

Untersuchungen zur Wärmedämmung und zum Schallschutz von Hochlochziegeln

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
doctor rerum naturalium (Dr. rer. nat.)

vorgelegt der

Naturwissenschaftlichen Fakultät III

(Agrar-, Geowissenschaften, Mathematik und Informatik)

der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

von Frau Barbara Hintz

geb. am 27.09.1985 in Erlangen

Gutachter:

1. Prof. Dr. Dr. Herbert Pöllmann
2. Prof. Dr. Wilhelm Schwieger

Nürnberg, 30. Oktober 2013

Tag der Verteidigung: 16.06.2014

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Formelzeichen und Indizes.....	V
Kurzzusammenfassung	VIII
1. Einleitung	1
1.1. Einführung	1
1.2. Aufgabenstellung	4
1.3. Grundlagen der Wärmeübertragung in Ziegeln	5
1.3.1. Wärmeleitung	5
1.3.2. Konvektion	6
1.3.3. Strahlung.....	7
1.3.4. Numerische Berechnungsverfahren	8
1.4. Grundlagen der Schallübertragung in Ziegeln	8
1.4.1. Körperschall	9
1.4.2. Luftschall.....	10
1.4.3. Dämpfung.....	10
1.4.4. Numerische Berechnungsverfahren	11
1.5. Lösungsansatz und Vorgehensweise.....	12
2. Experimentelle Methoden	13
2.1. Untersuchungsmethoden	13
2.1.1. Wärmeleitfähigkeit.....	13
2.1.1.1. Scherben-Wärmeleitfähigkeit (Plattenstrommessgerät TLP 200)	13
2.1.1.2. Äquivalente Wärmeleitfähigkeit (Plattenstrommessgerät TLP 900 ZS).....	14
2.1.2. Reflexionsmessung	14
2.1.3. Elektrische Leitfähigkeit	15
2.1.4. Elastische Kennwerte	16
2.1.4.1. Ultraschallverfahren	16
2.1.4.2. Impuls-Erregungs-Technologie	18
2.1.5. Mikroskopie	19
2.1.5.1. Auflichtmikroskopie	19
2.1.5.2. Laser-Scanning-Mikroskopie	19
2.1.5.3. Rasterelektronenmikroskopie	19
2.2. Charakterisierung verschiedener Beschichtungsmaterialien.....	19
2.2.1. Metallische Pigmente.....	21
2.2.1.1. Aluminiumpigmente	21
2.2.1.2. Kupfer- und Goldbronze-Pigmente	24
2.2.2. Graphite	26
2.2.2.1. Graphit auf Trägerpigment	31

2.2.2.2. Graphitauftrag während der Extrusion	32
2.2.3. Metallische Dünnschichten	34
2.2.4. Elektrisch leitfähige Oxidschichten	40
2.2.5. Zusammenhang Emissionskoeffizient und elektrische Leitfähigkeit	42
2.2.5.1. Spezifischer Oberflächenwiderstand ausgewählter Pigmente	42
2.2.5.2. Elektrische Leitfähigkeit bei metallischen Dünnschichten	44
2.2.5.3. Spezifischer Oberflächenwiderstand bei Graphiten	46
2.2.6. Pigmentgeometrie	48
2.2.7. Beschichtungen mit ausgewählten Pigmenten auf Ziegelsubstrat	55
3. Messungen an Hochlochziegeln	58
3.1. Scherben-Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{10, tr}$	59
3.2. Äquivalente Wärmeleitfähigkeit ausgewählter Lochbilder	59
3.2.1. Beschichtung der inneren Ziegeloberfläche	61
3.2.2. Äquivalente Wärmeleitfähigkeit beschichteter Ziegel	62
3.2.3. Äquivalente Wärmeleitfähigkeiten von mit „Stecklingen“ ausgerüsteten Ziegeln	63
3.3. Elastische Materialparameter	65
3.3.1. Abhängigkeit elastischer Materialparameter von der Extrusionsrichtung	66
3.3.2. Abhängigkeit elastischer Materialparameter von der Scherbenrohddichte	67
3.4. Kurzzusammenfassung: Messungen an Hochlochziegeln	69
4. Untersuchungen an Modellziegeln	70
4.1. Messtechnische Wärmebilanzen mit eingebauten Thermoelementen	70
4.1.1. Herstellung der Modellziegel	70
4.1.2. Ausrüstung mit Thermoelementen (Methode „Thermoelemente“)	71
4.1.3. Berechnung der Wärmebilanz aus den Messwerten	72
4.1.3.1. Wärmebilanz Modellziegel 1	74
4.1.3.2. Wärmebilanz Modellziegel 2	76
4.1.3.3. Wärmebilanz Modellziegel 3	78
4.1.3.4. Wärmebilanz Modellziegel 4	81
4.1.4. Vergleich Wärmebilanz mit und ohne Beschichtung	82
4.1.5. Vergleich Verfüllung und Beschichtung	85
4.2. FE-Berechnung der Wärmebilanzen	87
4.2.1. Randbedingungen und Vorgehensweise zur FE-Berechnung der Modellziegel	88
4.2.2. FE-Berechnung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit der Modellziegel	89
4.2.3. FE-Berechnung der Wärmebilanz der Modellziegel	90
4.2.4. Vergleich gemessene Wärmebilanzen und FE-Rechnungen	92

5. Wärmetechnische Berechnungen realer Ziegel	95
5.1. Eingabeparameter für die FE-Berechnung realer Ziegel.....	95
5.2. Vergleich Messung und Berechnung für reale Ziegel	96
5.3. Vergleich von FE-Berechnungen bei Verfüllung und Beschichtung	98
5.3.1. FE-Berechnungen für Ziegel A.....	98
5.3.2. FE-Berechnungen für Ziegel B.....	101
5.3.3. FE-Berechnungen für Ziegel C	103
5.3.4. FE-Berechnungen für Ziegel D	106
5.3.5. FE-Berechnungen für Ziegel E.....	109
5.3.6. FE-Berechnungen für Ziegel F.....	111
5.3.7. FE-Berechnungen für Ziegel G	114
5.4. Einfluss der Steganordnung auf den Wärmeübergang	117
5.4.1. Einfluss der Anzahl von Hohlräumen in Wärmestromrichtung.....	117
5.4.2. Einfluss der Anzahl von Hohlräumen senkrecht zur Wärmestromrichtung	119
5.5. Kurzzusammenfassung: Wärmetechnische FE-Berechnungen	128
6. Schallschutztechnische Berechnungen	129
6.1. Theoretische Vorgehensweise.....	129
6.1.1. FEM-BEM Modellierung des Schalldurchgangs.....	130
6.1.2. Homogenisierungsverfahren für periodische Strukturen	132
6.2. Vergleich Messung und Berechnung am Beispiel von Ziegel C.....	134
6.2.1. Wahl eines geeigneten repräsentativen Volumenelementes.....	135
6.3. Einfluss der Längs- und Querstege auf den Schallübergang	139
6.4. Kurzzusammenfassung der Schallschutz-technische Berechnungen	146
7. Diskussion und Zusammenfassung	148
8. Literaturverzeichnis	155
9. Anhang	160
9.1. Übersicht der untersuchten Beschichtungsstoffe.....	160
9.2. Untersuchung zur Infrarotdurchlässigkeit der Binder	170
9.3. Versuche zur Auswahl geeigneter Binder für die Fixierung des Pigments auf dem keramischen Scherben.....	171
9.4. Messwerte von Emissionskoeffizienten metallischer Pigmente.....	172
9.5. Emissionskoeffizient sechs verschiedener untersuchter Tone	174
9.6. Emissionskoeffizienten sonstiger Beschichtungsstoffe	175
9.7. Spezifische Flächenwiderstände der Dünnschichten und Pigmente	178
9.8. Messungen an Hochlochziegeln	182
9.9. Äquivalente Wärmeleitfähigkeit der Modellziegel	189
9.10. Messtechnische Ermittlung der Wärmebilanzen im Einplattenmessgerät.....	190
9.11. FE-Berechnung der Wärmebilanzen der Modellziegel.....	191

Bildverzeichnis.....	211
Tabellenverzeichnis	217
Danksagung.....	224
Erklärung	225
Lebenslauf	226

Formelzeichen und Indizes

Lateinische Buchstaben

Symbol	Einheit	Bedeutung
A	[m ²]	Fläche/Oberfläche
[C]	[-]	Dämpfungsmatrix
c	[m/s]	Schallgeschwindigkeit
d	[m]	Schichtdicke
E	[-]	Emission zwischen Flächen
E	[N/mm ²]	Elastizitätsmodul / E-Modul
F	[-]	Sichtfaktor zwischen Flächen
F	[Pa]	Anregungskraft
G	[N/mm ²]	Schermodul / G-Modul
f	[Hz]	Frequenz
I	[A]	Elektrische Stromstärke
[K]	[-]	Steifigkeitsmatrix
k	[1/m]	Wellenzahl / Wellenvektor
L	Pegel	[dB]
l	(Mess-)Länge	[mm]
[M]	[-]	Massenmatrix
P	[W]	Leistung
p	[Pa]	Schalldruck
Q	[W]	Wärmestrom
q	[W/m ²]	Wärmestrom pro Fläche
R	[dB]	Frequenz-abhängiges Schalldämmmaß
R	[Ω]	Flächenwiderstand
R _w	[dB]	Gewichtetes Schalldämmmaß / Einzahlwert
R	[Ω]	Elektrischer Widerstand
S	[m ²]	Effektive Fläche
s	[m]	Sondenabstand
T	[K]	Temperatur
t	[μs]	Schalllaufzeit
U	[-]	Verschiebung

Griechische Buchstaben

Symbol	Einheit	Bedeutung
α	[-]	Absorptionskoeffizient
α	[W/m ² K]	Wärmeübergangskoeffizient
δ	[-]	$\delta = 2\pi\xi$
ε	[-]	Emissionkoeffizient
λ	[μ m]	Wellenlänge der elektromag. Strahlung
λ	[m]	Schall-Wellenlänge
$\lambda_{\text{äquival.}}$	[W/mK]	Äquivalente Wärmeleitfähigkeit
$\lambda_{10,\text{tr.}}$	[W/mK]	Scherben-Wärmeleitfähigkeit
μ	[-]	Querdehnzahl / Poissonzahl
ν	[m/s]	Schallschnelle
ξ	[-]	Lehrsches Dämpfungsmaß
π	[-]	Kreiszahl Pi
ρ	[-]	Reflexionsgrad
ρ_s	[Ω m]	Spezifischer Oberflächenwiderstand
σ	[N/m ²]	Spannung
τ	[-]	Transmission
Ω	[Hz]	Kreisfrequenz
ω	[Hz]	Eigenkreisfrequenz
Δ	[-]	Differenz

Indizes

Symbol	Bedeutung
f	Fluid
dyn.	dynamisch
t	zeitabhängig
s	Festkörper

Abkürzungen

Folgende Abkürzungen wurden darüber hinaus verwendet:

Abkürzung	Bedeutung
BEM	Boundary Element Method (Randelement-Methode)
FEM	Finite Elemente Methode
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
G	Green'sche Funktion
IR	Infrarot
P	Punkt in Fernfeld
Q	Punkt auf Quelle
REM	Rasterelektronenmikroskop
RMS	Quadratisches Mittel
RTP	Raumtemperatursignal Probe
RTS	Raumtemperatursignal Strahler
pr	Probe
s	Sekunden
∇	Nabla-Operator / Vektor, dessen Komponenten die partiellen Ableitungsvektoren beinhaltet
∂	partielle Ableitung einer Funktion

Physikalische Konstanten

Vakuumlichtgeschwindigkeit	c_0	$3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$
Boltzmann Konstante	k	$1,3806503 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$
Planksches Wirkungsquantum	h	$6,62606876 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$
Erste Planksche Strahlungskonstante	c_1	$3,741775 \cdot 10^{-16} \text{ W m}^2$
Zweite Planksche Strahlungskonstante	c_2	$14387,7 \text{ } \mu\text{m K}$
Stefan-Boltzmann-Konstante	σ	$5,6704 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$
Referenzdruck	p_0	$2 \cdot 10^{-6} \text{ Pa}$

Kurzzusammenfassung

Der Gebäudesektor ist für über 40 % von Europas gesamtem Energieverbrauch verantwortlich. Durch eine Verbesserung der Wärmedämmung von Gebäuden (Neubauten und Altbauten) könnten in Zukunft enorme Energie- und Kosteneinsparungen erfolgen (Petersdorff, et al., 2006). Damit der Klimaschutz-Forderung nach CO₂-Minderung Rechnung getragen wird, muss der Einsatz fossiler Energieträger für die Gebäudebeheizung mittelfristig reduziert werden. Der Königsweg für das Erreichen der Klimaschutzziele besteht in einer energieeffizienten Gebäudeausrüstung mit bestmöglicher Wärmedämmung von Bestandsgebäuden und Neubauten.

Zahlreiche Massivwandbaustoffe und Dämmmaterialien stehen für den Bau energieeffizienter Gebäude zur Verfügung. Zu den innovativsten Wandbaustoffen gehört der Mauerziegel. Die üblichen Methoden zur Verbesserung der Wärmedämmung von Mauerziegeln umfassen die Optimierung der Lochbildgeometrie, Porosierung des keramischen Scherbens und in jüngster Zeit zusätzliches Verfüllen der Hohlräume mit Dämmstoffen. Zur gezielten Reduktion des Wärmestrahlungsübergangs in den Hohlräumen gibt es bislang nur wenige Untersuchungen. Auch der Anteil der einzelnen Wärmeübergangsarten Strahlung, Leitung und Konvektion in modernen Hochlochziegeln wurde bislang nur unzureichend betrachtet. Aus diesem Grund befasst sich diese Arbeit mit den Anteilen von Strahlung, Leitung und Konvektion am Wärmeübergang und der Reduktion des strahlungsbedingten Wärmeübergangs im Massivwandbaustoff Hochlochziegel. Auch die Auswirkungen verschiedener Lochbilder und Materialparameter zur Verbesserung des Schallschutzes werden mittels FE-Berechnung untersucht. Die hier erzielten Forschungsergebnisse werden derzeit im Rahmen weiterer Forschungsaktivitäten im Energie Campus Nürnberg auch auf andere Baustoffe und Dämmstoffe übertragen.

Die Absenkung des Strahlungsübergangs in Hochlochziegeln wird in dieser Arbeit durch entsprechende Ausrüstung der keramischen Ziegeloberfläche mit einem niedrigen Emissionskoeffizienten ε erreicht. Der Emissionskoeffizient ε liegt beim keramischen Werkstoff Ziegel bisher zwischen $\varepsilon = 0,90 - 0,98$ und damit sehr dicht am Maximalwert des „Schwarzen Strahlers“ von $\varepsilon = 1,0$ (theoretischer Wert).

Es konnte gezeigt werden, dass der Emissionskoeffizient untersuchter Ziegeloberflächen durch entsprechende Ausrüstung auf bis zu $\varepsilon = 0,35$ vermindert werden kann. Dadurch wird die äquivalente Wärmeleitfähigkeit von Hochlochziegeln je nach Lochbild um 10 % bis 30 % vermindert. Grund hierfür ist eine Absenkung des Wärmeübergangs durch Strahlung um bis zu 79 % in den Lochkammern unverfüllter Ziegel. Zudem ist es unter Verwendung der Finite-Elemente-Methode und der Rand-Element-Methode gelungen, sowohl das wärmetechnische, als auch das schallschutztechnische Verhalten von Hochlochziegeln unter

Berücksichtigung der Materialkennwerte zu berechnen.

Aufgrund dieser Berechnungen war es möglich, mehrere Varianten für wärmetechnisch optimierte Lochbilder aufzuzeigen. Bei diesen Lochbildvariationen war eine Anzahl von 10 Lochreihen ausreichend, um äquivalente Wärmeleitfähigkeiten von $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,098 \text{ W/mK}$ bis $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,074 \text{ W/mK}$ zu erreichen. Diese niedrigen Wärmeleitfähigkeiten sind in Verbindung mit einer hier entwickelten Beschichtung der inneren Hohlräume des Ziegels mit einem Emissionskoeffizienten bis zu $\varepsilon = 0,35$ möglich.

Alternativ zur Beschichtung wurde eine weitere Methode entwickelt, um nicht den keramischen Scherben selbst, sondern stattdessen ein Trägermaterial in Form von Stecklingen zu beschichten, welche anschließend in das Lochbild eingebracht werden können. Infolge der sehr glatten Oberflächen der Stecklinge sind hier Emissionskoeffizienten von bis zu $\varepsilon = 0,10$ möglich. Damit könnten die äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten von Hochlochziegeln bis auf $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,052 \text{ W/mK}$ abgesenkt werden.

Zudem wurden neben den wärmetechnischen auch die akustischen Auswirkungen von Längs- und Querstegen in Ziegeln untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass hier insbesondere auch der Elastizitätsmodul (E-Modul) von großer Bedeutung ist. Bei E-Moduln von $E = 10 \text{ GPa}$ ist die Anzahl der Längs- und Querstege von entscheidender Bedeutung für den Schallschutz. Bei gleichem Lochanteil kann durch eine Verdoppelung des E-Moduls von 5 GPa auf 10 GPa das bewertete Schalldämmmaß um bis zu 8 dB erhöht werden. Darüber hinaus zeigen Modelle mit Längsstegen ein um bis zu 8 dB höheres Schalldämmmaß, als Modelle mit Querstegen. Mit steigender Anzahl an Querstegen (Lochreihen) steigt das Schalldämmmaß ebenfalls. Bei einem E-Modul des keramischen Scherbens von 5 GPa kann nur eine geringe Auswirkung bei Variation der Anzahl von Längs- und Querstegen auf das Schalldämmmaß beobachtet werden. Die mögliche Erhöhung des bewerteten Schalldämmmaßes beträgt hier maximal 2 dB . Die aus dieser Untersuchung gewonnenen Erkenntnisse sollen in die zukünftige Entwicklung von Ziegellochbildern einfließen. Mit dem dargestellten Berechnungsverfahren können die akustischen Eigenschaften von Lochbildern künftig in einer frühen Entwicklungsphase ohne aufwändige Messungen abgeschätzt werden. Weiterhin können die hier untersuchten Modelle mit variabler Anzahl an Längs- und Querstegen eine erste Orientierung für neu zu entwickelnde Lochbilder in Abhängigkeit von geforderten technischen Eigenschaften liefern.

Die in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse eröffnen neue Möglichkeiten zur Herstellung moderner, höchstwärmedämmender und schallschutztechnisch optimierter Ziegel.

1. Einleitung

1.1. Einführung

Wärmedämmziegel, die den derzeitigen Stand der Technik repräsentieren, sind entweder mit möglichst vielen Lochreihen und dünnen Stegen ausgestattet oder im Lochmuster mit Wärmedämmmaterialien ausgefüllt. Diese Entwicklung führte in den letzten Jahren zu immer filigraneren Lochbildern und zu Verfüllungen mit möglichst hochwärmedämmenden Materialien. Beide Vorgehensweisen bringen produktionstechnische Probleme mit sich und erhöhen die Herstellungskosten der Ziegel erheblich. Die Minderung der Wärmeübertragung durch Leitung, eine werkstoffspezifische Eigenschaft (Wärmeleitfähigkeit λ), wurde insbesondere durch den massiven Einsatz organischer Porosierungsmittel erreicht. Dies führte allerdings zu einer Minderung der Ziegeldruckfestigkeiten und zu erhöhten CO₂-Emissionen beim Herstellungsverfahren. Zudem werden hierdurch die Schallschutzeigenschaften der Ziegel erheblich verschlechtert. Die Absenkung der Wärmeübertragung durch Konvektion in der Ziegelwand wurde durch eine „deckelnde“ Mörtelschicht (Dünnbett-, Mittelbettmörtel) und durch Perlit- bzw. Faserstoffverfüllung der Hohlräume erzielt. Die Wärmeübertragung durch Strahlung wurde durch eine zunehmende Anzahl von Stegreihen (Strahlungsschirmen) gemindert (Bild 1).



Bild 1: Moderne Hochlochziegel mit zusätzlicher Dämmstoff-Granulat-Füllung (links) oder filigraner Steganordnung mit hoher Anzahl an Lochreihen und Stegversatz (rechts)

Darüber hinaus erfolgte auch eine Wärmewegverlängerung in der Lochmustergeometrie der Ziegel mit extrem dünnen Stegstärken von bis zu 3,2 mm, wodurch die Ziegeldruckfestigkeit und der Schallschutz weiter abnahmen und eine zunehmende Stanzwirkung durch „Steg- auf Steg-Anordnung“ der übereinander vermörtelten bzw. verklebten Hochlochziegel entstand. Nach (Jiapeng, et al., 2009) sinkt der Anteil der Konvektion rasch mit steigender Anzahl an Querstegen und moderat mit steigender Anzahl an Längsstegen, bedingt durch die Reibungseffekte zwischen Luft und Ziegeloberfläche. Der Effekt der Wärmeleitung im Scherben ist in dieser Untersuchung aufgrund der hohen Scherbenwärmeleitfähigkeit dominierend. In der genannten Untersuchung darf auch der Einfluss der Wärmestrahlung

nicht vernachlässigt werden, da dieser je nach Lochbild mit 7,4 % bis 25,1 % zum gesamten Wärmeübergang beiträgt. Nach (Jiapeng, et al., 2009) kann der Anteil der Konvektion bereits nach 5 Querstegen und 3 Längsstegen (in Wärmestromrichtung) vernachlässigt werden. Bei den in (Li, et al., 2008) untersuchten Ziegeln lag der Anteil der Wärmestrahlung am gesamten Wärmeübergang zwischen 3,8 % und 23,7 %. Nach Berechnungen von Bouchair (Bouchair, 2007) kann durch eine Verminderung des Emissionskoeffizienten von $\varepsilon = 0,9$ auf $\varepsilon = 0,3$ die Wärmedämmung von 11,36 % bis zu 77,88 % je nach Lochbild verbessert werden.

Eine Absenkung der Wärmeübertragung durch Strahlung stellt daher im modernen wärmedämmenden Hochlochziegel eine bisher nicht ausgeschöpfte Möglichkeit zur Minderung des Wärmestroms von der Warm- zur Kaltseite des Mauerwerks dar. Dreh- und Angelpunkt der strahlungsbedingten Wärmeverluste ist der Emissionskoeffizient ε , der beim keramischen Werkstoff Ziegelstein bisher sehr dicht am Maximalwert des „Schwarzen Strahlers“ von $\varepsilon = 1,0$ (theoretischer Wert) liegt. Um den Wärmeübergang durch Strahlung abzusenken, muss der Emissionskoeffizient weitestgehend vermindert werden.

Besonders metallische Schichten verfügen über ein hohes Reflexionsvermögen und einen niedrigen Emissionskoeffizienten im Bereich der Wärmestrahlung (Eckertova, 1990) (Knittl, 1976) und werden deshalb oft für Isolierverglasungen verwendet (Wigginton, 1996) (Johnson, 1991). Diese Dünnschichten werden low-emissivity-coatings genannt (Wigginton, 1996) (Johnson, 1991). Der Wärmeverlust bei Verglasungen in Gebäuden konnte durch Dünnschichten aus Metallen signifikant reduziert werden (Carmody, et al., 2003) (Duffie, et al., 1991) (Balcomb, 1992) (Berning, 1983). Die Häufigsten für Dünnschichten auf Fensterscheiben verwendeten Materialien sind Silber und Gold, da diese über einen besonders niedrigen Emissionskoeffizienten und eine gute Transmission im sichtbaren Wellenlängenbereich verfügen. Aluminium dagegen findet aufgrund seiner ungenügenden Transmission im sichtbaren Bereich für Verglasungen keine Verwendung (Mohelnikova, 2009).

In der Arbeit von Mohelnikova (Mohelnikova, 2009) wurden Messungen zur Wirkung einer Dünnschicht mit niedrigem Emissionskoeffizienten in einer Box mit einem beschichteten Glasfenster durchgeführt. Hierbei konnte gezeigt werden, dass die Ausrüstung des Glasfensters mit einer niedrig emittierenden Beschichtung den Temperaturanstieg bei Bestrahlung des Fensters mit infraroter Strahlung im Inneren der Box reduziert. Ebenfalls geeignet sind Beschichtungen mit dotierten Oxidhalbleitern (Kerschberger, et al., 1997), welche bei Wärmeschutzverglasungen und Materialien mit antistatischer Ausrüstung (Gordon, 2000) Verwendung finden.

Weiterhin existieren zur Beschichtung von Ziegeln bereits zwei Patente, welche sich mit der Reduzierung des Wärmestrahlungsübergangs in Hochlochziegeln beschäftigen. In einem

Patent (Steinhoff, et al., 1998) wird ein Verfahren zur Herstellung einer wärmereflektierenden Beschichtung aus Graphit beschrieben. Die Graphitoberfläche bedarf nach dem Auftrag einer mechanischen Krafteinwirkung, welche die Graphitplättchen ausrichtet. In einem weiteren Patent (Ullermann, 2005) wird vorgeschlagen, Mauersteine mit einer elektrisch leitfähigen Schicht auszurüsten, welche Infrarotstrahlung reflektiert und Elektrosmog abschirmt. Als Beschichtungsmaterialien werden Graphit und Glimmer in pulverförmigem Zustand vorgeschlagen, welche mittels eines organischen Binders (z.B. Cellulose-Binder) auf die zu beschichtende Oberfläche aufgebracht werden. Beide Patente finden derzeit keine Anwendung, da mit den dort beschriebenen Verfahren keine ausreichende Absenkung des Emissionskoeffizienten erreicht wird.

Die wärmetechnische Weiterentwicklung und Lochbildoptimierung von modernen Hochlochziegeln erfordert zudem eine genaue Erfassung der komplexen Zusammenhänge zwischen Strahlung, Leitung und Konvektion. Nach Arendt (Arendt, et al., 2011) liegt der Lochanteil in Hochlochziegeln mit kleinen Lochabmessungen idealerweise zwischen 45 % - 65 %, da hier ein Optimum aus Speicherfähigkeit und Wärmedämmeigenschaft erreicht wird. Eine systematische Untersuchung des Einflusses der Lochbildgeometrie auf sowohl die wärmetechnischen, als auch die schallschutztechnischen Eigenschaften erfolgte bislang nicht. Durch die zunehmende Erhöhung des Lochanteils im Ziegel und durch Einsatz von Porosierungsstoffen sinkt aber auch die schalldämmende Wirkung der Hochlochziegel. Dennoch bestehen Anforderungen an den Schallschutz bei gleichzeitig hoher Wärmedämmung. Eine Verbesserung der Wärmedämmung bei guten Schallschutzeigenschaften wäre in Zukunft wünschenswert. Hierzu werden systematische Untersuchungen insbesondere der Auswirkung der Steganordnung im Ziegel und der elastischen Materialkennwerte auf die Schallschutzeigenschaften benötigt. Systematische Wandmessungen bezüglich des Einflusses der Steganordnung und der Materialeigenschaften werden aufgrund der erforderlichen hohen Kosten und des damit verbundenen hohen Zeitaufwandes nicht durchgeführt. Insbesondere zu schallschutztechnischen Eigenschaften von Ziegeln existieren nur wenige Berechnungsansätze, die sich meist auf bestimmte Frequenzbereiche beschränken (Cos Diaz, et al., 2010). Papadopoulos konnte eine FE-Berechnungs-Methodik für den Frequenzbereich zwischen 100 Hz bis 704 Hz entwickeln (Papadopoulos, 2002). Unter Verwendung hybrider FE-Methoden konnte Jean (Jean, et al., 2006) den Schalldurchgang in Mauerwerk zwischen 100 Hz bis 2000 Hz berechnen. In dieser Arbeit wird deshalb der Einsatz der Finite-Elemente-Methode zur Berechnung der wärmetechnischen und akustischen Eigenschaften von Ziegeln in Abhängigkeit von der Lochbildgeometrie und der Materialeigenschaften verfolgt.

1.2. Aufgabenstellung

Für die Ausrüstung der keramischen Oberfläche mit einem niedrigen Emissionskoeffizienten wurden verschiedene Vorgehensweisen gewählt. Zunächst sollte untersucht werden, ob der Emissionskoeffizient durch Variation der mineralogischen Zusammensetzung der Tone, der Brenntemperatur oder der Brennumgebung beeinflusst werden kann. Anschließend sollten Beschichtungsversuche der keramischen Oberfläche mit unterschiedlichen Materialien und eine Bestimmung des resultierenden Emissionskoeffizienten erfolgen.

Aus den untersuchten Beschichtungen musste eine Beschichtung ausgewählt werden, welche den Emissionskoeffizienten der Ziegeloberfläche weitestgehend absenkt. Anschließend sollten mit ausgewählten Hochlochziegeln Messungen der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit in unbeschichtetem und beschichtetem Zustand erfolgen. Ein Vergleich der Messwerte zeigt anschließend die Wirkung der Beschichtung auf den Wärmeübergang.

Im Anschluss sollte die Aufstellung von Wärmebilanzen realer Ziegel erfolgen, bestehend aus dem Strahlungs-, dem Leitungs- und dem Konvektionsanteil am Wärmeübergang. Als Voruntersuchung war die messtechnische Ermittlung der Wärmebilanzen für vier Modellziegel durchzuführen und mit einer Berechnung der Wärmebilanzen mittels Finite-Elemente-Methode zu vergleichen.

Darüber hinaus sollten systematische Untersuchungen des Einflusses der Lochreihenanzahl und Stegdicken auf den Wärme- und Schallübergang in Hochlochziegeln erfolgen. Auch der Einfluss der Materialeigenschaften sollte hierbei Berücksichtigung finden. Hierzu mussten Modelle berechnet werden, bei denen die Lochreihenanzahl und Stegdicken systematisch verändert wurden, während der Lochanteil konstant blieb.

Die hier vorliegende Arbeit soll neue Erkenntnisse für die künftige wärme- und schallschutztechnische Auslegung und Optimierung von Ziegellochbildern liefern. Von besonderem Interesse war der Einsatz der Finite-Elemente-Methode für die wärmetechnischen und schallschutztechnischen Berechnungen der Ziegel. Die Finite-Elemente-Berechnungen sollen, soweit messtechnische Referenzen zur Verfügung stehen, mit experimentellen Daten verglichen werden.

1.3. Grundlagen der Wärmeübertragung in Ziegeln

In Ziegeln erfolgt der Wärmeübergang als eine Kombination aus Leitung, Strahlung und Konvektion (Coz Diaz, et al., 2007), (Custodio-Garcia, et al., 2005) & (Incropera, et al., 2001). Unterschiedliche Lochbilder und Abmessungen der Hochlochziegel beeinflussen die Anteile von Leitung, Konvektion und Wärmestrahlung zwischen den Oberflächen (Jiapeng, et al., 2010). Obwohl Wärmeübertragungsvorgänge in der Realität instationär sind, erfolgt hier als Näherung die Annahme stationärer Wärmeübertragung.

Von besonderer Bedeutung sind hier die Faktoren Geometrie, Ausdehnung des Objekts, Stoffeigenschaften, auftretende Strömungen und zeitliche Dauer eines Wärmeübertragungsvorgangs (Langeheinecke, et al., 2011). Die Wärmedämmeigenschaft eines Hochlochziegels wird durch die äquivalente Wärmeleitfähigkeit, bestimmt unter Gleichgewichtsbedingungen, charakterisiert. Diese kann näherungsweise als Summe der einzelnen Wärmeübergangsmechanismen (Gleichung 1), beschrieben werden (Kaganer, 1969).

$$\lambda_{\text{äqu}} = \lambda_{\text{rad}} + \lambda_{\text{con}} + \lambda_{\text{solid}} \quad (1)$$

Dabei treten Wärmeleitung, Konvektion und Wärmestrahlung simultan auf (Li, et al., 2008). Die Messung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit erfolgt in einem Wärmestromplattenmessgerät (Vivancos, et al., 2009).

1.3.1. Wärmeleitung

Wärmeleitung findet in festen, flüssigen und gasförmigen Medien statt (Kreith, et al., 2000). Bei einem optisch dichten isotropen Material lässt sich der Wärmefluss proportional zur Temperaturdifferenz formulieren. Dieser Sachverhalt ist als Fourier'sches Gesetz zur Beschreibung der Wärmeleitung bekannt (Gleichung 2).

$$\vec{q} = -\lambda \text{ grad } T \quad (2)$$

\dot{q}	=	Wärmestromdichte	[W/m ²]
T	=	Temperatur	[K]
λ	=	Wärmeleitfähigkeit	[W/mK]

Die Wärmestromdichte \dot{q} ist dem Gradienten der Temperatur proportional entgegen gerichtet. Der Proportionalitätskoeffizient wird als Wärmeleitfähigkeit des jeweiligen Stoffes bezeichnet.

Diese Gleichung kann mit Hilfe des Nabla-Operators ∇ einheitlich für alle Koordinaten-

systeme als Differenzialgleichung dargestellt werden (Gleichung 3).

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha \nabla^2 T \quad (3)$$

Im Fall der stationären Wärmeleitung mit eindimensionalem Temperaturfeld kann die partielle Ableitung der Temperatur nach der Zeit (zeitliche Änderung der Temperatur bei instationärem Wärmeübergang) $\partial T / \partial \tau = 0$ gesetzt werden (Gleichung 4).

$$0 = \alpha \nabla^2 T \quad (4)$$

Für den Fall eines Wärmestroms in nur eine Richtung (von warm nach kalt) wird eine Differenzialgleichung 2. Ordnung erhalten.

$$0 = \frac{d^2 T}{dx^2} \quad (5)$$

Werden anschließend die Temperaturen der Warmseite = T_i und der Kaltseite = T_a eingesetzt, so kann die Gleichung gelöst werden. Mit Kenntnis der Temperaturen auf der Warm- und Kaltseite kann demnach die Wärmestromdichte q und nach Multiplikation mit der durchströmten Fläche der Wärmestrom \dot{Q} durch ein Volumen berechnet werden. Daraus ergibt sich die bekannte Gleichung (6) für den Wärmestrom durch ein Kontrollvolumen des Festkörpers:

$$\dot{Q} = \lambda \frac{A}{s} (T_i - T_a) \quad (6)$$

Da sich der Wärmeübergang durch Leitung in Hochlochziegeln aus Festkörperleitung und Fluidleitung zusammensetzt, müssen diese Anteile getrennt berechnet werden.

1.3.2. Konvektion

Wärmeübergang durch Leitung tritt nicht nur in Festkörpern, sondern auch in ruhenden Fluiden auf. Befindet sich das Fluid außerdem in makroskopischer Bewegung, wird zusätzlich Energie in Form von Enthalpie mitgeführt. Wenn äußere Kräfte die Bewegung des Fluids (in diesem Fall Luft) bewirken, wird die resultierende Strömung als erzwungene Konvektion bezeichnet. Freie Konvektion wird durch Dichtegefälle im Fluid hervorgerufen. Der Wärmeübergang von einem strömenden Fluid auf einen Festkörper ist für die vorliegende Arbeit von besonderem Interesse. Bei Annahme inkompressibler Strömungen mit konstanten Stoffwerten folgt die Differenzialgleichung für den Wärmetransport aus dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik und der Fourier-Gleichung für den Wärmetransport. Für die Beschreibung einer dreidimensionalen Strömung muss die Gleichung um die Strömung in y - und z -Richtung mit den Geschwindigkeiten w_y und w_z erweitert werden (Gleichung 7).

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial T}{\partial x} + w_y \frac{\partial T}{\partial y} + w_z \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (7)$$

Bei Betrachtung dieser Energietransportgleichung steht auf der linken Seite die Beschreibung der Konvektion und auf der rechten Seite die Beschreibung der Wärmeleitung. Bei einem Wärmeübergang von einem Fluid auf einen Festkörper ist eine Superposition der beiden Mechanismen Wärmeleitung und Konvektion zu berücksichtigen (Aung, 1972).

1.3.3. Strahlung

Wärmestrahlung wird von fester, flüssiger oder gasförmiger Materie durch Umwandlung innerer Energie (durch Elektronenübergänge oder Gitterschwingungen) emittiert. Die Umwandlung von innerer Energie in Strahlungsenergie wird als Wärmeübergang durch Strahlung bezeichnet (Mills, 1998). Die Strahlung wird in Form elektromagnetischer Wellen mit Lichtgeschwindigkeit transportiert. Der Strahlungsübergang erfordert kein Trägermedium für den Energietransport und erfolgt damit auch im Vakuum. Beim Auftreffen der emittierten Wärmestrahlung auf feste, flüssige oder gasförmige Materie kann die Strahlung absorbiert, reflektiert oder durchgelassen werden. Die absorbierte Strahlung erhöht die innere Energie der Materie.

Nach dem Prinzip der Energieerhaltung für elektromagnetische Wellen jeglicher Frequenz gilt für den Absorptionsgrad α , Reflexionsgrad ρ und den Transmissionsgrad τ die nachfolgende Gleichung (8) (Mohelnikova, 2009).

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (8)$$

Für jeden beliebigen Körper ist der Emissionskoeffizient ε bei gegebener Temperatur und Wellenlänge gleich dem Absorptionsgrad α (Gleichung 9) (Wolfe, et al., 1987).

$$\alpha = \varepsilon \quad (9)$$

Dies bedeutet, dass ein Körper, welcher Wärmestrahlung absorbiert, diese im selben Maße wieder emittieren kann. Bei opaken Materialien wie Ziegeln ist der transmittierte Anteil aus Gleichung (8) vernachlässigbar und nur noch die reflektierte und absorbierte Strahlung von Bedeutung. Mit dieser Vereinfachung resultiert aus einem hohen Reflexionsgrad für infrarote Strahlung gleichzeitig eine niedrige Absorption derselben.

$$\begin{aligned} \alpha + \rho = 1 & \quad \rightarrow \quad \rho = 1 - \alpha & \quad \rho \uparrow \leftrightarrow \alpha \downarrow \\ \alpha = \varepsilon & \quad \rightarrow & \quad \alpha \downarrow \leftrightarrow \varepsilon \downarrow \end{aligned}$$

Eine niedrige Absorption α bedeutet nach dem Kirchhoff'schen Gesetz (Gleichung 9) auch einen niedrigen Emissionskoeffizienten ε im jeweiligen Wellenlängenbereich. Durch einen hohen Reflexionsgrad im Infrarotbereich kann folglich eine niedrige Absorption in diesem Bereich und damit ein geringer Emissionskoeffizient erreicht werden.

Der Wärmeübergang durch Strahlung wird nach Gleichung (10) berechnet (Incopera, et al., 2006):

$$\dot{q}_{ij} = \varepsilon_i \sigma A_i F_{ij} (T_i^4 - T_j^4) \quad (10)$$

Die Berechnung der Sichtfaktoren, abhängig von der Ausrichtung der strahlenden Flächen, erfolgt nach Gleichung (11):

$$F_{ij} = \sum_{n=1}^N \Delta F_n = \frac{\Delta A_j}{\pi r^2} \cos \phi_i \cos \phi_j \quad (11)$$

1.3.4. Numerische Berechnungsverfahren

Im Falle einer komplexen Geometrie, wie zum Beispiel einem Ziegellochbild mit zusätzlich Strahlung und Konvektion in den Hohlräumen, kann die Fourier'sche Differenzialgleichung nicht mehr analytisch durch Einsetzen der Randbedingungen gelöst werden, da diese ebenfalls unbekannt sind. In dieser Arbeit wurde daher für die Berechnung des Wärmeübergangs die Finite-Elemente-Methode (FEM) gewählt. Die Berechnung des Temperaturfeldes erfolgt durch iterative Lösung der Fourier'schen Differenzialgleichung für die zu berechnenden Geometrien (Langeheinecke, et al., 2011). Hierbei wird das komplette Volumen des Ziegels durch ein Rechennetz in einzelne Kontrollvolumina zerlegt. In den Knotenpunkten des Rechennetzes werden die Temperaturen berechnet.

Für die Finite-Elemente-Berechnung (FE-Berechnung) der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit von Hochlochziegeln und von Ziegelmodellen wurden die Finite-Elemente-Programme (FE-Programme) SOLIDO und ANSYS CFX verwendet. Die Berechnungsergebnisse wurden mit realen Messwerten verglichen. Ziel ist eine möglichst genaue Übereinstimmung der Ergebnisse von Messung und Simulation zu erreichen.

1.4. Grundlagen der Schallübertragung in Ziegeln

Nach Jaqus (Jacqus, et al., 2011) werden die akustischen Eigenschaften von Ziegeln durch das Lochbild stark beeinflusst. Das Anregungsverhalten einzelner Ziegel zu Schwingungen in Abhängigkeit des Lochbildes wurde bereits untersucht (Weber, et al., 1998). Frühere Untersuchungen von Maysenhölder (Maysenhölder, et al., 2003) zeigen, dass eine direkte Berechnung des akustischen Verhaltens von Ziegeln sehr zeitintensiv ist. Nach (Jean, et al., 2006) beschränkt sich die Berechnung des Schalldurchgangs bei Hochlochziegeln mittels Finite-Elemente-Methoden bisher auf den Bereich der tiefen Frequenzen. Für die Beschreibung einer ganzen Wand aus Ziegeln muss ein Homogenisierungsverfahren Anwendung finden (Jacqus, et al., 2011). Die elastischen Materialparameter des Ziegelmaterials werden durch statische Messungen (Huon, et al., 2007) oder mittels Ultraschall-Laufzeitmessung (Bouchair, 2007) ermittelt. Es ergibt sich eine Abhängigkeit der Eigenschaften von der Extrusionsrichtung im Scherbenmaterial.

Da in dieser Arbeit auch eine schallschutztechnische Untersuchung von Ziegellochbildern erfolgt, werden die Grundlagen der Schallübertragung im Folgenden ebenfalls kurz erläutert.

Zur Berechnung des Schallübergangs in Wänden muss eine Analyse der Luftschall- und der Körperschallübertragung erfolgen.

1.4.1. Körperschall

Als Körperschall werden Schwingungen und Wellen in Festkörpern bezeichnet, wie sie in Platten, Stäben, Wänden und anderen Bauteilen auftreten. Der hörbare Luftschall wird durch die Körperschallabstrahlung durch Schwingung von Bauteiloberflächen hervorgerufen. Der entstehende Luftschall wird demzufolge eigentlich durch den Körperschall erzeugt. Da ein Gas auf eine Volumenänderung seiner Masse nur mit einer Druckänderung reagiert, beeinflusst eine Änderung der geometrischen Form der Gasmasse dessen Druck nicht. In Grenzflächen zwischen Gasvolumina können nur Kräfte senkrecht zu deren Oberfläche übertragen werden. Bei Körperschall schwingt das Bauteil durch ein fortwährendes Umwandeln von potentieller Energie, die in einer Form- und Volumenänderung gespeichert ist. Dabei entstehen Biege-, Torsions- und Dehnwellen. Da nur bei Biege-Wellen die Plattenauslenkung senkrecht zu deren Oberfläche steht, wird im Wesentlichen diese Wellenart zur Luftschallabstrahlung beitragen. Wegen der begrenzten Abmessungen der übertragenden Strukturen bilden sich in der Regel Schwingungsmoden aus, d.h. stehende Wellen mit ausgeprägten Resonanzen und Antiresonanzen. Die Schwingungsformen in den Resonanzen werden als Moden bezeichnet und mittels einer Modalanalyse bestimmt (Möser, 2012).

Ein durch die zeitlich veränderliche Kraft $F(t)$ zu Schwingungen angeregter Körper kann als Feder-Masse-Schwinger mit der Masse m , der Dämpfungskonstante c und der Federsteifigkeit k beschrieben werden. Es ergibt sich die Darstellung der Schwingung in Matrixschreibweise als Differenzialgleichung im Zeitbereich:

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = \{F(t)\} \quad (12)$$

Die Verschiebung U ergibt mit der ersten Ableitung die Geschwindigkeit \dot{U} und mit der zweiten Ableitung die Beschleunigung \ddot{U} .

Mittels komplexer Rechnung kann diese Differenzialgleichung vom Zeitbereich in den Frequenzbereich und in eine algebraische Gleichung in Matrixschreibweise überführt werden (Gleichung 13).

$$(-\Omega^2 [M] + i\Omega [C] + [K])\{\hat{U}\} = \{\hat{F}\} \quad (13)$$

Aus der Verschiebung des Festkörpers in Normalenrichtung U_n kann die gemittelte Geschwindigkeit v_{RMS} auf der Festkörperoberfläche A als Ableitung berechnet werden.

$$v_{\text{RMS}} = \sqrt{\langle \tilde{v}^2 \rangle} = \sqrt{\frac{1}{A} \int_A |\tilde{v}^2| dA} \quad (14)$$

Je nach Effektivität $\sigma(f)$ des Übergangs von Festkörper auf Luft, welche abhängig von der Wellenlänge im Festkörper ist, wird hierdurch die Schallschnelle im Fluid und damit letztendlich der Schalldruckpegel in [dB] bestimmt.

1.4.2. Luftschall

Ein schwingender Festkörper versetzt die umgebende Luft in Schwingungen. Diese Schwingungen werden infolge der Kompressibilität und Masse der Luft übertragen. Durch das Komprimieren der Luft entstehen kleine Druckschwankungen p im Vergleich zum Umgebungsluftdruck p_0 . Der dem atmosphärischen Ruhedruck p_0 überlagerte Druck p wird als Schalldruck bezeichnet. Vom schwingenden Körper wird demzufolge ein räumlich verteiltes Schallfeld abgestrahlt. Das physikalische Maß für die Schallstärke des Feldes ist dabei der Schalldruckpegel in Dezibel [dB]. Weiterhin kennzeichnend ist die Frequenz f , die die Anzahl der Wiederholungen einer Schwingung (Periodendauer) pro Sekunde in Herz [Hz] angibt.

Der Lautstärkepegel L_p wird mit Gleichung (15) aus dem gemittelten Lautstärkepegel \tilde{P} und dem atmosphärischen Referenzpegel $P_0 = 10^{-12}$ W bzw. aus den jeweiligen Drücken berechnet (Kollmann, et al., 2006).

$$L_p = 10 \log \frac{\tilde{P}}{P_0} [\text{dB}] = 10 \log \frac{\tilde{p}^2}{p_0^2} [\text{dB}] \quad (15)$$

Das frequenzabhängige Schalldämmmaß von Wandaufbauten ergibt sich bei der Messung aus der Differenz von Signalstärke vor und nach Durchtritt durch das Messobjekt (Gleichung 16).

$$\Delta L_p = 10 \log \frac{\tilde{P}_2}{\tilde{P}_1} [\text{dB}] = 10 \log \frac{\tilde{p}_2^2}{\tilde{p}_1^2} [\text{dB}] \quad (16)$$

Darüber hinaus hängt das Schalldämmmaß stark von den Materialparametern Elastizitätsmodul, Dichte und Dicke sowie den Dämpfungseigenschaften des Bauteils ab. Bei der Berechnung des Schalldämmmaßes von Hochlochziegeln sollte das Materialverhalten des Baustoffes berücksichtigt werden (Maysenhölder, 1996).

1.4.3. Dämpfung

Ursache der Dämpfung ist die Dissipation von Energie aufgrund innerer Reibung, also mikroskopischer Verformungen, Korngrenzenreibung oder Relaxationsvorgängen an Fehlstellen etc. (Beerens, 1994). Sie ist bei Metallen im akustischen Frequenzbereich klein. Bei Kunststoffen und Gummi erreicht sie größere Werte (Möser, 2012). Verlustfaktoren für Baustoffe bewegen sich in einer Größenordnung von etwa 0,01, wobei dies nur als Richtwert dienen kann, da die mechanischen Eigenschaften von Stoffen wie Beton und Ziegelstein

stark von der jeweiligen Zusammensetzung und Herstellungsart abhängen (Ackermann, 2001).

1.4.4. Numerische Berechnungsverfahren

Bei der Untersuchung von Schalltransmissionsvorgängen durch Wände handelt es sich um ein über die Oberflächen gekoppeltes Mehrfeldproblem. Es muss gewährleistet sein, dass auslaufende Wellen abklingen und keine Wellen vom Diskretisierungsrand reflektiert werden (Sommerfeld, 1978).

Diese Schwierigkeiten können mit einer Unterteilung in ein Nah- und ein Fernfeld umgangen werden. Das begrenzte Nahfeld wird mit Finiten-Elementen diskretisiert, während das Fernfeld mit Hilfe von absorbierenden Randbedingungen (Givoldi, 1992) oder mittels Finiter Elemente mit geeignet auslaufenden wellenförmigen Ansatzfunktionen abgeschnitten wird (Astley, 2000). Besonders gut geeignet für die Berechnung von Außenrandproblemen ist die Rand-Element-Methode (Antes, 1988), (Gaul, et al., 1997). Bei diesem Verfahren werden nur die Ränder des Rechengebietes diskretisiert, wodurch der Rechenaufwand stark reduziert wird.

Bei der Interaktion eines Fluids mit einer Struktur wird zuerst das Schwingungsproblem der Struktur gelöst (Modalanalyse) und die Verschiebungen der Struktur werden als Randbedingungen für das Fluid verwendet (Wu, et al., 1994). Insbesondere bei Schalltransmissionsproblemen zwischen zwei benachbarten Räumen muss die gegenseitige Wechselwirkung von Fluid- und Struktur berücksichtigt werden (Langer, 2001). Damit sämtliche Rückwirkungseffekte erfasst werden, ist eine vollständige Kopplung nötig (Fahy, 1985). Die Art der Kopplung ist stark von der Problemstellung abhängig. Ein Kriterium zur Unterscheidung wird von (Atalla, et al., 1994) vorgeschlagen. Generell besteht die Möglichkeit einer Kombination von BEM und FEM zur Diskretisierung des Rechengebietes, wie auch in dieser Arbeit verwendet. Aufgrund der Vor- und Nachteile beider Verfahren ist für Schallabstrahlungsprobleme sowie unendliche/halbunendliche Gebiete eine Kombination von FEM für die Struktur und BEM für das Fluid geeignet (Langer, 2001), (Rajakumar, et al., 1996), (Seybert, et al., 1993).

Die Vektorschreibweise der Fluidverschiebung hat den Vorteil der leichteren Implementierung in ein FEM-Programm für Strukturen, da die Kopplung knotenweise erfolgen kann. Aufgrund der gestiegenen Anzahl an Fluidunbekannten (drei Unbekannte pro Knoten bei 3D-Modell) muss eine rotationsfreie Bewegung durch zusätzliche Bedingungen sichergestellt werden (Hamdan, et al., 1995). Die Durchführung der Kopplung erfordert die Formulierung expliziter Kopplungsbedingungen. Darüber hinaus führt die skalare Schreibweise zu einem unsymmetrischen Gleichungssystem. In (Ackermann, 2001) kommt eine symmetrische Formulierung zum Einsatz, welche auf dem Schalldruck des Fluids und den Verschiebungen

der Struktur basiert und welche auch in (Owen, et al., 1983) vorgeschlagen wird.

1.5. Lösungsansatz und Vorgehensweise

Zunächst sollte geprüft werden, ob eine direkte Beeinflussung (Verminderung) des Emissionskoeffizienten der keramischen Ziegeloberfläche durch geeignete Garbrandtemperaturen und geeignete Brennraumatmosphäre erreicht werden kann.

Im weiteren Verlauf der Arbeiten wurde eine Absenkung des Emissionskoeffizienten durch Beschichtung der Scherbenoberfläche untersucht. Bei der Wahl der Beschichtungsmaterialien und der Beschichtungsverfahren wurden verschiedene Ansätze verfolgt, wie Sputtern, Pyrolyse und Sprühen flüssiger Beschichtungslösungen. Als Beschichtungsmaterialien fanden Edelmetalle, Metallfolien, Halbleiter und verschiedene metallische, organische und anorganische Pigmente Verwendung. Die flüssigen Beschichtungen wurden je nach Beschichtungsmaterial durch einen Glasurbrand oder durch Aushärten des enthaltenen Binders in einen Festkörper überführt. Als Beschichtungssubstrate dienten, je nach Fragestellung und Messanforderungen, Substrate aus Ziegelkeramik, Float-Glas (Natriumsilikatglas) und Polykarbonat.

Weiterhin sollte messtechnisch und mittels Finite-Elemente-Berechnung die Absenkung des Wärmeübergangs durch den Ziegel nach Beschichtung mit dem gewählten Material nachgewiesen werden. Hierfür werden ausgewählte Ziegel in beschichtetem und unbeschichtetem Zustand im Einplattenmessgerät gemessen und mit den Werten aus der FE-Berechnung verglichen. Insbesondere die Absenkung des Emissionskoeffizienten durch eine Beschichtung wird hierbei berücksichtigt. Zuletzt wurden die einzelnen Anteile von Strahlung, Leitung und Konvektion am gesamten Wärmeübergang von ausgewählten Ziegeln berechnet. Durch die Aufstellung einer Wärmebilanz kann der Wärmeübergang durch Strahlung separat berechnet und das erreichbare Verbesserungspotential für die wärmetechnischen Ziegeleigenschaften aufgezeigt werden.

Zuletzt werden schallschutztechnische Berechnungen der Ziegel durchgeführt. Hierbei wurde zunächst geklärt, ob die Berechnung des Schalldurchgangs an einem einzelnen Ziegel oder an einer ganzen Wand in Anlehnung an eine Prüfstandsmessung erfolgen muss. Hierzu wurden die jeweiligen, mittels FE-Berechnung erhaltenen Ergebnisse mit einer Messung im Schallprüfstand verglichen. Anschließend wird der Einfluss der elastischen Materialparameter und der Steganordnung im Ziegel auf das Schalldämmmaß untersucht. Betrachtet werden hierbei sowohl das frequenzabhängige Verhalten, als auch das bewertete Schalldämmmaß R_w .

2. Experimentelle Methoden

2.1. Untersuchungsmethoden

2.1.1. Wärmeleitfähigkeit

Methoden zur Bestimmung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit von Hochlochziegeln können in stationäre und transiente Verfahren unterteilt werden (Ngohe-Ekam, et al., 2006). In dieser Arbeit fanden nur stationäre Messverfahren Anwendung. Als stationäre Messapparaturen wurden das Plattenmessgerät TLP 200 und das Halbsteinmessgerät TLP 900 ZS verwendet.

2.1.1.1. Scherben-Wärmeleitfähigkeit (Plattenstrommessgerät TLP 200)

Zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Proben mit 100 mm Länge und 100 mm Breite wurde das Wärmestromplattenmessgerät TLP 200 der Firma Taurus, Weimar verwendet. Bei diesem stationären Messverfahren wird der Probe ein Temperaturgradient vorgegeben. Dazu werden die zentrale Heizplatte (Warmseite) und die Referenzplatte (Kaltseite) sowie der Schutzheizring mittels elektrischer Widerstandsheizungen und Peltierelementen auf vorgegebene Temperaturen eingestellt. Eine Messung ist dann abgeschlossen, wenn die eingestellten Kriterien für den stationären Zustand erreicht wurden. Die Messung erfolgt nach DIN EN ISO 12667 (bezogen auf die Wärmeleitfähigkeit einer rückgetrockneten Probe bei 10 °C Probenmitteltemperatur). Um einen Einfluss der Kondensfeuchte an der Referenzplatte auszuschließen, werden Messungen bei den Probenmitteltemperaturen 15 °C, 25 °C und 35 °C durchgeführt. Die Wärmeleitfähigkeit bei 10 °C Probenmitteltemperatur wird anschließend mittels linearer Regression durch diese drei Messpunkte ermittelt.

Zur messtechnischen Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit einer Probe wird der Wärmestrom durch die Probe aus der Heizspannung und der Stromstärke ermittelt (Gleichung 17). Mit Kenntnis der Oberflächentemperaturen an Warm- und Kaltseite lässt sich damit die Wärmeleitfähigkeit einer Probe bei konstantem Wärmestrom berechnen (Gleichung 18).

$$Q = U \cdot I$$

λ	= Wärmeleitfähigkeit	[W/m*K]	
Q	= Wärmestrom	[W]	(17)
U	= Spannung	[V]	
I	= Stromstärke	[A]	

$$\lambda = \frac{U \cdot I \cdot s}{A \cdot \Delta \vartheta}$$

s	= Probendicke	[mm]	(18)
A	= Fläche der Probe	[mm ²]	
$\Delta \vartheta$	= Temperaturdifferenz	[K]	

2.1.1.2. Äquivalente Wärmeleitfähigkeit (Plattenstrommessgerät TLP 900 ZS)

Die Bestimmung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit kann sowohl nach dem in ISO 8302 beschriebenen Verfahren in symmetrischer Anordnung von zwei Probekörpern, als auch in unsymmetrischer Anordnung nach ISO 8302 b mit nur einem Probekörper erfolgen.



Bild 2: Aufbau der Messapparatur TLP 900 ZS zur Bestimmung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit eines Hochlochziegels

Der experimentell ermittelte Wert für die äquivalente Wärmeleitfähigkeit wird entscheidend von der Qualität der Probenpräparation und dem Einbau in das Messgerät beeinflusst.

2.1.2. Reflexionsmessung

Zur Strahlungsmessung wurde ein Strahlungs-pyrometer (KT19.XX II) mit einem Wellenlängenbereich von 8 µm bis 14 µm der Firma Heitronics, D-Wiesbaden verwendet. Für das Anvisieren des Messpunktes diente ein im Pyrometer eingebauter Laserstrahl. Der Reflexionspunkt war 200 mm von der Strahlungsquelle entfernt. Für die Berechnung des Emissionskoeffizienten ε nach Gleichung (19) als Quotient aus Einfalls- und Reflexionssignal wurde zunächst das Strahlsignal des Schwarzen Strahlers benötigt (Bild 3).

$$\varepsilon = \frac{S_{Pr} - S_{RTP}}{S_{100^\circ C} - S_{RTS}} \quad (19)$$

Dieses berechnet sich aus dem Strahlsignal des Strahlers bei einer Temperatur von 100 °C ($S_{100^\circ C}$) abzüglich des Strahlsignals des schwarzen Strahlers bei Raumtemperatur (S_{RTS}). Das Reflexionssignal der Probe berechnet sich analog aus dem Reflexionssignal der Probe (S_{Pr}) bei einer Strahlertemperatur von 100 °C abzüglich des Strahlsignals der unbestrahlten Probe (S_{RTP}) bei Raumtemperatur. Da alle Körper bei einer Temperatur über 0 Kelvin

Wärmestrahlung emittieren, müssen die Raumtemperatursignale von Probe und Strahler von den Einstrahl- und Reflexionswerten abgezogen werden.

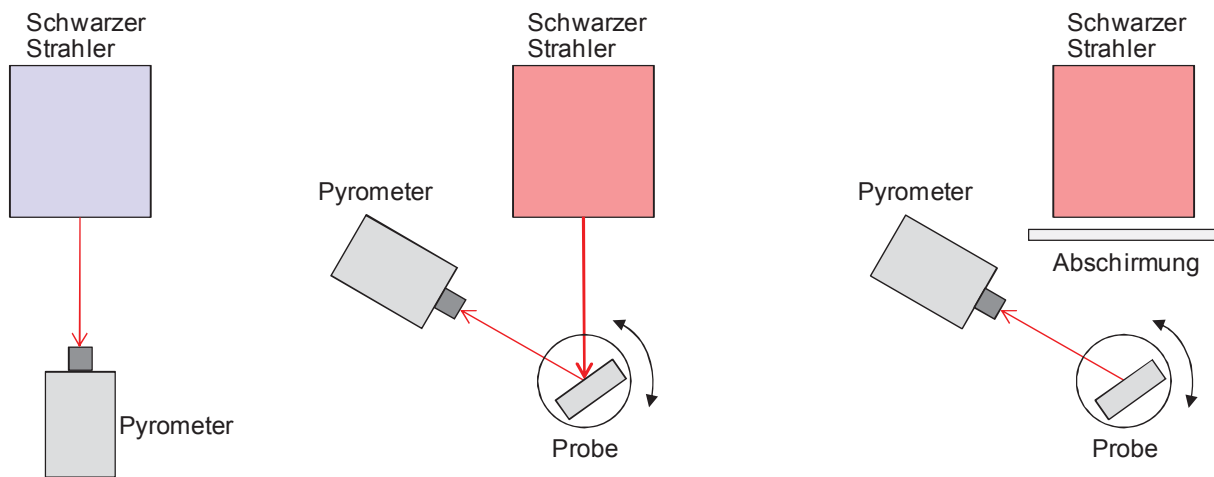


Bild 3: Messaufbau zur Bestimmung des Emissionskoeffizienten verschiedener Proben von links nach rechts: Einstrahlungssignal des Schwarzen Strahlers bei Raumtemperatur und bei einer Temperatur von 100 °C; Reflexionssignal der Probe bei Bestrahlung (Schwarzer Strahler 100 °C); Reflexionssignal der Probe bei Raumtemperatur

2.1.3. Elektrische Leitfähigkeit

Einen im Rahmen dieser Arbeit wichtigen Zusammenhang zwischen Emissionskoeffizient und elektrischer Leitfähigkeit beschreibt die Theorie nach Hagen-Rubens (Czychołł, 2008). Um zu prüfen, ob ein Zusammenhang zwischen der elektrischen Leitfähigkeit und dem Emissionskoeffizienten einer Probe besteht, wurden entsprechende Untersuchungen mit beschichteten Glassubstraten durchgeführt.

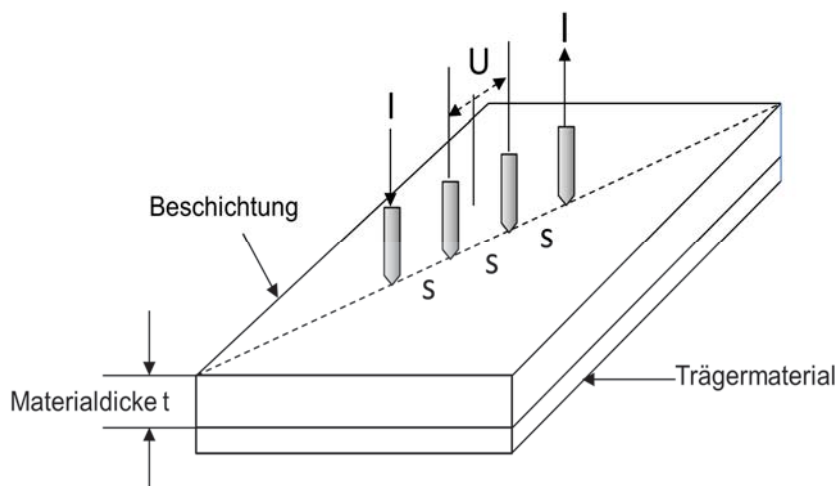


Bild 4: Vier-Punkt-Messung des spezifischen elektrischen Widerstandes einer beschichteten Probe

Nach der Beschichtung erfolgte die messtechnische Ermittlung der elektrischen Leitfähigkeit der Beschichtungen mit einem Vier-Punkt-Messgerät der Firma Silicon-Tech, Langenhagen an dessen Messkopf vier Messspitzen in einer Reihe angeordnet sind (Bild 4). Zur Messung

werden die vier in Reihe geschalteten Messelektroden auf dem Probekörper aufgesetzt und mit kontantem Druck aufgedrückt. Ein konstanter Anpressdruck wird durch ein Federsystem im Messfühler gewährleistet.

Durch die beiden äußeren Messspitzen wird die Probe mit einer konstanten Spannung beaufschlagt, welche im Bereich von 5 mV bis 55 mV liegen sollte. Die beiden inneren Messkontakte dienen zur Erfassung der Potentialdifferenz (elektrische Spannung U). Alle vier Messspitzen sind äquidistant zueinander im Abstand von $s = 1$ mm angeordnet. Aus der aufgetragenen Stromstärke I und der sich ergebenden Spannung U an den inneren beiden Spitzen kann mit Kenntnis der Schichtdicke der spezifische Widerstand ρ der Beschichtung nach Gleichung (20) berechnet werden (Razeghi, 2009).

$$\rho = \frac{U}{I} \cdot 2 \cdot \pi \cdot s \quad (20)$$

mit	ρ	: Spezifischer elektrischer Widerstand	[Ωm]
	U	: Spannung zwischen den inneren Elektroden	[V]
	I	: Anliegende Stromstärke	[A]
	s	: Abstand zwischen den inneren Elektroden	[m]

Aus dem spezifischen elektrischen Widerstand kann der Flächenwiderstand berechnet werden (Gleichung 21).

$$R = \frac{\rho}{d} \quad (21)$$

mit	R	: Flächenwiderstand	[Ω]
	ρ	: Spezifischer elektrischer Widerstand	[Ωm]
	d	: Schichtdicke	[m]

2.1.4. Elastische Kennwerte

Für die Berechnung der schallschutztechnischen Eigenschaften der Hochlochziegel werden die elastischen Materialparameter Elastizitätsmodul, Schubmodul, Poissonzahl und Dämpfung benötigt.

2.1.4.1. Ultraschallverfahren

Die Probekörper für die E-Modul- und Rohdichtemessungen wurden aus dem Ziegel C (Kapitel 5) nach Zulassungsbescheid Z 17.1906 mittels einer Steinsäge herausgeschnitten. Die Abschnitte wurden mit dem Ultraschall-Messgerät Ultrasonic Tester BP-5, Firma Steinkamp richtungsabhängig gemessen und ausgewertet. Das Elastizitätsmodul (E-Modul) ist definiert als das Verhältnis der auf eine Probe aufgetragenen mechanischen Spannung zu deren elastischer Dehnung. Für Keramiken (Ziegelscherben), die schon bei geringer Krafteinwirkung keinen linearen Zusammenhang zwischen Spannung und Verformung

zeigen, ist die Bestimmung des statischen E-Moduls fehlerhaft. Aufgrund dessen wird durch Aufbringen periodischer Belastungsänderungen auf einen Prüfkörper der dynamische E-Modul ermittelt. Durch die periodischen Belastungsänderungen wird die Verformung der Probe gering gehalten und darf vernachlässigt werden. Der dynamische E-Modul eignet sich daher besonders für die Bestimmung von Baustoffeigenschaften. Die Messungen des dynamischen E-Moduls erfolgten an Ziegelausschnitten im Bereich zwischen 10 kHz und 1 MHz.

Die Schallköpfe wurden zur besseren Einkopplung des Schalls in die Probe mit Gel benetzt, auf die Stirnseiten der Probe aufgesetzt und bei möglichst gleichbleibendem Anpressdruck die Schalllaufzeit in μs abgelesen (Bild 5). Aus der Bestimmung des E-Moduls können Rückschlüsse auf die schalltechnischen Kenngrößen eines Materials gezogen werden (Schäffer, et al., 2005) (Häring, et al., 1996).

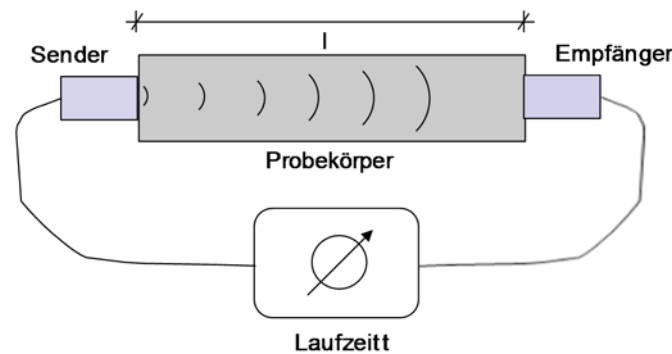


Bild 5: Messaufbau zur Bestimmung des dynamischen E-Moduls

Zwischen der longitudinalen Schallgeschwindigkeit u_l in [m/s] und dem dynamischen E-Modul E_{dyn} in [N/mm²] besteht folgender Zusammenhang (Gleichung 22):

$$E_{\text{dyn}} = u_l^2 \cdot \frac{(1 + \mu) \cdot (1 - 2\mu)}{1 - \mu} \cdot \rho \cdot 10^{-6} \quad (22)$$

Dabei müssen die Dichte ρ in [kg/dm³] und die Querdehnzahl μ (Poissonzahl) der Probe bekannt sein. In der Praxis ist es zweckmäßig, die Querdehnzahl zu vernachlässigen. Dabei ergibt sich Gleichung (23):

$$E_{\text{dyn}} = \frac{l^2 \cdot \rho}{t^2} \quad (23)$$

Es müssen der Messweg l in [mm] (Probenlänge) und die Schalllaufzeit t in [μs] gemessen werden. Da die Querdehnzahl mit diesem Versuchsaufbau nicht bestimmt werden konnte, wurde für Simulationen ein Wert von $\mu = 0,22$ für Ziegel aus Literaturdaten (Jacqus, et al., 2011) entnommen.

2.1.4.2. Impuls-Erregungs-Technologie

Das Verfahren der Impuls-Erregungs-Technik dient der Ermittlung dynamischer Eigenschaften von Feststoffen. Dazu wird ein Probekörper durch einen leichten von außen einwirkenden mechanischen Impuls zu einer körperspezifischen Grundschwingungsart angeregt. Dabei reagiert die Probe als Feder-Masse-Schwinger mit einer transienten Schwingung. Für die Bestimmung von Elastizitäts- und Schubmodul werden unterschiedliche Schwingungsformen angeregt (Bild 6). Die Berechnung der elastischen Materialparameter erfolgte nach Formeln von Spinner und Tefft (Spinner, et al., 1961).

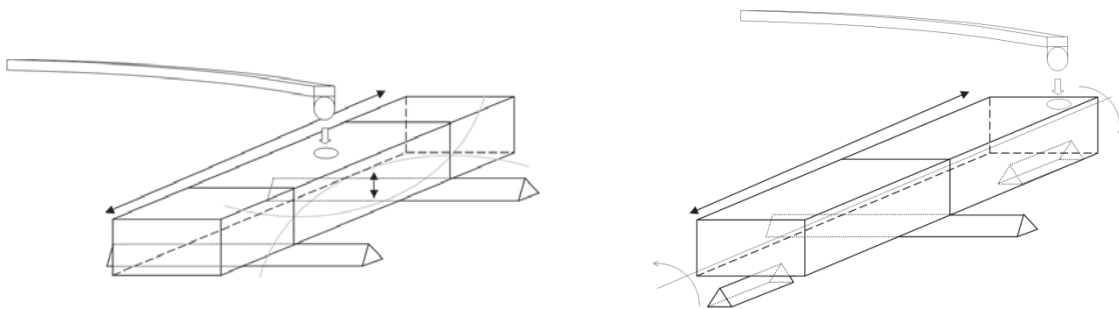


Bild 6: Lagerung und Anregung der Probe für die zerstörungsfreie Bestimmung des Elastizitätsmoduls (Biegeschwingung, links) und des Schubmoduls (Torsionsschwingung, rechts)

Die Frequenz f der angeregten Schwingung wird von der Probenlänge l , der Probenhöhe t , dem Elastizitätsmodul E und der Dichte ρ des Materials bestimmt. Nach Gleichung (24) kann der E-Modul der Probe aus den Messdaten und einem Formfaktor T berechnet werden.

$$E = 0,94642 \frac{\rho l^4 f^2}{t^2} T \quad (24)$$

Die Berechnung des Schubmoduls G (G-Modul) erfolgt nach Gleichung (25) aus der Dichte ρ , der Probenlänge l und der n -ten Frequenz f_n der Schwingung unter Berücksichtigung eines Formfaktors R für rechteckige Proben.

$$G = \rho \left(\frac{2lf_n}{n} \right)^2 R \quad (25)$$

Die Poissonzahl μ kann aus den Ergebnissen von E-Modul und G-Modul nach Gleichung (26) berechnet werden.

$$\mu = \frac{E}{2G} - 1 \quad (26)$$

Die Dämpfung wird aus dem Verhältnis zweier Amplituden zueinander als logarithmisches Dekrement Λ berechnet (Gleichung (27)).

$$\Lambda = \ln \left(\frac{u}{u_{n+1}} \right) \quad (27)$$

Die Messungen erfolgten mit dem Messgerät GrindoSonic MK5i der Firma J. W. Lemmens als Messung der Frequenz der dominanten Schwingungsmode im Zeitbereich.

2.1.5. Mikroskopie

Die optische Charakterisierung der Proben erfolgte mittels Auflicht- und Rasterelektronenmikroskopie.

2.1.5.1. Auflichtmikroskopie

Die Charakterisierung der aufgetragenen Beschichtungen in Bezug auf Bedeckungsgrad und Schichtdicke wurde mittels Stereomikroskop Discovery.V20 der Firma Carl Zeiss durchgeführt. Die Bildauswertung erfolgte mittels Software AxioVision der Firma Carl Zeiss.

2.1.5.2. Laser-Scanning-Mikroskopie

Für die Charakterisierung der Mikrooberflächenrauigkeiten beschichteter und unbeschichteter Proben wurde das Laser-Scanning-Mikroskop der Firma Carl Zeiss verwendet.

2.1.5.3. Rasterelektronenmikroskopie

Die optische Charakterisierung der Partikel- und Pigmentgeometrie in den Beschichtungen erfolgte mittels Rasterelektronenmikroskopie. Die Untersuchungen wurden an einem LEO 1525 und LEO 1530VP im Zentrum für Werkstoffanalytik, Lauf a. d. Pegnitz durchgeführt. Für hochauflösende Aufnahmen stand an diesen Geräten ein InLens-Detektor zur Verfügung. Bei der Verwendung des MPSE-Detektors wurde ein Blendendurchmesser von 30 µm und bei der Verwendung des InLENS-Detektors ein Blendendurchmesser von 20 µm gewählt.

2.2. Charakterisierung verschiedener Beschichtungsmaterialien

Da eine Variation der Brenntemperatur und der Brennraumatmosphäre den Emissionskoeffizienten von Ziegelkeramik nicht beeinflusst (Hintz, et al., 2012), sollte der Emissionskoeffizient im Folgenden durch eine Beschichtung mit geeigneten Materialien vermindert werden.

In Vorversuchen im Rahmen dieser Arbeit wurden unter anderem verschiedene farbige metallische Pigmente, Perlglanzpigmente, natürliche Glimmer, Spinelle, Graphite, oxidische Pigmente, organische Pigmente, Carbon-Nanotubes, Schwefelverbindungen, metallische Dünnschichten, leitfähige Oxidschichten, Keramikglasuren und Luster untersucht. Hierbei erwiesen sich nur metallische Pigmente, metallische Dünnschichten und leitfähige Oxidschichten als geeignete Beschichtungen zur Reduzierung der Wärmestrahlungsverluste in Hochlochziegeln. Diese Versuche werden im Folgenden näher beschrieben.

Die Beschichtungssubstanzen mussten zunächst auf ein Trägermaterial (Substrat) aufgebracht werden, um den Emissionskoeffizienten zu bestimmen. In den durchgeführten Versuchsreihen sollte ein möglicher Einfluss der Oberflächenrauigkeit des Substrates

(Ziegel) ausgeschlossen werden. Aus der Durchführung von Vorversuchen war bereits bekannt, dass Ziegelsubstrate auch durch mechanisches Nachbearbeiten keine in Versuchen vergleichbaren Oberflächenrauigkeiten erhalten. Da Objektträger aus Glas aufgrund ihres Herstellungsprozesses eine besonders glatte Oberfläche aufweisen, wurden diese als Substrate für einen Vergleich aller Beschichtungssubstanzen ausgewählt. Die nachfolgenden Aufnahmen mit dem Laser-Scanning-Mikroskop zeigen deutlich den bereits vermuteten Unterschied der Probenoberfläche eines Glasobjektträgers (Bild 7) und einer Ziegeloberfläche (geschliffen) (Bild 8).

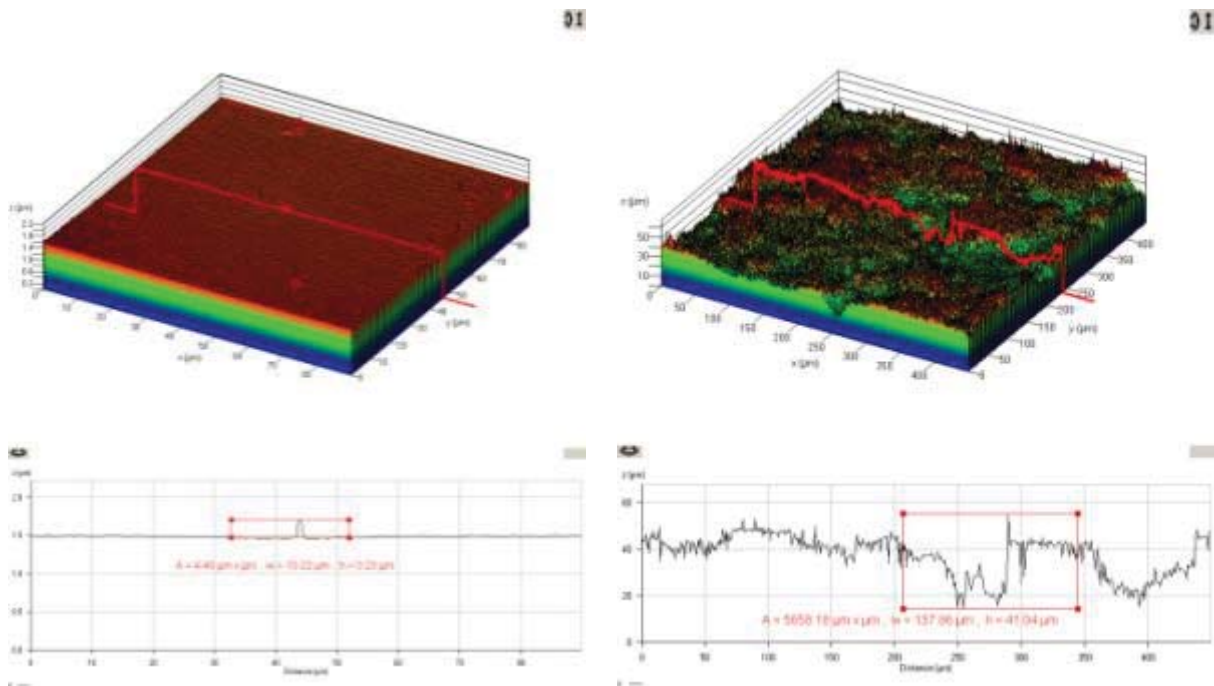


Bild 7: Aufnahme der Oberfläche einer Glasprobe mit dem Laser-Scanning-Mikroskop

Bild 8: Aufnahme der Oberfläche einer geschliffenen Ziegelprobe mit dem Laser-Scanning-Mikroskop

Es wird ersichtlich, dass das geschliffene Ziegelsubstrat eine Oberflächenrauigkeit von $20\ \mu\text{m}$ aufweist, während das Glassubstrat eine Oberflächenrauigkeit von nur $0,2\ \mu\text{m}$ zeigt. Um eine optimale Vergleichbarkeit der Versuchsreihen sicherzustellen, erfolgten Beschichtungsversuche zunächst auf Glassubstrat.

Da ein Einfluss des zur Fixierung der Pigmente verwendeten Binders auf den Emissionskoeffizienten vermieden werden sollte, wurde folgende Vorgehensweise gewählt: Zunächst wurden die Glassubstrate (Objektträger) mit Anlegemilch, einer Mischung bestehend aus Methylmethacrylat, Butylacrylat und Latex-Milch, vorbeschichtet. Nach einem Trocknungsschritt der Anlegemilch (20 Minuten bei Raumtemperatur) wurden die Pigmente mittels eines feinen Pinsels auf das so behandelte Glassubstrat aufgebracht. Mit dieser Beschichtungstechnik konnte ein reproduzierbares Beschichtungsergebnis bei allen Pigmenten erhalten werden. Bei der Nullprobe (Glassubstrat beschichtet mit Anlegemilch) wurde ein Emissionskoeffizient von $\varepsilon = 0,939$ gemessen (in den folgenden Diagrammen als gestrichelte Linie dargestellt). Von den so präparierten Proben wurde jeweils der Emissionskoeffizient

messtechnisch ermittelt. Nachfolgend sind die mit verschiedenen Pigmenten durchgeführten Beschichtungsversuche beschrieben.

2.2.1. Metallische Pigmente

Zunächst erfolgten Beschichtungen der Glassubstrate mit den als Pigment vorliegenden Materialien.

2.2.1.1. Aluminiumpigmente

Die Ergebnisse der für die Aluminium-Pigmente ermittelten Emissionskoeffizienten sind in Bild 9 graphisch dargestellt.

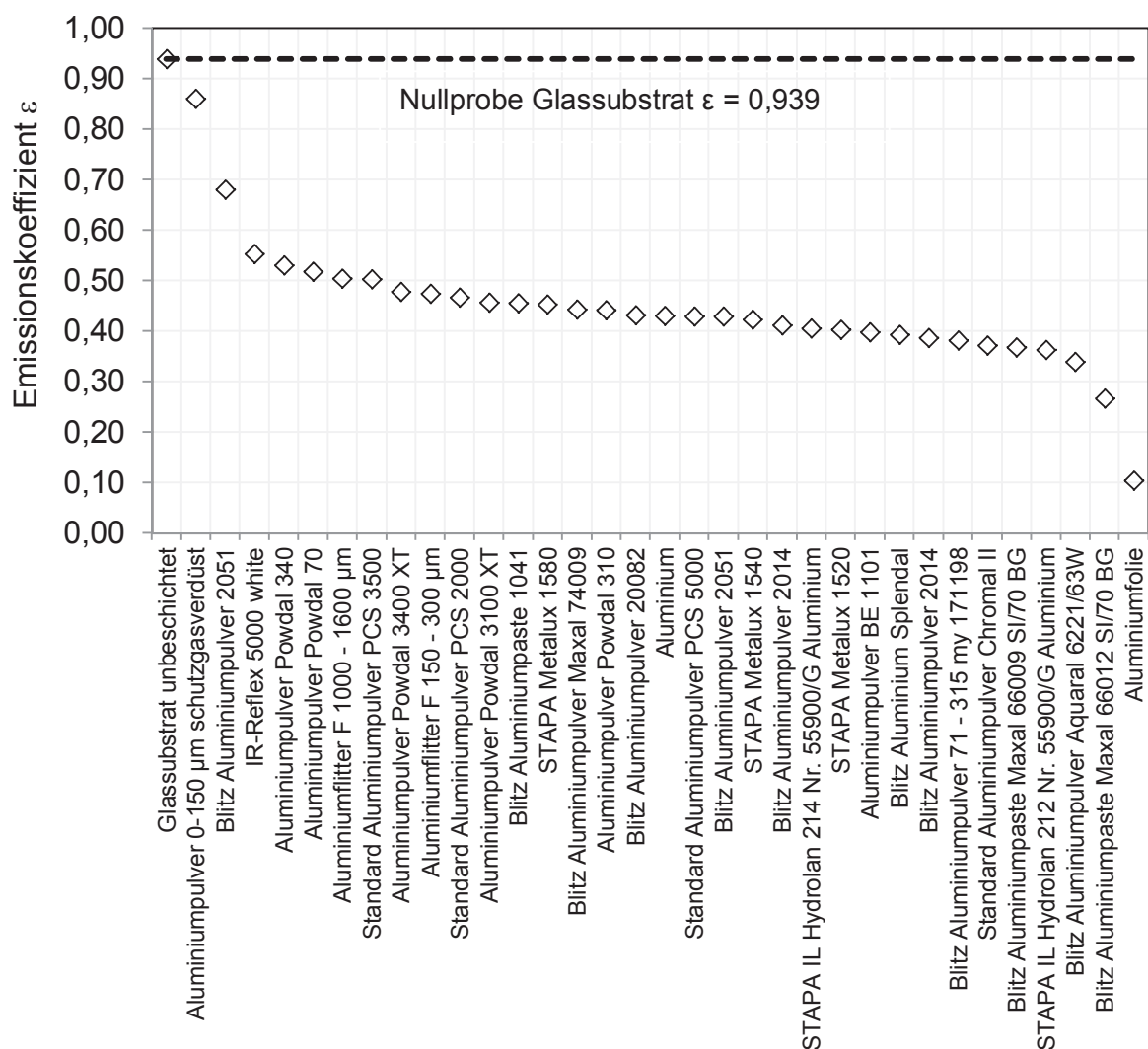


Bild 9: Messtechnisch ermittelte Emissionskoeffizienten der Aluminium-Pigmente auf mit Anlegemilch bestrichenen Glassubstraten

Für Vergleichszwecke wurde zusätzlich eine geschlossene Schicht aus Aluminiumfolie gemessen. Während bei der Aluminiumfolie ein Wert vom $\epsilon = 0,105$ ermittelt wurde, erreichten alle übrigen Aluminiumpigmente diesen Wert nicht. Aufgrund der elektrischen

Leitfähigkeit von Aluminium ist ein niedriger Emissionskoeffizient zu erwarten. Der niedrige Emissionskoeffizient wird aber nur erreicht, wenn die Reflexion infraroter Strahlung direkt am Pigment erfolgt. Dies ist durch die gewählte Präparationsmethode und durch das Aufpudern auf Anlegemilch für alle Pigmente dieser Versuchsreihe gewährleistet. Das Pigment mit dem niedrigsten in dieser Versuchsreihe erreichten Emissionskoeffizienten war „Blitz Aluminiumpaste Maxal 66012 SI/70 BG“ mit einem Emissionskoeffizienten von $\epsilon = 0,266$. Mit „Aluminiumpulver Aquaral 6221/63W“ konnte ein Emissionskoeffizient von $\epsilon = 0,339$ gemessen werden (Bild 10). Dieses Pigment ist stabilisiert und eignet sich besonders für den Einsatz in wässrigen Systemen. Das Pigment „STAPA Metalux 1520“ ist ein „Silberdollar“-Pigment, wie aus Bild 11 ersichtlich wird. Pigmente mit „Silberdollar“-Geometrie zeigen niedrige Emissionskoeffizienten. Für das Pigment „STAPA Metalux 1520“ konnte ein Emissionskoeffizient von $\epsilon = 0,403$ gemessen werden.

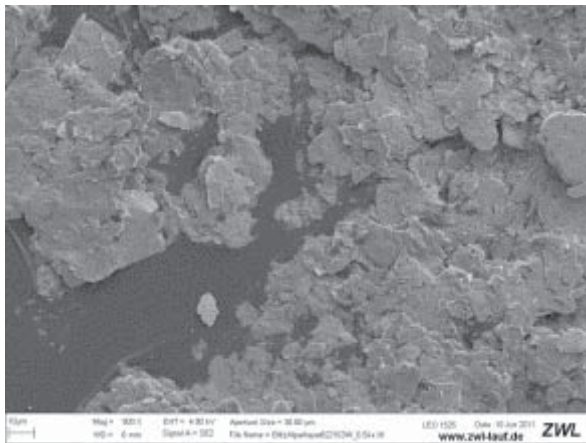


Bild 10: REM-Aufnahme von „Blitz Aluminiumpulver Aquaral 6221/63W“ mit $\epsilon = 0,339$

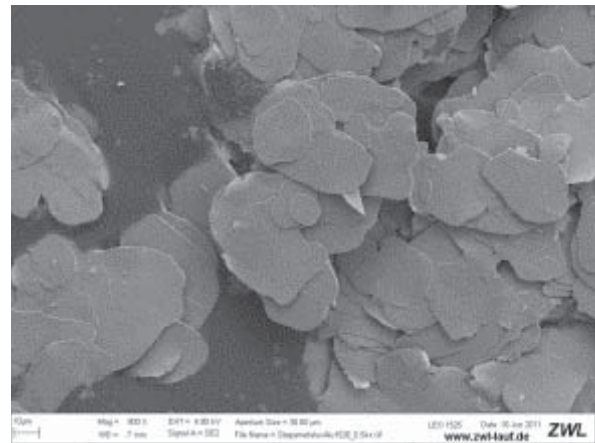


Bild 11: REM-Aufnahme von „STAPA Metalux 1520“ mit $\epsilon = 0,403$

Darüber hinaus zeigen metallische Pigmente, deren mittlere Pigmentgrößen d_{50} über der Wellenlänge der zu reflektierenden Strahlung mit $\lambda = 10 \mu\text{m}$ liegen, niedrigere Emissionskoeffizienten, als Pigmente mit Teilchengrößen unter dieser Wellenlänge.

Auch Pigmente mit großen Partikelgrößen zeigen niedrige Emissionskoeffizienten. Die Pigmente „Blitz Aluminiumpaste Maxal 66009 SI/70 BG“ (Bild 12) und „Blitz Aluminiumpulver 2014“ (Bild 13) zeigen jeweils Emissionskoeffizienten von $\epsilon = 0,368$ bzw. $\epsilon = 0,387$. Beide Pigmente eignen sich somit für eine Beschichtung zur Ausrüstung von Ziegelkeramik mit einem niedrigen Emissionskoeffizienten.

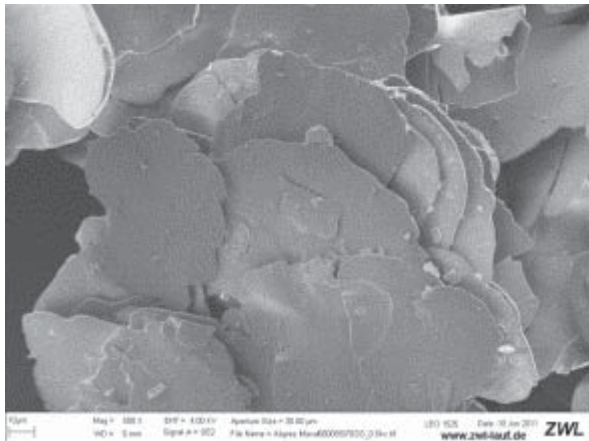


Bild 12: REM-Aufnahme von „Blitz Aluminiumpaste Maxal 66009 SI/70 BG“ bei 500-facher Vergrößerung mit $\epsilon = 0,368$

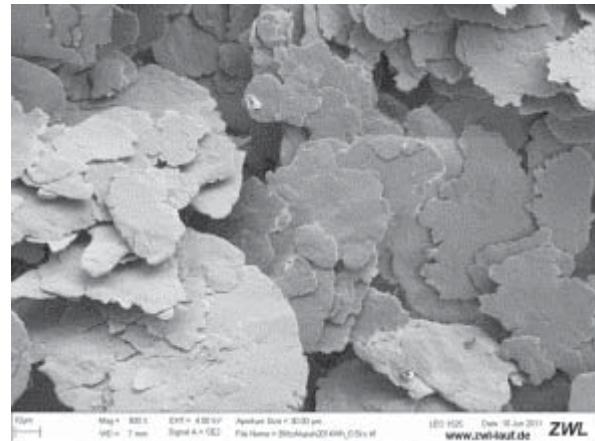


Bild 13: REM-Aufnahme von „Blitz Aluminiumpulver 2014“ bei 500-facher Vergrößerung mit $\epsilon = 0,387$

Das Pigment „Blitz Aluminiumpulver 2051“ ist ein „Cornflake“-Pigment und liegt mit seiner Pigmentgröße im Bereich der zu reflektierenden Strahlung mit $\lambda = 10 \mu\text{m}$ (Bild 14). Bei Partikelgrößen im Wellenlängenbereich der Strahlung tritt vermehrt Streuung der Strahlung auf, welche den Emissionskoeffizient auf $\epsilon = 0,681$ erhöhte. Auch sphärische metallische Partikel zeigen durch die vermehrt auftretende Streustrahlung einen hohen Emissionskoeffizienten (Bild 15).

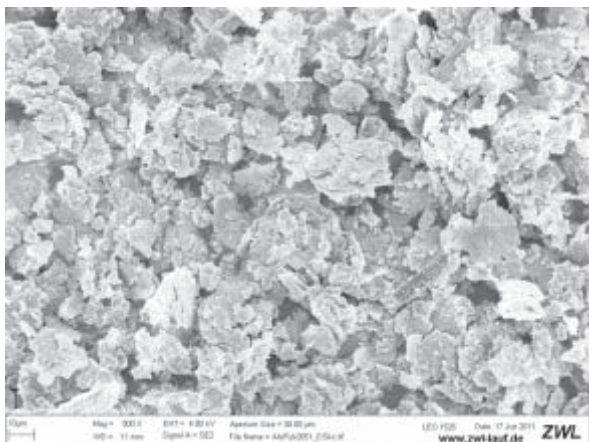


Bild 14: REM-Aufnahme von „Blitz Aluminiumpulver 2051“ bei 500-facher Vergrößerung mit $\epsilon = 0,681$

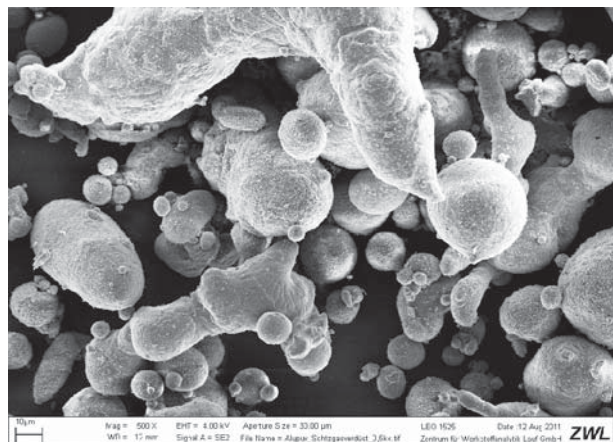


Bild 15: REM-Aufnahme von „Aluminiumpulver 0-150 μm schutzgasverdüst“ bei 500-facher Vergrößerung mit $\epsilon = 0,860$

Ein Einfluss der Pigmentgeometrie auf den Emissionskoeffizienten ist naheliegend. In Abschnitt 2.2.6 wird deshalb der Einfluss der Pigmentgeometrie auf den Emissionskoeffizienten einer Beschichtung näher untersucht.

2.2.1.2. Kupfer- und Goldbronze-Pigmente

Gute elektrische Leiter zeigen niedrige Emissionskoeffizienten aufgrund der Reflexion der Infrarot-Strahlung durch bewegliche Ladungsträger. Erwartungsgemäß wurden mit den Kupfer- und Kupfer-Zinn-Pigmenten aufgrund ihrer metallischen Zusammensetzung niedrige Werte für den Emissionskoeffizienten erreicht (Bild 16).

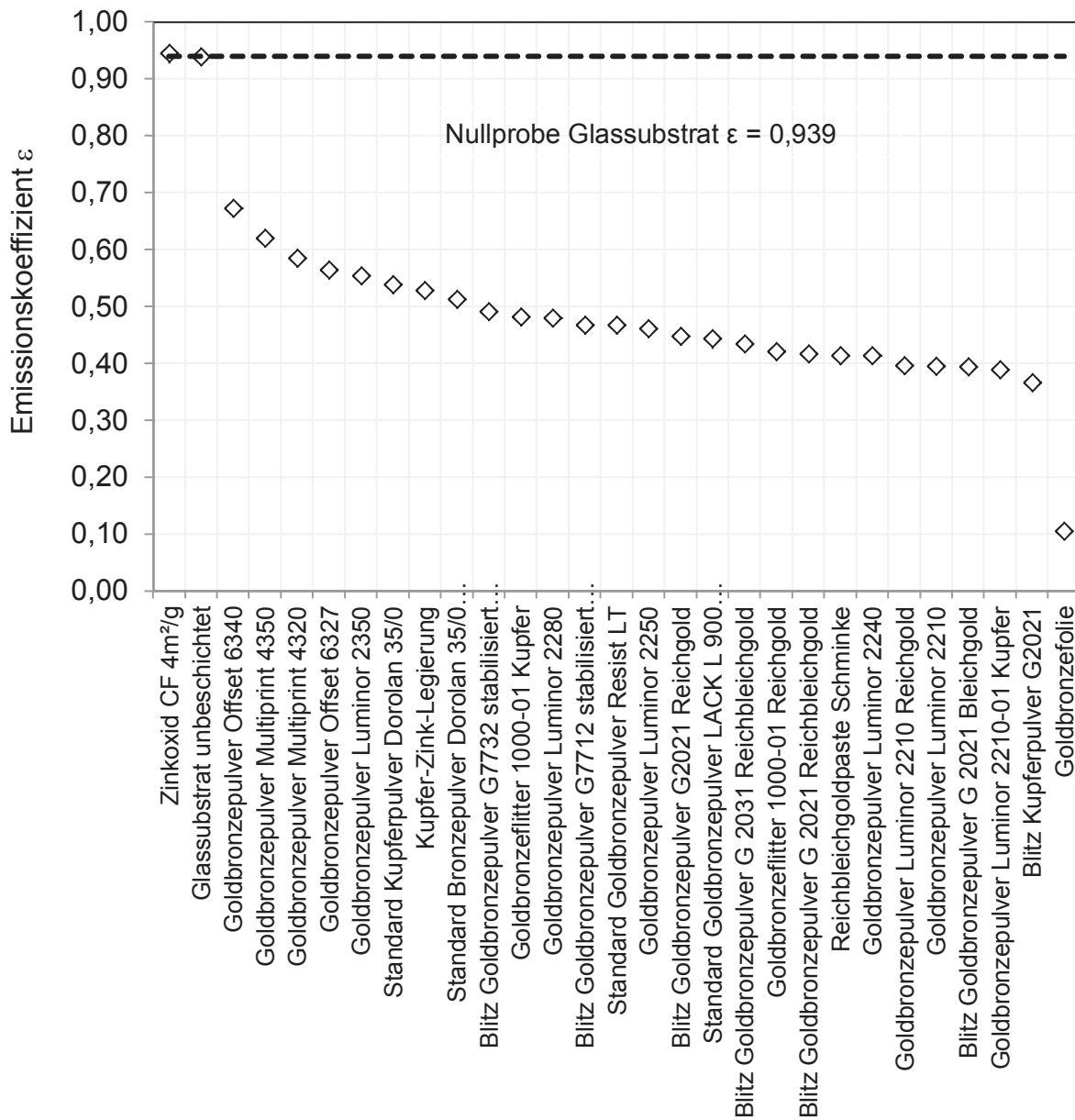


Bild 16: Messtechnisch ermittelte Emissionskoeffizienten der Kupfer- und Goldbronze-Pigmente auf mit Anlegemilch bestrichenen Glassubstraten

Der niedrigste Emissionskoeffizient wurde mit Goldbronze-foolie erreicht. Für die hier verwendete Goldbronze-foolie konnte ein Emissionskoeffizient von $\epsilon = 0,105$ messtechnisch ermittelt werden. Bei den Kupfer- und Kupfer-Zinn-Pigmenten wurden generell etwas höhere Emissionskoeffizienten gemessen, als bei den Aluminiumpigmenten.

Den niedrigsten Emissionskoeffizienten mit $\epsilon = 0,367$ in dieser Versuchsreihe zeigte das

Pigment „Blitz Kupferpulver G2021“ (Bild 17). Ähnliche Ergebnisse wurden mit den Pigmenten „Goldbronzepulver Luminor 2210-01 Kupfer“ (Bild 18), „Blitz Goldbronzepulver G 2021 Bleichgold“ (Bild 19) und „Goldbronzepulver Luminor 2210 Reichgold“ (Bild 20) mit Emissionskoeffizienten unter $\varepsilon = 0,4$ erreicht.

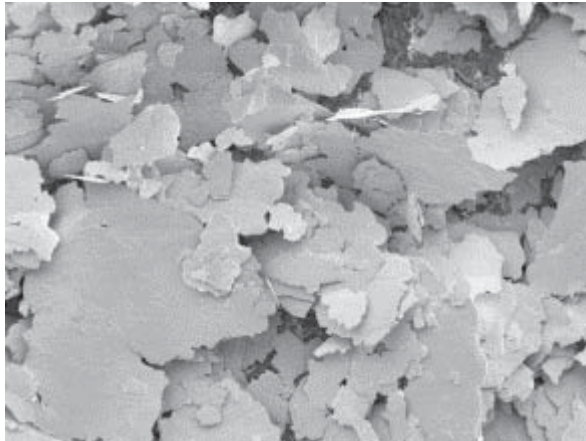


Bild 17: REM-Aufnahme von „Blitz Kupferpulver G2021“ bei 500-facher Vergrößerung mit $\varepsilon = 0,367$

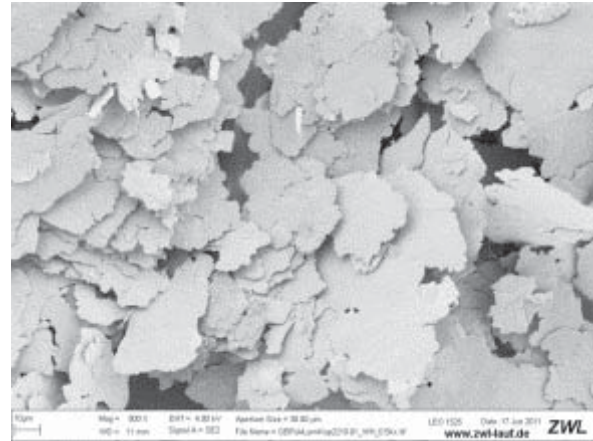


Bild 18: REM-Aufnahme von „Goldbronzepulver Luminor 2210-01 Kupfer“ bei 500-facher Vergrößerung mit $\varepsilon = 0,389$

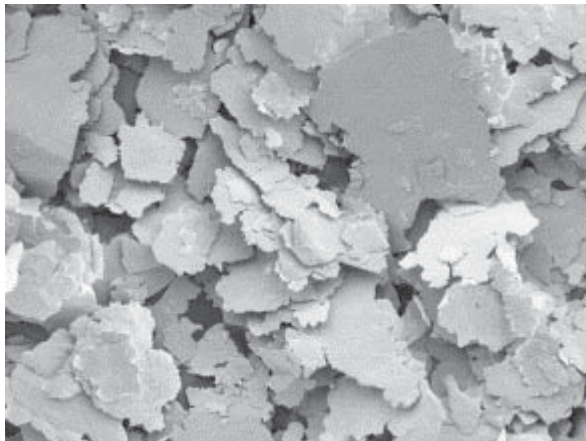


Bild 19: REM-Aufnahme von „Blitz Goldbronzepulver G 2021 Bleichgold“ bei 500-facher Vergrößerung mit $\varepsilon = 0,395$

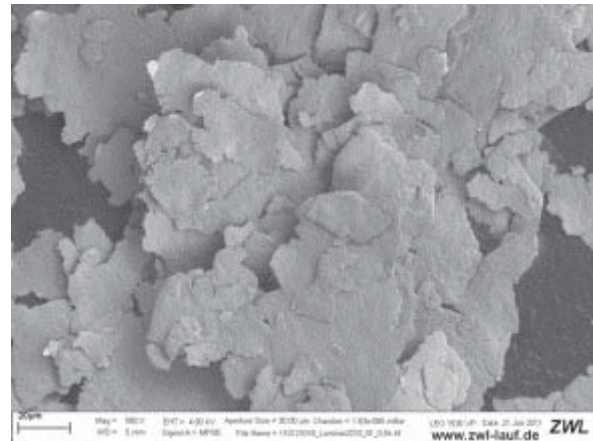


Bild 20: REM-Aufnahme von „Goldbronzepulver Luminor 2210 Reichgold“ bei 500-facher Vergrößerung mit $\varepsilon = 0,396$

Das Kupfer-Zinn-Pigment „Goldbronzepulver Luminor 2210“ wurde mit einem Wert von $\varepsilon = 0,396$ gemessen. Das Pigment „Goldbronzepulver Luminor 2240“ ergab bei der Messung $\varepsilon = 0,414$. Die Ähnlichkeit beider Pigmente sowohl in der Zusammensetzung als auch in der Korngröße ist hierfür ausschlaggebend. Beide Pigmente besitzen eine mittlere Korngröße von $50 \mu\text{m}$. Als Pigmente der gleichen Zusammensetzung, aber unterschiedlicher Korngröße, wurden die Pigmente „Goldbronzepulver Luminor 2250“, „Goldbronzepulver Luminor 2280“, „Goldbronzepulver Luminor 2350“, „Goldbronzepulver Multiprint 4320“ und „Goldbronzepulver Multiprint 4350“ sowie „Goldbronzepulver Offset 6327“ und „Goldbronzepulver Offset 6340“ gewählt. Sinkt die Korngröße, so steigt bei den Luminor-Pigmenten der Emissionskoeffizient. So hat „Goldbronzepulver Luminor 2250“ mit einer mittleren Korngröße von $35 \mu\text{m}$ einen Emissionskoeffizienten von $\varepsilon = 0,461$. Bei dem

Pigment „Goldbronzepulver Luminor 2350“ liegt der Emissionskoeffizient nur noch bei $\varepsilon = 0,554$ bei einer mittleren Korngröße von $16 \mu\text{m}$. Die Abhängigkeit des Emissionskoeffizienten von der Pigment-Korngröße setzt sich auch bei den Multiprint- und Offset-Pigmenten fort. Mit den Pigmenten „Goldbronzepulver Offset 6340“ (Bild 21) und „Goldbronzepulver Multiprint 4350“ (Bild 22) wurden Emissionskoeffizienten von $\varepsilon = 0,673$ bzw. $\varepsilon = 0,621$ gemessen.

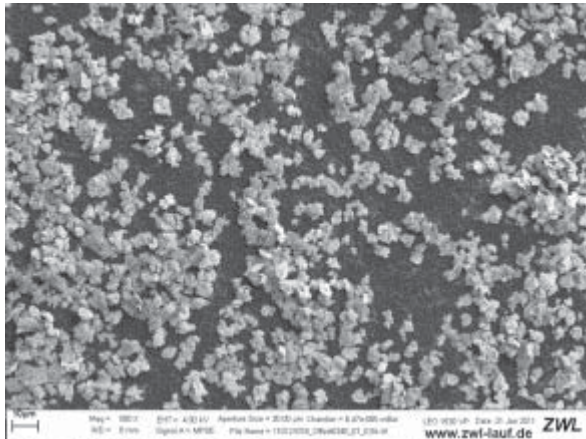


Bild 21: REM-Aufnahme von „Goldbronzepulver Offset 6340“ bei 500-facher Vergrößerung mit $\varepsilon = 0,673$

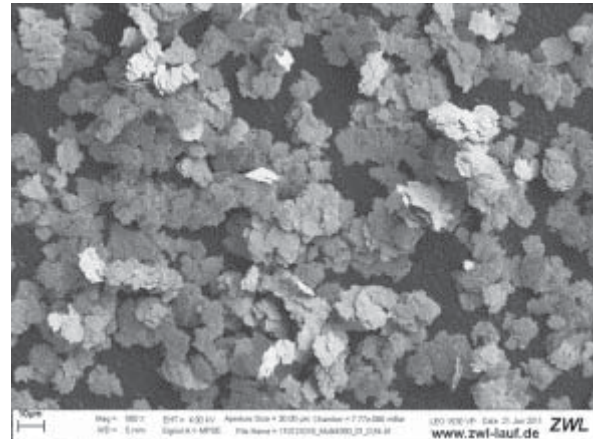


Bild 22: REM-Aufnahme von „Goldbronzepulver Multiprint 4350“ bei 500-facher Vergrößerung mit $\varepsilon = 0,621$

Da das Pigment mit der zweit-geringsten Korngröße, nämlich „Goldbronzepulver Offset 6327“, dennoch einen niedrigeren Emissionskoeffizient mit $\varepsilon = 0,565$ als die Pigmente „Goldbronzepulver Multiprint 4350“ und „Goldbronzepulver Multiprint 4320“ besitzt, liegt die Vermutung nahe, dass der Emissionskoeffizient nicht nur von der Pigmentgröße abhängig ist.

2.2.2. Graphite

In weiteren Versuchen wurden Graphite unterschiedlicher Partikelgeometrie, Reinheit und Korngröße untersucht.

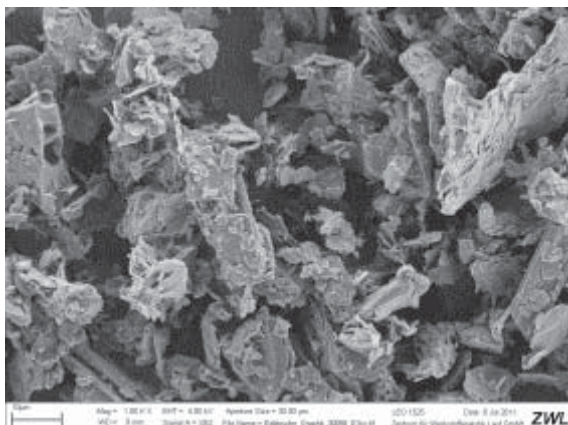


Bild 23: REM-Aufnahme von „Edelpudergraphit“ bei 1000-facher Vergrößerung

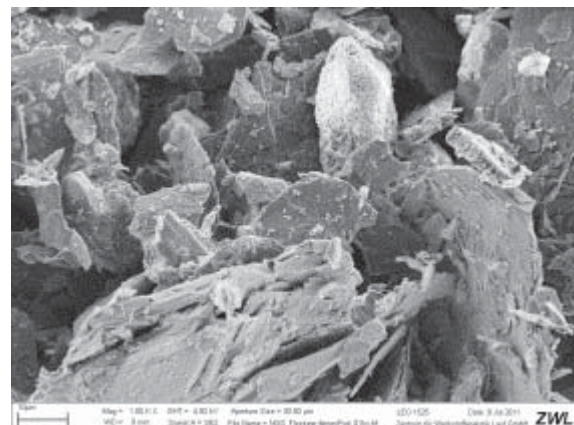


Bild 24: REM-Aufnahme von „Flocken-Graphit, feines Puder“ bei 1000-facher Vergrößerung

Aus den REM-Untersuchungen ist ersichtlich, dass die Graphite sehr unterschiedliche Pigmentgeometrien aufweisen (Bild 23 bis Bild 32).

Die Graphite wurden zunächst mit Anlegemilch auf Glassubstrate beschichtet und ihre Emissionskoeffizienten messtechnisch ermittelt. Die Grapheniumflocken erreichen als einzige Graphitsorte auch in unpoliertem Zustand Werte von $\epsilon = 0,46$ bis $\epsilon = 0,67$ bei einer Partikelgröße von 1 mm bis 10 mm. Graphite mit ausgeprägter Schichtstruktur wie „Graphit TVG/K“ (Bild 30), „ABL 87/90“ (Bild 27) und Graphit T1 (Bild 34) zeigen auch in unpoliertem Zustand relativ niedrige Emissionskoeffizienten zwischen $\epsilon = 0,6$ bis $\epsilon = 0,8$. Kugelförmige Graphite, wie „kugelförmiger Graphit SG 2S 99,95“ (Bild 31) und „Graphit SGB 25 L 99,9“ (Bild 32) zeigen dagegen in unpoliertem Zustand eher höhere Emissionskoeffizienten zwischen $\epsilon = 0,8$ bis $\epsilon = 0,92$. Die Pigmentgeometrie und Korngröße ist damit ein wichtiger Einflussfaktor für den Emissionskoeffizienten der verschiedenen Graphite.

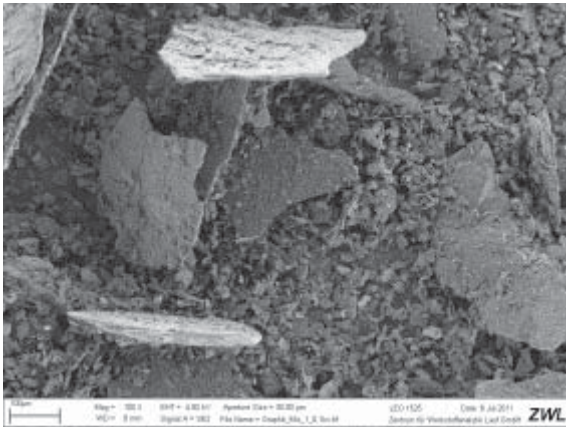


Bild 25: REM-Aufnahme von „Graphit Mix 1“ bei 100-facher Vergrößerung

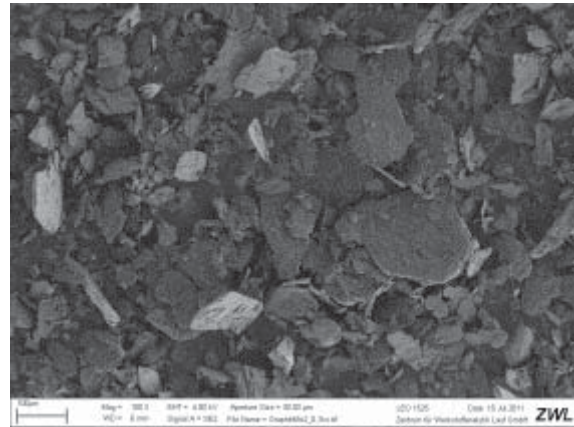


Bild 26: REM-Aufnahme von „Graphit Mix 2“ bei 100-facher Vergrößerung

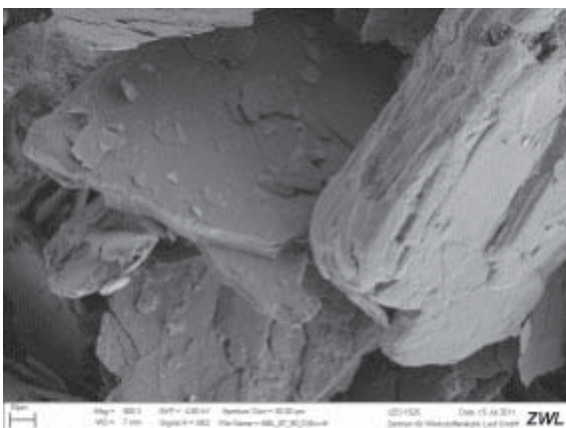


Bild 27: REM-Aufnahme von „ABL 87/90“ bei 500-facher Vergrößerung

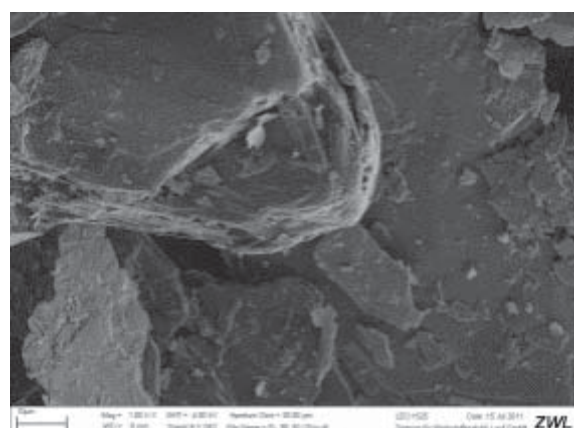


Bild 28: REM-Aufnahme von „EDM 90/92“ bei 1000-facher Vergrößerung

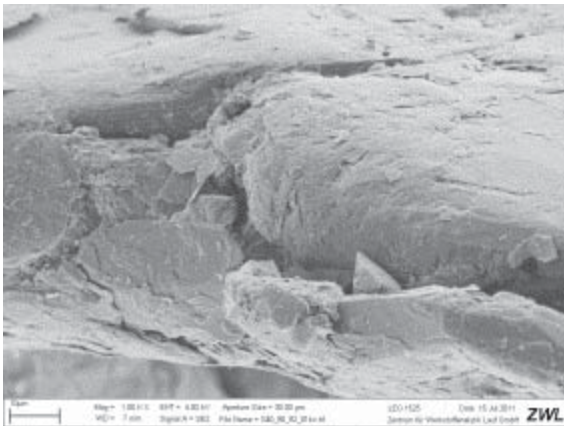


Bild 29: REM-Aufnahme von „Graphit S 40 90/92“ bei 500-facher Vergrößerung

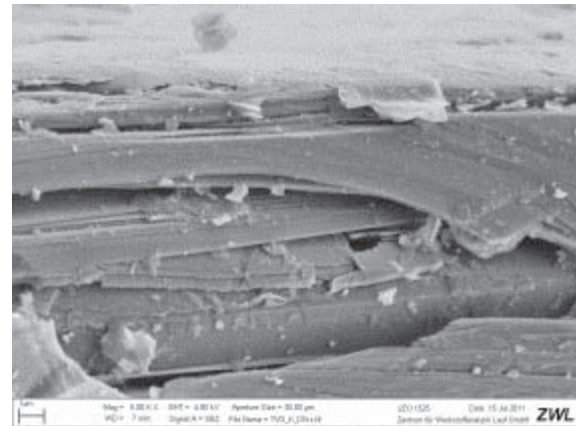


Bild 30: REM-Aufnahme von „Graphit TVG/K“ bei 1000-facher Vergrößerung

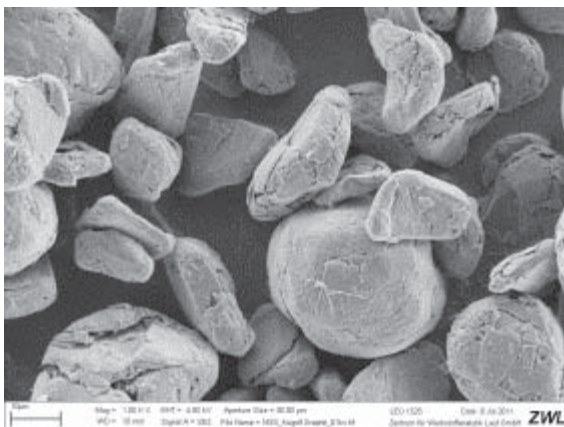


Bild 31: REM-Aufnahme „kugelförmiger Graphit SG 2S 99,95“ bei 1000-facher Vergrößerung

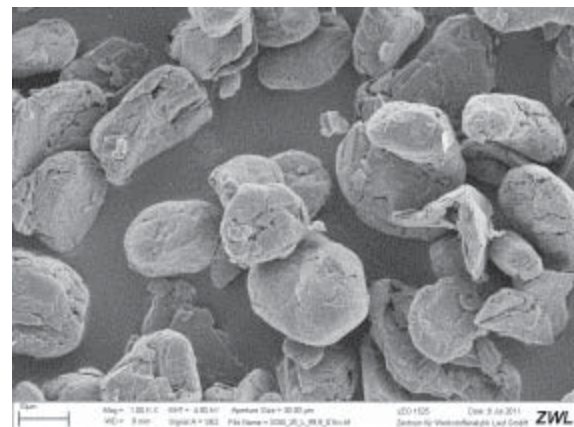


Bild 32: REM-Aufnahme von „Graphit SGB 25 L 99,9“ bei 1000-facher Vergrößerung

Im weiteren Verlauf erfolgte ein mechanisches Polieren der Proben über eine Dauer von einer Minute mit einem weichen Tuch. Im Anschluss an den Poliervorgang wurde der Emissionskoeffizient erneut gemessen.

Darauf folgend wurden die polierten Graphit-Proben (Substrat = Glas) mit dem Raster-Elektronen-Mikroskop auf Veränderungen durch mechanisches Polieren untersucht. In Bild 35 und Bild 37 ist jeweils eine unpolierte und in Bild 36 und Bild 38 jeweils eine polierte Graphitoberfläche gegenüber gestellt. Der Vergleich einer unpolierten Graphitoberfläche mit einer mechanisch polierten Graphitoberfläche wurde mit allen in dieser Arbeit verwendeten Graphitsorten durchgeführt. Die Graphit-beschichteten Glassubstrate wurden im Hinblick auf ihren Emissionskoeffizienten vor und nach dem mechanischen Polieren untersucht. Darüber hinaus wurde die elektrische Leitfähigkeit der Schichten mittels der Van-der-Pauw-Methode ermittelt. Anschließend wurden die elektrischen Leitfähigkeiten der unpolierten und mechanisch polierten Oberflächen verglichen. Das Aussehen der Graphit-Partikel und die Oberflächeneigenschaften der Beschichtungen werden exemplarisch an zwei unterschiedlichen Graphiten („Graphit EDM 90/92“ und „Graphit T1“) miteinander verglichen. Das Aussehen der ursprünglichen Graphit-Partikel ist in Bild 33 und Bild 34 dargestellt.

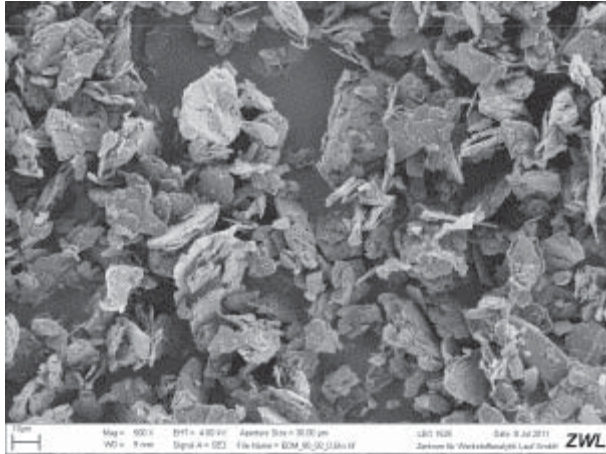


Bild 33: REM-Aufnahme „Graphit EDM 90/92“ bei 500-facher Vergrößerung

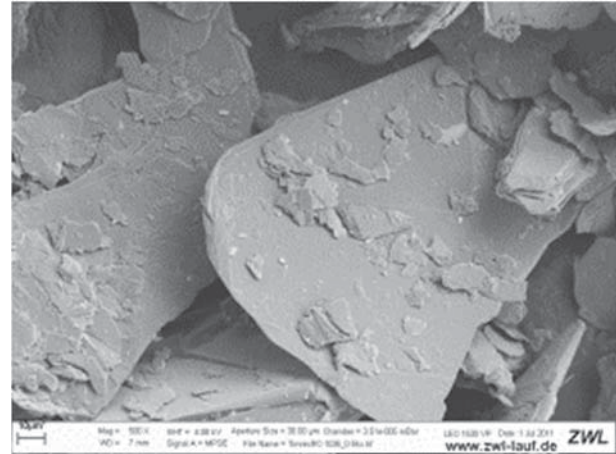


Bild 34: REM-Aufnahme „Graphit T1“ bei 500-facher Vergrößerung

In Bild 35 bis Bild 38 erfolgt exemplarisch ein Vergleich der mechanisch polierten und unpolierten Oberflächen der Graphite mit den Bezeichnungen „EDM 90/92“ und „Graphit T1“.

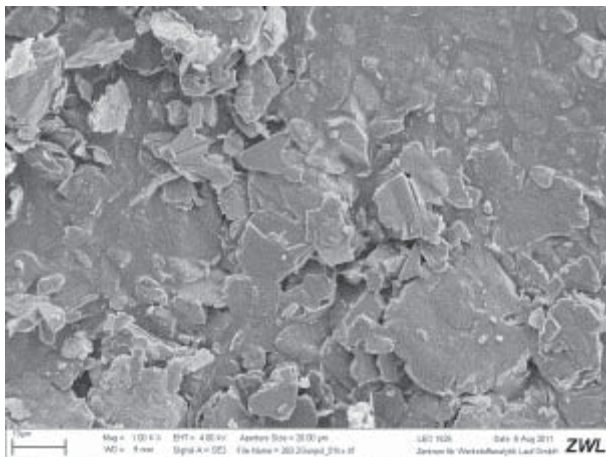


Bild 35: „Graphit EDM 90/92“ aufgedudert auf ein mit Anlegemilch beschichtetes Glassubstrat (unpoliert) bei 1000-facher Vergrößerung

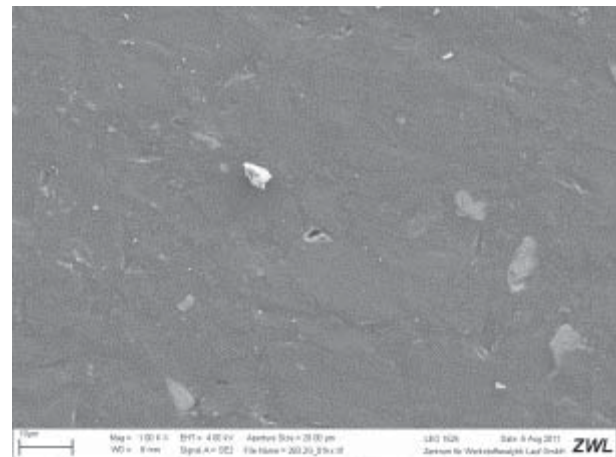


Bild 36: „Graphit EDM 90/92“ wie Bild 35 nach mechanischem Polieren der Oberfläche bei 1000-facher Vergrößerung

Aus den Messungen der Emissionskoeffizienten derselben Proben in unpoliertem und poliertem Zustand geht hervor, dass durch mechanisches Polieren der Emissionskoeffizient einer mit Graphit beschichteten Oberfläche abgesenkt werden kann. Dies kann dadurch erklärt werden, dass durch das mechanische Polieren aus den einzelnen Graphit-Partikeln eine geschlossene, elektrisch kontaktierte Schicht entsteht (Bild 36 und Bild 38). Das Entstehen dieser geschlossenen Schicht ist bei Graphiten mit einem erhöhten Anteil an kleinen Korngrößen ausgeprägter, als bei Graphiten mit großen Partikelgrößen. Es kann angenommen werden, dass bei den Graphitsorten mit überwiegend kleinen Korngrößen durch das mechanische Polieren eine nahezu geschlossene Beschichtung erreicht wird. Die Lücken zwischen den einzelnen Pigmenten können leicht geschlossen werden, so dass in der polierten Schicht (Bild 36) keine einzelnen Graphit Partikel mehr erkennbar sind.

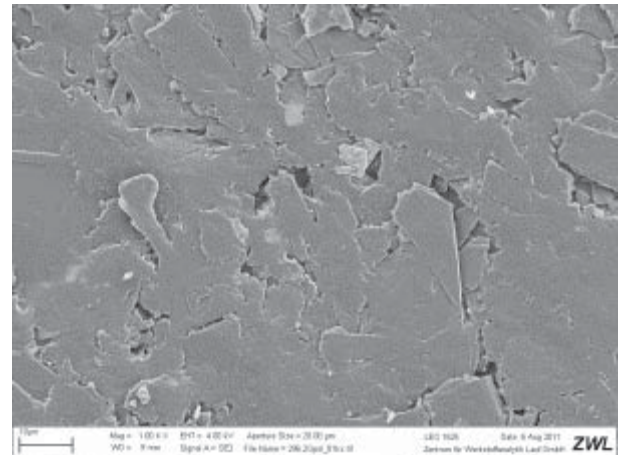
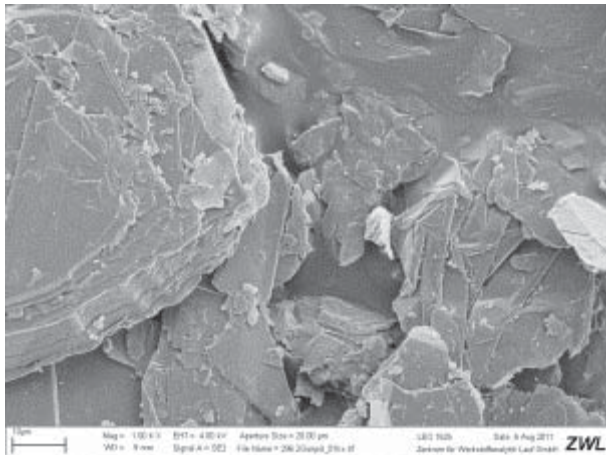


Bild 37: „Graphit T1“ aufgedudert auf ein mit Anlegemilch beschichtetes Glassubstrat (unpoliert) bei 1000-facher Vergrößerung

Bild 38: „Graphit T1“ wie Bild 37 nach mechanischem Polieren der Oberfläche bei 1000-facher Vergrößerung

Aus der lückenhaften Beschichtung ist eine geschlossene Schicht entstanden. Der Emissionskoeffizient aller Graphite, bis auf „Grapheniumflocken“, konnte durch den mechanischen Poliervorgang erheblich gemindert werden (Bild 39).

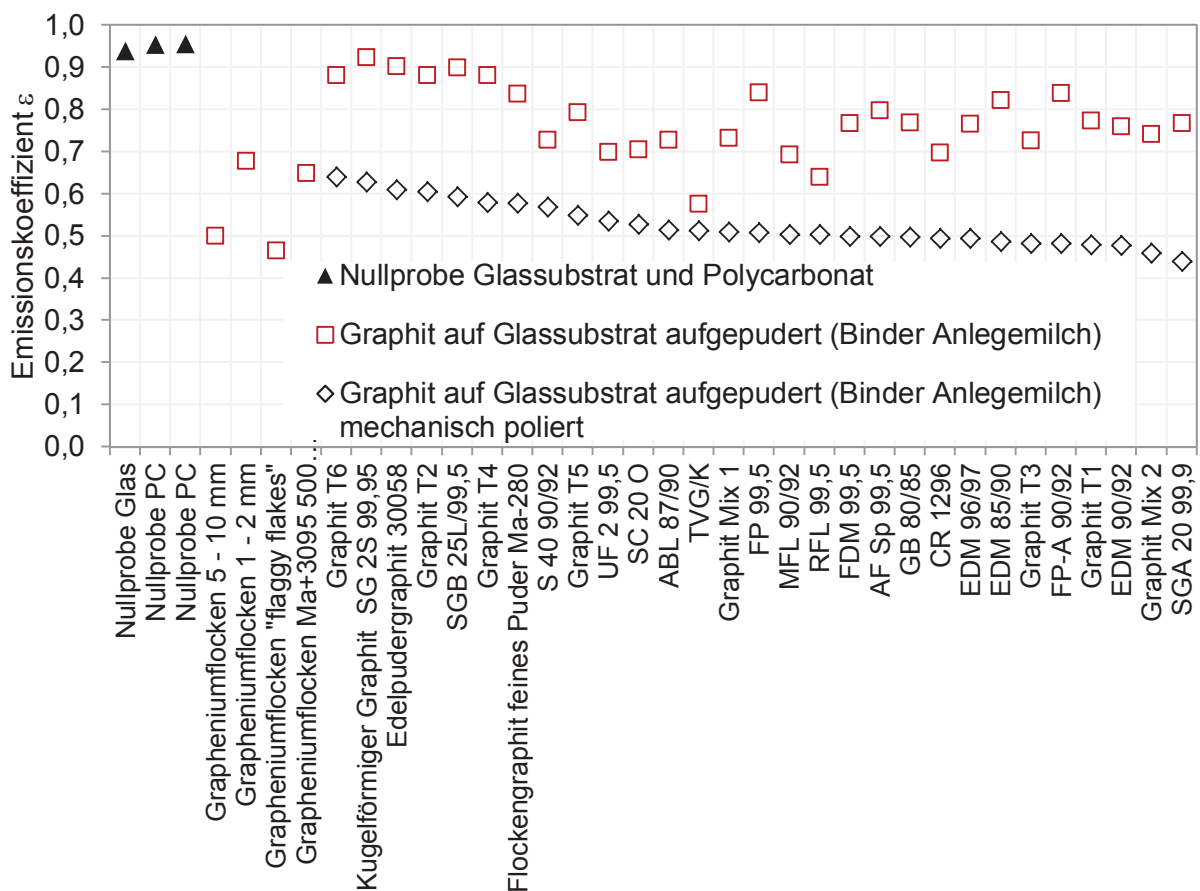


Bild 39: Emissionskoeffizienten der mit Graphit bepuderten Glassubstrate (Binder ist Anlegemilch) vor und nach dem mechanischen Polieren im Vergleich

Ein Polieren der Graphite mit der Bezeichnung „Grapheniumflocken“ war aufgrund der

großen Teilchengröße nicht möglich, so dass hierfür keine Messwerte vorliegen. Die Polierbarkeit der Graphite sinkt mit steigender Partikelgröße. Bei „Graphit T1“ mit einer großen Korngröße und wenig Feinkornanteil konnten die Lücken zwischen den Pigmenten durch das mechanische Polieren nicht vollständig geschlossen werden, obwohl sich eine durchgehende Graphit-Schicht ausbildet. Einzelne Graphitpartikel sind jedoch erkennbar. Es kann angenommen werden, dass durch das mechanische Polieren Graphitebenen, wie in Bild 37 erkennbar, getrennt oder verschoben werden.

Im Rahmen dieser Arbeiten wurde festgestellt, dass der Emissionskoeffizient von Graphit durch einen Poliervorgang weiter abgesenkt werden kann. Im weiteren Verlauf wird gezeigt, dass die Minderung durch eine Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit der Graphit-Beschichtung begründet (Abschnitt 2.2.5.3) werden kann.

2.2.2.1. Graphit auf Trägerpigment

Würde Graphit als Beschichtungsmaterial im Inneren von Hochlochziegeln eingesetzt werden, so wäre ein nachträglicher Polierschritt technisch nur sehr schwierig umsetzbar. In weiteren Untersuchungen wurde deshalb geprüft, ob ein Trägerpigment mit bereits poliertem Graphit ausgerüstet werden kann. Das so ausgerüstete Trägerpigment könnte anschließend im Inneren des Hochlochziegels appliziert werden und bedarf keiner weiteren Nachbehandlung.

Als Trägerpigment wurde ein Glimmer der Firma Luh mit einer Korngröße zwischen 0,5 – 0,8 mm ausgewählt. Für diesen Glimmer wurde ein Emissionskoeffizient von $\varepsilon = 0,92$ messtechnisch ermittelt. Das Trägerpigment wurde mit einer Mischung aus wasserverdünntem Holzleim (1 Teil Holzleim : 4 Teile dest. Wasser) und Graphit T1 beschichtet. Graphit T1 weist eine Korngröße von $d_{50} = 50 \mu\text{m}$ auf und zeigt als eigenständiges Beschichtungspigment auf Glas-Substrat einen Emissionskoeffizienten von $\varepsilon = 0,779$ im unpolierten und von $\varepsilon = 0,479$ im polierten Zustand. Nach dem Trocknungsvorgang der Beschichtungsmischung wurden die Graphitbeschichteten Glimmerpigmente in einer Kugelmühle bei niedriger Drehzahl (60 U/min.) bewegt. Durch den reibenden Effekt der verwendeten Steatitmahlkörper auf den Glimmerpigmenten sollte ein mechanisches Polieren der Graphitbeschichtung auf dem Trägerpigment erfolgen. Die Polierversuche wurden über einen Zeitraum von zwei Stunden, vier Stunden und sechs Stunden durchgeführt und jeweils anschließend der Emissionskoeffizient bestimmt (Tabelle 1).

Tabelle 1: Emissionskoeffizienten von Graphit-beschichteten und polierten Glimmerpartikeln bei steigender Polierzeit. Das mit Graphit beschichtete und polierte Trägerpigment (Glimmer) wurde mittels wasserverdünntem Holzleim (1 Teil Holzleim : 4 Teile dest. Wasser) auf Ziegelsubstrate aufgebracht.

Trägerpigment	Dauer des Poliervorgangs	Graphit-Beschichtung	Emissionskoeffizient ϵ
Glimmer Luh 0,5 – 0,8 mm	-	-	0,920
Glimmer Luh 0,5 – 0,8 mm	2 h	Graphit T1	0,913
Glimmer Luh 0,5 – 0,8 mm	4 h	Graphit T1	0,915
Glimmer Luh 0,5 – 0,8 mm	6 h	Graphit T1	0,916

Der unbeschichtete Glimmer zeigte einen Emissionskoeffizienten von $\epsilon = 0,920$. Aus der Untersuchung ging hervor, dass durch die Beschichtung des Glimmers mit poliertem Graphit der Emissionskoeffizient nur unwesentlich abgesenkt werden konnte.

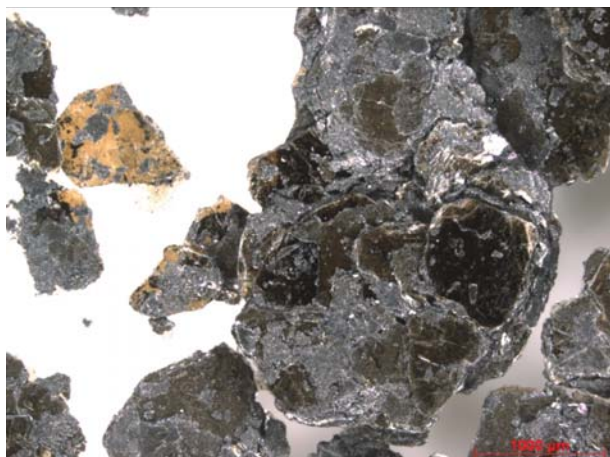


Bild 40: Lichtmikroskopische Aufnahme bei 30-facher Vergrößerung von Glimmerpartikeln, die mit poliertem Graphit der Sorte Graphit T1 beschichtet wurden ($\epsilon = 0,913$). Die Polierdauer betrug zwei Stunden

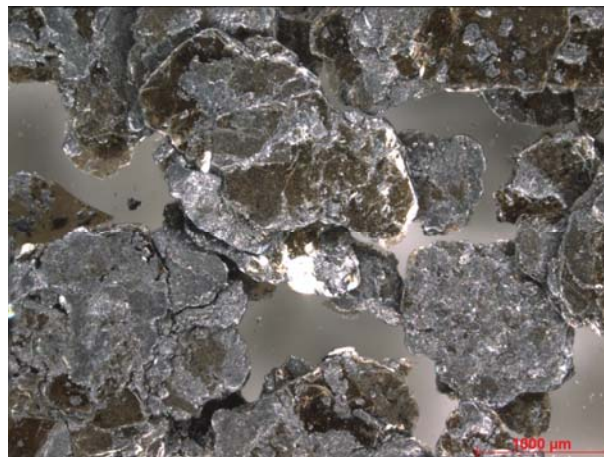


Bild 41: Lichtmikroskopische Aufnahme bei 30-facher Vergrößerung von Glimmerpartikeln, die mit poliertem Graphit der Sorte Graphit T1 beschichtet wurden ($\epsilon = 0,916$). Die Polierdauer betrug sechs Stunden

Obwohl Bild 40 bis Bild 41 zeigen, dass der Graphit gut auf den Glimmerpartikeln haftet und an verschiedenen Stellen poliert ist, konnte auch durch eine Polierdauer von 6 Stunden keine signifikante Absenkung des Emissionskoeffizienten herbeigeführt werden.

2.2.2.2. Graphitauftrag während der Extrusion

Um den Graphit bereits während des Extrusionsprozesses im Inneren der frisch gepressten Rohlinge aufzubringen und dabei gleichzeitig zu polieren, wurden entsprechende Versuche durchgeführt.

Im Folgenden wurden Vorversuche mit verschiedenen Graphitsorten durchgeführt, um zu prüfen, ob sich Graphit auf Tonoberflächen aufpolieren lässt (Tabelle 2). Hierfür wurden Würfel aus plastifiziertem Ton (Wassergehalt 18 Gew.-%) auf einer Kunststoffplatte aus Polyoxymethylen (POM) unter Druck (manuelles Andrücken) entlang gezogen. Die Platte wurde hierfür wahlweise befeuchtet oder trocken belassen. Auf die Platte wurden jeweils

unterschiedliche Graphitsorten aufgedudert und anschließend der plastische Tonwürfel auf diese Schicht aufgesetzt und entlang der Platte gezogen. Nach der vollständigen Trocknung an Luft und im Trockenschrank wurden die Tonwürfel einem Reduktionsbrand mit einer Aufheizzeit von 27 Stunden und einer Haltezeit bei 900 °C Garbrandtemperatur von drei Stunden unterzogen. Die reduzierende Atmosphäre während des keramischen Brandes wird benötigt, um zu verhindern, dass der Graphit infolge eines Sauerstoffgehaltes in der Brennatmosphäre zu CO und CO₂ oxidiert wird. Die Emissionskoeffizienten der Beschichtungen wurden jeweils vor- und nach dem Brand ermittelt (Tabelle 2).

Tabelle 2: Emissionskoeffizienten graphitbeschichteter Ziegelproben. Der Graphit wurde durch einen Reib- und Poliervorgang auf die plastischen Tonproben aufgebracht. Anschließend erfolgte ein Reduktionsbrand bei 900 °C

Probennummer	Graphitsorte	Zustand Graphit	Beschichtung	Emissionskoeffizient ϵ vor Brand	Emissionskoeffizient ϵ nach Brand
1	SGA 20,99	trocken	dick	0,790	0,900
2	SGA 20,99	trocken	dünn	0,826	0,907
3	Graphit MIX 2	trocken	dick	0,665	0,735
4	Graphit MIX 2	trocken	dünn	0,806	0,863
5	EDM 96-97	trocken	dick	0,761	0,856
6	EDM 96-97	trocken	dünn	0,735	0,979
7	EDM 96-97	nass	sehr dünn	0,900	0,917
8	EDM 90-92	trocken	dick	0,735	0,764
9	EDM 90-92	trocken	dünn	0,761	0,870
10	Graphit T1	trocken	dünn	0,637	0,743
11	Graphit T1	trocken	dick	0,663	0,761
12	Graphit T1	nass	dick	0,725	0,783
13	Graphit T1	trocken	dick	0,633	0,68
14	Goldbronzepulver Luminor 2210	trocken	dünn	0,673	0,92

Wie aus Bild 42 bis Bild 43 erkennbar, bleibt die Graphitschicht während des Brandes in reduzierender Brennraum-Atmosphäre erhalten. Durch das Reiben entlang der

Kunststoffplatte konnte bei einigen Proben in Abhängigkeit von der Graphitsorte eine teilweise polierte Oberfläche erzeugt werden (Bild 43).

Ein Ergebnisvergleich (Tabelle 2) zeigt in allen Fällen eine Zunahme des Emissionskoeffizienten nach dem keramischen Brand in reduzierender Atmosphäre.

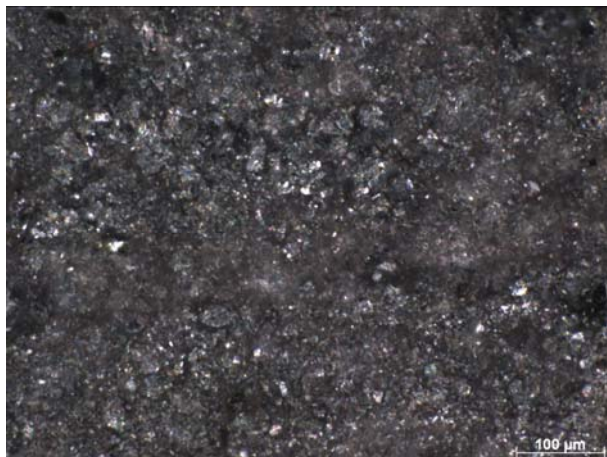


Bild 42: Graphitbeschichtete Ziegelprobe 7 nach Reduktionsbrand im Auflichtmikroskop bei 200-facher Vergrößerung. Die Beschichtung erfolgte mit der Graphitsorte EDM 96/97 (nass aufpoliert). Der Emissionskoeffizient betrug $\varepsilon = 0,917$

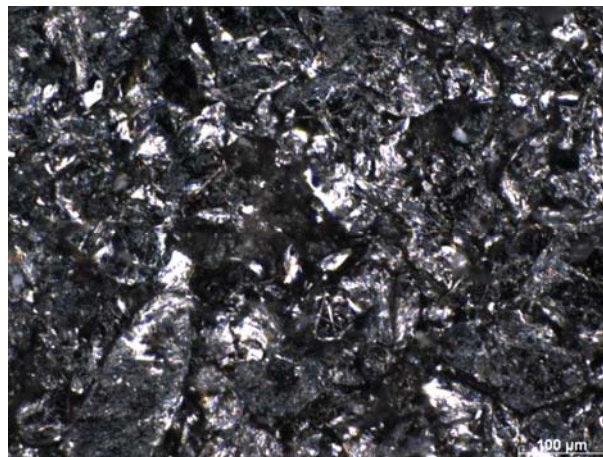


Bild 43: Graphit-beschichtete Ziegelprobe 10 nach Reduktionsbrand im Auflichtmikroskop bei 200-facher Vergrößerung. Die Beschichtung erfolgte mit der Graphitsorte Graphit T1 (trocken aufpoliert). Der Emissionskoeffizient betrug $\varepsilon = 0,743$

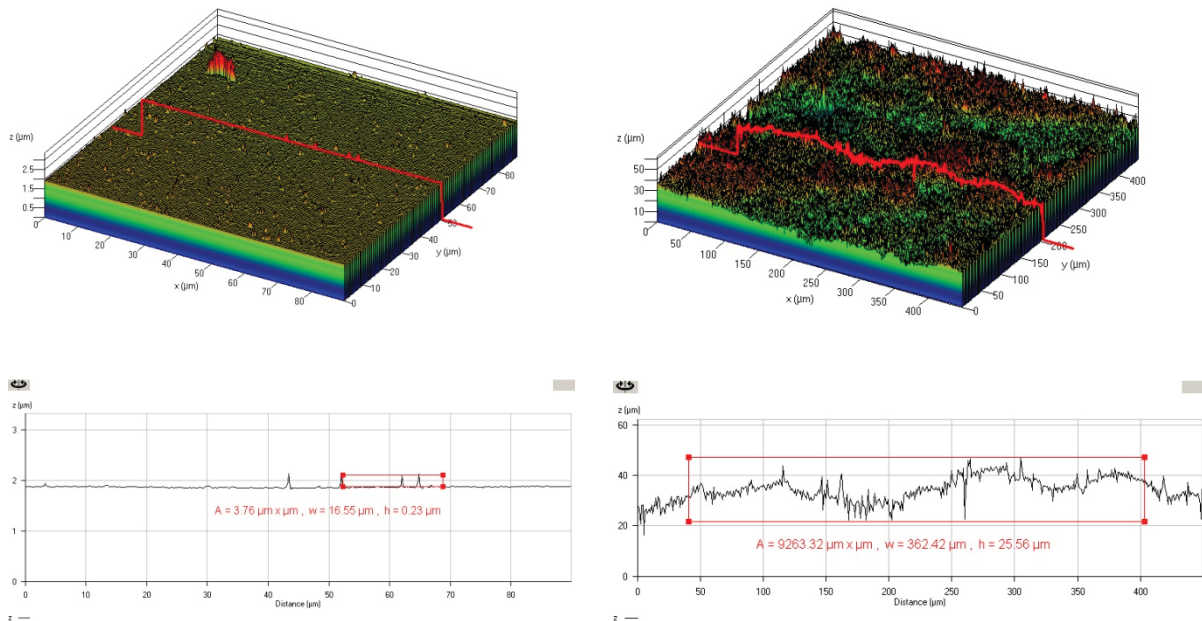
Da jedoch die unbeschichtete Ziegeloberfläche einen Emissionskoeffizienten von $\varepsilon = 0,95$ aufweist und die Beschichtung mit Graphit T1 nach dem keramischen Brand einen Wert von $\varepsilon = 0,68$ aufweist, kann durch die so applizierte Graphitbeschichtung eine Minderung des Emissionskoeffizienten von immerhin $\Delta\varepsilon = 0,27$ erzielt werden

2.2.3. Metallische Dünnschichten

Die hier verwendeten metallischen Beschichtungen wurden u.a. durch „Sputtern“ aufgebracht. Das „Besputtern“ von Ziegel- und Glasproben erfolgte mittels des Geräts Sputter Coater Standardmodell E 5000 der Firma Dr. Walter Hert Mikrotechnik GmbH. Als Target-Materialien wurden Gold, Silber und Nickel verwendet. Um unterschiedliche Schichtdicken zu erreichen, wurden Sputterzeiten von 60, 120 und 180 Sekunden (s) eingestellt. Die Oberflächen der zu beschichtenden Glas- und Ziegelsubstrate wurden vor und nach der Beschichtung mittels Laser-Scanning-Mikroskop (LSM) optisch charakterisiert. Hierbei wird ein deutlicher Unterschied der Substrate in Bezug auf deren Oberflächenrauigkeit ersichtlich. Das unbeschichtete Glassubstrat in Bild 44 zeigt eine sehr geringe Oberflächenrauigkeit von $0,5 \mu\text{m}$ und eine homogene Oberflächenstruktur. Eine weitaus höhere Oberflächenrauigkeit von im Mittel $41 \mu\text{m}$ konnte für ein poliertes, unbeschichtetes Ziegelsubstrat ermittelt werden. Die sehr unterschiedliche Oberflächenrauigkeit der Substrate aus Ziegel und Glas wird sowohl aus den LSM-

Aufnahmen, als auch aus den abgetasteten Oberflächenprofilen ersichtlich. Aus dem Oberflächenprofil können die Rauigkeiten der Oberfläche direkt abgelesen werden.

Ein Vergleich der Proben nach der Beschichtung mit Gold zeigt, dass diese Unterschiede in der Oberflächenrauigkeit auch nach einer Sputter-Beschichtung bestehen bleiben. Die nachfolgenden Aufnahmen mit dem Laser-Scanning-Mikroskop (LSM) zeigen einen deutlichen Unterschied beider Probenoberflächen (Glas und Ziegel) bei einer Beschichtungsdauer von 180 sec (Bild 44 und Bild 45).



*Bild 44: LSM-Aufnahme und Auswertung der Oberflächenrauigkeiten eines **Glassubstrates** nach einer Beschichtung mit **Gold** mittels Sputtern (Beschichtungsdauer 180 Sekunden)*

*Bild 45: LSM-Aufnahme und Auswertung der Oberflächenrauigkeiten eines **Ziegelsubstrates** nach einer Beschichtung mit **Gold** mittels Sputtern (Beschichtungsdauer 180 Sekunden)*

Wie aus den Oberflächenscans ersichtlich, beträgt die Oberflächenrauigkeit des Glassubstrates auch nach der Sputterbeschichtung mit Gold $0,23\ \mu\text{m}$. Die Oberflächenrauigkeit des Ziegelsubstrates wurde durch die Sputterbeschichtung mit Gold von $41\ \mu\text{m}$ auf $25\ \mu\text{m}$ vermindert. Dennoch zeigt das goldbeschichtete Ziegelsubstrat damit eine 100-fach höhere Oberflächenrauigkeit, als das goldbeschichtete Glassubstrat.

Weitere Beschichtungen wurden unter gleichen Versuchsbedingungen mit Silber durchgeführt. Diese Proben wurden ebenfalls optisch mittels dem Laser-Scanning-Mikroskop charakterisiert (Bild 46 und Bild 47).

Bei den mit Silber beschichteten Proben wurde die Oberflächenrauigkeit des Ziegelsubstrates bei einer Beschichtungsdauer von 180 Sekunden von $41\ \mu\text{m}$ auf $27\ \mu\text{m}$ vermindert. Diese Verminderung der Oberflächenrauigkeit des Ziegelssubstrates ist mit der durch Sputterbeschichtung mit Gold erreichten Verminderung vergleichbar. Die Oberflächenrauigkeit des Glassubstrates wird auch bei Sputter-Beschichtung mit Silber nicht beeinflusst und liegt nach der Beschichtung bei $0,23\ \mu\text{m}$. Es wird ersichtlich, dass auch

bei Sputterbeschichtung des Ziegelsubstrates mit Silber die Oberflächenrauigkeit 100-fach höher liegt, als bei dem Glassubstrat. Diese Unterschiede in der Oberflächenrauigkeit der beiden Substrate (Glas und Ziegel) wirken sich auch auf die Emissionskoeffizienten der Substrate aus.

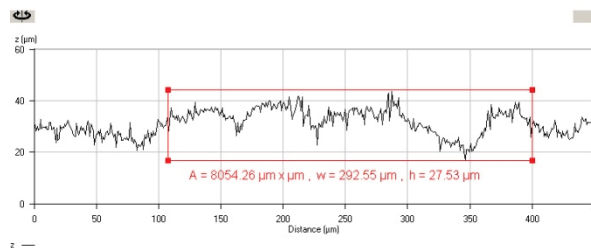
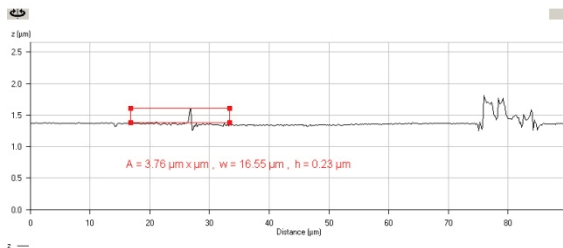
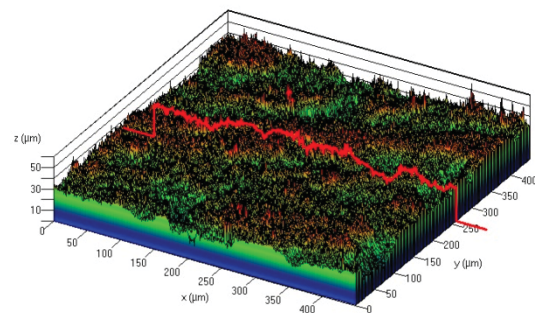
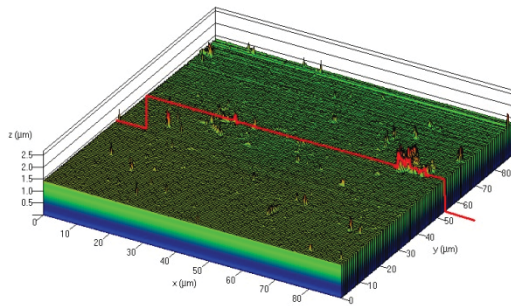


Bild 46: LSM-Aufnahme und Auswertung der Oberflächenrauigkeiten eines **Glassubstrates** nach einer Beschichtung mit **Silber** mittels Sputtern (Beschichtungsdauer 180 Sekunden)

Bild 47: LSM-Aufnahme und Auswertung der Oberflächenrauigkeiten eines **Ziegelsubstrates** nach einer Beschichtung mit **Silber** mittels Sputtern (Beschichtungsdauer 180 Sekunden)

Weitere Beschichtungen wurden unter gleichen Versuchsbedingungen mit Nickel durchgeführt. Diese Proben wurden ebenfalls optisch mittels Laser-Scanning-Mikroskop charakterisiert (Bild 48 und Bild 49).

Werden die Oberflächenrauigkeiten der mit Nickel besputterten Glas- und Ziegelsubstrate verglichen, wird auch hier ein deutlicher Unterschied ersichtlich. Während die Oberflächenrauigkeit der Glasprobe nach einem Sputtervorgang mit Nickel für 180 Sekunden geringfügig von $0,23\ \mu\text{m}$ auf $0,32\ \mu\text{m}$ erhöht wurde, wurde die Oberflächenrauigkeit der Nickelbeschichteten Ziegelprobe kaum vermindert. Die Oberflächenrauigkeit dieser Probe konnte nach einer Sputterbeschichtung von 180 Sekunden mit Nickel lediglich von $41\ \mu\text{m}$ auf $40\ \mu\text{m}$ vermindert werden.

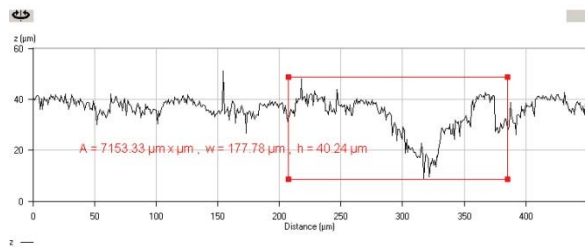
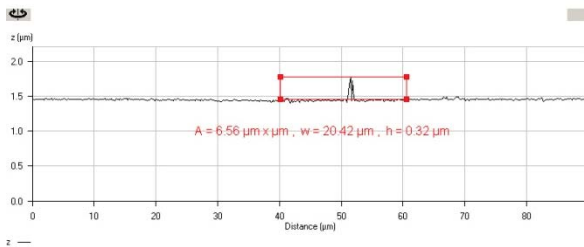
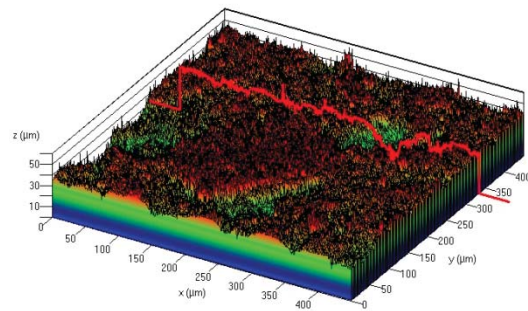
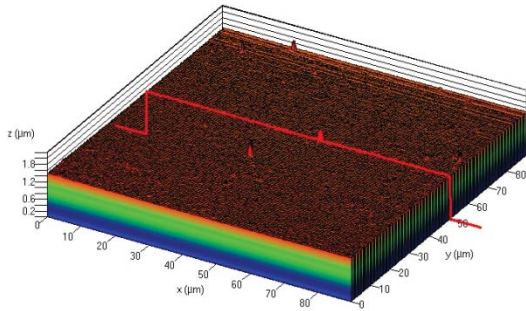


Bild 48: LSM-Aufnahme und Auswertung der Oberflächenrauigkeiten eines **Glassubstrates** nach einer Beschichtung mit **Nickel** mittels Sputtern (Beschichtungsdauer 180 Sekunden)

Bild 49: LSM-Aufnahme und Auswertung der Oberflächenrauigkeiten eines **Ziegelsubstrates** nach einer Beschichtung mit **Nickel** mittels Sputtern (Beschichtungsdauer 180 Sekunden)

Die so beschichteten Glas- und Ziegelsubstrate wurden auf ihre Emissionskoeffizienten untersucht (Bild 50). Daraus geht hervor, dass sich bei den mit Gold, Silber und Nickel beschichteten Glas-Substraten der Emissionskoeffizient ϵ mit steigender Beschichtungszeit im Vergleich zur Nullprobe verringert.

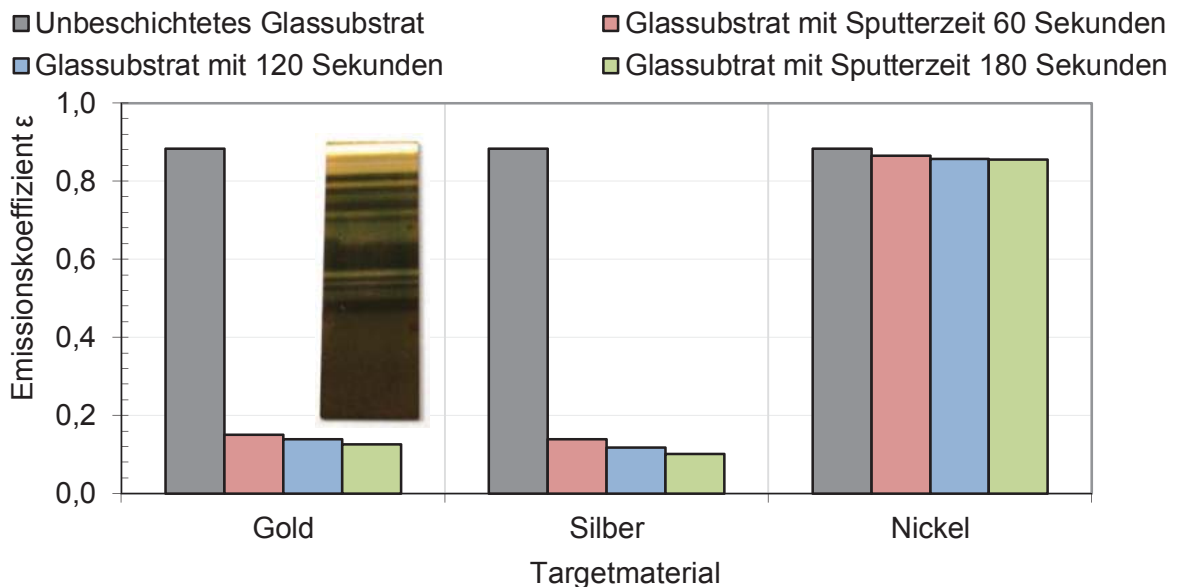


Bild 50: Emissionskoeffizienten von Glassubstraten, welche mit Gold, Silber und Nickel für 60, 120 und 180 Sekunden durch Sputtern beschichtet wurde, im Vergleich mit der unbeschichteten Glas-Nullprobe

Wird ein Glassubstrat über einen Zeitraum von 60 Sekunden mit Gold besputtert, verringert sich der Emissionskoeffizient von $\varepsilon = 0,884$ auf $\varepsilon = 0,151$. Nach einer Sputterzeit von 120 Sekunden wird der Emissionskoeffizient auf $\varepsilon = 0,139$ herabgesetzt und nach einer Sputterzeit von 180 Sekunden sogar auf $\varepsilon = 0,126$ vermindert.

Bei den mit Silber besputterten Glassubstraten wird nach einer Beschichtungszeit von 60 Sekunden ein Emissionskoeffizient von $\varepsilon = 0,140$ erreicht. Wird für eine Dauer von 120 Sekunden beschichtet, mindert sich der Emissionskoeffizient auf $\varepsilon = 0,119$ und nach einer Sputterzeit von 180 Sekunden wird sogar ein Wert von $\varepsilon = 0,102$ erzielt.

Im Falle einer Beschichtung mit Nickel ist keine Minderung der Wärmeübertragung durch Strahlung zu erwarten.

Gleichzeitig zu den Glassubstraten wurden auch Ziegelsubstrate beschichtet, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu ermöglichen. Bild 51 zeigt die Emissionskoeffizienten nach der Beschichtung der Ziegelproben im Vergleich mit der unbeschichteten Ziegel-Nullprobe.

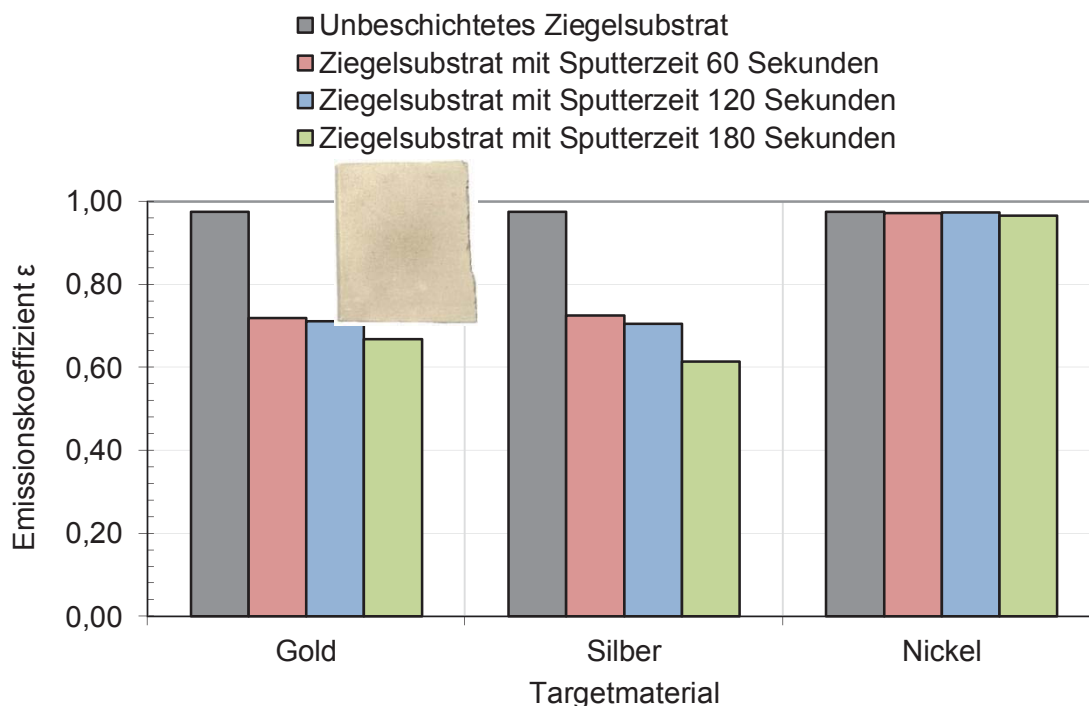


Bild 51: Emissionskoeffizienten von Ziegelsubstraten, welche mit Gold, Silber und Nickel für 60, 120 und 180 Sekunden durch Sputtern beschichtet wurden, im Vergleich mit der unbeschichteten Ziegel-Nullprobe

Aus einem Wertevergleich (Bild 50 und Bild 51) geht hervor, dass der Emissionskoeffizient bei der Beschichtung von Ziegeloberflächen im Vergleich zu den Glassubstraten vergleichsweise nicht so stark abgesenkt wird. Werden Ziegeloberflächen über einen Zeitraum von 60 Sekunden mit Gold besputtert, so sinkt der Emissionskoeffizient von $\varepsilon = 0,976$ auf $\varepsilon = 0,719$. Bei Erhöhung der Beschichtungszeit auf 120 Sekunden bzw. 180 Sekunden sinkt der Emissionskoeffizient auf $\varepsilon = 0,712$ bzw. $\varepsilon = 0,668$.

Werden Ziegelsubstrate über einen Zeitraum von 60 Sekunden mit Silber besputtert, so sinkt der Emissionskoeffizient auf $\varepsilon = 0,725$. Bei einer Sputterzeit von 120 Sekunden bzw. 180 Sekunden werden die Werte auf $\varepsilon = 0,705$ bzw. $\varepsilon = 0,615$ abgesenkt.

Die Ziegelbeschichtung mit Nickel führt analog zur Glasbeschichtung mit Nickel zu keiner gravierenden Minderung der Emissionskoeffizienten.

In einem weiteren Versuch wurde die Sputterzeit für Ziegelsubstrate unter Verwendung von Gold als Targetmaterial schrittweise auf 1080 Sekunden erhöht. Dabei erfolgte eine Berechnung der abgeschiedenen Goldschichtdicke nach Angaben des Geräteherstellers. Aus Bild 52 geht hervor, dass mit zunehmender Goldschichtstärke der Emissionskoeffizient ε zwar absinkt, aber schließlich weitestgehend konstant bleibt.

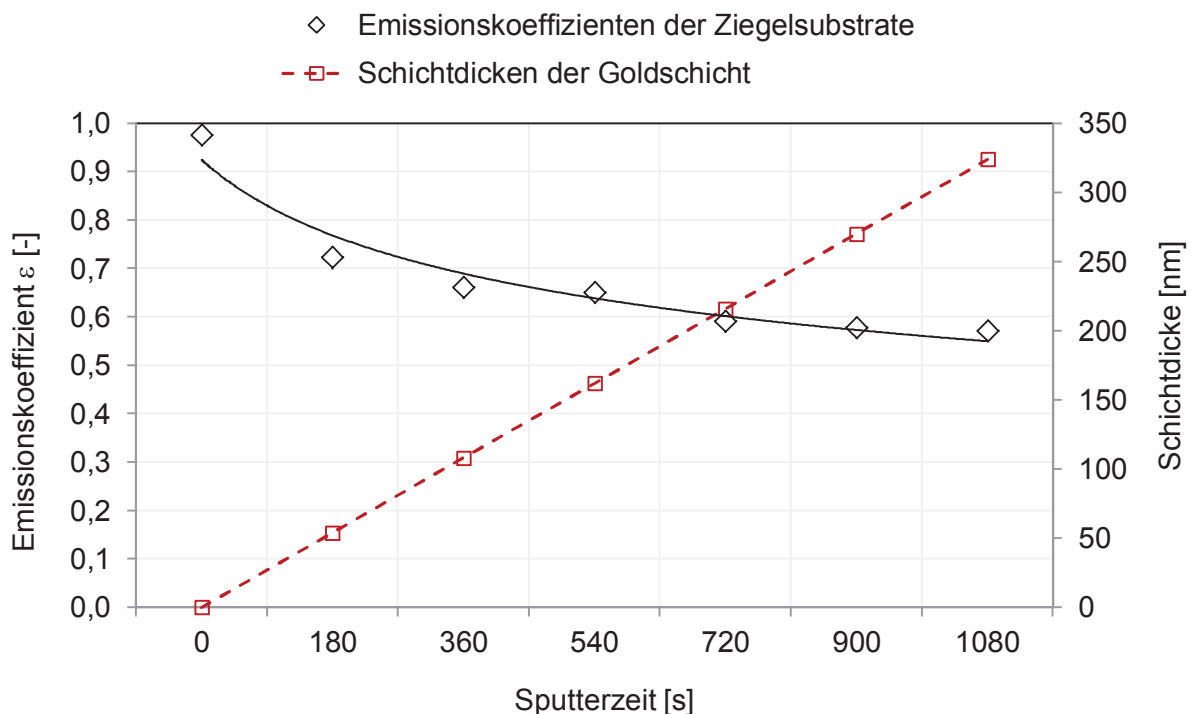


Bild 52: Minderung des Emissionskoeffizienten einer mit Gold besputterten Ziegeloberfläche bei schrittweiser Erhöhung der Sputterzeit auf 1080 Sekunden im Vergleich mit einer unbeschichteten Ziegel-Nullprobe (dunkelgrau)

Darüber hinaus zeigt Bild 52, dass die Absenkung des Emissionskoeffizienten der Ziegelsubstrate durch Erhöhung der Sputterdauer in Sekunden immer geringer wird, während die aufgebrauchte Schichtdicke an Gold linear ansteigt. Bei einer Dauer des Sputtervorgangs von 180 Sekunden kann der Emissionskoeffizient von $\varepsilon = 0,976$ (unbesputterte Ziegelprobe) auf $\varepsilon = 0,724$ vermindert werden. Die Verminderung des Emissionskoeffizienten wird bei jeder Erhöhung der Sputterdauer um 180 Sekunden trotz linearer Zunahme der Schichtdicke immer geringer. Bei einer Erhöhung der Sputterdauer von 900 Sekunden auf 1080 Sekunden beträgt der Unterschied im Emissionskoeffizienten

nur noch $\Delta\varepsilon = 0,007$. Eine weitere Erhöhung der Sputterdauer ist nicht mehr sinnvoll. Um einen Emissionskoeffizienten von $\varepsilon = 0,571$ zu erreichen, war eine Sputterdauer von 1080 Sekunden und damit eine Goldschichtdicke von $d = 324$ nm nötig.

Es kann angenommen werden, dass durch die hohe Oberflächenrauigkeit der Ziegelsubstrate, diese im Vergleich zu den Glassubstraten weniger infrarote Strahlung reflektieren. Aufgrund der benötigten Menge an Gold und der damit verbundenen Kosten ist diese Beschichtungsmethode für Hochlochziegel ungeeignet. Darüber hinaus sollte beachtet werden, dass durchgehende Metallschichten über sehr hohe Wärmeleitfähigkeiten verfügen und die äquivalente Wärmeleitfähigkeit des Ziegels negativ beeinflussen werden.

2.2.4. Elektrisch leitfähige Oxidschichten

Im weiteren Verlauf der Untersuchungen erfolgte eine Applikation dünner Halbleiterschichten auf Glas- und Ziegelsubstrate mittels Pyrolysolverfahren. Die Vorgehensweise wird nachfolgend beschrieben.

Nach (Dien, et al., 1999) sind die häufigsten zur Herstellung von TCO-Schichten (Transparent Conductive Oxide) benutzten Verfahren Bedampfen, Sputtern, reaktives Ionenplattieren, die Dipptechnik und die chemische Gasphasenabscheidung (CVD). Die angegebene Literaturstelle erwähnt, dass das CVD-Verfahren das vielversprechendste Herstellungsverfahren ist, da hier unter Normaldruck gearbeitet werden kann und es sich auch für große zu beschichtende Oberflächen eignet. Nach (Veluchamy, et al., 2001) ist das Pyrolysolverfahren zur Herstellung von TCO-Schichten ein einfacher und in einer industriellen Produktion handhabbarer Prozess. Als Pyrolysolverfahren wird die Spaltung organischer Verbindungen durch Hitze bezeichnet. Diese Spaltung kann entweder direkt auf dem heißen Substrat oder kurz davor in einer Grenzschicht erfolgen. Für einen möglichst konstanten Schichtauftrag sind kleine Sprühmengen und eine geringe Sprühzeit zu beachten. Bei erhöhten Sprühmengen kommt es zur Abkühlung des Substrates und damit zu einer negativen Beeinflussung der Beschichtung. Für eine homogene Schicht sind konstante Substrattemperaturen nötig. Zudem kommt es bei größeren Sprühmengen zur Bildung unerwünscht großer Tropfen auf der Oberfläche und damit zu einer inhomogenen Schichtdicke. Im günstigsten Fall liegt die Sprühmenge zwischen 25 und 30 ml/min bei Sprühzeiten von 10 bis 20 Sekunden. Dabei laufen folgende Reaktionsschritte ab (Agashe, 1996):

1. Zinnchloridreaktion: $\text{SnCl}_4 + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{SnO}_2 + 4 \text{HCl} \uparrow$
2. Ammoniumfluoridreaktion: $\text{NH}_4\text{F} \rightarrow \text{NH}_3 \uparrow + \text{HF} \uparrow$
3. Reaktion beider Reaktionspartner: $\text{SnO}_2 + 4 \text{HF} \rightarrow \text{SnF}_4 \uparrow + 2 \text{H}_2\text{O} \uparrow$

Nach jedem Sprühvorgang muss das Substrat zunächst wieder die notwendige Temperatur

erreichen, bevor ein neuer Beschichtungsvorgang durchgeführt werden kann. Die Substrattemperatur sollte dabei unter der Zersetzungstemperatur der Ausgangsstoffe in der Beschichtungslösung liegen. Um eine dickere Schicht zu erzeugen, sind mehrere Sprühdurchgänge nötig. Die Konzentration der Ausgangsstoffe in der Lösung, die verwendeten Komplexbildner sowie die Sprühraten und Sprühzeiten haben ebenfalls einen entscheidenden Einfluss auf die endgültigen Eigenschaften der Beschichtung (Nascu, 2004). Der Ansatz für die Sprühyrolyse (Pyrolysolverfahren) mit dem Halbleiter Fluor-dotiertes Zinnoxid (FTO, fluorine doped tin oxide) wurde nach dem von Russo (Russo, 2008) beschriebenen Verfahren hergestellt. Die Lösung wird in eine Airbrushvorrichtung gegeben, welche eine feine Zerstäubung der Lösung ermöglicht. Das Aufsprühen dieser Lösung erfolgt auf den auf eine Temperatur von 440 °C getemperten Ziegel, der sich in einem Ofen befand. Das Aufheizen von Raumtemperatur auf 440 °C erfolgt innerhalb von 3 Stunden. Anschließend wird diese Temperatur über einen Zeitraum von weiteren 2,5 Stunden gehalten. Während dieses Zeitraums findet die Sprühbeschichtung statt. Die Beschichtung ist mit bloßem Auge an einer Verfärbung der Oberfläche und Interferenzerscheinungen erkennbar (Bild 53). Unter dem Raster-Elektronen-Mikroskop kann die Schicht aus Fluor-dotiertem-Zinnoxid sichtbar gemacht werden (Bild 54). Es wird ersichtlich, dass die Beschichtung aus einzelnen Partikeln besteht, welche an der Oberfläche der Probe versintert sind.

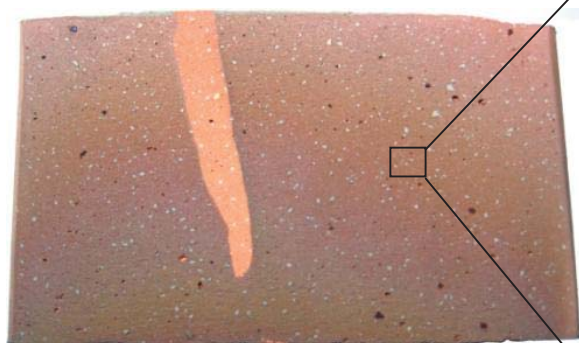


Bild 53: Ziegelsubstrat mit einer Beschichtung aus Fluor-dotiertem-Zinnoxid (FTO). Die Oberfläche war teilweise mit einem Stück Aluminiumoxid abgedeckt (heller Streifen)

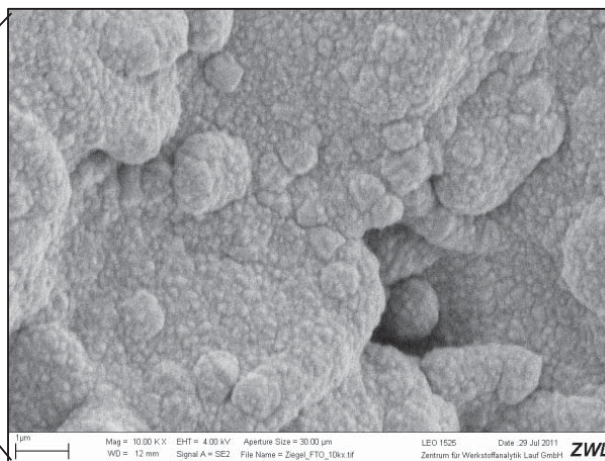


Bild 54: REM-Aufnahme eines mit Fluor-dotiertem-Zinnoxid (FTO) beschichteten Ziegelsubstrates bei 10k-facher Vergrößerung. Die FTO-Schicht wurde mit dem Pyrolysolverfahren (Russo, 2008) bei einer Temperatur von 440 °C hergestellt

Durch diese Nanobeschichtung kann die Oberflächenrauigkeit der Ziegeloberfläche nicht reduziert werden. Mit der beschriebenen Vorgehensweise erfolgte eine ganze Reihe von Beschichtungen, wobei die Schichtstärke über den gewählten Beschichtungszeitraum variiert wurde. Dabei wurden auch Glasproben (Objekträger) mit der FTO-Schicht ausgerüstet. Nach den Beschichtungen wurde der spezifische elektrische Oberflächenwiderstand der

aufgebrachten FTO-Beschichtung mittels der sogenannten Vier-Spitzen-Methode (Van-der Pauw) ermittelt. Dieser wurde von $\rho_s = 10^{13} \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ der unbeschichteten Ziegelprobe auf $\rho_s = 20 \Omega$ bei der FTO-beschichteten Ziegelprobe abgesenkt. Gleichzeitig konnte der Emissionskoeffizient von $\varepsilon = 0,97$ auf $\varepsilon = 0,70$ bei maximaler FTO-Schichtstärke abgesenkt werden. Der gleiche Effekt zeigte sich bei den FTO-Beschichtungen der Glasproben. Während unbeschichtete Glasproben einen spezifischen elektrischen Oberflächenwiderstand von $\rho_s = 10^{11} \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ aufweisen, zeigten die FTO-beschichteten Glasproben Werte von $\rho_s = 0,5 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ bis $\rho_s = 5 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$. Dabei wurde der Emissionskoeffizient von $\varepsilon = 0,884$ der unbeschichteten Glasproben auf Werte zwischen $\varepsilon = 0,16$ bis $\varepsilon = 0,21$ der FTO-beschichteten Glassproben abgesenkt.

Aus der Untersuchung geht hervor, dass elektrische Nichtleiter wie Ziegel- oder Glasoberflächen durch FTO-Beschichtungen mit einer gewissen elektrischen Leitfähigkeit ausgerüstet werden können. Mit Zunahme der elektrischen Leitfähigkeit nimmt gleichzeitig der Emissionskoeffizient ab.

2.2.5. Zusammenhang Emissionskoeffizient und elektrische Leitfähigkeit

Im weiteren Verlauf der Untersuchungen wurde der mittels der 4-Spitzen-Methode (Van-der Pauw) gemessene spezifische elektrische Widerstand ausgewählter Beschichtungen ermittelt und daraus der spezifische Oberflächenwiderstand berechnet.

2.2.5.1. Spezifischer Oberflächenwiderstand ausgewählter Pigmente

Aus der Untersuchung (Bild 55) geht hervor, dass kein unmittelbarer Zusammenhang zwischen spezifischem Oberflächenwiderstand und elektrischer Leitfähigkeit der Beschichtungen mit Pigmenten hergestellt werden kann.

Dies kann damit begründet werden, dass die Spitzen des Messgerätes die weicheren Pigmentschichten leicht durchstechen können und somit zum Teil auf dem Glassubstrat aufliegen. Da das Messgerät mit einem leichten Anpressdruck auf dem zu messenden Substrat aufgelegt werden muss, war ein Durchstechen der dünnen Pigmente nicht zu vermeiden. Darüber hinaus weisen die hier untersuchten Pigmente sehr unterschiedliche Korngrößen auf, so dass die elektrische Leitfähigkeit bei manchen Pigmenten über mehrere Korngrößen hinweg gemessen wird, während bei anderen Pigmenten mit sehr großen Korngrößen innerhalb eines einzigen plättchenförmigen Pigmentes gemessen wird. Die Pigmente „Goldbronzeflitter 1000-01 Reichgold“ und „Goldbronzeflitter 1000-01 Kupfer“ liegen mit ihren Korngrößen im mm-Bereich vor. Bei diesen Pigmenten ist es wahrscheinlich, dass der elektrische Oberflächenwiderstand eines einzelnen Pigmentpartikels erfasst wurde. Die Messung des spezifischen Widerstandes gestaltete sich deshalb bei pigmentierten Beschichtungen schwierig. Aus dem spezifischen Oberflächenwiderstand wurde der

Flächenwiderstand berechnet. Ein direkter (linearer) Zusammenhang zwischen dem Flächenwiderstand und dem Emissionskoeffizienten der Pigmente ist nicht zu erkennen (Bild 55). Es zeigt sich aber ein niedriger Emissionskoeffizient bei geringem spezifischem Oberflächenwiderstand.

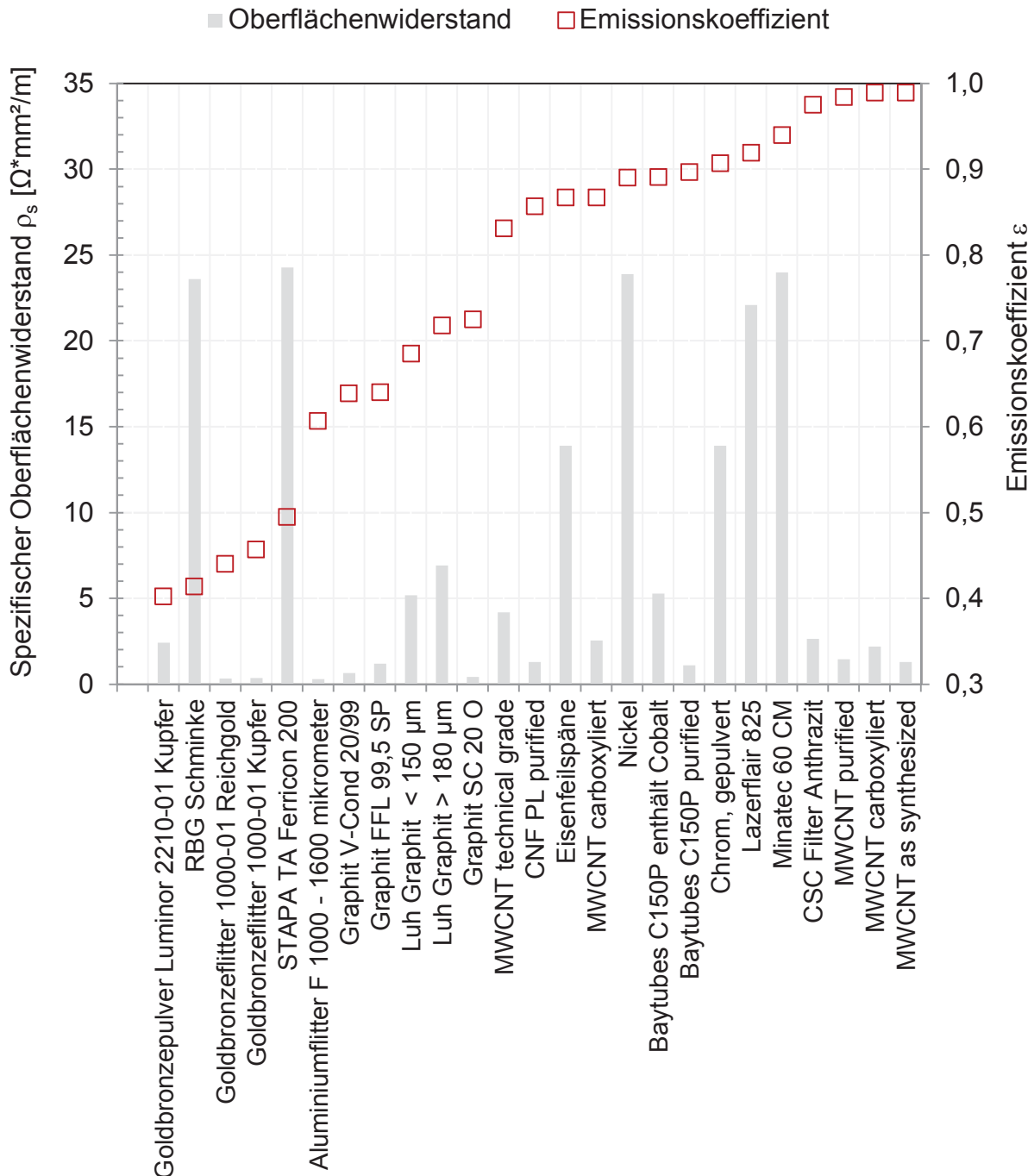


Bild 55: Zusammenhang zwischen Emissionskoeffizient und spezifischem Oberflächenwiderstand bei ausgewählten Pigmenten (detaillierte Auflistung im Anhang: Tabelle 30 bis Tabelle 44), welche auf ein mit Anlegemilch bestrichenes Glassubstrat aufgedulvert wurden

Als Ursache für diese Ergebnisse kommt die Beschaffenheit der Beschichtung in Frage. Auf den Glassubstraten befindet sich Anlegemilch als Binder, während die Pigmente an deren Oberfläche fixiert sind. Es handelt sich also nicht um ein homogenes System eines Binders,

in welchem die Pigmente eingebettet sind. Hier würden sich vermutlich deutlich andere Werte ergeben. Ein weiteres Problem können die vier Messspitzen des Widerstandsmessgeräts darstellen. Diese durchbohren teilweise die weichen Pigmente und beeinflussen somit die elektrische Widerstandsmessung entscheidend. Außerdem ist eine vollständige Kontaktierung der Pigmentteilchen untereinander bei diesem Beschichtungsverfahren nicht gegeben.

2.2.5.2. Elektrische Leitfähigkeit bei metallischen Dünnschichten

Weitere Messungen zur Bestimmung des spezifischen Oberflächenwiderstandes wurden an den geschlossenen, homogenen und mittels Sputtern aufgetragenen Silber-, Nickel- und Goldschichten durchgeführt. Aus dem spezifischen Oberflächenwiderstand kann die spezifische elektrische Leitfähigkeit der Beschichtung berechnet werden (Bild 56).

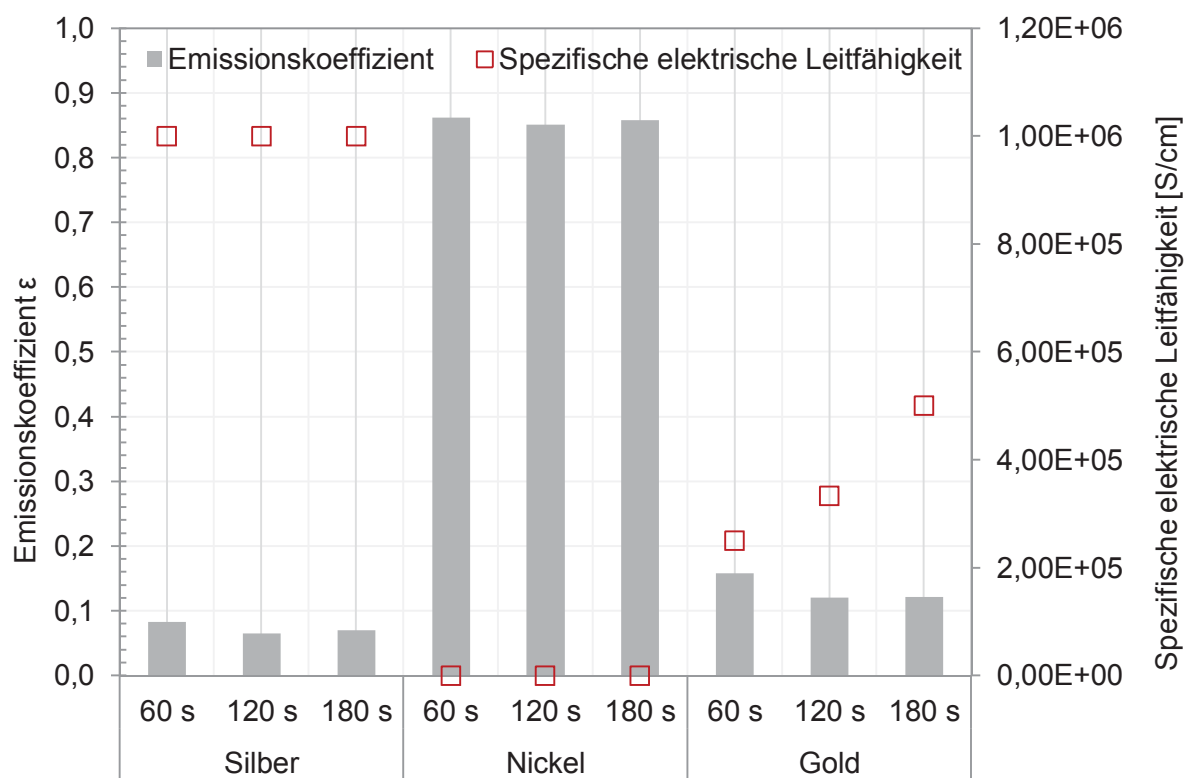


Bild 56: Zusammenhang zwischen Emissionskoeffizient und spezifischer elektrischer Leitfähigkeit von Glassubstraten, welche jeweils 60, 120 und 180 Sekunden mit Gold, Silber und Nickel besputtert wurden

Daraus geht hervor, dass für eine Absenkung des Emissionskoeffizienten eine bestimmte spezifische elektrische Leitfähigkeit benötigt wird. Diese Grenze der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit kann unmittelbar aus den dargestellten Versuchsergebnissen näherungsweise abgeleitet werden. Als Grenze wurden Emissionskoeffizienten von $\epsilon = 0,5$ und darunter gewählt. Anhand des unmittelbaren Zusammenhangs zwischen Emissionskoeffizient und elektrischer Leitfähigkeit kann die von einem Material mindestens benötigte elektrische Leitfähigkeit aus dem spezifischen Oberflächenwiderstand berechnet werden. Für

die Berechnung der Grenze der elektrischen Leitfähigkeit (Grenzleitfähigkeit) wurden die erhaltenen Ergebnisse der gesputterten Dünnschichten aus Silber, Gold und Nickel verwendet. Andere Targetmaterialien mit möglicherweise abweichender elektrischer Leitfähigkeit konnten nicht verwendet werden, da hierfür der zur Verfügung stehende Sputtercoater nicht geeignet war. Anhand der Messwerte für den Emissionskoeffizienten und der zugehörigen elektrischen Leitfähigkeiten der mit Silber, Gold und Nickel besputterten Glassubstrate konnte eine mindestens benötigte elektrische Leitfähigkeit der Beschichtung näherungsweise berechnet werden (Bild 57).

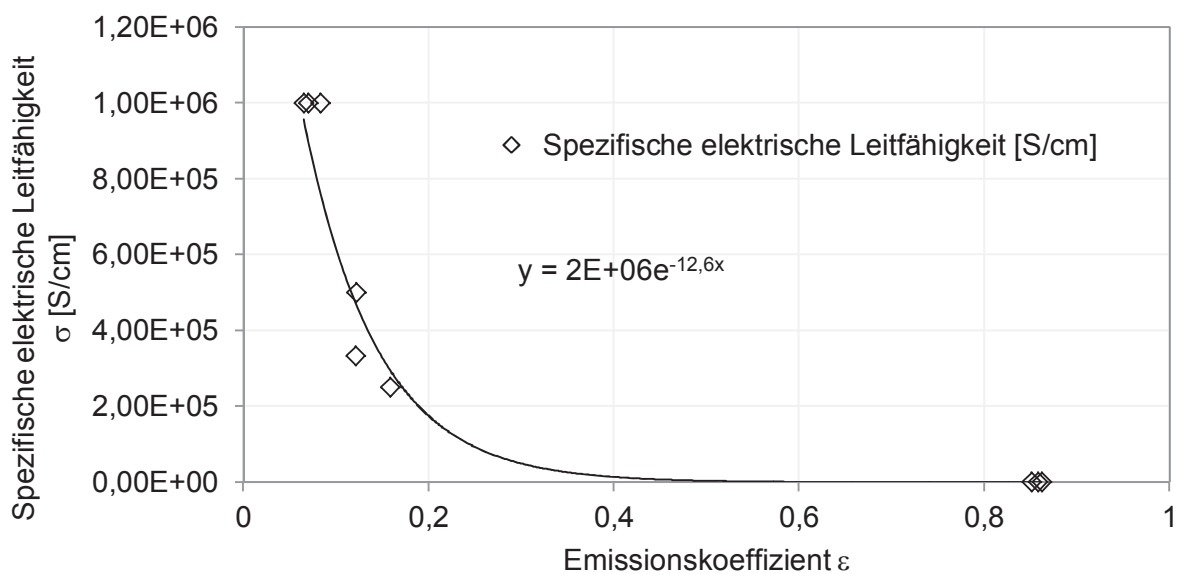


Bild 57: Spezifische elektrische Leitfähigkeit der hergestellten metallischen Dünnschichten; aufgetragen gegen den gemessenen Emissionskoeffizienten dieser Schichten

Die Grenzleitfähigkeit beträgt für einen Emissionskoeffizienten von $\epsilon = 0,5$ mindestens $\sigma = 3672$ S/cm. Für Emissionskoeffizienten unter $\epsilon = 0,5$ werden entsprechend höhere elektrische Leitfähigkeiten benötigt. Die dadurch notwendigen hohen spezifischen elektrischen Leitfähigkeiten bzw. niedrigen spezifischen Oberflächenwiderstände werden nur von Metallen und wenigen Halbleitern erreicht (Bild 58), so dass generell nur diese Materialien für eine Beschichtung in Betracht kommen können.

Die im Rahmen dieser Arbeit erhaltenen Ergebnisse für den spezifischen Oberflächenwiderstand wurden mit Literaturwerten (Lide, 2009) verglichen. Für den spezifischen Oberflächenwiderstand von Silber ist ein Wert von $\rho = 1,587 \cdot 10^{-2} \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ und für Gold ein Wert von $\rho = 2,214 \cdot 10^{-2} \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ bekannt. Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit messtechnisch ermittelten elektrischen Oberflächenwiderstände stimmen mit den Literaturwerten gut überein.

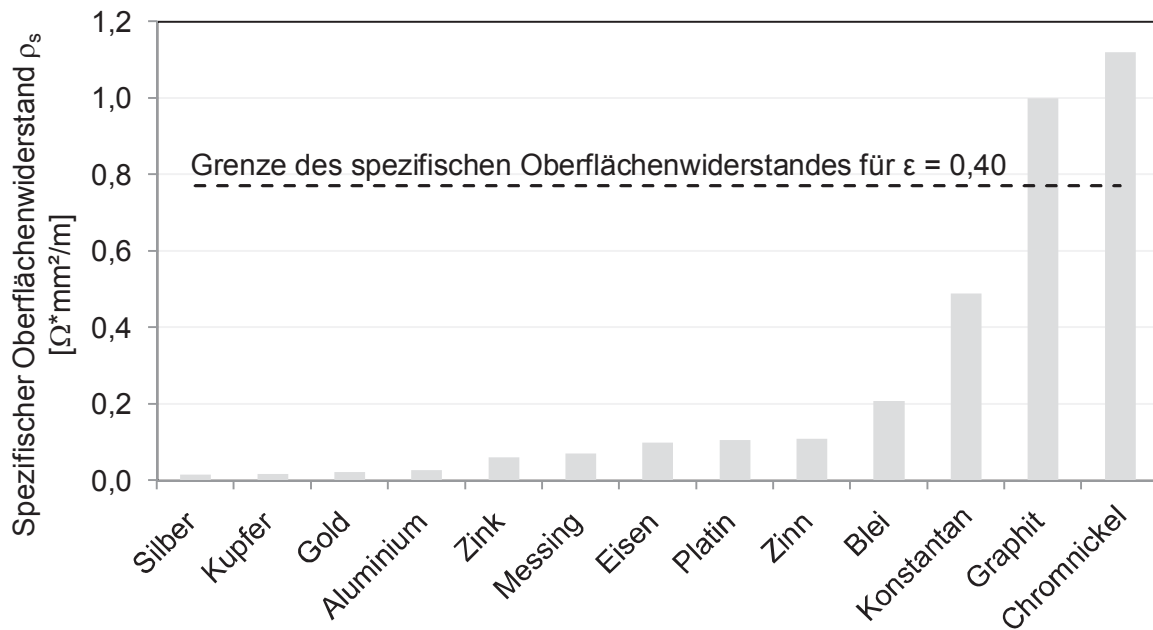


Bild 58: Spezifische Oberflächenwiderstände verschiedener Metalle und Graphit (die schwarze Linie stellt den für einen Emissionskoeffizienten von $\varepsilon = 0,4$ mindestens nötigen spezifischen Oberflächenwiderstand dar). Die Werte für den spezifischen Oberflächenwiderstand sind aus einer Veröffentlichung entnommen (Giese, et al.)

Aus Bild 58 wird ersichtlich, dass nur Metalle über einen ausreichend niedrigen spezifischen Oberflächenwiderstand verfügen, da diese unter der gestrichelten Grenzlinie liegen. Es ist zu erwarten, dass Materialien, die keinen ausreichend niedrigen spezifischen Oberflächenwiderstand aufweisen, auch über einen hohen Emissionskoeffizienten verfügen.

2.2.5.3. Spezifischer Oberflächenwiderstand bei Graphiten

Es zeigte sich, dass einige Graphite aufgrund ihrer Partikelgeometrie und ihres Aufbaus niedrige Emissionskoeffizienten von $\varepsilon = 0,924$ bis $\varepsilon = 0,466$ (Grapheniumflocken „flaggy flakes“) aufweisen. Darüber hinaus konnte festgestellt werden, dass nach geeigneter mechanischer Nachbearbeitung (Polieren) fast alle Graphitbeschichtungen einen niedrigeren Emissionskoeffizienten zeigen. Von diesen mechanisch polierten Graphitschichten wurden die Emissionskoeffizienten und die spezifischen elektrischen Oberflächenwiderstände messtechnisch ermittelt. Aus der Untersuchung wird deutlich, dass durch den mechanischen Poliervorgang der Oberflächenwiderstand der Graphitschichten deutlich abgesenkt wird (Bild 59). Die durch den mechanischen Poliervorgang erreichte Absenkung des Emissionskoeffizienten ist abhängig von der jeweiligen Graphitsorte. Die spezifischen Oberflächenwiderstände der Graphite in unpoliertem Zustand liegen zwischen $\rho_s = 5,78 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ für Graphitsorte CR 1296 und $\rho_s = 67,60 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ für Graphitsorte FDM 99,5. Mit dem Zusammenhang zwischen Emissionskoeffizient und Oberflächenwiderstand wurde berechnet, dass für einen Emissionskoeffizienten von $\varepsilon = 0,5$ mindestens ein spezifischer Oberflächenwiderstand (Grenzwiderstand) von $\rho_s = 2,72 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ benötigt

wird. Dieser niedrige spezifische Oberflächenwiderstand wurde von keinem der in Bild 59 verwendeten Graphite in unpoliertem Zustand erreicht.

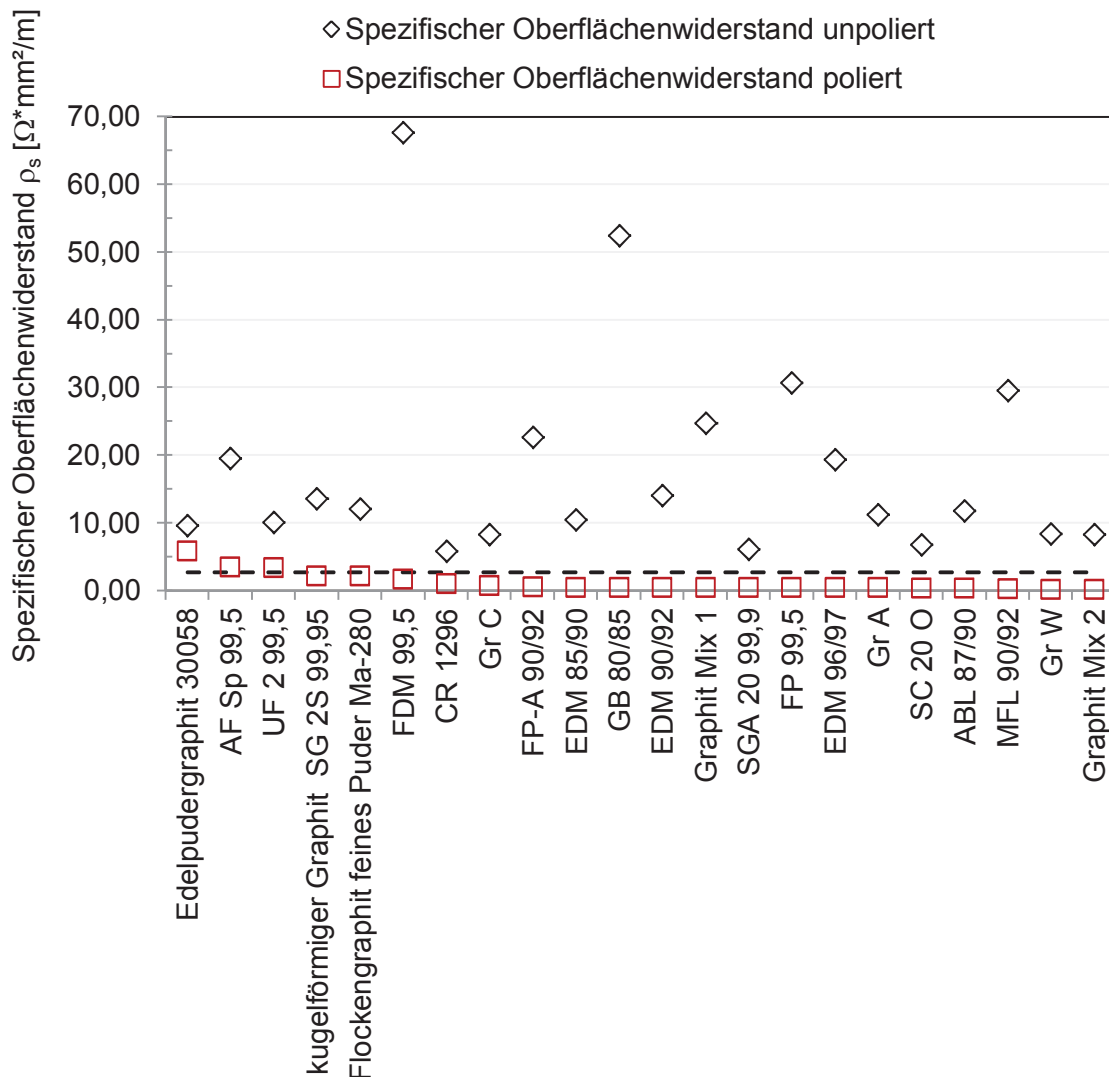


Bild 59: Spezifische Oberflächenwiderstände der in Abschnitt 2.2.2 untersuchten Graphitschichten; Vergleich der Oberflächenwiderstände in unpoliertem und poliertem Zustand (die schwarze, gestrichelte Linie stellt den für einen Emissionskoeffizienten von $\epsilon = 0,5$ mindestens nötigen spezifischen Oberflächenwiderstand $\rho_s = 2,72 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ dar)

Werden die Graphite mechanisch poliert, so sinken die spezifischen Oberflächenwiderstände auf $\rho_s = 0,16 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ für Graphit Mix 2 und bis $\rho_s = 5,76 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ für Edelpudergraphit 30058.

Aus Bild 60 wird ersichtlich, dass der in Bild 57 anhand der Messwerte aufgestellte empirische Zusammenhang zwischen spezifischer elektrischer Leitfähigkeit und Emissionskoeffizient eine gute Abschätzung für den benötigten spezifischen Oberflächenwiderstand liefert (gestrichelte Linie für $\epsilon = 0,50$).

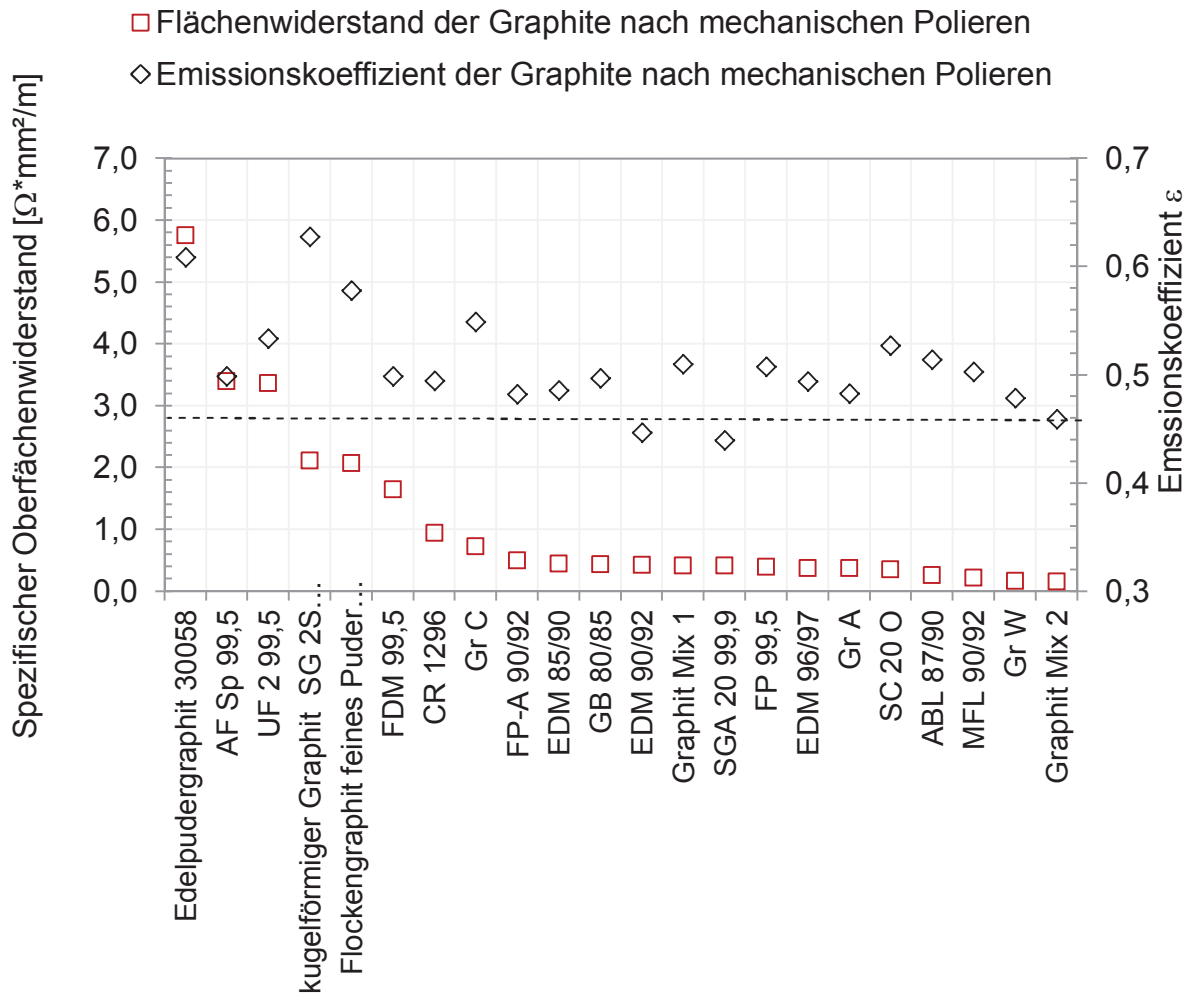


Bild 60: Spezifische Oberflächenwiderstände der untersuchten Graphitschichten; Vergleich der Oberflächenwiderstände im polierten Zustand mit den gemessenen Emissionskoeffizienten

Mit dem Zusammenhang zwischen spezifischem Oberflächenwiderstand und Emissionskoeffizient ist es demnach möglich, den spezifischen Oberflächenwiderstand zu berechnen, den ein Material benötigt, um als infrarotreflektierende Beschichtung im Bereich der Raumtemperatur eingesetzt werden zu können.

2.2.6. Pigmentgeometrie

Im Allgemeinen besitzen elektrisch leitfähige Materialien (wie Metalle und Halbmatalle) eine niedrige Emission bei gleichzeitig hoher Reflexion im Spektralbereich des mittleren Infrarots. Elektrische Isolatoren zeigen hingegen eine hohe Emission und damit eine niedrige Reflexion in diesem Spektralbereich (Siegel, et al., 1981). Dies konnte auch in den vorangegangenen Versuchen gezeigt werden. Der Emissionskoeffizient einer Beschichtung hängt maßgeblich von Binder und Pigment ab (Huijuan, et al., 2009). In einer Veröffentlichung über polymerbasierte infrarotreflektierende Lacke (Manara, et al., 2011) wird erwähnt, dass die Reflexion nicht nur von der Zugabemenge an Pigment, sondern auch

von dessen Größe und Partikelform abhängig ist.

In weiteren Untersuchungen wurde deshalb der Einfluss der durch die Pigmentgeometrie verursachten Streustrahlung auf den Emissionskoeffizienten untersucht. Aus Vorversuchen war bekannt, dass die größte Reflexion der infraroten Strahlung und damit der niedrigste Emissionskoeffizient erreicht werden, wenn die infrarote Strahlung von oberflächennahen Pigmenten reflektiert wird.

Liegt die Größe der Pigmente unterhalb der Wellenlänge des Intensitätsmaximums der zu reflektierenden infraroten Strahlung, so tritt vermehrt Streuung an den Pigmenten auf und das Reflexionsverhalten wird verschlechtert (Schramm, et al., 2007). In dem genannten Patent der Firma Merck wird erwähnt, dass auch die Dicke der Pigmente deren Reflexionseigenschaft beeinflusst.

Nachfolgend wird deshalb die Korngröße von Pigmenten und deren Einfluss auf den Emissionskoeffizienten untersucht.

Zunächst wird der Einfluss der mittleren Pigmentgröße / Korngröße / Partikelgröße (d_{50} -Wert) auf den Emissionskoeffizienten geprüft. Diese untere Grenze für die mittlere Pigmentgröße (d_{50} -Wert) kann theoretisch aus dem Intensitätsmaximum der elektromagnetischen Strahlung (in diesem Fall bei Raumtemperatur) berechnet werden. Hierzu findet das Wien'sche Verschiebungsgesetz (Gleichung 28) zur Berechnung der Wellenlänge der Strahlung in Abhängigkeit von der Temperatur des Strahlers Anwendung (Marek, et al., 2007).

$$\lambda_{\max} = \frac{2897,8 \mu\text{m} \cdot \text{K}}{T} \quad (28)$$

mit	λ_{\max}	Wellenlänge des Intensitätsmaximums der Strahlung	[μm]
	T	Temperatur	[K]

Nach dem Wien'schen Verschiebungsgesetz lässt sich für eine gegebene Temperatur unter Annahme eines „Schwarzen Strahlers“ die Wellenlänge des Intensitätsmaximums der emittierten Strahlung berechnen. Hiermit kann gezeigt werden, dass das Intensitätsmaximum der Wärmestrahlung bei Raumtemperatur zwischen 9 μm bis 10 μm liegt (Wallrabe, 2001). Ein großer Teil der Wärmestrahlung liegt auch beiderseits dieses Maximums. Dies hat zur Folge, dass Messungen des Emissionskoeffizienten außerhalb dieses Maximums eine nicht zu vernachlässigende Wirkung auf das erhaltene Signal bedeuten, da sich die integrierte Fläche ändert. Wärmequellen mit einer Temperatur von 30 °C bis 40 °C emittieren 95 % ihrer Strahlungsleistung in einem Wellenlängenbereich von 1,4 μm bis 40 μm (Czerny, et al., 1961). Unter Berücksichtigung dieser theoretischen Berechnung sollte sich das Reflexionsvermögen der Pigmente merklich verschlechtern, wenn der kritische Wert von 10 μm für die Pigmentgröße unterschritten wird. Um den Effekt zu prüfen, wurden geeignete Pigmente aus den Serien Luminor, Multiprint und Offset der Firma Schlenk, Roth eingesetzt, die

unterschiedliche Korngrößendurchmesser und Pigmentdicken aufweisen.

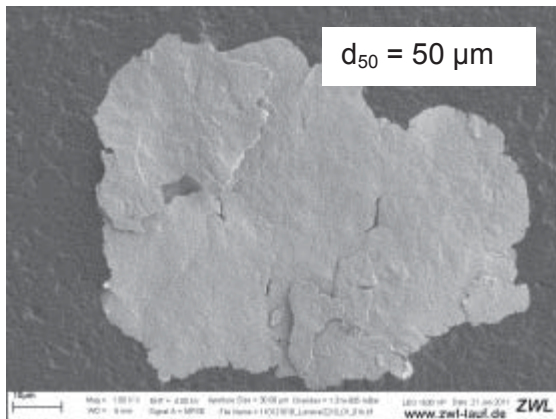


Bild 61: REM-Aufnahme eines Pigments der Bezeichnung „Goldbronzepulver Luminor 2210“ mit einer mittleren Partikelgröße von $d_{50} = 50 \mu\text{m}$ bei 1000-facher Vergrößerung

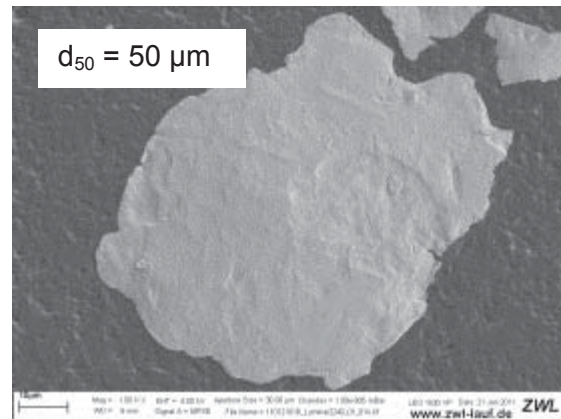


Bild 62: REM-Aufnahme eines Pigments der Bezeichnung „Goldbronzepulver Luminor 2240“ mit einer mittleren Partikelgröße von $d_{50} = 50 \mu\text{m}$ bei 1000-facher Vergrößerung

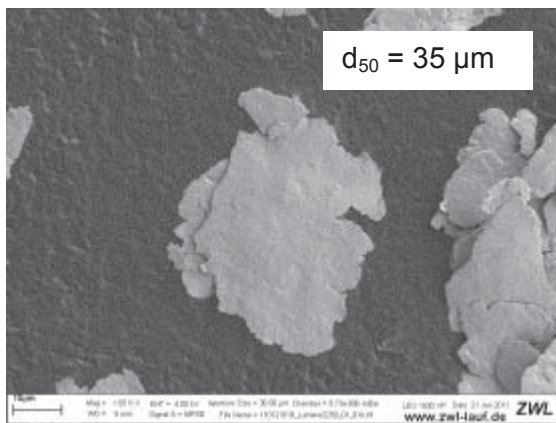


Bild 63: REM-Aufnahme eines Pigments der Bezeichnung „Goldbronzepulver Luminor 2250“ mit einer mittleren Partikelgröße von $d_{50} = 30 \mu\text{m}$ bei 1000-facher Vergrößerung

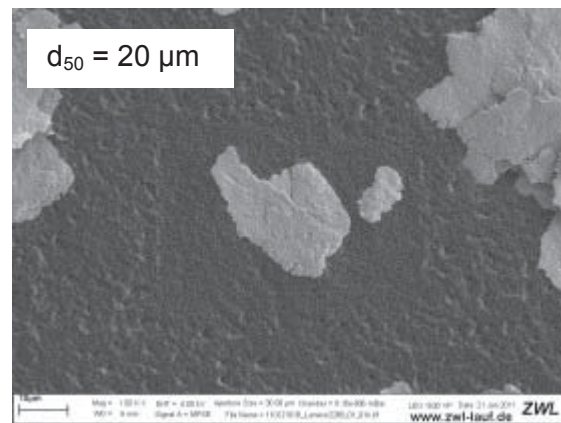


Bild 64: REM-Aufnahme eines Pigments der Bezeichnung „Goldbronzepulver Luminor 2280“ mit einer mittleren Partikelgröße von $d_{50} = 20 \mu\text{m}$ bei 1000-facher Vergrößerung

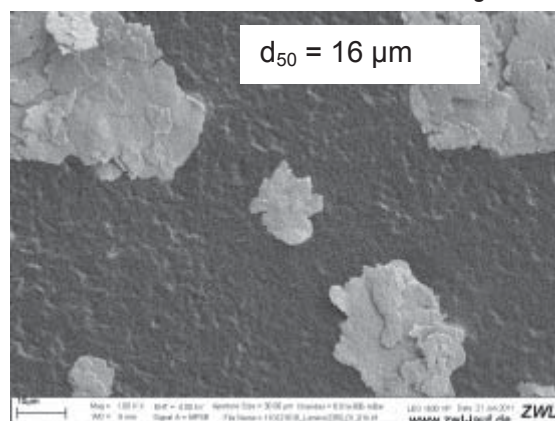


Bild 65: REM-Aufnahme eines Pigments der Bezeichnung „Goldbronzepulver Luminor 2350“ mit einer mittleren Partikelgröße von $d_{50} = 16 \mu\text{m}$ bei 1000-facher Vergrößerung

Bei den in Bild 61 bis Bild 65 dargestellten Pigmenten handelt es sich um sogenannte „Cornflake-Pigmente“, die aufgrund der Herstellung über einen Mahlvorgang eine unregelmäßige Partikelform mit zerklüfteten Kanten aufweisen. Durch Zugabe von Stearin-

Säure während dem Mahlvorgang können sich diese Pigmente nach dem Auftrag an der Oberfläche der Binderschicht ausrichten. Derartig behandelte Pigmente werden als „Leafing-Pigmente“ bezeichnet.

Der Einfluss der Korngröße / Partikelgröße auf den Emissionskoeffizienten sollte anhand von Pigmenten derselben chemischen Zusammensetzung untersucht werden. Dazu wurden die Pigmente der Sorten Goldbronzepulver Luminor, Multiprint und Offset nach der in Abschnitt 2.2 beschriebenen Methode auf Glas- und zugleich Kunststoffsubstrate aufgebracht und anschließend der Emissionskoeffizient dieser Proben messtechnisch ermittelt. Die Goldbronzepigmente der Sorten „Luminor“, „Multiprint“ und „Offset“ wurden für die Versuchsreihe gewählt, da diese einen Korngrößenbereich von $d_{50} = 50 \mu\text{m}$ bis $d_{50} = 2 \mu\text{m}$ abdecken und somit die für diese Versuchsreihe interessierenden Korngrößen enthalten. Zunächst wurden die Pigmente mit dem Raster-Elektronen-Mikroskop optisch charakterisiert. Die mittlere Partikelgröße d_{50} wurde den Herstellerdatenblättern entnommen. Bei den untersuchten Pigmenten handelt es sich um Goldbronzepigmente mit den Bezeichnungen Luminor ($50 \mu\text{m} - 16 \mu\text{m}$), Multiprint ($9 \mu\text{m}, 8 \mu\text{m}$) und Offset ($3 \mu\text{m}, 2 \mu\text{m}$). Die Pigmente der Sorte Luminor in Bild 61 bis Bild 67 sind zur besseren Vergleichbarkeit alle bei einer 1000-fachen Vergrößerung dargestellt, um das Verhältnis der Pigmentgrößen anschaulich herauszustellen.

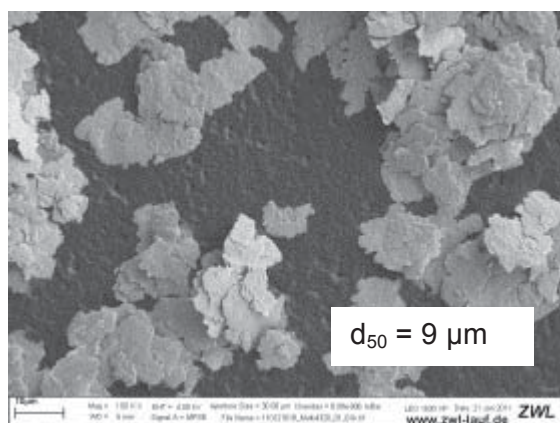


Bild 66: REM-Aufnahme eines Pigments der Bezeichnung „Goldbronzepulver Multiprint 4320“ mit einer mittleren Partikelgröße von $d_{50} = 9 \mu\text{m}$ bei 1000-facher Vergrößerung

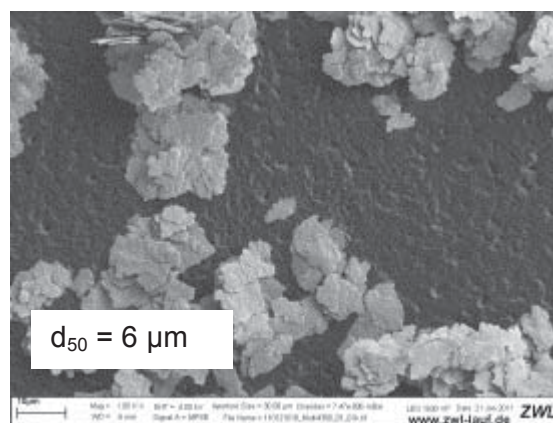


Bild 67: REM-Aufnahme eines Pigments der Bezeichnung „Goldbronzepulver Multiprint 4350“ mit einer mittleren Partikelgröße von $d_{50} = 6 \mu\text{m}$ bei 1000-facher Vergrößerung

Auch bei diesen Pigmenten handelt es sich um durch Vermahlung mit Stearin-Säure hergestellte Cornflake-Pigmente.

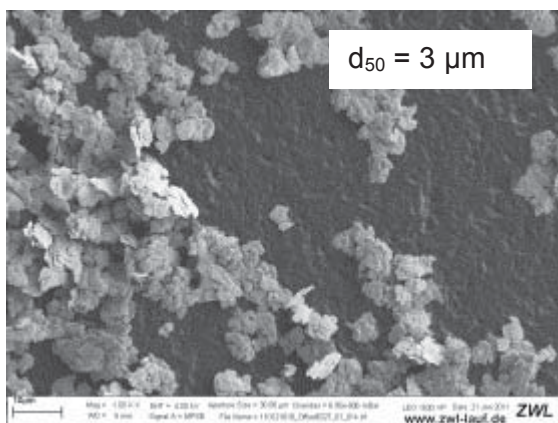


Bild 68: REM-Aufnahme eines Pigments der Bezeichnung „Goldbronzepulver Offset 6327“ mit einer mittleren Partikelgröße von $d_{50} = 3 \mu\text{m}$ bei 1000-facher Vergrößerung

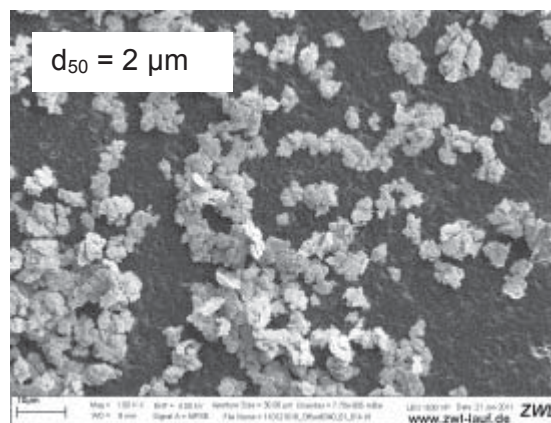


Bild 69: REM-Aufnahme eines Pigments der Bezeichnung „Goldbronzepulver Offset 6340“ mit einer mittleren Partikelgröße von $d_{50} = 2 \mu\text{m}$ bei 1000-facher Vergrößerung

Weiterhin wurden Offset-Druck Pigmente eingesetzt, die sich durch noch geringere Partikelgrößen auszeichnen (Bild 68 und Bild 69). Auch diese Pigmente sind der Vergleichbarkeit halber ebenfalls bei 1000-facher Vergrößerung dargestellt.

Um den Einfluss des Längen-Dickenverhältnisses der Pigmente auf den Emissionskoeffizienten zu untersuchen, wurde das in Abschnitt 2.2 beschriebene Präparationsverfahren gewählt. Zusätzlich erfolgten Beschichtungen auf Ziegelsubstrate unter Verwendung des Binders Polyvinylacetat (verdünnt). Dafür wurden die Pigmente mit einer Zugabemenge von 1 Vol.-% dem Binder beigemischt und mittels einer Airbrush-Vorrichtung auf das Ziegelsubstrat aufgetragen. Die mittleren Korngrößen der Pigmente waren aus den Datenblättern bekannt. Über die Pigmentdicken existierten keine Aussagen, weshalb diese mittels Raster-Elektronen-Mikroskop an jeweils 100 einzelnen Pigment-Partikeln der Sorten Luminor, Multiprint und Offset bestimmt wurden.

Deren unregelmäßige Form und die Neigung zur Agglomeratbildung erschwerten die Messungen und beeinflussten die Ergebnisse. Um die Dicke der Pigmente unter dem Raster-Elektronen-Mikroskop bestimmen zu können, mussten die Pigmente möglichst senkrecht auf dem Probenträger aufgebracht werden. Dies geschah mittels Aufstreuen der Pigmente auf die flüssige Kohlenstoff-Leitpaste und anschließendem Klopfen auf den umgedrehten Probenträger. Nach dem Aushärten der Kohlenstoff-Leitpaste wurden die Proben mittels REM untersucht (Bild 70) und die Pigmentdicken der Sorten Luminor (Bild 71), Multiprint (Bild 72) und Offset (Bild 73) ausgemessen.

Für die Pigmente mit der Bezeichnung „Goldbronzepulver Luminor“, „Goldbronzepulver Multiprint“ und „Goldbronzepulver Offset“ wurden Dickenmittelwerte von $d = 295 \text{ nm}$, $d = 131 \text{ nm}$ und $d = 94 \text{ nm}$ ermittelt.

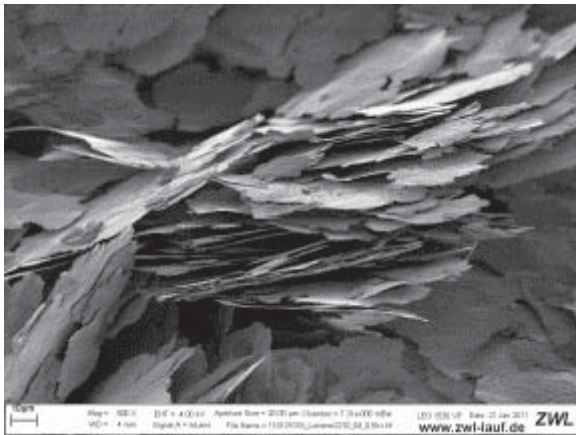


Bild 70: REM-Aufnahme der senkrecht stehenden Pigmente „Goldbronzepulver Luminor 2210“ bei 500-facher Vergrößerung

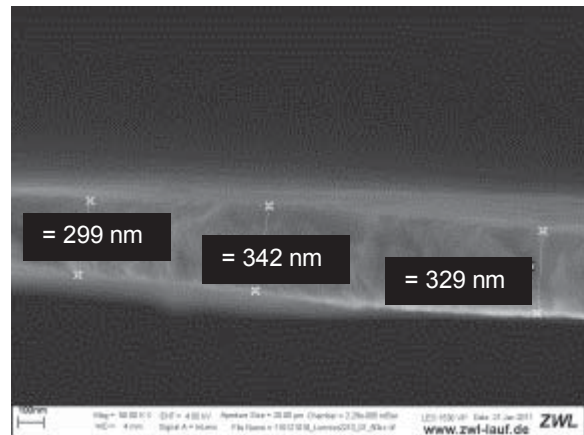


Bild 71: Schichtdicke eines Pigments der Sorte „Goldbronzepulver Luminor 2210“ bei 50kx-facher Vergrößerung

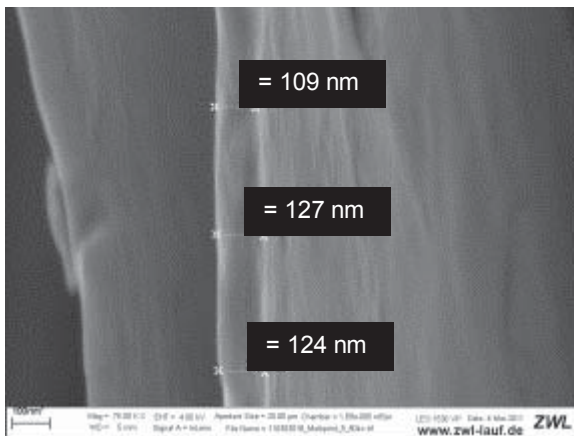


Bild 72: REM-Aufnahme des Pigments der Sorte „Goldbronzepulver Multiprint 4320“ bei 75kx-facher Vergrößerung

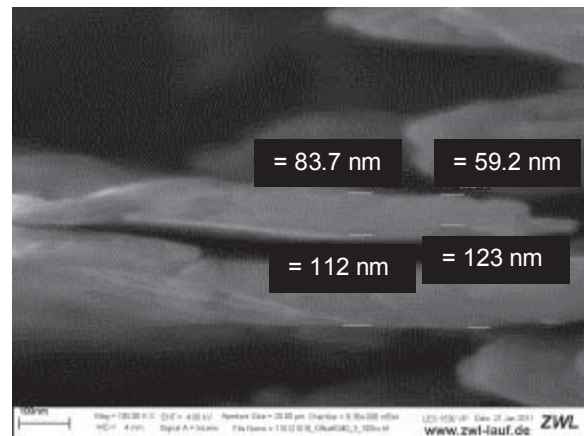


Bild 73: REM-Aufnahme des Pigments der Sorte „Goldbronzepulver Offset 27“ bei 100kx-facher Vergrößerung

Der Emissionskoeffizient der verwendeten Pigmente (Bild 61 bis Bild 69) mit der Bezeichnung „Goldbronzepulver Luminor“, „Goldbronzepulver Multiprint“ und „Goldbronzepulver Offset“ wurde in Abhängigkeit vom Längen-Dicken-Verhältnis (Bild 74) dargestellt.

Aus der Untersuchung ist eine klare Abhängigkeit des Emissionskoeffizienten vom Längen-Dicken-Verhältnis der Pigmente ersichtlich. Mit ansteigendem Längen-Dickenverhältnis der Pigmente von $L/D = 21,26$ auf einen Wert von $L/D = 169,28$ wird der Emissionskoeffizient von $\epsilon = 0,687$ (Ziegelsubstrat mit Binder Holzleim) auf einen Wert von $\epsilon = 0,379$ vermindert. Bei den Pigmenten, welche mit Anlegemilch auf Glassubstraten aufgebracht wurden, konnten ähnliche Werte gemessen werden. Dabei wurde der Emissionskoeffizient ausgehend von einem Wert von $\epsilon = 0,666$ (bei $L/D = 21,26$) auf einen Wert von $\epsilon = 0,389$ (bei $L/D = 169,28$) vermindert. Auch bei den beschichteten Kunststoffsubstraten wurden ähnliche Werte erreicht. Hier wurde der Emissionskoeffizient von $\epsilon = 0,697$ ($L/D = 21,26$) auf $\epsilon = 0,411$ ($L/D = 169,28$) abgesenkt.

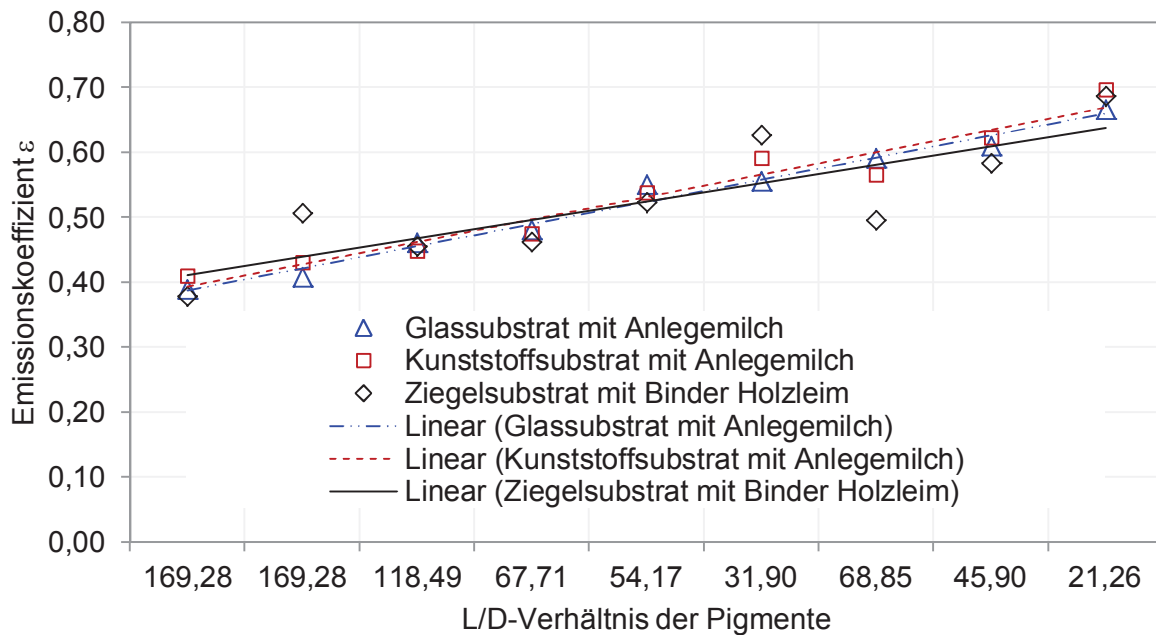


Bild 74: Emissionskoeffizient der Goldbronze-Pigmente der Sorten Luminor, Multiprint und Offset in Abhängigkeit vom Längen/Dicken-Verhältnis (L/D-Verhältnis)

In dieser Versuchsreihe konnte darüber hinaus kein signifikanter Einfluss des Beschichtungssubstrates (Glas, Kunststoff oder Ziegel) auf den Emissionskoeffizienten der Beschichtung festgestellt werden. Eine Beschichtung von Ziegelsubstraten mit einer Mischung aus metallischen Pigmenten in Verbindung mit einem geeigneten Binder ist einer gleichartigen Beschichtung auf Glassubstrat vergleichbar. Durch den verwendeten Binder wird die unebene, rauhe Oberfläche des Ziegelsubstrates (Bild 75) ausgeglichen und die Pigmente („Leafing-Pigmente“) können sich nach dem Schichtauftrag optimal ausrichten (Bild 76).

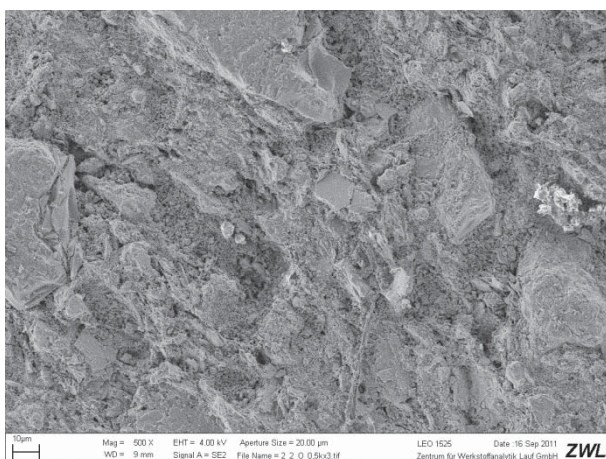


Bild 75: REM-Aufnahme einer unbeschichteten Ziegeloberfläche bei 500-facher Vergrößerung, $\epsilon = 0,930$

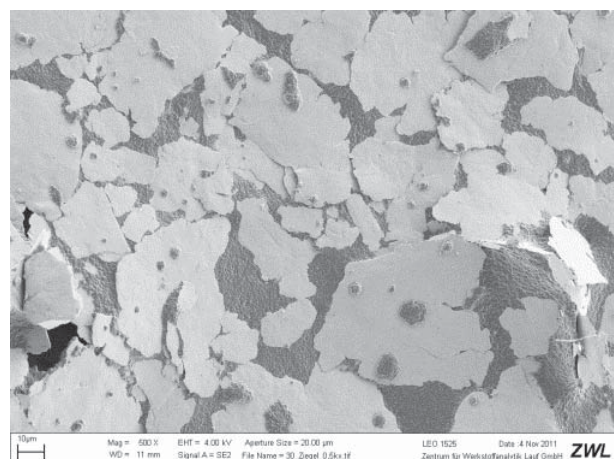


Bild 76: REM-Aufnahme Pigment „STANDARD Goldbronzepulver LACK 900 L Reichgold“ mit Holzleim als Bindemittel bei 500-facher Vergrößerung auf Ziegeloberfläche, $\epsilon = 0,530$

Aus einer Betrachtung der theoretischen Grenzfälle mit einem Längen-Dicken-Verhältnis von

$L/D = 1$ (Kugel) und $L/D = \infty$ (geschlossene Schicht) wird deutlich, dass kugelförmige Partikel für eine Beschichtung ungeeignet sind, während sich geschlossene Schichten am besten eignen. Es ist bekannt, dass durchgehende metallische Schichten einen Emissionskoeffizienten von etwa $\varepsilon = 0,1$ zeigen (material- und oberflächenabhängig). Je kugelförmiger ein Partikel ist, desto weniger Strahlung kann dieser gerichtet reflektieren. Aus diesem Grund führen sphärische Partikel, selbst aus gut reflektierenden Materialien, zu einer erhöhten Streuung der Strahlung und damit zu einem vergleichsweise höheren Emissionskoeffizienten (Bild 74).

Grundsätzlich eignen sich durchgehende metallische Schichten und Pigmente mit möglichst großem Längen-Dicken Verhältnis sehr gut zur Erzeugung niedriger Emissionskoeffizienten. Es sollte dabei beachtet werden, dass geschlossene metallische Schichten auch über eine sehr hohe Wärmeleitfähigkeit verfügen und Pigmente mit sehr großen Partikelgrößen schlechter verarbeitbar sind, einen höheren Pigmentgehalt im Binder benötigen und eine schlechtere Bedeckung des Beschichtungssubstrats bewirken. Pigmente mit einer Teilchengröße bis 50 μm waren in den durchgeführten Versuchsreihen gut verarbeitbar.

2.2.7. Beschichtungen mit ausgewählten Pigmenten auf Ziegelsubstrat

Alle Pigmente, welche in der Versuchsreihe mit Anlegemilch auf Glassubstrat mit einem Emissionskoeffizienten unter $\varepsilon = 0,60$ abgeschnitten hatten, wurden im weiteren Verlauf für eine Versuchsreihe mit dem Binder Holzleim (1 Teil Holzleim : 4 Teile dest. Wasser) ausgewählt. Als Substrat fungierte Ziegelkeramik.

Um eine gute Vergleichbarkeit der Ergebnisse sicherzustellen, musste eine vollständige Bedeckung der Ziegelsubstrate mit dem jeweiligen Pigment erreicht werden. Hierzu wurde den Beschichtungsrezepturen so lange Pigment zugegeben, bis bei einem einzigen Pinselstrich auf ein weißes Blatt Papier eine vollständige Bedeckung mit dem jeweiligen Pigment erreicht wurde.

Wie aus Bild 77 ersichtlich, wird eine vollständige Bedeckung der Ziegeloberfläche in Abhängigkeit vom verwendeten Pigment bei sehr unterschiedlichen Zugaben (Vol.-%) erreicht. Für die spätere Umsetzung der Beschichtung in industrielle Maßstäben eignen sich die Pigmente am besten, bei denen mit minimaler Zugabemenge eine maximale Absenkung des Emissionskoeffizienten erreicht wird (Kostensparnis).

Eine maximale Absenkung des Emissionskoeffizienten unter einen Wert von $\varepsilon = 0,4$ bei gleichzeitig geringer Pigmentzugabe von 1 - 2 Vol.-% zum Binder wird von den Pigmenten „Goldbronzepulver Luminor 2210“, „Blitz Aluminiumpulver 71 - 315 μm 171198“, „Blitz Goldbronzepulver G 2021 Reichbleichgold“ und „Blitz Goldbronzepulver G 2021 Bleichgold“ erreicht.

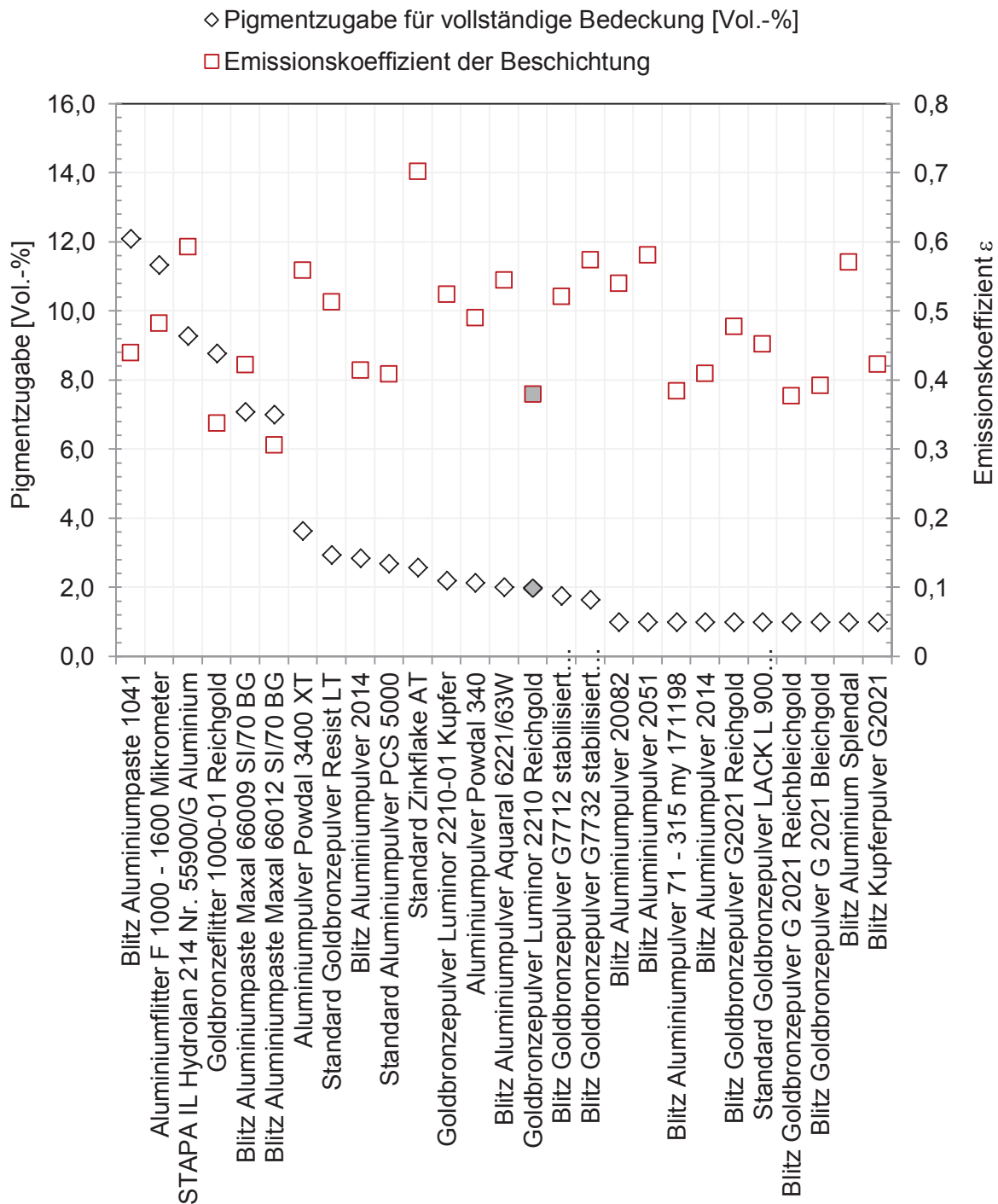


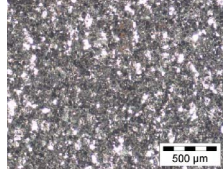
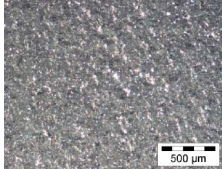
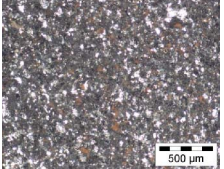
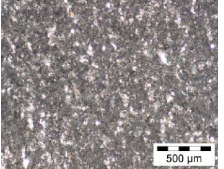
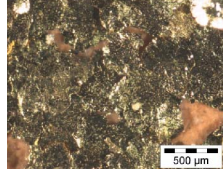
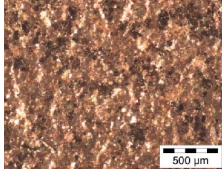
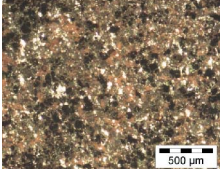
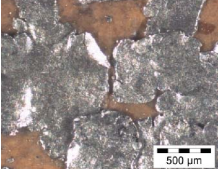
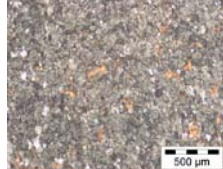
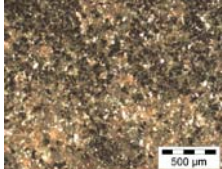
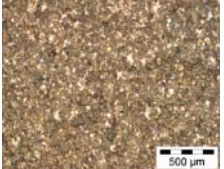
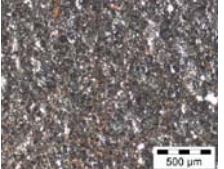
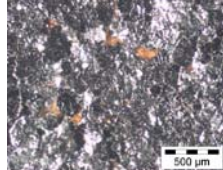
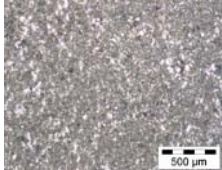
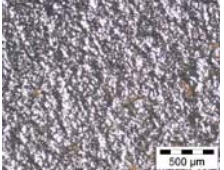
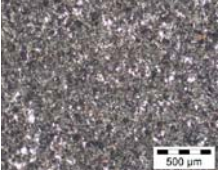
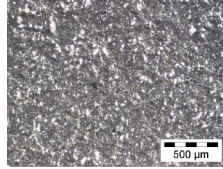
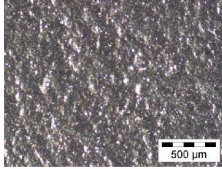
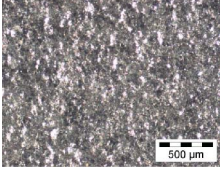
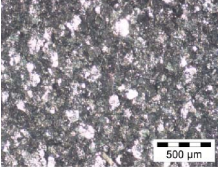
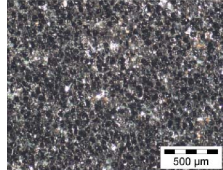
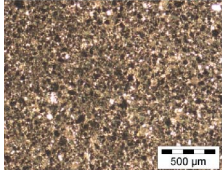
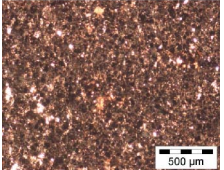
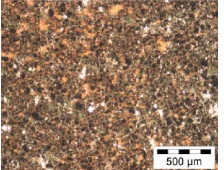
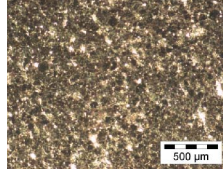
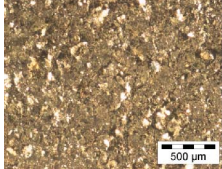
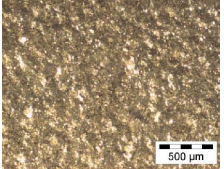
Bild 77: Für vollständige Bedeckung der Substrate notwendige Pigmentzugabe zum Binder verdünnter Holzleim (1 Teil Holzleim : 4 Teile dest. Wasser); ermittelt durch Wiegen der Beschichtungslösung nach vollständiger Bedeckung des Substrates, im Vergleich mit den Emissionskoeffizienten der beschichteten Ziegelsubstrate. Die Beschichtung erfolgte mittels Pinselauftrag der Mischung auf die Ziegelsubstrate

Aufgrund dieser Eigenschaften können die genannten Pigmente für eine Beschichtung von Hochlochziegeln gewählt werden. Im weiteren Verlauf erfolgte eine Untersuchung des Bedeckungsgrades bei allen beschichteten Ziegeloberflächen mittels Auflichtmikroskopie. Die Aufnahmen (Tabelle 3) zeigen eine vollständige Bedeckung der Substrate.

Im weiteren Verlauf der Arbeit erfolgten Versuchsreihen an Hochlochziegeln mit dem Pigment „Goldbronzepulver Luminor 2210“ (grau gekennzeichnet). Dieses Pigment zeichnet

sich bei einer Zugabemenge von nur 1 Vol.-% zum Binder (1 Teil Holzleim : 4 Teile destilliertes Wasser) durch einen Emissionskoeffizienten von $\epsilon = 0,38$ aus.

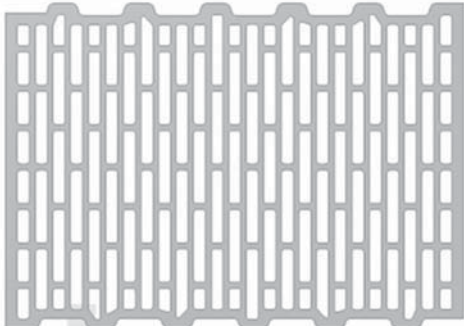
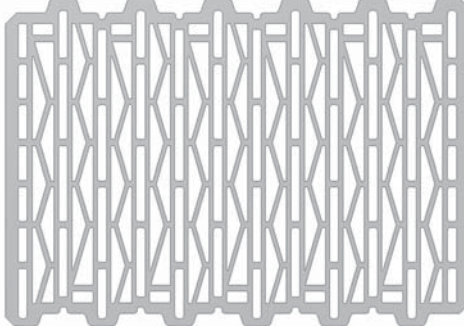

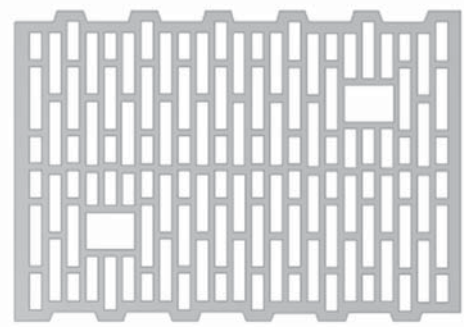
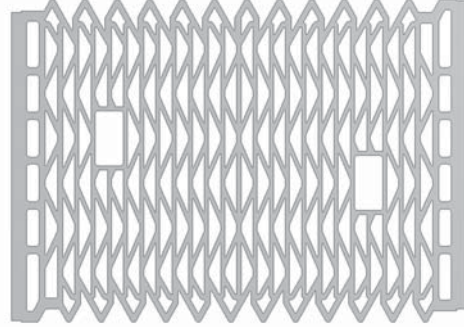
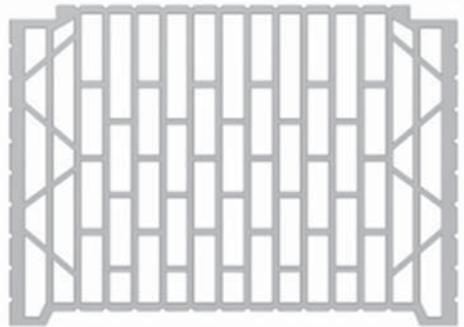
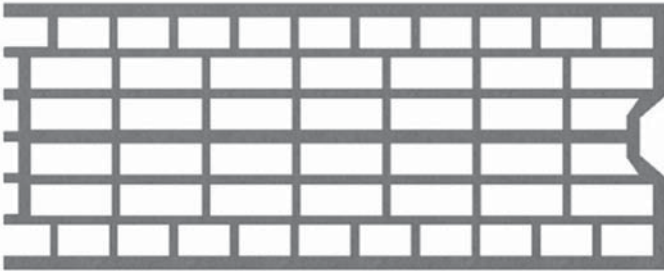
Tabelle 3: Bedeckungsgrad der Substrate bei der in Bild 77 aufgezeigten Pigmentzugabe zum Binder verdünnter Holzleim (1 Teil Holzleim : 4 Teile dest. Wasser); ermittelt durch Wiegen der Beschichtungslösung nach vollständiger Bedeckung des Substrates

 <i>STAPA IL Hydrolan 214 Nr. 55900/G Aluminium</i>	 <i>Standard Zinkflake AT</i>	 <i>Aluminiumpulver Powdal 340</i>	 <i>Aluminiumpulver Powdal 3400 XT</i>
 <i>Goldbronzeflitter 1000-01 Reichgold</i>	 <i>Goldbronzepulver Luminor 2210-01 Kupfer</i>	 <i>Goldbronzepulver Luminor 2210 Reichgold</i>	 <i>Aluminiumflitter F 1000 - 1600 µm</i>
 <i>STANDARD Aluminiumpulver PCS 5000</i>	 <i>STANDARD Goldbronzepulver LACK L 900 Reichgold</i>	 <i>STANDARD Goldbronzepulver Resist LT</i>	 <i>Blitz Aluminiumpulver 2014</i>
 <i>Blitz Aluminiumpulver 71 - 315 my 171198</i>	 <i>Blitz Aluminiumpaste 1041</i>	 <i>Blitz Aluminium Splendal</i>	 <i>Blitz Aluminiumpulver 2014</i>
 <i>Blitz Aluminiumpulver 2051</i>	 <i>Blitz Aluminiumpulver 20082</i>	 <i>Blitz Aluminiumpulver Aqualar 6221/63W</i>	 <i>Blitz Aluminiumpaste Maxal 66009 SI/70 BG</i>
 <i>Blitz Aluminiumpaste Maxal 66012 SI/70 BG</i>	 <i>Blitz Goldbronzepulver G 2021 Bleichgold</i>	 <i>Blitz Kupferpulver G2021</i>	 <i>Blitz Goldbronzepulver G 2021 Reichbleichgold</i>
 <i>Blitz Goldbronzepulver G2021 Reichgold</i>	 <i>Blitz Goldbronzepulver G7712 stabilisiert Reichbleichgold</i>	 <i>Blitz Goldbronzepulver G7732 stabilisiert Reichbleichgold</i>	

3. Messungen an Hochlochziegeln

Im weiteren Verlauf der Untersuchungen erfolgten Beschichtungsversuche an industriell hergestellten Hochlochziegeln der Projektpartner mit verschiedenen Lochmustern. Für diese Versuche wurden sieben unterschiedliche Lochbilder ausgewählt und mit Ziegel A bis Ziegel G bezeichnet (Tabelle 4).

Tabelle 4: Übersicht der für die Untersuchungen in dieser Arbeit ausgewählten Lochbilder

 <p>Ziegel A nach Zulassung Z 17.1-697</p>	 <p>Ziegel B nach Zulassung Z 17.1-935</p>
 <p>Ziegel C nach Zulassung Z 17.1-906</p>	 <p>Ziegel D nach Zulassung Z 17.1-651</p>
 <p>Ziegel E nach Zulassung Z 17.1-1012</p>	 <p>Ziegel F nach Zulassung Z 17.1-935</p>
 <p>Ziegel G, keine Zulassung in Deutschland</p>	

Die Untersuchungen wurden sowohl an ganzen Hochlochziegeln, als auch an daraus entnommenen Teilstücken sowie an Prüfkörpern, die aus mehreren Ziegeln zusammengesetzt waren, durchgeführt.

Messtechnisch ermittelt wurden Scherben-Wärmeleitfähigkeiten, Scherbenrohddichten, Emissionskoeffizienten und äquivalente Wärmeleitfähigkeiten der Ziegel sowohl mit, als auch ohne eine den Wärmestrahlungsübergang absenkende Beschichtung.

3.1. Scherben-Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{10, tr}$.

Für die spätere FE-Berechnung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit wurden die Scherben-Wärmeleitfähigkeiten $\lambda_{10, tr}$ der zur Verfügung gestellten Ziegelsorten benötigt. Hierzu wurden aus den zur Verfügung gestellten Ziegeln typische Längs- und Querstege entnommen und deren Scherben-Wärmeleitfähigkeit bestimmt. Die Ermittlung der Scherben-Wärmeleitfähigkeit bei einer Probenmitteltemperatur von 10 °C, bezeichnet als $\lambda_{10, tr}$, erfolgte mit einem Einplattengerät nach DIN EN 12667. Die Ergebnisse der Scherben-Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{10, tr}$ für die seitens der Projektpartner zur Verfügung gestellten Ziegel sind in Tabelle 5 aufgeführt.

Tabelle 5: Scherbenrohddichten und Scherben-Wärmeleitfähigkeiten $\lambda_{10, tr}$ der zur Verfügung gestellten Hochlochziegel. Die Messungen erfolgten an herausgeschnittenen Einzelstegen (Mittelwert aus 10 Einzelstegen)

Bezeichnung der Hochlochziegel	Scherbenrohddichte [kg/dm ³]	Scherben-Wärmeleitfähigkeit [W/mK]
Ziegel A	1,49	0,366
Ziegel B	1,32	0,332
Ziegel C	1,49	0,293
Ziegel D	1,54	0,350
Ziegel E	1,23	0,332
Ziegel F	1,10	0,270
Ziegel G	1,50	0,460

Die niedrigste Scherben-Wärmeleitfähigkeit der zur Verfügung gestellten Ziegel zeigte Ziegel F mit $\lambda_{10, tr} = 0,270$ W/mK. Die höchste Scherben-Wärmeleitfähigkeit wurde für Ziegel G mit $\lambda_{10, tr} = 0,460$ W/mK gemessen.

3.2. Äquivalente Wärmeleitfähigkeit ausgewählter Lochbilder

Die Probekörper für die Halbsteinmessungen wurden aus Ziegeln zusammengesetzt und mit Polyurethanschaum fixiert. Die Abmaße der Probekörper betragen 500 mm x 500 mm. Um die Konvektion über die Gesamthöhe des Prüflings zu verhindern, wurde ein Glasfaser-Netz zwischen die Ziegellagen eingezogen und mit Polyurethanschaum gedeckelt. Nach dem Aushärten wurden die Probekörper bis zur Massenkonstanz für mindestens 48 Stunden bei

einer Temperatur von 90 °C in einem Trockenschrank gelagert. Dadurch wurde sichergestellt, dass die Messergebnisse nicht durch Restfeuchtegehalte der Prüflinge beeinflusst wurden.

Anschließend wurden die Prüfkörper innerhalb eines Tages auf eine Temperatur von 40 °C abgekühlt und dann aus dem Trockenschrank entnommen. Unmittelbar danach wurden diese mit einer dünnen selbstklebenden Folie umwickelt und dadurch luftdicht verschlossen. Die Folie verhindert die Adsorption von Feuchtigkeit durch den Ziegelprüfkörper während des Abkühlens auf Raumtemperatur und nachfolgend während der mehrere Tage andauernden Messung im Halbsteinmessgerät. Nach dem vollständigen Abkühlen auf Raumtemperatur wurde der Probekörper in die Messapparatur in Bild 78 eingebaut.

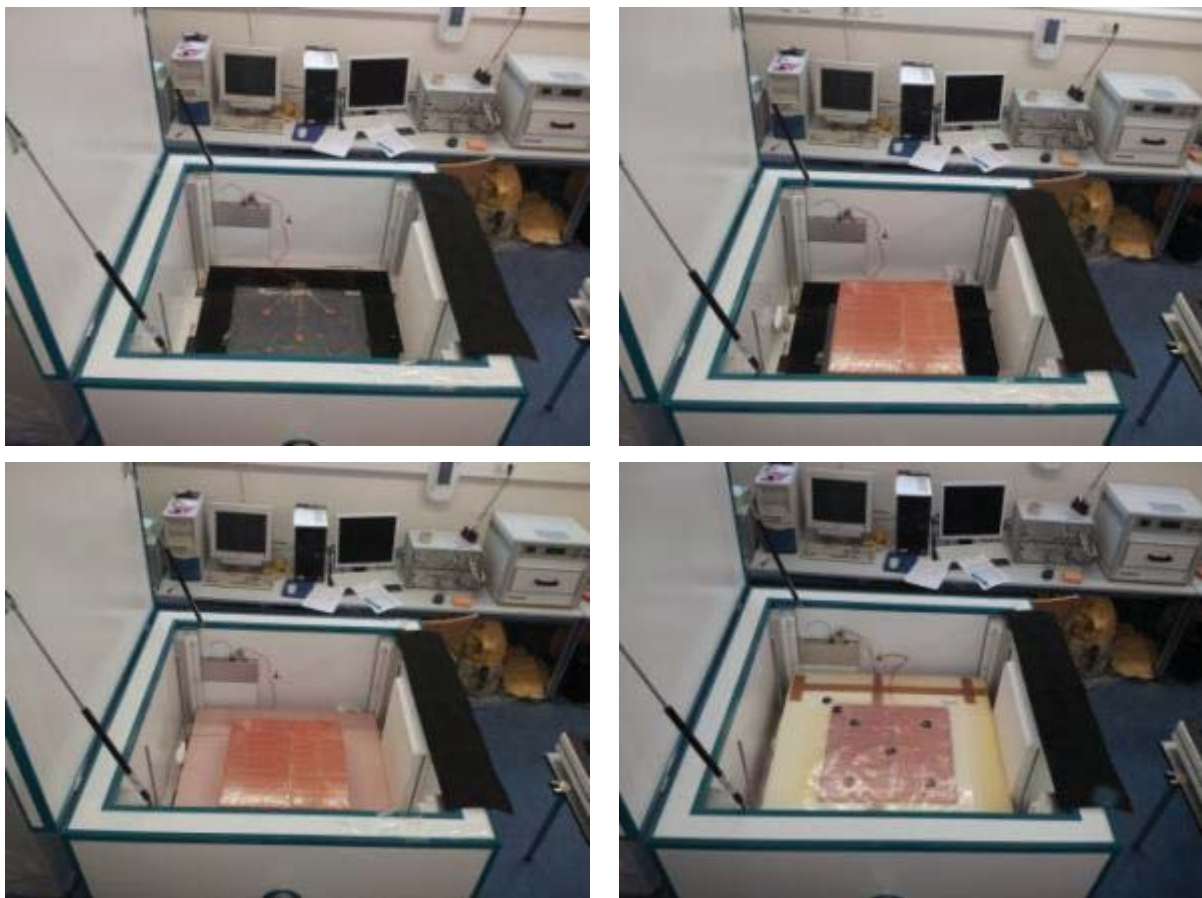


Bild 78: Einbau des Ziegelprobekörpers in das Plattenmessgerät nach EN 12667 (Halbsteinmessung) für die Betriebsweise als Einplattenmessgerät

Nach dem Probeneinbau wird die geschlossene Messvorrichtung um 90 ° geschwenkt, um dem realen Wärmedurchgang in einer Ziegelmauer zu entsprechen. Dies ist nötig, um den Wärmeübergang durch Konvektion messtechnisch richtig abbilden zu können. Die Messung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit der Probekörper erfolgte als Einpunktmessung bei einer Probenmitteltemperatur von $T_m = 10 \text{ °C}$. Nach Erreichen des stationären Zustandes wurde die Messung manuell beendet.

3.2.1. Beschichtung der inneren Ziegeloberfläche

Die Beschichtung der Hochlochziegel erfolgte mittels einer Hohlraumversiegelungssonde, bestehend aus einem Druckbecherbehälter in Verbindung mit einer Sprühvorrichtung und einem biegsamen Schlauch mit Zerstäuberdüse. Der biegsame Schlauch wurde während des Beschichtungsvorgangs in die einzelnen Hohlräume im Ziegel eingeführt.

Es wurden einzelne Ziegel und komplett präparierte Probekörper beschichtet. Da mit dieser Methode auch bereits für die Halbsteinmessung vorhandene Probekörper beschichtet werden können, eignete sich diese Methode besonders für einen direkten Vergleich der Messergebnisse. Derselbe Probekörper konnte in unbeschichtetem und beschichtetem Zustand gemessen werden, um jeweils die äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten zu bestimmen.

Die Bestimmung der Emissionskoeffizienten der Hochlochziegel erfolgte an Scherben, die aus unbeschichteten sowie sprühbeschichteten Ziegeln herausgeschnitten wurden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6 dargestellt.

Tabelle 6: Emissionskoeffizienten der herausgeschnittenen Scherben (mit Sinterhaut) vor und nach einer Beschichtung mit dem ausgewählten Binder (1 Teil Holzleim : 4 Teile dest. Wasser) und Pigmentsystem „Goldbronzepulver Luminor 2210 (Mittelwert aus 4 bis 8 Einzelmessungen).

Bezeichnung der Scherben	ϵ unbeschichtete Ziegeloberfläche	ϵ beschichtete Ziegeloberfläche
Ziegel A	0,966	0,354
Ziegel B	0,950	0,462
Ziegel C	0,968	0,365
Ziegel D	0,963	0,631
Ziegel E	0,959	0,470
Ziegel F	0,973	0,494
Ziegel G	0,951	0,475

Aus der Untersuchung ging hervor, dass die Emissionskoeffizienten der Ziegelscherben in beschichtetem Zustand maßgeblich von der Oberfläche des Scherbens beeinflusst werden. Für eine Beschichtung sind Ziegelscherben mit einer geschlossenen Sinterhaut besser geeignet, als stark porosierte Scherben mit einer sehr unregelmäßigen Oberfläche. Nur bei einer möglichst glatten Oberfläche können mit den verwendeten Pigmenten Emissionskoeffizienten unter $\epsilon = 0,40$ erzielt werden. Im Mittel kann für unbearbeitete Ziegeloberflächen durch Ausrüstung mit einer Beschichtung bestehend aus dem gewählten Binder (1 Teil Holzleim : 4 Teile dest. Wasser) und Pigmentsystem „Goldbronzepigment Luminor 2210“ ein Emissionskoeffizient von $\epsilon = 0,50$ erreicht werden.

3.2.2. Äquivalente Wärmeleitfähigkeit beschichteter Ziegel

Um die Auswirkung einer Ausrüstung der Ziegeloberfläche mit einem niedrigen Emissionskoeffizienten messtechnisch zu erfassen, wurden die sieben zur Verfügung gestellten Lochbilder der Projektpartner beschichtet. Die Bestimmung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit erfolgte dabei an denselben Probekörpern jeweils vor und nach einer Beschichtung (Bild 79 und Bild 80) mit dem gewählten Binder- und Pigmentsystem (1 Teil Holzleim : 4 Teile dest. Wasser und Pigment „Goldbronzepigment Luminor 2210“).



Bild 79: Beschichteter Probekörper aus Ziegelsorte A

Bild 80: Beschichteter Probekörper aus Ziegelsorte D

Die Versuchsergebnisse für die Halbsteinmessungen (Mittelwerte) der ausgewählten Lochbilder in unbeschichtetem und beschichtetem Zustand sind in Tabelle 7 dargestellt.

Tabelle 7: Äquivalente Wärmeleitfähigkeiten (Halbsteinmessungen) der von den Projektpartnern zur Verfügung gestellten Hochlochziegel **vor** und **nach einer Beschichtung** derselben Probekörper mit dem ausgewählten Pigment „Goldbronzepulver Luminor 2210“ und verdünntem Holzleim als Binder. Die Ergebnisse sind Mittelwerte aus mindestens drei einzelnen Messungen jeweils neu präparierter Probekörper

Lochbild	Äquivalente Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{\text{äquival.}}$ unbeschichtet [W/mK]	Äquivalente Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{\text{äquival.}}$ beschichtet [W/mK]	Verbesserung der Wärmedämmung [%]
Ziegel A	0,128	0,105	17,9
Ziegel B	0,120	0,103	14,2
Ziegel C	0,214	0,151	29,4
Ziegel D	0,143	0,119	16,8
Ziegel E	0,097	0,086	11,3
Ziegel F	0,121	0,090	25,6
Ziegel G	0,197	0,141	28,4

Aus der Tabelle geht hervor, dass die mit der Beschichtung erreichte Absenkung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit u.a. vom Lochbild des Ziegels abhängig ist. Dies wird durch die unterschiedlichen Anteile der Wärmeübergangsmechanismen Strahlung, Leitung und Konvektion am Wärmeübergang verursacht. In der vorliegenden Untersuchung kann die äquivalente Wärmeleitfähigkeit durch Beschichtung je nach Lochbild um 11,3 % bis 29,4 % vermindert und die Wärmedämmung entsprechend um 11,3 % bis 29,4 % verbessert werden.

3.2.3. Äquivalente Wärmeleitfähigkeiten von mit „Stecklingen“ ausgerüsteten Ziegeln

Neben den metallischen Pigmenten erreichten auch die mechanisch polierten Graphite relativ niedrige Emissionskoeffizienten. Aus Vorversuchen war bekannt, dass ein mechanisches Polieren graphitbeschichteter Hohlräume im Inneren der Ziegel praktisch nicht möglich ist. Von (Alhazmy, 2010) wird ein Verfahren zur Reduktion der natürlichen Konvektion in Hochlochziegeln durch Papierstecklinge vorgestellt. Papierstecklinge eignen sich auch hervorragend als Trägermaterial für eine Beschichtung. Große Flächen des Trägermaterials können zunächst beschichtet und poliert und anschließend zu Stecklingen verarbeitet werden. Durch diese Vorgehensweise wird durch eine Beschichtung nicht nur der Wärmestrahlungsübergang, sondern gleichzeitig auch der Wärmeübergang durch natürliche Konvektion vermindert.

Dazu wurde die Oberfläche eines Kartons mit einer Mischung aus 3 Vol.-% Graphit und 97 Vol.-% verdünntem Holzleim beschichtet. Anschließend wurde der beschichtete Karton mit einer Poliervorrichtung für Autolack wenige Minuten poliert (Bild 81).



Bild 81: Polieren einer Graphitschicht auf einem Kartonträger. Die Beschichtung aus 3 Vol.-% Graphit und 97 Vol.-% verdünntem Holzleim (1 Teil Holzleim : 4 Teile dest. Wasser) wurde mittels Airbrush-Technik aufgesprüht. Nach dem Poliervorgang betrug der Emissionskoeffizient des **graphitbeschichteten Kartons** $\epsilon = 0,46$



Bild 82: Ziegel G mit beschichteten Stecklingen (Graphitbeschichtet und poliert) in den Löchern. Der Emissionskoeffizient des **graphitbeschichteten Kartons** beträgt $\epsilon = 0,46$

Der so beschichtete und geschnittene Karton wurde mittels Falten zu einer Art „Steckling“ verarbeitet und analog zu anderen Füllstoffen in das Ziegel-Lochmuster eingebracht (Bild 82). Anstelle des Kartons sind auch andere, haltbarere Trägermaterialien denkbar. Die Trägermaterialien können anstatt mit Graphit auch mit den in dieser Arbeit untersuchten metallischen Pigmenten ausgerüstet werden. Der Poliervorgang entfällt dann bei dieser Vorgehensweise. Ein besonderer Vorteil dieser Methode ist, dass ein aufwändiger Beschichtungsvorgang der inneren Ziegelfläche entfallen kann.

Die Kartonstecklinge wurden mit Graphit und anderen Pigmenten aus dieser Arbeit beschichtet und ausgewählte Ziegellochbilder damit ausgerüstet (Tabelle 8). Für die

Beschichtung der Stecklinge wurde die „Aluminiumpaste Blitz Maxal 66012 SI/70 BG“, ein Aluminiumpigment, eingesetzt.

Tabelle 8: Äquivalente Wärmeleitfähigkeiten unbeschichteter und mit beschichteten Stecklingen ausgerüstete Hochlochziegel im Vergleich. Die Ergebnisse sind Mittelwerte aus drei einzelnen Messungen jeweils neu präparierter Probekörper

Lochbild	Beschichtungssubstanz der Papierstecklinge	Äquivalente Wärmeleitfähigkeit unbeschichtet [W/mK]	Äquivalente Wärmeleitfähigkeit mit beschichteten Stecklingen [W/mK]	Verbesserung der Wärmedämmung durch Stecklinge [%]
Ziegel A	Aluminiumpigment „Blitz Maxal 66012 SI/70 BG“	0,128	0,102	20,3
Ziegel B	Aluminiumpigment „Blitz Maxal 66012 SI/70 BG“	0,120	0,099	17,5
Ziegel C	Pigment „Goldbronzepulver Luminor 2210“ und „Blitz Maxal 66012 SI/70 BG“	0,214	0,120	43,9
<u>Ziegel C beschichtet</u>	Pigment „Goldbronzepulver Luminor 2210“ und „Blitz Maxal 66012 SI/70 BG“	0,214	0,115	46,3
Ziegel G	Graphit T1	0,197	0,145	26,4

Durch das Einbringen beschichteter Stecklinge konnte die äquivalente Wärmeleitfähigkeit des Ziegels A von $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,128 \text{ W/mK}$ auf $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,102 \text{ W/mK}$ abgesenkt und damit um 20 % gemindert werden. Wurde Ziegel B mit beschichteten Stecklingen ausgerüstet, so resultiert eine Verminderung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit um 17,5 % von $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,120 \text{ W/mK}$ auf $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,099 \text{ W/mK}$. Im Falle des Ziegels C wurden 50 % der eingebrachten Stecklinge mit dem Pigment „Blitz Aluminiumpaste Maxal 66012 SI/70 BG“ und 50 % der Stecklinge mit dem Pigment „Goldbronzepulver Luminor 2210“ beschichtet. Durch das Einbringen der beschichteten Stecklinge konnte eine Absenkung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit um 43,9 % von $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,214 \text{ W/mK}$ im unbeschichteten und unverfüllten Zustand auf $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,120 \text{ W/mK}$ herbeigeführt werden. Wurde noch zusätzlich zu den beschichteten Stecklingen eine Beschichtung der Hohlräume mit „Goldbronzepulver Luminor 2210“ vorgenommen, so verminderte sich die äquivalente Wärmeleitfähigkeit auf $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,115 \text{ W/mK}$, also um 46,3 % im Vergleich zum unbeschichteten und unverfüllten Zustand. Aus dieser Untersuchung ging hervor, dass eine zusätzliche Innenbeschichtung der Hochlochziegel mit beschichteten Stecklingen mit „Goldbronzepulver Luminor 2210“ in

Verbindung mit verdünntem Holzleim zu einer weiteren Minderung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit von 2,4 % führt (Tabelle 8).

Weitere Versuche wurden mit Ziegel G durchgeführt. Es erfolgte eine Verfüllung aller Hohlräume mit Stecklingen aus Graphit-beschichtetem Karton (Bild 82). Durch die verwendete Falttechnik konnten die Stecklinge in den relativ großen Hohlräumen fixiert werden. Durch das Einbringen der mit poliertem Graphit ausgerüsteten Stecklinge wurde eine Verminderung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,197 \text{ W/mK}$ um 26,4 % auf $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,145 \text{ W/mK}$ erreicht.

Das Einbringen von Stecklingen eignet sich besonders für Lochbilder mit wenigen Lochreihen als Ersatz der Verfüllung (z.B. in Verfüllziegeln), da bei sehr filigranen Ziegeln mit vielen Lochreihen entsprechend viele Stecklinge eingebracht werden müssten.



Bild 83: Probekörper aus Ziegelsorte C für die Halbsteinmessung. Die eingebrachten Stecklinge bestehen aus **beschichtetem Karton** („**Aluminiumpaste Blitz Maxal 66012 SI/70 BG**“ und „**Goldbronzepulver Luminor 2210**“). Der Emissionskoeffizient des beschichteten Kartons beträgt jeweils $\varepsilon = 0,50$ für beide Pigmente



Bild 84: Probekörper aus Ziegelsorte B für die Halbsteinmessung. Die eingebrachten Stecklinge bestehen aus **beschichtetem Karton (Aluminiumpaste „Blitz Maxal 66012 SI/70 BG“)** ausgestattet. Der Emissionskoeffizient des beschichteten Kartons beträgt $\varepsilon = 0,50$

Ein weiterer Vorteil bei der Verwendung beschichteter Stecklinge besteht darin, dass die Ziegel trocken bleiben. Bei einem Beschichtungsvorgang der Löcher müsste der Ziegel anschließend wieder getrocknet werden. Bei der Applikation der Stecklinge entfällt dieser Arbeitsschritt. Auch das Recycling am Ende der Lebenszeit der Ziegel wird erleichtert, da Ziegel und Stecklinge auf einfache Art separiert werden können.

3.3. Elastische Materialparameter

Die elastischen Materialparameter E-Modul, G-Modul, Poissonzahl und Dämpfung der Hochlochziegel wurden für die späteren schallschutztechnischen FE-Berechnungen benötigt und müssen messtechnisch ermittelt werden. Dazu werden aus den Ziegeln der Projektpartner jeweils Stege herausgeschnitten.

3.3.1. Abhängigkeit elastischer Materialparameter von der Extrusionsrichtung

Im Fall des Ziegels C erfolgte die Bestimmung des E-Moduls über das beschriebene Ultraschallverfahren. Die Messung des E-Moduls erfolgte richtungsabhängig, um einen Einfluss des Extrusions-Prozesses auf den E-Modul zu untersuchen. Hier war eine richtungsabhängige Bestimmung der Poissonzahl, des G-Moduls und der Dämpfung aufgrund des Messverfahrens nicht möglich. Die Werte wurden deshalb für spätere Berechnungen mit 2 % Dämpfung und einer Poissonzahl von 0,3 angenommen. Die Ergebnisse der Ultraschallmessung sind in Tabelle 9 dargestellt. Die Bezeichnung X-Richtung steht dabei für die Steinlänge zwischen zwei Stoßfugen, Y-Richtung für die Mauerwerksbreite und Z-Richtung für die Steinhöhe, also die Extrusionsrichtung.

Tabelle 9: E-Modul und Rohdichte des Ziegels C. Der E-Modul wurde richtungsabhängig bestimmt mit dem Ultraschallverfahren an entnommenen Querstegen bestimmt

Stegtyp	Position	E-Modul [GPa]			Rohdichte [kg/dm ³]
		X-Richtung	Y-Richtung	Z-Richtung	
Quersteg	Aussen	2,0	8,2	9,0	1,41
Quersteg	Innen	3,1	7,3	10,0	1,47

Es ist ersichtlich, dass das höchste E-Modul in Extrusionsrichtung (Z-Richtung) erreicht wird. Anhand von Ziegel C konnte ein Abgleich mit Messergebnissen aus einem Wandprüfstand erfolgen, da von Ziegel C ein Messergebnis für das Schalldämmmaß vorhanden war. Dazu wurden schallschutztechnische Berechnungen mit und ohne Berücksichtigung von Putz und Mörtelschichten und mit und ohne Berücksichtigung der Anisotropie der Materialparameter durchgeführt (Abschnitt 6).

Eine E-Modul-Messung mittels Ultraschallverfahren war nicht an allen hier untersuchten Ziegeln möglich, da die teilweise sehr dünnen Stegstärken sich nicht für dieses Messverfahren eignen. Aus diesem Grund wurde für weitere Versuche die Impuls-Erregungs-Technologie nach Spinner (Spinner, et al., 1961) für die messtechnische Ermittlung des E-Moduls gewählt.

Dabei müssen auch keine Annahmen bezüglich G-Modul, Poissonzahl und Dämpfung getroffen werden, da diese Kennwerte vollständig messtechnisch ermittelt werden. Während eine stabförmige Probe zu Biege- oder Torsionsschwingungen angeregt wird (Bild 85), wird bei diesem Messverfahren die Frequenz der Schwingung mittels eines Piezotasters erfasst (Bild 86). Die Berechnung der Materialparameter E-Modul, G-Modul und Poissonzahl erfolgte nach Formeln von Spinner und Tefft (Spinner, et al., 1960) für stabförmige Proben.



Bild 85: Anregung einer Biegeschwingung durch Anschlagen mit einem geeigneten Werkzeug und gleichzeitige Erfassung der Schwingung mittels Piezotaster

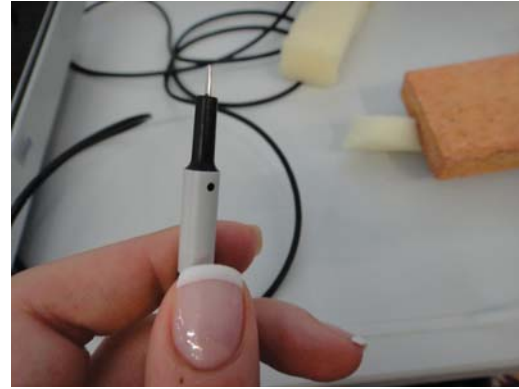


Bild 86: Piezotaster zur Messung der Frequenz der angeregten Schwingung

3.3.2. Abhängigkeit elastischer Materialparameter von der Scherbenrohddichte

Im Folgenden wurde an den von den Projektpartnern zur Verfügung gestellten Ziegeln eine Abhängigkeit der elastischen Materialparameter von der Scherbenrohddichte untersucht. Dazu wurden die elastischen Materialparameter E-Modul, G-Modul, Poissonzahl und Dämpfung an den in dieser Arbeit verwendeten Hochlochziegeln mittels Impuls-Erregungstechnologie gemessen und nach Spinner und Tefft berechnet. Anschließend wurden die berechneten elastischen Materialparameter gegen die Scherbenrohddichte aufgetragen (Bild 87 bis Bild 90). Aus der Untersuchung wurde ein Zusammenhang zwischen der Scherbenrohddichte und den gemessenen elastischen Materialparametern deutlich.

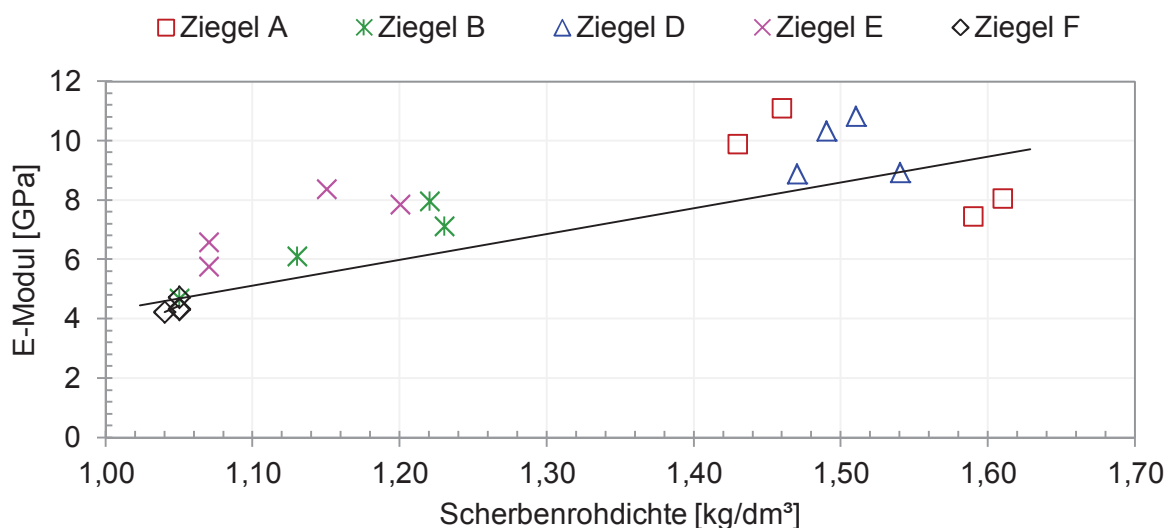


Bild 87: Zusammenhang zwischen E-Modul und Scherbenrohddichte der Ziegel mit der Bezeichnung A, B, D, E und F: Die messtechnische Ermittlung des E-Moduls erfolgte mittels Impuls-Erregungs-Technologie

Mit Anstieg der Scherbenrohddichte steigen auch E-Modul und G-Modul an. Bei der niedrigsten gemessenen Scherbenrohddichte mit $\rho_{\text{Scherben}} = 1,05 \text{ kg/dm}^3$ (Ziegel F) wird nur ein

E-Modul von $E = 4,4 \text{ GPa}$ erreicht. Bei einer Scherbenrohddichte von $\rho_{\text{Scherben}} = 1,50 \text{ kg/dm}^3$ (Ziegel D) wird mit einem E-Modul von $E = 9,75 \text{ GPa}$ ein mehr als doppelt so hoher Wert erreicht. Es ist anzunehmen, dass sich das E-Modul neben der Lochbildgeometrie signifikant auf das Schalldämmmaß von Hochlochziegeln auswirkt.

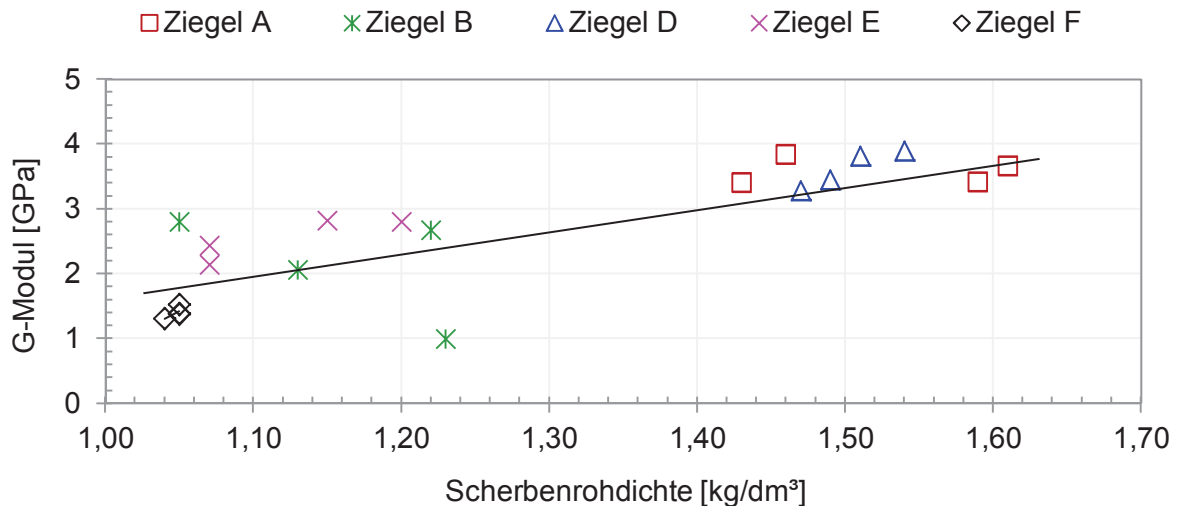


Bild 88: Zusammenhang zwischen G-Modul und Scherbenrohddichte der Ziegel mit der Bezeichnung A, B, D, E und F: Die messtechnische Ermittlung des E-Moduls erfolgte mittels Impuls-Erregungs-Technologie

Während E-Modul und G-Modul mit steigender Scherbenrohddichte ansteigen, sinken dabei die Querkontraktionszahl (Poissonzahl) und die innere Dämpfung (Material-Dämpfung) ab (Bild 89 und Bild 90).

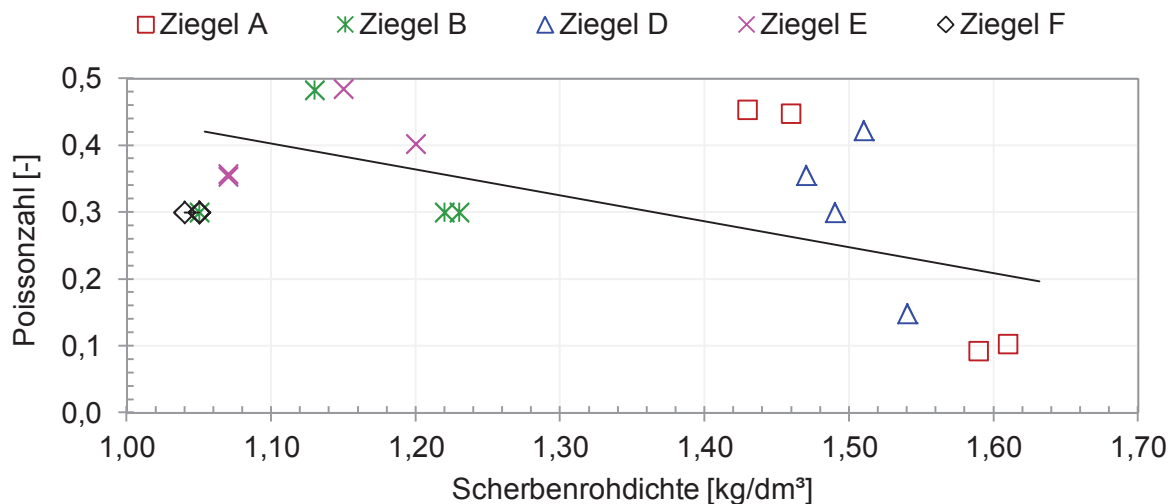


Bild 89: Zusammenhang zwischen Poissonzahl μ und Scherbenrohddichte der Ziegel mit der Bezeichnung A, B, D, E und F: Die messtechnische Ermittlung des E-Moduls erfolgte mittels Impuls-Erregungs-Technologie

Dabei bewegen sich die gemessenen Werte für die Poissonzahl zwischen $\mu = 0,399$ für $\rho_{\text{Scherben}} = 1,12 \text{ kg/dm}^3$ (Ziegel E) und $\mu = 0,274$ für $\rho_{\text{Scherben}} = 1,52 \text{ kg/dm}^3$ (Hochlochziegel Ziegel A). Die Messwerte für die innere Dämpfung liegen zwischen $\delta = 6,4 \%$ für $\rho_{\text{Scherben}} = 1,12 \text{ kg/dm}^3$ (Ziegel E) und $\delta = 3,2 \%$ für $\rho_{\text{Scherben}} = 1,52 \text{ kg/dm}^3$ (Ziegel A).

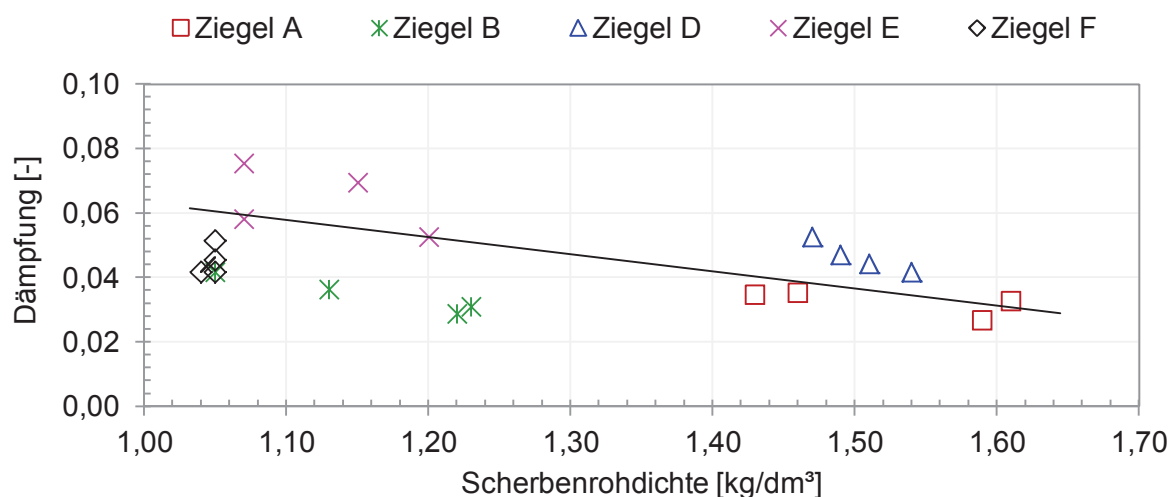


Bild 90. Zusammenhang zwischen Dämpfung und Scherbenrohddichte der Ziegel mit der Bezeichnung A, B, D, E und F: Die messtechnische Ermittlung des E-Moduls erfolgte mittels Impuls-Erregungs-Technologie

Für die übrigen in dieser Arbeit untersuchten Hochlochziegel konnten keine schallschutztechnischen Messergebnisse seitens der Projektpartner zur Verfügung gestellt werden, so dass hier kein Abgleich der FE-Berechnungen erfolgen konnte. Die hier ermittelten Materialparameter dienen zur Abschätzung der ziegeltypischen Werte für E-Modul, G-Modul, Poissonzahl und Dämpfung für die FE-Berechnung zum Einfluss des Lochbildes auf den Schallschutz. Die Materialparameter werden für diese FE-Berechnungen in Anlehnung an die in diesem Abschnitt ermittelten Minimal- und Maximalwerte für Scherbenrohddichte und E-Modul gewählt.

3.4. Kurzzusammenfassung: Messungen an Hochlochziegeln

Es kann festgestellt werden, dass eine Zunahme der Scherbenrohddichte mit einer Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit einhergeht. Auch zwischen E-Modul und Rohddichte besteht ein ähnlicher Zusammenhang. Eine Erhöhung des E-Moduls führt zu einer Verbesserung der Schallschutzeigenschaften des Hochlochziegels, aber gleichzeitig zu einer Erhöhung der Scherben-Wärmeleitfähigkeit und damit der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit.

Weiterhin konnte gezeigt werden, dass durch eine Ausrüstung der inneren Ziegeloberflächen mit einem niedrigen Emissionskoeffizienten die äquivalente Wärmeleitfähigkeit massiv vermindert werden kann, ohne die übrigen Materialparameter zu beeinflussen. Somit wird durch eine Beschichtung bzw. durch eine Ausrüstung der Ziegel mit beschichteten Stecklingen eine Möglichkeit geschaffen, die wärmetechnischen Eigenschaften der Hochlochziegel zu verbessern, ohne etwas am Lochbild oder an den Materialparametern zu ändern.

Außerdem konnte gezeigt werden, dass ein Zusammenhang zwischen den elastischen Materialparametern E-Modul, G-Modul, Poissonzahl und innerer Dämpfung und der Scherbenrohddichte besteht. So steigen E-Modul und G-Modul bei einer Erhöhung der Scherbenrohddichte an, während Poissonzahl und innere Dämpfung vermindert werden.

4. Untersuchungen an Modellziegeln

Die von den Projektpartnern bereit gestellten Hochlochziegel zeichnen sich durch unterschiedliche werkstofftechnische Kenngrößen und unterschiedliche Lochbildgeometrien aus. Um die weiteren Untersuchungen zur Aufstellung einer Wärmebilanz von diesen Kenngrößen unabhängig zu machen, wurden Untersuchungen an definierten Modellziegeln durchgeführt. Dabei bestand die Aufgabe darin, die Wirkung der Beschichtung auf den Wärmeübergang durch Strahlung an vier einfachen Modellgeometrien quantitativ messtechnisch und durch FE-Berechnung zu ermitteln. Dafür wurden die Modellziegel mit Thermoelementen ausgestattet und vor und nach einer Beschichtung gemessen. Die experimentell ermittelten Wärmeströme für Leitung, Strahlung und Konvektion wurden mit entsprechenden Wärmebilanzen verglichen, die mittels Finiter-Elemente-Methode berechnet wurden. Ziel hierbei war es, eine Aussage zu erhalten, ob Finite-Elemente-Berechnungen für die Aufstellung einer Wärmebilanz hinreichend genaue Werte für den Strahlungs-, Leitungs- und Konvektionsanteil liefern.

Die Wärmebilanz realer Hochlochziegel kann aufgrund der komplexen Lochbildgeometrie und der Größe der Probekörper bislang mit keinem existierenden Verfahren messtechnisch erfasst werden und muss mittels Finiter-Elemente-Berechnung bestimmt werden.

4.1. Messtechnische Wärmebilanzen mit eingebauten Thermoelementen

4.1.1. Herstellung der Modellziegel

Die herzustellenden Modellziegel sollten mit ihren Abmaßen genau in das Wärmestromplattenmessgerät TLP 200 passen. Aus diesem Grund kam nur eine Modellziegelgeometrie von 100 mm x 100 mm x 30 mm in Frage. Um eine gleichbleibende Scherben-Wärmeleitfähigkeit von etwa $\lambda_{10, \text{tr}} = 0,35 \text{ W/mK}$ (Standardwert eines Ziegelscherbens) über den gesamten Modellziegel zu gewährleisten, hat sich der Druckguss von Kunstharz mit Füllstoffzumischung als Verfahren zur Probenherstellung am besten bewährt. Bei diesem Verfahren werden auf Grundlage von 3D-CAD Dateien die Modelle mittels Stereolithographie gefertigt. Aus den so hergestellten Stereolithographiemodellen werden anschließend Druckgussformen hergestellt. Um die gewünschte Scherben-Wärmeleitfähigkeit der Modellziegel einstellen zu können, musste zunächst ein geeignetes Kunstharz und der richtige Gehalt von Graphit als Füllstoff, nämlich 34 Ma.-%, ermittelt werden. Mit der Graphit-Zugabe konnte im Kunstharz genau die gleiche Scherben-Wärmeleitfähigkeit, nämlich $\lambda_{10, \text{tr}} = 0,35 \text{ W/mK}$, wie in der Ziegelkeramik eingestellt werden.

Anschließend wurden die äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten der vier Modelle im Wärmestromplattenmessgerät TLP 200 ermittelt. Danach wurden Bohrlöcher für die Bestückung der Minimodelle mit Thermoelementen eingebracht, da für die Aufstellung der Wärmebilanzen zusätzliche Messpunkte für die Temperatur in den Stegen benötigt wurden.

4.1.2. Ausrüstung mit Thermoelementen (Methode „Thermoelemente“)

Für die jeweils separate Bestimmung der einzelnen Wärmeübergänge durch Strahlung, Leitung und Konvektion wurde ein spezieller Versuchsaufbau für die Bestimmung der einzelnen Anteile am Gesamtwärmestrom konzipiert werden. Zur Bestimmung des Gesamtwärmestroms durch die Modellziegel stand das Einplattengerät TLP 200 der Firma Taurus zur Verfügung. Aus dem Gesamtwärmestrom durch die Modellziegel kann die äquivalente Wärmeleitfähigkeit des Modells berechnet werden. Die zusätzlichen Thermoelemente ermöglicht die Berechnung des Leitungsanteils über das Festkörpergerüst unter Anwendung von Gleichung (29). Diese Thermoelemente werden in den seitlichen und mittleren Stegen der Modellziegel benötigt. Die Position der Thermoelemente ist dabei genau festgelegt und resultiert aus theoretischen Überlegungen. Für die Thermoelemente werden zunächst sehr feine Löcher mit einem Durchmesser von 2 mm gebohrt. Anschließend werden die zuvor kalibrierten Thermoelemente (Typ K) in den Bohrlöchern platziert und mittels Epoxidharzkleber der gleichen Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{10, \text{tr}} = 0,35 \text{ W/mK}$ fixiert (Bild 91).

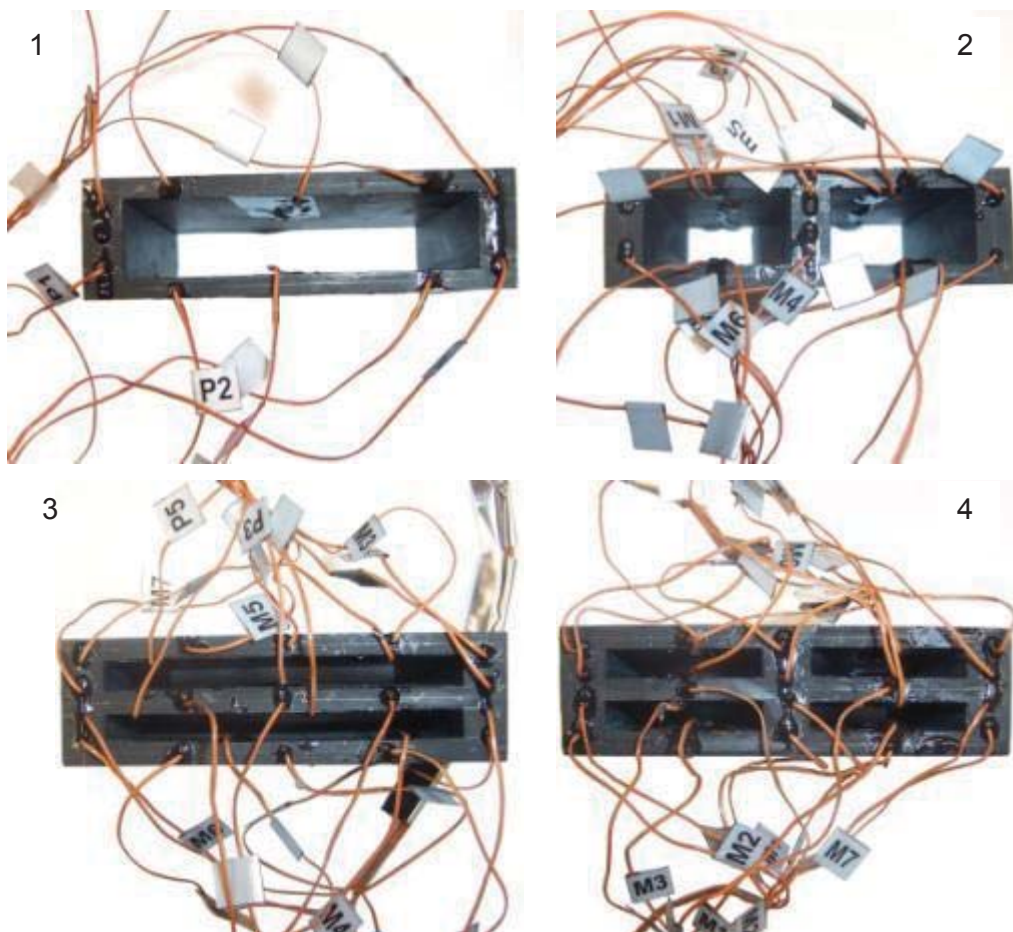


Bild 91: Modellziegel 1 bis 4 versehen mit Thermoelementen zur Bestimmung der Temperaturen an vordefinierten Stellen (Methode „Thermoelemente“)

Zusätzliche Thermoelemente wurden in den Modellziegeln platziert, um die symmetrische Verteilung der Temperatur sicherzustellen und den Einfluss seitlicher Wärmeströme auszuschließen. Nach dem Aushärten der Epoxidharzmischung wurden die Modellziegel nacheinander in das Einplattenmessgerät TLP 200 eingebaut und die äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten gemessen. Um einen Einfluss der eingebrachten Thermoelemente auf die Messergebnisse auszuschließen, wurden die Modellziegel zunächst ohne und anschließend mit den eingebrachten Thermoelementen gemessen und die ermittelten äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten verglichen. Dabei konnte kein nennenswerter Einfluss der eingebrachten zusätzlichen Thermoelemente auf den Wärmeübergang festgestellt werden.

4.1.3. Berechnung der Wärmebilanz aus den Messwerten

Da bei der Methode „Thermoelemente“ nur die Temperaturen und der Gesamt-Wärmestrom direkt gemessen werden konnten, mussten die einzelnen Wärmestromanteile aus den experimentellen Daten berechnet werden. Es lassen sich aber nur die direkten Wärmeströme über z.B. einen Einzelsteg oder der Wärmestrom durch Strahlung zwischen zwei Flächen berechnen.

Die Bestimmung der Wärmeübertragung durch Leitung im Festkörper erfolgte anhand der gemessenen Temperaturen in den einzelnen Stegen nach Gleichung (29):

$$\dot{Q} = \lambda \frac{A}{s} (T_i - T_a) \quad (29)$$

Die Wärmeleitfähigkeit des Vollmaterials wurde mit $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,35 \text{ W/mK}$ exakt eingestellt und kann als konstant vorausgesetzt werden. Die Temperaturen T in den Messpunkten werden durch die zusätzlich eingebrachten Thermoelemente erfasst; der Abstand der Thermoelemente s und die durchströmte Querschnittsfläche A sind bekannt.

Die Vorgehensweise bei der Ermittlung des Strahlungsanteils wird analog zur Ermittlung des Leitungsanteils anhand der Oberflächentemperaturen der Strahlungsflächeninnenseiten durchgeführt. Hierzu wurden je nach Modellziegel mehrere Thermoelemente an verschiedenen Stellen der gegenüberliegenden Innenflächen angebracht. Zur Berechnung des Wärmeübergangs durch Strahlung wird die Stefan-Boltzmann-Gleichung (30) verwendet:

$$\dot{Q}_{12} = C_{12} A (T_1^4 - T_2^4) \quad (30)$$

Die Strahlungsaustauschzahl C_{12} wird dabei durch den Emissionskoeffizienten ε bestimmt; σ ist die Strahlzahl des „Schwarzen Körpers“. Gleichung (31) gilt nur für den Fall paralleler Strahlungsflächen, was bei den verwendeten Modellen gegeben ist.

$$C_{12} = \frac{\sigma}{\left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)} \quad (31)$$

Da für die Berechnung des Strahlungsübergangs parallele Flächen angenommen werden, konnte die je Zeiteinheit durch Strahlung übertragene Wärmemenge nach Gleichung (32) berechnet werden:

$$\dot{Q}_{12} = \frac{\sigma}{\left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)} A (T_1^4 - T_2^4) \quad (32)$$

Um nochmals nachzuweisen, dass eine Beschichtung mit vergleichsweise niedrigem Emissionskoeffizienten den Wärmestrom durch Strahlung absenken kann, wurden die Modellziegel nach dem ersten Messdurchlauf mit der neu entwickelten Beschichtung aus „Goldbronzepulver Luminor 2210“ (1 Vol.-% Gehalt im Binder) und verdünntem Holzleim als Binder beschichtet. Anschließend erfolgte eine erneute Messung der Wärmeströme und ein Aufstellen der Wärmebilanz der beschichteten Modellziegel. Der Wärmestrom durch Strahlung sollte dabei erkennbar abgenommen haben. Für die Modellziegel waren die geometrische Abmessungen und somit die am Strahlungsübergang beteiligten Flächen bekannt. Die Temperaturen der am Strahlungsübergang beteiligten Innenflächen wurden mittels Thermoelementen erfasst. Die Emissionskoeffizienten ε der unbeschichteten und beschichteten Modellziegel wurden experimentell mit $\varepsilon = 0,941$ und $\varepsilon = 0,272$ bei einer Strahlertemperatur von 100 °C und mit $\varepsilon = 0,948$ und $\varepsilon = 0,377$ bei einer Strahlertemperatur von 40 °C gemessen. Mit Gleichung (32) lässt sich aus diesen Daten der Wärmeübergang durch Strahlung zwischen den jeweiligen Flächen berechnen.

Da die natürliche Konvektion aufgrund der sehr geringen Strömungsgeschwindigkeit in den Modellen messtechnisch nicht erfassbar war, erfolgte eine Berechnung als Differenz aus Gesamtwärmestrom abzüglich Strahlung und Leitung im Festkörper.

Um aus den Teilwärmeströmen durch Wärmeleitung einen Gesamtanteil durch Leitung zu erhalten, wurde ein weiteres Modell, nämlich die bestehende Analogie zwischen Wärmeleitung und elektrischer Leitung, herangezogen. Dabei fungiert die elektrische Stromstärke I als Synonym für den Wärmestrom \dot{Q} die Spannung U ist der anliegende Temperaturgradient $\Delta T/\Delta x$ und der Wärmeleitwiderstand R lässt sich als Quotient aus Spannung U (Temperaturgradient) und Stromstärke I ausdrücken. Somit kann für die Wärmeleitung jedes Modellziegels ein elektrisches Widerstandsmodell beschrieben werden. Dabei werden je nach Modellziegel die Teilwärmeströme als Reihen- oder Parallelschaltung oder als eine Kombination aus beiden betrachtet. Die Modellziegel können jetzt durch elektrische Widerstandsmodelle berechnet werden. Dabei bezeichnet R_L den Widerstand durch Wärmeleitung, R_S den Widerstand durch Strahlung und R_K den Widerstand durch Konvektion (Beuken, 1936).

Alle Wärmewiderstände lassen sich durch den Temperaturgradienten am Modellziegel und den gemessenen Wärmestrom beschreiben. Somit können die einzelnen Wärmeströme

durch mathematische Gleichungen für jeden Modellziegel formuliert werden. In Bild 92 sind die sogenannten Ersatzschaltbilder für den jeweiligen Modellziegel dargestellt.

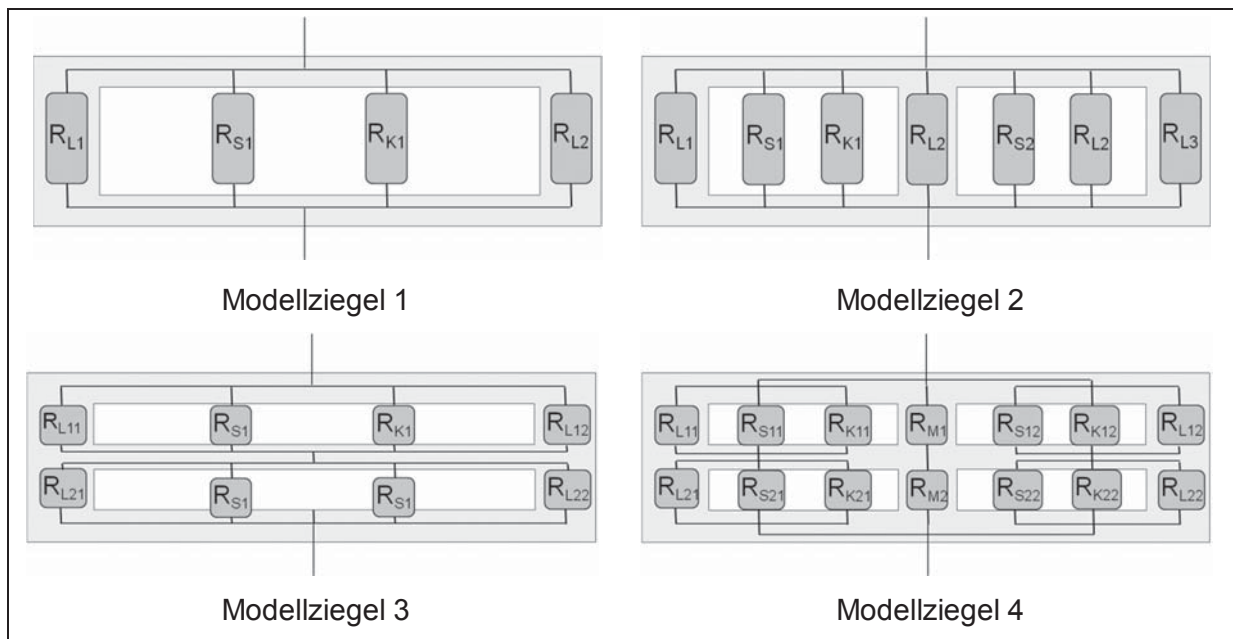


Bild 92: Ersatzschaltbilder für die Modellziegel 1 bis 4 zur Aufstellung der Wärmebilanzen aus den gemessenen Teilwärmeströmen

4.1.3.1. Wärmebilanz Modellziegel 1

Für Modellziegel 1 ergibt sich eine Parallelschaltung der Widerstände für den Wärmeübergang durch Leitung, Strahlung und Konvektion. Die einzelnen Teilwärmeströme werden hierbei aufsummiert und ergeben zusammen den gesamten Wärmestrom durch den Modellziegel. Die Summe der Wärmeströme aus Strahlung im Hohlraum, Konvektion im Hohlraum und der Leitung über die beiden seitlichen Stege ergibt somit den gesamten Wärmestrom durch das Modell. Der Wärmestrom durch Konvektion konnte nicht direkt messtechnisch erfasst werden und berechnet sich mit Kenntnis des gesamten Wärmestroms durch den Modellziegel, abzüglich des Wärmestroms durch Leitung und durch Strahlung (Gleichung (33)).

Somit kann der Konvektionsanteil für Modellziegel 1 folgendermaßen berechnet werden:

$$\frac{1}{R_{\text{ges}}} = \frac{1}{R_{L1}} + \frac{1}{R_K} + \frac{1}{R_S} + \frac{1}{R_{L2}} \tag{33}$$

Mit Verwendung des Ohm'schen Gesetzes $U = R \cdot I$ kann Gleichung (33) durch die Spannung U (= Temperaturdifferenz) und den Strom I (= Wärmestrom \dot{Q}) ausgedrückt werden (Gleichung 34).

$$\frac{I_{\text{ges}}}{U_{\text{ges}}} = \frac{I_{L1}}{U_{L1}} + \frac{I_K}{U_K} + \frac{I_S}{U_S} + \frac{I_{L2}}{U_{L2}} \tag{34}$$

Da es sich um eine Parallelschaltung von Widerständen handelt, ist die an den Teilwiderständen anliegende Spannung $U_{\text{ges}} = \Delta T = U_{L1} = U_S = U_K = U_{L2}$. Mit dieser Annahme ergibt sich Gleichung (35).

$$I_{\text{ges}} = I_{L1} + I_S + I_K + I_{L2} \quad (35)$$

Zur Berechnung des Konvektionsanteils in Modellziegel 1 wird Gleichung (35) nach I_K umgestellt (Gleichung 36).

$$I_K = I_{\text{ges}} - (I_{L1} + I_S + I_{L2}) \quad (36)$$

Wird anstelle des elektrischen Stroms I der Wärmestrom \dot{Q} eingesetzt, so führt dies zur Berechnung des Konvektionsanteils in Gleichung (37).

$$\dot{Q}_K = \dot{Q}_{\text{ges}} - (\dot{Q}_{L1} + \dot{Q}_S + \dot{Q}_{L2}) \quad (37)$$

Mit Kenntnis aller im Modellziegel auftretenden Wärmeströme und der korrekten Beschreibung durch ein Widerstandsmodell der Teilströme ist es möglich, aus den gemessenen Daten eine Wärmebilanz des Modellziegels aufzustellen. Die Aufstellung der Wärmebilanz für die Modellziegel erfolgte bei Probenmitteltemperaturen von 15 °C, 25 °C und 35 °C. Die Ergebnisse für die einzelnen Wärmeströme sind in Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 10: Absolute Wärmeströme \dot{Q} [W] bei Modellziegel ; gemessen bei den Probenmitteltemperaturen 15 °C, 25 °C und 35 °C (Mittelwerte aus je drei Einzelmessungen)

Probenmitteltemperatur	Modellziegel 1, Emissionskoeffizient $\varepsilon = 0,94$			Modellziegel 1, Emissionskoeffizient $\varepsilon = 0,37$		
	Leitung	Konvektion	Strahlung	Leitung	Konvektion	Strahlung
[°C]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]
15	0,321	0,148	0,408	0,324	0,240	0,098
25	0,322	0,130	0,446	0,326	0,237	0,109
35	0,321	0,135	0,483	0,325	0,238	0,121

Werden die einzelnen Wärmeströme bei den Probenmitteltemperaturen 15 °C, 25 °C und 35 °C betrachtet, so ändert sich der Wärmestrom durch Leitung praktisch nicht, während der Wärmestrom durch Strahlung mit zunehmender Temperatur ansteigt. Der Konvektionsanteil kann als nahezu gleichbleibend betrachtet werden. Durch eine Verminderung des Emissionskoeffizienten von $\varepsilon = 0,948$ auf $\varepsilon = 0,374$ (gemessen bei einer Strahlertemperatur von 40 °C) mittels Beschichtung der Innenseiten der Strahlungsflächen wird der Wärmeübergang durch Strahlung wesentlich vermindert. Weiterhin ist ein Anstieg des Konvektionsanteils zu verzeichnen, der mit einer Erhöhung der Temperaturdifferenz zwischen den Innenflächen im Modell erklärbar ist. Zur Aufstellung einer Wärmebilanz für Modellziegel 1 werden diese Wärmeströme zueinander ins Verhältnis gesetzt (Tabelle 11).

Tabelle 11: Prozentuale Anteile der Wärmeströme bei Modellziegel 1; gemessen bei den Probenmitteltemperaturen 15 °C, 25 °C und 35 °C (Mittelwerte aus je drei Einzelmessungen)

Probenmitteltemperatur	Modellziegel 1, Emissionskoeffizient $\varepsilon = 0,94$			Modellziegel 1, Emissionskoeffizient $\varepsilon = 0,37$		
	Leitung	Konvektion	Strahlung	Leitung	Konvektion	Strahlung
[°C]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
15 °C	36,7	16,9	46,5	48,9	36,3	14,8
25 °C	35,9	14,5	49,6	48,5	35,2	16,3
35 °C	34,2	14,3	51,5	47,5	34,8	17,7

Aus Tabelle 11 ist ersichtlich, dass der Einfluss von Leitung und Konvektion bei Anstieg der Probenmitteltemperatur vermindert wird, wohingegen der Strahlungsanteil mit zunehmender Temperatur ansteigt. Der Anteil der Leitung am gesamten Wärmeübergang sinkt mit einem Anstieg der Probenmitteltemperatur von 15 °C auf 35 °C von 36,7 % auf 34,2 %. Wie zu erwarten, steigt der Strahlungsanteil von 46,5 % auf 51,5 % im unbeschichteten und von 14,8 % auf 17,7 % im beschichteten Modellziegel an. In Modellziegel 1 kann durch die Verminderung des Emissionskoeffizienten der gesamte Wärmestrom zwischen 31,7 % (bei Probenmitteltemperatur 15 °C) und 33,8 % (bei Probenmitteltemperatur 35 °C) vermindert werden.

4.1.3.2. Wärmebilanz Modellziegel 2

Dieselbe Vorgehensweise wurde zur Aufstellung der Wärmebilanz für Modellziegel 2 angewendet. Auch hier wurde in Analogie zu Modellziegel 1 zuerst ein Ersatzschaltbild der Teilwiderstände formuliert (Gleichung (38)):

$$\frac{1}{R_{\text{ges}}} = \frac{1}{R_{L1}} + \frac{1}{R_{K1}} + \frac{1}{R_{S1}} + \frac{1}{R_{L2}} + \frac{1}{R_{K2}} + \frac{1}{R_{S2}} + \frac{1}{R_{L3}} \quad (38)$$

Der Ohm'sche Widerstand R wird durch die elektrische Spannung U (= Temperatur) und den Strom I (= Wärmestrom) ausgedrückt. Danach wird der Strom I durch den Wärmestrom \dot{Q} substituiert. Wird die Gleichung anschließend nach dem Wärmestrom durch Konvektion \dot{Q}_K umgestellt, so kann dieser aus den Messdaten berechnet werden (Gleichung 39). Die Kenntnis des Konvektionsanteils in Modellziegel 2 erlaubt die Aufstellung einer Wärmebilanz für dieses Modell.

$$\dot{Q}_K = \dot{Q}_{\text{ges}} - (\dot{Q}_{L1} + \dot{Q}_{S1} + \dot{Q}_{L2} + \dot{Q}_{S2} + \dot{Q}_{L3}) \quad (39)$$

Mit Kenntnis aller im Modellziegel auftretenden Wärmeströme und der korrekten Beschreibung dieser durch ein Widerstandsmodell der Teilströme ist es nun möglich, aus den gemessenen Daten eine Wärmebilanz des Modellziegels 2 aufzustellen. Die Aufstellung der Wärmebilanz erfolgte bei Probenmitteltemperaturen von 15 °C, 25 °C und 35 °C. Die

Ergebnisse für die absolut gemessenen Wärmeströme sind Tabelle 12 zu entnehmen.

Tabelle 12: Absolute Wärmeströme \dot{Q} [W] bei Modellziegel 2, gemessen bei den Probenmitteltemperaturen 15 °C, 25 °C und 35 °C (Mittelwerte aus je drei Einzelmessungen)

Probenmitteltemperatur	Modellziegel 2, Emissionskoeffizient $\varepsilon = 0,94$			Modellziegel 2, Emissionskoeffizient $\varepsilon = 0,37$		
	Leitung	Konvektion	Strahlung	Leitung	Konvektion	Strahlung
[°C]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]
15	0,460	0,095	0,341	0,475	0,187	0,079
25	0,463	0,068	0,377	0,477	0,187	0,088
35	0,461	0,078	0,411	0,479	0,197	0,094

Werden die einzelnen Wärmeströme bei den Probenmitteltemperaturen 15 °C, 25 °C und 35 °C verglichen, so ändert sich der Wärmestrom durch Leitung nicht, während der Wärmestrom durch Strahlung mit zunehmender Temperatur ansteigt. Der Konvektionsanteil kann als nahezu gleichbleibend betrachtet werden. Durch eine Verminderung des Emissionskoeffizienten von $\varepsilon = 0,94$ auf $\varepsilon = 0,37$ durch Beschichtung der Innenflächen wird der Wärmeübergang durch Strahlung von 0,341 W bei 15 °C Probenmitteltemperatur auf 0,079 W vermindert. Bei einer Probenmitteltemperatur von 35 °C kann der strahlungsbedingte Wärmestrom von 0,411 W auf 0,094 W abgesenkt werden. Durch die Beschichtung ist ein leichter Anstieg des Konvektionsanteils zu verzeichnen. Zur Aufstellung einer Wärmebilanz für Modellziegel 2 werden diese Wärmeströme zueinander ins Verhältnis gesetzt (Tabelle 13).

Tabelle 13: Prozentuale Anteile der Wärmeströme bei Modellziegel 2, gemessen bei den Probenmitteltemperaturen 15 °C, 25 °C und 35 °C (Mittelwerte aus je drei Einzelmessungen)

Probenmitteltemperatur	Modellziegel 2, Emissionskoeffizient $\varepsilon = 0,94$			Modellziegel 2, Emissionskoeffizient $\varepsilon = 0,37$		
	Leitung	Konvektion	Strahlung	Leitung	Konvektion	Strahlung
[°C]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
15	51,4	10,6	38,1	64,1	25,2	10,7
25	51,0	7,5	41,5	63,4	24,8	11,7
35	48,5	8,2	43,2	62,2	25,5	12,2

Aus Tabelle 13 wird eine Verminderung des Leitungs- und des Konvektionsanteils bei steigender Probenmitteltemperatur erkennbar. Der Strahlungsanteil steigt in unbeschichtetem ($\varepsilon = 0,94$) und beschichtetem Zustand ($\varepsilon = 0,37$) mit zunehmender Temperatur an. Der Anteil der Leitung am gesamten Wärmeübergang sinkt mit einem Anstieg der Probenmitteltemperatur von 15 °C auf 35 °C von 51,4 % auf 48,5 %. Wie zu erwarten, steigt der Strahlungsanteil von 38,1 % auf 43,2 % im unbeschichteten und von 10,7 % auf 12,2 %

im beschichteten Modellziegel 2. In Modellziegel 2 kann durch Verminderung des Emissionskoeffizienten von $\epsilon = 0,94$ auf $\epsilon = 0,37$ der gesamte Wärmestrom zwischen 27,4 % (bei Probenmitteltemperatur 15 °C) und 31,0 % (bei Probenmitteltemperatur 35 °C) vermindert werden.

4.1.3.3. Wärmebilanz Modellziegel 3

Bei Modellziegel 3 handelt es sich um ein komplexeres Modell, bei dem eine Reihenschaltung zweier Parallelschaltungen beachtet werden muss (Bild 93).

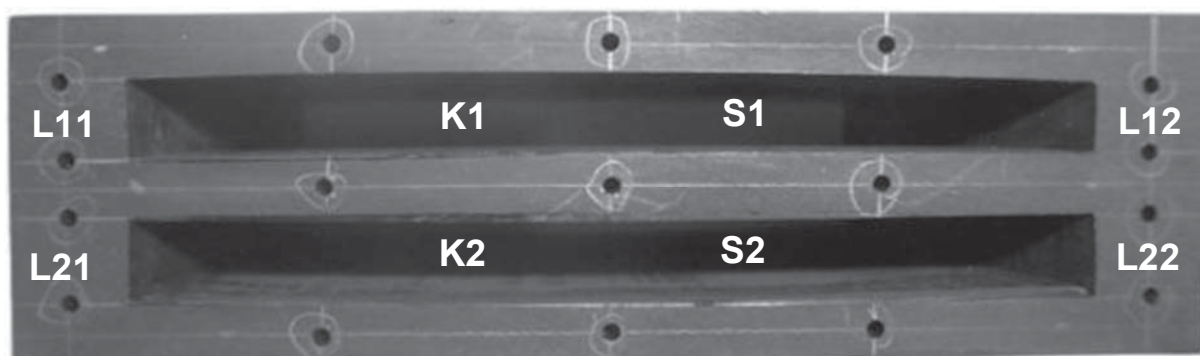


Bild 93: Modellziegel 3 mit Bohrungen für Thermoelemente zur Bestimmung der Wärmeströme im Festkörper L11, L12, L21, L22, der Konvektionsströme in beiden Hohlräumen K1 und K2 und des Wärmeübergangs durch Strahlung in beiden Hohlräumen S1 und S2

Bei Reihenschaltungen ergibt sich der Gesamtwiderstand R_{ges} aus der Summe der Einzelwiderstände. Die beiden Einzelwiderstände lassen sich als Parallelschaltung der Teilwiderstände Strahlung, Leitung und Konvektion beschreiben. Da dieselbe Spannung bei einer Parallelschaltung an allen Teilwiderständen anliegt, kann das Ersatzschaltbild für Modellziegel 3 folgendermaßen beschrieben werden (Gleichung 40):

$$R_{\text{ges}} = R_1 + R_2 = \frac{U_{\text{ges}}}{I_{\text{ges}}} = \frac{U_1}{I_{L11} + I_{K1} + I_{S1} + I_{L12}} + \frac{U_2}{I_{L21} + I_{K2} + I_{S2} + I_{L22}} \quad (40)$$

Gleichung (40) muss nun nach den beiden Konvektionströmen I_{K1} und I_{K2} aufgelöst werden. Da das Modell symmetrisch ist und die Temperaturdifferenzen in beiden Hohlräumen sehr ähnlich sind, wird angenommen, dass $I_{K1} = I_{K2} = I_K$ gilt. Gleichung (40) wird somit nach I_K aufgelöst:

$$\frac{U_{\text{ges}}}{I_{\text{ges}}} (I_{L11} + I_K + I_{S1} + I_{L12}) \cdot (I_{L21} + I_K + I_{S2} + I_{L22}) = U_1 (I_{L21} + I_K + I_{S2} + I_{L22}) + U_2 (I_{L11} + I_K + I_{S1} + I_{L12})$$

Durch Multiplikation der einzelnen Summanden werden die Klammern aufgelöst und folgender Ausdruck wird erhalten:

$$\frac{1}{I_{\text{ges}}} (I_{L11} \cdot I_{L21} + I_{L11} \cdot I_K + I_{L11} \cdot I_{S2} + I_{L11} \cdot I_{L22} + I_K \cdot I_{L21} + I_K^2 + I_K \cdot I_{S2} + I_K \cdot I_{L22} + I_{S1} \cdot I_{L21} + I_{S1} \cdot I_K + I_{S1} \cdot I_{S2} + I_{L22} \cdot I_{S1} + I_{L12} \cdot I_{L21} + I_{L12} \cdot I_K + I_{L12} \cdot I_{S2} + I_{L12} \cdot I_{L22}) = 0,5 (I_{L21} + I_K + I_{S2} + I_{L22}) + 0,5 (I_{L11} + I_K + I_{S1} + I_{L12})$$

Nun werden die Klammern auf beiden Seiten aufgelöst, so dass nach I_K ausmultipliziert werden kann:

$$\frac{I_{L11} \cdot I_{L21}}{I_{\text{ges}}} + \frac{I_{L11}}{I_{\text{ges}}} \cdot I_K + \frac{I_{L11} \cdot I_{S2}}{I_{\text{ges}}} + \frac{I_{L11} \cdot I_{L22}}{I_{\text{ges}}} + \frac{I_{L21}}{I_{\text{ges}}} \cdot I_K + \frac{1}{I_{\text{ges}}} \cdot I_K^2 + \frac{I_{S2}}{I_{\text{ges}}} \cdot I_K + \frac{I_{L22}}{I_{\text{ges}}} \cdot I_K = 0,5 \cdot I_{L21} + 0,5 \cdot I_K + 0,5 \cdot I_{S2} + 0,5 \cdot I_{L22} + 0,5 \cdot I_{L11} + 0,5 \cdot I_K + 0,5 \cdot I_{S1} + 0,5 \cdot I_{L12}$$

An dieser Stelle werden die aus der Messung erhaltenen Wärmeströme eingesetzt und die Gleichung weiter zusammengefasst. Nach Einsetzen und Auflösen nach I_K resultiert folgende Gleichung:

$$I_K^2 + 0,670 \text{ W} \cdot I_K - 0,09995 \text{ W}^2 = 0$$

Es handelt sich hierbei um eine Binomische Gleichung, die mit der Lösungsformel gelöst werden muss:

$$I_{K1} = \frac{-0,670 \text{ W} - \sqrt{(0,670 \text{ W})^2 - 4 \cdot (0,09995 \text{ W}^2)}}{2} = \frac{-0,670 \text{ W} - 0,921 \text{ W}}{2} = \underline{\underline{-0,7955 \text{ W}}}$$

Ergebnis I_{K1} scheidet aus, da es negativ ist.

$$I_{K2} = \frac{-0,670 \text{ W} + \sqrt{(0,670 \text{ W})^2 - 4 \cdot (0,09995 \text{ W}^2)}}{2} = \frac{-0,670 \text{ W} + 0,921 \text{ W}}{2} = \underline{\underline{0,1255 \text{ W}}}$$

Die Lösung für I_{K2} liefert das korrekte Ergebnis für den Konvektionsanteil in Modellziegel 3.

Alternativ kann Modellziegel 3 auch direkt über die Wärmeströme berechnet werden. Es gilt:

$$I_{\text{ges}} = I_1 = I_2 \quad (41)$$

I_{ges} ist der gesamte Wärmestrom \dot{Q} der durch Modellziegel 3 fließt, sowohl durch die obere I_1 , als auch die untere I_2 Lochreihe (Gleichung 41). Es handelt sich dabei um eine Reihenschaltung. Die Wärmeströme I_1 und I_2 lassen sich weiter aufteilen in je eine Parallelschaltung.

$$I_1 = I_{L11} + I_{S1} + I_{K1} + I_{L12} = I_{\text{ges}} \quad (42)$$

$$I_2 = I_{L21} + I_{S2} + I_{K2} + I_{L22} = I_{\text{ges}} \quad (43)$$

Auf diese Art wird der Wärmestrom durch Konvektion in Übereinstimmung mit den voran gegangenen Rechnungen zu $I_K = I_{K1} = I_{K2} = 0,126 \text{ W}$ berechnet. Durch Einsetzen der gemessenen Wärmeströme in Gleichung (42) und Gleichung (43) wird direkt die Wärmebilanz von Modellziegel 3 (Tabelle 14) erhalten. Beide Rechenwege liefern dasselbe Ergebniss für den Konvektionsanteil und können analog verwendet werden.

Tabelle 14: Absolute Wärmeströme \dot{Q} [W] bei Modellziegel 3; gemessen bei den Probenmitteltemperaturen 15 °C, 25 °C und 35 °C (Mittelwerte aus je drei Einzelmessungen)

Probenmitteltemperatur	Modellziegel 3, Emissionskoeffizient $\varepsilon = 0,94$			Modellziegel 3, Emissionskoeffizient $\varepsilon = 0,37$		
	Leitung	Konvektion	Strahlung	Leitung	Konvektion	Strahlung
[°C]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]
15	0,351	0,119	0,190	0,365	0,148	0,044
25	0,355	0,125	0,210	0,364	0,161	0,049
35	0,362	0,130	0,230	0,368	0,165	0,054

Werden die einzelnen Wärmeströme bei den Probenmitteltemperaturen 15 °C, 25 °C und 35 °C verglichen, so ändert sich der Wärmestrom durch Leitung praktisch nicht, während der Wärmestrom durch Strahlung mit der Temperatur ansteigt. Der Konvektionsanteil erhöht sich bei diesem Modell ebenfalls mit der Temperatur. Durch eine Verminderung des Emissionskoeffizienten von $\varepsilon = 0,94$ auf $\varepsilon = 0,37$ durch Beschichtung der Innenseiten wird der Wärmeübergang durch Strahlung von 0,190 W bei 15 °C Probenmitteltemperatur auf 0,044 W vermindert. Bei einer Probenmitteltemperatur von 35 °C kann der strahlungsbedingte Wärmestrom von 0,230 W auf 0,054 W abgesenkt werden. Durch die Beschichtung ist ein leichter Anstieg des Konvektionsanteils zu verzeichnen. Zur Aufstellung einer Wärmebilanz für Modellziegel 3 werden diese Wärmeströme zueinander ins Verhältnis gesetzt (Tabelle 15).

Tabelle 15: Prozentuale Anteile der Wärmeströme bei Modellziegel 3; gemessen bei den Probenmitteltemperaturen 15 °C, 25 °C und 35 °C (Mittelwerte aus je drei Einzelmessungen)

Probenmitteltemperatur	Modellziegel 3, Emissionskoeffizient $\varepsilon = 0,94$			Modellziegel 3, Emissionskoeffizient $\varepsilon = 0,37$		
	Leitung	Konvektion	Strahlung	Leitung	Konvektion	Strahlung
[°C]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
15	59,3	13,1	27,6	71,5	21,0	7,6
25	56,2	15,0	28,7	69,4	22,6	8,0
35	53,4	16,7	29,9	67,1	24,2	8,7

Der Einfluss der Leitung auf den gesamten Wärmeübergang vermindert sich mit steigender Probenmitteltemperatur. Darüber hinaus steigen die Anteile von Strahlung und Konvektion an. Der Anteil der Leitung am gesamten Wärmeübergang sinkt mit einem Anstieg der Probenmitteltemperatur von 15 °C auf 35 °C von 59,3 % auf 53,4 %. Wie zu erwarten, steigt der Strahlungsanteil von 27,6 % auf 29,9 % im unbeschichteten und von 7,6 % auf 8,7 % im beschichteten Modellziegel 3 an. Durch eine Verminderung des Emissionskoeffizienten von $\varepsilon = 0,94$ auf $\varepsilon = 0,37$ wird eine Absenkung des gesamten Wärmestroms zwischen 20 % (bei Probenmitteltemperatur 15 °C) und 21,2 % (bei Probenmitteltemperatur 35 °C) herbeigeführt.

4.1.3.4. Wärmebilanz Modellziegel 4

Auch zur Berechnung der Wärmeströme in Modell 4 kann ein Ersatzschaltbild formuliert werden. Dieses wird als Reihenschaltung von Modell 2 berechnet (Gleichung (44)). Da es sich um eine Reihenschaltung handelt, können von den Wärmeströmen ausgehend folgende Teilgleichungen aufgestellt werden.

$$I_{\text{ges}} = I_1 = I_2 = \dot{Q}_{\text{ges}} = \dot{Q}_1 = \dot{Q}_2 \quad (44)$$

$$I_{\text{ges}} = I_1 = \sum_{n=1}^N I_{1n} = I_{L11} + I_{S11} + I_{K11} + I_{M1} + I_{S12} + I_{K12} + I_{L12}$$

$$I_{\text{ges}} = I_2 = \sum_{n=1}^N I_{2n} = I_{L21} + I_{S21} + I_{K21} + I_{M2} + I_{S22} + I_{K22} + I_{L22}$$

Aufgrund der Symmetrie des Modells kann folgende Annahme für die erste Lochreihe getroffen werden:

$$I_{K11} = I_{K12} = I_{K1}$$

$$I_{\text{ges}} = I_1 = I_{L11} + I_{S11} + 2 \cdot I_{K1} + I_{M1} + I_{S12} + I_{L12}$$

$$I_{\text{ges}} = I_2 = I_{L21} + I_{S21} + 2 \cdot I_{K2} + I_{M2} + I_{S22} + I_{L22}$$

Die Wärmeströme von Strahlung, Leitung und Konvektion berechnen sich damit zu:

$$I_L = I_{L11} + I_{M1} + I_{L12}$$

$$I_S = I_{S11} + I_{S12}$$

$$I_K = I_{K11} + I_{K12} = 2 I_K$$

Mit Hilfe von Messergebnissen und Teilwärmeströmen wurde berechnet, dass sich die Wärmeströme in Modellziegel 4 symmetrisch verhalten. Die Teilergebnisse sind dem Anhang zu entnehmen.

Tabelle 16: Absolute Wärmeströme \dot{Q} [W] bei Modellziegel 4; gemessen bei den Probenmitteltemperaturen 15 °C, 25 °C und 35 °C (Mittelwerte aus je drei Einzelmessungen)

Probenmitteltemperatur	Modellziegel 4, Emissionskoeffizient $\varepsilon = 0,94$			Modellziegel 4, Emissionskoeffizient $\varepsilon = 0,37$		
	Leitung	Konvektion	Strahlung	Leitung	Konvektion	Strahlung
[°C]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]
15	0,612	0,046	0,216	0,618	0,192	0,047
25	0,614	0,046	0,237	0,630	0,177	0,050
35	0,619	0,052	0,259	0,631	0,176	0,056

In Analogie zu den bereits beschriebenen Modellziegeln ändert sich der Wärmestrom durch Leitung bei den Probenmitteltemperaturen 15 °C, 25 °C und 35 °C praktisch nicht. Der Wärmestrom durch Strahlung steigt, wie bei den anderen Modellen mit steigender

Probenmitteltemperatur ebenfalls an. Der Konvektionsanteil kann als nahezu gleichbleibend betrachtet werden. Durch eine Verminderung des Emissionskoeffizienten von $\varepsilon = 0,94$ auf $\varepsilon = 0,37$ durch Beschichtung der Innenflächen wird der Wärmeübergang durch Strahlung deutlich messbar vermindert. Der Konvektionsanteil steigt durch Ausrüstung der Modelle mit einem Emissionskoeffizienten von $\varepsilon = 0,37$ deutlich an. Zur Aufstellung einer Wärmebilanz werden diese Wärmeströme zueinander ins Verhältnis gesetzt (Tabelle 17).

Tabelle 17: Prozentuale Anteile der Wärmeströme bei Modellziegel 4; gemessen bei den Probenmitteltemperaturen 15 °C, 25 °C und 35 °C (Mittelwerte aus je drei Einzelmessungen)

Probenmitteltemperatur	Modellziegel 4, Emissionskoeffizient $\varepsilon = 0,94$			Modellziegel 4, Emissionskoeffizient $\varepsilon = 0,37$		
	Leitung	Konvektion	Strahlung	Leitung	Konvektion	Strahlung
[°C]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
15	70,0	5,2	24,8	72,1	22,4	5,5
25	68,5	5,1	26,4	73,5	20,6	5,9
35	66,5	5,6	27,9	73,1	20,4	6,5

Aus Tabelle 17 wird ersichtlich, dass der Einfluss von Leitung und Konvektion bei Anstieg der Probenmitteltemperatur vermindert wird, während gleichzeitig der Strahlungsanteil ansteigt. Der Anteil der Leitung am gesamten Wärmeübergang sinkt mit einem Anstieg der Probenmitteltemperatur von 15 °C auf 35 °C von 70 % auf 66,5 %. Wie zu erwarten, steigt der Strahlungsanteil von 24,8 % auf 27,9 % im unbeschichteten und von 5,5 % auf 6,5 % im beschichteten Modellziegel. In Modellziegel 4 kann durch Verminderung des Emissionskoeffizienten auf $\varepsilon = 0,37$ der gesamte Wärmestrom zwischen 19,3 % (bei Probenmitteltemperatur 15 °C) und 21,4 % (bei Probenmitteltemperatur 35 °C) vermindert werden.

4.1.4. Vergleich Wärmebilanz mit und ohne Beschichtung

In Bild 94 und Bild 95 werden die Anteile der Wärmeströme in den Modellen gegenüber gestellt. Exemplarisch erfolgt hier die Darstellung der Wärmeströme bei 15 °C Probenmitteltemperatur. Es wird erkennbar, dass je nach Lochbild die Zusammensetzung des gesamten Wärmestroms aus Leitung, Strahlung und Konvektion variiert. Somit kann gezeigt werden, dass die Anteile der Wärmeübertragungsmechanismen eindeutig vom Lochbild abhängig sind. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass die mögliche Absenkung des Wärmestrahlungsübergangs durch Beschichtung damit auch eindeutig abhängig vom beschichteten Lochbild ist.

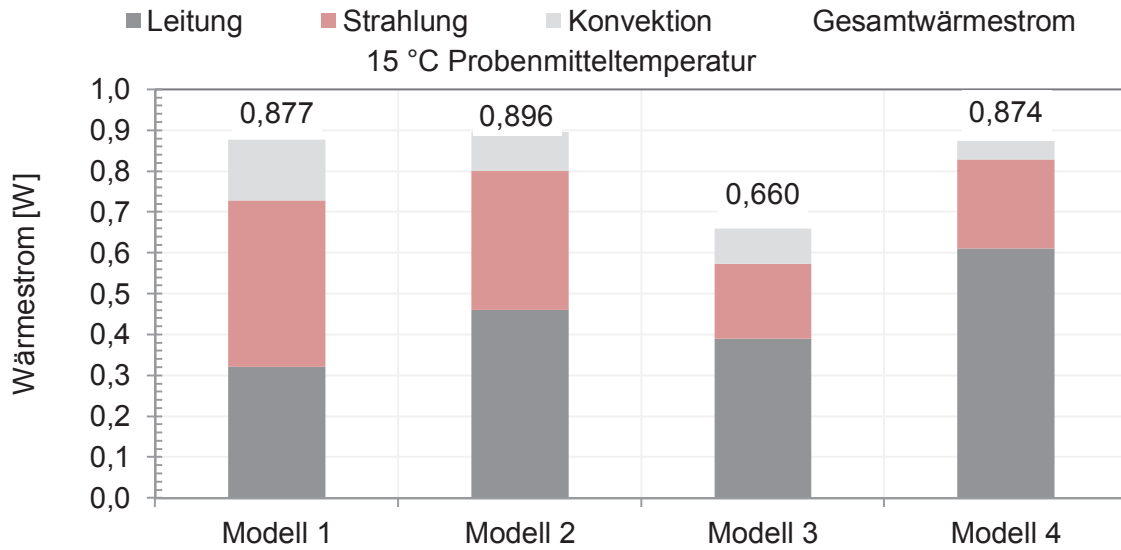


Bild 94: Messtechnisch ermittelte Wärmeströme von vier **unbeschichteten** Modellziegeln. Zusammensetzung des gesamten Wärmedurchgangs bestehend aus Strahlung, Leitung und Konvektion (Mittelwerte aus drei Messungen je Modellziegel) (Hintz, et al., 2012)

Eine Beschichtung der Modellziegel führt zu einer Absenkung des Strahlungsanteils, wodurch der gesamte Wärmestrom vermindert wird. Der Konvektionsanteil wird durch die Beschichtung etwas erhöht. Insgesamt führt die Beschichtung durch Verminderung des Wärmestroms durch Strahlung zu einer Verminderung des gesamten Wärmestroms durch die Modellziegel.

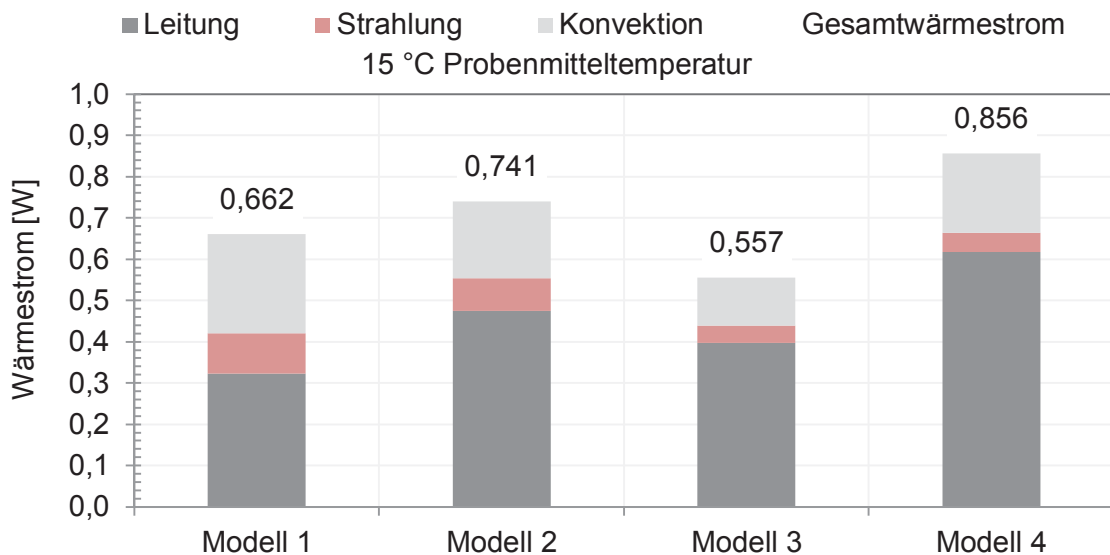


Bild 95: Messtechnisch ermittelte Wärmeströme von vier **beschichteten** Modellziegeln. Zusammensetzung des gesamten Wärmedurchgangs bestehend aus Strahlung, Leitung und Konvektion (Mittelwerte aus drei Messungen je Modellziegel) (Hintz, et al., 2012)

Werden die Wärmeströme aus Bild 94 und Bild 95 zueinander in ein Verhältnis gesetzt, so resultieren die prozentualen Wärmebilanzen in Bild 96 und Bild 97.

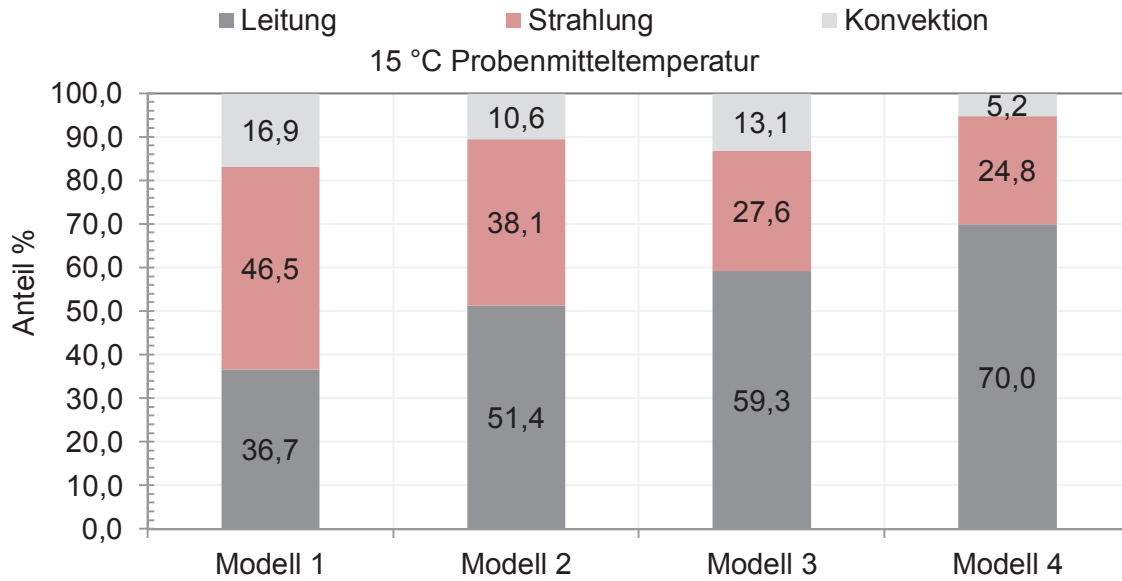


Bild 96: Messtechnisch ermittelte Wärmebilanzen für vier **unbeschichtete** Modellziegel. Zusammensetzung des gesamten Wärmedurchgangs aus Strahlung, Leitung und Konvektion (Mittelwerte aus drei Messungen je Modellziegel)

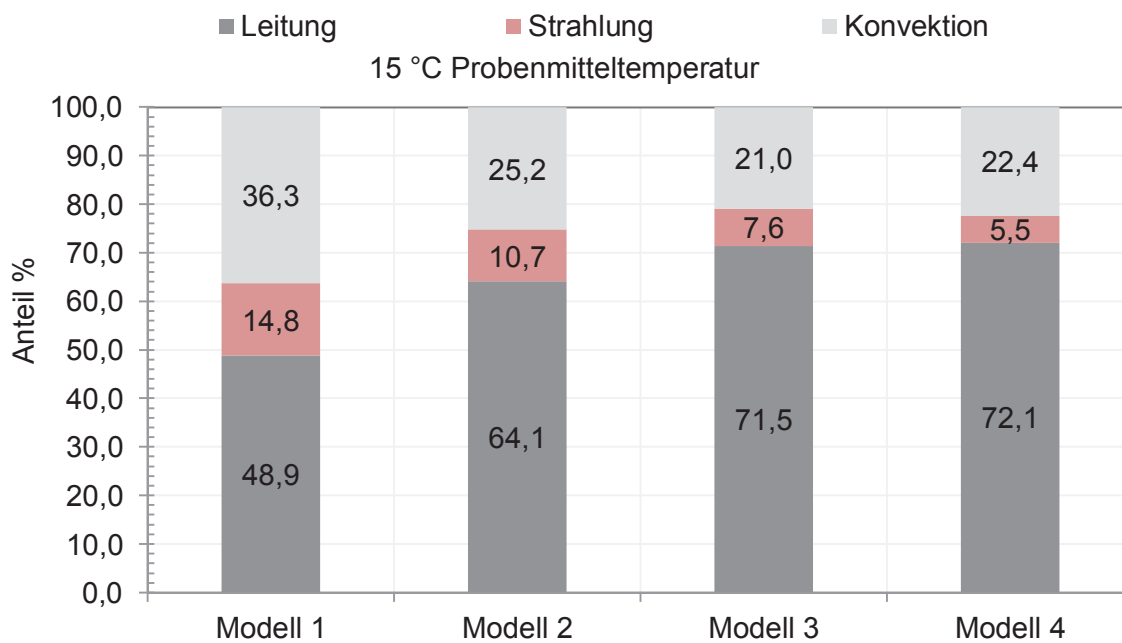


Bild 97: Messtechnisch ermittelte Wärmebilanzen für vier **beschichtete** Modellziegel. Zusammensetzung des gesamten Wärmedurchgangs aus Strahlung, Leitung und Konvektion (Mittelwerte aus drei Messungen je Modellziegel)

Durch eine Verminderung des Gesamtwärmestroms durch Beschichtung wird die äquivalente Wärmeleitfähigkeit der Modellziegel vermindert und somit die Wärmedämmung verbessert. Dies kann mit den durchgeführten Messungen (Bild 98) bestätigt werden.

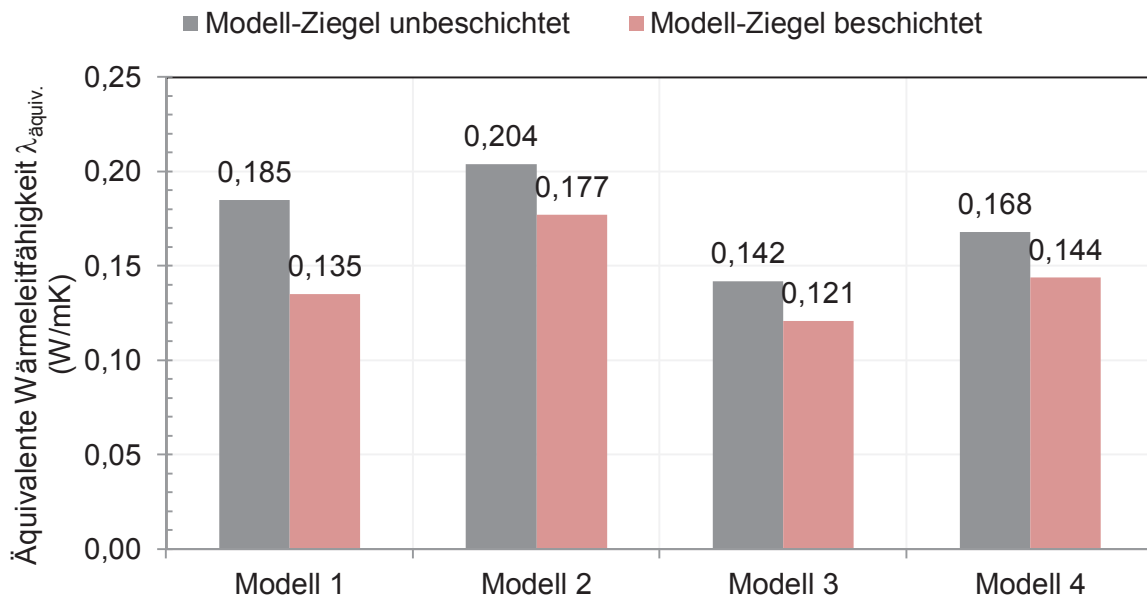


Bild 98: Gemessene äquivalente Wärmeleitfähigkeiten für Modellziegel in unbeschichtetem ($\epsilon = 0,94$) und beschichtetem Zustand ($\epsilon = 0,30$) (Mittelwerte aus drei Messungen je Modellziegel)

Durch Beschichtung von Modellziegel 1 kann die äquivalente Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{\text{äquiv.}} = 0,185$ W/mK auf $\lambda_{\text{äquiv.}} = 0,135$ W/mK vermindert werden. Eine Beschichtung von Modellziegel 2 reduziert die äquivalente Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{\text{äquiv.}} = 0,204$ W/mK auf $\lambda_{\text{äquiv.}} = 0,177$ W/mK. Wird Modellziegel 3 mit einer Beschichtung ausgerüstet, so wird eine Absenkung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{\text{äquiv.}} = 0,142$ W/mK auf $\lambda_{\text{äquiv.}} = 0,121$ W/mK erreicht. Durch den hohen Leitungsanteil in Modellziegel 4 führt hier eine Beschichtung nur zu einer Absenkung von $\lambda_{\text{äquiv.}} = 0,168$ W/mK auf $\lambda_{\text{äquiv.}} = 0,144$ W/mK. Die Ausrüstung mit einem niedrigen Emissionskoeffizienten führt zu einer Absenkung des Wärmeübergangs durch Strahlung um ca. 80 % im Vergleich mit dem unbeschichteten Zustand. Die absolute Absenkung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit durch Beschichtung ist durch den Anteil der Wärmestrahlung am Gesamtwärmeübergang vorgegeben. Das Ausmaß der jeweiligen Absenkung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit wird durch die Lochbildgeometrie geprägt.

4.1.5. Vergleich Verfüllung und Beschichtung

In weiteren Untersuchungen sollte geprüft werden, ob der Wärmeübergang durch Strahlung mit einer Beschichtung der Innenflächen oder durch Applikation metallisierter Stecklinge in die Löcher oder stattdessen durch die Verfüllung der Hohlräume mit Dämmstoffen am stärksten vermindert wird. Dazu wurden die Modellziegel 1 bis 4 eingesetzt. Für die Beschichtung wurde das Pigment „Goldbronzepulver Luminor 2210“ mit einem Emissionskoeffizienten von $\epsilon = 0,37$ auf die Sichtflächen aufgetragen und die resultierende äquivalente Wärmeleitfähigkeit messtechnisch ermittelt. Danach wurden mit Aluminium metallisierte

Papierschirmchen ($\varepsilon = 0,20$) in den Hohlräumen appliziert bzw. die Hohlräume der Modellziegel jeweils mit Verfüllungen aus Neopor, Mineralwollegranulat und Perlite gefüllt und jeweils die äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten ermittelt (Bild 99).



Bild 99: Modellziegel 1 mit einer Beschichtung aus Pigment „Goldbronzepulver Luminor 2210“ der in Wärmestromrichtung gegenüber liegenden Strahlungsflächen (Links) und Modellziegel 2 mit Schirmchen aus metallisiertem Papier (rechts)

Die Auswirkungen dieser Ausrüstungen wurden im Plattenmessgerät messtechnisch erfasst und sind in Bild 100 gegenüber gestellt.

Aufgrund des hohen Konvektionsanteils am Wärmeübergang mit 16,9 % bei Modellziegel 1 sind Verfüllungen mit Dämmstoffen und die Ausrüstung mit metallisierten Schirmchen am besten geeignet, um die äquivalente Wärmeleitfähigkeit abzusenken. Durch eine Verfüllung mit Neopor wird die äquivalente Wärmeleitfähigkeit des Modellziegel 1 von $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,185 \text{ W/mK}$ auf $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,099 \text{ W/mK}$ vermindert. Wird Modellziegel 1 mit metallisierten Schirmchen ($\varepsilon = 0,20$) ausgerüstet, so sinkt die äquivalente Wärmeleitfähigkeit des Modells auf $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,112 \text{ W/mK}$.

Ähnliche Ergebnisse werden für Modellziegel 2 mit einem Konvektionsanteil von 10,6 % festgestellt. Die höchste Absenkung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit wird bei diesem Modell durch eine Neopor-Verfüllung erreicht. Dabei wird die äquivalente Wärmeleitfähigkeit des Modells von $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,204 \text{ W/mK}$ auf $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,150 \text{ W/mK}$ vermindert. Durch die Verfüllungen mit anderen Dämmstoffen, Beschichtungen oder Ausrüstungen mit beschichteten Stecklingen werden äquivalente Wärmeleitfähigkeiten von $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,168 \text{ W/mK}$ (Mineralwollefüllung) bis $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,182 \text{ W/mK}$ (Innenbeschichtung mit Pigment „Goldbronzepulver Luminor 2210“) gemessen.

Auch für Modellziegel 3 und Modellziegel 4 werden ähnliche Ergebnisse erhalten. Bei beiden Modellen sind die Ergebnisse für eine Beschichtung mit dem Pigment „Goldbronzepulver Luminor 2210“ vergleichbar den Ergebnissen einer Verfüllung mit Neopor oder Stecklingen ($\varepsilon = 0,20$ und $\varepsilon = 0,50$). Hier wird bei Modell 3 eine Absenkung von $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,142 \text{ W/mK}$ auf $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,120 \text{ W/mK}$ (Innenflächen beschichtet mit Pigment „Goldbronzepulver Luminor 2210“, $\varepsilon = 0,37$) bis $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,125 \text{ W/mK}$ (Stecklinge aus pigmentiertem Papier beschichtet mit „Blitz Maxal 66012 SI/70 BG“, $\varepsilon = 0,50$) erreicht. Einzig Verfüllungen mit Perlite oder Mineralwolle zeigen höhere äquivalente Wärmeleitfähigkeiten, als das unbeschichtete Modell 3. Bei Modellziegel 4 wird eine Absenkung von $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,168 \text{ W/mK}$ auf $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,14 \text{ W/mK}$ (Innenflächen beschichtet mit „Goldbronzepulver Luminor 2210“, $\varepsilon = 0,37$) bis

$\lambda_{\text{äquiv.}} = 0,150 \text{ W/mK}$ (Stecklinge aus pigmentiertem Papier beschichtet mit „Blitz Maxal 66012 SI/70 BG“, $\varepsilon = 0,50$) erreicht.

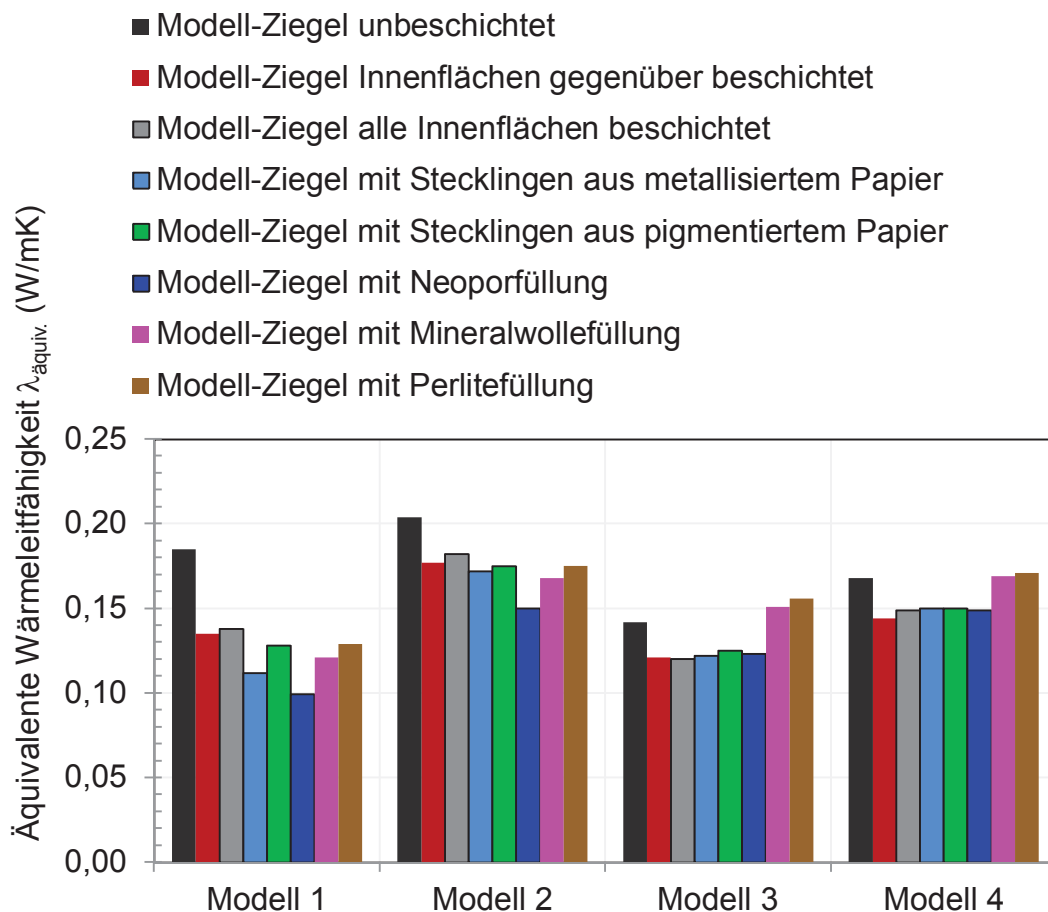


Bild 100: Vergleich der Modellziegel in unbeschichtetem Zustand (Nullproben) mit beschichteten und verfüllten Varianten. Dabei betrug der Emissionskoeffizient der Beschichtung $\varepsilon = 0,3$, der pigmentierte Strahlungsschirm zeigte einen Emissionskoeffizienten von $\varepsilon = 0,5$ und das metallisierte Papier zeigte $\varepsilon = 0,2$. Die Hohlräume wurden außerdem mit Neopor, Mineralwollegranulat und Perlite gefüllt

Im weiteren Verlauf der Untersuchungen erfolgte ein Vergleich der messtechnisch ermittelten Wärmebilanzen der Modellziegel mit theoretischen Berechnungen der Wärmebilanzen durch Finite-Elemente-Methoden.

4.2. FE-Berechnung der Wärmebilanzen

Um die Wärmebilanzen realer Ziegel berechnen zu können, muss zunächst gezeigt werden, dass eine FE-Berechnung der Wärmebilanzen in guter Übereinstimmung mit Messergebnissen möglich ist. Da für die Modellziegel Messergebnisse für die einzelnen Anteile von Strahlung, Leitung und Konvektion vorliegen, kann anhand dieser Modelle ein Abgleich mit der FE-Berechnung der Wärmebilanz erfolgen. Die Simulation der Wärmeübertragung erfordert die korrekte Modellierung der Anteile der drei Wärmeübertragungsmechanismen Leitung, Strahlung und Konvektion. Dabei sollten auch die Berechnungsergebnisse der FE-Programme ANSYS CFX und SOLIDO miteinander verglichen werden.

4.2.1. Randbedingungen und Vorgehensweise zur FE-Berechnung der Modellziegel

Die FE-Berechnung der Modellziegel 1 bis 4 wurde unter Annahme der sich aus den vorab zur messtechnischen Ermittlung der Wärmebilanz ergebenden Temperaturen für Warm- und Kaltseite im Plattenmessgerät durchgeführt. Die so ermittelten Temperaturen der Warm- und Kaltseite wurden somit für die FE-Berechnung des Wärmeübergangs in den Modellziegeln als Randbedingungen vorgegeben. Da die Simulation der Messung nachempfunden sein sollte, wurde der Wärmestrom bzw. die äquivalente Wärmeleitfähigkeit bei den entsprechenden Probenmitteltemperaturen (15 °C, 25 °C und 35 °C) in Anlehnung an die Messung berechnet. Die Emissionskoeffizienten der unbeschichteten und beschichteten Proben wurden vorab messtechnisch ermittelt. Unter Verwendung der Software **ANSYS CFX** wird der Wärmeübergang durch Konvektion nach dem Newton'schen Abkühlungsgesetz berechnet. Hierzu erfolgt die Definition lokaler Wärmeübergangskoeffizienten α an jeder Stelle des Übergangs von Fluid auf Festkörper nach Gleichung (45). Der lokale Wärmeübergangskoeffizient α wird dabei aus dem Wärmeübergang in Wandnähe \dot{Q} , aus den Temperaturen des Fluids in der Grenzschicht T_{Fluid} und aus den jeweiligen Temperaturen des Festkörpers T_{Solid} berechnet.

$$\dot{Q} = \alpha (T_{\text{Solid}} - T_{\text{Fluid}}) \quad (45)$$
$$\alpha = \frac{\dot{Q}}{(T_{\text{Solid}} - T_{\text{Fluid}})}$$

Die Konvektionsströmung wurde aufgrund ihrer geringen Geschwindigkeit als laminar und reibungsfrei angenommen. Schon geringe Temperaturdifferenzen im Fluid verursachen eine Konvektionsströmung. Diese kann dabei in einen aufwärts und einen abwärts gerichteten Teil unterschieden werden (Durst, 2006).

Für die FE-Berechnung des Wärmestroms durch Strahlung mit **ANSYS CFX** wird das Strahlungsmodell „Discrete Transfer“ verwendet und der jeweilige Emissionskoeffizient ϵ vorgegeben.

Unter Verwendung der Software **SOLIDO** wird die Konvektion nach EN ISO 10077-2 berechnet. Dabei werden nicht rechteckige Hohlräume in rechteckige Hohlräume derselben Fläche und desselben Verhältnisses von Länge zu Breite umgewandelt (Äquivalentflächenverfahren).

Die Berechnung des Wärmestrahlungsübergangs erfolgt bei Verwendung der Software **SOLIDO** durch Definition eines Äquivalentmaterials mit der Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{\text{äqui}}$ für den Strahlungsanteil. Diese äquivalente Wärmeleitfähigkeit resultiert aus der Lage der strahlenden Flächen, deren Abstand und Temperatur und den jeweiligen Emissionskoeffizienten.

Die Bestimmung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{\text{äquival.}}$ aus dem berechneten Gesamtwärmestrom erfolgte bei beiden FE-Programmen mittels linearer Regression durch die drei Probenmitteltemperaturen in Anlehnung an die Messung im Einplattenmessgerät TLP 200.

4.2.2. FE-Berechnung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit der Modellziegel

In Tabelle 18 werden die Ergebnisse bei FE-Berechnung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit unter Verwendung der Programme ANSYS CFX und SOLIDO mit den experimentell ermittelten Ergebnissen verglichen. Daraus geht hervor, dass von beiden Finite-Elemente-Programmen die äquivalente Wärmeleitfähigkeit der Modellziegel in unbeschichtetem Zustand sehr gut abgebildet werden kann. Bei der Berechnung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit nach Beschichtung der Modelle mit dem Pigment „Goldbronzepulver Luminor 2210“ werden mit dem Finite-Elemente-Programm SOLIDO für die beschichteten Modellziegel etwas zu geringe äquivalente Wärmeleitfähigkeiten erhalten. Dies liegt in der Berechnungsweise des Programms SOLIDO begründet, dass den Strahlungsanteil aufgrund des verwendeten Näherungsverfahrens nach EN ISO 10077-2 etwas zu hoch ansetzt. Realistischere Werte werden mit dem Finite-Elemente-Programm ANSYS CFX durch direkte Lösung der Strahlungstransportgleichung erhalten (Tabelle 18).

Tabelle 18: Messtechnisch ermittelte äquivalente Wärmeleitfähigkeiten der Modellziegel im Vergleich mit entsprechenden Werten aus der FEM mit **ANSYS CFX** und **SOLIDO** in unbeschichtetem und beschichtetem Zustand

Probe	Äquivalente Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{\text{äquival.}}$ [W/mK]					
	Unbeschichtet $\varepsilon = 0,94$			Beschichtet $\varepsilon = 0,37$		
Modell	Messung	Simulation ANSYS CFX	Simulation SOLIDO	Messung	Simulation ANSYS CFX	Simulation SOLIDO
1	0,185	0,195	0,18	0,135	0,145	0,129
2	0,204	0,215	0,204	0,177	0,176	0,157
3	0,146	0,157	0,134	0,121	0,127	0,102
4	0,161	0,181	0,161	0,144	0,158	0,136

Im weiteren Verlauf sollte auch eine fiktive Verfüllung der von den Projektpartnern zur Verfügung gestellten Ziegel A bis G mit den Dämmstoffen Neopor, Mineralwolle und Perlite, der Beschichtung dieser Ziegel gegenüber gestellt werden. Hierzu musste zunächst anhand der Modellziegel überprüft werden, inwieweit eine Verfüllung mit Dämmstoffen durch FE-Berechnung abgebildet werden kann.

In Tabelle 19 werden die Finite-Elemente-Berechnungen der Modellziegel mit Messungen der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit der Modellziegel bei Verfüllung mit Dämmstoffen verglichen. Als Finite-Elemente-Programm wurde SOLIDO verwendet, da aufgrund der

Verfüllung keine Berechnung von Konvektion und Strahlung in den Hohlräumen erfolgen musste.

Tabelle 19: Messtechnisch ermittelte äquivalente Wärmeleitfähigkeiten der Modellziegel im Vergleich mit entsprechenden Werten aus der FE-Simulation mit **SOLIDO** bei Verfüllung mit Dämmstoffen

Probe	Äquivalente Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{\text{äquival.}}$ [W/mK]					
	Neopor		Mineralwollegranulat		Perlite	
Modell	Messung	Simulation	Messung	Simulation	Messung	Simulation
1	0,099	0,114	0,121	0,123	0,129	0,13
2	0,150	0,148	0,168	0,156	0,175	0,17
3	0,123	0,127	0,151	0,138	0,156	0,158
4	0,149	0,158	0,169	0,167	0,171	0,184

Mittels der FE-Berechnung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit konnte nach Verfüllung mit verschiedenen Dämmstoffen eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und FE-Berechnung erhalten werden. Geringe Abweichungen der Simulations- und Messergebnisse sind auf die unterschiedliche Verdichtung der Verfüllmaterialien in den Hohlräumen zurück zu führen. Durch eine stärkere Verdichtung bei der Probenpräparation wird eine etwas erhöhte Wärmeleitfähigkeit des Verfüllstoffes bewirkt. Insgesamt hängt die Wärmeleitfähigkeit von Verfüllstoffen sehr stark von deren Verdichtung ab, was in diesem Vergleich nicht berücksichtigt werden konnte. Die Wärmeleitfähigkeit der Verfüllstoffe wurde zuvor in einer separaten Messung als Schüttung bestimmt (siehe Tabelle 83 im Anhang).

Es kann festgestellt werden, dass bei einer Finite-Elemente-Berechnung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit sowohl der unverfüllten und unbeschichteten Modellziegel, als auch der verfüllten oder beschichteten Modellziegel eine gute Übereinstimmung mit den Messergebnissen erhalten wird. Die verwendete Berechnungsmethode mittels Finiter-Elemente konnte für die vier Modellziegel bestätigt werden und ist damit auch auf reale Ziegel übertragbar.

4.2.3. FE-Berechnung der Wärmebilanz der Modellziegel

Für die Aufstellung der Wärmebilanzen wurden die Programme ANSYS CFX und SOLIDO verwendet. Im weiteren Verlauf der Untersuchungen erfolgte ein Vergleich der Ergebnisse, welche mit beiden Programmen erhalten wurden. Die Aufstellung der Wärmebilanzen erfolgte anhand der Messwerte, welche von den Proben bei einer Probenmitteltemperatur von 15 °C vorlagen. Bei Wegnahme des Wärmeübergangs durch Strahlung (Annahme $\varepsilon = 0,0$) wurden die Oberflächentemperaturen angesetzt, welche sich bei der Messung der beschichteten Proben ($\varepsilon = 0,30$) einstellten. Für die Aufstellung der Wärmebilanzen wurden die Wärmeübertragungsmechanismen als in erster Näherung additiv angenommen. Die mit

SOLIDO erhaltenen Wärmebilanzen werden aus Bild 101 ersichtlich.

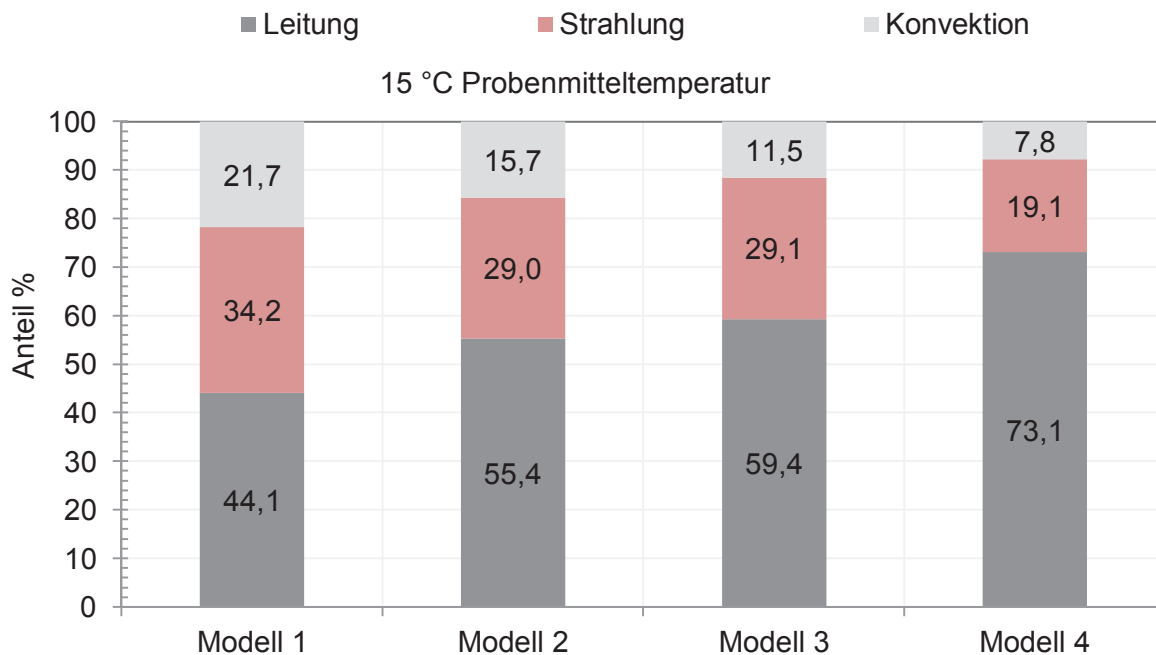


Bild 101: **Finite Elemente Berechnung (SOLIDO)** der Wärmebilanzen bei additiver Annahme des gesamten Wärmedurchgangs aus Strahlung, Leitung und Konvektion für **unbeschichtete** Modellziegel

Bei der FE-Berechnung der Wärmebilanzen wurde bei jedem weiteren Berechnungsschritt ein Wärmeübergangsmechanismus ausgeschaltet. So erfolgte zuerst die Wegnahme der Wärmestrahlung durch das Einsetzen eines Emissionskoeffizienten von $\varepsilon = 0,0$. Anschließend erfolgte die Wegnahme der Konvektion durch Einsetzen der Wärmeleitfähigkeit ruhender Luft mit $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,0261 \text{ W/mK}$. Anschließend wurde die Luft durch Vakuum substituiert, um die reine Leitung im Festkörper zu erhalten. Dies geschieht allerdings nicht in Übereinstimmung mit der Messung, da bei diesem Verfahren alle Mechanismen während einer einzelnen Messung erfasst wurden.

Für die Modelle werden mit dem FE-Programm SOLIDO Wärmestrahlungsanteile zwischen 21,7 % (für Modellziegel 1) bis 7,8 % (für Modellziegel 4) erhalten. Der Konvektionsanteil wird mit Werten zwischen 34,2 % (für Modellziegel 1) bis 19,1 % (für Modellziegel 4) berechnet. Der größte Anteil von 44,1 % (für Modellziegel 1) bis 73,1 % (für Modellziegel 4) wird für den Leitungsanteil im Festkörper (hier Kunstharz) berechnet. Diese Ergebnisse werden in Abschnitt 4.2.4 mit den Messergebnissen verglichen.

Dieselben Berechnungen wurden zum Vergleich auch mit dem FE-Programm ANSYS CFX durchgeführt, da zwischen den FE-Programmen ANSYS CFX und SOLIDO Unterschiede in der Betrachtung der Wärmestrahlung und der Konvektion bestehen. Die mit ANSYS CFX erhaltenen Wärmebilanzen sind in Bild 102 dargestellt.

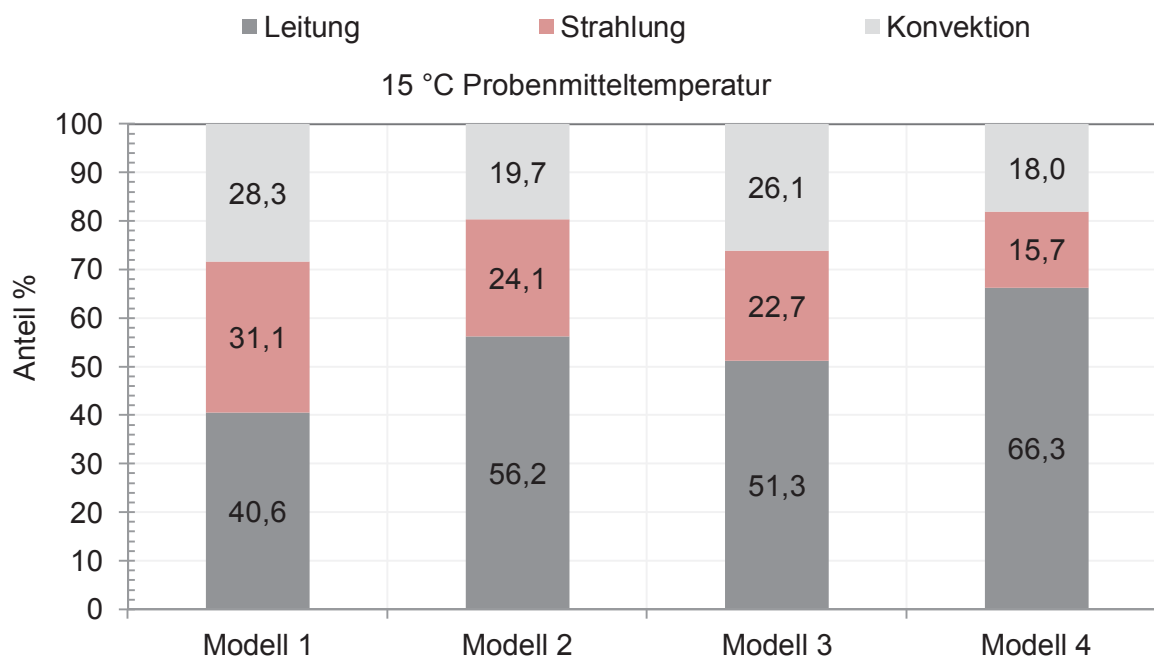


Bild 102: **Finite Elemente Berechnung (ANSYS CFX)** der Wärmebilanzen bei additiver Annahme des gesamten Wärmedurchgangs aus Strahlung, Leitung und Konvektion für **unbeschichtete** Modellziegel

Bei der Berechnung unter Verwendung von ANSYS CFX werden Wärmestrahlungsanteile von 18,0 % (für Modellziegel 4) bis 28,3 % (für Modellziegel 1) erhalten. Für den Konvektionsanteil werden Anteile zwischen 15,7 % (für Modellziegel 4) und 31,1 % (für Modellziegel 1) berechnet. Die Anteile für den Wärmeübergang durch Leitung liegen nach dieser Berechnung zwischen 40,6 % (für Modellziegel 1) und 66,3 % (für Modellziegel 4). Die höchsten Leitungsanteile werden für Modellziegel 2 mit 56,2 % und Modellziegel 4 mit 66,3 % erhalten. Dies ist in Übereinstimmung mit den Erwartungen, da beide Modelle einen zusätzlichen durchgehenden Mittelsteg besitzen, welcher zur Wärmeleitung beiträgt. Die Ergebnisse beider Berechnungsverfahren werden im Folgenden mit den Messergebnissen der Modelle verglichen.

4.2.4. Vergleich gemessene Wärmebilanzen und FE-Rechnungen

Die Aufstellung der Wärmebilanzen mittels Finiter Elemente Methoden konnte im Falle von SOLIDO nur nach additiven Annahmen durchgeführt werden. Dies erfolgt nicht in Übereinstimmung mit dem in der Messung verwendeten Verfahren, da hierbei alle Mechanismen gleichzeitig gemessen werden. Dies stellt eine Besonderheit des erarbeiteten Verfahrens dar. Darüber hinaus ist es ausschließlich mit diesem Messverfahren möglich, die Wärmeübergänge im instationären Zustand zu erfassen. Im Falle der Aufstellung der Wärmebilanzen mit ANSYS CFX konnten dagegen die Anteile von Strahlung, Leitung und Konvektion gemeinsam, wie im messtechnischen Verfahren, erfasst werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass hierdurch lediglich geringe Einflüsse auf den Konvektions- und

Strahlungsanteil bestehen, während die Festkörperleitung hiervon unbeeinflusst bleibt. Weiterhin muss darauf hingewiesen werden, dass auch bei den Messungen Abweichungen auftreten können. Um zufällige Messfehler auszuschließen, wurde jede Messung dreimal wiederholt und daraus ein Mittelwert gebildet. Dennoch können systematische Fehler, wie die Positionierung der Thermoelemente, deren Messgenauigkeit und die zulässige Abweichung der Wärmeströme im Messgerät nicht ausgeschlossen werden. Aus den Angaben für die Messabweichungen im Messprotokoll kann eine prozentuale Abweichung der Messergebnisse von bis zu 2 % angegeben werden.

Die nachfolgende Tabelle 20 bis Tabelle 22 zeigen einen Vergleich der Messergebnisse für die Anteile von Strahlung, Leitung und Konvektion mit den aus der FE-Simulation erhaltenen Ergebnissen.

Beim Vergleich des messtechnisch ermittelten Strahlungsanteils ergibt sich die größte Abweichung vom Messergebnis für Modellziegel 1 mit 15 % für die Berechnung mit ANSYS CFX. Die Berechnung mittels ANSYS CFX liefert mit 31,1 % einen eher konservativen Wert gegenüber dem Messergebnis mit 46,5 % Wärmestrahlungsanteil (Tabelle 20). Dennoch ergab sich für die Simulation bei Beschichtung der Modellziegel in Abschnitt 4.2.2 eine sehr geringe Abweichung zum Messergebnis sowohl der unbeschichteten, als auch der beschichteten Modellziegel. Diese Abweichung im Strahlungsanteil könnte auch aus der sehr groben Berechnung des Wärmestrahlungsübergangs unter Verwendung der Oberflächentemperaturen im Modellziegel herrühren. Ein Sensor zur Erfassung der Wärmestrahlung oder ein anderes Messverfahren standen nicht zur Verfügung. Die Berechnung der Wärmestrahlung erfolgte aus den gemessenen Oberflächentemperaturen mittels Stefan-Boltzmann-Gesetz für parallele Oberflächen.

*Tabelle 20: Vergleich der berechneten **Strahlungsanteile** am gesamten Wärmeübergang der Modellziegel bei einer direkten Messung (Methode „Thermoelemente“) mit der Finite-Elemente-Berechnung unter Verwendung von **ANSYS CFX** und **SOLIDO***

Anteil der Wärmestrahlung (Vergleich der Ergebnisse)			
Probe	Messung	ANSYS CFX	SOLIDO
	[%]	[%]	[%]
Modellziegel 1	46,5	31,1	34,2
Modellziegel 2	38,1	24,1	29,0
Modellziegel 3	27,6	22,7	29,1
Modellziegel 4	24,8	15,7	19,1

Der Wärmeübergang durch Konvektion konnte nicht direkt gemessen werden und wurde daher aus der Differenz des Gesamtwärmestroms abzüglich des Strahlungs- und Leitungsanteils berechnet. Abweichungen im Konvektionsanteil zwischen Messung und FE-Berechnung sind demnach durch Abweichungen im Strahlungs- oder Leitungsanteil

begründet. Die größte Abweichung zwischen Messergebnis und den FE-Berechnungsergebnissen wird bei Modellziegel 3 mit 13 % gefunden (Tabelle 21).

Tabelle 21: Vergleich der berechneten **Konvektionssanteile** am gesamten Wärmeübergang der Modellziegel bei einer direkten Messung (Methode „Thermoelemente“) mit der Finite-Elemente-Berechnung unter Verwendung von **ANSYS CFX** und **SOLIDO**

Anteil der Konvektion (Vergleich der Ergebnisse)			
Probe	Messung	ANSYS CFX	SOLIDO
	[%]	[%]	[%]
Modellziegel 1	16,9	28,3	21,7
Modellziegel 2	10,6	19,7	15,7
Modellziegel 3	13,1	26,1	11,5
Modellziegel 4	5,2	18,0	7,8

Aus Tabelle 22 wird ersichtlich, dass eine gute Übereinstimmung zwischen dem messtechnisch ermittelten und dem aus der FE-Berechnung erhaltenen Anteil der Wärmeleitung besteht. Die maximale Abweichung zwischen Messung und FE-Berechnungen wird für Modellziegel 3 mit 8 % ermittelt.

Tabelle 22: Vergleich der berechneten **Leitungssanteile** am gesamten Wärmeübergang der Modellziegel bei einer direkten Messung (Methode „Thermoelemente“) mit der Finite-Elemente-Berechnung unter Verwendung von **ANSYS CFX** und **SOLIDO**

Anteil der Leitung (Vergleich der Ergebnisse)			
Probe	Messung	ANSYS CFX	SOLIDO
	[%]	[%]	[%]
Modellziegel 1	36,7	40,6	44,1
Modellziegel 2	51,4	56,2	55,4
Modellziegel 3	59,3	51,3	59,4
Modellziegel 4	70,0	66,3	73,1

Aus der Untersuchung geht hervor, dass durch die Programme ANSYS CFX und SOLIDO die einzelnen Anteile der Wärmeströme in den Modellziegeln in akzeptabler Übereinstimmung abgebildet werden können. Eine Abweichung zwischen Messung und FE-Berechnung von 10 % kann im Allgemeinen als gute Übereinstimmung angesehen werden. Für den Gesamtwärmestrom und damit für die äquivalente Wärmeleitfähigkeit der Modellziegel vor und nach Ausrüstung mit einem niedrigen Emissionskoeffizienten (Beschichtung mit „Goldbronzepulver Luminor 2210“) wird eine sehr gute Übereinstimmung zwischen FE-Berechnung und Messung erreicht. Besonders gut konnte der Wärmeübergang bei Beschichtung mit dem FE-Programm ANSYS CFX abgebildet werden. Für weitere wärmetechnische Berechnungen an realen Ziegeln wurden deshalb weiterhin beide Programme simultan verwendet und die Ergebnisse mit den Messwerten verglichen.

5. Wärmetechnische Berechnungen realer Ziegel

Im weiteren Verlauf der Untersuchungen wurden die Erkenntnisse aus der FE-Berechnung der Modellziegel auf reale Ziegel der Projektpartner übertragen. Dabei wurden sowohl unbeschichtete als auch beschichtete Ziegel untersucht. Die Ergebnisse der FE-Berechnung wurden mit realen Messungen im Wärmeprüfstand verglichen. Besonderer Wert wurde hierbei auf die theoretische Berechnung der Wärmestrahlung und Konvektion im Rahmen der Aufstellung von Wärmebilanzen gelegt. Die FE-Berechnungen und Messungen wurden für folgende Lochbilder bzw. Hochlochziegel durchgeführt:

- Ziegel A nach Zulassung Z 17.1-697 34/10
- Ziegel B nach Zulassung Z 17.1-935
- Ziegel C nach Zulassung Z 17.1-906
- Ziegel D nach Zulassung Z 17.1-651
- Ziegel E nach Zulassung Z 17.1-1012
- Ziegel F nach Zulassung Z 17.1-935
- Ziegel G, kein Zulassungsbescheid erforderlich

Alle Ziegel hatten eine Steinbreite von 365 mm. Die für die Simulation benötigten Randparameter Scherben-Wärmeleitfähigkeit und Emissionskoeffizient wurden in Abschnitt 3 messtechnisch ermittelt. Für die Simulationen wurden diese vorab gemessenen Werte als Eingabeparameter verwendet.

5.1. Eingabeparameter für die FE-Berechnung realer Ziegel

Für eine Simulation des Wärmedurchgangs durch einen Festkörper müssen verschiedene physikalische Randbedingungen und Materialparameter vorgegeben werden. Dazu zählen die sich bei der Messung einstellenden Oberflächentemperaturen, die Scherben-Wärmeleitfähigkeiten der Materialien, die Wärmeübergangskoeffizienten zwischen Materialien und Fluiden und deren Emissionskoeffizienten. Die sich im Verlauf der Messung einstellenden Temperaturen können direkt aus der Messung entnommen werden. An Warm- und Kaltseite wurden deshalb direkt die sich bei der Messung einstellenden Oberflächentemperaturen aufgegeben. Bei der Simulation des Wärmeübergangs durch Konvektion und Wärmestrahlung werden mittels **ANSYS CFX** die jeweiligen Wärmeübergangskoeffizienten von Fluid auf Festkörper in vorgegebenen Zeitschritten berechnet und superponiert. Im Gegensatz dazu erfolgt die Berechnung des konvektiven und des Strahlungsübergangs durch **SOLIDO** mittels Definition einer äquivalenten Wärmeleitfähigkeit für den Hohlraum unter Verwendung des Äquivalentflächenverfahrens. Zur Beurteilung der Qualität und der Übereinstimmung von Simulation und Messung erfolgt ein Vergleich mit den als Referenz durchgeführten Halbsteinmessungen im Wärmeprüfstand.

5.2. Vergleich Messung und Berechnung für reale Ziegel

Die FE-Berechnungen der äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten erfolgten jeweils vor und nach Ausrüstung der Ziegel mit einem niedrigen Emissionskoeffizienten (Beschichtung der inneren Oberflächen) in Anlehnung an die Messungen in Abschnitt 3.2. Die FE-Berechnung setzt eine genaue Kenntnis der auf den jeweiligen Ziegelscherben erreichbaren Emissionskoeffizienten und der Scherben-Wärmeleitfähigkeit voraus. Um die berechneten Ergebnisse zu überprüfen, erfolgte ein Vergleich mit den Ergebnissen aus den Halbsteinmessungen. Ziel war eine möglichst große Übereinstimmung mit den messtechnisch erhaltenen Ergebnissen zu erzielen. Die Messergebnisse für die Emissionskoeffizienten der Ziegel vor und nach einer Beschichtung sind in Abschnitt 3.2.1 aufgeführt. Die FE-Berechnung erfolgte jeweils mit den Programmen ANSYS CFX und SOLIDO. Einen tabellarischen Vergleich der Mess- und Berechnungsergebnisse zeigt Tabelle 23 (unbeschichtete Ziegel) und Tabelle 24 (beschichtete Ziegel).

*Tabelle 23: Vergleich der äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten aus FE-Berechnungen mit den Ergebnissen aus den Halbsteinmessungen der von den Projektpartnern zur Verfügung gestellten Hochlochziegel **ohne Beschichtung** (Annahme der Emissionskoeffizienten nach messtechnischer Ermittlung in Tabelle 6 und Scherben-Wärmeleitfähigkeiten nach Tabelle 8)*

Lochbild	Äquival. Wärmeleitfähigkeiten unbeschichteter Ziegel		
	$\lambda_{\text{äquival.}} [\text{W/mK}]$		
	Messung	ANSYS CFX	SOLIDO
Ziegel A	0,128	0,133	0,132
Ziegel B	0,120	0,118	0,115
Ziegel C	0,214	0,247	0,253
Ziegel D	0,143	0,139	0,146
Ziegel E	0,097	0,096	0,102
Ziegel F	0,121	0,129	0,140
Ziegel G	0,197	0,197	0,198

Werden die Messergebnisse der unbeschichteten Ziegel mit den Ergebnissen der FE-Berechnung verglichen, wird eine gute Übereinstimmung ersichtlich. Die äquivalente Wärmeleitfähigkeit des Ziegels A konnte unter Verwendung von ANSYS CFX mit einer Abweichung von 3,9 % berechnet werden. Unter Verwendung von SOLIDO wird eine Abweichung von 3,1 % bezogen auf den Messwert für Ziegel A erhalten. Für Ziegel B ergibt sich eine maximale Abweichung zwischen Messung und FE-Berechnung von 1,7 % für ANSYS CFX und 4,2 % für SOLIDO. Die größte Abweichung zeigt sich bei Ziegel C mit 15,4 % unter Verwendung von ANSYS CFX bzw. 18,2 % bei Verwendung von SOLIDO. Für die restlichen berechneten Hochlochziegel konnte eine relativ geringere Abweichung vom Messergebnis berechnet werden. Für Ziegel D liefert die FE-Berechnung mit ANSYS CFX eine Abweichung von Messwert von 2,8 % und bei SOLIDO von 2,1 %. Für Ziegel E ergibt sich bei FE-Berechnung mit ANSYS CFX eine Abweichung von 1,0 % bzw. bei SOLIDO von

5,2 %. Der große Unterschied zwischen der in ANSYS berechneten und der mittels SOLIDO erreichten Abweichung vom Messergebnis liegt in der Berechnungsweise beider Programme und dem Lochbild des Ziegels E begründet. Dieser besteht ausschließlich aus Dreieckslochungen. Das in SOLIDO verwendete Äquivalentflächenverfahren führt hier aufgrund der darin getroffenen Annahmen rechteckiger Hohlräume zu einer wesentlich größeren Abweichung vom Messwert, als dies bei Verwendung der Software ANSYS CFX der Fall ist. Für Ziegel F wird bei FE-Berechnung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit eine Abweichung von 6,5 % erhalten. Unter Verwendung der Software SOLIDO beträgt diese Abweichung vom Messwert 15,7 %. Auch das Lochbild des Ziegels F besteht teilweise aus Dreieckslochungen, wodurch sich insbesondere bei SOLIDO die relativ große Abweichung vom Messwert erklären lässt. Die äquivalente Wärmeleitfähigkeit des Ziegels G wird unter Verwendung von ANSYS CFX ohne Abweichung berechnet, während mit SOLIDO eine Abweichung von 0,5 % bezogen auf den Messwert erhalten wird.

Die gleichen Untersuchungen und FE-Berechnungen wurden an den beschichteten Hochlochziegeln durchgeführt. Dazu erfolgte ein Messwertvergleich nach Beschichtung mit den entsprechenden FE-Berechnungen unter Berücksichtigung des verminderten Emissionskoeffizienten. Von großer Bedeutung ist auch hier die genaue Kenntnis der durch Beschichtung erreichten Emissionskoeffizienten. Diese wurden vorab messtechnisch ermittelt (Tabelle 6). Auch hierbei werden für alle Hochlochziegel sehr gute Übereinstimmungen zwischen Messergebnis und FE-Berechnung erreicht (Tabelle 24).

Tabelle 24: Vergleich der äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten aus FE-Berechnungen mit den Ergebnissen aus den Halbsteinmessungen der von den Projektpartnern zur Verfügung gestellten Hochlochziegel mit Beschichtung durch Pigment „Goldbronzepulver Luminor 2210“ (Annahme der Emissionskoeffizienten nach messtechnischer Ermittlung in Tabelle 6 und Scherben-Wärmeleitfähigkeit nach Tabelle 8)

Lochbild	Äquival. Wärmeleitfähigkeiten beschichteter Ziegel $\lambda_{\text{äquival.}} [\text{W/mK}]$		
	Messung	ANSYS CFX	SOLIDO
Ziegel A	0,105	0,095	0,094
Ziegel B	0,103	0,092	0,089
Ziegel C	0,151	0,155	0,139
Ziegel D	0,119	0,118	0,121
Ziegel E	0,086	0,073	0,080
Ziegel F	0,090	0,103	0,093
Ziegel G	0,141	0,148	0,140

Für Ziegel A wird die äquivalente Wärmeleitfähigkeit bei Beschichtung mit einer Abweichung von 9,5 % unter Verwendung der Software ANSYS CFX bzw. mit 10,5 % bei Verwendung der Software SOLIDO berechnet. Die Berechnung des Ziegels B nach Beschichtung mit „Goldbronzepulver Luminor 2210“ liefert unter Verwendung von ANSYS CFX eine Abweichung von 10,7 % und unter Verwendung von SOLIDO eine Abweichung von 13,6 %.

Die Abweichung vom Messergebnis bei FE-Berechnung des Ziegels C nach Beschichtung ergibt sich bei ANSYS CFX mit 2,6 % und bei SOLIDO mit 7,9 %. Für Ziegel D wird nach Beschichtung unter Verwendung von ANSYS CFX eine Abweichung vom Messergebnis von 0,8 % und von 1,7 % für SOLIDO erhalten. Für den Ziegel E wird unter Verwendung von ANSYS CFX eine Abweichung von 15,1 % und bei SOLIDO von 7,0 % erhalten. Wird die äquivalente Wärmeleitfähigkeit für Ziegel F mit Beschichtung berechnet, so resultiert eine Abweichung von 14,4 % für ANSYS CFX bzw. 3,3 % für SOLIDO. Auch für Ziegel G wird mit 5,0 % für ANSYS CFX und 0,7 % für SOLIDO eine geringe Abweichung vom Messergebnis erhalten.

Durch den Messwertvergleich konnte gezeigt werden, dass die äquivalente Wärmeleitfähigkeit von Hochlochziegeln sowohl mit ANSYS CFX, als auch mit SOLIDO in Übereinstimmung mit den Messwerten berechnet werden kann. Die für die Berechnung verwendeten Modellannahmen konnten bestätigt werden. Beide FE-Berechnungs-Programme eignen sich auch für die Berechnung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit bei Ausrüstung der Ziegeloberfläche mit einem niedrigen Emissionskoeffizienten. Die FE-Berechnung unter Verwendung dieser Software erlaubt zukünftig eine verlässliche Abschätzung der durch Beschichtung erreichbaren Verminderung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit auch bei Lochbildern, die nicht explizit in dieser Arbeit untersucht wurden.

5.3. Vergleich von FE-Berechnungen bei Verfüllung und Beschichtung

In weiteren Untersuchungen sollte geprüft werden, bei welchen Ziegellochmustern eine Verfüllung mit Isolierstoff bzw. eine Beschichtung der Lochmuster zu einer maximalen Absenkung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit führt. Für die Berechnung werden die Lochbildgeometrien der von den Projektpartnern zur Verfügung gestellten Ziegel A bis G sowie die gemessenen Scherben-Wärmeleitfähigkeiten dieser Ziegel verwendet. Darüber hinaus erfolgte zur Vereinheitlichung der Ergebnisse die Annahme einer Scherbenwärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,250 \text{ W/mK}$. Für die FE-Berechnung bei Verfüllung der Löcher im Ziegel mit unterschiedlichen Dämmstoffen war eine Berechnung mit der Software SOLIDO ausreichend, da für die Dämmstoffe Messwerte vorlagen. Falls die Ziegel-Lochmuster unverfüllt blieben, erfolgte eine zusätzliche Berechnung des Konvektions- und des Strahlungsanteils mit der Software ANSYS CFX.

5.3.1. FE-Berechnungen für Ziegel A

Wird eine Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,366 \text{ W/mK}$ (Messwert aus Tabelle 5) für Ziegel A angenommen und der Emissionskoeffizient schrittweise von $\varepsilon = 1$ auf $\varepsilon = 0$ abgesenkt, so berechnet sich eine Absenkung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,169 \text{ W/mK}$ auf $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,079 \text{ W/mK}$, entsprechend um 53,3 %. Wird eine

Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,25 \text{ W/mK}$ vorgegeben, so resultiert eine Minderung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,144 \text{ W/mK}$ auf $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,065 \text{ W/mK}$ (Bild 103). Dies entspricht einer Minderung um 54,9 %.

Nach Beschichtung der inneren Oberflächen im Lochmuster des Ziegels A konnte der Emissionskoeffizient der Scherbenoberfläche von $\varepsilon = 0,966$ in unbeschichtetem Zustand auf $\varepsilon = 0,354$ (Tabelle 6) vermindert werden. Damit zeigt die beschichtete Scherbenoberfläche des Ziegels A einen vergleichsweise sehr niedrigen Emissionskoeffizienten.

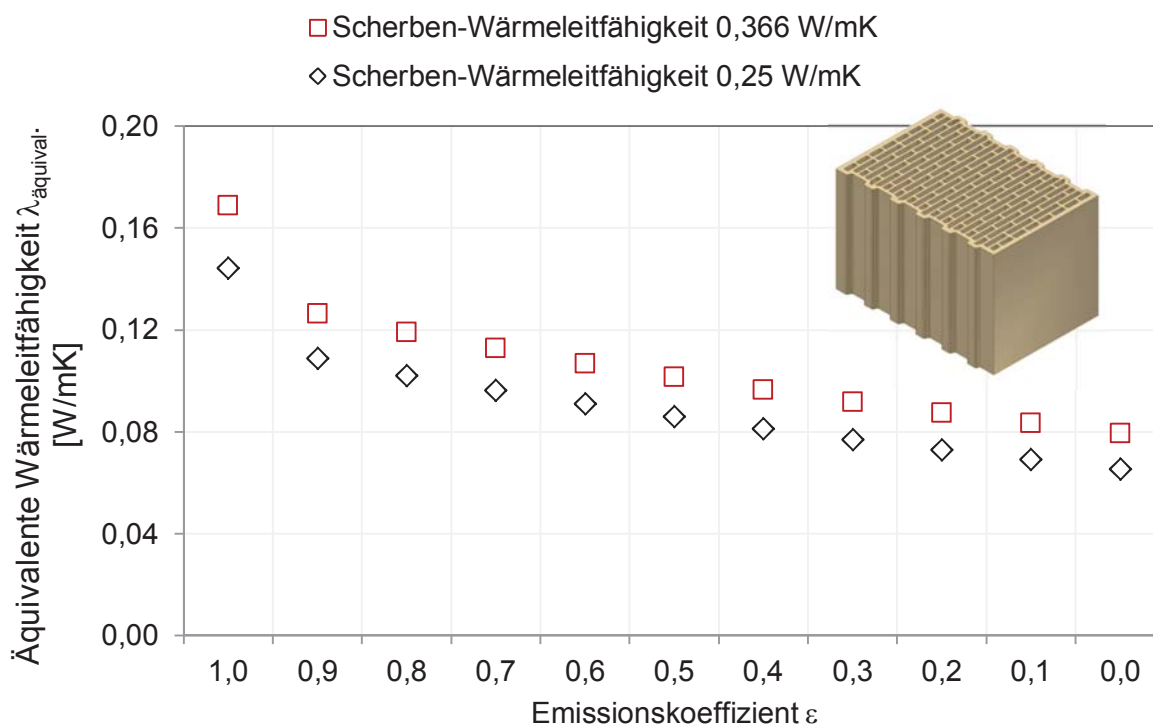


Bild 103: Verminderung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit des Ziegels A bei schrittweiser Absenkung des Emissionskoeffizienten (SOLIDO)

In weiteren FE-Berechnungen des Ziegels A erfolgte ein Vergleich der Beschichtung mit einem angenommenen Emissionskoeffizienten von $\varepsilon = 0,344$ (Tabelle 6) mit entsprechenden Verfüllungen der Hohlräume durch jeweils Neopor, Mineralwollegranulat und Perlite (Bild 104).

Die Beschichtung führt bei einem Emissionskoeffizienten von $\varepsilon = 0,344$ und einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,366 \text{ W/mK}$ zu einer äquivalenten Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,094 \text{ W/mK}$. Dies entspricht einer Minderung um 28,8 %. Wird eine Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,25 \text{ W/mK}$ angenommen, so resultiert eine äquivalente Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,079 \text{ W/mK}$. Dies entsprechend 30,7 % Minderung.

Eine Verfüllung des Ziegels A mit Neopor würde zu einer geringfügigen Erniedrigung (6,4 % bzw. 5,2 %) der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit bei beiden Scherben-Wärmeleitfähigkeiten führen und die Verfüllung mit Mineralwollegranulat zu einer geringfügigen Erhöhung im

Vergleich mit der Beschichtung. Im Falle der Ausrüstung mit Perlite wird bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, tr.} = 0,366 \text{ W/mK}$ die äquivalente Wärmeleitfähigkeit auf $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,118 \text{ W/mK}$ abgesenkt und im Falle einer angenommenen Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, tr.} = 0,25 \text{ W/mK}$ eine äquivalente Wärmeleitfähigkeit von $0,101 \text{ W/mK}$ (Bild 104) erzielt.

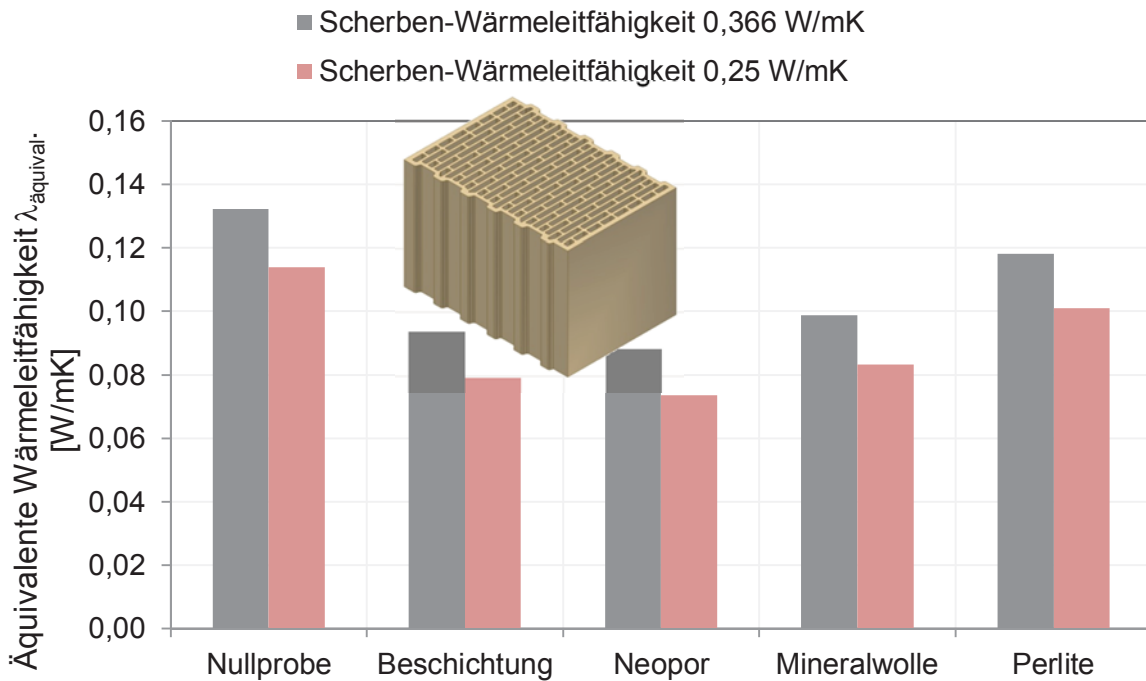


Bild 104: FEM-Berechnung (SOLIDO) der äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten des Ziegels A. Vergleich der Beschichtung mit einer Verfüllung aus Neopor, Mineralwollegranulat und Perlite

Beim Vergleich der mit ANSYS CFX und SOLIDO aufgestellten Wärmebilanzen zeigt sich ein geringer Unterschied im Strahlungsanteil (Bild 105).

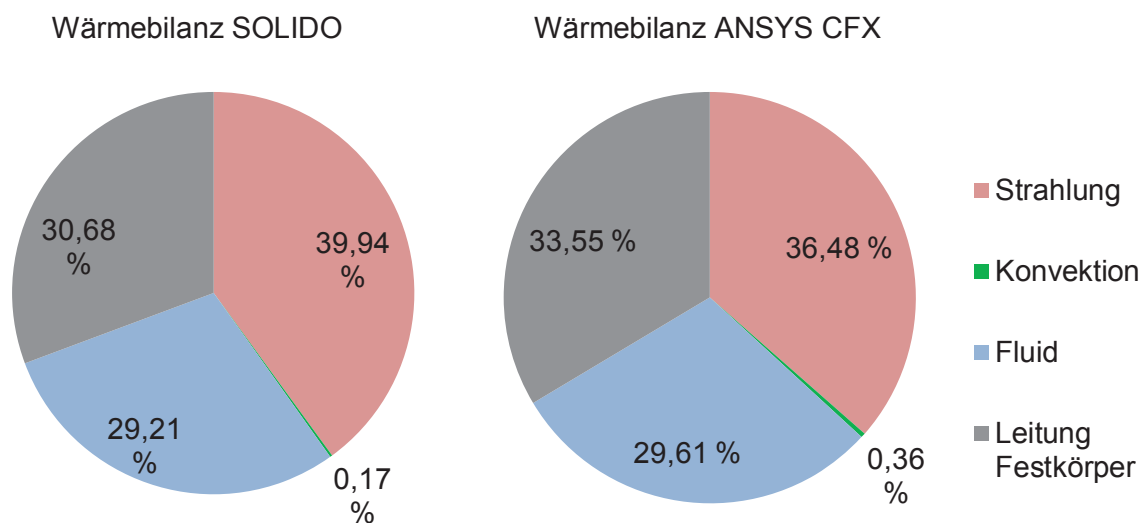


Bild 105: Wärmebilanzen des Ziegels A bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, tr.} = 0,366 \text{ W/mK}$ (Messwert aus Tabelle 5). Berechnung mit SOLIDO (links) und mit ANSYS CFX (rechts)

Dieser wird mit ANSYS CFX zu 33,55 % berechnet, während mit SOLIDO ein Strahlungsanteil von 39,94 % erhalten wird. Ein weiterer Unterschied ergibt sich in der Berechnung des Fluidleitungsanteils. Dieser wird von ANSYS CFX mit 33,55 % und von SOLIDO mit 30,68 % ausgegeben. Der Ergebnisse für den Leitungsanteil im Festkörper stimmen bei beiden Programmen überein. Beide Programme weisen einen sehr geringen Konvektionsanteil aus.

5.3.2. FE-Berechnungen für Ziegel B

Mit der schrittweisen Absenkung des Emissionskoeffizienten um jeweils $\Delta\varepsilon=0,1$ erfolgt eine theoretische Absenkung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten von $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,151 \text{ W/mK}$ auf $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,072 \text{ W/mK}$, entsprechend 52 % bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10,\text{tr.}} = 0,332 \text{ W/mK}$.

Wird eine Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10,\text{tr.}} = 0,25 \text{ W/mK}$ angenommen, so wird sogar eine Absenkung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,134 \text{ W/mK}$ auf $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,062 \text{ W/mK}$ berechnet, entsprechend 53,7 % (Bild 106).

Nach einer Beschichtung der inneren Oberflächen des Ziegels B wurde der Emissionskoeffizient der Scherbenoberfläche von $\varepsilon = 0,950$ in unbeschichtetem Zustand auf $\varepsilon = 0,462$ vermindert (Tabelle 6). Hierdurch konnte eine Absenkung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,115 \text{ W/mK}$ auf $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,089 \text{ W/mK}$, entsprechend 22,6 %, berechnet werden.

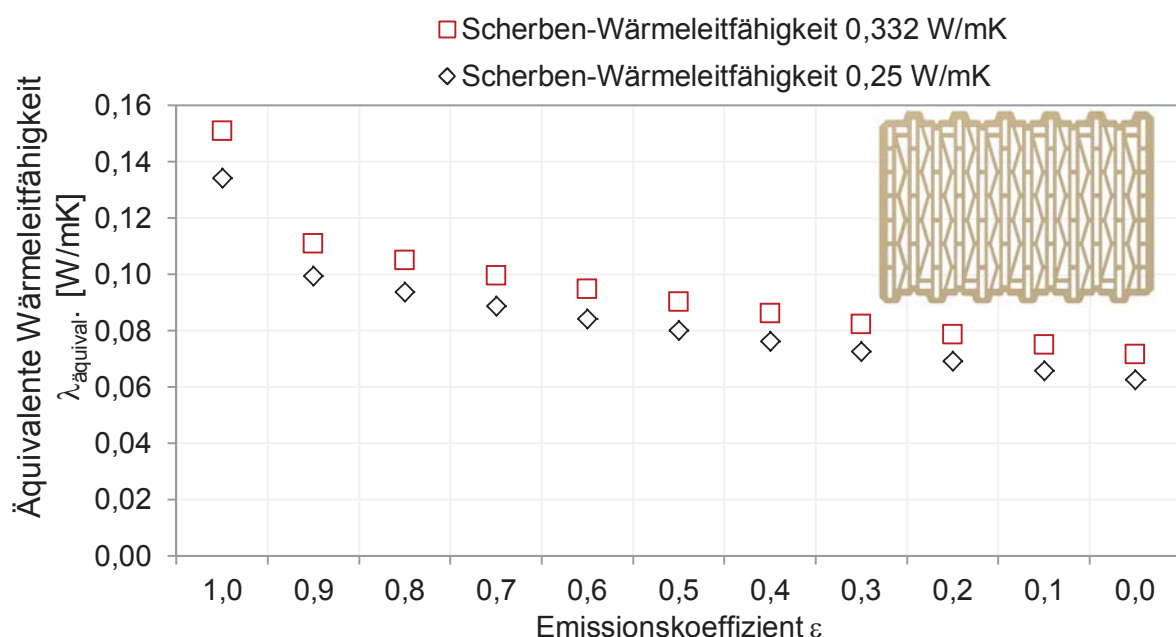


Bild 106: Minderung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit des Ziegels B bei schrittweiser Absenkung des Emissionskoeffizienten der keramischen Scherbenoberfläche (SOLIDO)

Weitere Finite-Elemente-Berechnungen wurden für einen Vergleich der Beschichtung bei einem Emissionskoeffizienten von $\varepsilon = 0,462$ mit einer Verfüllung der Hohlräume durch Neopor, Mineralwollegranulat und Perlite durchgeführt (Bild 107).

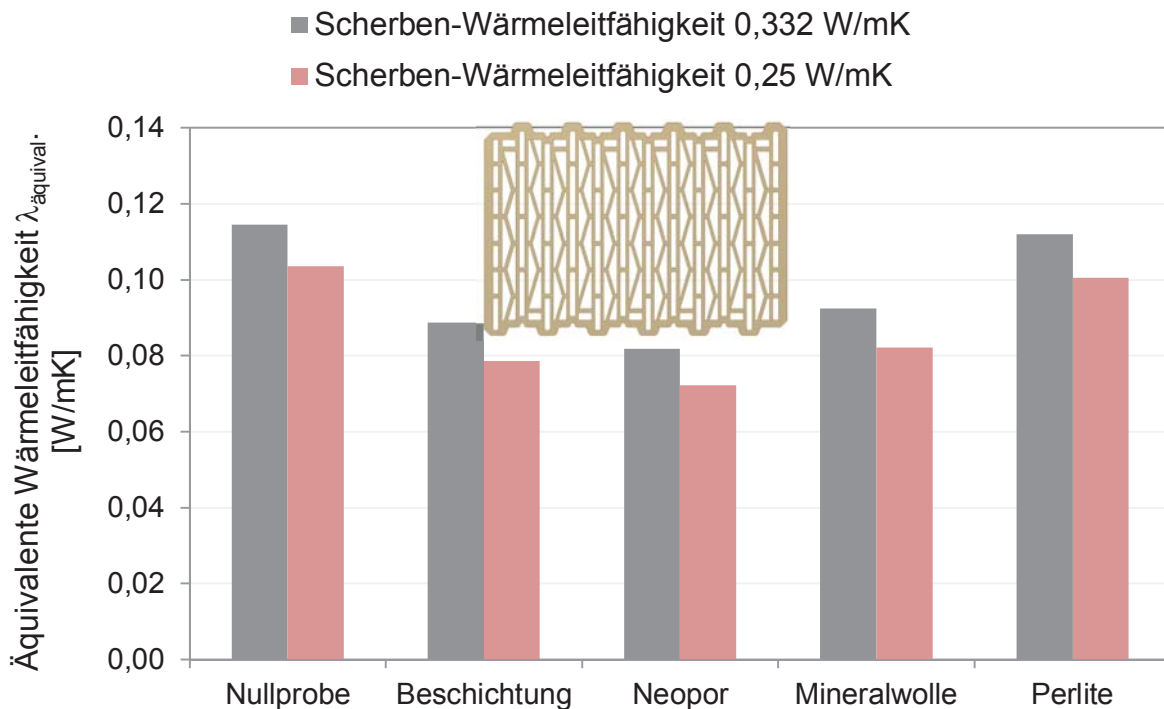


Bild 107: FEM-Berechnung (SOLIDO) der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{\text{äquival.}}$ des Ziegels B: Vergleich der Beschichtung mit einer Verfüllung aus Neopor, Mineralwollegranulat und Perlite

Bei Beschichtung der inneren Ziegeloberflächen ($\varepsilon = 0,462$) und einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, tr.} = 0,332$ W/mK berechnet sich eine äquivalente Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,089$ W/mK. Würde die Scherben-Wärmeleitfähigkeit des Ziegels B theoretisch auf $\lambda_{10, tr.} = 0,25$ W/mK abgesenkt, so berechnet sich eine äquivalente Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,079$ W/mK.

Bei einer Verfüllung der Hohlräume mit Neopor werden äquivalente Wärmeleitfähigkeiten von $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,082$ W/mK bzw. von $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,072$ W/mK erreicht. Damit bewirkt die Verfüllung mit Neopor gegenüber der Beschichtung ($\varepsilon = 0,462$) um 7,9 % bzw. 8,9 % erniedrigte äquivalente Wärmeleitfähigkeiten.

Bei einer Verfüllung mit Mineralwollegranulat werden gegenüber der Beschichtung geringfügig höhere Werte berechnet, nämlich $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,092$ W/mK bzw. $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,082$ W/mK. Im Falle einer Verfüllung mit Perlite liegen die äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten bei $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,112$ W/mK bzw. 0,100 W/mK (Bild 107).

Im Folgenden wurde mit den Programmen SOLIDO und ANSYS CFX jeweils eine Wärmebilanz des Ziegels B bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, tr.} = 0,332$ W/mK (Messwert) aufgestellt (Bild 108).

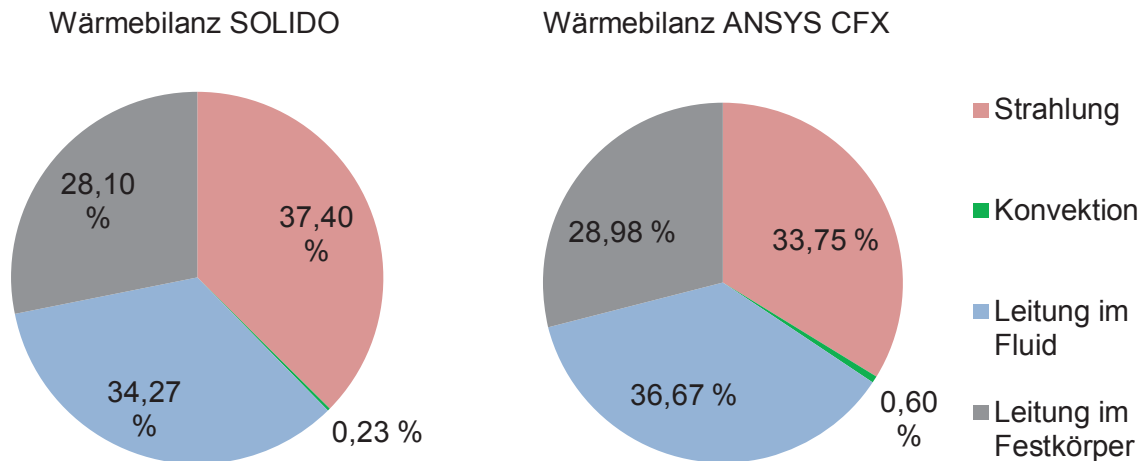


Bild 108: Wärmebilanzen des Ziegels B bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, tr.} = 0,332 \text{ W/mK}$ (Messwert aus Tabelle 5). Berechnet mit SOLIDO (links) und mit ANSYS CFX (rechts)

Beim Vergleich der Wärmebilanzen sind nur sehr geringe Unterschiede erkennbar. Es ergibt sich ein geringer Unterschied im Strahlungsanteil, der zwischen 34 % und 37 % liegt. Ein kleiner Unterschied von nur 3 % ergibt sich bei den Anteilen der Fluidleitung. Hier werden 34 % Fluidleitung mit der Software SOLIDO und 37 % Fluidleitung mit ANSYS CFX berechnet. Die Ergebnisse für den Leitungsanteil im Festkörper stimmen bei beiden Programmen mit 28 % bzw. 29 % gut überein. Im Falle von ANSYS CFX ist zusätzlich ein sehr geringer Konvektionsanteil von 0,6 % berechenbar.

5.3.3. FE-Berechnungen für Ziegel C

Aus der FE-Berechnung mit SOLIDO geht hervor, dass bei Ziegel C die schrittweise Absenkung des Emissionskoeffizienten von $\varepsilon = 1,0$ auf $\varepsilon = 0,0$ bei einer gegebenen Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, tr.} = 0,293 \text{ W/mK}$ die äquivalente Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,25 \text{ W/mK}$ auf $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,085 \text{ W/mK}$ abgesenkt werden kann.

Wird eine verminderte Scherben-Wärmeleitfähigkeit von sogar $\lambda_{10, tr.} = 0,25 \text{ W/mK}$ angenommen, erfolgt eine Absenkung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,235 \text{ W/mK}$ auf $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,079 \text{ W/mK}$ (Bild 109).

Aus der Untersuchung geht hervor, dass die Beschichtung von Ziegel C mit „Goldbronzepulver Luminor 2210“ zu einer Absenkung des Emissionskoeffizienten von $\varepsilon = 0,968$ in unbeschichtetem Zustand auf $\varepsilon = 0,365$ im beschichtetem Zustand führt.

Aus Bild 109 wird ersichtlich, dass ein möglichst niedriger Emissionskoeffizient der Beschichtung erreicht werden muss, damit eine möglichst große Absenkung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit resultiert.

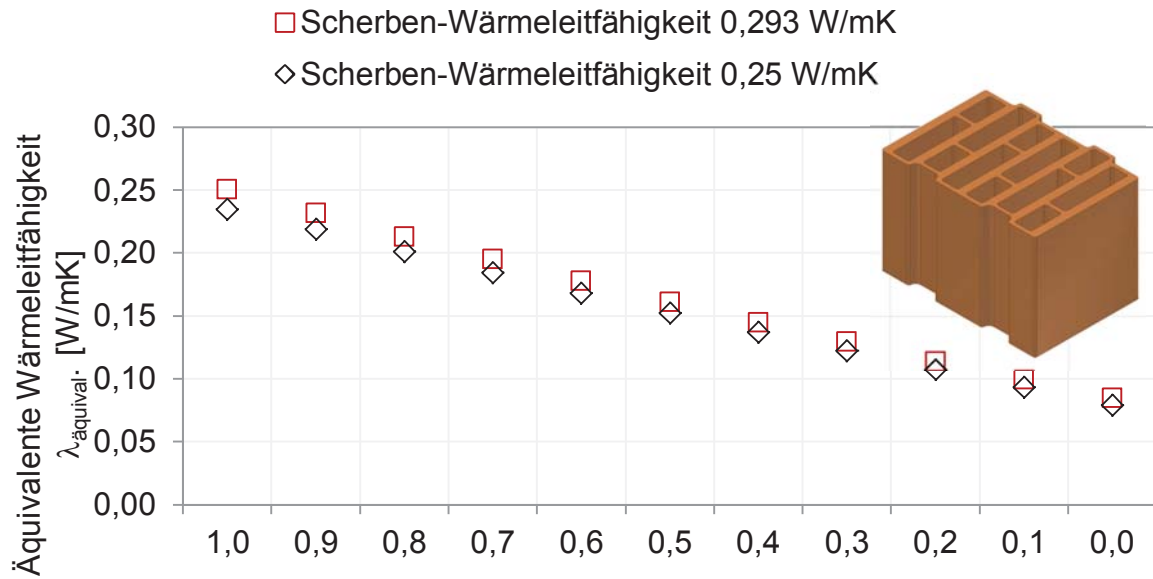


Bild 109: Minderung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{\text{äquiv.}}$ des Ziegels C nach Zulassung Z 17.1-906 bei schrittweiser Absenkung des Emissionskoeffizienten der keramischen Scherbenoberfläche um jeweils $\Delta\epsilon = 0,1$ von $\epsilon = 1$ bis $\epsilon = 0$ (Berechnung mit SOLIDO)

In weiteren FE-Berechnungen wurde eine Beschichtung von Ziegel C mit dem Pigment „Goldbronzepulver Luminor 2210“ ($\epsilon = 0,365$) mit je einer Verfüllung aus Neopor, Mineralwollegranulat und Perlite verglichen. Die Ergebnisse sind in Bild 110 graphisch dargestellt.

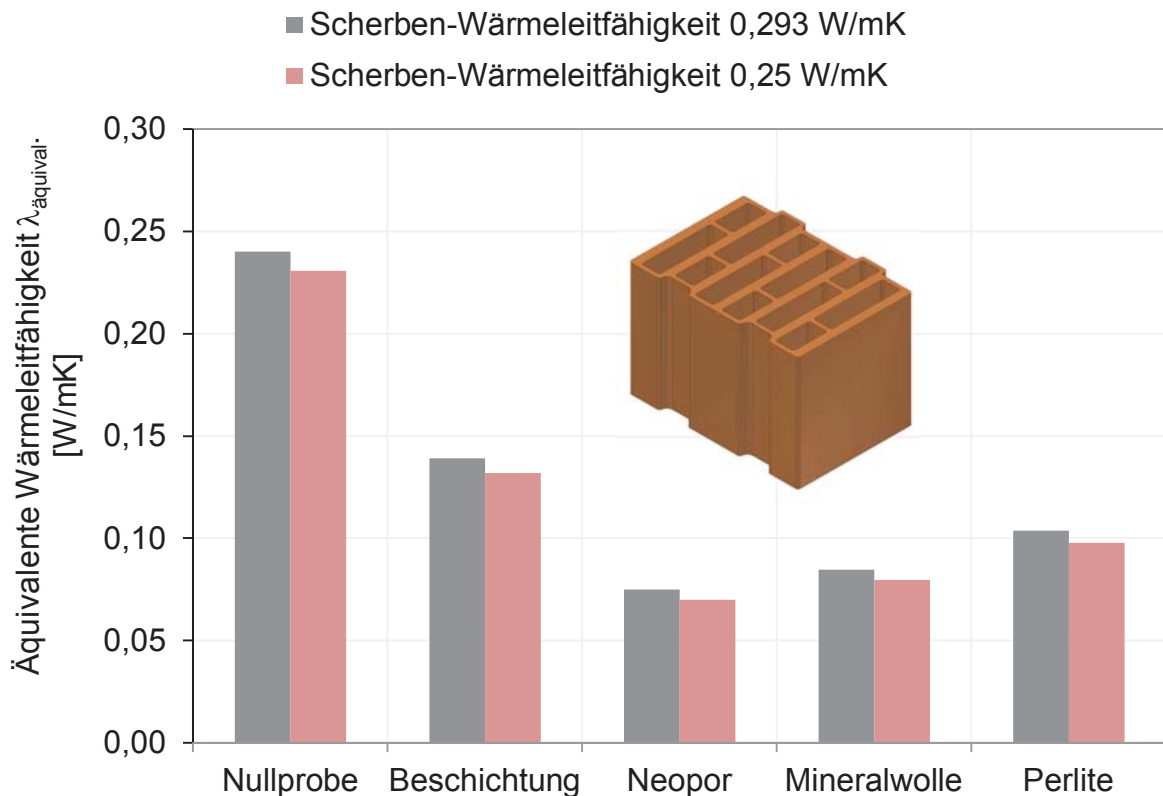


Bild 110: Finite Elemente Berechnung (SOLIDO) der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit des Ziegels C nach Zulassung Z 17.1-906. Vergleich von Nullprobe (ohne Beschichtung und Verfüllung) mit Beschichtung und Verfüllung mit Neopor, Mineralwollegranulat und Perlite

Daraus wird ersichtlich, dass durch Verfüllung der Hohlräume mit Dämmstoffen eine vergleichsweise größere Absenkung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit erreicht werden kann. Dies resultiert aus der Wärmebilanz des unverfüllten Ziegels mit einem Konvektionsanteil von 14,17 % (Bild 111). Dieser relativ hohe Konvektionsanteil kann durch eine Beschichtung nicht abgesenkt werden. Daher ist bei diesem Lochbild eine Minderung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit durch Verfüllung der Löcher die vergleichsweise bessere Methode.

Der unbeschichtete Ziegel C zeigt eine äquivalente Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,250 \text{ W/mK}$. Während bei der Beschichtung und zwei verschiedenen Scherben-Wärmeleitfähigkeiten ($\lambda_{10,\text{tr.}} = 0,293 \text{ W/mk}$ und $\lambda_{10,\text{tr.}} = 0,25 \text{ W/mk}$) äquivalente Wärmeleitfähigkeiten von $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,139 \text{ W/mK}$ und $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,132 \text{ W/mK}$ resultieren, führt die Verfüllung der Hohlräume mit Neopor zu einer Absenkung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit auf $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,075 \text{ W/mK}$ und $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,070 \text{ W/mK}$. Werden die Hohlräume mit Mineralwollegranulat gefüllt, so steigen die äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten auf $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,085 \text{ W/mK}$ bzw. $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,080 \text{ W/mK}$ an. Bei einer Verfüllung der Hohlräume mit Perlite resultiert eine äquivalente Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,104 \text{ W/mK}$ bzw. $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,098 \text{ W/mK}$. Aus der Untersuchung geht hervor, dass bei Ziegel C eine Verfüllung der Löcher mit Dämmstoffen zu vergleichsweise niedrigeren äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten führt.

Um eine mögliche Verbesserung der Wärmedämmung von Ziegel C durch Absenkung des strahlungsbedingten Wärmeübergangs beurteilen zu können, müssen die jeweiligen Anteile der Leitung, Konvektion und Strahlung am Wärmeübergang bekannt sein. Dazu erfolgte die Aufstellung einer Wärmebilanz unter Verwendung der FE-Programme ANSYS CFX und SOLIDO, wobei die Ergebnisse aus beiden Berechnungsverfahren miteinander verglichen werden (Bild 111).

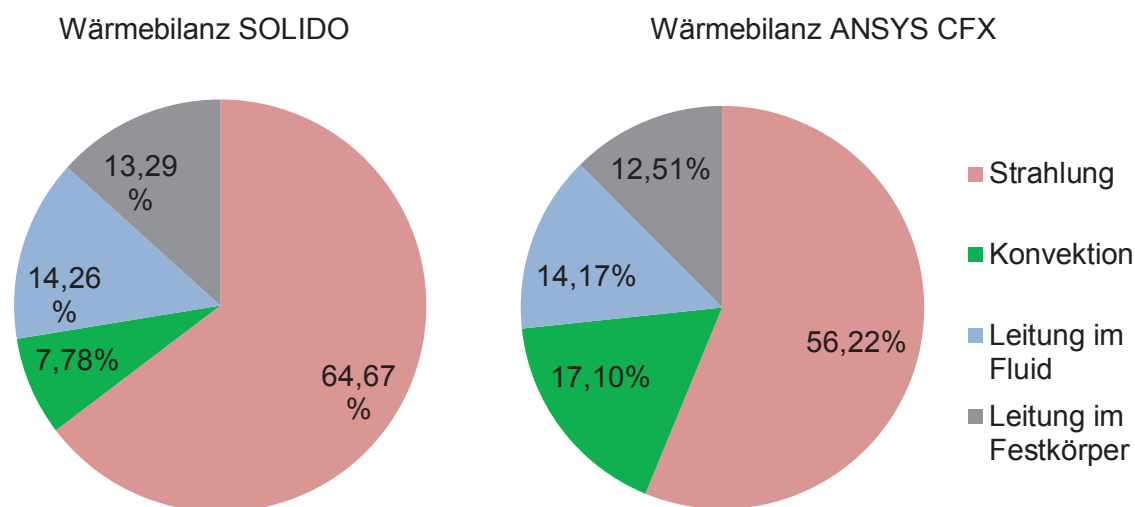


Bild 111: Wärmebilanzen von Ziegel C bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10,\text{tr.}} = 0,293 \text{ W/mK}$ (Messwert aus Tabelle 5); berechnet mit SOLIDO (links) und mit ANSYS CFX (rechts)

Mit dem FE-Programm SOLIDO wurde berechnet, dass den größten Anteil am Wärmeübergang die Strahlung mit 64,7 % verursacht, während die Konvektion 7,8 % und die Fluidleitung 14,3 % bewirken. Ein vergleichsweise geringer Anteil von 13,3 % erfolgt durch Leitung im Scherben. Bei der Berechnung mit ANSYS CFX resultieren etwas abweichende Werte. Für die Berechnung des Strahlungsanteils beträgt die Differenz zwischen den beiden FE-Programmen 8,45 %, wobei mit SOLIDO ein höherer Prozentsatz für die Strahlung erhalten wird. Zwischen der Leitung im Fluid und der Leitung im Festkörper besteht praktisch keine Differenz zwischen den mit beiden Programmen berechneten prozentualen Anteilen. Eine Differenz von 9,3 % ergibt sich für die Konvektion.

Durch eine Beschichtung der inneren Flächen im Hochlochziegel kann der Wärmeübergang durch Strahlung, je nach erzielbarem Emissionskoeffizienten um maximal 56,22 % bzw. 64,67 %, (bei $\varepsilon = 0,0$), abgesenkt werden. Durch Verfüllung der Hohlräume mit Dämmstoffen kann sowohl der Wärmeübergang durch Strahlung um 56,22 % bzw. 64,67 %, als auch durch Konvektion mit 7,78 % bzw. 17,10 % unterbunden werden. Eine Verfüllung mit Dämmstoffen eignet sich aber nur dann, wenn die Wärmeleitfähigkeiten der Verfüllstoffe unter der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit des unverfüllten Hohlraums liegen. Diese berechnet sich additiv aus dem Strahlungsanteil der Wärmeleitfähigkeit, dem Konvektionsanteil und der Wärmeleitfähigkeit der ruhenden Luft.

5.3.4. FE-Berechnungen für Ziegel D

Bei der FE-Berechnung des Ziegels D mit einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, \text{tr}} = 0,35 \text{ W/mK}$ wird der Emissionskoeffizient von $\varepsilon = 1,0$ schrittweise um $\Delta\varepsilon = 0,1$ variiert (Bild 112).

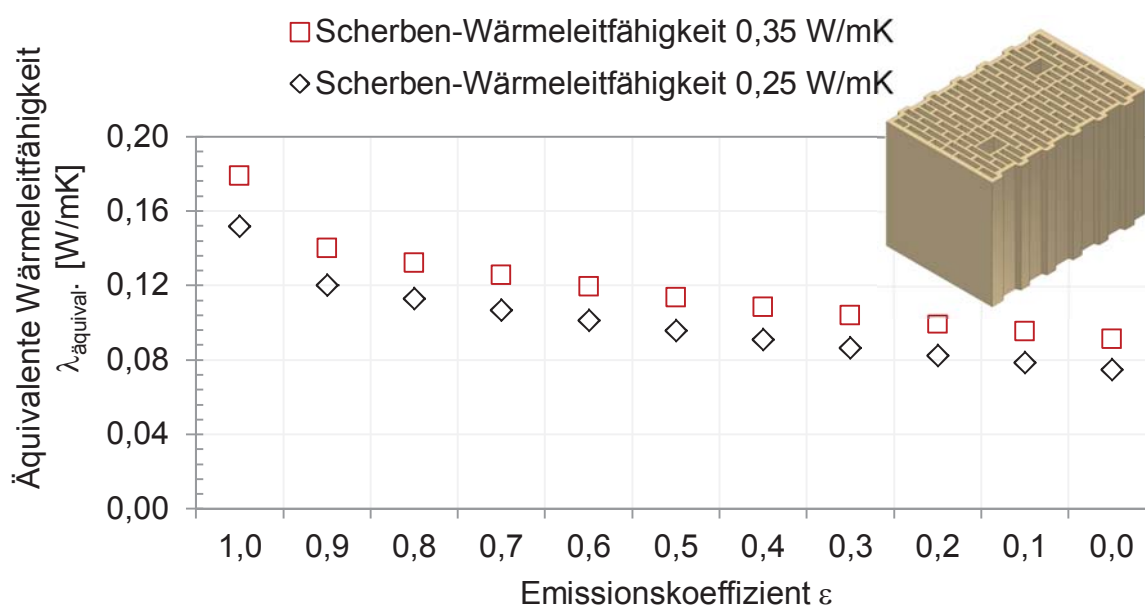


Bild 112: Minderung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit des Ziegels D bei schrittweiser Absenkung des Emissionskoeffizienten der keramischen Scherbenoberfläche (Berechnung mit SOLIDO)

Dadurch wird die äquivalente Wärmeleitfähigkeit des unverfüllten Ziegels von $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,179 \text{ W/mK}$ auf $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,091 \text{ W/mK}$ abgesenkt. Wird stattdessen eine Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10,\text{tr.}} = 0,25 \text{ W/mK}$ angenommen, so mindert sich die äquivalente Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,152 \text{ W/mK}$ auf $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,075 \text{ W/mK}$

Tatsächlich konnte durch eine Beschichtung der inneren Oberflächen des Ziegels D der Emissionskoeffizient von $\varepsilon = 0,963$ auf $\varepsilon = 0,631$ abgesenkt werden. Dies führte zu einer Minderung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,146 \text{ W/mK}$ auf $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,121 \text{ W/mK}$, nämlich um 17,1 %.

Im weiteren Verlauf der Untersuchungen wurde eine Beschichtung („Goldbronzepulver Luminor 2210“) mit einem Emissionskoeffizienten von $\varepsilon = 0,631$ vorgegeben (Tabelle 6) und die berechneten äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten mit den entsprechenden Werten bei Verfüllung verglichen (Bild 113).

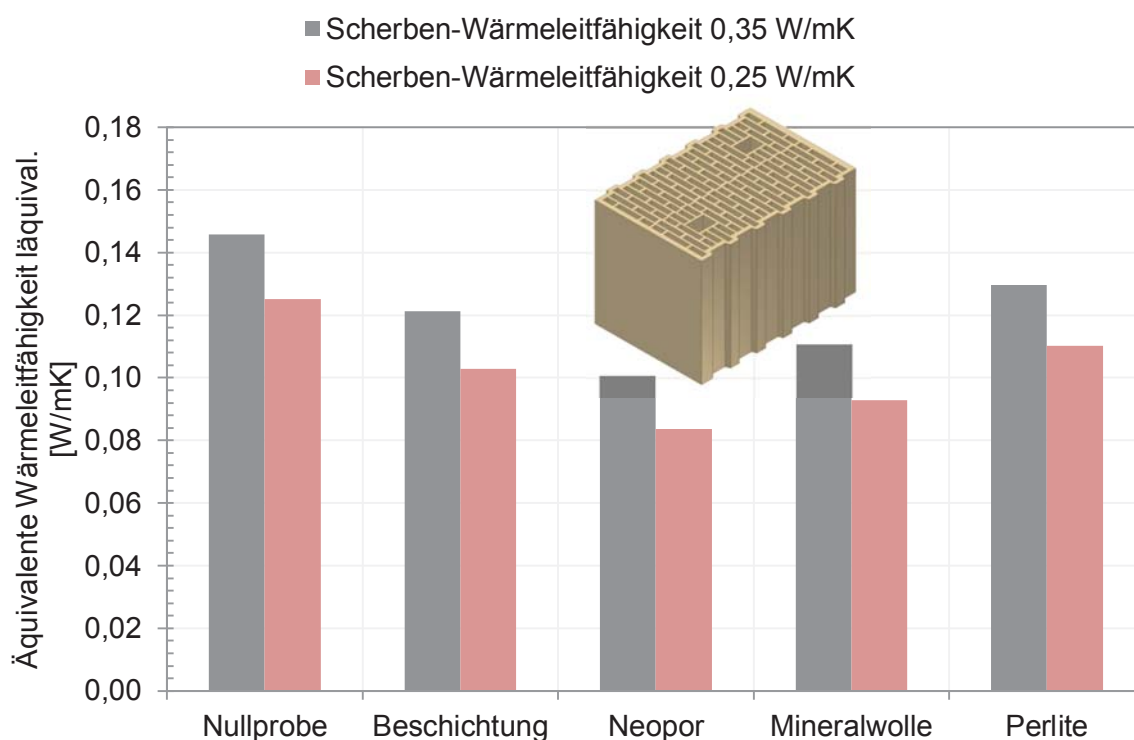


Bild 113: Finite Elemente Berechnung (SOLIDO) der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit des Ziegels D: Vergleich der Beschichtung mit jeweils einer Verfüllung aus Neopor, Mineralwollegranulat und Perlite

Die äquivalente Wärmeleitfähigkeit des unverfüllten Ziegels D beträgt $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,120 \text{ W/mK}$ bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10,\text{tr.}} = 0,35 \text{ W/mK}$. Bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10,\text{tr.}} = 0,35 \text{ W/mK}$ und einer Beschichtung mit „Goldbronzepulver Luminor 2210“ wird die äquivalente Wärmeleitfähigkeit auf $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,121 \text{ W/mK}$ abgesenkt. Mit der Annahme einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10,\text{tr.}} = 0,25 \text{ W/mK}$ berechnet sich eine Absenkung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit um 17,6 % auf $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,103 \text{ W/mK}$ bei Beschichtung

($\varepsilon = 0,631$) (Bild 113). Durch eine Verfüllung des Ziegels D mit Neopor kann bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,35 \text{ W/mK}$ eine äquivalente Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,101 \text{ W/mK}$ erreicht werden und bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,25 \text{ W/mK}$ berechnet sich ein Wert von $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,084 \text{ W/mK}$.

Bei der Verfüllung mit Mineralwollegranulat und Perlite steigen die resultierenden äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten wieder geringfügig an.

Aus der FE-Berechnung geht hervor, dass ab einem Emissionskoeffizienten von $\varepsilon = 0,3$ die resultierende äquivalente Wärmeleitfähigkeit durch Beschichtung stärker abgesenkt wird, als durch eine Neopor-Verfüllung. Im Falle der Verwendung von Mineralwollegranulat und Perlite kann sogar der Emissionskoeffizient auf $\varepsilon = 0,4$ zurückgenommen werden, um mit der Beschichtung niedrigere äquivalente Wärmeleitfähigkeiten zu erhalten, als mit der Verfüllung. Bei relativ hohen Emissionskoeffizienten (z.B. $\varepsilon = 0,631$) ist bei Ziegel D die Verfüllung der Beschichtung überlegen. Wird dagegen der Emissionskoeffizient auf $\varepsilon = 0,3$ bzw. $\varepsilon = 0,4$ abgesenkt, so ist die Beschichtung gegenüber der Befüllung mit Dämmstoffen vorzuziehen. Würde es gelingen, die Oberflächenrauigkeit im Ziegel zu reduzieren, besteht eine zusätzliche Möglichkeit, den Emissionskoeffizienten der Ziegeloberfläche in Verbindung mit einer Beschichtung weiter abzusenken.

Die mittels den Programmen SOLIDO und ANSYS CFX berechneten Wärmebilanzen des Ziegels D sind nachfolgend dargestellt (Bild 114).

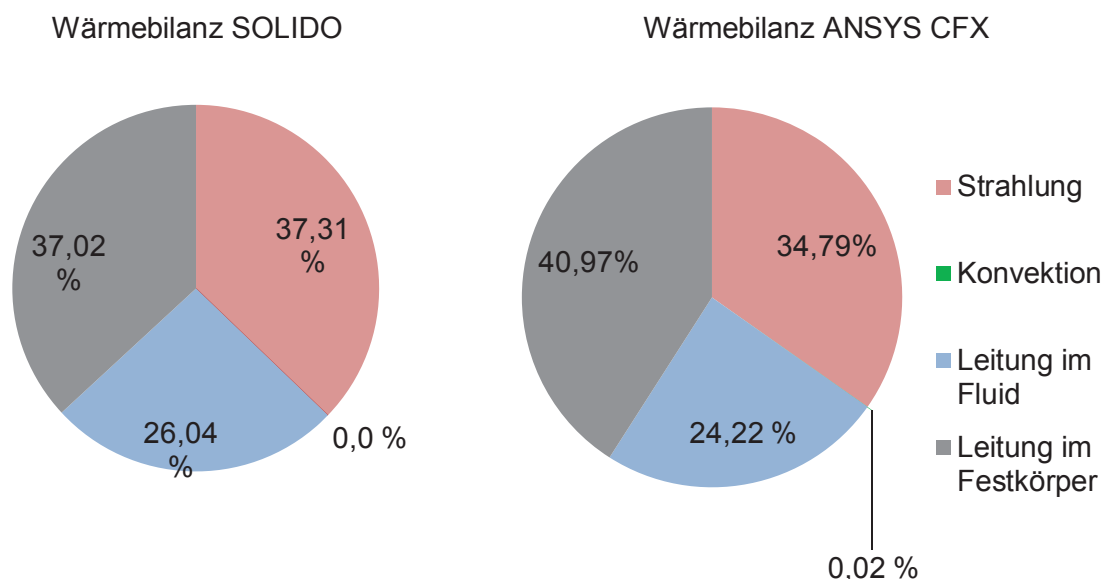


Bild 114: Wärmebilanzen des Ziegels D bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,35 \text{ W/mK}$ (Messwert aus Tabelle 5); berechnet mit SOLIDO (links) und mit ANSYS CFX (rechts)

Die mit beiden FE-Programmen berechneten Wärmebilanzen zeigen sehr ähnliche Anteile für die Wärmeübertragungsarten Leitung, Strahlung und Konvektion. Der Anteil der Wärmestrahlung am gesamten Wärmeübergang liegt, je nach Berechnungsprogramm,

zwischen 35 % bis 37 %. Ein Großteil des Wärmeübergangs mit 38 % bis 41 % findet durch Leitung im Festkörper statt. Dieser hohe Anteil ist mit der hohen Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,35 \text{ W/mK}$, dem geringen Lochanteil von 50 Vol.-% und den von der Warm- zur Kaltseite durchgängigen Stegen begründet. Die restlichen 24 % bis 26 % des Wärmeübergangs erfolgen durch Leitung im ruhenden Fluid. Ein Beitrag der Konvektion am Wärmeübergang liegt nicht vor. Das Fehlen des konvektiven Wärmeübergangs ist auf die relativ hohe Anzahl an Quersteinen in diesem Lochbild zurück zu führen, nämlich insgesamt 24.

5.3.5. FE-Berechnungen für Ziegel E

Wird der Emissionskoeffizient des Ziegels E schrittweise von $\varepsilon = 1,0$ auf $\varepsilon = 0,0$ vermindert, so berechnet sich bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,332 \text{ W/mK}$ eine theoretische Absenkung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit des Ziegels E von $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,160 \text{ W/mK}$ auf $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,064 \text{ W/mK}$, entsprechend 60,0 %. Bei einer angenommenen Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,25 \text{ W/mK}$, wird eine Absenkung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,139 \text{ W/mK}$ auf $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,056 \text{ W/mK}$ möglich (Bild 115).

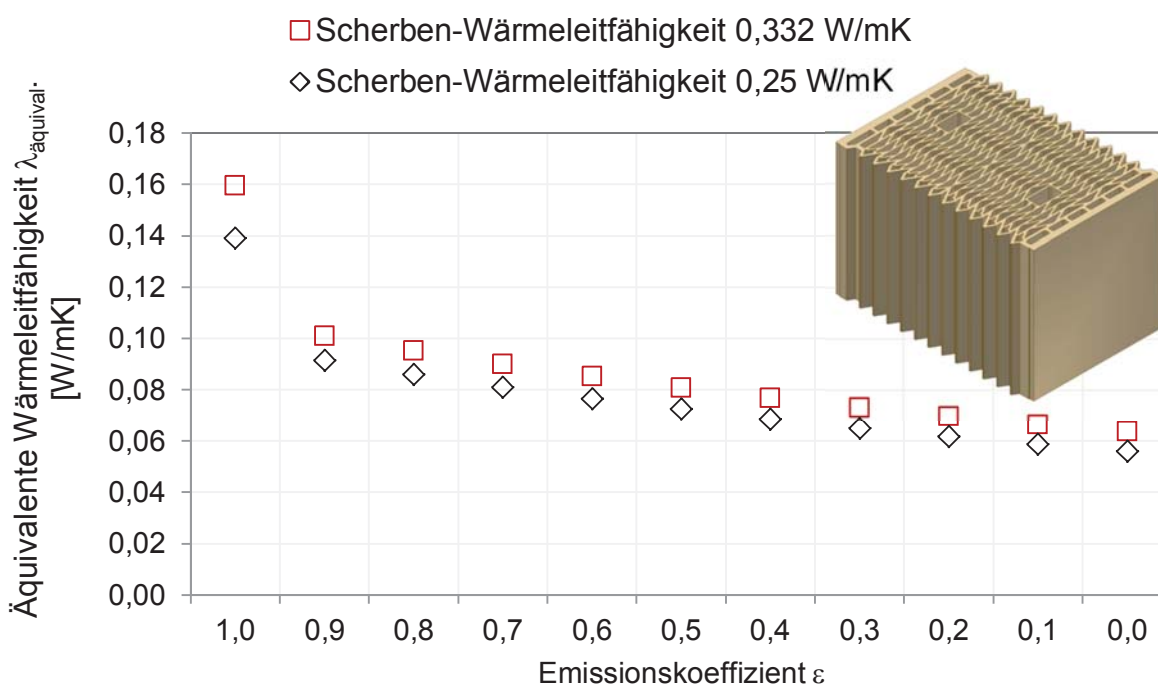


Bild 115: Minderung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit des Ziegels E bei schrittweiser Absenkung des Emissionskoeffizienten der keramischen Scherbenoberfläche (SOLIDO)

Weitere FE-Berechnungen des Ziegels E wurden für einen Vergleich der Beschichtung mit einem tatsächlich gemessenen Emissionskoeffizienten von $\varepsilon = 0,47$ (Tabelle 6) und einer Verfüllung der Hohlräume durch Neopor, Mineralwollegranulat und Perlite durchgeführt.

Nach einer Beschichtung der inneren Oberflächen des Ziegels E mit „Goldbronzepulver Luminor 2210“ wurde der Emissionskoeffizient der Scherbenoberfläche von $\varepsilon = 0,959$ in unbeschichtetem Zustand auf $\varepsilon = 0,47$ vermindert (Tabelle 6), entsprechend 50,9 %.

Nach Beschichtung und einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,332 \text{ W/mK}$ (Messwert aus Tabelle 5) wird eine äquivalente Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,079 \text{ W/mK}$ berechnet. Wird eine Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,25 \text{ W/mK}$ angenommen, so resultiert eine äquivalente Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,071 \text{ W/mK}$ bei Beschichtung der inneren Oberflächen des Ziegels. Die Befüllung der Ziegelhohlräume mit dem Dämmstoff Neopor liefert bei beiden angenommenen Scherben-Wärmeleitfähigkeiten vergleichbare Ergebnisse, wie bei der Beschichtung. Bei einer Verfüllung des Ziegels mit Mineralwollegranulat wird bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,332 \text{ W/mK}$ eine äquivalente Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,090 \text{ W/mK}$ erreicht und bei einer angenommenen Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,25 \text{ W/mK}$ resultiert ein Wert von $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,080 \text{ W/mK}$. Die Verfüllung des Ziegels mit Perlite bewirkt bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,332 \text{ W/mK}$ eine vergleichsweise erhöhte äquivalente Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,109 \text{ W/mK}$. Wird eine Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,25 \text{ W/mK}$ angenommen, so berechnet sich eine vergleichsweise ebenso hohe äquivalente Wärmeleitfähigkeit des Ziegels von $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,098 \text{ W/mK}$ (Bild 116).

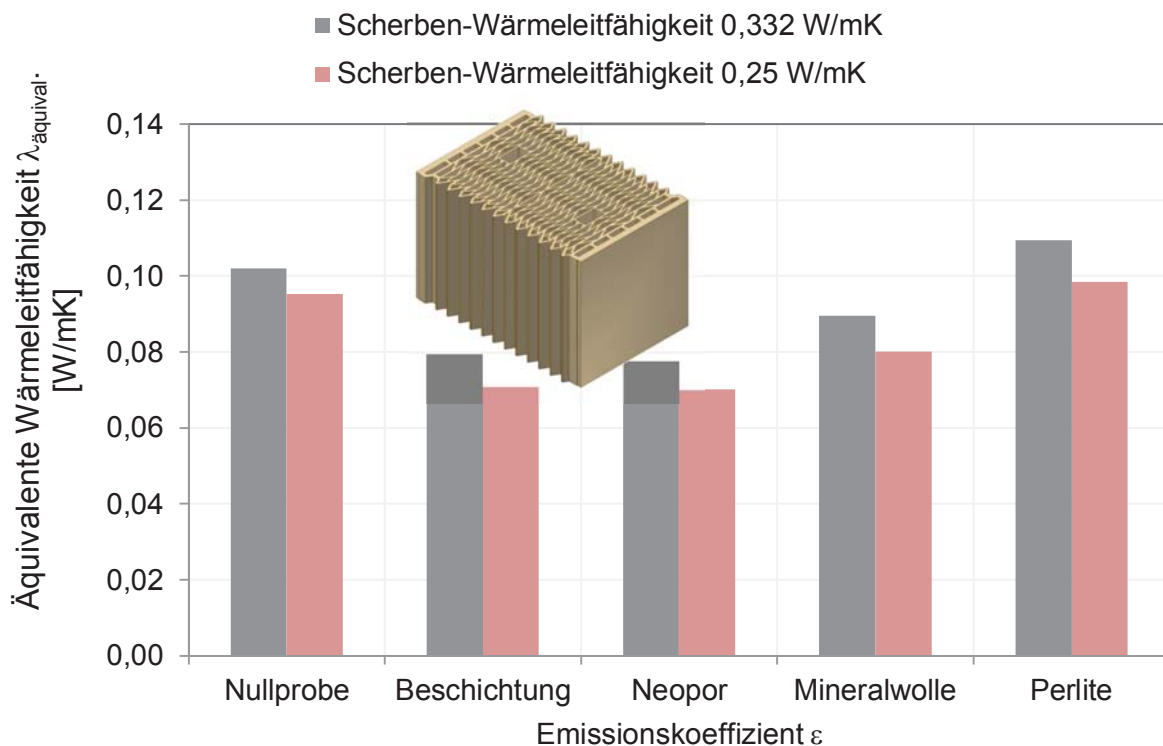


Bild 116: FE-Berechnung (SOLIDO) der äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten des Ziegels E bei zwei verschiedenen Scherben-Wärmeleitfähigkeiten. Vergleich der Beschichtung mit einer Befüllung aus Neopor, Mineralwollegranulat und Perlite

Die für den Ziegel E aufgestellten Wärmebilanzen sind in Bild 117 dargestellt. Bei der Berechnung der Strahlungsanteile gibt es nur einen geringen Unterschied zwischen 37 % und 38 %. Auch bei der Berechnung der Fluidleitung resultiert nur ein geringer Unterschied zwischen 39 % und 38 %. Größere Unterschiede ergeben sich bei einem Vergleich der Festkörperleitung. Diese wird mit SOLIDO zu fast 30 % und mit ANSYS CFX zu 25 % berechnet. Für den Konvektionsanteil wird mit SOLIDO ein Wert von -5,58 % erhalten. Dieser Wert ist physikalisch nicht möglich und kann auf das SOLIDO zugrunde liegende Berechnungsverfahren (Berechnung des Konvektions- und Strahlungsübergangs mittels Äquivalentflächenverfahren) zurückgeführt werden. Nach der Berechnung mit ANSYS CFX findet kein Wärmeübergang durch Konvektion statt.

Der Wärmeübergang teilt sich im Fall von Ziegel E mit je einem Drittel auf die Anteile von Strahlung, Leitung und Konvektion auf.

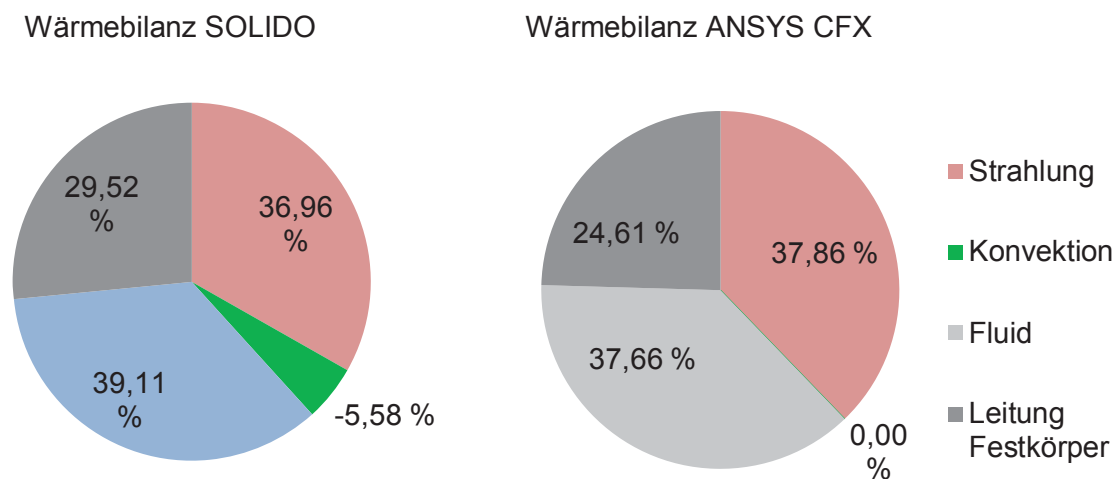


Bild 117: Wärmebilanzen des Ziegels E bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, tr.} = 0,332 \text{ W/mK}$ (Messwert aus Tabelle 5). Berechnung mit SOLIDO (links) und mit ANSYS CFX (rechts)

5.3.6. FE-Berechnungen für Ziegel F

Weitere FE-Berechnungen wurden mit Ziegel F durchgeführt. Der unverfüllte und unbeschichtete Ziegel zeigt eine äquivalente Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,162 \text{ W/mK}$. Wird der Emissionskoeffizient der Scherbenoberfläche schrittweise von $\varepsilon = 1,0$ auf $\varepsilon = 0,0$ vermindert, so ist bei einer gemessenen Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, tr.} = 0,27 \text{ W/mK}$ eine Absenkung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit um 62 % von $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,162 \text{ W/mK}$ auf $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,061 \text{ W/mK}$ theoretisch erreichbar. Wird eine Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, tr.} = 0,25 \text{ W/mK}$ angenommen, so resultiert eine Absenkung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,158 \text{ W/mK}$ auf $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,058 \text{ W/mK}$ (Bild 118). Nach einer Beschichtung der inneren Oberflächen des Ziegels F konnte der Emissionskoeffizient der

Scherbenoberfläche von $\varepsilon = 0,973$ in unbeschichtetem Zustand auf $\varepsilon = 0,494$ vermindert werden.

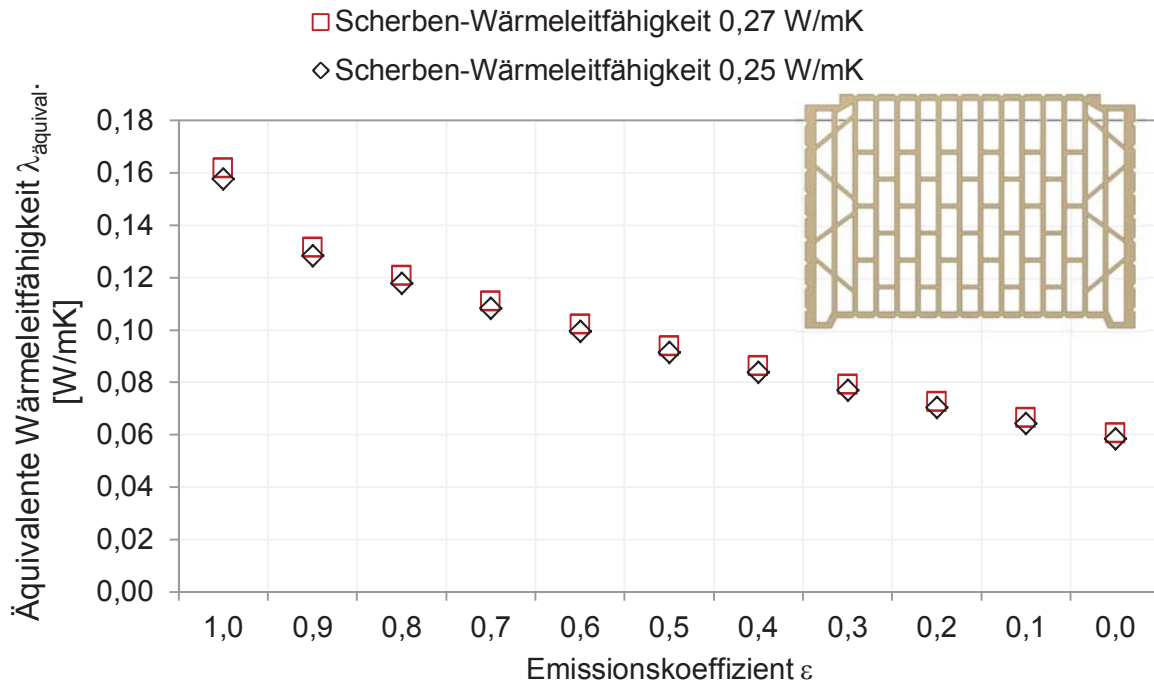


Bild 118: Minderung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit des Ziegels F bei schrittweiser Absenkung des Emissionskoeffizienten der keramischen Scherbenoberfläche (SOLIDO)

Um einen Vergleich zwischen Beschichtung und Verfüllung der Löcher in Ziegel F zu ermöglichen, wurden weitere FE-Berechnungen durchgeführt. Dabei wurde eine Beschichtung mit einem Emissionskoeffizienten von $\varepsilon = 0,494$ (Tabelle 6) mit einer Verfüllung aus Neopor, Mineralwollegranulat und Perlite verglichen. Die Ergebnisse sind in Bild 119 graphisch dargestellt.

Der unverfüllte und unbeschichtete Ziegel F zeigt bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10,\text{tr.}} = 0,27$ W/mK eine äquivalente Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,129$ W/mK. Mit einer Verfüllung der Hohlräume mit Neopor oder Mineralwollegranulat kann eine größere Absenkung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit erreicht werden, als durch die Beschichtung. Bei einer Verfüllung der Hohlräume mit Neopor und einer angenommenen Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10,\text{tr.}} = 0,27$ W/mK resultiert eine Absenkung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit auf $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,068$ W/mK und auf $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,066$ W/mK bei einer angenommenen Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10,\text{tr.}} = 0,25$ W/mK. Im Falle der Verwendung von Mineralwollegranulat wird bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10,\text{tr.}} = 0,27$ W/mK eine Absenkung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit auf $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,077$ W/mK erzielt. Bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10,\text{tr.}} = 0,25$ W/mK wird eine äquivalente Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,072$ W/mK erreicht.

Die Verfüllung mit Perlite führt zu Absenkungen auf $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,095$ W/mK bei einer

angenommenen Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,27 \text{ W/mK}$ und auf $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,092 \text{ W/mK}$ bei $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,25 \text{ W/mK}$. Dies entspricht einer Absenkung von 26,4 % bzw. 27,0 % im Vergleich mit der Nullprobe.

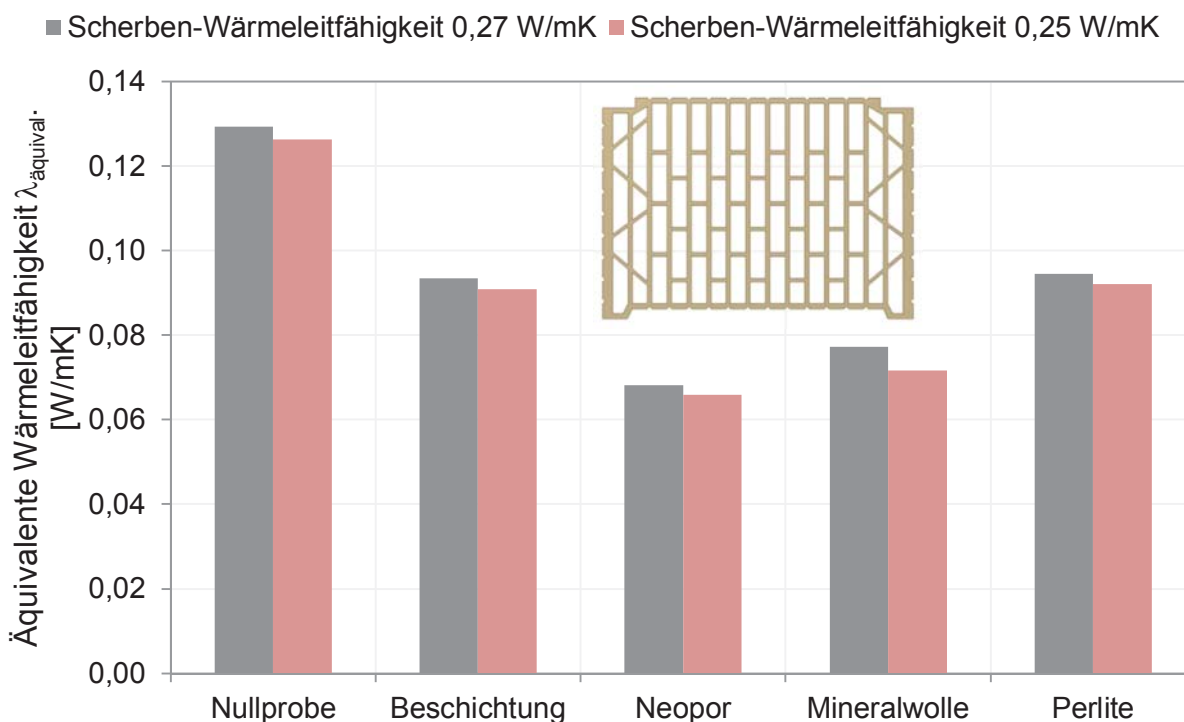


Bild 119: Finite Elemente Berechnung (SOLIDO) der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit des Ziegels F: Vergleich der Beschichtung mit einer Verfüllung aus Neopor, Mineralwollegranulat und Perlite

Durch Beschichtung der inneren Oberflächen ($\varepsilon = 0,494$) und Absenkung des Emissionskoeffizienten von $\varepsilon = 0,973$ auf $\varepsilon = 0,494$ ist eine Absenkung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit auf $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,093 \text{ W/mK}$ bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,27 \text{ W/mK}$ erreichbar. Dies entspricht einer Verminderung um 27,9 %. Wird eine Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,25 \text{ W/mK}$ angenommen, so berechnet sich eine äquivalente Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,091 \text{ W/mK}$. Aus der Untersuchung geht hervor, dass erst ab einem Emissionskoeffizienten von $\varepsilon = 0,1$ eine größere Absenkung durch Beschichtung im Vergleich zu einer Verfüllung mit Neopor erzielbar ist. Im Vergleich zu einer Verfüllung mit Mineralwollegranulat werden durch eine Beschichtung mit einem Emissionskoeffizienten von $\varepsilon = 0,1$ vergleichbare Ergebnisse erhalten. Ähnliche Ergebnisse berechnen sich für eine Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,25 \text{ W/mK}$.

Weiterhin wurde jeweils eine Wärmebilanz für Ziegel F mit den Programmen SOLIDO und ANSYS CFX aufgestellt. Beide Programme berechnen für Ziegel F einen Strahlungsanteil zwischen 55 % bis 57 % am gesamten Wärmeübergang. Für den Anteil der Fluidleitung berechnen beide Programme verschiedene Anteile. Mit ANSYS CFX wird ein Anteil von 12,34 % des Fluids am Wärmeübergang und mit SOLIDO ein Anteil von 23,14 % berechnet. Dementsprechend unterscheiden sich auch die von beiden Programmen berechneten

Anteile der Leitung im Festkörper, nämlich 20 % bei SOLIDO und 33 % bei ANSYS CFX. Aufgrund der relativ niedrigen Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, tr.} = 0,27 \text{ W/mK}$ fällt der Anteil der Festkörperleitung hier relativ gering aus. Der von ANSYS CFX berechnete Leitungsanteil erscheint hier plausibler, da sich bei ähnlichen Lochbildern auch Leitungsanteile von etwa 30 % gezeigt haben. Nur bei SOLIDO wird ein zusätzlicher Beitrag von 0,31 % für die Konvektion berechnet.

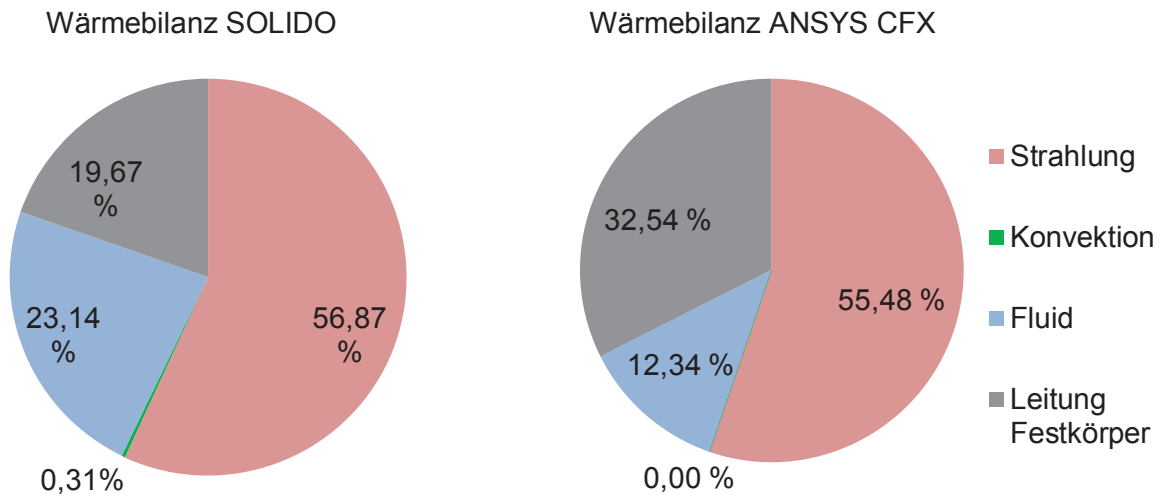


Bild 120: Wärmebilanz des Ziegels F bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, tr.} = 0,27 \text{ W/mK}$ (Messwert aus Tabelle 5). Berechnet mit SOLIDO (links) und mit ANSYS CFX (rechts)

5.3.7. FE-Berechnungen für Ziegel G

Der Emissionskoeffizient der Scherbenoberfläche wird bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, tr.} = 0,46 \text{ W/mK}$ für Ziegel G von $\epsilon = 1,0$ schrittweise auf $\epsilon = 0,0$ vermindert (Bild 121).

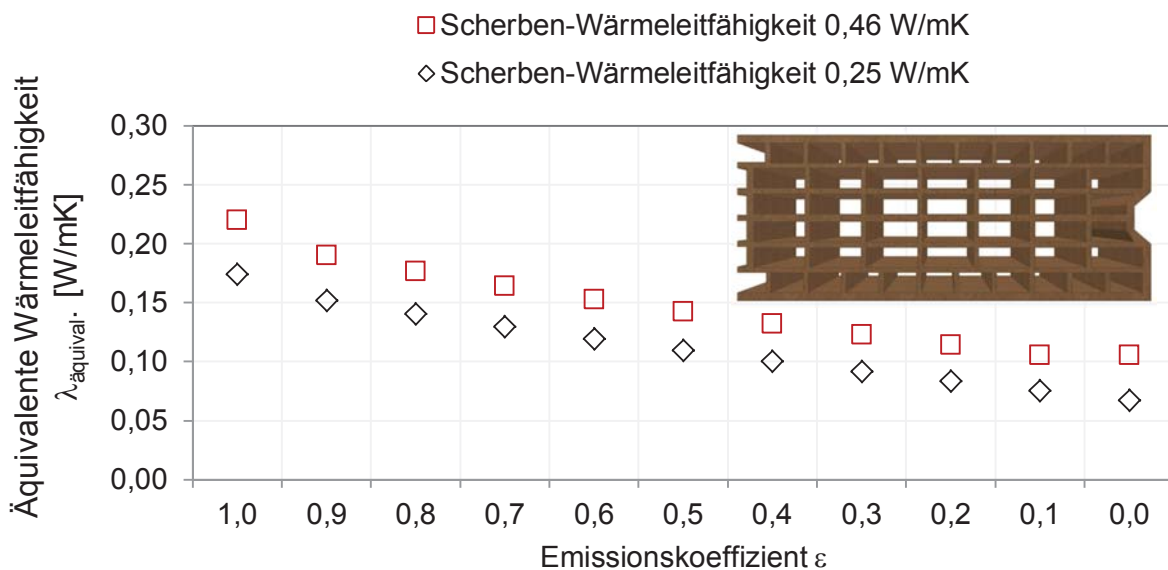


Bild 121: Verminderung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit des Ziegels G bei schrittweiser Absenkung des Emissionskoeffizienten der keramischen Scherbenoberfläche (SOLIDO)

Es resultiert (Messwert aus Tabelle 5) eine theoretische Absenkung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,220 \text{ W/mK}$ auf $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,106 \text{ W/mK}$, entsprechend einer Absenkung um 51,8 %.

Bei Annahme einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10,\text{tr.}} = 0,25 \text{ W/mK}$ berechnet sich eine Abnahme der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,174 \text{ W/mK}$ auf $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,067 \text{ W/mK}$. Dies entspricht einer Absenkung um 61,5 %.

Um die Wirksamkeit der Beschichtung mit der Verfüllung zu vergleichen, wurden entsprechende FE-Berechnungen durchgeführt (Bild 122). Die Beschichtung des inneren Lochmusters mit „Goldbronzepulver Luminor 2210“ ($\epsilon = 0,475$, Tabelle 6) führt bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10,\text{tr.}} = 0,46 \text{ W/mK}$ zu einer äquivalenten Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,140 \text{ W/mK}$ und damit zu einer Absenkung um 29,3 %. Durch Befüllung der Hohlräume mit Neopor, Mineralwollegrenulat und Perlite wird in allen drei Fällen eine niedrigere äquivalente Wärmeleitfähigkeit erzielt, als durch die Beschichtung. Bei Absenkung der Scherben-Wärmeleitfähigkeit auf $\lambda_{10,\text{tr.}} = 0,25 \text{ W/mK}$ mindert sich die äquivalente Wärmeleitfähigkeit auf $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,107 \text{ W/mK}$ (Bild 122). Bei einer Verfüllung der Hohlräume mit Neopor wird bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10,\text{tr.}} = 0,46 \text{ W/mK}$ eine Absenkung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit auf $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,103 \text{ W/mK}$ bewirkt. Wird die Scherben-Wärmeleitfähigkeit auf $\lambda_{10,\text{tr.}} = 0,25 \text{ W/mK}$ abgesenkt, so fällt die äquivalente Wärmeleitfähigkeit auf $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,072 \text{ W/mK}$ ab. Werden die Hohlräume mit Mineralwollegrenulat befüllt, so resultiert eine äquivalente Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,112 \text{ W/mK}$, wenn die Scherben-Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{10,\text{tr.}} = 0,46 \text{ W/mK}$ beträgt.

■ Scherben-Wärmeleitfähigkeit 0,46 W/mK ■ Scherben-Wärmeleitfähigkeit 0,25 W/mK

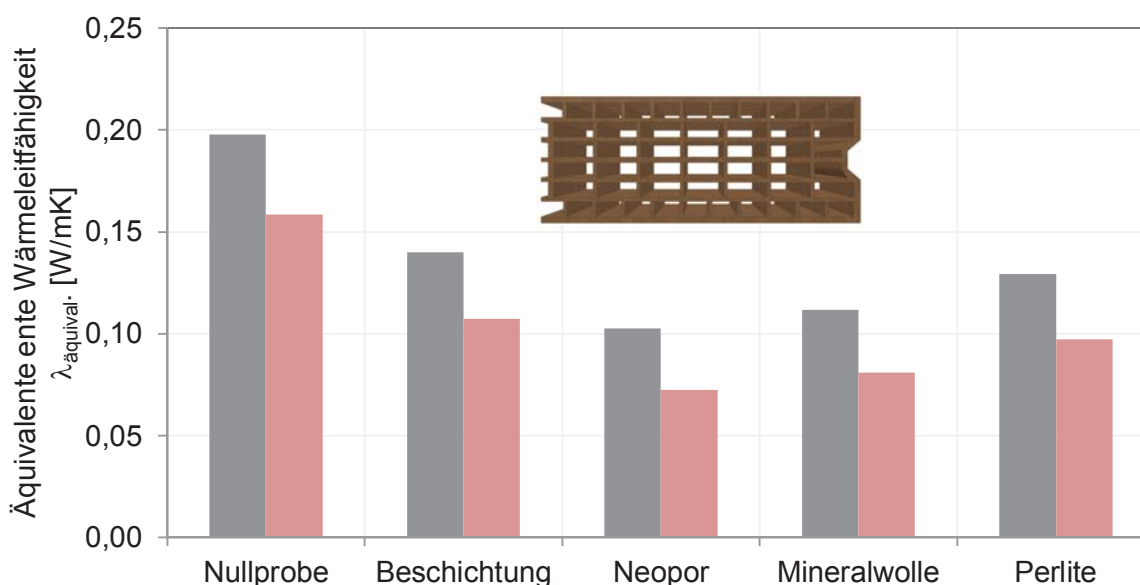


Bild 122: FE-Berechnung (SOLIDO) der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit des Ziegels G. Vergleich der Beschichtung mit einer Verfüllung aus Neopor, Mineralwollegrenulat und Perlite

Im Falle des Ziegels G ist eine Befüllung der Löcher mit den genannten Füllstoffen stets besser, als eine Beschichtung mit einem Emissionskoeffizienten von $\epsilon = 0,475$. Dieser Effekt lässt sich durch das Ziegel-Lochmuster und den damit vorhandenen Konvektionsanteil zwischen 5,49 % und 7,62 % (je nach FE-Berechnungsverfahren) erklären (Bild 123).

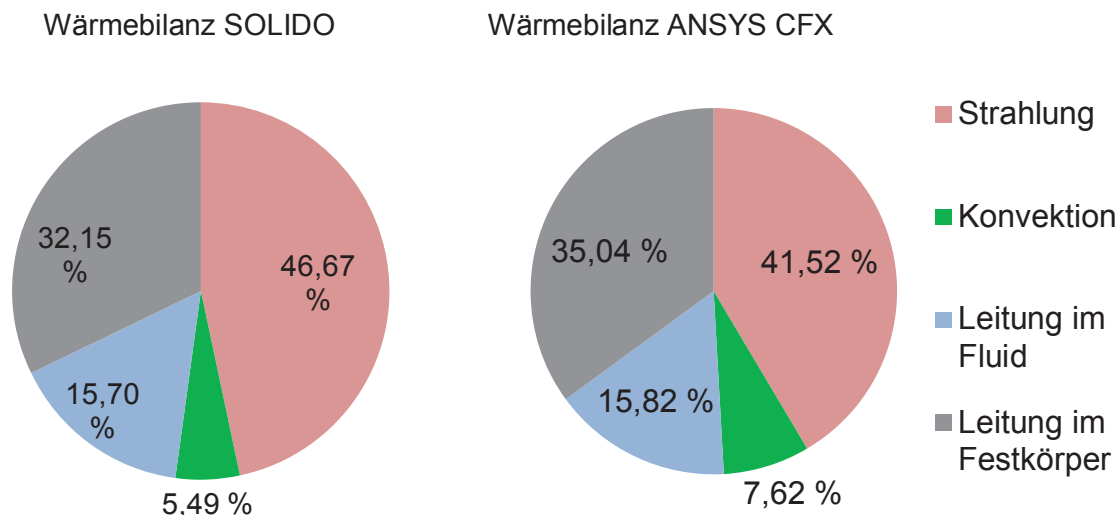


Bild 123: Wärmebilanzen des Ziegels G bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10,tr.} = 0,46 \text{ W/mK}$ (Messwert aus Tabelle 5). Berechnung mit SOLIDO (links) und mit ANSYS CFX (rechts)

Der Vergleich der Wärmebilanzen des Ziegels G, die mittels der Programme ANSYS CFX und SOLIDO berechnet wurden, zeigt eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse beider Berechnungsmethoden. Mit SOLIDO ergibt sich ein Strahlungsanteil von 47 %, während mit ANSYS CFX ein Strahlungsanteil von 42 % berechnet wird. Für den Konvektionsanteil am Wärmübergang wurde mit SOLIDO ein Anteil von 5 % und mit ANSYS CFX ein Wert von 8 % berechnet. Der Konvektionsanteil des Ziegels G ist damit vergleichbar dem Konvektionsanteil des Ziegels C. Der Konvektionsanteil kann durch eine Beschichtung der Innenseiten nicht gemindert werden, wohl aber durch eine Verfüllung mit Dämmstoffen (Bild 123).

Aus den durchgeführten FE-Berechnungen geht hervor, dass eine Wärmebilanz geeignet ist, das wärmetechnische Verbesserungspotential der Ziegel bei Beschichtung und bei Verfüllung der Hohlräume aufzuzeigen. Anhand einer Wärmebilanz und vor allem anhand des Konvektionsanteils lässt sich beurteilen, welches Lochbild für eine Verfüllung und welches Lochbild für eine Beschichtung besser geeignet ist. Allgemein kann abgeleitet werden, dass bei Vorhandensein eines Konvektionsanteils im Lochbild stets die Verfüllung einer Beschichtung vorzuziehen ist. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass der Wärmeübergang in modernen Hochlochziegeln mit filigranen Stegen zu je einem Drittel über Strahlung, Leitung im (ruhenden Fluid) und Konvektion erfolgt. Der Wärmeübergang durch Konvektion spielt bei modernen, filigranen Lochbildern eine untergeordnete Rolle. Das größte Verbesserungspotential liegt somit in der Absenkung des Wärmestrahlungs-

übergangs und in der Verminderung des Leitungsanteils durch Reduktion der Scherben-Wärmeleitfähigkeit. Die Wärmeleitfähigkeit ruhender Luft kann mit den in der Ziegelindustrie üblichen Verfahren nicht vermindert werden.

5.4. Einfluss der Steganordnung auf den Wärmeübergang

Durch die Entwicklung immer filigraner Lochbildgeometrien ist es der Ziegelindustrie während der letzten 20 Jahre gelungen, die Wärmeübergangswiderstände für Leitung und Konvektion zu erhöhen. Dadurch wurde in den vergangenen Jahren eine bedeutende Verbesserung der Wärmedämmung von Hochlochziegeln von $\lambda_{\text{äquiv.}} = 0,14 \text{ W/mK}$ auf $\lambda_{\text{äquiv.}} = 0,07 \text{ W/mK}$ (bisher nur mit Verfüllung der Hohlräume durch Dämmstoffen) erreicht und die wärmedämmende Wirkung von Ziegeln nahezu verdoppelt. Ein Grund hierfür ist die Wärmewegverlängerung durch ein teilweise sehr komplexes Lochbild aus filigranen Stegen in Kombination mit vielen Lochreihen. Die Wärmeübertragung durch Strahlung und Konvektion konnten durch eine zunehmende Anzahl an Lochreihen deutlich vermindert werden. Dies führte zu Lochbildern mit Stegstärken von z.T. nur 3 mm. Eine weitere Verbesserung der Wärmedämmung durch noch filigranere Stegstärken stößt bei der Ziegelherstellung an technische Grenzen.

In weiteren FE-Berechnungen wird geprüft, ob in Verbindung mit der neu entwickelten Beschichtung eine Minderung der Lochreihenanzahl in Wärmestromrichtung des Ziegels erfolgen kann.

Um Aussagen über den Einfluss der Anzahl der Stege parallel und senkrecht zur Wärmestromrichtung zu gewinnen, wurden wärmetechnische Simulationen mit dem FE-Programm SOLIDO durchgeführt. Dazu wurden 40 einfache Modell-Geometrien mit einem Lochanteil von jeweils 60 % in Anlehnung an die von den Projektpartnern zur Verfügung gestellten Wärmedämmziegel berechnet. Die theoretischen Modelle wurden mit einer steigenden Anzahl an Hohlräumen parallel und senkrecht zur Wärmestromrichtung ausgerüstet, während gleichzeitig der Lochanteil von 60 % in jedem Modell beibehalten wurde. Die Berechnung der Modelle erfolgte unter Annahme der Scherben-Wärmeleitfähigkeiten von $\lambda_{10,\text{tr.}} = 0,20 \text{ W/mK}$, $\lambda_{10,\text{tr.}} = 0,25 \text{ W/mK}$, $\lambda_{10,\text{tr.}} = 0,30 \text{ W/mK}$ und $\lambda_{10,\text{tr.}} = 0,35 \text{ W/mK}$. Berechnet wurde jeweils die äquivalente Wärmeleitfähigkeit als Summe der Wärmeübergänge aus Strahlung, Leitung und Konvektion, wobei nochmals in bewegte Fluid-Konvektion und ruhende Fluid-Leitung unterteilt wurde. Dabei zeigte sich ein eindeutiger Einfluss der Anordnung der Hohlräume im Ziegel auf die äquivalente Wärmeleitfähigkeit und deren Zusammensetzung aus den einzelnen Wärmeübergangsarten (Bild 124)

5.4.1. Einfluss der Anzahl von Hohlräumen in Wärmestromrichtung

Zunächst werden die Auswirkungen einer zunehmenden Anzahl an Hohlräumen in Wärmestromrichtung (hier auch als Längsstege bezeichnet) bei gleichbleibendem Lochanteil

(60 Vol.-%) untersucht. Dazu werden die vorhandenen Stegdicken bei jedem Modell weiter unterteilt, wobei die Summe der Dicken der Längsstege beibehalten wird.

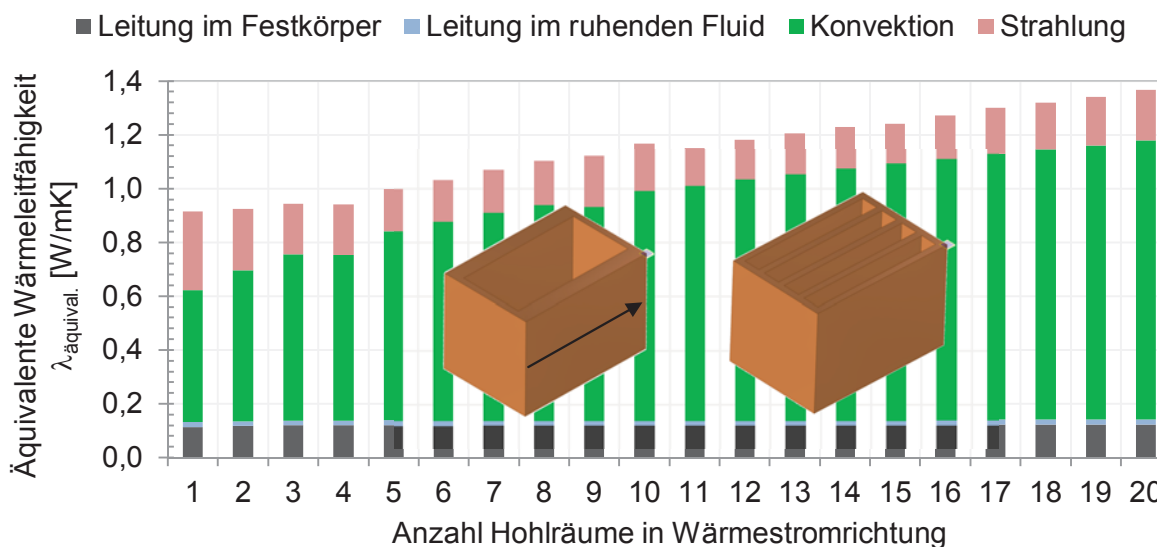


Bild 124: Äquivalente Wärmeleitfähigkeiten der Modelle mit 1 bis 20 Hohlräumen in Wärmestromrichtung bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, tr.} = 0,35 \text{ W/mK}$. Der Pfeil im Modell markiert die Richtung des Wärmestroms

Bei Annahme einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, tr.} = 0,35 \text{ W/mK}$ resultiert, aus einer steigenden Anzahl an Hohlräumen in Wärmestromrichtung durch weitere Unterteilung der Längsstege bei gleichbleibendem Lochanteil im Modell, eine Erhöhung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit. Diese steigt von $\lambda_{\text{äquiv.}} = 0,916 \text{ W/mK}$ bei nur einem Hohlraum auf $\lambda_{\text{äquiv.}} = 1,366 \text{ W/mK}$ bei 20 Hohlräumen in Wärmestromrichtung an. Die Konvektion stellt dabei den mit Abstand größten Anteil am Wärmeübergang dar. Der Konvektionsanteil am Wärmeübergang steigt von 53,5 % bei nur einem Hohlraum auf 76,1 % bei 20 Hohlräumen in Wärmestromrichtung an. Der Anteil der Leitung im Festkörper bewegt sich zwischen 12,2 % bei einem Hohlraum und 9,0 % bei 20 Hohlräumen. Den geringsten Einfluss auf den gesamten Wärmeübergang übt die Fluidleitung durch Stoßprozesse im ruhenden Fluid aus. Der Anteil der Leitung im ruhenden Fluid sinkt von 2,2 % bei einem Hohlraum auf 1,3 % bei 20 Hohlräumen. Der Anteil der Wärmestrahlung sinkt von 32,1 % bei einem Hohlraum in Wärmestromrichtung auf 11,9 % bei 15 Hohlräumen in Wärmestromrichtung. Bei weiterer Erhöhung wird ein leichter Anstieg des Strahlungsanteils bis auf 13,6 % bei 20 Hohlräumen in Wärmestromrichtung festgestellt (Bild 124).

Für Scherben-Wärmeleitfähigkeiten von $\lambda_{10, tr.} = 0,30 \text{ W/mK}$ und $\lambda_{10, tr.} = 0,25 \text{ W/mK}$ werden ähnliche Ergebnisse erhalten.

Aus der Untersuchung wird ersichtlich, dass eine weitere Steigerung der Steganzahl über 20 Längsstege hinaus, eine Erhöhung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit trotz gleichbleibenden Steganteils bewirkt. Dieser Anstieg der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit resultiert aus einer Zunahme des Konvektionsanteils im Modell. Durch den verhältnismäßig

geringen Anteil der Wärmestrahlung kann durch eine Beschichtung der inneren Ziegeloberflächen der Wärmeübergang im gesamten Modell nur unwesentlich gemindert werden. Modelle dieser Art sind somit ungeeignet für eine Beschichtung.

Als Ergebnis der FE-Berechnungen wird eine starke Abhängigkeit der Anteile von Strahlung, Leitung und Konvektion von der Anzahl der Querstege vermutet. Bei weiteren Modellziegeln, welche ausschließlich Stege senkrecht zur Wärmestromrichtung aufweisen, wurden ebenfalls FE-Berechnungen durchgeführt. Dabei wurde festgestellt, dass ein großer Teil des Wärmeübergangs durch Konvektion erfolgt. Ein weitaus geringerer Anteil des Wärmeübergangs erfolgt durch Wärmestrahlung, gefolgt von Leitung im Festkörper. Den geringsten Anteil am Wärmeübergang stellt die Wärmeleitung im ruhenden Fluid dar.

Als Summe der Wärmeübergänge durch Strahlung, Leitung und Konvektion ergibt sich für alle Modelle mit Stegen in Wärmestromrichtung (Längsstege) eine höhere äquivalente Wärmeleitfähigkeit als bei einem Vollstein mit denselben Scherben-Wärmeleitfähigkeiten erreicht worden wäre, trotz eines Lochanteils von 60 Vol.-%. Eine Verminderung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit von Ziegeln wird auf diese Art nicht erreicht. Dennoch sind Längsstege in Hochlochziegeln wichtig für die Festigkeit und Stabilisierung des Ziegels und der daraus hergestellten Wände. Die Auswirkungen der Längsstege auf den Schallschutz werden in Abschnitt 6.3 untersucht.

5.4.2. Einfluss der Anzahl von Hohlräumen senkrecht zur Wärmestromrichtung

Weitere FE-Berechnungen wurden zum Einfluss der Querstege (Stege senkrecht zur Wärmestromrichtung) auf den Wärmeübergang in Ziegeln durchgeführt. Dabei wurden die Modelle mit einer steigenden Anzahl an Lufthohlräumen senkrecht zur Wärmestromrichtung ausgerüstet, während der Lochanteil von 60 % im Modell beibehalten wurde. Die Berechnung erfolgte unter Annahme der Scherben-Wärmeleitfähigkeiten $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,20 \text{ W/mK}$, $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,25 \text{ W/mK}$, $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,30 \text{ W/mK}$ und $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,35 \text{ W/mK}$. Berechnet wurde die jeweilige äquivalente Wärmeleitfähigkeit als Summe der Wärmeübergänge aus Strahlung, Leitung und Konvektion. Aus der Berechnung geht hervor, dass die Anzahl der Stege senkrecht zur Wärmestromrichtung einen großen Einfluss auf die äquivalente Wärmeleitfähigkeit ausübt (Bild 125).

Bei Annahme einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,35 \text{ W/mK}$ resultiert bei einer steigenden Anzahl an Hohlräumen senkrecht zur Wärmestromrichtung und gleichbleibendem Lochanteil von 60 Vol.-% eine starke Verminderung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit.

Die äquivalente Wärmeleitfähigkeit der Modelle sinkt von $\lambda_{\text{äquiv.}} = 0,666 \text{ W/mK}$ bei einem Hohlraum senkrecht zur Wärmestromrichtung auf $\lambda_{\text{äquiv.}} = 0,144 \text{ W/mK}$ bei 20 Hohlräumen.

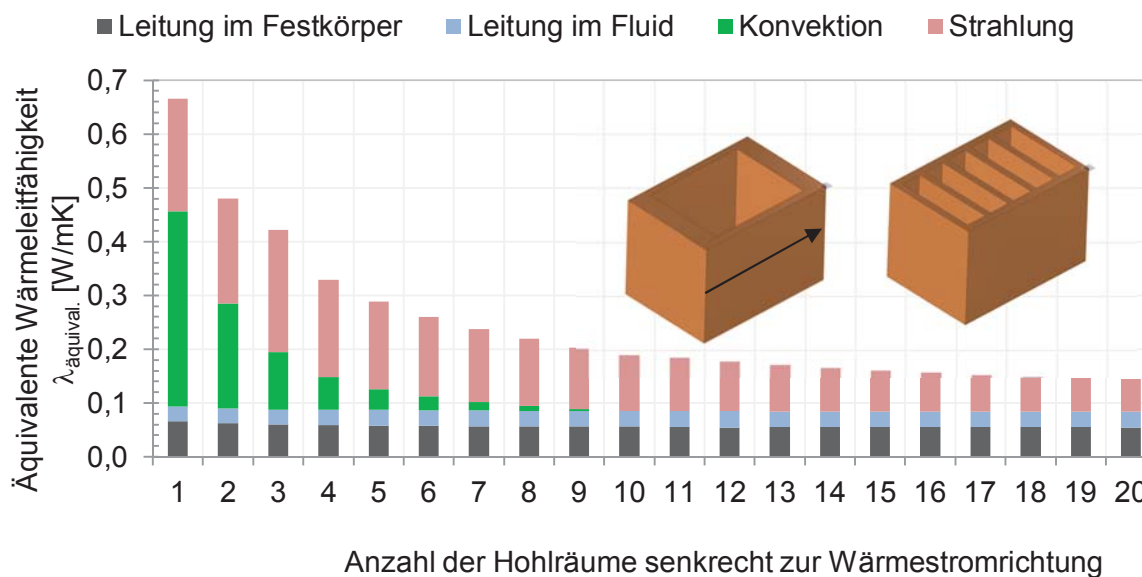


Bild 125: Äquivalente Wärmeleitfähigkeiten der Modelle mit 1 bis 20 Hohlräumen senkrecht zur Wärmestromrichtung bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, tr.} = 0,35 \text{ W/mK}$. Der Pfeil im Modell markiert die Richtung des Wärmestroms

Der Anteil der Konvektion am Wärmeübergang sinkt daher von 54,5 % bei einem Hohlraum auf 0 % bereits bei 10 Hohlräumen senkrecht zur Wärmestromrichtung. Während die Konvektion bei einem Hohlraum den größten Anteil am gesamten Wärmeübergang bewirkt, ist diese bereits bei 10 Hohlräumen nicht mehr vorhanden. Der Anteil der Wärmeleitung im Festkörper berechnet sich mit 9,9 % bei einem Hohlraum und 37,9 % bei 20 Hohlräumen. Der Einfluss der Wärmeleitung im Ziegel nimmt somit mit steigender Lochreihenanzahl zu. Der Anteil der Fluid-Leitung im ruhenden Fluid steigt von 4,1 % bei einem Hohlraum auf 20,4 % bei 20 Hohlräumen. Der Anteil der Wärmestrahlung steigt zunächst von 31,5 % bei einem Hohlraum auf 55,5 % bei 10 Hohlräumen in Wärmestromrichtung. Wird eine Anzahl von 10 Hohlräumen überschritten, so vermindert sich der Strahlungsanteil wieder bis auf 41,9 % bei 20 Hohlräumen senkrecht zur Wärmestromrichtung.

Die Ergebnisse der FE-Berechnungen (SOLIDO) bei Annahme einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, tr.} = 0,30 \text{ W/mK}$ und $\lambda_{10, tr.} = 0,25 \text{ W/mK}$ zeigen dieselben Tendenzen.

Aus den durchgeführten FE-Berechnungen wird ersichtlich, dass nur durch eine steigende Anzahl von Stegen senkrecht zur Wärmestromrichtung die äquivalente Wärmeleitfähigkeit bei gleichem Lochanteil vermindert wird. Durch das Einbringen von 20 Hohlräumen in Wärmestromrichtung bei gleichbleibendem Lochanteil wurde eine äquivalente Wärmeleitfähigkeit für den Ziegel erreicht, welche annähernd der halben Wärmeleitfähigkeit des Vollmaterials entspricht. Somit kann durch das Einbringen von Querstegen und zusätzliche Unterteilung der Hohlräume senkrecht zur Wärmestromrichtung bei gleich bleibendem Lochanteil eine signifikante Verbesserung der Dämmwirkung erzielt werden. Mit steigender Anzahl an Lochreihen nimmt der Einfluss auf die Minderung der äquivalenten

Wärmeleitfähigkeit ab.

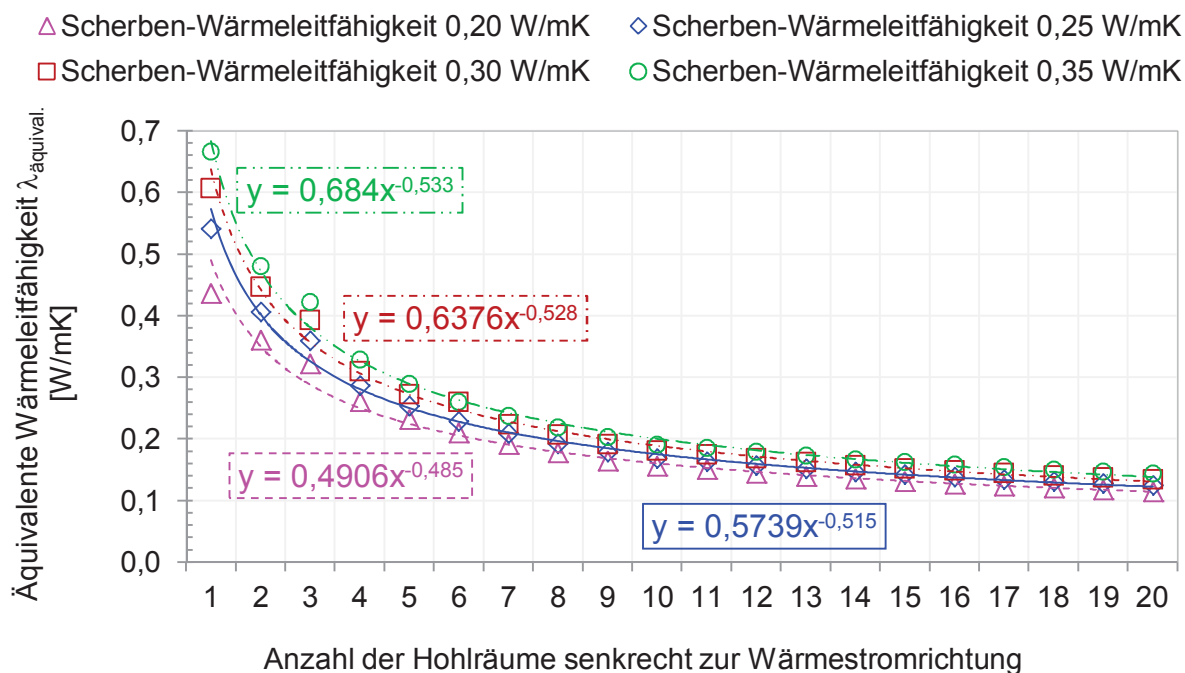


Bild 126: Äquivalente Wärmeleitfähigkeiten von Modellziegeln in Abhängigkeit von der Anzahl der Hohlräume senkrecht zur Wärmestromrichtung/Lochreihen bei einem Lochanteil von 60 Vol.-% und Scherben-Wärmeleitfähigkeiten von $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,20$ W/mK bis $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,35$ W/mK (FE-Berechnung mit SOLIDO)

Aus der durchgeführten FE-Berechnung resultiert bei allen angenommenen Scherben-Wärmeleitfähigkeiten eine Abnahme der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit bei zunehmender Anzahl an Hohlräumen senkrecht zur Wärmestromrichtung (Bild 126).

Die dargestellten Zusammenhänge gelten in erster Linie für einen Lochanteil von 60 Vol.-%, können aber auch in erster Näherung für davon abweichende Lochanteile Verwendung finden.

In Tabelle 25 werden die nach den Ansätzen aus Bild 126 berechneten sowie im Wärmeprüfstand gemessenen äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten der in dieser Arbeit untersuchten Hochlochziegel mit Angabe des Lochanteils dargestellt.

Beim Vergleich der berechneten Werte für die Hochlochziegel mit den nach Bild 126 abgeschätzten äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten (Abschätzung für 60 Vol.-% Lochanteil) ergibt sich für den Ziegel A eine prozentuale Abweichung zur gemessenen äquivalenten Wärmeleitfähigkeit von 8,6 %. Für den Ziegel B beträgt der Abschätzungsfehler 6,6 %. Eine größere Differenz ergibt sich für Ziegel C mit 15,4 %, wengleich der abgeschätzte Wert den mittels FE-Berechnung erhaltenen Ergebnissen sehr nahe kommt. Der Abschätzungsfehler für Ziegel D beträgt 10,5 %.

Tabelle 25: Vergleich der Ergebnisse bei Abschätzung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von der Lochreihenanzahl und der Scherbenwärmeleitfähigkeit, die Abschätzung wurde exemplarisch für die in dieser Arbeit untersuchten Hochlochziegel durchgeführt und **gilt für einen Lochanteil von 60 Vol.-%**

Lochbild	Äquival. Wärmeleitfähigkeiten unbeschichteter Ziegel $\lambda_{\text{äquival.}}$ [W/mK]		Lochanteil [Vol.-%]	Anzahl Lochreihen [-]	Scherben- wärmeleit- fähigkeit [W/mK]
	Messung Halbstein- verfahren	Berechnung* nach Formeln in Bild 126			
Ziegel A	0,128	0,117	56,6	25	0,366
Ziegel B	0,120	0,128	56,0	23	0,332
Ziegel C	0,214	0,247	59,5	6	0,293
Ziegel D	0,143	0,128	52,1	23	0,350
Ziegel E	0,097	0,117	51,4	26	0,332
Ziegel F	0,121	0,142	64,9	15	0,270

*) Berechnung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten von Hochlochziegeln nach den Zusammenhängen aus Bild 126 in Abhängigkeit von der Lochreihenanzahl und der Scherben-Wärmeleitfähigkeit

Hierbei muss in Betracht gezogen werden, dass dieser Ziegel auch nur über einen Lochanteil von 52,1 %, anstatt 60 Vol.-%, verfügt. Auch für den Ziegel E ergibt sich mit 20,6 % ein ähnlicher Abschätzungsfehler, da dieser Ziegel ebenfalls nur über einen Lochanteil von 51,4 Vol.-% verfügt und zugleich eine Dreieckslochung vorliegt. Für Dreieckslochung gilt die Annahme paralleler Lochanordnungen und damit des angenommenen Sichtfaktors (angenommen Sichtfaktor 1 bei parallelen Oberflächen) nicht. Der Strahlungsübergang ist bei diesem Lochbild durch die Steganordnung (Dreieckslochung) bereits vermindert. Der Ziegel Coriso 07 verfügt über einen etwas höheren Lochanteil von 64,9 Vol.-%, wodurch ein Fehler bei der Abschätzung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit von 17,4 % erklärbar ist. Dennoch konnte gezeigt werden, dass sich der in Bild 126 dargelegte Zusammenhang für eine Abschätzung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit eines Ziegellochbildes eignet. Weiterhin kann aus dieser Arbeit die nötige Scherben-Wärmeleitfähigkeit und Lochreihenanzahl, sowie deren Kombination für eine vorgegebene äquivalente Wärmeleitfähigkeit abgeschätzt werden. Auf diese Art kann beispielsweise berechnet werden, dass für ein Lochbild mit einer äquivalenten Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,095$ W/mK bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10,\text{tr.}} = 0,30$ W/mK und einem Lochanteil von 60 Vol.-% insgesamt 37 Lochreihen benötigt werden. Kann die Scherben-Wärmeleitfähigkeit auf $\lambda_{10,\text{tr.}} = 0,25$ W/mK vermindert werden, so sinkt die Anzahl der benötigten Lochreihen auf 33. Nach einer Verminderung der Scherben-Wärmeleitfähigkeit auf $\lambda_{10,\text{tr.}} = 0,20$ W/mK werden für dieselbe äquivalente Wärmeleitfähigkeit nur noch 30 Lochreihen benötigt. Eine hohe Lochreihenanzahl resultiert aufgrund des hohen Lochanteils bei sehr filigranen Stegen. Anstatt die Anzahl der Lochreihen weiter zu erhöhen, sollte entweder der Lochanteil über 60 % erhöht oder ein maximales Verkippen der sonst parallelen Stege, resultierend in einer Zick-Zack-Anordnung, in Erwägung gezogen werden.

Eine Alternative zu diesen bereits bekannten Möglichkeiten stellt die in dieser Arbeit entwickelte Beschichtung dar, wie im Folgenden gezeigt wird.

Bei allen angenommenen Scherben-Wärmeleitfähigkeiten zeigte der Strahlungsanteil im Bereich zwischen einem bis 10 Hohlräumen (10 Lochreihen) senkrecht zur Wärmestromrichtung stets Maximalwerte zwischen 50 - 55 % am gesamten Wärmeübergang. Gleichzeitig erfolgt bei mehr als 10 Lochreihen kein Wärmeübergang mehr durch Konvektion. Ein Lochbild mit einer Lochreihenanzahl von 10 Lochreihen und einem Lochanteil von 60 Vol.-% sollte demnach besonders geeignet für eine Beschichtung sein. Für eine entsprechende Untersuchung wurden Lochbilder mit 10 bzw. 12 Lochreihen in Anlehnung an die Ergebnisse der voran gegangenen Untersuchung gewählt. Durch weitere Modifikation dieser Lochbilder wurde versucht, den Strahlungsanteil noch weiter zu erhöhen, um die Wirkung einer Beschichtung auf den Wärmeübergang im Ziegel zu erhöhen und die Wärmedämmung zu verbessern.

Anschließend wurden neue Lochbilder teilweise mit durchgehenden Mittelstegen gestaltet, da zum Zeitpunkt der Untersuchung nicht bekannt war, wie sich diese auf den Schalldurchgang auswirken. Die erste Variation eines Lochbildes mit 12 Lochreihen parallel zur Wärmestromrichtung stellt das Lochbild mit der Bezeichnung 12 Q V 1 dar (Bild 127). Es wurde ein zusätzlicher durchgehender Mittelsteg eingebracht, wobei die Gesamtdicke der Längsstege und damit der Lochanteil beibehalten wurde. Im nächsten Schritt wird die Dicke der seitlichen Längsstege (Stege in Wärmestromrichtung) teilweise zum Mittelsteg dazu gegeben (12 Q V 3). Eine weitere Variation ohne durchgehenden Mittelsteg stellt das Lochbild mit der Bezeichnung 12 Q V 4 dar. Bei den Variationen 10 Q V 1, 10 Q V 3 und 10 Q V 5 wurde die Anzahl der Lochreihen auf 10 reduziert. Die Modelle zeigen keinen durchgehenden Mittelsteg. Die Putzflächen der Ziegel wurden zusätzlich stärker bemessen. Die FE-Berechnung der Lochbildgeometrien erfolgte mittels SOLIDO sowohl ohne ($\varepsilon = 0,93$), als auch mit einer angenommenen Beschichtung ($\varepsilon = 0,40$) zur Reduzierung des Wärmestrahlungsübergangs. Für die Berechnung wurde ein Emissionskoeffizient von $\varepsilon = 0,40$ angenommen, da dieser auf dem keramischen Scherben nach Beschichtung gut erreichbar ist. Dabei wurden Scherben-Wärmeleitfähigkeiten von $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,15 \text{ W/mK}$, $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,20 \text{ W/mK}$, $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,25 \text{ W/mK}$, $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,30 \text{ W/mK}$ und $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,35 \text{ W/mK}$ für die Berechnung angenommen. Die Randbedingungen für den Wärmeübergang auf der Innen- und Außenseite des Bauteiles wurden gemäß DIN EN ISO 10211 eingesetzt. Mit allen Modellen (12 Q V 1 – 10 Q V 5) konnten für eine Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,35 \text{ W/mK}$ bei Beschichtung (Annahme Emissionskoeffizient $\varepsilon = 0,40$) äquivalente Wärmeleitfähigkeiten von unter $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,120 \text{ W/mK}$ erreicht werden.

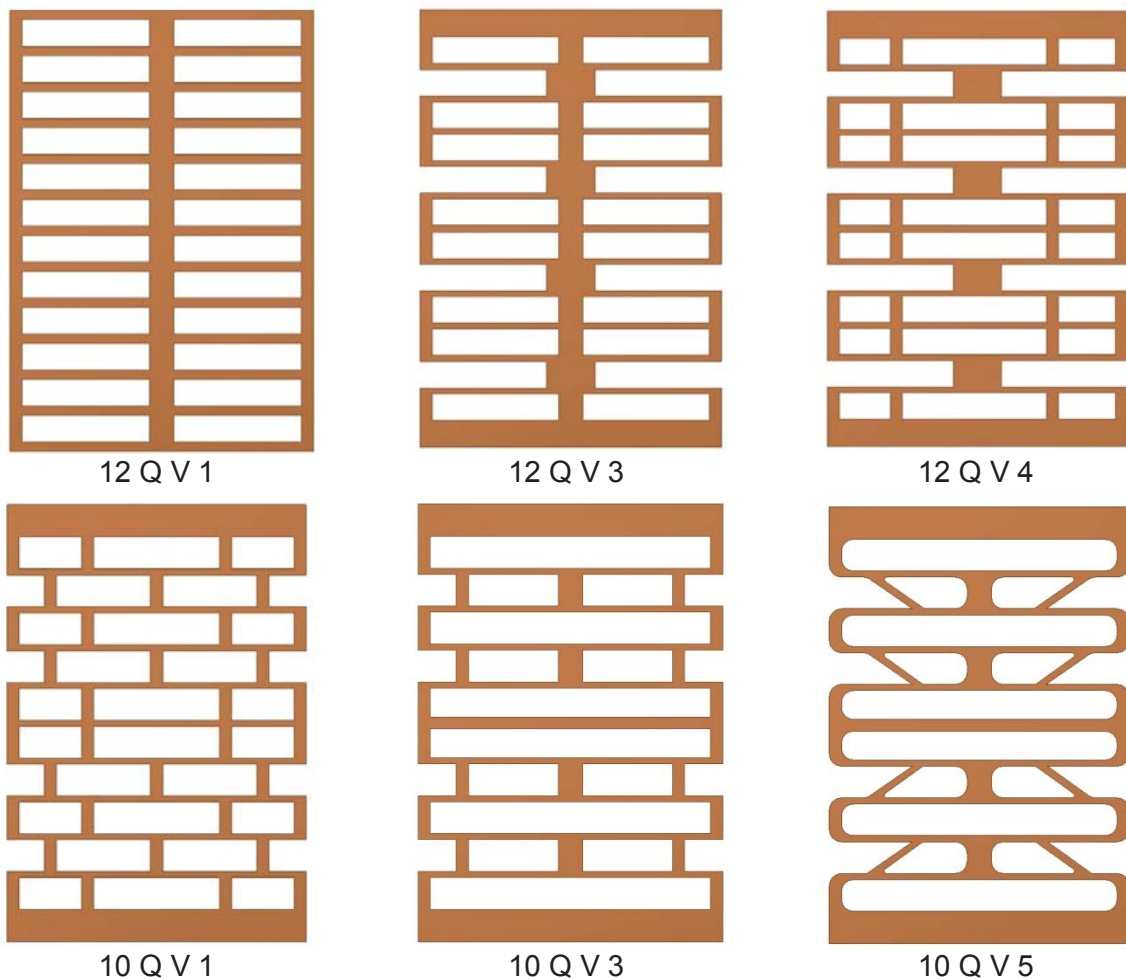


Bild 127: Neu entwickelte Lochbildgeometrien mit 10 – 12 Lochreihen, die sich durch einen hohen Wärmestrahlungsanteil auszeichnen. Der Lochanteil beträgt jeweils 60 %

Wurde die Scherben-Wärmeleitfähigkeiten auf $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,30 \text{ W/mK}$ reduziert, werden für alle Modelle mit Beschichtung ($\epsilon = 0,40$) äquivalente Wärmeleitfähigkeiten von unter $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,110 \text{ W/mK}$ berechnet.

Für die beschichteten Modelle mit der Bezeichnung 12 Q V 4 B, 10 Q V 3 B und 10 Q V 5 (B steht für Beschichtung) werden bei einer angenommenen Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,30 \text{ W/mK}$ äquivalente Wärmeleitfähigkeiten von unter $\lambda_{\text{äquival.}} = 0,095 \text{ W/mK}$ berechnet. Diese niedrigen äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten sind mit den bisher üblichen filigranen und unbeschichteten Lochbildern bei 12 bzw. 10 Lochreihen nicht möglich. Um derart niedrige äquivalente Wärmeleitfähigkeiten zu erzielen, wären selbst bei komplexen Lochbildern mit Dreieckslochung insgesamt 26 Lochreihen nötig (Tabelle 25). Die Ergebnisse ausgewählter FE-Berechnungen für die Lochbild-Variation 12 Q V 1 sind nachfolgend dargestellt (Tabelle 26).

Wie aus Tabelle 26 hervorgeht, kann mit Lochbild 12 Q V 1 im beschichteten Zustand die niedrigste äquivalente Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{\text{äquiv.}} = 0,079 \text{ W/mK}$ bei nur 12 Lochreihen erreicht werden.

Tabelle 26: Resultierende äquivalente Wärmeleitfähigkeiten des Lochbildes 12 Q V 1 mit 12 Lochreihen bei Scherben-Wärmeleitfähigkeiten von $\lambda_{10, \text{tr}} = 0,35$; $\lambda_{10, \text{tr}} = 0,30$; $\lambda_{10, \text{tr}} = 0,25$; $\lambda_{10, \text{tr}} = 0,20$ und $\lambda_{10, \text{tr}} = 0,15$ W/mK sowohl unbeschichtet ($\varepsilon = 0,93$), als auch mit Beschichtung (Annahme: $\varepsilon = 0,40$)

Variantenbezeichnung	Emissionskoeffizient ε	Scherben-Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{10, \text{tr}}$ W/mK	Berechnete äquivalente Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{\text{äquiv.}}$ W/mK
12 Q V 1	0,93	0,35	0,174
12 Q V 1	0,93	0,30	0,164
12 Q V 1	0,93	0,25	0,153
12 Q V 1	0,93	0,20	0,141
12 Q V 1	0,93	0,15	0,127
12 Q V 1 B*	0,40	0,35	0,115
12 Q V 1 B*	0,40	0,30	0,107
12 Q V 1 B*	0,40	0,25	0,098
12 Q V 1 B*	0,40	0,20	0,089
12 Q V 1 B*	0,40	0,15	0,079

B* steht für eine angenommene Beschichtung

Diese niedrige äquivalente Wärmeleitfähigkeit des neu konstruierten Lochbildes resultiert aus dem vergleichsweise hohen Strahlungsanteil am Wärmeübergang, der durch die neue Beschichtung um 70 % ($\varepsilon = 0,4$) vermindert werden kann.

Weitere FE-Untersuchungen werden exemplarisch am Lochbild 12 Q V 4 dargestellt (Tabelle 27).

Tabelle 27: Resultierende äquivalente Wärmeleitfähigkeiten des Lochbildes 12 Q V 4 mit 12 Lochreihen bei Variation der Scherben-Wärmeleitfähigkeiten $\lambda_{10, \text{tr}} = 0,35$; $\lambda_{10, \text{tr}} = 0,30$; $\lambda_{10, \text{tr}} = 0,25$; $\lambda_{10, \text{tr}} = 0,20$ und $\lambda_{10, \text{tr}} = 0,15$ W/mK sowohl unbeschichtet ($\varepsilon = 0,93$), als auch mit Beschichtung (Annahme: $\varepsilon = 0,40$)

Variantenbezeichnung	Emissionskoeffizient ε	Scherben-Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{10, \text{tr}}$ W/mK	Berechnete äquivalente Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{\text{äquiv.}}$ W/mK
12 Q V 4	0,93	0,35	0,167
12 Q V 4	0,93	0,30	0,159
12 Q V 4	0,93	0,25	0,150
12 Q V 4	0,93	0,20	0,139
12 Q V 4	0,93	0,15	0,127
12 Q V 4 B	0,40	0,35	0,098
12 Q V 4 B	0,40	0,30	0,094
12 Q V 4 B	0,40	0,25	0,089
12 Q V 4 B	0,40	0,20	0,083
12 Q V 4 B	0,40	0,15	0,078

Durch Variation des Lochbildes 12 Q V 1 mit einem Lochanteil von 60 % resultiert Lochbild 12 Q V 4 mit gleichem Lochanteil, aber leicht erhöhtem Strahlungsanteil am Wärmeübergang von 65 %. Mit diesem Lochbild in Verbindung mit einer Beschichtung ($\varepsilon = 0,4$) kann eine äquivalente Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{\text{äquiv.}} = 0,078$ W/mK bei 12 Lochreihen erhalten werden.

Bei Lochbild 12 Q V 4 wurden die Querstege verdickt und die Längsstege besonders angeordnet, um eine schallschutztechnische Entkopplung der Innen- und Aussenseite des Ziegels zu erreichen. Es wird vermutet, dass sich durch diese Entkopplung die schallschutztechnischen Eigenschaften verbessern.

In Tabelle 28 sind die berechneten äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten einer Lochbildvariante mit 10 Lochreihen dargestellt. Mit dem neu konstruierten Lochbild 10 Q V 3 können in unbeschichtetem Zustand äquivalente Wärmeleitfähigkeiten von $\lambda_{\text{äquiv.}} = 0,176$ W/mK (Scherben-Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{10,\text{tr.}} = 0,35$ W/mK) bis $\lambda_{\text{äquiv.}} = 0,136$ W/mK (Scherben-Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{10,\text{tr.}} = 0,15$ W/mK) erreicht werden. Werden die Innenseiten mit einem Emissionskoeffizienten von $\varepsilon = 0,4$ ausgerüstet, kann die äquivalente Wärmeleitfähigkeit auf $\lambda_{\text{äquiv.}} = 0,079$ W/mK vermindert werden (Scherben-Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{10,\text{tr.}} = 0,15$ W/mK). Kann der Emissionskoeffizient auf $\varepsilon = 0,10$ abgesenkt werden, z.B. durch die Einführung metallisierter Stecklinge in das Lochmuster, so sind äquivalente Wärmeleitfähigkeiten von sogar $\lambda_{\text{äquiv.}} = 0,052$ W/mK erreichbar (Tabelle 28).

Tabelle 28: Resultierende äquivalente Wärmeleitfähigkeiten des Lochbildes 10 Q V 3 mit 10 Lochreihen bei Scherben-Wärmeleitfähigkeiten $\lambda_{10,\text{tr.}} = 0,35$; $\lambda_{10,\text{tr.}} = 0,30$; $\lambda_{10,\text{tr.}} = 0,25$; $\lambda_{10,\text{tr.}} = 0,20$ und $\lambda_{10,\text{tr.}} = 0,15$ W/mK sowohl unbeschichtet ($\varepsilon = 0,93$), als auch mit Beschichtung (Annahme: $\varepsilon = 0,40$; $\varepsilon = 0,30$; $\varepsilon = 0,20$; $\varepsilon = 0,10$)

Variantenbezeichnung	Emissionskoeffizient ε	Scherben-Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{10,\text{tr.}}$ W/mK	Berechnete äquivalente Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{\text{äquiv.}}$ W/mK
10 Q V 3	0,93	0,35	0,176
10 Q V 3	0,93	0,30	0,169
10 Q V 3	0,93	0,25	0,160
10 Q V 3	0,93	0,20	0,149
10 Q V 3	0,93	0,15	0,136
10 Q V 3 B*	0,40	0,35	0,099
10 Q V 3 B*	0,40	0,30	0,095
10 Q V 3 B*	0,40	0,25	0,090
10 Q V 3 B*	0,40	0,20	0,085
10 Q V 3 B*	0,40	0,15	0,079
10 Q V 3 B*	0,30	0,15	0,069
10 Q V 3 B*	0,20	0,15	0,060
10 Q V 3 B*	0,10	0,15	0,052

B* steht für eine angenommene Beschichtung

In Tabelle 29 sind die berechneten äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten einer weiteren Lochbildvariante mit der Bezeichnung 10 Q V 5 und 10 Lochreihen dargestellt.

Werden die Innenseiten von Lochbild 10 Q V 5 B mit einem Emissionskoeffizienten von $\varepsilon = 0,4$ ausgerüstet, kann die äquivalente Wärmeleitfähigkeit auf $\lambda_{\text{äquiv.}} = 0,078 \text{ W/mK}$ vermindert werden ($\lambda_{10,\text{tr.}} = 0,15 \text{ W/mK}$). Kann der Emissionskoeffizient auf $\varepsilon = 0,10$ abgesenkt werden (durch metallisierte Stecklinge), so sind äquivalente Wärmeleitfähigkeiten von $\lambda_{\text{äquiv.}} = 0,052 \text{ W/mK}$ erreichbar. Emissionskoeffizienten von unter $\varepsilon = 0,40$ sind auf rauhen Oberflächen, wie dem Ziegel, nicht erreichbar. Wird die Reduktion des Wärmestrahlungsübergangs durch eine Beschichtung mit einem Emissionskoeffizienten unter $\varepsilon = 0,35$ angestrebt, so muss auf die Beschichtung von Stecklingen mit glatter Oberfläche verwiesen werden. Besonders niedrige Emissionskoeffizienten werden erreicht, wenn Stecklinge aus einem Material mit glatter Oberfläche mit geschlossenen, dünnen Metallschichten oder Metallfolien beschichtet werden. Nur mit geschlossenen Metallschichten können Emissionskoeffizienten im Bereich von $\varepsilon = 0,1$ erreicht werden. Die Metallschichten können durch Sputtern oder Folienbeschichtung auf ein Substrat aufgebracht werden, welches anschließend analog zu einer Verfüllung in den jeweiligen Ziegel eingebracht wird.

Tabelle 29: Resultierende äquivalente Wärmeleitfähigkeiten des Lochbildes 10 Q V 5 mit 10 Lochreihen bei Scherben-Wärmeleitfähigkeiten von $\lambda_{10,\text{tr.}} = 0,35$; $\lambda_{10,\text{tr.}} = 0,30$; $\lambda_{10,\text{tr.}} = 0,25$; $\lambda_{10,\text{tr.}} = 0,20$ und $\lambda_{10,\text{tr.}} = 0,15 \text{ W/mK}$ sowohl unbeschichtet ($\varepsilon = 0,93$), als auch mit Beschichtung (Annahme: $\varepsilon = 0,40$; $\varepsilon = 0,30$; $\varepsilon = 0,20$; $\varepsilon = 0,10$)

Variantenbezeichnung	Emissionskoeffizient ε	Scherben-Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{10,\text{tr.}}$ W/mK	Berechnete äquivalente Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{\text{äquiv.}}$ W/mK
10 Q V 5	0,93	0,35	0,175
10 Q V 5	0,93	0,30	0,167
10 Q V 5	0,93	0,25	0,159
10 Q V 5	0,93	0,20	0,148
10 Q V 5	0,93	0,15	0,134
10 Q V 5 B*	0,40	0,35	0,098
10 Q V 5 B*	0,40	0,30	0,094
10 Q V 5 B*	0,40	0,25	0,090
10 Q V 5 B*	0,40	0,20	0,084
10 Q V 5 B*	0,40	0,15	0,078
10 Q V 5 B*	0,30	0,15	0,069
10 Q V 5 B*	0,20	0,15	0,060
10 Q V 5 B*	0,10	0,15	0,052

B* steht für eine angenommene Beschichtung

5.5. Kurzzusammenfassung: Wärmetechnische FE-Berechnungen

Die hier durchgeführten FE-Berechnungen der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit von Hochlochziegeln unter Kenntnis der Materialparameter stimmen sehr gut mit den Messergebnissen überein. Auch die Absenkung des Wärmeübergangs durch Strahlung konnte mittels FE-Modellierung sehr gut abgebildet werden. Aufgrund der guten Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation konnten weitere Studien zur Verbesserung der Wärmedämmung durch schrittweise Absenkung des Emissionskoeffizienten mittels FE-Methoden erfolgen. Je nach anteiliger Zusammensetzung des Wärmeübergangs aus Leitung, Konvektion und Wärmestrahlung in den unterschiedlichen Lochbildern wurden unterschiedliche Ergebnisse erhalten. Der Anteil der Wärmestrahlung am gesamten Wärmeübergang bei modernen Hochlochziegeln bewegt sich zwischen 67,67 % (SOLIDO) bzw. 56,22 % (ANSYS CFX) für Ziegel C ohne Mineralwollfüllung und 37,40 % (SOLIDO) bzw. 33,75 % (ANSYS CFX) für den Ziegel B. Die Verbesserung der Wärmedämmung durch Verminderung des Wärmestrahlungsübergangs ist maßgeblich vom Emissionskoeffizienten der Strahlungsflächen abhängig. Aufgrund der rauhen Ziegeloberfläche werden durch Beschichtung Emissionskoeffizienten im Bereich von $\varepsilon = 0,35$ bis $\varepsilon = 0,6$ erreicht. Der Anteil der Konvektion am Wärmeübergang fällt rapide mit steigender Lochreihenanzahl und beträgt bei 6 Lochreihen nur noch 7 %, für die restlichen berechneten Hochlochziegel mit bis zu 15 Lochreihen liegt der Anteil der Konvektion am Wärmeübergang unter 1 %. Der Anteil der Leitung wird in Leitung im Fluid und Leitung im Festkörper unterteilt. Der Anteil der Wärmeleitung im Festkörper liegt bei unverfüllten Hochlochziegeln zwischen 30 bis 40 %.

In weiteren Berechnungen wurde ein Lochanteil von 60 % als konstant angenommen und die Anzahl der Längs- und Querstege sowie die Scherben-Wärmeleitfähigkeiten variiert. Es zeigte sich, dass bereits ab 10 Lochreihen (10 Hohlräume senkrecht zur Wärmestromrichtung) kein Wärmeübergang durch Konvektion stattfindet. Die Wärmeübergänge durch Leitung im Festkörper und im Fluid bleiben innerhalb dieser Untersuchung gleich. Der Wärmeübergang durch Strahlung sinkt ebenfalls mit steigender Anzahl an Querstegen, sein Anteil am Gesamtwärmeübergang in % erreicht aber bei 10 Lochreihen ein Maximum. Diese Lochreihenanzahl bildet somit das Ausgangsmodell für ein neues und wärmetechnisch optimiertes Lochbild in Verbindung mit einer neu entwickelten Beschichtung.

Aus den Ergebnissen der Modellvarianten wird ersichtlich, dass bereits bei 10 Lochreihen in Verbindung mit einer Beschichtung ($\varepsilon = 0,40$) eine vergleichbare äquivalente Wärmeleitfähigkeit, wie bei modernen Lochbildern mit 26 Lochreihen erhalten werden kann. Darüber hinaus konnte ein Zusammenhang zwischen der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit, der Lochreihenanzahl und der Scherben-Wärmeleitfähigkeit erarbeitet werden.

6. Schallschutztechnische Berechnungen

Eine rechnerische Abschätzung des Schalldämmmaßes von Ziegeln in Abhängigkeit von den Scherbeneigenschaften und der Geometrie gewinnt neben wärmetechnischen Berechnungen zunehmend an Bedeutung. Die Wärmedämmeigenschaft der Ziegel wird, wie bereits gezeigt, maßgeblich von der Anzahl an Längs- und Querstegen und von deren Anordnung bestimmt. Da Wärmedämmziegel auch gleichzeitig über möglichst gute Schallschutzeigenschaften verfügen müssen, wird im weiteren Verlauf der Untersuchungen der Einfluss des Lochbildes auf die Schallschutzeigenschaften untersucht. Wärmedämmziegel verfügen in der Regel über Schalldämmmaße (Einzahlwert) von 45 dB – 49 dB. Die Schallschutz-technischen Eigenschaften hängen ebenso wie die wärmetechnischen Eigenschaften, von der Anordnung der Längs- und Querstege, vom Lochanteil und von den Materialkennwerten des keramischen Scherbenmaterials ab. Untersuchungen zum Einfluss der genannten Parameter auf den Schalldurchgang werden anhand der bereits für die wärmetechnischen Simulationen verwendeten Modelle durchgeführt. Die Berechnungen erfolgen dabei für E-Moduln von $E = 5 \text{ GPa}$ und $E = 10 \text{ GPa}$ bei entsprechenden Scherbenrohndichten.

Die Berechnung des frequenzabhängigen Schalldämmmaßes erfolgt mit der Finite-Element-Methode (für das Strukturmodell) und Rand-Element-Methode (für das Akustikmodell). Die vollständig gekoppelte Berechnung ermöglicht neben der Ermittlung der Schalldruckverteilungen ebenso die Berechnung des Schalldämmmaßes eines Einzelsteines und einer ganzen Wand.

6.1. Theoretische Vorgehensweise

Die FE-Berechnung des Schalldurchgangs durch eine Wand aus Ziegeln erfolgt in Anlehnung an die Messung im Wandprüfstand nach DIN EN ISO 140-3 bei Frequenzen zwischen 50 Hz und 5000 Hz (Bild 128). Der frequenzunabhängige Bezugswert R_w für das Schalldämmmaß wird als Einzahlwert bezeichnet und aus den frequenzabhängigen Schalldämmmaßen durch Verschiebung der Bezugskurve nach ISO 717-1 aus den Frequenzen von 100 Hz bis 3150 Hz berechnet. Die FE-Berechnung des Schalldämmmaßes erfolgt in analoger Weise.

Die Schalldämmeigenschaften eines Ziegels sind abhängig von der Geometrie des Ziegels, Rohdichte, E-Modul, Poissonzahl und Dämpfung des Scherbenmaterials. Diese Eigenschaften wurden vorab messtechnisch ermittelt (Abschnitt 3.3) und werden als Materialparameter angesetzt. Die entsprechenden elastischen Materialkennwerte für Putz und Mörtel wurden vom Hersteller erfragt.

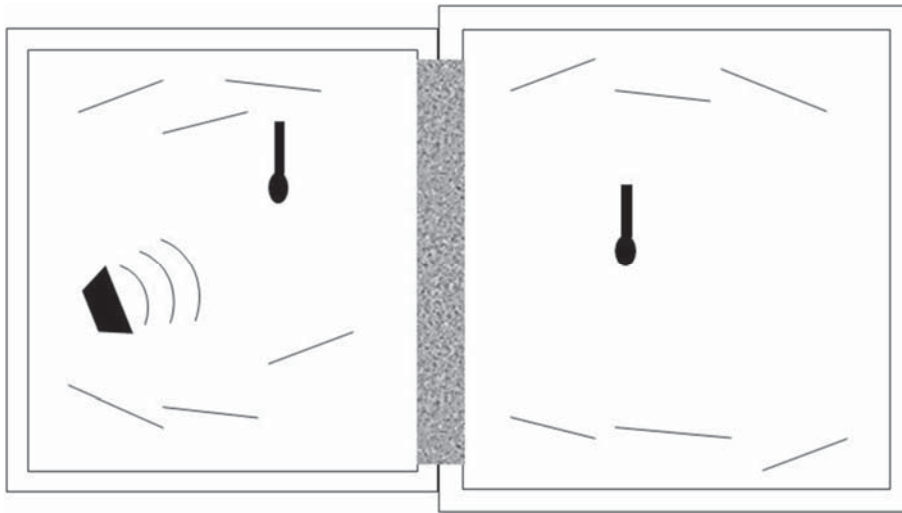


Bild 128: Schallschutzmessung im Wandprüfstand nach DIN EN ISO 140-3 mit Sende- und Empfangsraum: zwischen beiden Räumen befindet sich das Messobjekt

Als Ergebnis der Berechnung wird der Schalldruck nach Durchtritt durch den Ziegel erhalten. In Sende und Empfangsraum wird ein diffuses Schallfeld vorausgesetzt und der mittlere Schalldruckpegel erfasst. Als ΔL wird dabei die mittlere Pegeldifferenz zwischen Sende und Empfangsraum bezeichnet, während für A die äquivalente Absorptionsfläche eingesetzt wird (Gleichung (46)).

$$R = \Delta L - 10 \log \frac{S}{A} [\text{dB}] \quad (46)$$

Für die Berechnung des Schalldämmmaßes in der Bauakustik können verschiedene Ansätze Verwendung finden. Für eine schnelle Abschätzung kann die Berechnung nach dem Massengesetz erfolgen. Darüber hinaus können Berechnungen mittels Strahlverfolgung, Statistischer Energieanalyse (SEA), Finiter Elemente (FEM) oder durch die Randelementmethode (BEM) erfolgen (Moosrainer, 2013). In dieser Arbeit wird eine Kopplung aus FEM und BEM für die Berechnung des Schalldämmmaßes von Hochlochziegeln verwendet.

6.1.1. FEM-BEM Modellierung des Schalldurchgangs

Zunächst erfolgt die Anregung der Luft im Senderraum durch eine Mikrofonanordnung zur Erzeugung eines diffusen Schallfeldes. Die Mikrophone stellen hierbei die Anregung durch die akustischen Quellen F_f mit der Anregungsfrequenz Ω dar. Die Bewegungsgleichung für das Fluid lässt sich nach Gleichung (47) schreiben:

$$\left(-\Omega^2 [M_f] + i\rho [C_f] + [K_f] \right) \{P\} = \{F_f\} \quad (47)$$

Bei M_f handelt es sich um die Massenmatrix, bei C_f um die Dämpfungsmatrix und bei K_f um die Steifigkeitsmatrix des Fluids (Luft) im Senderraum, während P den Druck im Fluid bezeichnet. Über Gleichung (39) kann somit ein Zusammenhang zwischen resultierendem

Schalldruck im Senderraum P und Anregung durch akustische Quellen F_t hergestellt werden. Gleichung (48) beschreibt die Verschiebung der Struktur U nach Anregung durch die akustischen Quellen F . Die Matrix M_s bezeichnet dabei die Massenmatrix, C_s bezeichnet die Dämpfungsmatrix und K_s die Steifigkeitsmatrix der Struktur (Ziegelwand).

$$\left(-\Omega^2 [M_s] + i\Omega [C_s] + [K_s]\right)\{\bar{U}\} = \{\bar{F}\} \quad (48)$$

Zunächst muss hierfür eine Modalanalyse der Struktur mittels dem FE-Programm ANSYS durchgeführt werden, mit welcher das Anregungsverhalten der Struktur in Abhängigkeit von den genannten Eingangsgrößen ermittelt wird. Gleichung (49) wird hier mittels Anwendung der Finiten Elemente gelöst.

$$\left(-\Omega^2 [M_s] + i\Omega [C_s] + [K_s]\right)\{\bar{U}\} = 0 \quad (49)$$

Da keine Anregung durch eine äußere Kraft erfolgt, wird $F = 0$ gesetzt und die Eigenfrequenzen der Struktur Ω gelöst. Wird das Bauteil gar nicht gelagert, liegen die ersten sechs Eigenmoden bei 0 Hz, da es sich um Starrkörperbewegungen handelt. Die maximale Anzahl der Eigenmoden kann aus der Anzahl an Knoten, multipliziert mit den Freiheitsgraden für die Bewegung (DOF) berechnet werden. Die Berechnung der Eigenmoden (Modalanalyse) erfolgt in den meisten Fällen mit Frequenzdopplung. In dieser Arbeit erfolgte eine Modalanalyse bis 2500 Hz, da durch den massiven Anstieg der Eigenmoden ab dieser Frequenz eine weitere Berechnung nicht mehr sinnvoll ist. Die Berechnung des Schalldämmmaßes mit Gewichtung aus den modalen Partizipationsfaktoren erfolgte ebenfalls bis zu dieser Frequenz, wobei nur Verschiebungen in Richtung der Flächennormalen der Struktur bewertet werden.

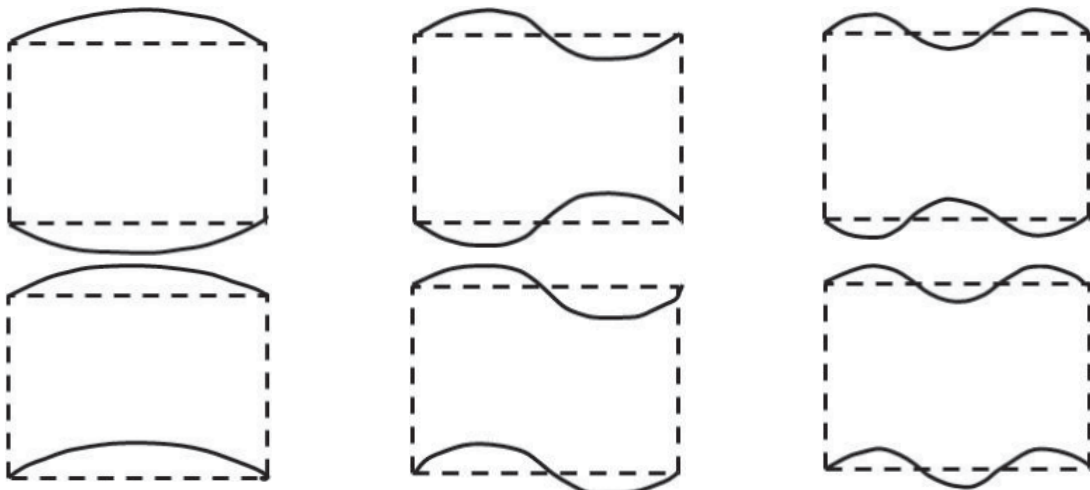


Bild 129: Verschiedene Schwingungsformen eines Einzelsteins: Es treten Dickenresonanzen (oben) und Biegeschwingungen (unten) auf (Maysenhölder, 1993)

Bei den Dickenresonanzen schwingen die gegenüber liegenden Seiten gegenphasig und bei Biegeschwingungen gleichphasig (Bild 129). Die einzelnen berechneten Schwingformen und Moden in diesem Bereich können im FE-Programm sichtbar gemacht werden.

Anhand der modalen Partizipationsfaktoren für die Verschiebung der Struktur in Normalenrichtung kann die Antwort der Struktur bei Anregung mit der Frequenz Ω berechnet werden. Aus der ersten Ableitung der Verschiebung der Struktur (Ziegelwand) ergibt sich die Geschwindigkeit. Aus der gemittelten Geschwindigkeit der Struktur in Normalenrichtung v_n kann der Schalldruck p an der Oberfläche der Struktur berechnet werden. Für die Bewertung des Schalldämmmaßes des Bauteils wird der Schalldruck p jedoch in einiger Entfernung von der Oberfläche der Struktur benötigt. Die Ausbreitung der Welle in den Raum wird mittels der akustischen Wellengleichung beschrieben (Gleichung (50)).

$$\nabla^2 \hat{p} + k^2 \hat{p} = 0; \quad k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (50)$$

Unter Verwendung der Green'sche Funktion G kann Gleichung (50) und Gleichung (51) zur Berechnung des Schalldrucks im Fernfeld überführt werden.

Über die Anregungsfrequenz Ω , die Dichte des Fluides ρ_F und die Schallschnelle v_n in Normalenrichtung im Quellpunkt Q wird der Schalldruck in einem Feldpunkt p (P) im Fernfeld (51) erhalten. Aus dem Schalldruck p kann direkt der gesuchte dB-Wert im Empfangsraum berechnet werden.

$$\hat{p}(P) \int_A \left(\hat{p}(Q) \frac{\partial}{\partial n} G(P, Q) + i\Omega \rho_F v_n G(P, Q) \right) dA \quad (51)$$

Diese Gleichung wird unter Verwendung der akustischen Randelementmethode mit dem Programm Virtual.Lab Acoustics gelöst.

Das Konzept wird in Virtual.Lab Acoustics unter der Formulierung eines Akustik Transfer Vektor Konzepts implementiert.

Dabei wird der Schalldruck p an einem virtuellen „Mikrofon“ (field point) im Fernfeld nach Gleichung (51) über die Definition eines Akustik Transfer Vektors (AVT) nach Gleichung (52) berechnet.

$$p = \left\{ \text{AVT}(\omega)^T \cdot \{v_{ns}(\omega)\} \right\} \quad (52)$$

Die Berechnung des Schalldurchgangs erfolgt somit als gekoppelte Berechnung aus FE-Methode zur Lösung des Schwingungsproblems der Struktur und Randelementmethode (BEM) zur Schallabstrahlung im Feldpunkt (LMS International, 2012).

6.1.2. Homogenisierungsverfahren für periodische Strukturen

Da Ziegelwände aus einer großen Anzahl an Hochlochziegeln und zusätzlichen Putz- und Mörtelschichten bestehen, wird das gemessene Schalldämmmaß der Wand durch den Wandaufbau bestimmt. Da eine Wand mit den Abmaßen 3705 mm (B) x 2988 mm (H) x 365 mm (T) (bestehend aus 180 Einzelsteinen) nicht vollständig diskretisiert berechnet werden kann, erfolgt die Berechnung der ganzen Wand aus Ziegeln anhand eines homogenisiertes Materials. Die einzelnen Hochlochziegel werden dabei als homogenes

Ersatzkontinuum betrachtet, deren effektive mechanische Eigenschaften zunächst unbekannt sind. Durch das E-Modul E und die Poisson-Zahl μ wird ein isotropes Material vollständig charakterisiert. Da ein Hochlochziegel aber eine Mischung aus luftgefüllten Hohlkammern und keramischem Scherben darstellt, kann hier kein isotropes Materialmodell angesetzt werden. Es wird vermutet, dass Hochlochziegel als orthotropes, elastisches Kontinuum zu beschreiben sind und daher jeweils neun elastische Konstanten zur vollständigen Charakterisierung erforderlich sind.

Grundlage für die Homogenisierung bildet das Hook'sche Gesetz für ein elastisches Material (Betten, 1985):

$$[\sigma] = [C][\varepsilon] \quad (53)$$

Dabei ist σ die Komponente des Spannungs-, ε die Komponente des Verzerrungs- und C die Komponente des Elastizitätstensors (Gleichung (53)).

Das Hook'sche Gesetz kann in Tensorschreibweise nach Voigt-Notation als Matrixgleichung (54) geschrieben werden.

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ 2\varepsilon_{xy} \\ 2\varepsilon_{yz} \\ 2\varepsilon_{xz} \end{bmatrix} \quad (54)$$

Für die Definition des homogenen Ersatzmaterials müssen die Einträge C_{ij} bestimmt werden, um die Steifigkeit der Struktur zu extrahieren. Die Homogenisierung erfolgt mittels FE-Berechnung mit Einheitslasten (Einheitsauslenkungsvektoren) und periodischen Randbedingungen. Für jede Spalte der Steifigkeitsmatrix C muss die Einheitszelle (repräsentatives Volumenelement) mit einer Einheitslast beaufschlagt werden. Für die Extraktion der Steifigkeit (6 x 6 Matrix) werden 6 Einheitslasten aufgegeben und die Antwort der Struktur berechnet. An den Rändern der Elementarzelle werden periodische Randbedingungen aufgegeben, um das Deformationsverhalten der unendlich ausgedehnten periodischen Struktur wiederzugeben.

Anschließend wird die Antwort der Struktur auf das Volumen der Elementarzelle bezogen gewichtet. Daraus wird die Steifigkeitsmatrix für das homogene Äquivalentmaterial erhalten. Durch Homogenisierung und Berechnung der äquivalenten elastischen Parameter wird die Berechnung des Schalldurchgangs durch eine ganze Wand unter Berücksichtigung der Ziegelgeometrie, der elastischen Eigenschaften des Ziegelscherbens und unter Berücksichtigung der Putz- und Mörtelschichten und deren elastischer Parameter möglich.

6.2. Vergleich Messung und Berechnung am Beispiel von Ziegel C

Um das schallschutztechnische Verhalten einer Ziegelwand durch Simulation am besten abzubilden, wäre ein sehr großer Diskretisierungsaufwand notwendig, der durch die heute leistbaren Rechenkapazitäten nicht abgedeckt werden kann. Ein alternatives Verfahren wird von Maysenhölder (Maysenhölder, 1993) vorgeschlagen. Er stellt die Frage, ob sich das schalltechnische Verhalten einer ganzen Ziegelwand anhand eines einzelnen Steins zumindest teilweise abbilden lässt (Maysenhölder, 1993). Mit Hilfe einer Modalanalyse wird hier versucht, schalltechnische Mängel aufzuklären und das Schalldämmmaß abgeschätzt. Besonders im Frequenzbereich zwischen 500 Hz und 2000 Hz treten Verschlechterungen des Schalldämmverhaltens auf. Von Gösele konnte gezeigt werden, dass „Dickenresonanzen“ der Ziegel die Schalldämmungseinbrüche verursachen (Gösele, 1990). Es handelt sich dabei um Schwingungen der Wand, bei denen sich zwei gegenüber liegende Oberflächenpunkte gegenphasig bewegen. Bei den üblichen Biegeschwingungen liegt eine gleichphasige Bewegung beider Wandoberflächen vor. In Koch (Koch, et al., 1990) und Maysenhölder (Maysenhölder, 1991) wird betont, dass die Dickenresonanz jeweils auf einen Stein begrenzt ist, während im Bereich der Mörtelfugen kaum eine Schwingung stattfindet. Die Dickenschwingungen homogener Wände stellen für inhomogene und periodisch aufgebaute Wände somit keine zutreffende Beschreibung dar. In Maysenhölder (Maysenhölder, 1993) wird vorgeschlagen, die Messfrequenzen in drei Frequenzbereiche zu unterteilen, in denen jeweils verschiedene Berechnungs-Methoden zur Anwendung kommen. Im unteren Frequenzbereich darf die Wand aus Ziegelsteinen als homogene Platte angenommen werden. Hier erfolgt die Beschreibung der Wand aus der flächenbezogenen Masse oder durch die Definition eines Äquivalentmaterials nach einem Homogenisierungsverfahren der Kontinuumsmechanik. Die akustische Inhomogenität der Wand macht sich ab 1250 Hz in der Schwingung einzelner Steine bemerkbar. Die Schwingung der Wand setzt sich aus den Schwingungen der einzelnen Steine zusammen. Sind die modalen Daten verfügbar, können die durch das anregende diffuse Schallfeld erzwungenen Schwingungen berechnet werden. Aus der Druckverteilung auf der Empfangsseite kann das Schalldämmmaß bestimmt werden. Mit wachsender Frequenz steigt die Dichte der Eigenmoden. Ab einer Frequenz von 2500 Hz – 3000 Hz kann der Verlauf des frequenzabhängigen Schalldämmmaßes mit konstanter Steigung extrapoliert werden. Im Fall periodischer Wände kann die Steigung mit 3 dB pro Terzband angesetzt werden (Cremer, 1942). In dieser Arbeit wird sowohl ein Berechnungsansatz als Einzelstein, als Wand mit homogenisiertem Materialmodell und mittels dem Berger'schen Massengesetz verfolgt. Anschließend werden die Berechnungsansätze mit einem Messergebnis aus dem Wandprüfstand verglichen.

6.2.1. Wahl eines geeigneten repräsentativen Volumenelementes

Da nur für Ziegel C eine Messung des Schalldämmmaßes vorlag, erfolgte an diesem Hochlochziegel ein Abgleich mit den berechneten Ergebnissen.

Nachdem die Berechnung des Schalldurchgangs am einzelnen Ziegel bis zu einer Frequenz von $f = 400$ Hz erhebliche Abweichungen zum Messergebnis zeigt, musste die komplette Versuchswand in der FE-Berechnung nachempfunden und berechnet werden. Wie im vorangegangenen Abschnitt erwähnt, ist eine Diskretisierung und Berechnung der kompletten Wand aus Ziegeln nicht möglich. Da eine Wand aus Ziegeln als periodische Struktur genähert werden kann, wurde das in Abschnitt 6.1.2 beschriebene Homogenisierungsverfahren für periodische Strukturen angewendet. Untersucht wurde zuerst die Wahl einer geeigneten Elementarzelle für die Homogenisierung der Materialparameter und die Modellierung von Putz und Mörtel. Darüber hinaus wurde der Einfluss einer Anisotropie der Materialparameter im keramischen Scherben auf das Schalldämmmaß untersucht. Die für diese Untersuchung gewählten und für die periodische Struktur repräsentativen Volumenelemente sind Bild 130 zu entnehmen. Zusätzlich wurden die Modelle mit der Bezeichnung „EiS Ziegel C“, „EiSMöPu Ziegel C“ und „EiZMöPu Ziegel C“ unter Annahme der gemessenen elastischen Materialparameter mit und ohne Berücksichtigung von deren Anisotropie berechnet. Für die übrigen Modelle wurden die Materialparameter als anisotrop angenommen.

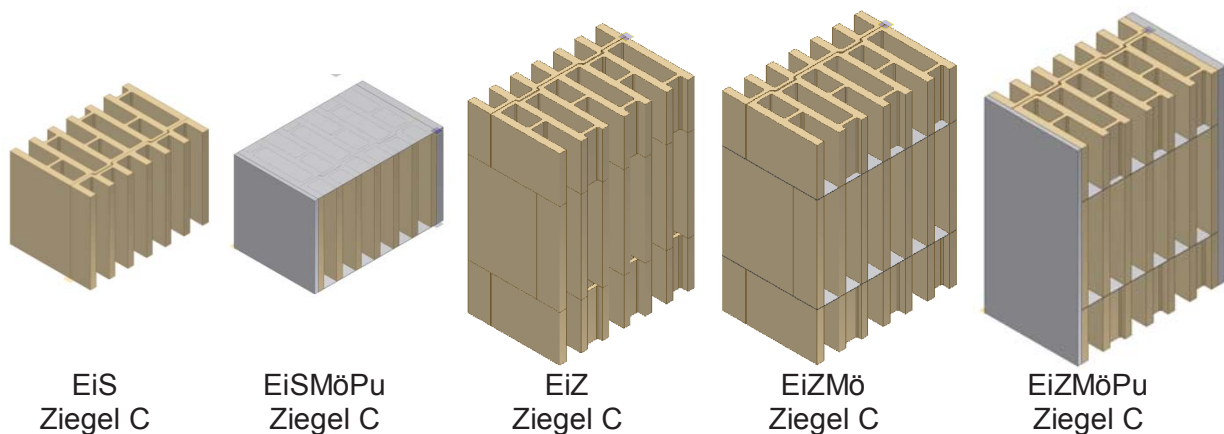


Bild 130: Für die Schallschutz-Berechnung gewählte unterschiedliche repräsentative Volumenelemente: die Bezeichnung „EiS“ steht für die Berechnung als einzelner Stein, während mit „EiZ“ die Berechnung als Elementarzelle mit Berücksichtigung des Versatzes der Ziegel bezeichnet wird. Der Zusatz „Mö“ steht für die Berechnung mit Dünnbettmörtelschicht und der Zusatz „MöPu“ beschreibt die Berechnung mit Mörtel und zusätzlicher Putzschicht auf der Innen- und Außenseite.

Neben der Frage nach dem zu wählenden repräsentativen Volumenelement („Elementarzelle“) stellt sich die Frage der Eingabe der Materialparameter. Diese können unter Berücksichtigung der messtechnisch erfassten Anisotropie eingegeben werden (Bezeichnung mit Aniso) oder als Mittelwert aus den anisotrop erfassten Materialparametern. Die Ergebnisse im Vergleich mit den Messwerten sind in Bild 131 dargestellt. Zusätzlich erfolgt hier ein Vergleich mit dem Schalldämmmaß, welches sich unter Anwendung des

Berger'schen Massengesetzes nach Gleichung (55) berechnet (Lohmeyer, et al., 2005).

$$R = 20 \log(m' \cdot f) - 47 \quad (55)$$

Dabei bezeichnet f die anregende Frequenz, R das frequenzabhängige Schalldämmmaß und m' die flächenbezogene Masse des Bauteils. Die Bemessung des Schallschutzes wird hierbei lediglich unter Berücksichtigung der Masse und ohne Berücksichtigung der Geometrie des Bauteils berechnet. Weiterhin setzt das Berger'sche Massengesetz einen Schalleinfallswinkel von 90° voraus. Dies ist im Fall eines diffusen Schallfeldes nicht gegeben.

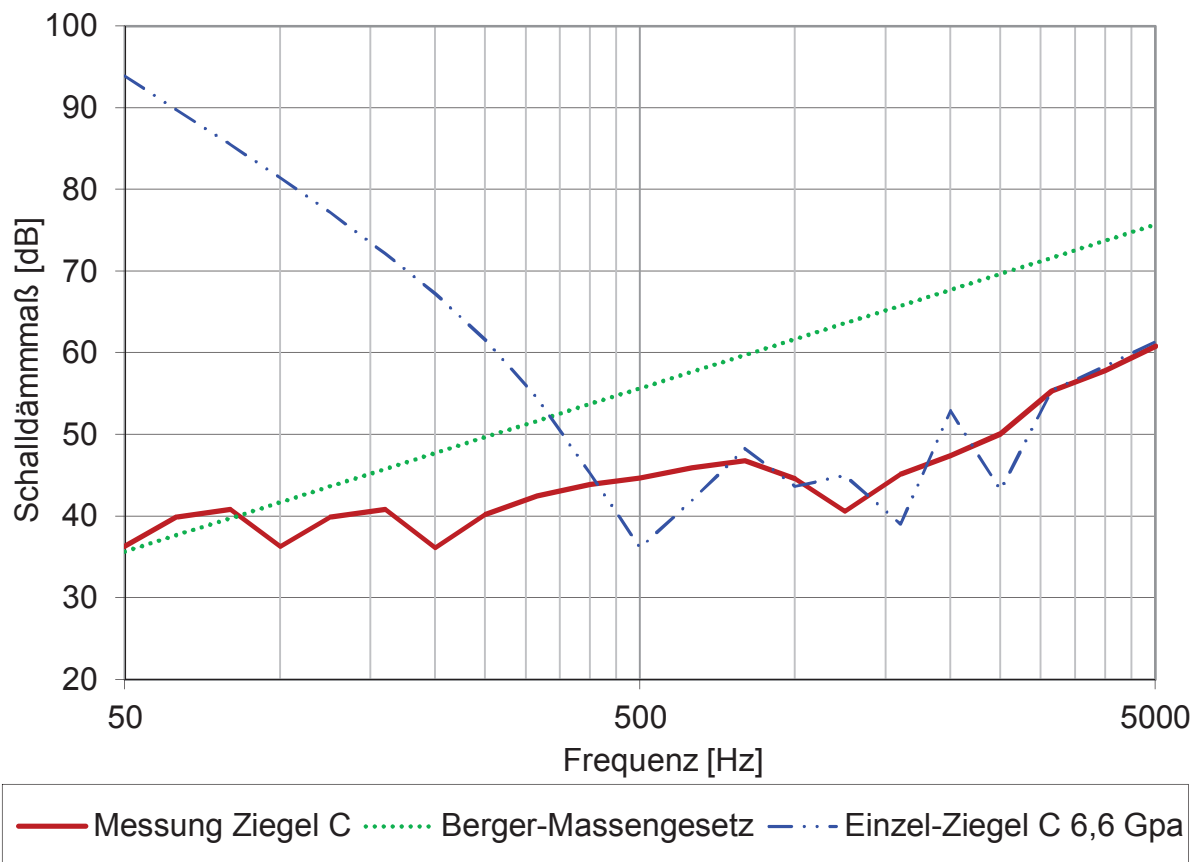


Bild 131: FE-Berechnung für das frequenzabhängige Schalldämmmaß des Ziegels C bei Berechnung mittels Berger'schen Massengesetz oder als einzelner Ziegel und Vergleich mit den im Schallprüfstand gemessenen Werten (graue durchgehende Linie)

Aus Bild 131 wird ersichtlich, dass das Berger-Massengesetz das frequenzabhängige Schalldämmmaß von Ziegel C ungenügend abbildet. Dies liegt zum einen darin begründet, dass bei einem Schalleinfallswinkel von unter 90° eine Phasengleichheit für die Spur der Luftschallwelle und die Spur der Biegewelle auftritt. Dabei tritt eine Verstärkung des Schalldurchgangs durch das Bauteil auf, welche als Spuranpassung bezeichnet wird. Diese Spuranpassung führt zu einem niedrigeren Schalldämmmaß und wird im Berger'schen Massengesetz nicht berücksichtigt. Als Messwert wird ein bewertetes Schalldämmmaß nach DIN EN ISO 717-1 von $R_w = 46$ dB für Ziegel C angegeben. Nach dem Berger'schen

Massengesetz wird ein Schalldämmmaß von $R_w = 60$ dB berechnet. Die Abweichung beträgt in diesem Fall 13 dB. Bei Betrachtung des Frequenz-abhängigen Verlaufs wird ersichtlich, dass das Schalldämmmaß unter Berücksichtigung der Masse gut im Frequenzbereich zwischen 50 Hz und 150 Hz abgebildet werden kann. Danach werden bei ausschließlicher Berücksichtigung der Masse zu hohe Werte für das Schalldämmmaß erhalten. Bei Berechnung als einzelner Ziegel und nicht als Wand mit homogenisiertem Material (bezeichnet mit Einzel-Ziegel C) resultiert bis zu einer Frequenz von 400 Hz ein zu hohes frequenzabhängiges Schalldämmmaß. Anschließend nähert sich der Verlauf der Messkurve immer weiter an. Für die Berechnung des Schalldämmmaßes an einem einzelnen Ziegel wird ein bewertetes Schalldämmmaß von $R_w = 44$ dB erhalten. Es ergibt sich eine Abweichung vom Messwert von 2 dB.

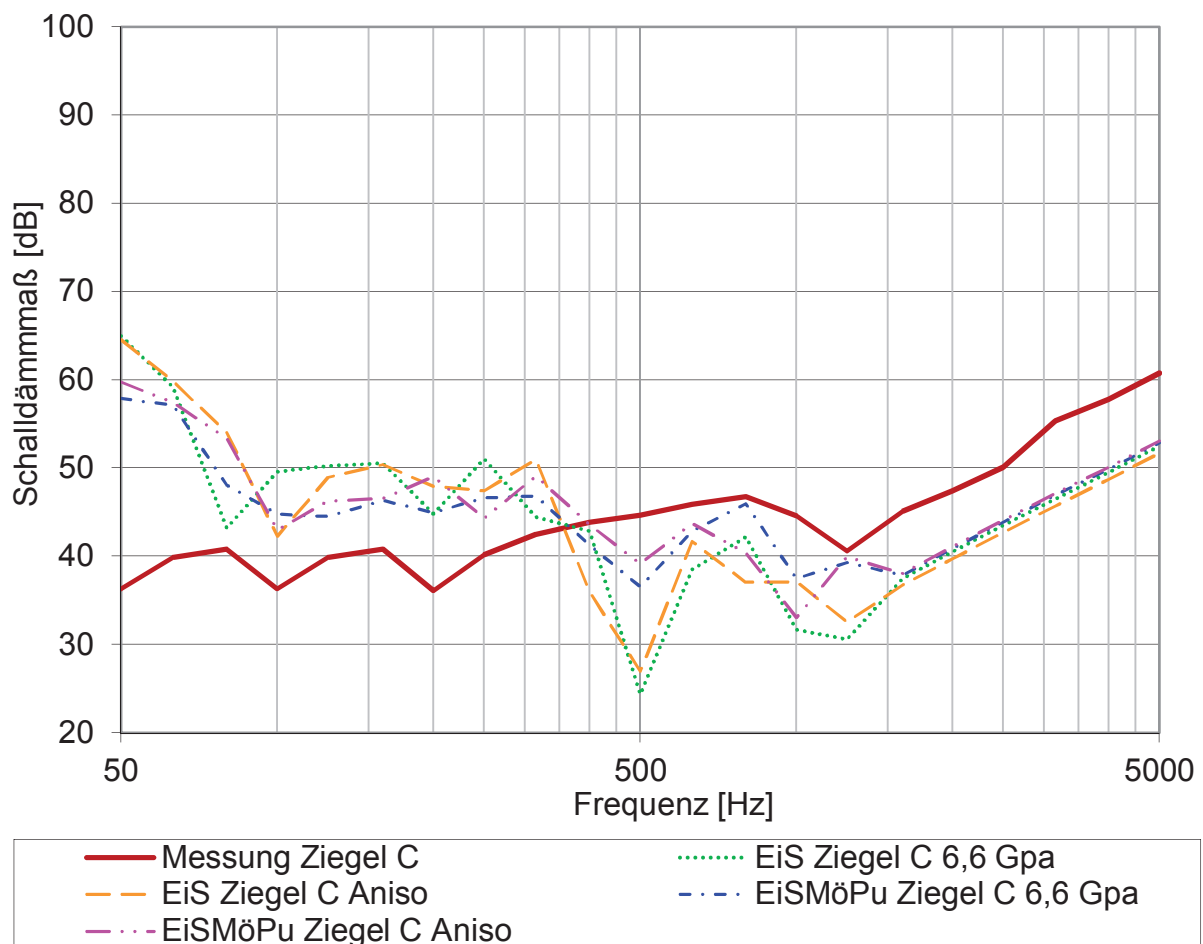


Bild 132: FE-Berechnung für das frequenzabhängige Schalldämmmaß des Ziegels C bei Berechnung als homogenisiertes Material. Wahl der Elementarzelle als einzelne Steinlage ohne (bezeichnet als „EiS“) und mit Berücksichtigung von Mörtel und Putz (bezeichnet als „EiSMöPu“)

Wird eine Homogenisierung der Materialparameter mit Wahl der Einheitszelle als einzelne Steinlage unter Berücksichtigung der Stoßfuge ohne Putz- und Mörtelschichten durchgeführt (Bezeichnung als EiS Ziegel C 6,6 GPa), so ergibt sich ein bewertetes Schalldämmmaß von $R_w = 36$ dB. Der Frequenz-abhängige Verlauf wird aus Bild 132 ersichtlich. Wird bei Wahl

derselben Einheitszelle zusätzlich die Inhomogenität berücksichtigt (bezeichnet mit EiS Ziegel C Aniso), so ergibt sich ein bewertetes Schalldämmmaß von $R_w = 37$ dB. Beide Einheitszellen können die Lage der Einbrüche im Schalldämmmaß in sehr guter Übereinstimmung mit der Messkurve erfassen, allerdings fallen diese Einbrüche im Vergleich mit der Messkurve zu hoch aus. Darüber hinaus wird das Schalldämmmaß im Frequenzbereich von 50 Hz bis 100 Hz zu hoch eingeschätzt. Wird dieselbe Einheitszelle gewählt und Putz- und Mörtelschichten zusätzlich berücksichtigt (bezeichnet mit EiSMöPU Ziegel C 6,6 Gpa), so resultiert ein bewertetes Schalldämmmaß von $R_w = 41$ dB. Wird auch hier zusätzlich die Anisotropie des Ziegelscherbens berücksichtigt (EiSMöPU Ziegel C Aniso), so ergibt sich ein Schalldämmmaß von $R_w = 40$ dB. Erfolgt ein Vergleich der berechneten Kurven mit der Messkurve, so wird eine bessere Übereinstimmung mit der Messkurve deutlich. Auch die Einbrüche im Schalldämmmaß sind wesentlich weniger ausgeprägt und liegen näher an der Messkurve. Weiterhin wurde der Versatz der einzelnen Ziegel in der Mauerwerkswand durch Wahl einer größeren Einheitszelle über drei Steinhöhen hinweg berücksichtigt (bezeichnet mit EiZ) (Bild 133).

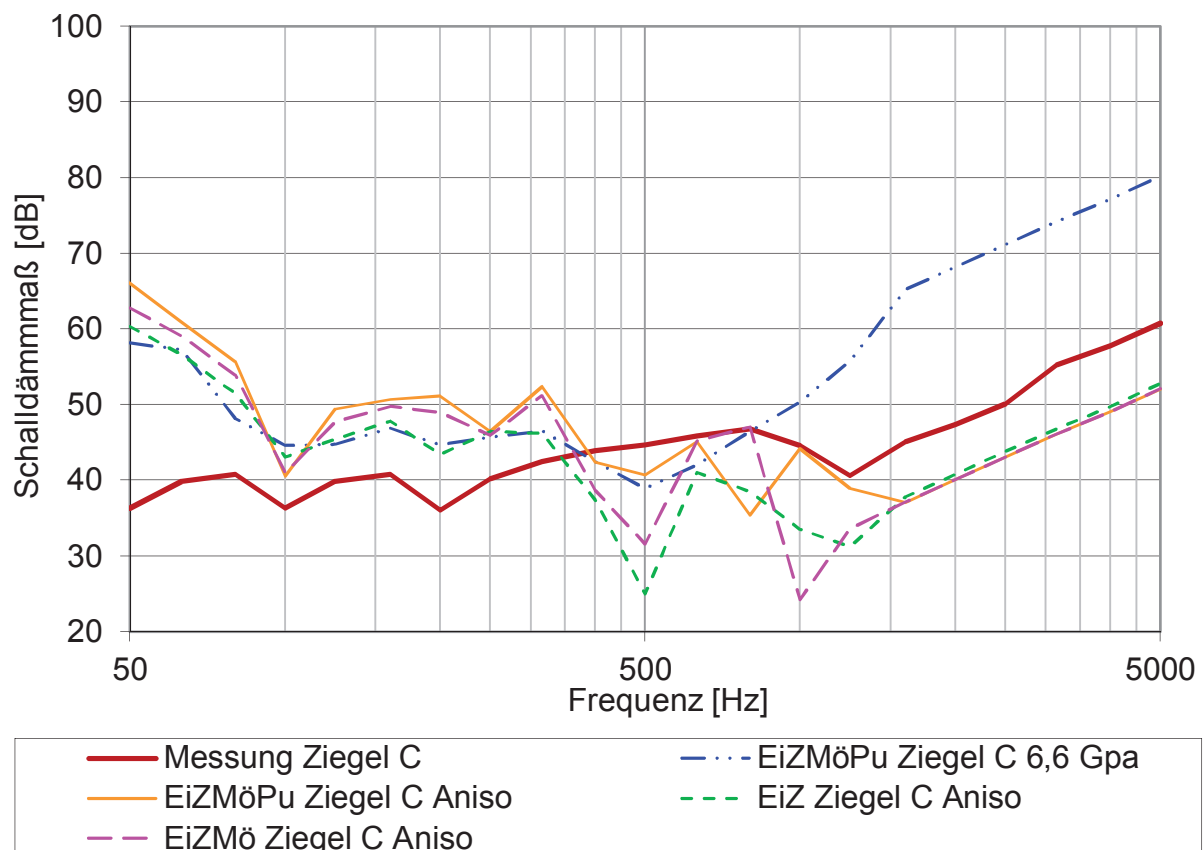


Bild 133: FE-Berechnung für das frequenzabhängige Schalldämmmaß des Ziegels C bei Berechnung als homogenisiertes Material. Wahl der Elementarzelle über drei Steinlagen hinweg mit Berücksichtigung des Steinversatzes ohne (bezeichnet als „EiZ“) und mit Berücksichtigung von Mörtel (bezeichnet als „EiZMö“) und Putz (bezeichnet als „EiZMöPu“)

Ohne weitere Berücksichtigung von Putz- und Mörtelschichten wird für nach frequenzabhängige Schalldämmmaß ein Wert von 36 dB, was einer Abweichung vom Messwert um 10 dB entspricht, berechnet. Wird zusätzlich eine Dünnbettmörtelschicht in der Lagerfuge angenommen, beträgt das bewertete Schalldämmmaß ebenfalls 36 dB. Wird zusätzlich eine Putzschicht auf der Innen- und Außenseite der Ziegel berücksichtigt, so resultiert bei Annahme isotroper Materialparameter (EiZMöPu Ziegel C 6,6 GPa) ein bewertetes Schalldämmmaß von $R_w = 49$ GPa.

Die Wahl der Elementarzelle beeinflusst das berechnete Schalldämmmaß nur im unteren Frequenzbereich bis 400 Hz, anschließend ist der frequenzabhängige Verlauf sehr ähnlich.

Es wird ersichtlich, dass durch Wahl der Elementarzelle „EiZMöPu Aniso“ die beste Übereinstimmung mit den Messergebnissen erhalten wird. Es ergibt sich allerdings eine Abweichung vom für die Messergebnisse bestimmten, bewerteten Schalldämmmaß von $\Delta R_w = 5$ GPa. Eine geringere Abweichungen im bewerteten Schalldämmmaß ergab sich für die Berechnung als Einzelstein „Einzel-Ziegel C“ mit $\Delta R_w = 2$ GPa. Eine ähnliche Differenz ergibt sich für die Berechnung als Elementarzelle mit Berücksichtigung des Steinversatzes und Vernachlässigung der Anisotropie, bezeichnet als „EiZMöPu Ziegel C Aniso“, mit $\Delta R_w = 3$ GPa. In beiden Fällen wird aber der frequenzabhängige Verlauf des Schalldämmmaßes ungenügend abgebildet.

6.3. Einfluss der Längs- und Querstege auf den Schallübergang

Analog zu den wärmetechnischen FE-Berechnungen zum Einfluss der Längs- und Querstege auf den Wärmeübergang wurden schallschutztechnische Berechnungen zum Einfluss der Stege durchgeführt. Darüber hinaus wurde der Einfluss der Materialparameter auf das Lochbild untersucht. Hierzu wurden E-Moduln für den Ziegelscherben von jeweils $E = 10$ GPa und $E = 5$ GPa für jedes Lochbild angenommen. Diese E-Modul-Werte wurden in Anlehnung an die höchsten und niedrigsten E-Moduln für die in dieser Arbeit messtechnisch für Hochlochziegel ermittelten E-Moduln gewählt (Abschnitt 3.3). Weiterhin wurde ebenfalls in Anlehnung an diese Werte eine Dämpfung von $\delta = 4$ % und eine Querkontraktionszahl (Poissonzahl) $\mu = 0,3$ angenommen.

In Bild 134 sind die frequenzabhängigen Schalldämmmaße der Modelle mit 2 bis 21 Querstegen (entsprechend 1 bis 20 Lochreihen) bei Annahme eines E-Moduls von $E = 10$ GPa (Maximalwert der in dieser Arbeit untersuchten realen Ziegel) dargestellt.

Es wird ersichtlich, dass das frequenzabhängige Verhalten der verschiedenen Modelle von der Anzahl der Querstege bzw. Lochreihen abhängt. Die Einbrüche im Schalldämmmaß verhalten sich bis zu einer Lochreihenanzahl von 10 Lochreihen ähnlich. Besonders im Bereich tieferer Frequenzen bis 100 Hz wird ersichtlich, dass sich mit steigender Anzahl an

Querstegen (Lochreihen) das Schalldämmmaß erhöht. Für 2 Querstege bzw. eine Lochreihe wird bei 50 Hz ein Schalldämmmaß von $R_w = 52$ dB erhalten, bei 3 Querstegen (gleicher Lochanteil von 60 Vol.-%) resultiert ein Schalldämmmaß von $R_w = 55$ dB. Weitere Querstege bzw. Lochreihen verbessern das Schalldämm-Maß bis auf $R_w = 69$ dB bei 50 Hz und einer Anzahl an Querstegen von 21 (bzw. bei 20 Lochreihen).

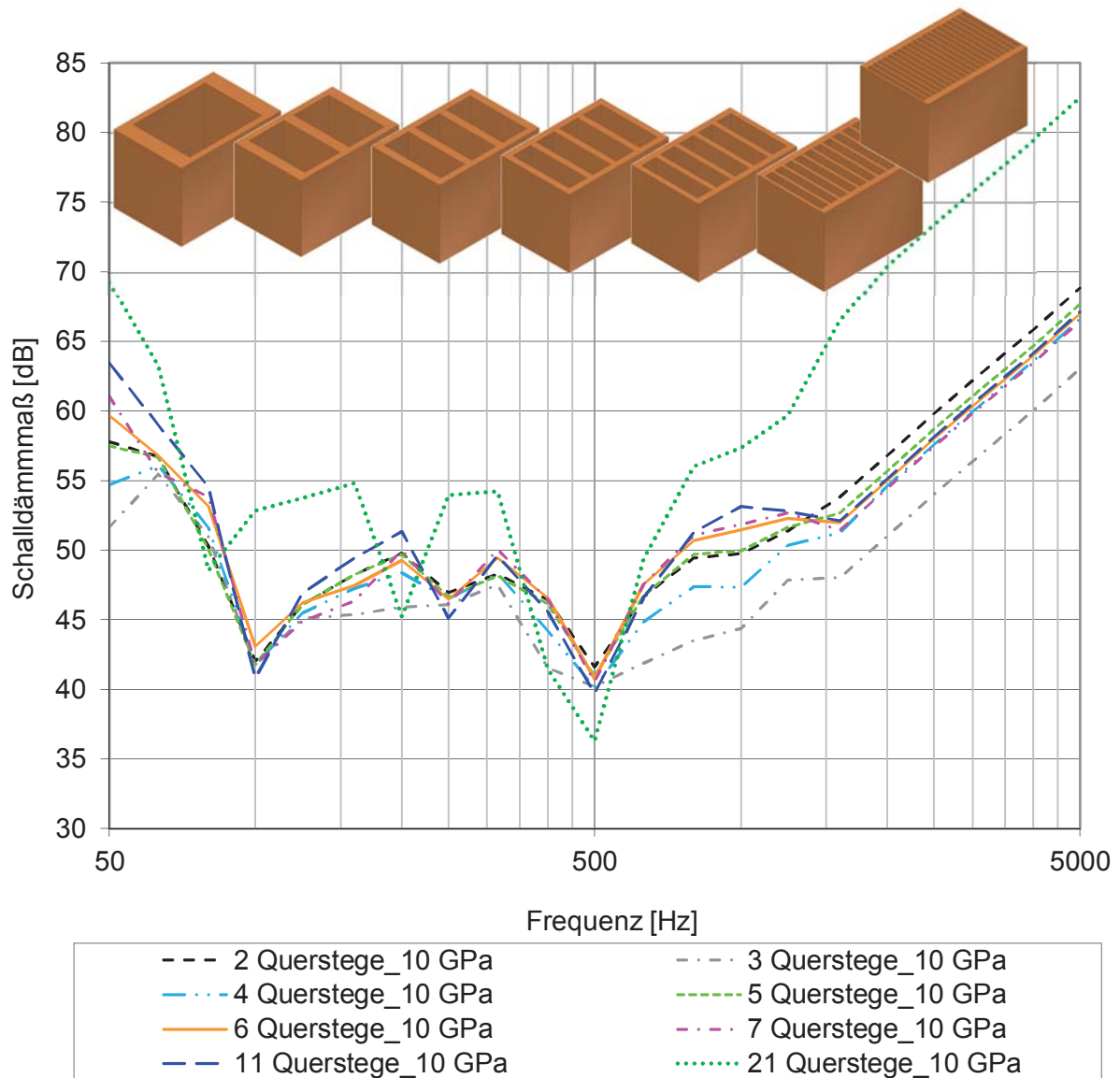


Bild 134: FE-Berechnung des Einflusses der Querstege auf das Schalldämm-Maß von Hochlochziegeln. Als Modelle dienen die Modelle aus den wärmetechnischen Berechnungen. Angenommen wurde ein **E-Modul von 10 GPa** für den Scherben, eine Poissonzahl von $\mu = 0,3$, eine Materialdämpfung von $\delta = 4 \%$ und ein Lochanteil von 60 Vol.-% (Hintz, et al., 2013)

Weiterhin kann durch eine Erhöhung der Quersteganzahl auf 21 Stege (bzw. 20 Lochreihen) der Einbruch im Schalldämm-Maß bei einer Frequenz von 100 Hz vermieden werden. Dies führt aber auch zu einem besonders starken Einbruch des Schalldämmmaßes bei 500 Hz. Zwischen 63 Hz und 125 Hz zeigen alle Modelle mit 2 bis 11 Querstegen bzw. 1 bis 10 Lochreihen kaum Abweichungen im Schalldämmmaß. Einzig bei 20 Lochreihen bzw. 21 Querstegen wird in diesem Frequenzbereich ein um 10 dB höheres Schalldämmmaß

erreicht. Bei 200 Hz liegen die Schalldämm-Maße der Modelle mit 1 bis 10 Lochreihen (2 bis 21 Querstege) um etwa 5 dB höher als das Modell mit 21 Querstege. Zwischen 250 Hz bis 300 Hz zeigt sich ein um 5 dB bis 10 dB erhöhtes Schalldämm-Maß als die übrigen Modelle. Bei Frequenzen über 500 Hz ist das Modell mit den 21 Querstege bzw. 20 Lochreihen durchweg um 5 dB bis 15 dB besser, als die Übrigen untersuchten Modelle. Gerade auch bei hohen Frequenzen ab 500 Hz werden von den Modellen mit 3 und 4 Querstege Schalldämm-Maße erhalten, welche ca. 3 dB unter denen der übrigen Modelle liegen. Zwischen den restlichen Modellen wird hier kaum ein Unterschied erkennbar.

Dieselben Berechnungen zum Einfluss der Querstege auf das frequenzabhängige Schalldämm-Maß wurden unter Annahme eines E-Moduls von $E = 5 \text{ GPa}$ (Minimalwert der in dieser Arbeit untersuchten realen Ziegel) durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Bild 135 dargestellt.

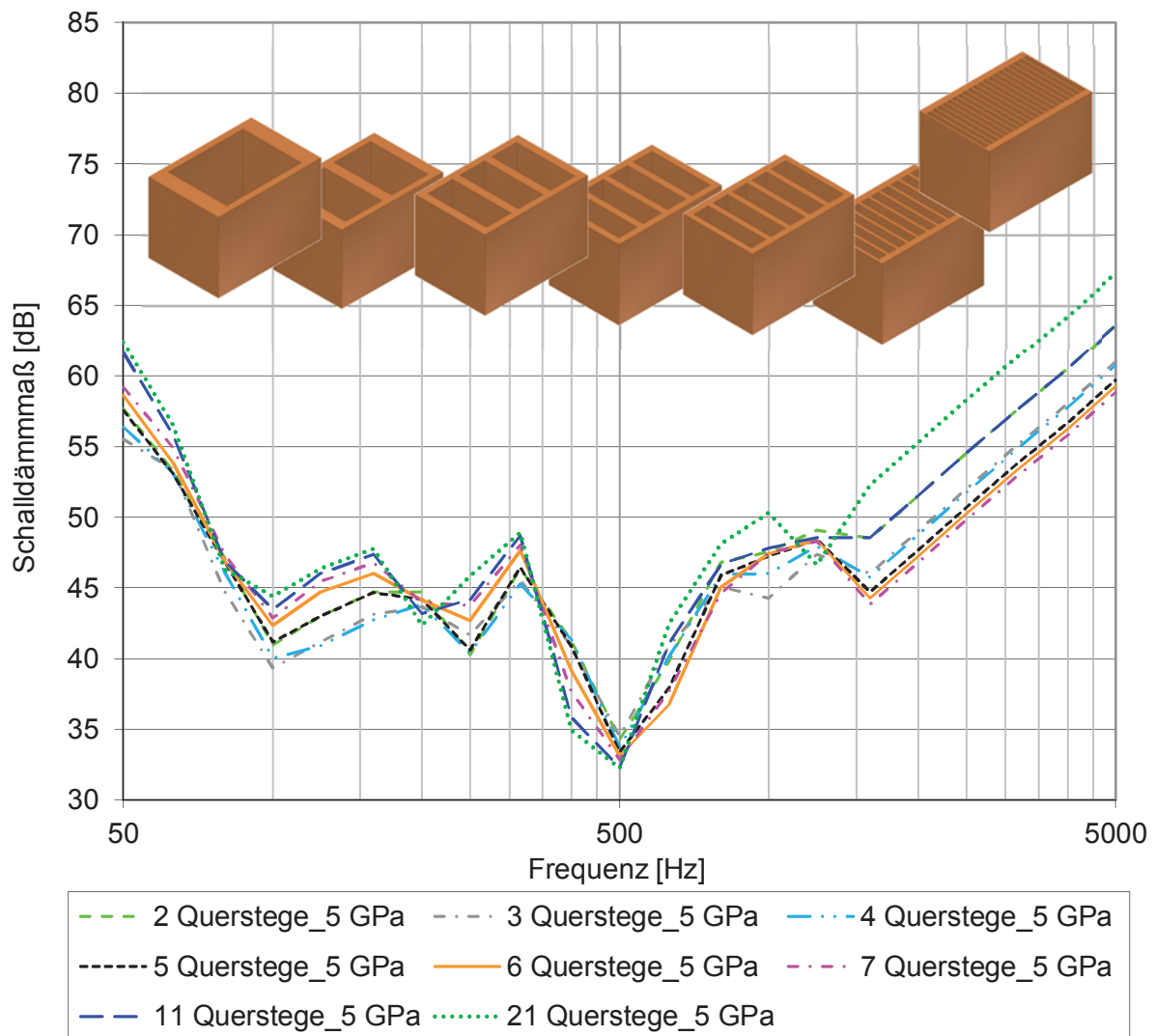


Bild 135: FE-Berechnung des Einflusses der Querstege auf das Schalldämm-Maß von Hochlochziegel. Als Modelle dienen die Modelle aus den wärmetechnischen Berechnungen. Angenommen wurde ein **E-Modul von 5 GPa** für den Scherben, eine Poissonzahl von $\mu = 0,3$, eine Materialdämpfung von $\delta = 4 \%$, und ein Lochanteil von 60 Vol.-% Lochanteil

Bis auf das Modell mit 2 Querstegen (1 Lochreihe) ist das Schalldämmmaß bei allen Modellen mit Querstegen und einem E-Modul von $E = 5$ GPa geringer als bei einem E-Modul von $E = 10$ GPa. Damit bestätigt sich die Annahme, dass ein höheres E-Modul grundsätzlich eine Verbesserung des Schalldämmmaßes bewirkt. Eine Verschiebung der Einbrüche bei Frequenzen von 100 Hz, 250 Hz und 500 Hz findet auch bei einem E-Modul von $E = 5$ GPa nicht statt. Die Unterschiede durch die Anzahl der Querstege (Lochreihen) sind gerade im unteren Frequenzbereich bis 100 Hz bei einem E-Modul von $E = 5$ GPa mit bis zu 7 dB nicht so stark ausgeprägt, wie bei den Modellen mit einem E-Modul von $E = 10$ GPa (hier sind es bis zu 17 dB). Weiterhin ist die Differenz der Schalldämmmaße in Abhängigkeit der Quersteg-Anzahl bei $E = 5$ GPa nicht so ausgeprägt, wie bei einem E-Modul von $E = 10$ GPa. Hier ergibt sich ein maximaler Unterschied von 8 dB, während der Unterschied durch die Steganzahl bei $E = 10$ GPa bis zu 19 dB beträgt. Der Einbruch im Schalldämmmaß bei 630 Hz kann durch Erhöhung der Anzahl an Querstegen bzw. Lochreihen vermindert und bei 20 Querstegen zu tieferen Frequenzen verschoben werden. Insgesamt zeigen die Modelle mit Querstegen und einem E-Modul von $E = 10$ GPa ein höheres frequenzabhängiges Schalldämmmaß, als dieselben Modelle bei einem E-Modul von $E = 5$ GPa.

In Bild 136 sind die frequenzabhängigen Schalldämmmaße der Modelle mit 2 bis 21 Längsstegen (entsprechend 1 bis 20 Lochreihen) bei Annahme eines E-Moduls von $E = 10$ GPa dargestellt.

Für die Berechnung der Modelle mit gleichem Lochanteil, aber Variation der Anzahl der Längsstege, kann festgestellt werden, dass die Anzahl der Längsstege einen geringeren Einfluss auf das frequenzabhängige Schalldämmmaß ausübt, als die Anzahl der Querstege. Es ergeben sich kaum Abweichungen innerhalb der Modelle mit Variation der Anzahl an Längsstegen. Im Vergleich mit den Modellen mit Querstegen und einem E-Modul von 10 GPa ergibt sich bei Vergleich der Diagramme für die Modelle mit Längsstegen ein höheres frequenzabhängiges Schalldämmmaß. Generell zeigt aber auch hier das Modell mit 20 Längsstegen das höchste Schalldämmmaß. Auch bei den Längsstegen bleiben dieselben Einbruchfrequenzen mit 100 Hz, 250 Hz und 500 Hz erhalten. Die Einbruchfrequenzen hängen somit nicht vom Lochbild, der Scherbenrohndichte oder dem E-Modul des keramischen Scherbens ab. Es kann angenommen werden, dass die Einbruchfrequenzen durch den Lochanteil des Ziegels bedingt werden.

Der Einbruch im frequenzabhängigen Schalldämm-Maß bei 500 Hz ist bei den Modellen mit den Längsstegen weniger ausgeprägt. Auch zeigt sich keine Abhängigkeit der Tiefe des Einbruchs von der Anzahl der Längsstege.

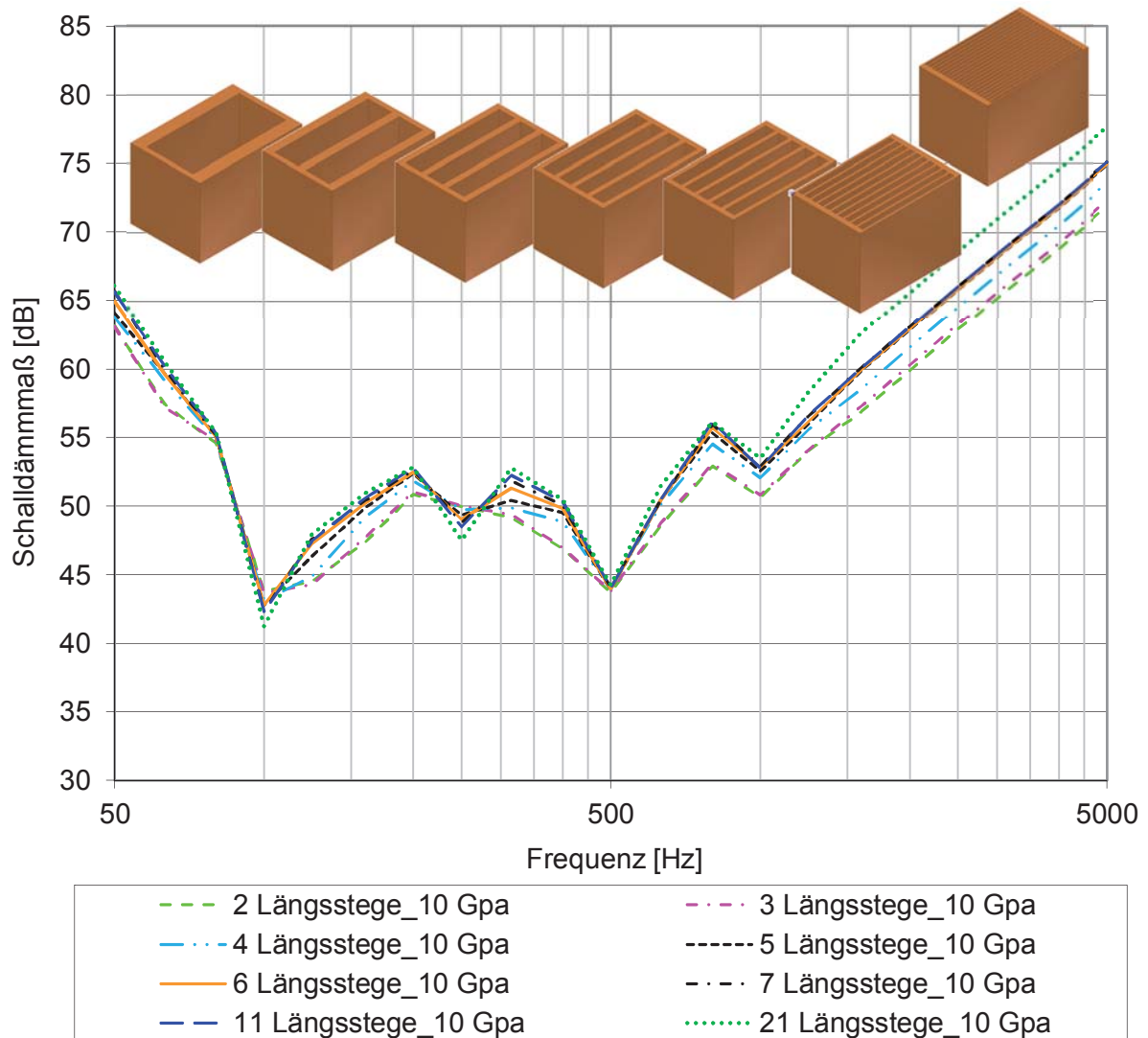


Bild 136: FE-Berechnung des Einflusses der Längsstege auf das Schalldämm-Maß von Hochlochziegeln. Als Modelle dienen die Modelle aus den wärmetechnischen Berechnungen. Angenommen wurde ein **E-Modul von 10 GPa** für den Scherben, eine Poissonzahl von $\mu = 0,3$, eine Materialdämpfung von $\delta = 4\%$ und ein Lochanteil von 60 Vol.-%! (Hintz, et al., 2013)

Als Vergleich wurden dieselben Modelle auch unter Annahme eines E-Moduls von $E = 5\text{ GPa}$ berechnet (Bild 137).

Es wird ersichtlich, dass durch Verminderung des E-Moduls von 10 GPa auf 5 GPa ein deutlicher Unterschied im Verlauf des Schalldämm-Maßes über die Frequenzen von 50 Hz bis 5000 Hz erzielt wird. Das Schalldämm-Maß im unteren Frequenzbereich sinkt durch diese Verminderung des E-Moduls bei 50 Hz um durchschnittlich 5 dB. Der Einbruch des Schalldämm-Maßes bei 100 Hz wird durch die Halbierung des E-Moduls von 10 GPa auf 5 GPa nicht verändert und in beiden Fällen sinkt hier das Schalldämm-Maß auf durchschnittlich 43 dB ab. Auch der Einbruch bei einer Frequenz von 250 Hz bleibt bestehen; es ergeben sich aber Unterschiede von bis zu 5 dB durch eine unterschiedliche Anzahl an Längsstegen (bei gleichem Lochanteil von 60 Vol.-%). Die Einbruchfrequenz bei

500 Hz wird bei den Modellen mit 11 und 21 Längsstege bzw. 10 und 20 Lochreihen von 500 Hz zu einer Frequenz von 400 Hz verschoben. Auch der Einbruch bei einer Frequenz von 1000 Hz wird durch Halbierung des E-Moduls zu 1600 Hz, bei größerer Verminderung des Schalldämmmaßes, verschoben. Darüber hinaus wird bis zu einer Frequenz von 100 Hz nur ein geringer Unterschied durch die Anzahl der Längsstege erkennbar. Zwischen 50 Hz und 63 Hz unterscheiden sich alle Varianten nur maximal um 2 dB im frequenzabhängigen Schalldämmmaß.

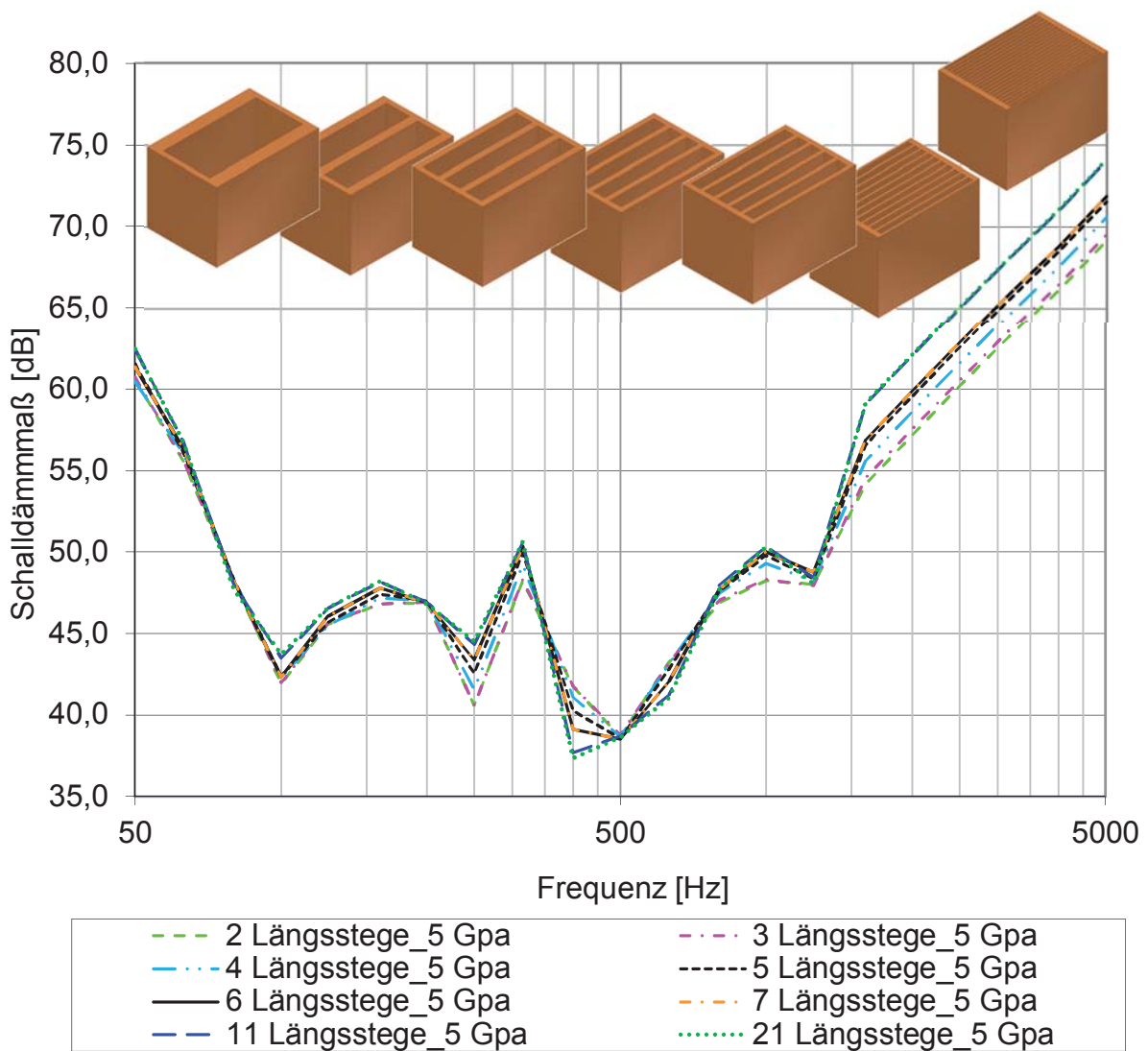


Bild 137: FE-Berechnung des Einflusses der Längsstege auf das Schalldämm-Maß von Hochlochziegeln. Als Modelle dienen die Modelle aus den wärmetechnischen Berechnungen. Angenommen wurde ein **E-Modul von 5 GPa** für den Scherben, eine Poissonzahl von $\mu = 0,3$, eine Materialdämpfung von $\delta = 4 \%$ und ein Lochanteil von 60 Vol.-%

Zum direkten Vergleich der Modelle untereinander, wurde das bewertete Schalldämmmaß nach DIN 717-1 bestimmt und gegen die Anzahl der Hohlräume in Längs- und Quer-Richtung aufgetragen (Bild 138).

Aus der FE-Berechnung wird ersichtlich, dass sich durchgehende Längsstege positiv auf das Schalldämmmaß auswirken, da diese bei gleicher Anzahl zu höheren Schalldämmmaßen

führen, als Querstege. Besonders ausgeprägt ist dieser Effekt bei einem E-Modul von $E = 10 \text{ GPa}$. Das bewertete Schalldämmmaß steigt bei einem E-Modul von $E = 10 \text{ GPa}$ und einem Hohlraum quer (entspricht zwei Längsstegen) von $R_w = 53 \text{ dB}$ auf $R_w = 55 \text{ dB}$ bei 4 Hohlräumen quer (entspricht fünf Längsstegen). Eine weitere Erhöhung der Anzahl an Längsstegen auf 21 Längsstege (entspricht 20 Hohlräumen) führt zu keiner weiteren Verbesserung des bewerteten Schalldämmmaßes über $R_w = 55 \text{ dB}$ hinaus.

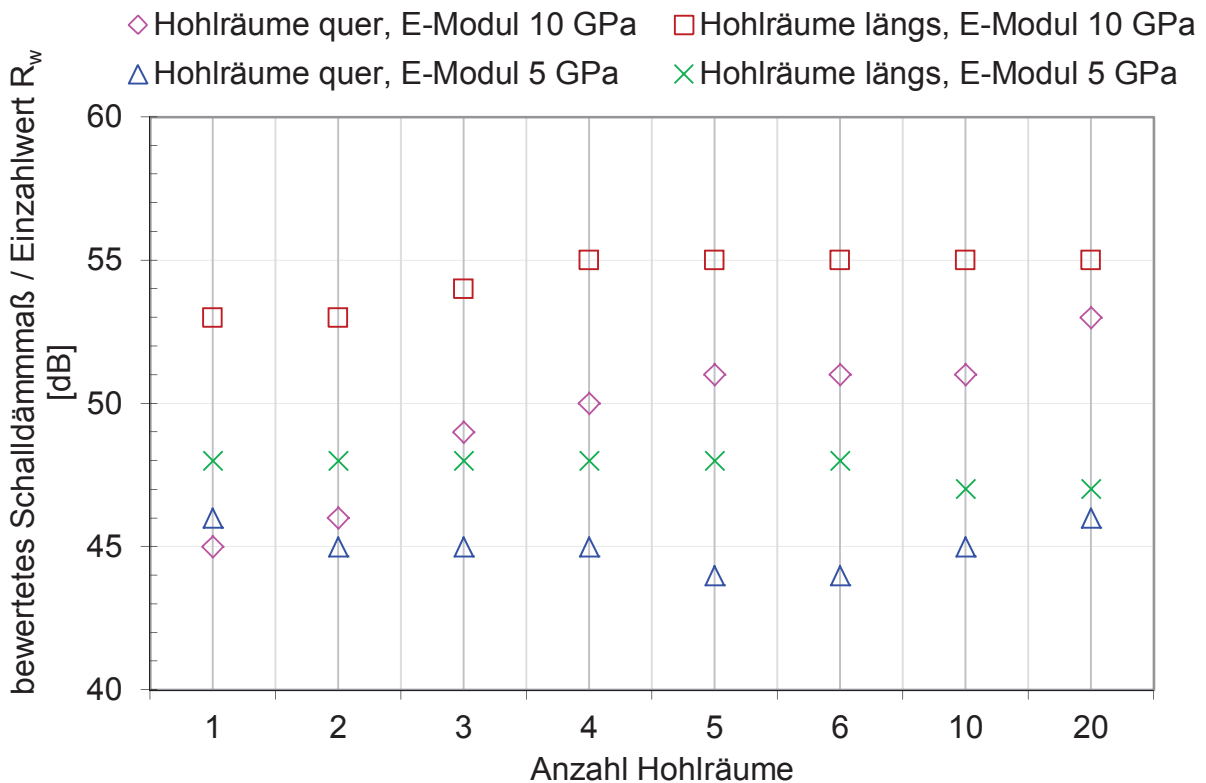


Bild 138: FE-Berechnung zum Einfluss der Anzahl der Hohlräume bzw. Stege auf das bewertete Schalldämmmaß von Hochlochziegeln. Als Modelle dienen die Modelle aus den wärmetechnischen Berechnungen. Verglichen wurden E-Moduln von $E = 5 \text{ GPa}$ und $E = 10 \text{ GPa}$ für den Scherben bei einer Poissonzahl von $\mu = 0,3$, einer Materialdämpfung von $\delta = 4 \%$ und einem Lochanteil von 60 Vol.-% (Hintz, et al., 2013)

Wird das E-Modul bei diesen Modellen von $E = 10 \text{ GPa}$ auf $E = 5 \text{ GPa}$ vermindert, wird durch eine Erhöhung der Anzahl an Längsstegen von 2 auf 7 bzw. Hohlräumen längs von 1 auf 6 keine Erhöhung des Schalldämm-Maßes über einen Wert von $R_w = 48 \text{ dB}$ herbeigeführt. Ab einer Anzahl von 10 Hohlräumen bei 11 Längsstegen sinkt das Schalldämm-Maß sogar auf $R_w = 47 \text{ dB}$ ab.

Bei gleichem Lochanteil von 60 Vol.-% und Variation der Anzahl der Querstege bei einem E-Modul von $E = 10 \text{ GPa}$ können deutlichere Effekte erhalten werden. So wird durch eine Erhöhung der Anzahl an Querstegen das Schalldämmmaß schrittweise von $R_w = 45 \text{ dB}$ auf $R_w = 51 \text{ dB}$ für 10 Lochreihen und auf $R_w = 53 \text{ dB}$ für 20 Lochreihen erhöht. Wird ein E-Modul von $E = 5 \text{ GPa}$ für die FE-Berechnungen angenommen, so kann das Schalldämmmaß gar nicht erhöht werden. Für eine Lochreihe ergibt sich ein Schalldämmmaß von $R_w = 46 \text{ dB}$

(1 dB höher als bei $E = 10$ GPa) welches bei 5 Lochreihen auf $R_w = 44$ dB absinkt und sich ab 10 Lochreihen wieder auf $R_w = 45$ dB erhöht.

Bei einem E-Modul von 10 GPa führt eine Variation der Steganzahl zur einer signifikanten Veränderung des Schalldämmmaßes, während bei einem E-Modul von $E = 5$ GPa kaum mehr Effekte durch Veränderung der Steganzahl erzielt werden.

Generell wirken sich durchgehende Stege in Längsrichtung, also in Richtung des Wärmestroms, sehr positiver auf den Schallschutz. Dies ist möglicherweise auf die aussteifende Wirkung dieser Stege in Bezug auf die Dickenschwingungen der Hochlochziegel zurück zu führen.

Darüber hinaus liegen die Schalldämmmaße der Modelle mit einem E-Modul von $E = 10$ GPa über den Schalldämmmaßen der Modelle mit einem E-Modul von $E = 5$ GPa. Die größte Differenz des Schalldämmmaßes in Bezug auf die E-Moduln findet sich bei den Längsstegen mit einer Differenz von $\Delta R_w = 5$ dB bis $\Delta R_w = 8$ dB.

Die Differenz für die Modelle mit den Querstegen beträgt dagegen $\Delta R_w = 1$ dB bis $\Delta R_w = 6$ dB.

6.4. Kurzzusammenfassung der schallschutztechnische Berechnungen

Die Berechnung des Schalldämmmaßes konnte nicht an einem einzelnen Stein erfolgen, da hierfür keine mit Messungen vergleichbaren Ergebnisse vorlagen. Um die Berechnung einer ganzen Wand aus Ziegeln vornehmen zu können, musste zunächst ein Äquivalentmaterial definiert werden. Dieses Äquivalentmaterial zeichnet sich durch dieselben elastischen Materialeigenschaften aus, wie die zu homogenisierende Materialstruktur aus beispielsweise Ziegeln mit Mörtel und Putz. Die Berechnung des Schallübergangs erfolgte mittels gekoppelter Berechnung unter Verwendung der Finite-Elemente-Methode (FEM) für die Struktur und der Rand-Element-Methode (BEM) für die Kopplung zwischen Schallausbreitung im Fluid und der Struktur. Ein Abgleich der Simulationsergebnisse erfolgte im Fall des Ziegel C mit einer entsprechenden Messung im Schallprüfstand. Hierbei konnte eine gute Übereinstimmung mit den Messergebnissen erreicht werden. Weiterhin wurde der Einfluss der Längs- und Querstege in Ziegeln an einfachen Modellen untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass durch die Anzahl der Längs- und Querstege das frequenzabhängige Schalldämmmaß erheblich beeinflusst wird. Besonders stark war dieser Effekt bei einem E-Modul von 10 GPa. Durch die Erhöhung der Anzahl der Längsstege von 2 auf 5 (bzw. der Hohlräume von 1 auf 4) bei gleichem Lochanteil konnte das bewertete Schalldämmmaß um $\Delta R_w = 2$ dB bei einem E-Modul von 10 GPa erhöht werden. Bei einem E-Modul von $E = 5$ GPa konnte durch eine Erhöhung der Längssteg-Anzahl keine Erhöhung des bewerteten Schalldämmmaßes mehr bewirkt werden. Auch die Anzahl der Querstege ergibt bei einem E-Modul von $E = 10$ GPa größere Unterschiede im Schalldämmmaß, als bei einem

E-Modul von $E = 5$ GPa. Bei einem E-Modul von $E = 10$ GPa kann das bewertete Schalldämmmaß von $R_w = 45$ dB bei 2 Querstegen (einer Lochreihe) auf $R_w = 49$ dB bei 4 Querstegen bzw. 3 Lochreihen und gleichbleibendem Lochanteil erhöht werden. Eine weitere Erhöhung des bewerteten Schalldämmmaßes auf $R_w = 51$ dB kann durch 6 bis 11 Querstege (bzw. 5 bis 10 Lochreihen) erreicht werden. Durch 21 Querstege bzw. 20 Lochreihen wird das bewertete Schalldämmmaß nochmals um $\Delta R_w = 2$ dB auf $R_w = 53$ dB verbessert. Die Anzahl der Querstege im Ziegellochbild trägt demnach entscheidend zu den Schallschutzeigenschaften bei. Eine große Anzahl an Querstegen verbessert den Schallschutz, wenn das E-Modul des keramischen Scherbens etwa bei $E = 10$ GPa liegt. Bei einem E-Modul von 5 GPa kann durch eine Erhöhung der Anzahl der Querstege ein geringer Effekt, je nach Modell von je 1 dB erreicht werden.

Es kann angenommen werden, dass sich bei realen Ziegeln mit Längs- und Querstegen die Effekte überlagern.

7. Diskussion und Zusammenfassung

Charakterisierung verschiedener Beschichtungsmaterialien

In der vorliegenden Arbeit wurden Untersuchungen zur Verminderung des Wärme- und Schallübergangs in Hochlochziegeln durchgeführt. Die Verminderung des Wärmestrahlungsübergangs wird durch eine Absenkung des **Emissionskoeffizienten** bewirkt, welcher theoretisch Werte **zwischen 1,0 (idealer schwarzer Strahler) und 0,0 (ideal reflektierend)** annimmt. Ein Hauptziel dieser Arbeit bestand somit darin, den Emissionskoeffizienten ε durch entsprechende Ausrüstung der **keramischen Ziegeloberfläche** ausgehend von $\varepsilon = 0,93 - 0,97$ so weit wie möglich abzusenken. Dadurch ergibt sich ein enormes Verbesserungspotential für die Wärmedämmung von Hochlochziegeln durch Reduzierung der Wärmestrahlungsverluste.

Durch geeignete Wahl der Garbrandtemperatur, Brennraumatmosfera oder Tonsorte konnte keine nennenswerte Absenkung des Emissionskoeffizienten bewirkt werden. Dies resultiert aus der fehlenden elektrischen Leitfähigkeit, die für einen niedrigen Emissionskoeffizienten benötigt wird.

Um den Emissionskoeffizienten von Ziegelkeramik abzusenken, wurde eine Vielzahl unterschiedlicher Beschichtungssubstanzen untersucht. Die niedrigsten Emissionskoeffizienten konnten bei metallischen Pigmenten und metallischen Dünnschichten gemessen werden. Auch eignen sich einige Graphitsorten als Beschichtungssubstanzen mit niedrigen Emissionskoeffizienten, aber meist nur nach einem mechanischen Poliervorgang. Mit den Graphiten „**Grapheniumflocke flaggy flakes**“ wurde ein Emissionskoeffizient von $\varepsilon = 0,466$ und mit „**Grapheniumflocke 5 – 10 mm**“ ein Emissionskoeffizient von $\varepsilon = 0,501$ in unpoliertem Zustand gemessen. Nach einem **mechanischen Poliervorgang** zeigen die Graphite „**SGA 20 99,9**“ mit $\varepsilon = 0,440$ und „**Graphit Mix 2**“ mit $\varepsilon = 0,459$ die niedrigsten Emissionskoeffizienten der Graphitversuchsreihe.

Bei den Aluminiumpigmenten wurde der niedrigste Emissionskoeffizient beim System Ziegel/Aluminiumpigment ermittelt. Eine Beschichtung der Ziegeloberfläche mit dem Pigment „**Blitz Aluminiumpaste Maxal 66012 SI/70 BG**“ führte zu einer Minderung des Emissionskoeffizienten von $\varepsilon = 0,976$ auf $\varepsilon = 0,306$. Eine vergleichbare Verminderung konnte das Aluminiumpigment „**Blitz Aluminiumpulver Aquaral 6221/63 W**“ auf $\varepsilon = 0,339$ bewirken, während mit „**STAPA IL Hydrolan 212 Nr. 55900/G Aluminium**“ ein Wert von $\varepsilon = 0,363$ erreicht wird. Auch Kupfer- und Goldbronzepigmente eignen sich als Beschichtung mit niedrigem Emissionskoeffizienten.

Bei der Beschichtung von Ziegelkeramik mit Kupfer- und Goldbronzepigmenten wurde mit „**Blitz Kupferpulver G 2021**“ ein Emissionskoeffizient von $\epsilon = 0,367$ und mit „**Goldbronzepulver Luminor 2210-01 Kupfer**“ ein Wert von $\epsilon = 0,389$ erreicht. Mit „**Blitz Goldbronzepulver G 2021 Bleichgold**“ konnte eine Minderung des Emissionskoeffizienten auf $\epsilon = 0,395$ herbeigeführt werden. Metallische Dünnschichten aus Silber oder Gold eigneten sich aufgrund der Oberflächenrauigkeit der Ziegelkeramik und der resultierenden verstärkten thermischen Leitfähigkeit der durchgehenden Metallschicht nicht für die Beschichtung von Ziegeln zur Verminderung des Wärmeübergangs.

Es konnte gezeigt werden, dass folgende Faktoren für einen niedrigen Emissionskoeffizienten der Beschichtung maßgebend sind:

- **Hohe elektrische Leitfähigkeit des Beschichtungsmaterials**
- **Geeignete Korngröße von $d_{50} \sim 50 \mu\text{m}$ oder geschlossene Schicht**
- **Möglichst großes Verhältnis von Länge zu Dicke des Partikels**
- **Niedrige Oberflächenrauigkeit des Beschichtungssubstrates**

Messungen an Hochlochziegeln

Mit ausgewählten Hochlochziegeln der Projektpartner erfolgten Beschichtungsversuche des gesamten Lochgitters mit anschließenden Halbsteinmessungen zur Bestimmung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten. Je nach Lochbild konnten durch die Beschichtung mit dem Pigment „Goldbronzepulver Luminor 2210“ unterschiedliche Absenkungen der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit erzielt werden. Für **Ziegel E** mit einer **äquivalenten Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{\text{äquiv.}} = 0,097 \text{ W/mK}$** wurde eine **Absenkung um 11,3 %** auf **$\lambda_{\text{äquiv.}} = 0,086 \text{ W/mK}$** erreicht. Für den **Ziegel C** (unverfüllt) wurde die **äquivalente Wärmeleitfähigkeit** sogar um **29,5 %** von **$\lambda_{\text{äquiv.}} = 0,214 \text{ W/mK}$** auf **$\lambda_{\text{äquiv.}} = 0,151 \text{ W/mK}$** abgesenkt. Mit einer Beschichtung des **Ziegels B** konnte die äquivalente Wärmeleitfähigkeit von **$\lambda_{\text{äquiv.}} = 0,120 \text{ W/mK}$** auf **$\lambda_{\text{äquiv.}} = 0,103 \text{ W/mK}$** , um **14,2 %**, reduziert werden. Erfolgte eine Beschichtung des **Ziegels A**, war eine Verminderung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit von **$\lambda_{\text{äquiv.}} = 0,128 \text{ W/mK}$** auf **$\lambda_{\text{äquiv.}} = 0,105 \text{ W/mK}$** , um **17,9 %**, erreichbar. Eine Absenkung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit von **$\lambda_{\text{äquiv.}} = 0,143 \text{ W/mK}$** auf **$\lambda_{\text{äquiv.}} = 0,119 \text{ W/mK}$** , entsprechend **16,8 %**, konnte bei Beschichtung des **Ziegel D** erreicht werden. Wurde **Ziegel F** (unverfüllt) beschichtet, konnte eine Absenkung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit von **$\lambda_{\text{äquiv.}} = 0,121 \text{ W/mK}$** auf **$\lambda_{\text{äquiv.}} = 0,090 \text{ W/mK}$** um **25,6 %** bewirkt werden. Auch bei **Ziegel G** konnte eine Verminderung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit um **28 %** von **$\lambda_{\text{äquiv.}} = 0,197 \text{ W/mK}$** auf **$\lambda_{\text{äquiv.}} = 0,141 \text{ W/mK}$** herbeigeführt werden.

Im Mittel konnte die **äquivalente Wärmeleitfähigkeit** der aufgeführten Ziegel durch die Beschichtung um **15 % vermindert** werden.

Die mögliche Absenkung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit von Hochlochziegeln durch eine Beschichtung mit niedrigem Emissionskoeffizienten wird dabei durch folgende Faktoren beeinflusst:

- **Lochbild des Ziegels und daraus resultierend Anteil der Wärmestrahlung**
- **Scherbenwärmeleitfähigkeit $\lambda_{10, \text{tr}}$ des keramischen Scherbens**
- **Emissionskoeffizient des beschichteten Scherbens**

Im Rahmen dieser Arbeit ist es gelungen, die Ziegeloberflächen mit metallischen Pigmenten derart zu beschichten, dass der **Emissionskoeffizient von $\varepsilon \sim 0,96$ auf $\varepsilon = 0,63$** (für Ziegel D) **bis $\varepsilon = 0,35$** (für Ziegel C) abgesenkt werden konnte (Tabelle 6).

Untersuchungen an Modellziegeln

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Verfahren entwickelt, dass die **Aufstellung einer Wärmebilanz** aus Strahlung, Leitung und Konvektion für Ziegel und andere Wandbaustoffe erlaubt. Das Verfahren zur Ermittlung der Wärmebilanzen wurde vorab an eigens hergestellten Modellziegeln bestätigt. Für die experimentelle Bestimmung der Teilwärmeströme in Modellziegeln erfolgte eine sinnvolle Erweiterung der Einplattenmessapparatur TLP 200 der Firma TAURUS zur getrennten Bestimmung des Wärmestroms durch Leitung, Strahlung und Konvektion. Damit war es möglich, Wärmebilanzen der Modellziegel aufzustellen.

Zudem konnte an den Modellziegeln **messtechnisch bewiesen** werden, dass der **Wärmeübergang durch Strahlung** unter Verwendung der entwickelten Beschichtung „**Goldbronzepulver Luminor 2210**“ **drastisch abgesenkt** werden kann. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass es unter Verwendung von Finite Elemente Verfahren möglich ist, die Wärmebilanz realer Ziegel und damit den Anteil von Strahlung, Leitung und Konvektion zu berechnen.

Die in einigen Fällen etwas höheren Abweichungen zwischen FE-Berechnung und Messung können auf die verschiedenen getroffenen Annahmen und Näherungen zur Aufstellung der Wärmebilanzen zurück geführt werden. So wurde der Emissionskoeffizient als homogen über die gesamte Oberfläche angenommen. Minimale Abweichungen in den Stegdicken oder der Position der Thermolemente blieben unberücksichtigt. Der Wärmestrahlungsübergang wurde durch Messung der Oberflächentemperaturen im Modell an ausgewählten Stellen über das Stefan–Boltzmann-Gesetz bestimmt. Eine Temperaturverteilung auf der Oberfläche konnte mit dem gewählten Messverfahren über Thermolemente nicht erfasst und somit auch nicht berücksichtigt werden. Darüber hinaus erfolgte die Berechnung der Anteile der gemessenen Teilwärmeströme am Gesamtwärmestrom als Ersatzschaltung von Teilwiderständen in Analogie zum elektrischen Strom. Auch die FE-Berechnungen stellen

an sich eine Näherungslösung dar, da hier mittels eines iterativen Gleichungslösers gegen eine Fehlergrenze gerechnet wird.

Wärmetechnische Berechnungen realer Ziegel

Mit der **Finite Elemente Methode** unter Verwendung der Programme **ANSYS CFX** und **SOLIDO** konnten die äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten realer Ziegel in sehr guter Übereinstimmung mit den Messungen berechnet werden. Auch die Berechnung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit der Beschichtung unter Berücksichtigung des Emissionskoeffizienten zeigte eine gute Übereinstimmung mit den Messungen. Mit Kenntnis der Wärmebilanzen ist es künftig möglich, die Wärmedämmeigenschaften von Ziegellochbildern zu optimieren und zu beurteilen, welches Lochbild für eine Verfüllung und welches Lochbild für eine Beschichtung besser geeignet ist. Dabei ist von besonderer Bedeutung, dass die Druckfestigkeit der Ziegel erhalten bleibt, da für die Minderung der Wärmeübertragung durch Strahlung weder am Lochmuster noch an der Porosierung etwas verändert werden muss.

Für eine Beschichtung eignen sich demnach Lochbilder, welche über keinen Konvektionsanteil, über eine verhältnismäßig niedrige Scherbenwärmeleitfähigkeit und einen hohen Strahlungsanteil verfügen.

Für die in dieser Arbeit untersuchten Lochbilder wurden **Leitungsanteile von 13,29 % bis 37,02 %**, **Konvektionsanteile von 0 % bis 7,78 %** und **Strahlungsanteile von 36,96 % bis 64,67 %** in Anhängigkeit des Lochbildes berechnet.

Mit den in dieser Arbeit bezüglich der Wärmeübertragung in Ziegeln erarbeiteten Erkenntnissen können die Stegstärken der modernen sehr filigranen Ziegellochmuster wieder erhöht und trotzdem niedrige äquivalente Wärmeleitfähigkeiten der Produkte erreicht werden. Hierdurch wird eine Verbesserung der Schallschutzeigenschaften und eine Vereinfachung der Produktion bewirkt.

Einfluss der Steganordnung auf den Wärmeübergang

Um grundlegende Aussagen über den **Einfluss der Anzahl der Stege parallel und senkrecht zur Wärmestromrichtung** zu gewinnen, wurden wärmetechnische Simulationen durchgeführt. Hierzu wurden insgesamt 40 einfache Modelle mit einem **Lochanteil von jeweils 60 %** in Anlehnung an reale Hochlochziegel untersucht. Aus den durchgeführten Berechnungen wurde ersichtlich, dass nur durch eine steigende Anzahl von Stegen senkrecht zur Wärmestromrichtung die äquivalente Wärmeleitfähigkeit bei gleichem Lochanteil vermindert werden kann. Mit steigender Anzahl an Lochreihen wird der Effekt der Minderung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit immer geringer und führt zunehmend zu immer filigraneren Lochbildern, wenn nicht der Anteil der Wärmestrahlung auf andere Art

(Beschichtung, metallisierte Schirmchen und Dreieckslochung) vermindert werden kann. Bei allen untersuchten Scherben-Wärmeleitfähigkeiten zeigte sich bei Lochbildern mit jeweils **10 Hohlräumen (10 Lochreihen) senkrecht zur Wärmestromrichtung ein Maximum des Strahlungsanteils** am Wärmeübergang mit **50 – 55 %** (bezogen auf den Gesamtwärmestrom). Gleichzeitig erfolgt ab einer Lochreihenanzahl von 10 senkrecht zur Wärmestromrichtung kein Wärmeübergang durch Konvektion mehr. Das Ausgangslochbild mit 10 Lochreihen wurde im Hinblick auf einen maximierten Strahlungsübergang optimiert, da hier die Beschichtung eine maximale Absenkung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit mit geringem Aufwand herbeiführen kann. Auf diese Art können **in Verbindung** mit einer **Innenbeschichtung** der Hohlräume **filigrane Stege vermieden** und dennoch niedrige äquivalente Wärmeleitfähigkeiten erreicht werden.

Auf Grundlage dieser Berechnungen wurden **verschiedene Lochbilder** unter Berücksichtigung der in dieser Arbeit aufgestellten Theorien **entwickelt**.

Wurden die Innenseiten von **Lochbildvariante 10 Q V 5 B (10 Lochreihen)** mit einem Emissionskoeffizienten von $\varepsilon = 0,4$ ausgerüstet, kann die äquivalente Wärmeleitfähigkeit auf $\lambda_{\text{äquiv.}} = 0,078 \text{ W/mK}$ vermindert werden (Scherben-Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{10,\text{tr.}} = 0,15 \text{ W/mK}$). Dieser Wert wäre ohne Beschichtung und Verfüllung der Löcher mit Dämmstoffen erst ab ca. 35 Lochreihen erreichbar. Kann der Emissionskoeffizient auf $\varepsilon = 0,10$ abgesenkt werden (durch metallisierte Stecklinge), so sind äquivalente Wärmeleitfähigkeiten von $\lambda_{\text{äquiv.}} = 0,052 \text{ W/mK}$ erreichbar.

Schallschutztechnische Berechnungen

Auch schallschutztechnisch konnte Verbesserungspotential aufgezeigt werden.

Viele moderne höchst-wärmedämmende Ziegel zeigen aufgrund der geforderten niedrigen Scherbenwärmeleitfähigkeit eine geringe Festigkeit und demzufolge ein geringes E-Modul. Die E-Moduln der in dieser Arbeit wärmetechnisch untersuchten Ziegel wurden messtechnisch ermittelt. Für die in dieser Arbeit **untersuchten Hochlochziegel** wurden **E-Module** zwischen **E = 9,75 GPa** bis **E = 4,4 GPa** in Abhängigkeit der Scherbenrohddichte ermittelt. Dabei zeigte sich auch hier die Tendenz zu niedrigeren E-Moduln um die E = 5 GPa aufgrund der geforderten niedrigen Scherbenwärmeleitfähigkeit. Niedrigere Scherbenrohddichten führen dabei zu **niedrigen E-Moduln** und **niedrigeren Schalldämmmaßen**.

Zunächst wurde untersucht, auf welche Art das Schalldämm-Maß von Hochlochziegeln berechnet werden kann. Die Berechnung des **Schalldämmmaßes** erfolgte als **Kopplung** aus **Finite Elemente** und **Randelemente Methode**. Zum Abgleich wurde zum einen das Berger'sche Massengesetz, zum anderen die Berechnung als Einzelstein und als Ziegelwand gewählt und mit dem Messergebnis verglichen. Die Berechnung als

Ziegelwand erfolgte als **homogenes Äquivalentmaterial** mit entsprechender Steifigkeitsmatrix. Die **Steifigkeitsmatrix** wurde anhand verschiedener **Elementarzellen** mit und ohne Berücksichtigung von Putz- und Mörtelschichten **extrahiert**. Es konnte gezeigt werden, dass die **Wahl der Elementarzelle** das berechnete Schalldämmmaß nur im unteren Frequenzbereich **bis 400 Hz beeinflusst**.

Durch Wahl einer Elementarzelle mit **Berücksichtigung des Versatzes der Ziegel** in der Wand und der **Putz- und Mörtelschichten** (bezeichnet als „EiZMöPu Aniso“) wird die **beste Übereinstimmung** mit den Messergebnissen in Bezug auf den frequenzabhängigen Verlauf erhalten. Die **Abweichung** des Rechenwertes vom Messergebnis für das bewertete Schalldämmmaß beträgt **$\Delta R_w = 5$ dB**. Eine bessere Übereinstimmung für das **bewerteten Schalldämmmaß R_w** ergibt sich für die Berechnung als **Einzelstein** „Einzel-Ziegel C“ mit **$\Delta R_w = 2$ dB** oder als **Elementarzelle mit Berücksichtigung des Steinversatzes** und Vernachlässigung der Anisotropie, bezeichnet als „EiZMöPu Ziegel C Aniso“, mit **$\Delta R_w = 3$ dB**. In beiden Fällen wird aber der **frequenzabhängige Verlauf** des Schalldämmmaßes **ungenügend** abgebildet.

Eine **ausreichende Abschätzung** des Schalldämmmaßes **bis ca. 150 Hz** liefert auch das **Berger'sche Massengesetz**. Auch eine Kombination der Berechnungsmethoden kann in Betracht gezogen werden.

Mögliche Fehlerquellen für die Berechnung liegen in den Annahmen für das G-Modul, die Poissonzahl und die Dämpfung begründet. Auch waren keine Proben für Putz- und Mörtel verfügbar, sodass hier die Herstellerangaben herangezogen werden mussten. Ebenso führt eine geringfügige Variation der Putzdicke in der Messung von den für die Simulation angenommenen Werten zu Abweichungen im berechneten Schalldämmmaß.

Einfluss der Steganordnung auf das Schalldämm-Maß

Die Untersuchungen zum Einfluss der Längs- und Querstege hatten gezeigt, dass bei **niedrigeren E-Moduln von $E = 5$ GPa** der **Einfluss des Lochbildes auf den Schallschutz sehr gering** ist. Ein **großer Einfluss des Lochbildes** auf den Schallschutz kann für **E-Moduln von $E = 10$ GPa** ausgemacht werden. Auch bewirken **Längsstege ein höheres Schalldämmmaß als Querstege**. Weiterhin wird mit **steigender Anzahl an Längs- und Querstegen das Schalldämmmaß erhöht**. Somit kann in diesen Fällen eine Verbesserung des Schallschutzes nicht durch Modifikation des Lochbildes bewirkt werden. Eine **Erhöhung des E-Moduls** des keramischen Scherbens **auf $E = 10$ GPa** bewirkt dagegen eine **Verbesserung des Schallschutzes** aber auch einen Anstieg der Scherben-Wärmeleitfähigkeit und somit eine **Verschlechterung der Wärmedämmung**. Auch eine Verminderung des Lochanteils im Ziegel bewirkt zwar eine Verbesserung der Schallschutzeigenschaften führt aber gleichermaßen aufgrund der zusätzlichen

Wärmeleitung zu einer Verschlechterung der Wärmedämmung.

Durch die in dieser Arbeit entwickelte Beschichtung kann die Wärmedämmung von Hochlochziegeln ohne negative Auswirkungen auf den Schallschutz verbessert werden. Da gezeigt werden konnte, dass je ein Drittel des Wärmeübergangs in modernen Hochlochziegeln über Leitung, Strahlung und Konvektion erfolgt, ist eine Verminderung des Strahlungsanteils einer Verminderung des Leitungsanteils gleichwertig und kann stattdessen erfolgen. Eine weitere Verbesserung der Schallschutzeigenschaften in Hochlochziegeln kann durch Reduktion des Wärmestrahlungsübergangs durch Verminderung des Emissionskoeffizienten erfolgen. Gegebenenfalls besteht die Möglichkeit einer Kompensation der Wärmeleitfähigkeitserhöhung durch eine Erhöhung des E-Moduls des keramischen Scherbens durch Applizieren der Beschichtung. Auf diese Art könnten die Schallschutzeigenschaften bestehender Lochbilder verbessert werden. Dies kann leicht rechnerisch mittels FE-Simulation überprüft werden. Als Orientierung können hierzu die in Abschnitt 3 gemessenen Materialparameter für Scherben-Wärmeleitfähigkeit, Scherbenrohndichte und E-Modul und die bestimmten Korrelationen herangezogen werden.

8. Literaturverzeichnis

- 2409, DIN EN ISO. 1994.** *Lacke und Anstrichstoffe*. 1994.
- Ackermann, H. 2007.** *Dokumentation TLP 900 ZS*. [Benutzerhandbuch] Weimar : TAURUS intruments GmbH, 2007.
- Ackermann, L. 2001.** Simulation der Schalltransmission durch Wände, Dissertation. 2001.
- Agashe, C. 1996.** Effect of heavy doping in SnO₂:F films. *Journal of materials science*. 1996, 31.
- Alhazmy, M. M. 2010.** Numerical investigation on using inclined partitions to reduce natural convection inside the cavities of hollow bricks. *International Journal of Thermal Sciences*. 2010, 49.
- ANSYS 12.1 Help.
- Antes, H. 1988.** *Anwendungen der Methode der Randelemente in der Elastodynamik und der Fluidodynamik*. Stuttgart : B. G. Teubner, 1988.
- Arendt, K., Krzaczek, M. und Florczuk, J. 2011.** Numerical analysis by FEM and analytical study of the dynamic thermal behavior of hollow bricks with different cavity concentration. *International journal of Thermal Sciences*. 2011, 50.
- Astley, R. J. 2000.** Infinite elements for wave problems: a review of current formulations and an assesment of accuracy. *International Journal for Nummerical Methods in Engineering*. 2000, S. 951-976.
- Atalla, N. und Bernhard, R. J. 1994.** Review of numerical solutions for low frequency structural-acoustic problems. *Applied Acoustics*. 1994, S. 271-294.
- Aung, W. 1972.** Fully developed laminar free convection between vertical plates heated asymmetrically. *Int. J. Heat Mass Transfer* 15. 1972.
- Balcomb, J. D. 1992.** *Passive solar buildings (solar heat technologies and applications)*. Cambridge : The MIT Press, 1992.
- Beblo, M. 1997.** *Umweltgeophysik*. Berlin : Ernst Sohn Verlag, 1997.
- Beerens, C. 1994.** Zur Modelierung nichtlinearer Dämpfungsphänomene in der Strukturmechanik. *Mitteilungen aus dem Institut für Mechanik der Ruhr-Universität Bochum*. 1994, Bd. 91.
- Bendiganavale, A. K. und Malshe, V. C. 2008.** Infrared Reflective Inorganic Pigments. *Recent Patents on Chemical Engineering*. 2008, S. 67 - 79.
- Berning, P. H. 1983.** Principles of design of architectural coatings. *Appl Opt*. 1983, Bd. 22, 24.
- Betten, J. 1985.** *Elastizitäts- und Plastizitätslehre*. Braunschweig, Wiesbaden : Vieweg & Sohn, 1985.
- Beuken, D. L.: 1936.** *Wärmeverluste bei periodisch betriebenen Öfen*. Freiburg : Dissertation, 1936.
- Bock, R. 2001.** *Handbuch der analytisch-chemischen Aufschlussmethoden*. s.l. : Wiley-VCH Verlag GmbH, 2001.
- Bohren, C. F. und Huffmann, D. R. 1983.** *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*. New York : John Wiley & Sons, 1983.
- Bouchair, A. 2007.** Steady state theoretical model of fired clay hollow bricks for enhanced external wall thermal insulation. *Building and Environment*. 2007, 43.
- Brüderle, Rainer. 2010.** bmwi. [Online] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, September 2010. [Zitat vom: 31. März 2011.]
- Bucur, V., Lancelleur, P. und Roge, B. 2002.** Acoustic properties of wood in tridimensional representation of slowness surface. *Ultrasonics*. 2002, 40.
- Carcatterra, A. und Sestieri, A. 1997.** Complex displacement analysis: a quasistatic approach to vibrations. *Journal of Sound and Vibration*. 1997, S. 205-233.
- Carmody, J., et al. 2003.** *Window systems for high-performance buildings*. New york : Norton Professional Books, 2003.
- Cos Diaz, J. J., et al. 2010.** Sound transmission loss analysis through a multilayer lightweight concrete hollow brick wall by FEM and experimental validation. *Building and Environment*. 45, 2010.
- Coz Diaz, J. J., et al. 2007.** Analysis and optimization of the heat-insulating light concrete hollow brick walls design by finite element method. *Applied Thermal Engineering*. 2007, 27.
- Cremer, L. 1942.** Theorie der Schalldämmung dünner Wände bei schrägem Einfall. *Akustische Zeitschrift*. 1942, S. 81-104.
- Custodio-Garcia, E., et al. 2005.** Solar condiction heat transfer in fired clay bricks. *Solar Energy Materials & Solar Cells*. 2005, 88.

- Czerny, M. und Walther, A. 1961.** *Tables of the fractional functions for the Planck Radiation Law.* Berlin, Göttingen, Heidelberg : Springer Verlag, 1961.
- Czycholl, G. 2008.** *Theoretische Festkörperphysik.* Heidelberg : Springer, 2008.
- Demtröder, W. 2006.** *Experimentalphysik 2 (Elektrizität und Optik).* Berlin Heidelberg New York : Springer, 2006.
- Deutsches Institut für Normung. 1999.** Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattenstrommessgerät. s.l. : Beuth-Verlag, 1999. Bd. EN 12667.
- Dien, E., Laurent, J. M. und Smith, A. 1999.** Comparison of Optical and Electrical Characteristics of SnO₂-based Thin Films Deposited by Pyrosol from Different Tin Precursors. *Journal of the European Ceramic Society.* 1999, 19.
- Dondi, M., et al. 2004.** Thermal conductivity of clay bricks. *Journal of Material Civil Engineering.* 2004, 16.
- Duffie, J. A. und Beckman, W. A. 1991.** *Solar engineering of thermal processes.* New York : John Willey & Sons, 1991.
- Durst, F. 2006.** *Grundlagen der Strömungsmechanik.* Erlangen : Springer-Verlag, 2006.
- Eckertova, L. 1990.** *Physics of thin films.* New York : Plenum Press, 1990.
- Erker, A. 2002.** The thermal conductivity of the brick ceramic body (part 1). *Ziegelindustrie International.* 2002, 55.
- Erker, A. 2002b.** The thermal conductivity of the brick ceramic body (part 2). *Ziegelindustrie international.* 2002b, 55.
- Fahy, F. J. 1985.** *Sound and Structural Vibration.* London : Academic Press, 1985.
- Fluke Corporation 1995 - 2011.** www.Fluke.com. [Online] Fluke Corporation 1995 - 2011. [Zitat vom: 18. Mai 2011.]
- Frey, H. 1987.** *Dünnschichttechnologie.* Düsseldorf : VDI-Verlag, 1987.
- Gaul, L. und Fiedler, C. 1997.** *Methode der Randelemente in Statik und Dynamik.* Wiesbaden, Braunschweig : Friedrich Vieweg & Sohn, 1997.
- Giese, P. und Brasse, H.** www.geophysik.uni-kiel.de. *www.geophysik.uni-kiel.de.* [Online] [Zitat vom: 28. 07 2011.]
- Givoldi, D. 1992.** Numerical methods for problems in infinite domains. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering.* 1992.
- Gordon, R. G. 2000.** Criteria for Choosing Transparent Conductors. *MRS Bulletin.* 2000, 25.
- Gösele, K. 1990.** Zur Längsleitung über leichte Außenwände. *Bauphysik.* 1990, S. 145-150.
- Gösele, K. 1990.** Verringerung der Luftschalldämmung von Wänden durch Dickeresonanzen. *Bauphysik.* 1990, S. 187-191.
- Gummerson, R. J., Hall, C. und Hoff, W. D. 1981.** The suction rate and the sorptivity of brick. *British Ceramic Transactions and Journal.* 1981.
- Hall, C., Hoff, W. D. und Prout, W. 1992.** Sorptivity-porosity relations in clay brick ceramic. *American ceramic Society Bulletin.* 1992.
- Hamberg, I. und Granqvist, C. G. 1986.** Evaporated Sn-doped 10203 films: Basic optical properties and applications to energy-efficient windows. *Journal of Applied Physics.* 1986, 60.
- Hamdan, F. H. und Dowling, P. J. 1995.** Fluid-structure interaction: application to structures in an acoustic fluid medium, part I: an introduction to numerical treatment. *Engineering Computation.* 1995, S. 749-758.
- Häring, S., Günther, K. und Klausen, D. 1996.** *Technologie der Baustoffe: Handbuch für Studium und Praxis.* Heidelberg : C. F. Müller Verlag, 1996.
- Hintz, B. und Krcmar, K. 2012.** *Verbesserung der Wärmedämmung von Hochlochziegeln durch Reduzierung der Strahlungsverluste bei gleich bleibender Druckfestigkeit.* Nürnberg : Allianz Industrie Forschung (AiF), 2012. 1735 X 08.
- Hintz, B., et al. 2010.** *Keramische Charakterisierung von Ziegelproben bei reduzierendem und oxidierendem Brand.* Nürnberg : Innovationsring Hintermauerziegelindustrie, 2010.
- Hintz, B., Pöllmann, H. und Krcmar, W. 2013.** *Transmission loss of brick walls using FEM-BEM coupling.* Nürnberg : Technische Hochschule Nürnberg, 2013.
- Hintz, B., Pöllmann, H. und Krcmar, W. 2012.** Reduktion von Wärmestrahlungsverlusten - Ein neues Konzept zur wärmetechnischen Altbausanierung. *B+B Forum.* 2012.

- Hoffman, D. und Niesel, K. 1988. Quantifying capillary rise in columns of porous material. *American Ceramic Society Bulletin*. 1988.
- Hottel, H. C. und Sarofim, A. F. 1967. *Radiative Transfer*. New York : McGraw-Hill, 1967.
- Huijuan, Y., et al. 2009. Effects of size, shape and floatage of Cu particles on the low infrared. *Progress in Organic Coatings*. 2009, 66.
- Hunklinger, Siegfried. 2009. *Festkörperphysik*. s.l. : Oldenbourg Verlag, 2009.
- Huon, V., et al. 2007. Elastic behavior of anisotropic terra cotta ceramics determined by kinematic full-field measurements. *Journal of the European Ceramic Society*. 2007, 27.
- Incopera, F. P. und DeWitt, D. P. 2006. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. New York : John Wiley and Sons Ltd Verlag, 2006.
- Incropera, F. P. und DeWitt, D. P. 2001. *Introduction to Heat Transfer*. New York : Wiley, 2001.
- Jacqus, G., et al. 2011. A homogenised vibratory model for predicting the acoustic properties of hollow brick walls. *Journal of Sound and Vibration*. 2011.
- Jean, P. und Joubert, G. 2006. A decoupled vibro acoustic extension of FEM Application to laboratory modelling. *Building Acoustics*. 12, 2006.
- Jean, P. und Villot, M. 2006. Finite element modelling of sound transmission through heavy heterogeneous masonry. *Proceedings of the EURONOISE*. 2006.
- Jiapeng, S. und Liang, F. 2009. Numerical simulation of concrete hollow bricks by the finite volume method. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2009, 52.
- Jiapeng, S., Liang, F. und Han, J. 2010. Optimization of concrete hollow brick using hybrid genetic algorithm combining with artificial neural networks. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2010, 53.
- Johnson, ET. 1991. *Low-e glazing design guide*. Boston : Butterworth Architecture, 1991.
- Kaganer, M. G. 1969. *Theraml insulation in cryogenic engineering*. Jerusalem : IPST Press, 1969.
- Kerschberger, A., Platzer, W. und Weidlich, B. 1997. *Transparente Wärmedämmung: Produkte, Projekte, Planungshinweise*. Wiesbaden, Berlin : Bauverlag, 1997. 3-7625-3444-6.
- Kerschenberger, A. 1997. *TWD Transparente Wärmedämmung*. Wiesbaden und Berlin : Bauverlag, 1997.
- Kittel, Ch. 2002. *Einführung in die Festkörperphysik*. Wien : Oldenbourg Verlag, 2002.
- Kleber, W., et al. 2010. *Einführung in die Kristallographie*. München : Oldenbourg Verlag, 2010.
- Knittl, Z. 1976. *Optics of thin films*. London : John Wiley & Sons, 1976.
- Koch, S. und Maysenhölder, W. 1990. Zur Schalldämmung von Mauerwerk - Einfluß des Steinmaterials und der Steingeometrie. *Fortschritte der Akustik*. 1990, S. 203-206.
- Kohnke, P. 2009. *Theory Reference for the Mechanical APDL and Mechanical Applications*. Canonsburg, USA : ANSYS, Inc., 2009.
- Kollmann, G. F., Schösser, F. T. und Angert, R. 2006. *Praktische Maschinenakustik*. Berlin : Springer, 2006.
- Kreith, F. und Bohn, M. S. 2000. *Principles of Heat Transfer*. New York : Thomson-Engineering, 2000.
- Langeheinecke, K., Jany, P. und Thielke, G. 2011. *Thermodynamik für Ingenieure*. s.l. : Springer, 2011. S. 241-284.
- Langer, S. 2001. *Schalltransmission durch Isolierverglasung*, Dissertation. 2001.
- Lerch, R., Sessler, G. und Wolf, D. 2009. *Technische Akustik*. Erlangen, Frankfurt, Darmstadt : Springer-verlag, 2009. 978-3-540-23430-2.
- Li, L. P., et al. 2008. Numerical thermal optimization of the configuration of multi-holed clay bricks for constructing building walls by the finite volume method. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2008, 51.
- Lide, D. R. 2009. *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. Florida : CRC Taylor & Francis, 2009.
- LMS International. 2012. *LMS Virtual-Lab FEM-Acoustics*. Leuven, Belgium : LMS International, 2012.
- Lohmeyer, G., Bergmann, H. und M., Post. 2005. *Praktische Bauphysik: Eine Einführung mit Berechnungsbeispielen*. Wiesbaden : Teubner, 2005.
- Manara, J., Caps, R. und Fricke, j. 2005. Characterization of the Pore Structure of Ceramics via Propagation of Light and Infrared Radiation. *International Journal of Thermophysics*. 2005, 26.
- Manara, J., et al. 2011. Polymer-based pigmented coatings on flexible substrates with spectrally selective characteristics to improve the thermal properties. *Progress in Organic Coatings*. 2011, 70.

- Marek, R. und Nitsche, K. 2007.** *Praxis der Wärmeübertragung: Grundlagen - Anwendungen - Übungsaufgaben.* München : Hanser Fachbuchverlag, 2007.
- Maysenhölder, W. 1993.** Kann die Schalldämmung einer gemauerten Wand aus dem Schwingungsverhalten eines einzelnen Steins berechnet werden? *Bauphysik.* 1993, S. 50-57.
- Maysenhölder, W., 1996.** Low frequency sound transmission trough periodically inhomogeneous plates with arbitrary local anisotropy and arbitrary global symmetry. *Acustica.* 1996, Bd. 82.
- Maysenhölder, W. 1991.** *Erster experimenteller Nachweis eines Sperrbandes für Dickenschwingungen in einer gemauerten Wand.* s.l. : Frauenhofer-Institut für Bauphysik, 1991.
- Maysenhölder, W. und Haberkern, R. 2003.** Sound transmission through periodically inhomogeneous plates: solution of the general problem by a variational formulation. *Acta Acustica.* 2003, 89.
- McCulloch, C. und Estorff, O. 2000.** Zur effektiven numerischen Modellierung des Schalldurchgangs durch Strukturen. *Fortschritte der Akustik.* 2000.
- Mills, A. F. 1998.** *Heat Transfer.* New York : Prentice Hall, 1998.
- Mohelnikova, J. 2009.** Materials for reflective coatings of window glass applications. *Construction and Building Materials.* 2009, 23.
- Moosrainer, M. 2013.** *Technical Acoustics for Mechanical Engineering.* Garching bei München : CADFEM GmbH, 2013.
- Mortimer, C.E. 2003.** *Das Basiswissen der Chemie.* Stuttgart : Thieme Verlag, 2003.
- Möser, M. 2012.** *Technische Akustik.* Berlin : Springer, 2012.
- Nascu, H. 2004.** CuS thin films obtained by spray pyrolysis. *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies.* 2004, 4.
- Ngohe-Ekam, P. S., et al. 2006.** Thermophysical characterisation of tropical wood used as building materials: with respect to the basal density. *Construction and Building Materials.* 2006, 20.
- Owen, D. R.J. und Figueiras, J. A. 1983.** Anisotropic elasto-plastic finite element analysis of thick and thin shells. *International Journal for Numerical Methods in Engineering.* 1983, S. 541-566.
- Palik, E. D. 1991.** *Handbook of optical constants of solids.* New York : Academic Press, 1991.
- Papadopoulos, C.I. 2002.** Development of an optimised, standard-compliant procedure to calculate sound transmission loss: design of transmission rooms. *Applied Acoustics.* 63, 2002.
- Pasculli, A. und Sciarra, N. 2001.** *numerical one-dimensional modelling of water transport through a porous material under saturated and unsaturated condition: parametric studies.* 2001.
- Penz, A. 2008.** *Herstellung und Charakterisierung von transparenten und leitfähigen Schichten.* Aachen : RWTH, 2008.
- Petersdorff, C., Boermans, T. und Harnisch, T. 2006.** Mitigation of CO2 emissions from the EU-15 building stock. Beyond the EU directive on the energy performance of. *Environmental Science and Pollution Research.* 2006, 13.
- Pfaff, G. 2007.** *Spezielle Effektpigmente.* Hannover : Vincentz Network GmbH & Co. KG, 2007.
- Physik, Institut für theoretische. Einführung in die Tensoranalysis.** [Vorlesung] Freiberg : TU-Freiberg.
- Pickett, G. 1945.** Equations for computing elastic constants from flexural and torsional resonant frequencies of vibration of prisms and cylinders. *Am. Soc. Testing Mats.* 1945, Vol.45.
- Quan-Bao, M., et al. 2008.** Highly Infrared Reflective Behavior of Transparent Conductive ZnO:Ga Films Synthesized by DC Reaktive Magnetron Sputtering. *ChemPhysChem.* 2008, 9.
- Rajakumar, C. und Ali, A. 1996.** Boundary element-finite element coupled eigenanalysis of fluid-structure systems. *International Journal for Numerical Methods in Engineering.* 1996, S. 1625-1634.
- Razeghi, M. 2009.** *Technology of Quantum devices.* Berlin : Springer-Verlag, 2009.
- Rimpel, E. 1998.** Influence of mineral constituents and equilibrium moisture on the thermal conductivity of bricks. 1998.
- Rimpel, E. 2001.** Examination of the influence of moisture on thermal conductivity, Part 1. 2001.
- Rosseland, S. 1936.** *Theoretical Astrophysics.* s.l. : Oxford University Press, 1936.
- Rudolf Ernst GmbH & Co. KG.** www.ernst-gun.de. [Online] [Zitat vom: 08. 11 2012.]
- Ruf, E. 1990.** *Verfahren zur Herstellung elektrisch leitender, IR-reflektierender fluordotierter Zinnoxidschichten auf der Oberfläche von Gegenständen aus Glas oder Keramik oder von Emailbeschichtungen und*

- Zubereitung zum Aufbringen solcher Schichten. 0 396 994 B1* Essen, 14. 11 1990. Europäische Patentschrift.
- Russo, B. 2008.** Fabrication and characterization of fluorine-doped thin oxide films and nanorod arrays via spray pyrolysis. *Applied Physics. Materials Science & Processing*, 2008.
- Santos, D.M.C., Pertence, A.E.M. und Cetlin, P.R. 2005.** The development of 3D models through rapid prototyping concepts. *Journal of Materials Processing Technology*. 168, 2005, 2.
- Schack, K. 1983.** *Der industrielle Wärmeübergang*. Düsseldorf : Verlag Stahleisen GmbH, 1983.
- Schäffer, H., Bruy, E. und Schelling, G. 2005.** *Baustoffkunde: Aufbau und Technologie, Arten und Eigenschaften, Anwendung und Verarbeitung der Baustoffe*. Würzburg : Vogel Buchverlag, 2005.
- Schmidt, H. 1985.** Relationship between the equilibrium moisture content and the material properties of masonry bricks. 1985.
- Schramm, Christian, et al. 2007.** *Weißes, IR-Strahlung reflektierendes Pigment, dessen Herstellung und Verwendung. WO 2007076967 20070712* Deutschland/Fürth, 12. Juli 2007.
- Seybert, A. F., Wu, T. W. und Li, W. L. 1993.** A coupled FEM/BEM for fluid-structure interaction using Ritz vector and eigenvectors. *Journal of Vibration and Acoustics*. 1993, S. 152-158.
- Siegel, R. und Howell, J. R. 1981.** *Thermal Radiation-Heat Transfer*. Washington : McGraw-Hill, 1981.
- Sommerfeld, A. 1978.** *Partielle Differenzialgleichungen in der Physik*. Frankfurt/Main : Harri Deutsch, 1978.
- Spinner, S. und Tefft, W. E. 1961.** *ASTM Vol 61: Method for determining mechanical resonance frequencies and for calculation of elastic moduli from these frequencies*. 1961.
- Spinner, S., Reichard, T. W. und Tefft, W. E. 1960.** A comparison of experimental and theoretical relations between Young's Modulus and flexural and longitudinal resonance frequencies of uniform bars. *Journal of Research*. 1960, Vol.64 A.
- Steinhoff, E., Fürst, D. und Blatter, E. 1998.** *Wärmereflektierende Schicht, Verfahren zur Herstellung einer wärmereflektierenden Beschichtung und deren Verwendung*. 3186 Düdingen (CH), 09. 11 1998.
- Sveda, M. 1998.** Influence of equilibrium humidity on the thermal conductivity of brick products. *Ziegelindustrie international*. 1998, 51.
- Ullermann, K. 2005.** *Baumaterialien mit einer vor Elektrosmog schützenden und/oder wärmedämmenden Ausrüstung*. Deutschland/Bayern, 15. 12 2005.
- Ullermann, K., Gehlken, P. L. und Hintz, B. 2008.** *Technische Charakterisierung von Kaolinen: Untersuchung der technischen Eigenschaften in Abhängigkeit von der Mineralogie, der chemischen Analyse und der Korngröße*. Nürnberg : Innovationsring Hintermauerziegelindustrie, 2008.
- Veluchamy, P., et al. 2001.** A pyrosol process to deposit large-area SnO₂:F thin films and its use as a transparent conducting substrate for CdTe solar cells. *Solar Energy Materials & Solar Cells*. 2001, 67.
- Vivancos, J. L., et al. 2009.** A new model based on experimental results for the thermal characterization of bricks. *Building and Environment*. 2009, 44.
- von Böckh, Peter und Wetzler, Thomas. 2009.** *Wärmeübertragung: Grundlagen und Praxis*. Heidelberg Dordrecht London New York : Springer, 2009. 978-3-642-03043-7.
- Vöth, S. 2006.** *Dynamik schwingungsfähiger Systeme*. Wiesbaden : Vieweg & Sohn Verlag, 2006.
- Wagh, A.S. 1993.** Porosity dependence of thermal conductivity of ceramics and sedimentary rocks. *Journal of Material Science*. 1993, 28.
- Wallrabe, A. 2001.** *Nachtsichttechnik*. Braunschweig und Wiesbaden : Vieweg, 2001.
- Weber, L. und Buckle, A. 1998.** Schalldämmung von Lochsteinen - neue Erkenntnisse . *Bauphysik*. 1998, 20.
- Wigginton, M. 1996.** *Glass in architecture*. London : Phaidon press Ltd., 1996.
- Wilhelm, S., et al. 2000.** *Die konfokale Laser Scanning Mikroskopie - Grundlagen*. Jena : Carl Zeiss, 2000.
- Wolfe, W. L. und Zissis, G. J. 1987.** *The infrared Handbook*. Michigan : Environmental Research of Center Michigan, 1987.
- Wu, T. W. und Dandapani, A. 1994.** A boundary element solution for sound transmission through thin panels. *Journal of Sound and Vibration*. 1994, S. 145-157.

9. Anhang

9.1. Übersicht der untersuchten Beschichtungsstoffe

Tabelle 30: Übersicht der verwendeten Kupfer- und Kupfer-Zinkpigmente

Bezeichnung	Material	Hersteller
Zinkoxid CF 4m ² /g	Zink-Oxid	Georg H. Luh GmbH
Goldbronzepulver Offset 6340	Kupfer-Zink-Legierung	Schlenk
Goldbronzepulver Multiprint 4350	Kupfer-Zink-Legierung	Schlenk
Goldbronzepulver Multiprint 4320	Kupfer-Zink-Legierung	Schlenk
Goldbronzepulver Offset 6327	Kupfer-Zink-Legierung	Schlenk
Goldbronzepulver Luminor 2350	Kupfer-Zink-Legierung	Schlenk
Standard Kupferpulver Dorolan 35/0	Kupfer	Eckart
Kupfer-Zink-Legierung	Zink	Metalure
Standard Bronzepulver Dorolan 35/0 Reichbleichgold	Kupfer-Zink-Legierung	Eckart
Blitz Goldbronzepulver G7732 stabilisiert Reichbleichgold	Kupfer-Zink-Legierung	Benda-Lutz
Goldbronzeflitter 1000-01 Kupfer	Kupfer	Schlenk
Goldbronzepulver Luminor 2280	Kupfer-Zink-Legierung	Schlenk
Blitz Goldbronzepulver G7712 stabilisiert Reichbleichgold	Kupfer-Zink-Legierung	Benda-Lutz
STANDARD Goldbronzepulver Resist LT	Kupfer-Zink-Legierung	Eckart
Goldbronzepulver Luminor 2250	Kupfer-Zink-Legierung	Schlenk
Blitz Goldbronzepulver G2021 Reichgold	Kupfer-Zink-Legierung	Benda-Lutz
STANDARD Goldbronzepulver LACK L 900 Reichgold	Kupfer-Zink-Legierung	Eckart
Blitz Goldbronzepulver G 2031 Reichbleichgold	Kupfer-Zink-Legierung	Benda-Lutz
Goldbronzeflitter 1000-01 Reichgold	Kupfer-Zink-Legierung	Schlenk
Blitz Goldbronzepulver G 2021 Reichbleichgold	Kupfer-Zink-Legierung	Benda-Lutz
Reichbleichgoldpaste Schminke	Kupfer-Zink-Legierung	Schminke
Goldbronzepulver Luminor 2240	Kupfer-Zink-Legierung	Schlenk
Goldbronzepulver Luminor 2210 Reichgold	Kupfer-Zink-Legierung	Schlenk
Goldbronzepulver Luminor 2210	Kupfer-Zink-Legierung	Schlenk
Blitz Goldbronzepulver G 2021 Bleichgold	Kupfer-Zink-Legierung	Benda-Lutz
Goldbronzepulver Luminor 2210-01 Kupfer	Kupfer	Schlenk
Blitz Kupferpulver G2021	Kupfer	Benda-Lutz
Goldbronzefolie	Kupfer-Zink-Legierung	Art-Deco

Tabelle 31: Übersicht der verwendeten Glimmer

Bezeichnung	Inhaltsstoffe	Hersteller
Luh Eisenglimmer < 30 µm	Eisenglimmer	Georg H. Luh GmbH
Luh Glimmer 0,5 - 0,8 mm	Muskovit	Georg H. Luh GmbH
Luh Eisenglimmer 400 - 600 µm	Eisenglimmer	Georg H. Luh GmbH
53185 Phlogopit, silbrig grau 0,3-1 mm	Phlogopit	Kremer
53210 Phlogopit, silbrig-grau 1-3 mm	Phlogopit	Kremer

Tabelle 32: Übersicht der verwendeten Pigmente aus Aluminium

Bezeichnung	Inhaltsstoffe	Hersteller
Aluminiumpulver 0-150 µm Schutzgasverdüst	Aluminium	Metalure
Blitz Aluminiumpulver 2051	Aluminium	Benda-Lutz
IR-Reflex 5000 white	Aluminium	Eckart
Aluminiumpulver Powdal 340	Aluminium	Schlenk
Aluminiumpulver Powdal 70	Aluminium	Schlenk
Aluminiumfitter F 1000 - 1600 Mikrometer	Aluminium	Metalure
STANDARD Aluminiumpulver PCS 3500	Aluminium	Eckart
Aluminiumpulver Powdal 3400 XT	Aluminium	Schlenk
Aluminiumfitter F 150 - 300 Mikrometer	Aluminium	Metalure
STANDARD Aluminiumpulver PCS 2000	Aluminium	Eckart
Aluminiumpulver Powdal 3100 XT	Aluminium	Schlenk
Blitz Aluminiumpaste 1041	Aluminium	Benda-Lutz
STAPA Metalux 1580	Aluminium	Eckart
Blitz AluminiumpulverMaxal 74009	Aluminium	Benda-Lutz
Aluminiumpulver Powdal 310	Aluminium	Schlenk
Blitz Aluminiumpulver 20082	Aluminium	Benda-Lutz
Aluminium	Aluminium	Art-Deco
STANDARD Aluminiumpulver PCS 5000	Aluminium	Eckart
Blitz Aluminiumpulver 2051	Aluminium	Benda-Lutz
STAPA Metalux 1540	Aluminium	Eckart
Blitz Aluminiumpulver 2014	Aluminium	Benda-Lutz
STAPA IL Hydrolan 214 Nr. 55900/G Aluminium	Aluminium	Eckart
STAPA Metalux 1520	Aluminium	Eckart
Aluminiumpulver BE 1101	Aluminium	Metalure
Blitz Aluminium Splendal	Aluminium	Benda-Lutz
Blitz Aluminiumpulver 2014	Aluminium	Benda-Lutz
Blitz Aluminiumpulver 71 - 315 my 171198	Aluminium	Benda-Lutz
STANDARD Aluminiumpulver Chromal II	Aluminium	Eckart
Blitz Aluminiumpaste Maxal 66009 SI/70 BG	Aluminium	Benda-Lutz
STAPA IL Hydrolan 212 Nr. 55900/G Aluminium	Aluminium	Eckart
Blitz Aluminiumpulver Aquaral 6221/63W	Aluminium	Benda-Lutz
Blitz Aluminiumpaste Maxal 66012 SI/70 BG	Aluminium	Benda-Lutz
Aluminiumfolie	Aluminium	Art-Deco

Tabelle 33: Übersicht der verwendeten Carbon-Nano-Tubes

Bezeichnung	Inhaltsstoffe	Hersteller
Baytubes C150P purified	Kohlenstoff	Bayer
Baytubes C150P as synthesized	Kohlenstoff	Bayer
CNFPL purified	Kohlenstoff	Bayer
MWCNT as synthesized	Kohlenstoff	Bayer
MWCNT carboxyliert	Kohlenstoff	Bayer
MWCNT purified	Kohlenstoff	Bayer
MWCNT technical grade	Kohlenstoff	Bayer
Baytubes C150P	Kohlenstoff, enthält Cobalt	Bayer

Tabelle 34: Übersicht der verwendeten Perlglanzpigmente (Pigmente mit Schichtaufbau, Teil 1)

Bezeichnung	Inhaltsstoffe	Hersteller
Colorstream T10-01 Viola fantasy	Siliziumdioxid beschichtet mit Titandioxid und Zinnoxid	Merck
Xirallic T50-1 Crystal Silver	Aluminiumoxid beschichtet mit Titandioxid und Zinnoxid	Merck
Solarflair 9875	Metalloxid-beschichteter Glimmer	Merck
Lazerflair 825	Titandioxid beschichtet mit Zinnoxid	Merck
50000 Perlglanz Silber, Seidenglanz-Silber	Glimmer beschichtet mit Titandioxid und Zinnoxid	Kremer
50010 Perlglanz Silber S	Glimmer beschichtet mit Titandioxid und Zinnoxid	Kremer
50012 Perlglanz MIRA Magic Grün	Calcium-Aluminium-Borosilikat beschichtet mit Siliziumdioxid, Titandioxid und Zinnoxid	Kremer
50013 Perlglanz MIRA Magic Türkis	Calcium-Aluminium-Borosilikat beschichtet mit Siliziumdioxid, Titandioxid und Zinnoxid	Kremer
50014 Perlglanz MIRA Silber Magic White	Calcium-Aluminium-Borosilikat beschichtet mit Siliziumdioxid, Titandioxid und Zinnoxid	Kremer
50015 Perlglanz MIRA Magic Lila	Calcium-Aluminium-Borosilikat beschichtet mit Siliziumdioxid, Titandioxid und Zinnoxid	Kremer
50016 Perlglanz MIRA Magic Sonnengold	Calcium-Aluminium-Borosilikat beschichtet mit Siliziumdioxid, Titandioxid und Zinnoxid	Kremer
50017 Perlglanz MIRA, Magic Kupfer	Calcium-Aluminium-Borosilikat beschichtet mit Siliziumdioxid, Titandioxid und Zinnoxid	Kremer
50018 Perlglanz MIRA Magic Blau	Calcium-Aluminium-Borosilikat beschichtet mit Siliziumdioxid, Titandioxid und Zinnoxid	Kremer
50019 Perlglanz MIRA Magic Rot	Calcium-Aluminium-Borosilikat beschichtet mit Siliziumdioxid, Titandioxid und Zinnoxid	Kremer
50020 Perlglanz Silber Flitter, fein	Glimmer beschichtet mit Titandioxid und Zinnoxid	Kremer
50024 Perlglanz Silber Flitter, grob	Glimmer beschichtet mit Titandioxid und Zinnoxid	Kremer
50035 Perlglanz Icy White	Glimmer beschichtet mit Titandioxid	Kremer
50040 Perlglanz Ekaton Polarsilber	Glimmer beschichtet mit Titandioxid und Zinnoxid	Kremer
50061 Perlglanz Pyrisma™ Gelb	Glimmer beschichtet mit Titandioxid, Zinnoxid und Siliziumdioxid	Kremer
50062 Perlglanz Pyrisma™ Rot	Glimmer beschichtet mit Titandioxid, Zinnoxid und Siliziumdioxid	Kremer
50063 Perlglanz Pyrisma™ Indigo	Glimmer beschichtet mit Titandioxid und Zinnoxid	Kremer
50064 Perlglanz Pyrisma™ Blau	Glimmer beschichtet mit Titandioxid und Zinnoxid	Kremer
50065 Perlglanz Pyrisma™ Grün	Glimmer beschichtet mit Titandioxid und Zinnoxid	Kremer
50066 Perlglanz Pyrisma™ Türkis	Glimmer beschichtet mit Titandioxid und Zinnoxid	Kremer
50067 Perlglanz Pyrisma™ Violett	Glimmer beschichtet mit Titandioxid und Zinnoxid	Kremer

Tabelle 35: Übersicht der verwendeten Perlglanzpigmente (Pigmente mit Schichtaufbau, Teil 2)

Bezeichnung	Inhaltsstoffe	Hersteller
50068 Perlglanz Pyrisma™ Magenta	Glimmer beschichtet mit Titandioxid und Zinnoxid	Kremer
50080 Perlglanz Diamantsilber	Al ₂ O ₃ beschichtet mit Titandioxid und Zinnoxid	Kremer
50082 Perlglanz Diamant Türkis	Al ₂ O ₃ beschichtet mit Titandioxid und Zinnoxid	Kremer
50083 Perlglanz Diamant Amethyst	Al ₂ O ₃ beschichtet mit Titandioxid und Zinnoxid	Kremer
50221 Perlglanz Chroma Blitzgold	Glimmer beschichtet mit Titandioxid und Zinnoxid	Kremer
50410 Perlglanz Colibri Eisenrot	Glimmer beschichtet mit Eisenoxid	Kremer
50100 Perlglanz Colibri Gold	Glimmer beschichtet mit Titandioxid und Zinnoxid	Kremer
50110 Perlglanz Colibri Star-Gold	Glimmer beschichtet mit Titandioxid, Zinnoxid, Siliziumdioxid und Eisenoxid	Kremer
50111 Perlglanz Colibri Star Gold WR	Glimmer beschichtet mit Titandioxid, Eisenoxid und Zinnoxid	Kremer
50140 Perlglanz Colibri Sonnengold	Glimmer beschichtet mit Titandioxid und Eisenoxid	Kremer
50160 Perlglanz Colibri Glitzergold	Glimmer beschichtet mit Titandioxid und Eisenoxid	Kremer
50179 Perlglanz Colibri Satin-Royalgold	Glimmer beschichtet mit Titandioxid, Eisenoxid und Zinnoxid	Kremer
50180 Perlglanz Colibri Royalgold	Glimmer beschichtet mit Titandioxid, Eisenoxid und Zinnoxid	Kremer
50200 Perlglanz Colibri Bleichgold	Glimmer beschichtet mit Titandioxid und Eisenoxid	Kremer
50300 Perlglanz Colibri Bronze	Glimmer beschichtet mit Eisenoxid	Kremer
50320 Perlglanz Colibri Glitzerbronze	Glimmer beschichtet mit Eisenoxid	Kremer
50359 Perlglanz Colibri Satin-Glanzkupfer	Glimmer beschichtet mit Eisenoxid	Kremer
50360 Perlglanz Colibri Glanzkupfer	Glimmer beschichtet mit Eisenoxid	Kremer
50361 Perlglanz Colibri Glitzer-Glanzkupfer	Glimmer beschichtet mit Eisenoxid	Kremer
50400 Perlglanz Colibri Rot	Glimmer beschichtet mit Eisenoxid	Kremer
50440 Perlglanz Lava Red	Siliziumdioxid beschichtet mit Eisenoxid	Kremer
50640 Perlglanz Duo Rot-Grün	Glimmer beschichtet mit Eisenoxid und Zinnoxid	Kremer
50650 Perlglanz Magic Gold	Aluminiumpulver beschichtet mit Siliziumdioxid und Eisen-III-oxid, mehrschichtig	Kremer

Tabelle 36: Übersicht der verwendeten Perlglanzpigmente (Pigmente mit Schichtaufbau, Teil 3)

Bezeichnung	Inhaltsstoffe	Hersteller
50651 Perlglanz Magic Indian Summer	Siliziumdioxid beschichtet mit Eisenoxid	Kremer
50652 Perlglanz Magic Rot	Aluminiumpulver beschichtet mit Siliziumdioxid und Eisen-III-oxid, mehrschichtig	Kremer
50653 Perlglanz Magic Royal Damask	Glimmer beschichtet mit Titandioxid, Siliziumdioxid und Zinnoxid	Kremer
50654 Perlglanz Magic Purpur	Gamma-Eisen-II-oxid und Siliziumdioxid, mehrschichtig	Kremer
50655 Perlglanz Magic Lapis	Siliziumdioxid beschichtet mit Titandioxid und Zinnoxid	Kremer
50656 Perlglanz Magic Violett	Siliziumdioxid beschichtet mit Titandioxid, Zinnoxid und Zirkonoxid	Kremer
50657 Perlglanz Magic Silbrig	Siliziumdioxid beschichtet mit Titandioxid und Zinnoxid	Kremer
50658 Perlglanz Magic Grün	Siliziumdioxid beschichtet mit Titandioxid, Zinnoxid und Zirkonoxid	Kremer
50659 Perlglanz Magic Pacific Lagoon	Glimmer beschichtet mit Titandioxid, Siliziumdioxid und Zinnoxid	Kremer
53501 Fischsilber in Pulver	Natürliche Fischschuppen, gemahlen	Kremer
50946 Glimmer Wüstengold	Glimmer, beschichtet mit Titandioxid, Eisenoxid und einer geringen Menge Zinnoxid.	Kremer
50947 Glimmer Kiwi Gold	Glimmer (K-Al-Silikat), Metalloxide, organisches Pigment, Zinnoxid	Kremer
Pearlescent Pigment Phoenix PX 5001	Rutil	Eckart
Solarflair 875	Glimmer beschichtet mit Titandioxid	Merck
Solarflair 870	Glimmer beschichtet mit Titandioxid	Merck

Tabelle 37: Übersicht der Pigmente aus gemahlene Schwefelverbindungen

Bezeichnung	Inhaltsstoffe	Hersteller
Chrom-(III)-sulfid	Cr_2S_3	Chemetall
Kupfereisensulfid	CuFeS_2	Chemetall
Eisen-(II)-disulfid	FeS_2	Chemetall
Eisen-(II)-sulfid	FeS	Chemetall
Kupfer-(II)-sulfid	CuS	Chemetall
Antimonsulfid	Sb_2S_3	Chemetall
Mangan-(II)-sulfid	MnS	Chemetall
Zinksulfid	ZnS	Chemetall
Zinn-(IV)-sulfid	SnS_2	Chemetall
Kupfer-(I)-sulfid	Cu_2S	Chemetall
Molybdändisulfid	MoS_2	Chemetall
Wismutsulfid	Bi_2S_3	Chemetall
Zinn-(II)-sulfid	SnS	Chemetall
Wolfram-(IV)-sulfid	WS_2	Chemetall

Tabelle 38: Übersicht der verwendeten anorganischen Pigmente/Erdfarben

Bezeichnung	Inhaltsstoffe	Hersteller
Grüne Erde dunkel	Spinell	Kalk-Laden
Rosso Sartorius	natürliches Erdpigment	Kremer
Terra Ercolano	Natürliche rote Erde, gemischt mit Eisenoxiden	Kalk-Laden
Grüne Erde hell	Spinell, Chromoxid	Kalk-Laden
roter marokkanischer Ocker	Brauneisenstein, Tonminerale, Quarz, Kalk	Kalk-Laden
Echttrot	Silikat	Kalk-Laden
Zirkonrot	Einschlusspigment $ZrSiO_4$ / $Cd(S, Se)$	Kremer
Umbr grünlich	Eisenhydrat, Manganoxidhydrat, Tonerdesilikat	Kalk-Laden
Englischrot dunkel	geglühte, verschnittene Eisen(III)-oxide, Fe_2O_3	Kalk-Laden
Bordeauxrot	synthetischer Rost aus Eisensulfatlösung	Kremer
Zinnober	Cinnabarit	Kremer
Braunocker	Eisenoxidhydrat (Mineral)	Kalk-Laden
Echtblau	Spinell	Kalk-Laden
Eisenoxidrot 110 hell	Eisen-III-Oxid (Fe_2O_3)	Kalk-Laden
Chromoxidgrün	Chromoxid	Kremer
Echtorange	künstliches Mineralpigment	Kalk-Laden
Titanweiß	Titandioxid	Kalk-Laden
Englisch-rot mittel	Natürliches Erdpigment, gebrannt	Kalk-Laden
Lindgrün	Künstliches Mineralpigment	Kalk-Laden
Umbrabraun	Eisenoxidhydrat (Mineral)	Kalk-Laden
Echtgrün dunkel	Silikat	Kalk-Laden
Oxidgrün	Chromoxid	Kalk-Laden
Echtgelb	Künstliches Mineralpigment	Kalk-Laden
Goldocker	Eisenoxidhydrat (Mineral)	Kalk-Laden
Terra di Sienna	natürliches Erdpigment, gebrannt	Kremer
Echtgrün hell	Silikat	Kalk-Laden
Englisch rot	Natürliches Erdpigment, gebrannt	Kalk-Laden
Oxidgelb	Eisenoxid	Kalk-Laden
Umbr Krapprot	Natürliches Erdpigment, Krapp	Kalk-Laden
Ultramarinblau	Künstliches Mineralpigment aus Ton, Soda und Schwefel	Kalk-Laden
Cadmiumrot NR 2 mittel	$Cd(S, Se)$	Kremer
Ultramarinrot B	Soda, Ton und Schwefel	Kremer
Umbr rötlich	Eisenhydrat, Manganoxidhydrat, Tonerdesilikat	Kalk-Laden
Cadmiumrot NR 1 hell	Cadmiumblende mit Selen	Kremer
Oxidrot-Mittel	Eisenoxid	Kremer
Cadmiumrot NR 3 dunkel	Cadmiumblende mit Selen	Kremer
Oxidbraun	Eisenoxid	Kalk-Laden
Manganblau	Manganoxid	Kalk-Laden
Oxidschwarz	Eisenoxidhydrat	Kalk-Laden
Oxidrot	Eisenoxid	Kalk-Laden

Tabelle 39: Übersicht der verwendeten organischen Pigmente/Verbindungen

Bezeichnung	Inhaltsstoffe	Hersteller
XLS Mohnrot X	Alizarin	Kremer
Tagesleuchtfarbe Violett	Triazin-Toluolsulfonamid- Paraformaldehyd Polykondensationsharz mit synthetischen Farbstoffen	Kremer
Carmin Naccarat	Karminsäure, Kermessäure, Laccainsäure D	Kremer
XLS Irgazinrot DPP	Diketo-Pyrrolo-Pyrol	Kremer
Tagesleuchtfarbe Cyclamrot	Triazin-Toluolsulfonamid- Paraformaldehyd Polykondensationsharz mit synthetischen Farbstoffen	Kremer
Theaterfarbe Pink	Chinacridon, organischer Halbleiter	Kremer
Scharlachrot	Karminsäure	Kremer
Hostapermrot Magenta	Chinacridon, γ -Modifikation	Kremer
Irgazin Rubin DPP TRX	Diketo-Pyrrolo-Pyrol	Kremer
Purpurrot	2-[[3-[[[(2,3-dihydro-2-oxo-1h- benzimidazol-5-yl)amino]-carbonyl]-2- hydroxy-1-naphthalenyl]-azo]-benzoic acid methyl ester	Kremer
Alizarin-Krapplack hell	Alizarin	Kremer
Quindo Rosa DX	Chinacridon, organischer Halbleiter	Kremer
Permanentrot	1-(2,4-Dinitrophenyl-1-azo)-2-naphthol	Kremer
Kaminrot	Karminsäure	Kremer
Permanentrot	1-(2,4-Dinitrophenyl-1-azo)-2-naphthol	Kremer
Studiorot	Toluidinrot	Kremer
Irgazin Rot DPP BO	Diketopyrrolo-Pyrrole	Kremer
XLS Mohnrot X	Alizarin	Kremer
Tagesleuchtfarbe Violett	Triazin-Toluolsulfonamid- Paraformaldehyd Polykondensationsharz mit synthetischen Farbstoffen	Kremer

Tabelle 40: Übersicht der verwendeten Pigmente mit Spinell-Rutil-Struktur

Bezeichnung	Inhaltsstoffe	Hersteller
Shepherd yellow 29	Chrom Antimon Titan Oxid Rutil	Shepherd Color Co.
Shepherd blue 10K525	Kobalt Aluminium Oxid Spinell	Shepherd Color Co.
Shepherd yellow 14	Nickel Antimon Titan Oxid Rutil	Shepherd Color Co.
Shepherd green 260	Kobalt Nickel Titan Zink Oxid Spinell	Shepherd Color Co.
Shepherd green 410	Kobalt, Chrom, Aluminium, Zink, Titan	Shepherd Color Co.
Shepherd blue 424	Kobalt Aluminium Titan Lithium Oxid Spinell	Shepherd Color Co.
Shepherd brown 157	Eisen, Chrom, Zink und Titan	Shepherd Color Co.
Shepherd brown 10P835	Mangan Antimon Titan Oxid Rutil	Shepherd Color Co.
Shepherd black 10C909	Eisen Chromoxid Hämatit	Shepherd Color Co.
Shepherd black 411A	Eisen und Chrom	Shepherd Color Co.
Shepherd black 20C920	Kupfer Chrom Mangann oxid Spinell	Shepherd Color Co.
Black 10K927	Muster, unbekannte Inhaltsstoffe	Shepherd Color Co.

Tabelle 41: Übersicht der verwendeten Graphite

Bezeichnung	Inhaltsstoffe	Hersteller
Graphit < 150 µm	Graphit	Luh
Graphit > 180 µm	Graphit	Luh
Graphit > 500 µm	Graphit	Luh
Graphit FFL 99,5 SP	Graphit	Kropfmühl
Graphit V-Cond 20/99	Graphit	Kropfmühl
Graphit SC 20 O	Graphit	Kropfmühl
CSC Filter Anthrazit	Kohlenstoff	Kropfmühl
KFL 94/96	Graphit	Kropfmühl
TVG/K	Graphit	Kropfmühl
EDM 99,5	Graphit	Kropfmühl
RFL 99,5	Graphit	Kropfmühl
SGB 25 L/99,5	Graphit	Kropfmühl
MFL 90/92	Graphit	Kropfmühl
FP-A 90/92	Graphit	Kropfmühl
FP 99,5	Graphit	Kropfmühl
SC 20 O	Graphit	Kropfmühl
Graphit Mix 1	Graphit	Kropfmühl
S 40 90/92	Graphit	Kropfmühl
EDM 96/97	Graphit	Kropfmühl
V-SGA 20 99,9	Graphit	Kropfmühl
AF SP 99,5	Graphit	Kropfmühl
Graphit Mix 2	Graphit	Kropfmühl
EDM 85/90	Graphit	Kropfmühl
GB 80/85	Graphit	Kropfmühl
EDM 90/92	Graphit	Kropfmühl
CR 1296	Graphit	Kropfmühl
UF 2 99,5	Graphit	Kropfmühl
Edelpudergraphit 30058	Graphit	Kropfmühl
ABL 87/90	Graphit	Kropfmühl
Grapheniumflocken 5 - 10 mm	Graphit	NGS-Naturgraphit
Grapheniumflocken 1 - 2 mm	Graphit	NGS-Naturgraphit
Grapheniumflocken "flaggy flakes"	Graphit	NGS-Naturgraphit
Grapheniumflocken Ma+3095 500 – 600 µm	Graphit	NGS-Naturgraphit
Flockengraphit feines Puder Ma-280	Graphit	NGS-Naturgraphit
Kugelförmiger Graphit SG 2S 99,95	Graphit	NGS-Naturgraphit
Graphit T1	Graphit	Bestandsprobe
Graphit T2	Graphit	Bestandsprobe
Graphit T3	Graphit	Bestandsprobe
Graphit T4	Graphit	Bestandsprobe
Graphit T5	Graphit	Bestandsprobe
Graphit T6	Graphit	Bestandsprobe

Tabelle 42: Übersicht der verwendeten funktionellen Metalloxid-Glimmerpigmente

Bezeichnung	Inhaltsstoffe	Hersteller
Solarflair 875	TiO ₂ /Glimmer	Merck
Mintec 60 CM	(Sn, Sb)O ₂ /Glimmer	Merck
Solarflair 9875	TiO ₂ /Glimmer	Merck
Solarflair 870	TiO ₂ /Glimmer	Merck
Minatec 60 CM	(Sn, Sb)O ₂ /Glimmer	Merck
Minatec 40 CM	(Sn, Sb)O ₂ /Glimmer	Merck
Mintec 51 CM	(Sn, Sb)O ₂ /Glimmer	Merck
Lazerflair 825	TiO ₂ /Glimmer	Merck
Minatec 230 A-IR	TiO ₂ /Glimmer	Merck
Solarflair 875	TiO ₂ /Glimmer	Merck

Tabelle 43: Übersicht der verwendeten sonstigen Metall- und Metalloxidpulver

Bezeichnung	Inhaltsstoffe	Hersteller
Hammerschlagpulver	Flitter von Eisen-(II, III)-oxid	Kremer
Siliziummetall 0-150 µm	Silizium	Luh
Siliciumcarbid F1200	Siliziumcarbid	Luh
Zinksulfidpulver	Zinksulfid	Luh
Pyrogenes Titandioxid	Titandioxid	Luh
Titandioxid 3025	Titandioxid	Luh
Wismutmetallpulver	Wismut	Kremer
Zinkoxid	Zinkoxid	Luh
Chrom, gepulvert	Chrom	Omikron
Nickel	Nickel	Omikron
Eisenfeilspäne	Eisen	Kremer
Edelstahlpulver	Edelstahl	Kremer
Zinnpulver	Zinn	Kremer
Blitz Zinkpulver plättchenförmig Z 2012	Zink	Benda-Lutz
Stay/Steel 316L Flake Grade F	rostfreier Stahl	Eckart
STAPA TA Ferricon 200	Carbonyl-Eisen	Eckart

Tabelle 44: Übersicht der verwendeten Lüster

Bezeichnung:	Bezeichnung/Farbe	Hersteller
Lu 20 N	Kupferbronze	Heraus/Ferro
Lu 540	Dunkelgrün	Heraus/Ferro
Lu 580	Grau	Heraus/Ferro
GG 131	Goldluster	Heraus/Ferro
Lu 125 A	Violett	Heraus/Ferro
Lu 728	Fluid-Goldbronze	Heraus/Ferro
Lu 188	Aurora	Heraus/Ferro
HF 8012	Muster	Heraus/Ferro
Lu 34	Silberiris	Heraus/Ferro
Lu 111	Orange	Heraus/Ferro
Lu 100 N	Violett	Heraus/Ferro
Lu 578	Iris	Heraus/Ferro

Tabelle 45: Übersicht der verwendeten Glasuren

Bezeichnung:	Inhaltsstoffe	Hersteller
Selen-rot	Selen, Blei und Cadmium	Glasur Labor
Eierschalenfarben	SnO ₂ -haltig	Glasur Labor
Blutorange	Cd-Se-Zr-Farbkörper	Glasur Labor
Erdbeerrot	Cd-Se-Zr-Farbkörper	Glasur Labor
Silberaventurin	Ag-Verbindung	Glasur Labor
Goldaventurin	Au-Verbindung	Glasur Labor
Farbkörper 4000 hellgelb	Sn-V	Glasur Labor
Farbkörper 4005 sonnengelb	Zr-Si-Pr	Glasur Labor
Farbkörper 4006 orange	Cd-Se-Zr	Glasur Labor
Farbkörper 4010 rosa	Cr-Al-Zn	Glasur Labor
Farbkörper 4020 pink	Cr-Sn-Ca-Si	Glasur Labor
Farbkörper 4025 violett	Sn-Cr	Glasur Labor
Farbkörper 4030 rotbraun	Zr-Si-Fe	Glasur Labor
Farbkörper 4036 feuerrot	Cd-Se-Zr	Glasur Labor
Farbkörper 4040 himmelblau	Co-Al-Zn	Glasur Labor
Farbkörper 4045 dunkelblau	Co-Al	Glasur Labor
Farbkörper 4048 dunkelblau	Co-Si	Glasur Labor
Farbkörper 4050 türkis	Zr-Si-V	Glasur Labor
Farbkörper 4060 grasgrün	Cr-Co-Si	Glasur Labor
Farbkörper 4070 blaugrün	Co-Cr-Al-Zn	Glasur Labor
Farbkörper 4075 viktoriagrün	Cr-Ca-Si	Glasur Labor
Farbkörper 4078 kiwigrün	Zr-Pr-Si-V	Glasur Labor
Farbkörper 4080 blaugrau	Al-Co-Ni-Zn	Glasur Labor
Farbkörper 4090 hellgrau	Zr-Ni-Co-Cr-Fe-Zn	Glasur Labor
Farbkörper 4095 braun	Cr-Fe-Mn	Glasur Labor
Farbkörper 4100 tiefschwarz	Co-Fe-Cr	Glasur Labor

9.2. Untersuchung zur Infrarotdurchlässigkeit der Binder

Tabelle 46: Einfluss der Infrarotabsorption ausgewählter Binder auf den Emissionskoeffizienten der Beschichtungen auf Ziegelsubstrat

Binderbezeichnung	Aluminiumsubstrat	Ziegelsubstrat
	ϵ	ϵ
Nullprobe	0,109	0,952
Betol 52 T	0,911	0,793
Gouche-Bindemittel	0,96	0,79
Kaliumsilikat K 45 M	0,942	0,742
Yachtlack	0,954	0,699
Acryl-Glanzlack	0,88	0,683
Treppen und Parkettversiegelung	0,95	0,65
Luwax LS Flakes	0,911	0,648
Wasserglas	0,904	0,638
Acrylbindemittel	0,909	0,636
Metall Klarlack	0,91	0,612
Betol 50 T	0,908	0,59
Poligen WE1	0,622	0,571
Holzwachs W	0,95	0,56
Betol K 42 T	0,905	0,548
Poligen MW1	0,56	0,519
Acryl-PU-Klarlack	0,93	0,51
Gemäldefirnis	0,745	0,485
Luwax AH 3 Powder	0,413	0,476
Betol 28 T	0,896	0,461
Betol K 35 T	0,898	0,455
Holzlasur	0,95	0,42
Schlussfirnis	0,712	0,405
Mastixfirnis	0,945	0,403
Dammarfirnis	0,906	0,39
Betol 39 T	0,903	0,386
Blanose	0,854	0,382
Optapix PAF 35	0,958	0,374
Biopin Bienenwachs	0,711	0,364
Luwax V	-	0,343
Schellack	0,89	0,29
Leinöl	0,75	0,287
Universal Firnis RS	0,81	0,402
Natrosol	0,75	0,45
Luwax AF 29 Micropowder	0,541	0,62
Holzleim	0,82	0,35

9.3. Versuche zur Auswahl geeigneter Binder für die Fixierung des Pigments auf dem keramischen Scherben

Tabelle 47: Emissionskoeffizienten der Beschichtungen aus 1 Vol.-% Pigment „STANDARD Goldbronzepulver LACK 900 L Reichgold“ durchgeführt mit verschiedenen Bindern und Sprühbeschichtung auf jeweils Glas- und Ziegelsubstraten

Binder	Glassubstrat	Ziegelsubstrat
	ϵ	ϵ
Gouche-Bindemittel	0,890	0,899
Poligen WE1	0,936	0,834
Plextol D 498	0,757	0,774
Silicade 8	0,687	0,727
Poligen MW1	0,614	0,713
Alberdingk UC 84	0,390	0,685
Betol 50 T	0,619	0,676
Betol 52 T	0,497	0,674
Acrylbindemittel	0,475	0,625
Wachs-Wandlasurmedium	0,557	0,590
Aquazol 200/ wasserl. Kunstharz	0,410	0,585
Betol 39 T	0,735	0,580
Natrosol	0,396	0,571
Gemäldefirnis	0,916	0,539
Leinöl*	0,952	0,539
Holzleim	0,415	0,530
Syton X30	0,458	0,530
Optapix PAF 35*	0,451	0,529
Betol K 35 T	0,909	0,491
Limasol	0,439	0,488
Lithiumwasserglas	0,462	0,484
Kaliwasserglas 28/30	0,669	0,474
Syton W30	0,426	0,463
Betol 28 T	0,900	0,459
Polyurethan-Disp PU 52	0,450	0,454
Dammarfirnis*	0,903	0,440
Schellack	0,519	0,432
Betol K 42 T	0,928	0,432
Schlussfirnis*	0,944	0,420
Alberdingk AC 31	0,350	0,404
Blanose	0,352	0,393
Polyvinylalkohol	0,399	0,392

9.4. Messwerte von Emissionskoeffizienten metallischer Pigmente

Tabelle 48: gemessene Emissionskoeffizienten für **Aluminiumpigmente** und Aluminiumfolie auf Glasobjektträgern (Binder: Anlegemilch), Nullprobe auf Glassubstrat

Material	Emissionskoeffizient Einzelwerte			Emissionskoeffizient Mittelwert
	1	2	3	
Glassubstrat unbeschichtet	0,939	0,939	0,939	0,939
Aluminiumpulver 0-150 µm schutzgasverdüst	0,860	0,860	0,860	0,860
Blitz Aluminiumpulver 2051	0,681	0,680	0,682	0,681
IR-Reflex 5000 white	0,543	0,555	0,562	0,553
Aluminiumpulver Powdal 340	0,485	0,500	0,608	0,531
Aluminiumpulver Powdal 70	0,520	0,543	0,493	0,519
Aluminiumflitter F 1000 - 1600 µm	0,607	0,470	0,435	0,504
STANDARD Aluminiumpulver PCS 3500	0,541	0,484	0,486	0,504
Aluminiumpulver Powdal 3400 XT	0,473	0,472	0,489	0,478
Aluminiumflitter F 150 - 300 µm	0,484	0,468	0,472	0,475
STANDARD Aluminiumpulver PCS 2000	0,474	0,452	0,475	0,467
Aluminiumpulver Powdal 3100 XT	0,500	0,431	0,440	0,457
Blitz Aluminiumpaste 1041	0,466	0,465	0,436	0,456
STAPA Metalux 1580	0,440	0,530	0,391	0,454
Blitz Aluminiumpulver Maxal 74009	0,551	0,39	0,39	0,444
Aluminiumpulver Powdal 310	0,466	0,417	0,444	0,442
Blitz Aluminiumpulver 20082	0,466	0,441	0,39	0,432
Aluminium	0,398	0,436	0,457	0,430
STANDARD Aluminiumpulver PCS 5000	0,410	0,432	0,446	0,429
Blitz Aluminiumpulver 2051	0,416	0,428	0,444	0,429
STAPA Metalux 1540	0,423	0,396	0,449	0,423
Blitz Aluminiumpulver 2014	0,485	0,386	0,366	0,412
STAPA IL Hydrolan 214 Nr. 55900/G Aluminium	0,401	0,401	0,414	0,405
STAPA Metalux 1520	0,396	0,403	0,409	0,403
Aluminiumpulver BE 1101	0,462	0,363	0,368	0,398
Blitz Aluminium Splendal	0,399	0,388	0,391	0,393
Blitz Aluminiumpulver 2014	0,369	0,418	0,374	0,387
Blitz Aluminiumpulver 71 - 315 my 171198	0,428	0,352	0,366	0,382
STANDARD Aluminiumpulver Chromal II	0,363	0,313	0,438	0,371
Blitz Aluminiumpaste Maxal 66009 SI/70 BG	0,368	0,365	0,37	0,368
STAPA IL Hydrolan 212 Nr. 55900/G Aluminium	0,399	0,353	0,336	0,363
Blitz Aluminiumpulver Aquaral 6221/63W	0,349	0,335	0,333	0,339
Blitz Aluminiumpaste Maxal 66012 SI/70 BG	0,254	0,271	0,274	0,266
Aluminiumfolie	0,105	0,105	0,105	0,105

Tabelle 49: Gemessene Emissionskoeffizienten für **Kupfer – Goldbronzepigmente** und Goldbronzefolie auf Glasobjektträgern (Binder: Anlegemilch); Nullprobe auf Glassubstrat

Material	Emissionskoeffizient Einzelwerte			Emissionskoeffizient Mittelwert
	1	2	3	
Zinkoxid CF 4m ² /g	0,949	0,932	0,955	0,945
Glassubstrat unbeschichtet	0,939	0,939	0,939	0,939
Goldbronzepulver Offset 6340	0,672	0,659	0,693	0,673
Goldbronzepulver Multiprint 4350	0,566	0,617	0,652	0,621
Goldbronzepulver Multiprint 4320	0,595	0,583	0,566	0,585
Goldbronzepulver Offset 6327	0,535	0,57	0,592	0,565
Goldbronzepulver Luminor 2350	0,515	0,569	0,563	0,554
Standard Kupferpulver Dorolan 35/0	0,506	0,537	0,573	0,539
Kupfer-Zink-Legierung	0,525	0,522	0,538	0,528
Standard Bronzepulver Dorolan 35/0 Reichbleichgold	0,519	0,536	0,483	0,513
Blitz Goldbronzepulver G7732 stabilisiert Reichbleichgold	0,514	0,496	0,462	0,491
Goldbronzeflitter 1000-01 Kupfer	0,457	0,484	0,505	0,482
Goldbronzepulver Luminor 2280	0,474	0,475	0,478	0,480
Blitz Goldbronzepulver G7712 stabilisiert Reichbleichgold	0,476	0,442	0,485	0,468
STANDARD Goldbronzepulver Resist LT	0,467	0,465	0,469	0,467
Goldbronzepulver Luminor 2250	0,433	0,486	0,461	0,461
Blitz Goldbronzepulver G2021 Reichgold	0,417	0,47	0,458	0,448
STANDARD Goldbronzepulver LACK L 900 Reichgold	0,444	0,442	0,446	0,444
Blitz Goldbronzepulver G 2031 Reichbleichgold	0,507	0,392	0,404	0,434
Goldbronzeflitter 1000-01 Reichgold	0,44	0,427	0,396	0,421
Blitz Goldbronzepulver G 2021 Reichbleichgold	0,412	0,448	0,391	0,417
Reichbleichgoldpaste Schminke	0,414	0,410	0,418	0,414
Goldbronzepulver Luminor 2240	0,393	0,425	0,431	0,414
Goldbronzepulver Luminor 2210 Reichgold	0,402	0,39	0,396	0,396
Goldbronzepulver Luminor 2210	0,39	0,396	0,415	0,396
Blitz Goldbronzepulver G 2021 Bleichgold	-	0,405	0,384	0,395
Goldbronzepulver Luminor 2210-01 Kupfer	0,402	0,374	0,39	0,389
Blitz Kupferpulver G2021	0,403	0,339	0,358	0,367
Goldbronzefolie	0,105	0,105	0,105	0,105

Tabelle 50: Emissionskoeffizient bei wiederholtem Schichtauftrag mittels Airbrush. Mischung aus 1 Vol.-% Wasserglas Betol 39 T und Pigment Goldbronzepulver Luminor 2210

Probe	Schicht	Epsilon
Betol 39 T + H ₂ O + Luminor 2210	1	0,373
Betol 39 T + H ₂ O + Luminor 2210	2	0,359
Betol 39 T + H ₂ O + Luminor 2210	3	0,412
Betol 39 T + H ₂ O + Luminor 2210	4	0,472
Betol 39 T + H ₂ O + Luminor 2210	5	0,431

Tabelle 51: Gemessene Emissionskoeffizienten für Sputterbeschichtungen mit den Metallen Gold, Silber und Nickel jeweils auf Glas- und Ziegelsubstrat in Abhängigkeit der Sputter-Dauer

Sputterzeit [s]	Gold		Silber		Nickel	
	Ziegel	Glas	Ziegel	Glas	Ziegel	Glas
0	0,976	0,884	0,976	0,884	0,976	0,884
60	0,719	0,151	0,725	0,140	0,972	0,865
120	0,712	0,139	0,705	0,119	0,973	0,858
180	0,668	0,126	0,615	0,102	0,966	0,856

Tabelle 52: Gemessene Emissionskoeffizienten für Sputterbeschichtungen mit Titan und Kupfer bei Kombination beider Materialien und variabler Schichtdicke

Probe	Ti [nm]	Cu [nm]	Epsilon [-]	Schichtdicke [nm]
Cu 50 nm	0	50	0,89	50
Cu 100 nm	0	100	0,801	100
Ti 50 nm /Cu 50 nm	50	50	0,794	100
Ti 50 nm /Cu 100 nm	50	100	0,739	150
Ti 50 nm /Cu 200 nm	50	200	0,753	250
Ti 50 nm /Cu 500 nm	50	500	0,752	550

Tabelle 53: Gemessene Emissionskoeffizienten für Ziegelsubstrate bei Sputterbeschichtungen mit Gold als Beschichtungsmaterial und Erhöhung der Sputterdauer von 180 Sekunden auf 1080 Sekunden

Probe	Zeit [s]	Epsilon [-]	Schichtdicke [nm]
1	0	0,976	0
2	180	0,724	54
3	360	0,661	108
4	540	0,651	162
5	720	0,592	216
6	900	0,578	270
7	1080	0,571	324

9.5. Emissionskoeffizient sechs verschiedener untersuchter Tone

Tabelle 54: Emissionskoeffizient der **oxidierend** gebrannten Laborziegel (Mittelwerte aus jeweils drei Proben), Abhängigkeit des Emissionskoeffizienten von der Zusammensetzung und Brenntemperatur

Brenntemperatur [°C]	Illit- Kaolinit	Karbonat- Glimmer- Smektit- Chlorit	Karbonat- Glimmer- Smektit- Kaolinit	Quarz	Karbonat- Glimmer- Smektit- WL	Illit- Smektit- Chlorit
Probennummer	1	2	3	4	5	6
1000	0,983	0,984	0,984	0,983	0,984	0,985
950	0,979	0,984	0,979	0,984	0,982	0,984
900	0,980	0,982	0,979	0,984	0,984	0,984
850	0,983	0,982	0,981	0,983	0,983	0,983
800	0,984	0,982	0,983	0,982	0,977	0,983

Tabelle 55: Emissionskoeffizient der **reduzierend** gebrannten Laborziegel (Mittelwerte aus jeweils drei Proben), Abhängigkeit des Emissionskoeffizienten von der Zusammensetzung und Brenntemperatur

Brenntemperatur [°C]	Illit-Kaolinit	Karbonat-Glimmer-Smektit-Chlorit	Karbonat-Glimmer-Smektit-Kaolinit	Quarz	Karbonat-Glimmer-Smektit-WL	Illit-Smektit-Chlorit
Probennummer	1	2	3	4	5	6
1000	0,981	0,985	0,981	0,983	0,981	0,983
950	0,981	0,983	0,981	0,982	0,981	0,983
900	0,982	0,984	0,979	0,982	0,980	0,982
850	0,979	0,982	0,980	0,983	0,980	0,981
800	0,965	0,982	0,977	0,980	0,980	0,980

9.6. Emissionskoeffizienten sonstiger Beschichtungsstoffe

Tabelle 56: Gemessene Emissionskoeffizienten für **Erdfarben** (Oxidpigmente) auf Glasobjektträgern (Binder: Anlegemilch); Nullprobe auf Glassubstrat

Erdfarbenbezeichnung	Emiss. ϵ	Erdfarbenbezeichnung	Emiss. ϵ
Oxidrot	0,921	Titanweiß	0,948
Umbr Krapprot	0,924	Ultramarinblau	0,950
Oxidbraun	0,928	Umbr grünlich	0,956
Manganblau	0,932	Englisch-rot mittel	0,957
Oxidschwarz	0,933	Echtgrün hell	0,960
Englisch rot	0,935	Echtgrün dunkel	0,962
Oxidrot-Mittel	0,935	Lindgrün	0,962
Umbr rötlich	0,942	Bordeauxrot	0,964
Goldocker	0,942	Echtrot	0,968
Terra di Sienna	0,942	Echtblau	0,969
Oxidgelb	0,944	Braunocker	0,970
Echtgelb	0,946	Grüne Erde hell	0,979
Oxidgrün	0,946	Grüne Erde dunkel	0,981
Echtorange	0,947	--	--

Tabelle 57: Gemessene Emissionskoeffizienten für **Carbon-Nanotubes** (leitfähige Kohlenstoffröhrechen) auf Glasobjektträgern (Binder: Anlegemilch); Nullprobe auf Glassubstrat

Carbon-Nanotube	Emissionskoeffizient ϵ		Emissionskoef. ϵ
	Probe 1	Probe 2	Mittelwert
CNF PL purified	0,857	0,786	0,822
Baytubes C150P purified	0,897	0,825	0,861
MWCNT purified	0,984	0,828	0,906
MWCNT carboxyliert	0,989	0,841	0,915
Baytubes C150P enthält Cobalt	0,891	0,842	0,866
MWCNT as synthesized	0,989	0,854	0,922
Baytubes C150P as synthesized	0,990	0,870	0,930
MWCNT technical grade	0,831	0,884	0,858

Tabelle 58: Gemessene Emissionskoeffizienten für **Perlglanzpigmente** (Pigmente mit Schichtaufbau) auf Glasobjektträgern (Binder: Anlegemilch); Nullprobe auf Glassubstrat

Perlglanzpigment	Emiss. ε	Perlglanzpigment	Emiss. ε
50650 Perlglanz Magic Gold	0,676	50035 Perlglanz Icy White	0,929
50652 Perlglanz Magic Rot	0,844	50361 Perlglanz Colibri Glitzer-Glanzkupfer	0,930
50010 Perlglanz Silber S	0,856	50179 Perlglanz Colibri Satin-Royalgold	0,931
50020 Perlglanz Silber Flitter fein	0,876	50640 Perlglanz Duo Rot-Grün	0,931
50024 Perlglanz Silber Flitter grob	0,88	50656 Perlglanz Magic Violett	0,931
50014 Perlglanz MIRA Silber Magic White	0,882	50111 Perlglanz Colibri Star Gold WR	0,933
50221 Perlglanz Chroma Blitzgold	0,887	50040 Perlglanz Ekaton Polarsilber	0,934
Pearlescent Pigment Phoenix PX 5001	0,894	50140 Perlglanz Colibri Sonnengold	0,934
50016 Perlglanz MIRA Magic Sonnengold	0,897	50100 Perlglanz Colibri Gold	0,937
50012 Perlglanz MIRA Magic Grün	0,898	50410 Perlglanz Colibri Eisenrot	0,94
50013 Perlglanz MIRA Magic Türkis	0,901	50083 Perlglanz Diamant Amethyst	0,941
50017 Perlglanz MIRA, Magic Kupfer	0,901	50653 Perlglanz Magic Royal Damask	0,941
50160 Perlglanz Colibri Glitzergold	0,902	53501 Fischsilber in Pulver	0,941
50018 Perlglanz MIRA Magic Blau	0,905	50110 Perlglanz Colibri Star-Gold	0,942
50320 Perlglanz Colibri Glitzerbronze	0,907	50359 Perlglanz Colibri Satin-Glanzkupfer	0,942
colorstream T10-01 Viola Fantasy	0,907	50440 Perlglanz Lava Red	0,942
50019 Perlglanz MIRA Magic Rot	0,909	50068 Perlglanz Pyrisma™ Magenta	0,945
50015 Perlglanz MIRA Magic Lila	0,913	50080 Perlglanz Diamantsilber	0,945
50200 Perlglanz Colibri Bleichgold	0,916	50061 Perlglanz Pyrisma™ Gelb	0,953
50655 Perlglanz Magic Lapis	0,917	Solarflair 9875	0,954
Lazerflair 825	0,919	50067 Perlglanz Pyrisma™ Violett	0,955
50180 Perlglanz Colibri Royalgold	0,92	50082 Perlglanz Diamant Türkis	0,955
50300 Perlglanz Colibri Bronze	0,92	50654 Perlglanz Magic Purpur	0,956
50651 Perlglanz Magic Indian Summer	0,922	50062 Perlglanz Pyrisma™ Rot	0,958
50657 Perlglanz Magic Silbrig	0,922	50659 Perlglanz Magic Pacific Lagoon	0,959
50000 Perlglanz Silber, Seidenglanz-silber	0,924	50064 Perlglanz Pyrisma™ Blau	0,963
50360 Perlglanz Colibri Glanzkupfer	0,924	50063 Perlglanz Pyrisma™ Indigo	0,968
50400 Perlglanz Colibri Rot	0,924	50066 Perlglanz Pyrisma™ Türkis	0,972
50658 Perlglanz Magic Grün	0,925	--	--

Tabelle 59: Gemessene Emissionskoeffizienten für **Spinelle** (elektrisch leitfähig) auf Glasobjektträgern (Binder: Anlegemilch); Nullprobe auf Glassubstrat

Spinell-Bezeichnung	Emissionskoeffizient ϵ
Shepherd brown 157	0,986
Shepherd yellow 29	0,985
Shepherd blue 10	0,984
Shepherd blue 424	0,981
Shepherd brown 10P835	0,979
Shepherd green 410	0,977
Shepherd yellow 14	0,976
Shepherd black 411A	0,975
Shepherd green 2060	0,972
Shepherd black 20C	0,955
Black 10K927	0,956
Shepherd black 10C909	0,946

Tabelle 60: Gemessene Emissionskoeffizienten für **Sulfosalze** auf Glasobjektträgern (Binder: Anlegemilch); Nullprobe auf Glassubstrat

Sulfosalz	Emissionskoeffizient ϵ
Cr ₂ S ₃	0,964
CuFeS ₂	0,963
FeS ₂	0,949
FeS	0,948
CuS	0,946
Sb ₂ S ₃	0,945
MnS	0,940
ZnS	0,939
SnS ₂	0,935
Cu ₂ S	0,930
MoS ₂	0,929
Bi ₂ S ₃	0,919
SnS	0,918
WS ₂	0,916

Tabelle 61: Gemessene Emissionskoeffizienten für **Lüster** auf Glasobjektträgern (Binder: Anlegemilch; Nullprobe auf Glassubstrat

Lüster-Bezeichnung	Emissionskoeffizient ϵ	Emissionskoeffizient ϵ
	Strahler 40 °C	Strahler 100 °C
Nullprobe glasiert	0,884	0,866
Lu 20 N	0,893	0,887
Lu 540	0,906	0,906
Lu 580	0,915	0,888
GG 131	0,14	0,147
Lu 125	0,892	0,893
Lu 728	0,665	0,540
Lu 188	0,878	0,881
HF 8012	0,934	0,925
Lu 34	0,899	0,887
Lu 111	0,893	0,899
Lu 100 N	0,902	0,883
Lu 578	0,894	0,886

Tabelle 62: gemessene Emissionskoeffizienten für **Glasuren (Metallkomplex)** auf Glasobjektträgern (Binder: Anlegemilch), Nullprobe auf Glassubstrat

Lüster-Bezeichnung	Emissionskoeffizient ϵ	Emissionskoeffizient ϵ
	Strahler 40 °C	Strahler 100 °C
Selen-Rot	0,876	0,860
Eierschalenfarben	0,877	0,871
Blutorange	0,890	0,873
Erdbeerrot	0,904	0,870
Silberaventurin	0,882	0,878
Goldaventurin	0,869	0,868
Farbkörper 4000 hellgelb	0,884	0,870
Farbkörper 4005 sonnengelb	874	0,874
Farbkörper 4006 orange	0,888	0,878
Farbkörper 4010 rosa	0,887	0,891
Farbkörper 4020 pink	0,903	0,864
Farbkörper 4025 violett	0,878	0,870
Farbkörper 4030 rotbraun	0,88	0,874
Farbkörper 4036 feuerrot	0,884	0,876
Farbkörper 4040 himmelblau	0,885	0,891
Farbkörper 4045 dunkelblau	0,888	0,892
Farbkörper 4048 dunkelblau	0,883	0,872
Farbkörper 4050 türkis	0,896	0,873
Farbkörper 4060 grasgrün	0,878	0,870
Farbkörper 4070 blaugrün	0,908	0,876
Farbkörper 4075 viktoriagrün	0,874	0,865
Farbkörper 4078 kiwigrün	0,905	0,87
Farbkörper 4080 blaugrau	0,881	0,879
Farbkörper 4090 hellgrau	0,887	0,878
Farbkörper 4095 braun	0,887	0,883
Farbkörper 4100 tiefschwarz	0,882	0,896

9.7. Spezifische Flächenwiderstände der Dünnschichten und Pigmente

Tabelle 63: Emissionskoeffizient, spezifischer Widerstand und spezifische elektrische Leitfähigkeit von metallischen Dünnschichten auf Glasobjektträgern

Material	Substrat	Sputterzeit	Emissionskoeffizient	spezifischer elektrischer Widerstand	spezifische elektrische Leitfähigkeit
		[s]	ϵ	$[\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}]$	$[\text{S}/\text{cm}]$
Silber	Glas	60 s	0,083	0,01	1,00E+06
	Glas	120 s	0,065	0,01	1,00E+06
	Glas	180 s	0,070	0,01	1,00E+06
Nickel	Glas	60 s	0,862	235	4,26E+01
	Glas	120 s	0,851	199,3	5,03E+01
	Glas	180 s	0,858	239	4,18E+01
Gold	Glas	60 s	0,158	0,04	2,50E+05
	Glas	120 s	0,121	0,03	3,33E+05
	Glas	180 s	0,122	0,02	5,00E+05

Tabelle 64: Emissionskoeffizient und spezifischer elektrischer Widerstand ausgewählter Pigmente auf Glasobjektträgern (Binder: Anlegemilch)

Material	Substrat	Bindemittel [s]	Emissionskoeffizient ε	Spezifischer elektrischer Widerstand [Ω^*mm^2/m]
Goldbronzepulver Luminor 2210-01 Kupfer	Glas	Anlegemilch	0,402	2,43
RBG Schminke	Glas	Anlegemilch	0,414	23,6
Goldbronzeflüter 1000-01 Reichgold	Glas	Anlegemilch	0,440	0,35
Goldbronzeflüter 1000-01 Kupfer	Glas	Anlegemilch	0,457	0,37
STAPA TA Ferricon 200	Glas	Anlegemilch	0,495	24,3
Aluminiumflüter F 1000 - 1600 Mikrometer	Glas	Anlegemilch	0,607	0,30
Graphit V-Cond 20/99	Glas	Anlegemilch	0,639	0,65
Graphit FFL 99,5 SP	Glas	Anlegemilch	0,640	1,22
Luh Graphit < 150 μm	Glas	Anlegemilch	0,685	5,2
Luh Graphit > 180 μm	Glas	Anlegemilch	0,718	6,92
Graphit SC 20 O	Glas	Anlegemilch	0,725	0,44
MWCNT technical grade	Glas	Anlegemilch	0,831	4,2
CNF PL purified	Glas	Anlegemilch	0,857	1,3
Eisenfeilspäne	Glas	Anlegemilch	0,867	13,9
MWCNT carboxyliert	Glas	Anlegemilch	0,867	2,55
Nickel	Glas	Anlegemilch	0,890	23,9
Baytubes C150P enthält Cobalt	Glas	Anlegemilch	0,891	5,3
Baytubes C150P purified	Glas	Anlegemilch	0,897	1,1
Chrom, gepulvert	Glas	Anlegemilch	0,907	13,9
Lazerflair 825	Glas	Anlegemilch	0,919	22,1
Minatec 60 CM	Glas	Anlegemilch	0,94	24
CSC Filter Anthrazit	Glas	Anlegemilch	0,975	2,67
MWCNT purified	Glas	Anlegemilch	0,984	1,47
MWCNT carboxyliert	Glas	Anlegemilch	0,989	2,21
MWCNT as synthesized	Glas	Anlegemilch	0,989	1,3
Baytubes C150P as synthesized	Glas	Anlegemilch	0,99	1,15

Tabelle 65: Zusammenhang zwischen Emissionskoeffizient und spezifischer elektrischer Leitfähigkeit von Glassubstraten, welche jeweils 60, 120 und 180 Sekunden mit Gold, Silber und Nickel besputtert wurden

Material	Sputter-Zeit	Epsilon [-]	Spezifische elektrische Leitfähigkeit [S/cm]
	[s]		
Silber	60	0,083	1,00E+06
	120	0,065	1,00E+06
	180	0,07	1,00E+06
Nickel	60	0,862	4,26E+01
	120	0,851	5,03E+01
	180	0,858	4,18E+01
Gold	60	0,158	2,50E+05
	120	0,121	3,33E+05
	180	0,122	5,00E+05

Tabelle 66: Spezifische Oberflächenwiderstände der in Abschnitt 2.2.2 untersuchten Graphitschichten; Vergleich der Oberflächenwiderstände in unpoliertem und poliertem Zustand

Graphitsorte	Spezifischer Oberflächenwiderstand unpoliert (Mittelwert)	Spezifischer Oberflächenwiderstand poliert (Mittelwert)
	[$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$]	[$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$]
Edelpudergraphit 30058	9,59	5,76
AF Sp 99,5	19,48	3,40
UF 2 99,5	10,07	3,36
Kugelförmiger Graphit SG 2S 99,95	13,53	2,11
Flockengraphit feines Puder Ma-280	12,01	2,08
FDM 99,5	67,60	1,65
CR 1296	5,78	0,94
Gr C (Timrex RC-1034)	8,23	0,73
FP-A 90/92	22,58	0,50
EDM 85/90	10,40	0,44
GB 80/85	52,44	0,44
EDM 90/92	14,00	0,43
Graphit Mix 1	24,74	0,42
SGA 20 99,9	6,03	0,42
FP 99,5	30,65	0,39
EDM 96/97	19,33	0,38
Gr A (Timrex RC-1033 AE 030 C)	11,15	0,38
SC 20 O	6,76	0,35
ABL 87/90	11,72	0,27
MFL 90/92	29,48	0,22
Gr W (Timrex RC-1035)	8,32	0,17
Graphit Mix 2	8,26	0,16
Gr X (Timrex RC-1025 AF-300L)	-	-
Gr Y (Timrex RC-1033 AG-007 C)	-	-
GR Z (Timrex RC-1024 AA-108F)	-	-

Tabelle 67: Für vollständige Bedeckung der Substrate notwendige Pigmentzugabe zum Binder verdünnter Holzleim (1 Teil Holzleim : 4 Teile dest. Wasser); ermittelt durch Wiegen der Beschichtungslösung nach vollständiger Bedeckung des Substrates, im Vergleich mit den Emissionskoeffizienten der beschichteten Ziegelsubstrate. Die Beschichtung erfolgte mittels Pinselauftrag der Mischung auf die Ziegelsubstrate

Pigment	Zugabe [Vol.-%]	Emissions- koeffizient [ε]
Blitz Aluminiumpaste 1041	12,1	0,440
Aluminiumflitter F 1000 - 1600 Mikrometer	11,3	0,482
STAPA IL Hydrolan 214 Nr. 55900/G Aluminium	9,3	0,593
Goldbronzeflitter 1000-01 Reichgold	8,8	0,338
Blitz Aluminiumpaste Maxal 66009 SI/70 BG	7,1	0,422
Blitz Aluminiumpaste Maxal 66012 SI/70 BG	7,0	0,306
Aluminiumpulver Powdal 3400 XT	3,6	0,559
STANDARD Goldbronzepulver Resist LT	2,9	0,513
Blitz Aluminiumpulver 2014	2,9	0,414
STANDARD Aluminiumpulver PCS 5000	2,7	0,409
Standard Zinkflake AT	2,6	0,702
Goldbronzepulver Luminor 2210-01 Kupfer	2,2	0,524
Aluminiumpulver Powdal 340	2,1	0,49
Blitz Aluminiumpulver Aquaral 6221/63W	2,0	0,545
Goldbronzepulver Luminor 2210 Reichgold	2,0	0,380
Blitz Goldbronzepulver G7712 stabilisiert Reichbleichgold	1,8	0,521
Blitz Goldbronzepulver G7732 stabilisiert Reichbleichgold	1,7	0,574
Blitz Aluminiumpulver 20082	1,0	0,54
Blitz Aluminiumpulver 2051	1,0	0,581
Blitz Aluminiumpulver 71 - 315 my 171198	1,0	0,384
Blitz Aluminiumpulver 2014	1,0	0,410
Blitz Goldbronzepulver G2020 Reichgold	1,0	0,478
STANDARD Goldbronzepulver LACK L 900 Reichgold	1,0	0,452
Blitz Goldbronzepulver G 2021 Reichbleichgold	1,0	0,377
Blitz Goldbronzepulver G 2021 Bleichgold	1,0	0,392
Blitz Aluminium Splendal	1,0	0,571
Blitz Kupferpulver G2021	1,0	0,423

9.8. Messungen an Hochlochziegeln

Tabelle 68: Oxidische Haupt-, Neben- und Spurengehalte in den zur Verfügung gestellten Ziegeln der Projektpartner (Teil I); Analyse von Schmelztabletten mittels Röntgenfluoreszenzanalyse

Ziegel A		Ziegel B		Ziegel C	
Komponente	[%]	Komponente	[%]	Komponente	[%]
Na ₂ O	0,485	Na ₂ O	0,767	Na ₂ O	0,447
MgO	3,085	MgO	3,569	MgO	1,42
Al ₂ O ₃	13,406	Al ₂ O ₃	13,997	Al ₂ O ₃	17,936
SiO ₂	60,843	SiO ₂	59,637	SiO ₂	62,567
P ₂ O ₅	0,206	P ₂ O ₅	0,135	P ₂ O ₅	0,141
SO ₃	0,154	SO ₃	0,399	SO ₃	0,071
K ₂ O	1,906	Cl	0,029	Cl	0,033
CaO	9,362	K ₂ O	2,1	K ₂ O	2,865
TiO ₂	3,349	CaO	11,218	CaO	4,817
Cr ₂ O ₃	0,018	TiO ₂	0,785	TiO ₂	1,207
MnO	0,137	Cr ₂ O ₃	0,021	Cr ₂ O ₃	0,025
Fe ₂ O ₃	5,546	MnO	0,117	MnO	0,091
NiO	0,02	Fe ₂ O ₃	5,509	Fe ₂ O ₃	6,125
CuO	0,014	Co ₃ O ₄	0,011	Co ₃ O ₄	0,017
ZnO	0,014	NiO	0,017	NiO	0,022
Ga ₂ O ₃	0,003	CuO	0,014	CuO	0,014
Rb ₂ O	0,014	ZnO	0,016	ZnO	0,018
SrO	0,024	Ga ₂ O ₃	0,003	Ga ₂ O ₃	0,002
ZrO ₂	0,043	Rb ₂ O	0,014	Rb ₂ O	0,018
Nb ₂ O ₅	0,003	SrO	0,031	SrO	0,021
BaO	0,058	ZrO ₂	0,022	ZrO ₂	0,046
CeO ₂	0,056	Nb ₂ O ₅	0,003	Nb ₂ O ₅	0,004
PtO ₂	0,006	BaO	0,038	BaO	0,039
PbO	0,008	Au	0,252	CeO ₂	0,035
Au	0,248	PbO	0,007	Au	0,318
				PbO	0,012

Tabelle 69: Messwerte der Rohdichte an einzelnen Stegen für Ziegel B

Probenbezeichnung	Gewicht [g]	Länge [mm]		Breite [mm]		Höhe [mm]				Rohdichte [[kg]
B 1	43,0	100,56	100,56	10,9	10,9	31,95	32,26	32,18	31,9	1,22
B 2	25,68	99,97	99,97	5,92	5,92	31,81	31,04	31,94	31,78	1,37
B 3	8,31	100,31	100,31	2,13	2,13	31,64	31,74	31,71	31,68	1,23
B 4	11,97	99,53	99,53	2,89	2,89	31,55	31,73	31,65	31,63	1,31
B 5	10,53	99,33	99,33	2,47	2,47	31,59	31,63	31,71	31,61	1,36
B 6	12,16	99,6	99,6	2,58	2,58	31,62	31,65	31,67	31,48	1,50
B 7	12,31	99,87	99,87	3,05	3,05	31,79	31,7	31,58	31,47	1,28
B 8	12,18	100,18	100,18	3,03	30,03	31,84	31,84	31,69	31,59	1,26
B 9	12,06	99,8	99,8	2,93	2,93	31,27	31,55	31,68	31,64	1,31
B 10	13,4	98,44	98,44	3,09	3,09	31,95	32	31,74	31,49	1,38
B 11	15,73	100,02	100,02	3,62	3,62	31,95	32,02	31,76	31,69	1,36
B 12	18,56	100,31	100,31	5,16	5,16	31,47	31,39	31,31	31,12	1,14
B 13	19,61	89,87	89,87	5,1	5,1	32,5	32	31,8	31,42	1,34
B 14	38,63	100,56	100,56	8,71	8,71	32,33	32,4	32,22	31,52	1,37

Tabelle 72: Messwerte der Rohdichte an einzelnen Stegen für Ziegel D

Probenbezeichnung	Gewicht [g]	Länge [mm]		Breite [mm]		Höhe [mm]				Rohdichte [kg]
D 1	21,39	98,71	98,71	4,88	4,88	28,12	28,22	28,15	28,26	1,57
D 2	22,04	99,24	99,24	5,16	5,16	28,25	28,25	28,1	28,05	1,53
D 3	20,50	99,16	99,16	4,61	4,61	28,32	28,28	28,43	28,38	1,58
D 4	22,56	99,06	99,06	5,41	5,41	28,3	28,38	28,38	28,37	1,48
D 5	24,39	98,79	98,79	5,74	5,74	28,32	28,24	28,36	28,34	1,52
D 6	21,17	98,91	98,91	4,82	4,82	28,33	28,59	28,37	28,61	1,56
D 7	16,58	98,92	98,92	3,87	3,87	28,4	28,32	28,3	28,21	1,53
D 8	14,45	88,33	88,33	3,65	3,65	28,32	28,28	28,42	28,51	1,58
D 9	21,82	98,89	98,89	4,9	4,90	28,39	28,45	28,32	28,34	1,59
D 10	22,02	98,87	98,87	5,24	5,24	28,35	28,47	28,53	28,53	1,49

Tabelle 73: Messwerte der Rohdichte an einzelnen Stegen für Ziegel A

Probenbezeichnung	Gewicht [g]	Länge [mm]		Breite [mm]		Höhe [mm]				Rohdichte [kg]
A 1	36,23	98,06	98,16	28,74	28,79	8,95	8,76	9,16	8,48	1,45
A 2	36,40	97,77	97,91	28,57	28,70	8,35	8,95	8,82	8,91	1,49
A 3	37,75	98,14	98,22	28,45	28,59	9,14	8,95	9,15	8,51	1,51
A 4	38,01	98,09	98,16	28,76	28,58	9,09	8,9	9,08	9,11	1,49
A 5	36,23	98,07	98,09	28,60	28,39	8,98	8,92	8,92	9,11	1,44
A 6	36,70	98,22	98,27	28,58	28,39	8,69	8,52	8,84	8,61	1,51
A 7	36,70	98,02	97,90	28,53	28,58	8,88	8,65	8,75	8,37	1,52
A 8	38,17	97,88	98,03	28,50	28,35	9,22	9,22	9,11	9,16	1,49
A 9	37,27	98,17	98,11	28,66	28,36	9,08	8,95	9,02	9,27	1,46
A 10	36,45	98,26	98,00	28,60	28,58	9,11	9,00	8,53	8,86	1,46
A 11	34,50	98,02	97,89	28,80	28,71	8,28	7,92	8,27	8,45	1,49
A 12	37,94	97,61	97,72	28,27	28,47	9,53	8,96	8,75	8,82	1,52
A 13	36,58	98,07	98,16	28,40	28,77	8,74	8,85	8,30	8,41	1,53

Tabelle 74: Messwerte der Rohdichte an einzelnen Stegen für Ziegel E

Probenbezeichnung	Gewicht [g]	Länge [mm]		Breite [mm]		Höhe [mm]				Rohdichte [kg]
E 1	38,16	97,44	97,53	29,83	29,59	10,14	10,91	10,49	10,46	1,25
E 2	38,2	94,51	94,83	29,54	29,66	10,91	11,33	11,2	10,69	1,24
E 3	34,21	95,28	95,11	28,33	29,14	10,31	10,74	10,16	9,41	1,25
E 4	39,59	94,75	94,86	29,66	29,64	11,3	11,5	11,32	11,69	1,23
E 5	38,76	97,47	97,54	29,45	29,64	10,39	10,52	11,06	11,08	1,25
E 6	39,38	97,54	97,62	29,64	29,94	10,73	11,25	10,72	11,36	1,24
E 7	20,2	97,62	97,45	29,74	29,66	5,90	5,58	5,54	5,91	1,21
E 8	36,68	95,44	95,36	29,52	29,62	10,84	10,34	10,76	10,60	1,22
E 9	37,10	96,11	95,93	29,6	29,66	10,15	10,65	10,75	10,44	1,24
E 10	38,46	95,36	95,46	29,77	29,67	10,31	10,66	10,77	11,11	1,26
E 11	40,73	98,28	98,36	29,49	29,55	11,36	11,43	11,2	11,52	1,23
E 12	36,38	95,85	95,96	29,67	29,75	10,55	10,61	10,32	10,16	1,23
E 13	35,99	95,92	95,82	29,79	29,75	10,56	10,18	10,26	10,37	1,22
E 14	38,26	97,34	97,33	29,58	29,41	11,08	10,85	10,54	10,77	1,23
E 15	13,12	97,45	97,1	29,72	29,44	3,84	3,55	3,66	4,18	1,19

Tabelle 75: Messwerte der Rohdichte an einzelnen Stegen für Ziegel F

Probenbezeichnung	Gewicht [g]	Länge [mm]		Breite [mm]		Höhe [mm]				Rohdichte [kg]
F 1	29,88	103,37	103,37	8,28	8,28	31,68	31,64	31,67	31,65	1,10
F 2	29,98	103,40	103,40	8,57	8,57	31,98	31,80	31,78	31,85	1,06
F 3	27,91	103,40	103,40	8,06	8,06	31,80	31,90	32,02	32,07	1,05
F 4	28,74	103,35	103,35	8,40	8,40	32,08	32,06	32,02	32,05	1,03
F 5	29,33	103,24	103,24	8,23	8,23	31,79	31,80	31,96	31,86	1,08
F 6	30,97	103,31	103,31	9,40	9,40	32,20	32,16	32,17	32,18	0,99
F 7	30,77	103,35	103,35	8,30	8,30	32,10	32,13	32,15	32,16	1,12
F 8	30,62	103,32	103,32	8,27	8,27	32,02	32,05	32,07	32,09	1,12
F 9	31,71	103,31	103,31	8,35	8,35	32,11	32,09	32,07	32,08	1,15
F 10	27,5	103,28	103,28	8,15	8,15	32,16	32,14	32,17	32,18	1,02
F 11	29,07	103,32	103,32	8,30	8,30	32,14	32,16	32,13	32,15	1,05
F 12	25,53	103,40	103,40	8,12	8,12	31,63	31,62	31,65	31,63	0,96
F 13	37,21	103,32	103,32	9,95	9,95	32,29	32,25	32,30	32,27	1,12
F 14	37,19	103,43	103,43	10,00	10,00	32,41	32,40	32,45	32,43	1,11
F 15	37,02	102,95	102,95	11,20	11,20	32,19	32,2	32,17	32,20	1,00
F 16	36,92	103,35	103,35	11,02	11,02	32,29	32,25	32,28	32,26	1,00
F 17	37,01	103,35	103,35	10,23	10,23	32,25	32,23	32,28	32,28	1,08
F 18	37,21	103,45	103,45	9,96	9,96	32,28	32,26	32,24	32,22	1,12
F 19	36,91	103,28	103,28	10,00	10,00	32,65	32,60	32,66	32,63	1,09
F 20	36,89	103,67	103,67	9,95	9,95	32,07	32,05	32,02	32,05	1,12
F 21	37,6	103,83	103,83	11,28	11,28	32,40	32,42	32,45	32,45	0,99

Tabelle 76: Messergebnisse der äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten (Halbsteinmessungen) der von den Projektpartnern zur Verfügung gestellten Hochlochziegel (Teil I).

Probe	Beschichtung / Verfüllung	Einbau- datum	Dicke (Mittelwert) [mm]	Äquivalente Wärmeleitfähigkeit [W/mK]
Ziegel A	--	29.04.2011	356,869	0,127
Ziegel A	metallisiertes Papier	29.01.2012	356,869	0,113
Ziegel A	--	16.02.2012	361,874	0,128
Ziegel A	pigmentiertes Papier	28.02.2012	361,874	0,102
Ziegel A	--	11.10.2010	361,874	0,129
Ziegel A	Goldbronzepulver Luminor 2210	17.09.2010	361,874	0,100
Ziegel A	Goldbronzepulver Luminor 2210	13.11.2010	361,874	0,108
Ziegel A	Goldbronzepulver Luminor 2210	28.03.2012	361,874	0,107
Ziegel B	pigmentiertes Papier	07.02.2012	362,462	0,099
Ziegel B	--	17.02.2012	362,147	0,119
Ziegel B	--	01.10.2010	362,462	0,122
Ziegel B	Goldbronzepulver Luminor 2210	16.01.2012	362,462	0,104
Ziegel B	Goldbronzepulver Luminor 2210	13.03.2012	362,147	0,103
Ziegel B	--	30.10.2009	362,147	0,120
Ziegel C	Rockwoll	05.08.2009	365,13	0,0876
Ziegel C	Rockwoll	10.08.2009	365,13	0,0787
Ziegel C - unverfüllt	--	20.08.2009	365,13	0,213
Ziegel C	Rockwoll	15.07.2009	365,13	0,0906
Ziegel C - unverfüllt	--	27.08.2009	365,13	0,213
Ziegel C - beschichtet	Goldbronzepulver Luminor 2210	11.09.2009	365,13	0,144
Ziegel C - unverfüllt	nix	14.08.2009	366,8	0,215
Ziegel C - beschichtet	Goldbronzepulver Luminor 2210	10.11.2009	366,8	0,159
Ziegel C mit 1V gedreht beschichtet	Goldbronzepulver Luminor 2210	27.09.2011	366,8	0,120
Ziegel C - beschichtet	Goldbronzepulver Luminor 2210	20.09.2011	366,8	0,150
Ziegel C - beschichtet+Faltungen	Goldbronzepulver Luminor 2210	05.08.2009	366,8	0,115

Tabelle 77: Messergebnisse der äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten (Halbsteinmessungen) der von den Projektpartnern zur Verfügung gestellten Hochlochziegel (Teil II).

Probe	Beschichtung / Verfüllung	Einbau- datum	Dicke (Mittelwert) [mm]	Äquivalente Wärmeleitfähigkeit [W/mK]
Ziegel D	--	06.03.2012	362,100	0,143
Ziegel D beschichtet Luminor	Goldbronzepulver Luminor 2210	21.03.2012	362,100	0,119
Ziegel E	Goldbronzepulver Luminor 2210	24.06.2009	364,235	0,082
Ziegel E	--	29.05.2009	364,235	0,101
Ziegel E	--	22.05.2009	364,235	0,106
Ziegel E	--	20.05.2009	364,235	0,108
Ziegel E	---	05.06.2009	364,235	0,102
Ziegel E	--	21.11.2009	364,235	0,104
Ziegel E	--	28.11.2009	364,235	0,104
Ziegel E	--	05.12.2009	364,235	0,104
Ziegel E - Neopor	Neopor	21.09.2009		0,064
Ziegel E - Neopor	Neopor	28.09.2009		0,069
Ziegel E	--	06.10.2009	364,235	0,099
Ziegel E	--	09.09.2009	364,235	0,098
Ziegel E	--		364,235	0,101
Ziegel E - beschichtet	Goldbronzepulver Luminor 2210	03.09.2010	364,235	0,101
Ziegel E	--	10.05.2012		0,098
Ziegel E	--	15.08.2012		0,096
Ziegel E - beschichtet	Goldbronzepulver Luminor 2210	24.06.2009		0,082
Ziegel F	Mineralwolle	17.06.2012	363,200	0,082
Ziegel F	--	27.06.2012	363,200	0,121
Ziegel F - beschichtet	Goldbronzepulver Luminor 2210	02.07.2012	363,200	0,090
Ziegel G	beschichtet Luminor	30.10.2011	199,558	0,141
Ziegel G	unbeschichtet	15.11.2011	198,963	0,197
Ziegel G	mit Graphitschirmen	22.01.2012	198,963	0,145

Tabelle 78: E-Modul und Rohdichte des Ziegels B. Der E-Modul wurde mittels Ultraschallverfahren richtungsabhängig an entnommenen Querstegen bestimmt

Stegtyp	Lage:	E-Modul [kN/mm ²] bzw. [Gpa]			Rohdichte [kg/dm ³]
		Länge	Breite	Höhe	
Quersteg	Außen~	1,9	8,9	9,1	1,42
Quersteg	Außen~	2,4	43,1	-	1,43
Quersteg	Außen~	2,4	7,7	8,2	1,41
Quersteg	Außen~	2,3	6,8	-	1,47
Quersteg	Außen~	0,6	22,8	2,8	--
Quersteg	Außen~	1,7	8,0	-	1,45
Quersteg	Außen~	2,1	7,5	8,3	1,27
Quersteg	Außen~	1,8	8,5	10,2	1,45
Quersteg	Außen~	1,5	9,8	-	1,43
	Mittelwert:	2,0	8,2	9,0	1,41
Quersteg	Innen~	2,2	7,6	8,4	1,37
Quersteg	Innen~	4,0	8,3	11,9	1,54
Quersteg	Innen~	3,0	6,1	9,6	1,50
	Mittelwert:	3,1	7,3	10,0	1,47

Tabelle 79: Messwerte elastischer Materialkennwerte der Ziegel A, B, D, E und F bestimmt mittels Impuls-Erregungs-Technologie durch Anregung von Biege- und Torsionsschwingungen

Probe	Biegung	Torsion	Am- plitude	Dichte	E- Modul	G- Modul	Possion	Dämpfung
	[kHz]	[kHz]	[-]	[kg/dm ³]	[GPa]	[GPa]	[-]	[-]
F 1	1,439	2,349	9,8	1,05	4,34	1,37	0,300	0,052
F 2	1,174	1,938	8	1,05	4,31	1,38	0,300	0,042
F 3	1,642	2,658	8,7	1,05	4,72	1,52	0,300	0,046
F 4	1,357	2,209	8	1,04	4,24	1,31	0,300	0,042
A 1	2,505	4,54	5,2	1,59	7,45	3,41	0,092	0,027
A 2	2,572	4,681	6,3	1,61	8,05	3,65	0,102	0,033
A 3	2,511	4,379	6,8	1,46	11,08	3,83	0,447	0,035
A 4	2,452	4,239	6,7	1,43	9,88	3,40	0,453	0,035
D 1	1,4	2,595	9	1,49	10,34	3,45	0,300	0,047
D 2	1,355	2,638	10	1,47	8,88	3,28	0,355	0,053
D 3	1,424	2,986	8	1,54	8,93	3,89	0,148	0,042
D 4	1,44	2,707	8,5	1,51	10,83	3,81	0,422	0,044
E 1	3,404	5,137	13	1,15	8,38	2,82	0,484	0,070
E 2	1,58	2,86	11	1,07	5,77	2,13	0,353	0,058
E 3	1,128	2,093	14	1,07	6,59	2,43	0,357	0,075
E 4	2,96	4,84	10	1,20	7,86	2,80	0,402	0,053
B 1	2,734	4,252	5,6	1,22	7,97	2,67	0,300	0,029
B 2	2,234	2,28	6	1,23	7,12	0,99	0,300	0,031
B 3	1,633	2,757	7	1,13	6,11	2,06	0,482	0,036
B 4	0,8	2,9	8	1,05	4,69	2,80	0,300	0,042

9.9. Äquivalente Wärmeleitfähigkeit der Modellziegel

Tabelle 80: Messtechnisch ermittelte äquivalente Wärmeleitfähigkeiten der Modellziegel mit unterschiedlicher Ausrüstung

Modell	Beschreibung	Höhe [mm]	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]
1.1	gedreht	27,270	0,169
1.2			0,170
1.3			0,168
1.1 X	Mit Thermo-Elementen	27,270	0,166
1.2 X			0,167
1.3 X			0,165
1.1 X beschichtet	beschichtet $\epsilon = 0,272$	27,270	0,120
1.2 X beschichtet			0,119
1.3 X beschichtet			0,121
2.1	gedreht	28,355	0,187
2.2			0,186
2.3			0,190
2.1 X	Mit Thermo-Elementen	28,355	0,188
2.2 X			0,189
2.3 X			0,188
2.1 X beschichtet	beschichtet $\epsilon = 0,272$	28,355	0,151
2.2 X beschichtet			0,155
2.3 X beschichtet			0,152
3.1	gedreht	28,775	0,139
3.2			0,141
3.3			0,146
3.1 X	Mit Thermo-Elementen	28,775	0,135
3.2 X			0,135
3.3 X			0,137
3.1 X beschichtet	beschichtet $\epsilon = 0,272$	28,775	0,114
3.2 X beschichtet			0,111
3.3 X beschichtet			0,111
3.4 X beschichtet			0,109
4.1	gedreht	27,788	0,169
4.2			0,169
4.3			0,167
4.1 X	Mit Thermo-Elementen	27,788	0,165
4.2 X			0,168
4.3 X			0,170
4.1 X beschichtet	beschichtet $\epsilon = 0,272$	27,788	0,159
4.2 X beschichtet			0,155
4.3 X beschichtet			0,156
4.4 X beschichtet			0,159
Vollprobe Epoxidharz	Graphitzusatz	30,000	0,355

Tabelle 81: Vergleich Messung und Simulation der äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten $\lambda_{\text{äquiv.}}$ der Modellziegel bei Beschichtung und Verfüllung mit Dämmstoffen

Modell	Messung		Simul.	Mess.	Simul.	Mess.	Simul.	Mess.
	nix	Besch. $\epsilon = 0,3$		Neopor- füllung	Neopor- füllung	Mineralw- ollfüllung	Mineralw- ollfüllung	Perlite- füllung
1	0,185	0,135	0,129	0,099	0,114	0,121	0,123	0,129
2	0,204	0,177	0,157	0,150	0,148	0,168	0,156	0,175
3	0,142	0,121	0,102	0,123	0,127	0,151	0,138	0,156
4	0,168	0,144	0,136	0,149	0,158	0,169	0,167	0,171

Tabelle 82: Vergleich Messung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten $\lambda_{\text{äquiv.}}$ der Modellziegel ohne, mit Beschichtung und mit beschichteten Stecklingen

Modell	unbeschichtet	zwei Seiten beschichtet $\epsilon = 0,3$	vier Seiten beschichtet $\epsilon = 0,3$	metallisietes Papier $\epsilon = 0,2$	pigmentiertes Papier $\epsilon = 0,5$
1	0,185	0,135	0,138	0,112	0,128
2	0,204	0,177	0,182	0,172	0,175
3	0,142	0,121	0,12	0,122	0,125
4	0,168	0,144	0,149	0,15	0,15

Tabelle 83: Ergebnisse für die Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{10,\text{tr}}$ ausgewählter Dämmstoffe, gemessen als Schüttung oder Platte (Ergebnisse aus je drei Einzel-Messungen des Dämmmaterials)

Bezeichnung des Füllstoffes	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]
Mineralwollegranulat	0,041
Glaswollestecklinge	0,035
Perlite	0,057
Neopor Joma (als Schüttung, Styropor mit Graphit)	0,033
Polyurethanschaum	0,016

9.10. Messtechnische Ermittlung der Wärmebilanzen im Einplattenmessgerät

Tabelle 84: Experimentell ermittelte Wärmebilanzen der **unbeschichteten** Ziegel-Modelle bei 15 °C Probenmitteltemperatur (Messpunkt 1 bei 15 °C Probenmitteltemperatur im Einplattenmessgerät)

Modell	Leitung [W]	Strahlung [W]	Konvektion [W]	Gesamt [W]	Leitung [%]	Strahlung [%]	Konvektion [%]
1	0,321	0,408	0,148	0,877	36,7	46,5	16,9
2	0,460	0,341	0,095	0,896	51,4	38,1	10,6
3	0,391	0,182	0,086	0,660	59,3	27,6	13,1
4	0,612	0,216	0,046	0,874	70,0	24,8	5,2

Tabelle 85: Experimentell ermittelte Wärmebilanzen der **beschichteten** Ziegel-Modelle bei 15 °C Probenmitteltemperatur (Messpunkt 1 bei 15 °C Probenmitteltemperatur im Einplattenmessgerät)

Modell	Leitung [W]	Strahlung [W]	Konvektion [W]	Gesamt [W]	Leitung [%]	Strahlung [%]	Konvektion [%]
1	0,324	0,098	0,240	0,662	48,9	14,8	36,3
2	0,475	0,079	0,187	0,741	64,1	10,7	25,2
3	0,398	0,042	0,117	0,557	71,5	7,6	21,0
4	0,618	0,047	0,192	0,856	72,1	5,5	22,4

Tabelle 86: Experimentell ermittelte Wärmebilanzen der **unbeschichteten** Ziegel-Modelle bei 25 °C Probenmitteltemperatur (Messpunkt 1 bei 15 °C Probenmitteltemperatur im Einplattenmessgerät)

Modell	Leitung [W]	Strahlung [W]	Konvektion [W]	Gesamt [W]	Leitung [%]	Strahlung [%]	Konvektion [%]
1	0,322	0,446	0,130	0,898	35,9	49,6	14,5
2	0,463	0,377	0,068	0,908	51,0	41,5	7,5
3	0,388	0,198	0,104	0,690	56,2	28,7	15,0
4	0,614	0,237	0,046	0,897	68,5	26,4	5,1

Tabelle 87: Experimentell ermittelte Wärmebilanzen der **beschichteten** Ziegel-Modelle bei 25 °C Probenmitteltemperatur (Messpunkt 1 bei 15 °C Probenmitteltemperatur im Einplattenmessgerät)

Modell	Leitung [W]	Strahlung [W]	Konvektion [W]	Gesamt [W]	Leitung [%]	Strahlung [%]	Konvektion [%]
1	0,326	0,109	0,237	0,672	48,5	16,3	35,2
2	0,477	0,088	0,187	0,752	63,4	11,7	24,8
3	0,399	0,046	0,130	0,575	69,4	8,0	22,6
4	0,630	0,050	0,177	0,857	73,5	5,9	20,6

Tabelle 88: Experimentell ermittelte Wärmebilanzen der **unbeschichteten** Ziegel-Modelle bei 35 °C Probenmitteltemperatur (Messpunkt 1 bei 15 °C Probenmitteltemperatur im Einplattenmessgerät)

Modell	Leitung [W]	Strahlung [W]	Konvektion [W]	Gesamt [W]	Leitung [%]	Strahlung [%]	Konvektion [%]
1	0,321	0,483	0,135	0,939	34,2	51,5	14,3
2	0,461	0,411	0,078	0,950	48,5	43,2	8,2
3	0,385	0,216	0,121	0,722	53,4	29,9	16,7
4	0,619	0,259	0,052	0,930	66,5	27,9	5,6

Tabelle 89: Experimentell ermittelte Wärmebilanzen der **beschichteten** Ziegel-Modelle bei 35 °C Probenmitteltemperatur (Messpunkt 1 bei 15 °C Probenmitteltemperatur im Einplattenmessgerät)

Modell	Leitung [W]	Strahlung [W]	Konvektion [W]	Gesamt [W]	Leitung [%]	Strahlung [%]	Konvektion [%]
1	0,325	0,121	0,238	0,684	47,5	17,7	34,8
2	0,479	0,094	0,197	0,770	62,2	12,2	25,5
3	0,394	0,051	0,142	0,587	67,1	8,7	24,2
4	0,631	0,056	0,176	0,863	73,1	6,5	20,4

9.11. FE-Berechnung der Wärmebilanzen der Modellziegel

Tabelle 90: FE-Berechnung (ANSYS CFX) der äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten λ_{equiv} von **Modell 1** und Aufstellung einer Wärmebilanz mittels FE-Simulation: „II“ bedeutet ohne Wärmestrahlungsübergang, „III“ bedeutet ohne Wärmestrahlungs- und Konvektionsübergang, „IV“ bedeutet ausschließlich Leitung im Festkörper

Modell	ϵ [-]	Wärmestrom dQ/dt [W]	Wärmeleitf. [W/mK]	Temperaturen [°C]			$\lambda_{10,\text{tr}}$ [W/mK]
				kalt	warm	Mitteltemp.	
Modell 1	0,94	1,02095	0,197	7,83	21,95	14,8	0,195
	0,94	1,03528	0,203	18,27	32,19	25,2	
	0,94	1,0687	0,209	28,51	42,45	35,5	
Modell 1	0,3	0,79556	0,145	7,43	22,35	14,9	0,145
	0,3	0,791005	0,146	17,83	32,63	25,2	
	0,3	0,799341	0,147	28,05	42,93	35,5	
Modell 1	II	0,703179	0,129	7,43	22,35	14,9	-
	III	0,583653	0,108	7,43	22,35	14,9	-
	IV	0,414403	0,076	7,43	22,35	14,9	-

Tabelle 91: FE-Berechnung (ANSYS CFX) der äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten λ_{equiv} von **Modell 2** und Aufstellung einer Wärmebilanz mittels FE-Simulation: „II“ bedeutet ohne Wärmestrahlungsübergang, „III“ bedeutet ohne Wärmestrahlungs- und Konvektionsübergang, „IV“ bedeutet ausschließlich Leitung im Festkörper

Modell	ϵ [-]	Wärmestrom dQ/dt [W]	Wärmeleitf. [W/mK]	Temperaturen [°C]			$\lambda_{10,\text{tr}}$ [W/mK]
				kalt	warm	Mitteltemp.	
Modell 2	0,94	0,99792	0,217	8,26	21,31	14,8	0,215
	0,94	1,00872	0,222	18,68	31,59	25,1	
	0,94	1,03081	0,227	28,95	41,84	35,4	
Modell 2	0,3	0,846752	0,176	7,96	21,60	14,8	0,176
	0,3	0,84328	0,177	18,38	31,93	25,1	
	0,3	0,849406	0,177	28,61	42,20	35,4	
Modell 2	II	0,757426	0,157	7,96	21,60	14,8	-
	III	0,687737	0,143	7,96	21,60	14,8	-
	IV	0,561296	0,117	7,96	21,60	14,8	-

Tabelle 92: FE-Berechnung (ANSYS CFX) der äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten λ_{equiv} von **Modell 3** und Aufstellung einer Wärmebilanz mittels FE-Simulation: „II“ bedeutet ohne Wärmestrahlungsübergang, „III“ bedeutet ohne Wärmestrahlungs- und Konvektionsübergang, „IV“ bedeutet ausschließlich Leitung im Festkörper

Modell	ϵ [-]	Wärmestrom dQ/dt [W]	Wärmeleitf. [W/mK]	Temperaturen [°C]			$\lambda_{10,\text{tr}}$ [W/mK]
				kalt	warm	Mitteltemp.	
Modell 3	0,94	0,753309	0,159	7,94	21,61	14,8	0,157
	0,94	0,763532	0,163	18,32	31,83	25,1	
	0,94	0,758659	0,167	28,85	41,93	35,4	
Modell 3	0,3	0,62847	0,128	7,66	21,82	14,7	0,127
	0,3	0,62755	0,129	18,07	32,10	25,3	
	0,3	0,633175	0,130	28,35	42,39	35,4	
Modell 3	II	0,582682	0,118	7,66	21,82	14,7	-
	III	0,582053	0,118	7,66	21,82	14,7	-
	IV	0,386345	0,081	7,66	21,82	14,7	-

Tabelle 93: FE-Berechnung (ANSYS CFX) der äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten λ_{equiv} von **Modell 4** und Aufstellung einer Wärmebilanz mittels FE-Simulation: „II“ bedeutet ohne Wärmestrahlungsübergang, „III“ bedeutet ohne Wärmestrahlungs- und Konvektionsübergang, „IV“ bedeutet ausschließlich Leitung im Festkörper

Modell	ϵ [-]	Wärmestrom dQ/dt [W]	Wärmeleitf. [W/mK]	Temperaturen [°C]			$\lambda_{10,\text{tr}}$ [W/mK]
				kalt	warm	Mitteltemp.	
Modell 4	0,94	0,931732	0,182	7,58	21,78	14,63	0,181
	0,94	0,936194	0,186	18,03	32,05	24,67	
	0,94	0,951189	0,189	28,33	42,32	35,33	
Modell 4	0,3	0,825053	0,158	7,35	21,83	14,57	0,158
	0,3	0,817861	0,159	17,88	32,16	25,00	
	0,3	0,817714	0,160	28,24	42,44	35,30	
Modell 4	II	0,785833	0,151	7,35	21,83	14,57	-
	III	0,785495	0,151	7,35	21,83	14,57	-
	IV	0,618051	0,119	7,35	21,83	14,57	-

Tabelle 94: FE-Berechnung (SOLIDO) der äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten $\lambda_{\text{equiv.}}$ von **Modell 1** und Aufstellung einer Wärmebilanz mittels FE-Simulation: „II“ bedeutet ohne Wärmestrahlungsübergang, „III“ bedeutet ohne Wärmestrahlungs- und Konvektionsübergang, „IV“ bedeutet ausschließlich Leitung im Festkörper

Modell	ϵ [-]	Wärmestrom dQ/dt [W]	Wärmeleitf. [W/mK]	Temperaturen [°C]			$\lambda_{10,\text{tr.}}$ [W/mK]
				kalt	warm	Mitteltemp.	
Modell 1	0,94	0,92443	0,181	7,83	21,95	14,8	0,180
	0,94	0,91069	0,181	18,27	32,19	25,2	
	0,94	0,91207	0,181	28,51	42,45	35,5	
Modell 1	0,3	0,7	0,129	7,43	22,35	14,9	0,129
	0,3	0,69389	0,129	17,83	32,63	25,2	
	0,3	0,69796	0,129	28,05	42,93	35,5	
Modell 1	II	0,60836	0,112	7,43	22,35	14,9	-
	III			7,43	22,35	14,9	-
	IV	0,4081	0,075	7,43	22,35	14,9	-

Tabelle 95: FE-Berechnung (SOLIDO) der äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten $\lambda_{\text{equiv.}}$ von **Modell 2** und Aufstellung einer Wärmebilanz mittels FE-Simulation: „II“ bedeutet ohne Wärmestrahlungsübergang, „III“ bedeutet ohne Wärmestrahlungs- und Konvektionsübergang, „IV“ bedeutet ausschließlich Leitung im Festkörper

Modell	ϵ [-]	Wärmestrom dQ/dt [W]	Wärmeleitf. [W/mK]	Temperaturen [°C]			$\lambda_{10,\text{tr.}}$ [W/mK]
				kalt	warm	Mitteltemp.	
Modell 1	0,94	0,93904	0,207	8,26	21,31	14,8	0,204
	0,94	0,95485	0,213	18,68	31,59	25,1	
	0,94	0,98065	0,219	28,95	41,84	35,4	
Modell 1	0,3	0,74707	0,157	7,96	21,60	14,8	0,157
	0,3	0,74625	0,158	18,38	31,93	25,1	
	0,3	0,75311	0,159	28,61	42,20	35,4	
Modell 1	II	0,6671	0,140	7,96	21,60	14,8	-
	III			7,96	21,60	14,8	-
	IV	0,51993	0,109	7,96	21,60	14,8	-

Tabelle 96: FE-Berechnung (SOLIDO) der äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten $\lambda_{\text{equiv.}}$ von **Modell 3** und Aufstellung einer Wärmebilanz mittels FE-Simulation: „II“ bedeutet ohne Wärmestrahlungsübergang, „III“ bedeutet ohne Wärmestrahlungs- und Konvektionsübergang, „IV“ bedeutet ausschließlich Leitung im Festkörper

Modell	ϵ [-]	Wärmestrom dQ/dt [W]	Wärmeleitf. [W/mK]	Temperaturen [°C]			$\lambda_{10,\text{tr.}}$ [W/mK]
				kalt	warm	Mitteltemp.	
Modell 1	0,94	0,63859	0,136	7,94	21,61	14,8	0,134
	0,94	0,65103	0,140	18,32	31,83	25,1	
	0,94	0,65026	0,144	28,85	41,93	35,4	
Modell 1	0,3	0,49993	0,102	7,66	21,82	14,7	0,102
	0,3	0,50024	0,103	18,07	32,10	25,3	
	0,3	0,50602	0,104	28,35	42,39	35,4	
Modell 1	II	0,45289	0,093	7,66	21,82	14,7	-
	III						-
	IV	0,37914	0,077	7,66	21,82	14,7	-

Tabelle 97: FE-Berechnung (SOLIDO) der äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten $\lambda_{\text{äquiv.}}$ von Modell 4 und Aufstellung einer Wärmebilanz mittels FE-Simulation: „II“ bedeutet ohne Wärmestrahlungsübergang, „III“ bedeutet ohne Wärmestrahlungs- und Konvektionsübergang, „IV“ bedeutet ausschließlich Leitung im Festkörper

Modell	ϵ [-]	Wärmestrom dQ/dt [W]	Wärmeleitf. [W/mK]	Temperaturen [°C]			$\lambda_{10,\text{tr.}}$ [W/mK]
				kalt	warm	Mitteltemp.	
Modell 1	0,94	0,82218	0,163	7,58	21,78	14,63	0,161
	0,94	0,82868	0,166	18,03	32,05	24,67	
	0,94	0,84475	0,170	28,33	42,32	35,33	
Modell 1	0,3	0,70544	0,137	7,35	21,83	14,57	0,136
	0,3	0,69979	0,138	17,88	32,16	25,00	
	0,3	0,70034	0,138	28,24	42,44	35,30	
Modell 1	II	0,66538	0,129	7,35	21,83	14,57	-
	III			7,35	21,83	14,57	-
	IV	0,60138	0,116	7,35	21,83	14,57	-

Tabelle 98: FE-Wärmebilanzen der unbeschichteten Modellziegel nach Berechnung mit der Software ANSYS CFX bei 15 °C Probenmitteltemperatur (analog zu Messpunkt 1 bei 15 °C Probenmitteltemperatur im Einplattenmessgerät)

Modell	Leitung [W]	Strahlung [W]	Konvektion [W]	Gesamt [W]	Leitung [%]	Strahlung [%]	Konvektion [%]
1	0,414	0,318	0,289	1,021	40,6	31,1	28,3
2	0,561	0,240	0,196	0,998	56,2	24,1	19,7
3	0,386	0,171	0,196	0,753	51,3	22,7	26,1
4	0,618	0,146	0,168	0,932	66,3	15,7	18,0

Tabelle 99: FE-Wärmebilanzen der unbeschichteten Modellziegel nach Berechnung mit der Software SOLIDO bei 15 °C Probenmitteltemperatur (analog zu Messpunkt 1 bei 15 °C Probenmitteltemperatur im Einplattenmessgerät)

Modell	Leitung [W]	Strahlung [W]	Konvektion [W]	Gesamt [W]	Leitung [%]	Strahlung [%]	Konvektion [%]
1	0,408	0,316	0,200	0,924	44,1	34,2	21,7
2	0,520	0,272	0,147	0,939	55,4	29,0	15,7
3	0,379	0,186	0,074	0,639	59,4	29,1	11,5
4	0,601	0,157	0,064	0,822	73,1	19,1	7,8

Tabelle 100: Minderung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{\text{äquiv.}}$ von Ziegel C nach Zulassung Z 17.1-906 bei schrittweiser Absenkung des Emissionskoeffizienten der keramischen Scherbenoberfläche um jeweils $\Delta\epsilon = 0,1$ von $\epsilon = 0,0$ bis $\epsilon = 1,0$ bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{\text{Scherben}} = 0,25$ W/mK (Berechnung mit SOLIDO)

ϵ	d [m]	H [m]	B [m]	Wärme- weg [m]	ΔT [K]	α_i [W/m ² K]	α_a [W/m ² K]	λ_{Sch} [W/mK]	dQ/dt [W]	$\lambda_{\text{äquiv.}}$ [W/mK]
1,0	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,25	0,39536	0,235
0,9	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,25	0,36818	0,219
0,8	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,25	0,3389	0,201
0,7	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,25	0,31066	0,185
0,6	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,25	0,28334	0,168
0,5	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,25	0,25685	0,153
0,4	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,25	0,23111	0,137
0,3	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,25	0,20602	0,122
0,2	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,25	0,18147	0,108
0,1	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,25	0,1574	0,093
0	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,25	0,13368	0,079

Tabelle 101: Minderung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{\text{äquival.}}$ von Ziegel C nach Zulassung Z 17.1-906 bei schrittweiser Absenkung des Emissionskoeffizienten der keramischen Scherbenoberfläche um jeweils $\Delta\varepsilon = 0,1$ von $\varepsilon = 0,0$ bis $\varepsilon = 1,0$ bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{\text{Scherben}} = 0,293 \text{ W/mK}$ (Berechnung mit SOLIDO)

ε	d [m]	H [m]	B [m]	Wärme- weg [m]	ΔT [K]	α_i [W/m ² K]	α_a [W/m ² K]	λ_{Sch} [W/mK]	dQ/dt [W]	$\lambda_{\text{äqui.}}$ [W/mK]
1,0	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,293	0,4213	0,250
0,9	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,293	0,38982	0,232
0,8	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,293	0,35823	0,213
0,7	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,293	0,32797	0,195
0,6	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,293	0,2989	0,178
0,5	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,293	0,27089	0,161
0,4	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,293	0,24383	0,145
0,3	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,293	0,21759	0,129
0,2	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,293	0,19209	0,114
0,1	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,293	0,16718	0,099
0	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,293	0,14276	0,085

Tabelle 102: Finite Elemente Berechnung (SOLIDO) der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit des Ziegels C nach Zulassung Z 17.1-906. Vergleich der unverfüllten und unbeschichteten Nullprobe mit verfüllten bzw. beschichteten Proben (Verfüllung mit Neopor, Mineralwollegranulat und Perlite)

Aus- rüstung	d [m]	H [m]	B [m]	Wärme- weg [m]	ΔT [K]	α_i [W/m ² K]	α_a [W/m ² K]	λ_{Sch} [W/mK]	dQ/dt [W]	$\lambda_{\text{äqui.}}$ [W/mK]
Null- probe	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,293	0,40374	0,240
Beschich- tung	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,293	0,23429	0,139
Neopor	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,293	0,12609	0,075
Mineral- wolle	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,293	0,14271	0,085
Perlite	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,293	0,17455	0,104
Null- probe	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,25	0,38828	0,231
Beschich- ung	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,25	0,222	0,132
Neopor	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,25	0,1177	0,070
Mineral- wolle	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,25	0,13394	0,080
Perlite	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,25	0,16488	0,098

Tabelle 103: Minderung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{\text{äquival.}}$ von Ziegel D bei schrittweiser Absenkung des Emissionskoeffizienten der keramischen Scherbenoberfläche um jeweils $\Delta\varepsilon = 0,1$ von $\varepsilon = 0,0$ bis $\varepsilon = 1,0$ bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{\text{Scherben}} = 0,35 \text{ W/mK}$ (Berechnung mit SOLIDO)

ε	d [m]	H [m]	B [m]	Wärmeweg [m]	ΔT [K]	α_i [W/m ² K]	α_a [W/m ² K]	λ_{Sch} [W/mK]	dQ/dt [W]	$\lambda_{\text{äqui.}}$ [W/mK]
1,0	0,365	0,249	0,243563	0,060647187	10	1000	1000	0,35	0,296857	0,179
0,9	0,365	0,249	0,243563	0,060647187	10	1000	1000	0,35	0,232423	0,140
0,8	0,365	0,249	0,243563	0,060647187	10	1000	1000	0,35	0,219692	0,132
0,7	0,365	0,249	0,243563	0,060647187	10	1000	1000	0,35	0,208398	0,126
0,6	0,365	0,249	0,243563	0,060647187	10	1000	1000	0,35	0,198182	0,119
0,5	0,365	0,249	0,243563	0,060647187	10	1000	1000	0,35	0,188869	0,114
0,4	0,365	0,249	0,243563	0,060647187	10	1000	1000	0,35	0,180323	0,109
0,3	0,365	0,249	0,243563	0,060647187	10	1000	1000	0,35	0,172408	0,104
0,2	0,365	0,249	0,243563	0,060647187	10	1000	1000	0,35	0,165058	0,099
0,1	0,365	0,249	0,243563	0,060647187	10	1000	1000	0,35	0,158179	0,095
0	0,365	0,249	0,243563	0,060647187	10	1000	1000	0,35	0,15171	0,091

Tabelle 104: Minderung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{\text{äquival.}}$ von Ziegel D bei schrittweiser Absenkung des Emissionskoeffizienten der keramischen Scherbenoberfläche um jeweils $\Delta\varepsilon = 0,1$ von $\varepsilon = 0,0$ bis $\varepsilon = 1,0$ bei einer Scherbenwärmeleitfähigkeit von $\lambda_{\text{Scherben}} = 0,25 \text{ W/mK}$ (Berechnung mit SOLIDO)

ε	d [m]	H [m]	B [m]	Wärmeweg [m]	ΔT [K]	α_i [W/m ² K]	α_a [W/m ² K]	λ_{Sch} [W/mK]	dQ/dt [W]	$\lambda_{\text{äqui.}}$ [W/mK]
1	0,365	0,249	0,243563	0,060647187	10	1000	1000	0,25	0,251806	0,152
0,9	0,365	0,249	0,243563	0,060647187	10	1000	1000	0,25	0,199224	0,120
0,8	0,365	0,249	0,243563	0,060647187	10	1000	1000	0,25	0,187651	0,113
0,7	0,365	0,249	0,243563	0,060647187	10	1000	1000	0,25	0,177296	0,107
0,6	0,365	0,249	0,243563	0,060647187	10	1000	1000	0,25	0,167875	0,101
0,5	0,365	0,249	0,243563	0,060647187	10	1000	1000	0,25	0,159237	0,096
0,4	0,365	0,249	0,243563	0,060647187	10	1000	1000	0,25	0,151257	0,091
0,3	0,365	0,249	0,243563	0,060647187	10	1000	1000	0,25	0,143836	0,087
0,2	0,365	0,249	0,243563	0,060647187	10	1000	1000	0,25	0,136909	0,082
0,1	0,365	0,249	0,243563	0,060647187	10	1000	1000	0,25	0,130378	0,079
0	0,365	0,249	0,243563	0,060647187	10	1000	1000	0,25	0,124192	0,075

Tabelle 105: Finite Elemente Berechnung (SOLIDO) der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit des Ziegels D. Vergleich der unverfüllten und unbeschichteten Nullprobe mit verfüllten bzw. beschichteten Proben (Verfüllung mit Neopor, Mineralwollegranulat und Perlite)

Aus- rüstung	d [m]	H [m]	B [m]	Wärme- weg [m]	ΔT [K]	α_i [W/m ² K]	α_a [W/m ² K]	λ_{Sch} [W/mK]	dQ/dt [W]	$\lambda_{\text{äqui.}}$ [W/mK]
Null- probe	0,365	0,249	0,2435	0,060647	10	1000	1000	0,35	0,241936	0,146
Beschich- tung	0,365	0,249	0,2435	0,060647	10	1000	1000	0,35	0,20125	0,121
Neopor	0,365	0,249	0,2435	0,060647	10	1000	1000	0,35	0,16742	0,101
Mineral- wolle	0,365	0,249	0,2435	0,060647	10	1000	1000	0,35	0,18392	0,111
Perlite	0,365	0,249	0,2435	0,060647	10	1000	1000	0,35	0,2151	0,130
Null- probe	0,365	0,249	0,2435	0,06064718	10	1000	1000	0,25	0,20785	0,125
Beschich- ung	0,365	0,249	0,2435	0,06064718	10	1000	1000	0,25	0,17071	0,103
Neopor	0,365	0,249	0,2435	0,06064718	10	1000	1000	0,25	0,13881	0,084
Mineral- wolle	0,365	0,249	0,2435	0,06064718	10	1000	1000	0,25	0,15421	0,093
Perlite	0,365	0,249	0,2435	0,06064718	10	1000	1000	0,25	0,18297	0,110

Tabelle 106: Minderung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{\text{äquival.}}$ von Ziegel F bei schrittweiser Absenkung des Emissionskoeffizienten der keramischen Scherbenoberfläche um jeweils $\Delta\varepsilon = 0,1$ von $\varepsilon = 0,0$ bis $\varepsilon = 1,0$ bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{\text{Scherben}} = 0,27 \text{ W/mK}$ (Berechnung mit SOLIDO)

ε	d [m]	H [m]	B [m]	Wärmeweg [m]	ΔT [K]	α_i [W/m ² K]	α_a [W/m ² K]	λ_{Sch} [W/mK]	dQ/dt [W]	$\lambda_{\text{äqui.}}$ [W/mK]
1,0	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,27	0,2724	0,162
0,9	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,27	0,2212	0,131
0,8	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,27	0,20312	0,121
0,7	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,27	0,18677	0,111
0,6	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,27	0,17183	0,102
0,5	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,27	0,15807	0,094
0,4	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,27	0,14533	0,086
0,3	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,27	0,13347	0,079
0,2	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,27	0,12236	0,073
0,1	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,27	0,11191	0,066
0	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,27	0,102	0,061

Tabelle 107: Minderung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{\text{äquival.}}$ von Ziegel F bei schrittweiser Absenkung des Emissionskoeffizienten der keramischen Scherbenoberfläche um jeweils $\Delta\varepsilon = 0,1$ von $\varepsilon = 0,0$ bis $\varepsilon = 1,0$ bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{\text{Scherben}} = 0,25 \text{ W/mK}$ (Berechnung mit SOLIDO)

ε	d [m]	H [m]	B [m]	Wärmeweg [m]	ΔT [K]	α_i [W/m ² K]	α_a [W/m ² K]	λ_{Sch} [W/mK]	dQ/dt [W]	$\lambda_{\text{äqui.}}$ [W/mK]
1	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,25	0,26525	0,158
0,9	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,25	0,21586	0,128
0,8	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,25	0,19814	0,118
0,7	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,25	0,18208	0,108
0,6	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,25	0,16739	0,099
0,5	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,25	0,15382	0,091
0,4	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,25	0,14125	0,084
0,3	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,25	0,12953	0,077
0,2	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,25	0,11854	0,070
0,1	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,25	0,10818	0,064
0	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,25	0,09835	0,058

Tabelle 108: Finite Elemente Berechnung (SOLIDO) der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit des Ziegels F. Vergleich der unverfüllten und unbeschichteten Nullprobe mit verfüllten bzw. beschichteten Proben (Verfüllung mit Neopor, Mineralwollegranulat und Perlite)

Aus-rüstung	d [m]	H [m]	B [m]	Wärme-weg [m]	ΔT [K]	α_i [W/m ² K]	α_a [W/m ² K]	λ_{Sch} [W/mK]	dQ/dt [W]	$\lambda_{\text{äqui.}}$ [W/mK]
Null-probe	0,365	0,249	0,13520	0,0336658	10	1000	1000	0,27	0,119193	0,129
Beschich-tung	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,27	0,15728	0,093
Neopor	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,27	0,11475	0,068
Mineral-wolle	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,27	0,12996	0,077
Perlite	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,27	0,1592	0,095
Null-probe	0,365	0,249	0,12610	0,0336658	10	1000	1000	0,25	0,116427	0,126
Beschich-tung	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,25	0,15304	0,091
Neopor	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,25	0,11094	0,066
Mineral-wolle	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,25	0,12061	0,072
Perlite	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,25	0,15489	0,092

Tabelle 109: Minderung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{\text{äquival.}}$ von Ziegel B bei schrittweiser Absenkung des Emissionskoeffizienten der keramischen Scherbenoberfläche um jeweils $\Delta\varepsilon = 0,1$ von $\varepsilon = 0,0$ bis $\varepsilon = 1,0$ bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{\text{Scherben}} = 0,332 \text{ W/mK}$ (Berechnung mit SOLIDO)

ε	d [m]	H [m]	B [m]	Wärmeweg [m]	ΔT [K]	α_i [W/m ² K]	α_a [W/m ² K]	λ_{Sch} [W/mK]	dQ/dt [W]	$\lambda_{\text{äqui.}}$ [W/mK]
1,0	1	0,365	0,249	0,247	0,061503	20	7,7	25	0,332	0,475149
0,9	0,9	0,365	0,249	0,247	0,061503	20	7,7	25	0,332	0,355729
0,8	0,8	0,365	0,249	0,247	0,061503	20	7,7	25	0,332	0,337286
0,7	0,7	0,365	0,249	0,247	0,061503	20	7,7	25	0,332	0,320823
0,6	0,6	0,365	0,249	0,247	0,061503	20	7,7	25	0,332	0,305814
0,5	0,5	0,365	0,249	0,247	0,061503	20	7,7	25	0,332	0,291989
0,4	0,4	0,365	0,249	0,247	0,061503	20	7,7	25	0,332	0,279142
0,3	0,3	0,365	0,249	0,247	0,061503	20	7,7	25	0,332	0,267125
0,2	0,2	0,365	0,249	0,247	0,061503	20	7,7	25	0,332	0,25574
0,1	0,1	0,365	0,249	0,247	0,061503	20	7,7	25	0,332	0,244757
0	0	0,365	0,249	0,247	0,061503	20	7,7	25	0,332	0,23378

Tabelle 110: Minderung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{\text{äquival.}}$ von Ziegel B bei schrittweiser Absenkung des Emissionskoeffizienten der keramischen Scherbenoberfläche um jeweils $\Delta\varepsilon = 0,1$ von $\varepsilon = 0,0$ bis $\varepsilon = 1,0$ bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{\text{Scherben}} = 0,25 \text{ W/mK}$ (Berechnung mit SOLIDO)

ε	d [m]	H [m]	B [m]	Wärmeweg [m]	ΔT [K]	α_i [W/m ² K]	α_a [W/m ² K]	λ_{Sch} [W/mK]	dQ/dt [W]	$\lambda_{\text{äqui.}}$ [W/mK]
1,0	1	0,365	0,249	0,247	0,061503	20	7,7	25	0,25	0,42522
0,9	0,9	0,365	0,249	0,247	0,061503	20	7,7	25	0,25	0,320129
0,8	0,8	0,365	0,249	0,247	0,061503	20	7,7	25	0,25	0,302875
0,7	0,7	0,365	0,249	0,247	0,061503	20	7,7	25	0,25	0,287429
0,6	0,6	0,365	0,249	0,247	0,061503	20	7,7	25	0,25	0,273285
0,5	0,5	0,365	0,249	0,247	0,061503	20	7,7	25	0,25	0,26022
0,4	0,4	0,365	0,249	0,247	0,061503	20	7,7	25	0,25	0,248052
0,3	0,3	0,365	0,249	0,247	0,061503	20	7,7	25	0,25	0,236618
0,2	0,2	0,365	0,249	0,247	0,061503	20	7,7	25	0,25	0,225751
0,1	0,1	0,365	0,249	0,247	0,061503	20	7,7	25	0,25	0,215239
0	0	0,365	0,249	0,247	0,061503	20	7,7	25	0,25	0,204621

Tabelle 111: Finite Elemente Berechnung (SOLIDO) der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit des Ziegels B. Vergleich der unverfüllten und unbeschichteten Nullprobe mit verfüllten bzw. beschichteten Proben (Verfüllung mit Neopor, Mineralwollegranulat und Perlite)

Aus- rüstung	d [m]	H [m]	B [m]	Wärme- weg [m]	ΔT [K]	α_i [W/m ² K]	α_a [W/m ² K]	λ_{Sch} [W/mK]	dQ/dt [W]	$\lambda_{\text{äqui.}}$ [W/mK]
Null- probe	0,365	0,249	0,247	0,061503	20	7,7	25	0,332	0,366386	0,115
Beschich- tung	0,365	0,249	0,247	0,061503	20	7,7	25	0,332	0,286999	0,089
Neopor	0,365	0,249	0,247	0,061503	20	7,7	25	0,332	0,2659	0,082
Mineral- wolle	0,365	0,249	0,247	0,061503	20	7,7	25	0,332	0,29844	0,092
Perlite	0,365	0,249	0,247	0,061503	20	7,7	25	0,332	0,35897	0,112
Null- probe	0,365	0,249	0,247	0,061503	20	7,7	25	0,25	0,33319	0,104
Beschich- ung	0,365	0,249	0,247	0,061503	20	7,7	25	0,25	0,2555	0,079
Neopor	0,365	0,249	0,247	0,061503	20	7,7	25	0,25	0,23565	0,072
Mineral- wolle	0,365	0,249	0,247	0,061503	20	7,7	25	0,25	0,26656	0,082
Perlite	0,365	0,249	0,247	0,061503	20	7,7	25	0,25	0,32353	0,100

Tabelle 112: Minderung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{\text{äquival.}}$ von Ziegel E bei schrittweiser Absenkung des Emissionskoeffizienten der keramischen Scherbenoberfläche um jeweils $\Delta\varepsilon = 0,1$ von $\varepsilon = 0,0$ bis $\varepsilon = 1,0$ bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{\text{Scherben}} = 0,332 \text{ W/mK}$ (Berechnung mit SOLIDO)

ε	d [m]	H [m]	B [m]	Wärmeweg [m]	ΔT [K]	α_i [W/m ² K]	α_a [W/m ² K]	λ_{Sch} [W/mK]	dQ/dt [W]	$\lambda_{\text{äqui.}}$ [W/mK]
1,0	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,332	0,26856	0,160
0,9	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,332	0,1702	0,101
0,8	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,332	0,16025	0,095
0,7	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,332	0,15143	0,090
0,6	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,332	0,14345	0,085
0,5	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,332	0,13617	0,081
0,4	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,332	0,1295	0,077
0,3	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,332	0,12334	0,073
0,2	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,332	0,11762	0,070
0,1	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,332	0,1123	0,067
0	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,332	0,1073	0,064

Tabelle 113: Minderung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{\text{äquival.}}$ von Ziegel E bei schrittweiser Absenkung des Emissionskoeffizienten der keramischen Scherbenoberfläche um jeweils $\Delta\varepsilon = 0,1$ von $\varepsilon = 0,0$ bis $\varepsilon = 1,0$ bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{\text{Scherben}} = 0,25 \text{ W/mK}$ (Berechnung mit SOLIDO)

ε	d [m]	H [m]	B [m]	Wärmeweg [m]	ΔT [K]	α_i [W/m ² K]	α_a [W/m ² K]	λ_{Sch} [W/mK]	dQ/dt [W]	$\lambda_{\text{äqui.}}$ [W/mK]
1,0	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,25	0,23441	0,139
0,9	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,25	0,154	0,091
0,8	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,25	0,14471	0,086
0,7	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,25	0,13643	0,081
0,6	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,25	0,12891	0,077
0,5	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,25	0,12202	0,072
0,4	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,25	0,11567	0,069
0,3	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,25	0,10979	0,065
0,2	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,25	0,10432	0,062
0,1	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,25	0,0992	0,059
0	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,25	0,09437	0,056

Tabelle 114: Finite Elemente Berechnung (SOLIDO) der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit des Ziegels E. Vergleich der unverfüllten und unbeschichteten Nullprobe mit verfüllten bzw. beschichteten Proben (Verfüllung mit Neopor, Mineralwollegranulat und Perlite)

Aus- rüstung	d [m]	H [m]	B [m]	Wärme- weg [m]	ΔT [K]	α_i [W/m ² K]	α_a [W/m ² K]	λ_{Sch} [W/mK]	dQ/dt [W]	$\lambda_{\text{äqui.}}$ [W/mK]
Null- probe	0,365	0,249	0,244698	0,0609298	10	1000	1000	0,332	0,1702	0,102
Beschich- tung	0,365	0,249	0,247	0,061503	20	7,7	25	0,332	0,2585	0,080
Neopor	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,332	0,13089	0,078
Mineral- wolle	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,332	0,15088	0,090
Perlite	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,332	0,18435	0,109
Null- probe	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,25	0,1605	0,095
Beschich- ung	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,25	0,11850	0,071
Neopor	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,25	0,11824	0,070
Mineral- wolle	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,25	0,13496	0,080
Perlite	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,25	0,16582	0,098

Tabelle 115: Minderung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{\text{äquival.}}$ von Ziegel A bei schrittweiser Absenkung des Emissionskoeffizienten der keramischen Scherbenoberfläche um jeweils $\Delta\varepsilon = 0,1$ von $\varepsilon = 0,0$ bis $\varepsilon = 1,0$ bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{\text{Scherben}} = 0,366 \text{ W/mK}$ (Berechnung mit SOLIDO)

ε	d [m]	H [m]	B [m]	Wärmeweg [m]	ΔT [K]	α_i [W/m ² K]	α_a [W/m ² K]	λ_{Sch} [W/mK]	dQ/dt [W]	$\lambda_{\text{äqui.}}$ [W/mK]
1,0	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,366	0,28425	0,169
0,9	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,366	0,21305	0,127
0,8	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,366	0,20081	0,119
0,7	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,366	0,18989	0,113
0,6	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,366	0,17997	0,107
0,5	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,366	0,1709	0,101
0,4	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,366	0,16253	0,097
0,3	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,366	0,15475	0,092
0,2	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,366	0,14745	0,088
0,1	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,366	0,14052	0,083
0	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,366	0,13378	0,079

Tabelle 116: Minderung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{\text{äquival.}}$ von Ziegel A bei schrittweiser Absenkung des Emissionskoeffizienten der keramischen Scherbenoberfläche um jeweils $\Delta\varepsilon = 0,1$ von $\varepsilon = 0,0$ bis $\varepsilon = 1,0$ bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{\text{Scherben}} = 0,25 \text{ W/mK}$ (Berechnung mit SOLIDO)

ε	d [m]	H [m]	B [m]	Wärmeweg [m]	ΔT [K]	α_i [W/m ² K]	α_a [W/m ² K]	λ_{Sch} [W/mK]	dQ/dt [W]	$\lambda_{\text{äqui.}}$ [W/mK]
1,0	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,25	0,24304	0,144
0,9	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,25	0,18315	0,109
0,8	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,25	0,17209	0,102
0,7	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,25	0,16217	0,096
0,6	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,25	0,1531	0,091
0,5	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,25	0,14475	0,086
0,4	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,25	0,137	0,081
0,3	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,25	0,12976	0,077
0,2	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,25	0,12294	0,073
0,1	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,25	0,11643	0,069
0	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,25	0,11007	0,065

Tabelle 117: Finite Elemente Berechnung (SOLIDO) der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit des Ziegels A. Vergleich der unverfüllten und unbeschichteten mit verfüllten bzw. beschichteten Proben (Verfüllung mit Neopor, Mineralwollegranulat und Perlite)

Aus-rüstung	d [m]	H [m]	B [m]	Wärme-weg [m]	ΔT [K]	α_i [W/m ² K]	α_a [W/m ² K]	λ_{Sch} [W/mK]	dQ/dt [W]	$\lambda_{\text{äqui.}}$ [W/mK]
Null-probe	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,366	0,22273	0,132
Beschich-tung	0,365	0,249	0,247	0,061503	20	7,7	25	0,366	0,33685	0,094
Neopor	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,366	0,14892	0,088
Mineral-wolle	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,366	0,16625	0,099
Perlite	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,366	0,19911	0,118
Null-probe	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,25	0,19191	0,114
Beschich-tung	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,25	0,13362	0,079
Neopor	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,25	0,12403	0,074
Mineral-wolle	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,25	0,14011	0,083
Perlite	0,365	0,249	0,247	0,061503	10	1000	1000	0,25	0,17023	0,101

Tabelle 118: Minderung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{\text{äquival.}}$ von Ziegel G bei schrittweiser Absenkung des Emissionskoeffizienten der keramischen Scherbenoberfläche um jeweils $\Delta\varepsilon = 0,1$ von $\varepsilon = 0,0$ bis $\varepsilon = 1,0$ bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{\text{Scherben}} = 0,46 \text{ W/mK}$ (Berechnung mit SOLIDO)

ε	d [m]	H [m]	B [m]	Wärmeweg [m]	ΔT [K]	α_i [W/m ² K]	α_a [W/m ² K]	λ_{Sch} [W/mK]	dQ/dt [W]	$\lambda_{\text{äqui.}}$ [W/mK]
1,0	0,2	0,275	0,28236	0,077649	10	1000	1000	0,46	0,85403	0,220
0,9	0,2	0,275	0,28236	0,077649	10	1000	1000	0,46	0,737512	0,190
0,8	0,2	0,275	0,28236	0,077649	10	1000	1000	0,46	0,685291	0,177
0,7	0,2	0,275	0,28236	0,077649	10	1000	1000	0,46	0,637531	0,164
0,6	0,2	0,275	0,28236	0,077649	10	1000	1000	0,46	0,59337	0,153
0,5	0,2	0,275	0,28236	0,077649	10	1000	1000	0,46	0,552221	0,142
0,4	0,2	0,275	0,28236	0,077649	10	1000	1000	0,46	0,513629	0,132
0,3	0,2	0,275	0,28236	0,077649	10	1000	1000	0,46	0,477205	0,123
0,2	0,2	0,275	0,28236	0,077649	10	1000	1000	0,46	0,442562	0,114
0,1	0,2	0,275	0,28236	0,077649	10	1000	1000	0,46	0,40935	0,106
0	0,2	0,275	0,28236	0,077649	10	1000	1000	0,46	0,409354	0,106

Tabelle 119: Minderung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{\text{äquival.}}$ von Ziegel G bei schrittweiser Absenkung des Emissionskoeffizienten der keramischen Scherbenoberfläche um jeweils $\Delta\varepsilon = 0,1$ von $\varepsilon = 0,0$ bis $\varepsilon = 1,0$ bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{\text{Scherben}} = 0,25 \text{ W/mK}$ (Berechnung mit SOLIDO)

ε	d [m]	H [m]	B [m]	Wärmeweg [m]	ΔT [K]	α_i [W/m ² K]	α_a [W/m ² K]	λ_{Sch} [W/mK]	dQ/dt [W]	$\lambda_{\text{äqui.}}$ [W/mK]
1	0,2	0,275	0,28236	0,077649	10	1000	1000	0,25	0,67421	0,174
0,9	0,2	0,275	0,28236	0,077649	10	1000	1000	0,25	0,589057	0,152
0,8	0,2	0,275	0,28236	0,077649	10	1000	1000	0,25	0,543568	0,140
0,7	0,2	0,275	0,28236	0,077649	10	1000	1000	0,25	0,501393	0,129
0,6	0,2	0,275	0,28236	0,077649	10	1000	1000	0,25	0,461881	0,119
0,5	0,2	0,275	0,28236	0,077649	10	1000	1000	0,25	0,424618	0,109
0,4	0,2	0,275	0,28236	0,077649	10	1000	1000	0,25	0,389286	0,100
0,3	0,2	0,275	0,28236	0,077649	10	1000	1000	0,25	0,35558	0,092
0,2	0,2	0,275	0,28236	0,077649	10	1000	1000	0,25	0,323219	0,083
0,1	0,2	0,275	0,28236	0,077649	10	1000	1000	0,25	0,29191	0,075
0	0,2	0,275	0,28236	0,077649	10	1000	1000	0,25	0,261337	0,067

Tabelle 120: Finite Elemente Berechnung (SOLIDO) der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit des Ziegels G. Vergleich der unverfüllten und unbeschichteten Nullprobe mit verfüllten bzw. beschichteten Proben (Verfüllung mit Neopor, Mineralwollegranulat und Perlite)

Ausrüstung	d [m]	H [m]	B [m]	Wärmeweg [m]	ΔT [K]	α_i [W/m ² K]	α_a [W/m ² K]	λ_{Sch} [W/mK]	dQ/dt [W]	$\lambda_{\text{äqui.}}$ [W/mK]
Nullprobe	0,2	0,275	0,28236	0,077649	10	1000	1000	0,46	0,76682	0,198
Beschichtung	0,2	0,275	0,28236	0,077649	10	1000	1000	0,46	0,54235	0,140
Neopor	0,2	0,275	0,28236	0,077649	10	1000	1000	0,46	0,39794	0,103
Mineralwolle	0,2	0,275	0,28236	0,077649	10	1000	1000	0,46	0,43294	0,112
Perlite	0,2	0,275	0,28236	0,077649	10	1000	1000	0,46	0,50128	0,129
Nullprobe	0,2	0,275	0,28236	0,077649	10	1000	1000	0,25	0,61427	0,158
Beschichtung	0,2	0,275	0,28236	0,077649	10	1000	1000	0,25	0,41562	0,107
Neopor	0,2	0,275	0,28236	0,077649	10	1000	1000	0,25	0,28111	0,072
Mineralwolle	0,2	0,275	0,28236	0,077649	10	1000	1000	0,25	0,31413	0,081
Perlite	0,2	0,275	0,28236	0,077649	10	1000	1000	0,25	0,37772	0,097

Tabelle 121: Äquivalente Wärmeleitfähigkeiten der Modellziegel mit 1 bis 20 Hohlräumen in Wärmestromrichtung bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,35 \text{ W/mK}$

Modell	I	II	III	IV	Strahlung		Kovektion		Fluidleitung		Festkörper	
					[W/mK]	[%]	[W/mK]	[%]	[W/mK]	[%]	[W/mK]	[%]
1_Längs	0,916	0,622	0,132	0,112	0,294	32,1	0,490	53,5	0,020	2,2	0,112	12,2
2_Längs	0,924	0,696	0,135	0,117	0,228	24,7	0,561	60,7	0,018	1,9	0,117	12,7
3_Längs	0,944	0,755	0,137	0,119	0,189	20,0	0,618	65,5	0,018	1,9	0,119	12,6
4_Längs	0,941	0,753	0,138	0,120	0,188	20,0	0,615	65,4	0,018	1,9	0,120	12,8
5_Längs	0,997	0,840	0,139	0,121	0,157	15,7	0,701	70,3	0,018	1,8	0,121	12,1
6_Längs	1,032	0,876	0,139	0,121	0,156	15,1	0,737	71,4	0,018	1,7	0,121	11,7
7_Längs	1,070	0,910	0,139	0,122	0,160	15,0	0,771	72,1	0,017	1,6	0,122	11,4
8_Längs	1,103	0,939	0,139	0,122	0,164	14,9	0,800	72,5	0,017	1,5	0,122	11,1
9_Längs	1,121	0,932	0,140	0,122	0,189	16,9	0,792	70,7	0,018	1,6	0,122	10,9
10_Längs	1,167	0,991	0,140	0,122	0,176	15,1	0,851	72,9	0,018	1,5	0,122	10,5
11_Längs	1,150	1,010	0,140	0,122	0,139	12,1	0,870	75,7	0,018	1,5	0,122	10,7
12_Längs	1,181	1,034	0,140	0,123	0,148	12,5	0,894	75,6	0,017	1,5	0,123	10,4
13_Längs	1,204	1,054	0,140	0,123	0,150	12,5	0,914	75,9	0,017	1,5	0,123	10,2
14_Längs	1,228	1,075	0,140	0,123	0,154	12,5	0,934	76,1	0,017	1,4	0,123	10,0
15_Längs	1,242	1,094	0,140	0,123	0,148	11,9	0,954	76,8	0,017	1,4	0,123	9,9
16_Längs	1,271	1,110	0,141	0,123	0,161	12,6	0,970	76,3	0,018	1,4	0,123	9,7
17_Längs	1,299	1,129	0,140	0,123	0,170	13,1	0,989	76,1	0,017	1,3	0,123	9,5
18_Längs	1,320	1,145	0,141	0,123	0,175	13,2	1,005	76,1	0,017	1,3	0,123	9,3
19_Längs	1,341	1,161	0,141	0,123	0,179	13,4	1,020	76,1	0,017	1,3	0,123	9,2
20_Längs	1,366	1,180	0,141	0,123	0,186	13,6	1,040	76,1	0,017	1,3	0,123	9,0

Tabelle 122: Äquivalente Wärmeleitfähigkeiten der Modellziegel mit 1 bis 20 Hohlräumen in Wärmestromrichtung bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, tr.} = 0,30 \text{ W/mK}$

Modell	I	II	III	IV	Strahlung		Kovektion		Fluidleitung		Festkörper	
					[W/mK]	[%]	[W/mK]	[%]	[W/mK]	[%]	[W/mK]	[%]
1_Längs	0,862	0,587	0,116	0,097	0,275	31,9	0,471	54,6	0,019	2,2	0,097	11,3
2_Längs	0,869	0,654	0,119	0,110	0,215	24,7	0,535	61,6	0,009	1,0	0,110	12,7
3_Längs	0,886	0,706	0,120	0,102	0,180	20,3	0,586	66,1	0,018	2,0	0,102	11,5
4_Längs	0,883	0,703	0,121	0,103	0,180	20,4	0,582	65,9	0,018	2,0	0,103	11,7
5_Längs	0,931	0,781	0,121	0,104	0,150	16,1	0,660	70,9	0,017	1,8	0,104	11,2
6_Längs	0,962	0,813	0,122	0,104	0,149	15,5	0,691	71,8	0,018	1,9	0,104	10,8
7_Längs	0,995	0,843	0,122	0,104	0,152	15,3	0,721	72,5	0,018	1,8	0,104	10,5
8_Längs	1,023	0,867	0,122	0,105	0,156	15,2	0,745	72,8	0,017	1,7	0,105	10,3
9_Längs	1,039	0,860	0,122	0,105	0,179	17,2	0,738	71,0	0,017	1,6	0,105	10,1
10_Längs	1,078	0,914	0,122	0,105	0,164	15,2	0,792	73,5	0,017	1,6	0,105	9,7
11_Längs	1,069	0,930	0,123	0,105	0,139	13,0	0,807	75,5	0,017	1,6	0,105	9,8
12_Längs	1,091	0,950	0,123	0,105	0,141	12,9	0,828	75,9	0,017	1,6	0,105	9,6
13_Längs	1,111	0,968	0,123	0,105	0,143	12,9	0,845	76,1	0,017	1,6	0,105	9,5
14_Längs	1,131	0,986	0,123	0,105	0,145	12,8	0,863	76,3	0,017	1,5	0,105	9,3
15_Längs	1,151	1,003	0,123	0,105	0,148	12,9	0,880	76,5	0,017	1,5	0,105	9,2
16_Längs	1,168	1,017	0,123	0,106	0,151	12,9	0,894	76,5	0,018	1,5	0,106	9,0
17_Längs	1,193	1,033	0,123	0,106	0,160	13,4	0,910	76,3	0,017	1,4	0,106	8,9
18_Längs	1,211	1,047	0,123	0,106	0,164	13,5	0,924	76,3	0,017	1,4	0,106	8,7
19_Längs	1,229	1,061	0,123	0,106	0,167	13,6	0,938	76,3	0,017	1,4	0,106	8,6
20_Längs	1,252	1,074	0,123	0,106	0,178	14,2	0,951	76,0	0,017	1,4	0,106	8,4

Tabelle 123: Äquivalente Wärmeleitfähigkeiten der Modellziegel mit 1 bis 20 Hohlräumen in Wärmestromrichtung bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, tr.} = 0,25 \text{ W/mK}$

Modell	I	II	III	IV	Strahlung		Kovektion		Fluidleitung		Festkörper	
					[W/mK]	[%]	[W/mK]	[%]	[W/mK]	[%]	[W/mK]	[%]
1_Längs	0,798	0,547	0,100	0,081	0,251	31,5	0,447	56,0	0,019	2,4	0,081	10,2
2_Längs	0,805	0,606	0,102	0,084	0,199	24,7	0,504	62,6	0,018	2,2	0,084	10,4
3_Längs	0,819	0,651	0,103	0,085	0,168	20,5	0,548	66,9	0,018	2,2	0,085	10,4
4_Längs	0,818	0,647	0,104	0,086	0,171	20,9	0,543	66,4	0,018	2,2	0,086	10,5
5_Längs	0,856	0,715	0,104	0,086	0,141	16,5	0,611	71,4	0,018	2,1	0,086	10,0
6_Längs	0,882	0,742	0,104	0,087	0,140	15,9	0,638	72,3	0,017	1,9	0,087	9,9
7_Längs	0,910	0,768	0,105	0,087	0,142	15,6	0,663	72,9	0,018	2,0	0,087	9,6
8_Längs	0,934	0,788	0,105	0,087	0,146	15,6	0,683	73,1	0,018	1,9	0,087	9,3
9_Längs	0,948	0,782	0,105	0,087	0,166	17,5	0,677	71,4	0,018	1,9	0,087	9,2
10_Längs	0,980	0,828	0,105	0,088	0,152	15,5	0,723	73,8	0,017	1,7	0,088	9,0
11_Längs	0,972	0,841	0,105	0,088	0,131	13,4	0,736	75,7	0,017	1,8	0,088	9,0
12_Längs	0,990	0,859	0,105	0,088	0,132	13,3	0,753	76,1	0,017	1,8	0,088	8,9
13_Längs	1,007	0,873	0,105	0,088	0,133	13,2	0,768	76,3	0,017	1,7	0,088	8,7
14_Längs	1,024	0,889	0,105	0,088	0,135	13,2	0,783	76,5	0,017	1,7	0,088	8,6
15_Längs	1,040	0,903	0,105	0,088	0,137	13,2	0,798	76,7	0,017	1,7	0,088	8,5
16_Längs	1,054	0,915	0,106	0,088	0,139	13,2	0,809	76,8	0,017	1,7	0,088	8,4
17_Längs	1,076	0,928	0,105	0,088	0,147	13,7	0,823	76,5	0,017	1,6	0,088	8,2
18_Längs	1,091	0,940	0,106	0,088	0,150	13,8	0,835	76,5	0,017	1,6	0,088	8,1
19_Längs	1,106	0,952	0,106	0,088	0,154	13,9	0,846	76,6	0,017	1,6	0,088	8,0
20_Längs	1,126	0,967	0,106	0,088	0,159	14,1	0,862	76,5	0,017	1,5	0,088	7,8

Tabelle 124: Äquivalente Wärmeleitfähigkeiten der Modellziegel mit 1 bis 20 Hohlräumen in Wärmestromrichtung bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10,tr.} = 0,20 \text{ W/mK}$

Modell	I	II	III	IV	Strahlung		Kovektion		Fluidleitung		Festkörper	
					[W/mK]	[%]	[W/mK]	[%]	[W/mK]	[%]	[W/mK]	[%]
1_Längs	0,722	0,500	0,084	0,065	0,222	30,7	0,416	57,6	0,019	2,6	0,065	9,0
2_Längs	0,729	0,550	0,086	0,067	0,179	24,6	0,464	63,6	0,019	2,6	0,067	9,2
3_Längs	0,740	0,588	0,086	0,068	0,152	20,5	0,502	67,8	0,018	2,4	0,068	9,2
4_Längs	0,741	0,584	0,087	0,069	0,157	21,2	0,497	67,1	0,018	2,4	0,069	9,3
5_Längs	0,770	0,640	0,087	0,069	0,130	16,9	0,553	71,8	0,018	2,3	0,069	9,0
6_Längs	0,790	0,662	0,087	0,070	0,128	16,2	0,575	72,8	0,017	2,2	0,070	8,9
7_Längs	0,813	0,683	0,087	0,070	0,130	16,0	0,596	73,3	0,017	2,1	0,070	8,6
8_Längs	0,831	0,699	0,087	0,070	0,132	15,9	0,612	73,6	0,017	2,0	0,070	8,4
9_Längs	0,845	0,694	0,088	0,070	0,151	17,9	0,606	71,7	0,018	2,1	0,070	8,3
10_Längs	0,868	0,731	0,088	0,070	0,137	15,8	0,643	74,1	0,018	2,1	0,070	8,1
11_Längs	0,857	0,740	0,088	0,070	0,117	13,6	0,652	76,1	0,017	2,0	0,070	8,2
12_Längs	0,876	0,756	0,088	0,070	0,120	13,7	0,668	76,3	0,017	2,0	0,070	8,0
13_Längs	0,889	0,768	0,088	0,070	0,121	13,6	0,680	76,5	0,017	2,0	0,070	7,9
14_Längs	0,902	0,780	0,088	0,070	0,122	13,5	0,692	76,7	0,017	1,9	0,070	7,8
15_Längs	0,915	0,792	0,088	0,071	0,124	13,5	0,704	76,9	0,017	1,9	0,071	7,7
16_Längs	0,926	0,801	0,088	0,071	0,125	13,5	0,713	77,0	0,017	1,9	0,071	7,6
17_Längs	0,944	0,812	0,088	0,071	0,132	14,0	0,724	76,7	0,017	1,8	0,071	7,5
18_Längs	0,956	0,821	0,088	0,071	0,135	14,1	0,733	76,7	0,017	1,8	0,071	7,4
19_Längs	0,968	0,831	0,088	0,071	0,137	14,2	0,743	76,7	0,017	1,8	0,071	7,3
20_Längs	0,985	0,844	0,088	0,071	0,141	14,4	0,756	76,7	0,017	1,8	0,071	7,2

Tabelle 125: Äquivalente Wärmeleitfähigkeiten der Modellziegel mit 1 bis 20 Hohlräumen senkrecht zur Wärmestromrichtung bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10,tr.} = 0,35 \text{ W/mK}$

Modell	I	II	III	IV	Strahlung		Kovektion		Fluidleitung		Festkörper	
					[W/mK]	[%]	[W/mK]	[%]	[W/mK]	[%]	[W/mK]	[%]
1_Quer	0,666	0,456	0,093	0,066	0,210	31,5	0,363	54,5	0,027	4,1	0,066	9,9
2_Quer	0,480	0,285	0,090	0,063	0,195	40,6	0,195	40,6	0,027	5,6	0,063	13,1
3_Quer	0,422	0,195	0,088	0,060	0,227	53,8	0,107	25,4	0,028	6,6	0,060	14,2
4_Quer	0,329	0,148	0,087	0,059	0,181	55,0	0,061	18,5	0,028	8,5	0,059	17,9
5_Quer	0,289	0,126	0,087	0,058	0,163	56,4	0,039	13,5	0,029	10,0	0,058	20,1
6_Quer	0,260	0,112	0,086	0,058	0,148	56,9	0,026	10,0	0,028	10,8	0,058	22,3
7_Quer	0,237	0,102	0,086	0,057	0,135	57,0	0,016	6,8	0,029	12,2	0,057	24,1
8_Quer	0,219	0,094	0,085	0,057	0,125	57,1	0,009	4,1	0,028	12,8	0,057	26,0
9_Quer	0,203	0,089	0,085	0,056	0,114	56,2	0,004	2,0	0,029	14,3	0,056	27,6
10_Quer	0,191	0,085	0,085	0,056	0,106	55,5	0,000	0,0	0,029	15,2	0,056	29,3
11_Quer	0,185	0,084	0,085	0,056	0,101	54,6	0,000	0,0	0,029	15,6	0,056	30,1
12_Quer	0,179	0,084	0,085	0,055	0,095	53,0	0,000	0,0	0,030	16,8	0,055	30,6
13_Quer	0,173	0,084	0,084	0,055	0,089	51,3	0,000	0,0	0,029	16,9	0,055	31,8
14_Quer	0,167	0,084	0,084	0,055	0,083	49,8	0,000	0,0	0,029	17,4	0,055	33,1
15_Quer	0,162	0,084	0,084	0,055	0,078	48,4	0,000	0,0	0,029	18,0	0,055	34,0
16_Quer	0,158	0,084	0,084	0,055	0,074	47,0	0,000	0,0	0,029	18,5	0,055	34,9
17_Quer	0,154	0,084	0,084	0,055	0,070	45,6	0,000	0,0	0,029	19,0	0,055	35,8
18_Quer	0,150	0,083	0,084	0,055	0,067	44,4	0,000	0,0	0,029	19,4	0,055	36,6
19_Quer	0,147	0,083	0,084	0,055	0,063	43,1	0,000	0,0	0,029	20,0	0,055	37,3
20_Quer	0,144	0,083	0,084	0,055	0,060	41,9	0,000	0,0	0,029	20,4	0,055	38,1

Tabelle 126: Äquivalente Wärmeleitfähigkeiten der Modellziegel mit 1 bis 20 Hohlräumen senkrecht zur Wärmestromrichtung bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, tr.} = 0,30 \text{ W/mK}$

Modell	I	II	III	IV	Strahlung		Kovektion		Fluidleitung		Festkörper	
					[W/mK]	[%]	[W/mK]	[%]	[W/mK]	[%]	[W/mK]	[%]
1_Quer	0,607	0,423	0,084	0,057	0,184	30,3	0,339	55,8	0,027	4,4	0,057	9,4
2_Quer	0,447	0,246	0,081	0,054	0,201	45,0	0,165	36,9	0,027	6,0	0,054	12,1
3_Quer	0,393	0,182	0,080	0,052	0,211	53,7	0,102	26,0	0,028	7,1	0,052	13,2
4_Quer	0,310	0,139	0,079	0,051	0,171	55,2	0,060	19,4	0,028	9,0	0,051	16,5
5_Quer	0,273	0,117	0,078	0,050	0,156	57,1	0,039	14,3	0,028	10,3	0,050	18,3
6_Quer	0,260	0,112	0,078	0,058	0,148	56,9	0,034	13,1	0,020	7,7	0,058	22,3
7_Quer	0,224	0,093	0,078	0,049	0,131	58,5	0,015	6,7	0,029	12,9	0,049	21,9
8_Quer	0,207	0,086	0,077	0,049	0,121	58,5	0,009	4,3	0,028	13,5	0,049	23,7
9_Quer	0,192	0,081	0,077	0,049	0,111	57,8	0,004	2,1	0,028	14,6	0,049	25,5
10_Quer	0,181	0,077	0,077	0,049	0,104	57,5	0,000	0,0	0,028	15,5	0,049	27,1
11_Quer	0,175	0,076	0,077	0,048	0,099	56,3	0,000	0,0	0,029	16,4	0,048	27,6
12_Quer	0,168	0,076	0,076	0,048	0,092	54,7	0,000	0,0	0,028	16,8	0,048	28,6
13_Quer	0,163	0,076	0,076	0,048	0,086	53,2	0,000	0,0	0,029	17,7	0,048	29,3
14_Quer	0,157	0,076	0,077	0,048	0,081	51,6	0,000	0,0	0,029	18,3	0,048	30,4
15_Quer	0,153	0,076	0,077	0,048	0,077	50,2	0,000	0,0	0,029	18,9	0,048	31,3
16_Quer	0,149	0,076	0,077	0,048	0,073	48,8	0,000	0,0	0,029	19,4	0,048	32,2
17_Quer	0,144	0,076	0,077	0,048	0,068	47,4	0,000	0,0	0,029	20,0	0,048	33,0
18_Quer	0,141	0,076	0,076	0,048	0,065	46,3	0,000	0,0	0,029	20,4	0,048	33,8
19_Quer	0,138	0,076	0,076	0,047	0,062	45,0	0,000	0,0	0,029	21,0	0,047	34,5
20_Quer	0,135	0,076	0,076	0,047	0,059	43,8	0,000	0,0	0,029	21,5	0,047	35,2

Tabelle 127: Äquivalente Wärmeleitfähigkeiten der Modellziegel mit 1 bis 20 Hohlräumen senkrecht zur Wärmestromrichtung bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, tr.} = 0,25 \text{ W/mK}$

Modell	I	II	III	IV	Strahlung		Kovektion		Fluidleitung		Festkörper	
					[W/mK]	[%]	[W/mK]	[%]	[W/mK]	[%]	[W/mK]	[%]
1_Quer	0,542	0,384	0,074	0,048	0,158	29,2	0,310	57,2	0,026	4,8	0,048	8,9
2_Quer	0,407	0,228	0,073	0,045	0,179	44,0	0,155	38,1	0,028	6,9	0,045	11,1
3_Quer	0,360	0,169	0,071	0,044	0,191	53,1	0,098	27,2	0,027	7,5	0,044	12,2
4_Quer	0,287	0,128	0,071	0,043	0,159	55,4	0,057	19,9	0,028	9,8	0,043	15,0
5_Quer	0,254	0,108	0,070	0,042	0,146	57,5	0,038	15,0	0,028	11,0	0,042	16,5
6_Quer	0,229	0,094	0,070	0,042	0,135	59,0	0,024	10,5	0,028	12,2	0,042	18,3
7_Quer	0,209	0,085	0,070	0,041	0,124	59,3	0,015	7,2	0,029	13,9	0,041	19,6
8_Quer	0,193	0,078	0,069	0,041	0,115	59,6	0,009	4,7	0,028	14,5	0,041	21,2
9_Quer	0,179	0,073	0,069	0,041	0,106	59,2	0,004	2,2	0,028	15,6	0,041	22,9
10_Quer	0,169	0,069	0,069	0,041	0,100	59,2	0,000	0,0	0,028	16,6	0,041	24,3
11_Quer	0,164	0,068	0,069	0,041	0,095	58,1	0,000	0,0	0,028	17,3	0,041	24,9
12_Quer	0,157	0,068	0,069	0,041	0,089	56,6	0,000	0,0	0,029	18,3	0,041	25,8
13_Quer	0,152	0,068	0,069	0,040	0,084	55,0	0,000	0,0	0,028	18,7	0,040	26,4
14_Quer	0,147	0,068	0,069	0,040	0,079	53,5	0,000	0,0	0,028	19,4	0,040	27,5
15_Quer	0,142	0,068	0,069	0,040	0,074	52,1	0,000	0,0	0,028	20,0	0,040	28,3
16_Quer	0,139	0,068	0,069	0,040	0,070	50,8	0,000	0,0	0,028	20,5	0,040	29,1
17_Quer	0,135	0,068	0,069	0,040	0,066	49,4	0,000	0,0	0,029	21,2	0,040	29,9
18_Quer	0,131	0,068	0,069	0,040	0,063	48,3	0,000	0,0	0,028	21,7	0,040	30,6
19_Quer	0,128	0,068	0,069	0,040	0,060	47,0	0,000	0,0	0,029	22,3	0,040	31,3
20_Quer	0,125	0,068	0,067	0,040	0,057	45,8	0,000	0,0	0,027	21,8	0,040	32,0

Tabelle 128: Äquivalente Wärmeleitfähigkeiten der Modellziegel mit 1 bis 20 Hohlräumen senkrecht zur Wärmestromrichtung bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, tr.} = 0,20 \text{ W/mK}$

Modell	I	II	III	IV	Strahlung		Kovektion		Fluidleitung		Festkörper	
					[W/mK]	[%]	[W/mK]	[%]	[W/mK]	[%]	[W/mK]	[%]
1_Quer	0,437	0,339	0,065	0,038	0,098	22,4	0,274	62,7	0,027	6,2	0,038	8,7
2_Quer	0,361	0,208	0,063	0,036	0,153	42,4	0,145	40,2	0,027	7,5	0,036	10,0
3_Quer	0,322	0,154	0,063	0,035	0,168	52,2	0,091	28,3	0,028	8,7	0,035	10,9
4_Quer	0,261	0,117	0,062	0,035	0,144	55,2	0,055	21,1	0,027	10,3	0,035	13,4
5_Quer	0,232	0,098	0,062	0,034	0,134	57,8	0,036	15,5	0,028	12,1	0,034	14,7
6_Quer	0,210	0,085	0,061	0,034	0,125	59,5	0,024	11,4	0,027	12,9	0,034	16,2
7_Quer	0,192	0,076	0,061	0,034	0,116	60,4	0,015	7,8	0,027	14,1	0,034	17,7
8_Quer	0,178	0,069	0,061	0,033	0,109	61,2	0,008	4,5	0,028	15,7	0,033	18,5
9_Quer	0,165	0,064	0,061	0,033	0,101	61,2	0,003	1,8	0,028	17,0	0,033	20,0
10_Quer	0,156	0,061	0,061	0,033	0,095	60,9	0,000	0,0	0,028	17,9	0,033	21,2
11_Quer	0,151	0,060	0,061	0,033	0,090	59,9	0,000	0,0	0,028	18,5	0,033	21,9
12_Quer	0,145	0,060	0,060	0,033	0,085	58,4	0,000	0,0	0,027	18,9	0,033	22,7
13_Quer	0,140	0,060	0,061	0,033	0,080	57,0	0,000	0,0	0,028	20,0	0,033	23,3
14_Quer	0,135	0,060	0,061	0,033	0,075	55,5	0,000	0,0	0,028	20,7	0,033	24,3
15_Quer	0,131	0,060	0,061	0,033	0,071	54,2	0,000	0,0	0,028	21,4	0,033	25,0
16_Quer	0,128	0,060	0,061	0,033	0,067	52,9	0,000	0,0	0,028	21,9	0,033	25,7
17_Quer	0,124	0,060	0,061	0,033	0,064	51,5	0,000	0,0	0,028	22,7	0,033	26,4
18_Quer	0,121	0,060	0,061	0,033	0,061	50,4	0,000	0,0	0,028	23,2	0,033	27,0
19_Quer	0,118	0,060	0,061	0,033	0,058	49,1	0,000	0,0	0,028	23,9	0,033	27,7
20_Quer	0,115	0,060	0,061	0,033	0,055	47,9	0,000	0,0	0,028	24,7	0,033	28,3

Tabelle 129: Resultierende äquivalente Wärmeleitfähigkeiten des Lochbildes 12 Q V 1 mit 12 Lochreihen bei Scherben-Wärmeleitfähigkeiten von $\lambda_{10, tr.} = 0,35 \text{ W/mK}$, $\lambda_{10, tr.} = 0,30 \text{ W/mK}$, $\lambda_{10, tr.} = 0,25 \text{ W/mK}$, $\lambda_{10, tr.} = 0,20 \text{ W/mK}$ und $\lambda_{10, tr.} = 0,15 \text{ W/mK}$ sowohl unbeschichtet ($\epsilon = 0,93$), als auch mit Beschichtung (Annahme $\epsilon = 0,40$)

Aus- rüstung	d	H	B	Wärme- weg [m]	ΔT [K]	α_i [W/m ² K]	α_a [W/m ² K]	λ_{Sch} [W/mK]	dQ/dt [W]	$\lambda_{äqui.}$ [W/mK]
	[m]	[m]	[m]							
0,93	0,365	0,249	0,248	0,061752	20	25	7,7	0,35	0,54531	0,174
0,93	0,365	0,249	0,248	0,061752	20	25	7,7	0,30	0,51547	0,164
0,93	0,365	0,249	0,248	0,061752	20	25	7,7	0,25	0,48319	0,153
0,93	0,365	0,249	0,248	0,061752	20	25	7,7	0,20	0,44713	0,141
0,93	0,365	0,249	0,248	0,061752	20	25	7,7	0,15	0,4045	0,127
0,40	0,365	0,249	0,248	0,061752	20	25	7,7	0,35	0,37024	0,115
0,40	0,365	0,249	0,248	0,061752	20	25	7,7	0,30	0,3439	0,107
0,40	0,365	0,249	0,248	0,061752	20	25	7,7	0,25	0,31668	0,098
0,40	0,365	0,249	0,248	0,061752	20	25	7,7	0,20	0,28814	0,089
0,40	0,365	0,249	0,248	0,061752	20	25	7,7	0,15	0,25737	0,079

Tabelle 130: Resultierende äquivalente Wärmeleitfähigkeiten des Lochbildes 12 Q V 3 mit 12 Lochreihen bei Scherben-Wärmeleitfähigkeiten von $\lambda_{10, tr.} = 0,35 \text{ W/mK}$, $\lambda_{10, tr.} = 0,30 \text{ W/mK}$, $\lambda_{10, tr.} = 0,25 \text{ W/mK}$, $\lambda_{10, tr.} = 0,20 \text{ W/mK}$ und $\lambda_{10, tr.} = 0,15 \text{ W/mK}$ sowohl unbeschichtet ($\epsilon = 0,93$), als auch mit Beschichtung (Annahme $\epsilon = 0,40$)

Aus- rüstung	d	H	B	Wärme- weg [m]	ΔT [K]	α_i [W/m ² K]	α_a [W/m ² K]	λ_{Sch} [W/mK]	dQ/dt [W]	$\lambda_{äqui.}$ [W/mK]
	[m]	[m]	[m]							
0,93	0,365	0,249	0,248	0,061752	20	25	7,7	0,35	0,53874	0,172
0,93	0,365	0,249	0,248	0,061752	20	25	7,7	0,30	0,51146	0,163
0,93	0,365	0,249	0,248	0,061752	20	25	7,7	0,25	0,48134	0,152
0,93	0,365	0,249	0,248	0,061752	20	25	7,7	0,20	0,44691	0,141
0,93	0,365	0,249	0,248	0,061752	20	25	7,7	0,15	0,40530	0,127
0,40	0,365	0,249	0,248	0,061752	20	25	7,7	0,20	0,28136	0,086
0,40	0,365	0,249	0,248	0,061752	20	25	7,7	0,15	0,25379	0,078

Tabelle 131: Resultierende äquivalente Wärmeleitfähigkeiten des Lochbildes 12 Q V 4 mit 12 Lochreihen bei Scherben-Wärmeleitfähigkeiten von $\lambda_{10, tr.} = 0,35 \text{ W/mK}$, $\lambda_{10, tr.} = 0,30 \text{ W/mK}$, $\lambda_{10, tr.} = 0,25 \text{ W/mK}$, $\lambda_{10, tr.} = 0,20 \text{ W/mK}$ und $\lambda_{10, tr.} = 0,15 \text{ W/mK}$ sowohl unbeschichtet ($\varepsilon = 0,93$), als auch mit Beschichtung (Annahme $\varepsilon = 0,40$)

Aus-rüstung	d [m]	H [m]	B [m]	Wärme-weg [m]	ΔT [K]	α_i [W/m ² K]	α_a [W/m ² K]	λ_{Sch} [W/mK]	dQ/dt [W]	$\lambda_{äqui.}$ [W/mK]
0,93	0,365	0,249	0,248	0,061752	20	25	7,7	0,35	0,52311	0,167
0,93	0,365	0,249	0,248	0,061752	20	25	7,7	0,30	0,49986	0,159
0,93	0,365	0,249	0,248	0,061752	20	25	7,7	0,25	0,47307	0,150
0,93	0,365	0,249	0,248	0,061752	20	25	7,7	0,20	0,44111	0,139
0,40	0,365	0,249	0,248	0,061752	20	25	7,7	0,35	0,31822	0,098
0,40	0,365	0,249	0,248	0,061752	20	25	7,7	0,30	0,30427	0,094
0,40	0,365	0,249	0,248	0,061752	20	25	7,7	0,25	0,28866	0,089
0,40	0,365	0,249	0,248	0,061752	20	25	7,7	0,20	0,27065	0,083

Tabelle 132: Resultierende äquivalente Wärmeleitfähigkeiten des Lochbildes 10 Q V 3 mit 12 Lochreihen bei Scherben-Wärmeleitfähigkeiten von $\lambda_{10, tr.} = 0,35 \text{ W/mK}$, $\lambda_{10, tr.} = 0,30 \text{ W/mK}$, $\lambda_{10, tr.} = 0,25 \text{ W/mK}$, $\lambda_{10, tr.} = 0,20 \text{ W/mK}$ und $\lambda_{10, tr.} = 0,15 \text{ W/mK}$ sowohl unbeschichtet ($\varepsilon = 0,93$), als auch mit Beschichtung (Annahme $\varepsilon = 0,40$)

Aus-rüstung	d [m]	H [m]	B [m]	Wärme-weg [m]	ΔT [K]	α_i [W/m ² K]	α_a [W/m ² K]	λ_{Sch} [W/mK]	dQ/dt [W]	$\lambda_{äqui.}$ [W/mK]
0,93	0,365	0,249	0,248	0,061752	20	25	7,7	0,35	0,55056	0,176
0,93	0,365	0,249	0,248	0,061752	20	25	7,7	0,30	0,52896	0,169
0,93	0,365	0,249	0,248	0,061752	20	25	7,7	0,25	0,50368	0,160
0,93	0,365	0,249	0,248	0,061752	20	25	7,7	0,20	0,47274	0,149
0,93	0,365	0,249	0,248	0,061752	20	25	7,7	0,15	0,43233	0,136
0,40	0,365	0,249	0,248	0,061752	20	25	7,7	0,35	0,32110	0,099
0,40	0,365	0,249	0,248	0,061752	20	25	7,7	0,30	0,30808	0,095
0,40	0,365	0,249	0,248	0,061752	20	25	7,7	0,25	0,29357	0,090
0,40	0,365	0,249	0,248	0,061752	20	25	7,7	0,20	0,27676	0,085
0,40	0,365	0,249	0,248	0,061752	20	25	7,7	0,15	0,25646	0,079
0,30	0,365	0,249	0,248	0,061752	20	25	7,7	0,15	0,22723	0,069
0,20	0,365	0,249	0,248	0,061752	20	25	7,7	0,15	0,19905	0,060
0,10	0,365	0,249	0,248	0,061752	20	25	7,7	0,15	0,17181	0,052

Tabelle 133: Resultierende äquivalente Wärmeleitfähigkeiten des Lochbildes 10 Q V 5 mit 12 Lochreihen bei Scherben-Wärmeleitfähigkeiten von $\lambda_{10, tr.} = 0,35 \text{ W/mK}$, $\lambda_{10, tr.} = 0,30 \text{ W/mK}$, $\lambda_{10, tr.} = 0,25 \text{ W/mK}$, $\lambda_{10, tr.} = 0,20 \text{ W/mK}$ und $\lambda_{10, tr.} = 0,15 \text{ W/mK}$ sowohl unbeschichtet ($\varepsilon = 0,93$), als auch mit Beschichtung (Annahme $\varepsilon = 0,40$)

Aus-rüstung	d [m]	H [m]	B [m]	Wärme-weg [m]	ΔT [K]	α_i [W/m ² K]	α_a [W/m ² K]	λ_{Sch} [W/mK]	dQ/dt [W]	$\lambda_{äqui.}$ [W/mK]
0,93	0,365	0,249	0,248	0,061752	20	25	7,7	0,35	0,54718	0,175
0,93	0,365	0,249	0,248	0,061752	20	25	7,7	0,30	0,5256	0,167
0,93	0,365	0,249	0,248	0,061752	20	25	7,7	0,25	0,50008	0,159
0,93	0,365	0,249	0,248	0,061752	20	25	7,7	0,20	0,46852	0,148
0,93	0,365	0,249	0,248	0,061752	20	25	7,7	0,15	0,42717	0,134
0,40	0,365	0,249	0,248	0,061752	20	25	7,7	0,35	0,31731	0,098
0,40	0,365	0,249	0,248	0,061752	20	25	7,7	0,30	0,30511	0,094
0,40	0,365	0,249	0,248	0,061752	20	25	7,7	0,25	0,29133	0,090
0,40	0,365	0,249	0,248	0,061752	20	25	7,7	0,20	0,27504	0,084
0,40	0,365	0,249	0,248	0,061752	20	25	7,7	0,15	0,25472	0,078
0,30	0,365	0,249	0,248	0,061752	20	25	7,7	0,15	0,22619	0,069
0,20	0,365	0,249	0,248	0,061752	20	25	7,7	0,15	0,19862	0,060
0,10	0,365	0,249	0,248	0,061752	20	25	7,7	0,15	0,17175	0,052

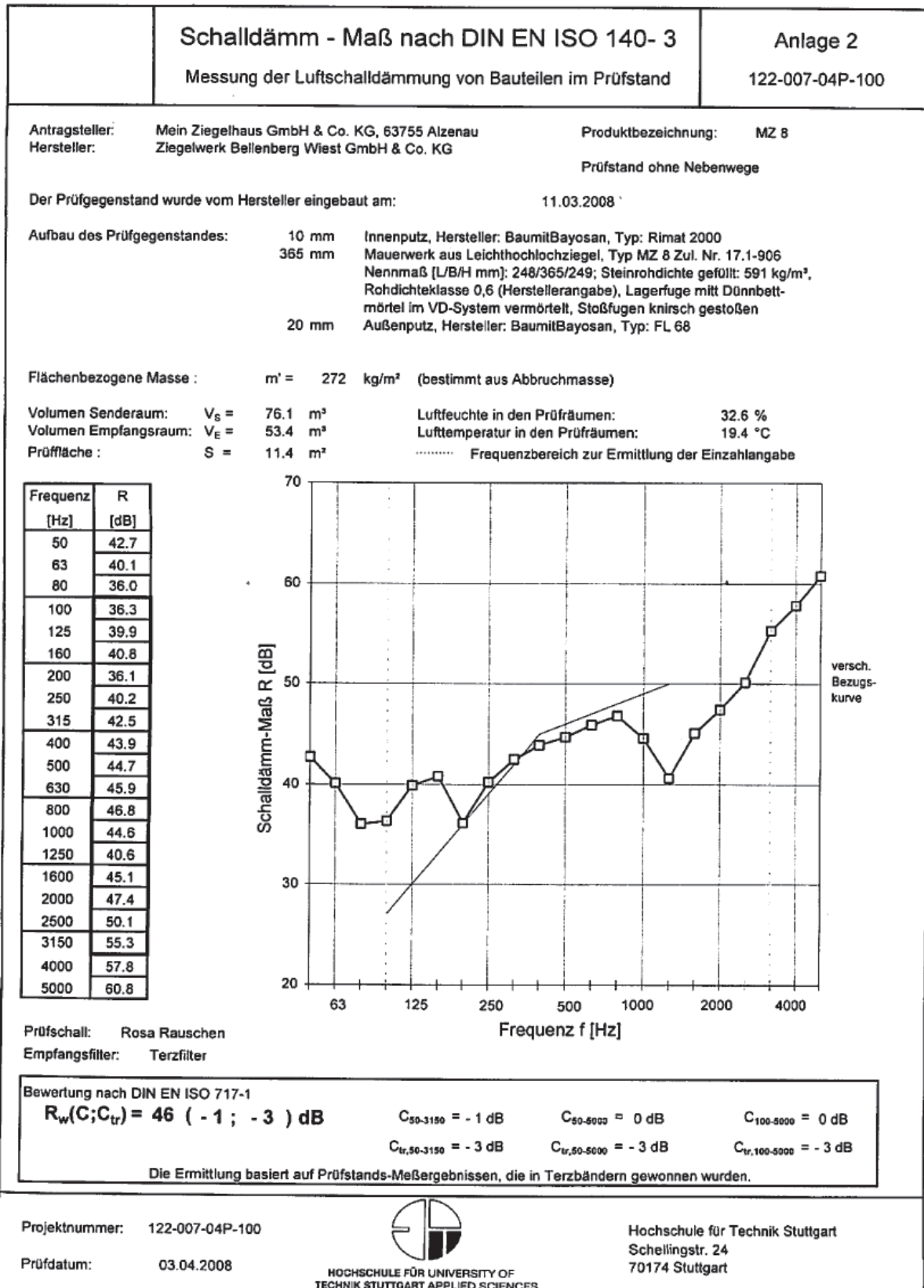


Bild 139: Messergebnisse des frequenzabhängigen Schalldämmmaßes des Ziegels C im Schallprüfstand

Tabelle 134: FE-Berechnung für das frequenzabhängige Schalldämmmaß des Ziegels C bei Wahl unterschiedlicher repräsentativer Volumenelemente als Grundlage für die Homogenisierung bzw. als einzelner Ziegel und Vergleich mit den im Schallprüfstand gemessenen Werten

Frequenz	EiSMöPu 6,6 Gpa	EiSMöPu Aniso	EiZMöPu 6,6 Gpa	EiZMöPu Aniso	EiS 6,6 Gpa	EiS Aniso	EiZMö Aniso	EiZ Aniso	Einzel- 6,6 Gpa	Berger- Massen- gesetz
[Hz]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]
50	57,9	59,8	58,2	66,1	65,0	64,5	62,8	60,3	93,9	35,7
63	57,1	57,4	57,3	60,9	59,2	59,8	59,0	56,6	89,8	37,7
80	48,1	53,4	48,2	55,7	43,2	54,0	53,9	51,5	85,5	39,8
100	44,8	43,0	44,6	40,6	49,6	42,3	41,0	43,0	81,4	41,7
125	44,5	46,2	44,8	49,4	50,3	48,9	47,8	45,5	77,2	43,6
160	46,3	46,6	46,9	50,7	50,5	50,4	49,8	47,8	72,2	45,8
200	45,0	49,0	44,7	51,2	44,8	47,9	49,0	43,4	67,3	47,7
250	46,6	44,3	45,7	46,4	51,0	47,4	45,9	46,5	61,6	49,7
315	46,8	49,1	46,6	52,4	44,4	51,0	51,2	46,2	54,5	51,7
400	41,2	43,6	42,5	42,4	42,9	35,9	38,6	37,4	45,2	53,7
500	36,6	39,2	38,9	40,7	24,3	27,0	31,6	25,0	36,1	55,7
630	42,9	43,8	42,1	45,1	38,5	41,7	45,2	41,1	41,9	57,7
800	46,0	40,4	46,5	35,4	42,2	37,1	47,1	38,5	48,3	59,8
1000	37,5	33,0	50,3	44,2	31,7	37,1	24,2	33,5	43,7	61,7
1250	39,3	39,9	55,8	39,0	30,6	32,5	33,6	31,3	45,0	63,6
1600	37,9	38,1	65,2	37,1	37,5	36,7	37,1	37,8	39,0	65,8
2000	40,9	41,1	68,2	40,1	40,5	39,7	40,1	40,8	52,9	67,7
2500	43,9	44,1	71,2	43,1	43,5	42,7	43,1	43,8	43,2	69,7
3150	46,9	47,1	74,2	46,1	46,5	45,7	46,1	46,8	55,4	71,7
4000	49,9	50,1	77,2	49,1	49,5	48,7	49,1	49,8	58,4	73,7
5000	52,9	53,1	80,2	52,1	52,5	51,7	52,1	52,8	61,4	75,7
RW	41	40	49	41	36	37	36	36	44,0	60

Tabelle 135: FE-Berechnung des Einflusses der Querstege auf das Schalldämmmaß von Hochlochziegeln. Als Modelle dienen die Modelle aus den wärmetechnischen Berechnungen. Angenommen wurde ein E-Modul von 10 GPa für den Scherben, eine Poissonzahl von $\mu = 0,3$, eine Materialdämpfung von $\delta = 4\%$ und ein Lochanteil von 60 %

Anzahl der Querstege (E-Modul = 10 GPa)								
Frequenz	2	3	4	5	6	7	11	21
[Hz]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]
50	57,8	51,6	54,7	57,5	59,7	61,1	63,5	69,3
63	56,7	55,5	56,0	56,6	56,8	55,6	59,0	63,2
80	50,3	51,0	51,6	50,1	53,1	53,8	54,5	48,5
100	42,0	41,8	41,7	41,7	43,1	41,8	40,8	52,9
125	46,1	45,1	45,5	46,1	46,2	44,9	46,9	53,7
160	48,3	45,4	47,2	48,2	47,5	46,3	49,5	54,8
200	49,8	45,9	48,4	49,7	49,3	50,0	51,3	45,2
250	46,9	46,1	46,5	46,7	46,5	46,1	45,1	54,0
315	48,3	47,5	48,3	48,2	49,4	50,0	49,6	54,2
400	46,4	41,5	44,2	46,1	46,6	46,4	45,6	41,4
500	41,6	40,2	40,1	40,9	40,8	40,5	39,7	36,3
630	46,7	41,9	44,9	46,7	47,5	47,5	46,5	49,4
800	49,5	43,5	47,4	49,7	50,7	51,1	51,3	56,0
1000	49,7	44,4	47,3	49,9	51,4	51,9	53,1	57,4
1250	51,4	47,9	50,3	51,6	52,3	52,7	52,8	59,7
1600	53,8	48,0	51,3	52,7	52,0	51,4	52,1	66,5
2000	56,8	51,0	54,6	55,7	55,0	54,4	55,1	70,5
2500	59,8	54,0	57,6	58,7	58,0	57,4	58,1	73,5
3150	62,8	57,0	60,6	61,7	61,0	60,4	61,1	76,5
4000	65,8	60,0	63,6	64,7	64,0	63,4	64,1	79,5
5000	68,8	63,0	66,6	67,7	67,0	66,4	67,1	82,5
R_w	45,0	46,0	49,0	50,0	51,0	51,0	51,0	53,0

Tabelle 136: FE-Berechnung des Einflusses der Querstege auf das Schalldämmmaß von Hochlochziegeln. Als Modelle dienen die Modelle aus den wärmetechnischen Berechnungen. Angenommen wurde ein E-Modul von 5 GPa für den Scherben, eine Poissonzahl von $\mu = 0,3$, eine Materialdämpfung von $\delta = 4 \%$ und ein Lochanteil von 60 %

Anzahl der Querstege (E-Modul = 5 GPa)								
Frequenz	2	3	4	5	6	7	11	21
[Hz]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]
50	57,7	55,5	56,4	57,6	58,7	59,2	61,7	62,4
63	53,3	53,4	53,2	53,1	53,9	55,0	55,8	56,6
80	47,1	44,7	46,1	46,9	46,9	47,4	46,9	46,3
100	40,9	39,4	40,0	41,1	42,3	42,9	43,5	44,4
125	43,0	41,2	40,9	43,0	44,7	45,5	46,0	46,4
160	44,7	43,1	42,7	44,7	46,0	46,8	47,4	47,8
200	44,7	43,7	43,8	44,2	44,1	44,0	43,2	42,4
250	40,3	41,6	40,4	40,6	42,7	43,7	44,2	45,8
315	46,3	45,6	45,3	46,5	47,7	48,0	48,7	48,9
400	41,3	40,9	41,3	40,8	39,1	37,6	35,8	34,9
500	34,3	34,5	33,7	33,4	33,1	32,9	32,3	32,3
630	39,8	40,9	40,2	37,9	36,8	37,7	41,1	42,5
800	46,8	45,1	45,9	45,9	45,1	44,6	46,7	48,1
1000	47,5	44,3	46,0	47,2	47,4	47,5	47,8	50,3
1250	49,1	47,4	47,9	48,4	48,4	48,3	48,5	46,6
1600	48,5	46,0	45,8	44,7	44,3	43,8	48,5	52,3
2000	51,5	49,0	48,8	47,7	47,3	46,8	51,5	55,3
2500	54,5	52,0	51,8	50,7	50,3	49,8	54,5	58,3
3150	57,5	55,0	54,8	53,7	53,3	52,8	57,5	61,3
4000	60,5	58,0	57,8	56,7	56,3	55,8	60,5	64,3
5000	63,5	61,0	60,8	59,7	59,3	58,8	63,5	67,3
R_w	46,0	45,0	45,0	45,0	44,0	44,0	45,0	46,0

Tabelle 137: FE-Berechnung des Einflusses der Längsstege auf das Schalldämmmaß von Hochlochziegeln. Als Modelle dienen die Modelle aus den wärmetechnischen Berechnungen. Angenommen wurde ein E-Modul von 10 GPa für den Scherben, eine Poissonzahl von $\mu = 0,3$, eine Materialdämpfung von $\delta = 4 \%$ und ein Lochanteil von 60 %

Anzahl der Längsstege (E-Modul = 10 GPa)								
Frequenz	2	3	4	5	6	7	11	21
[Hz]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]
50	63,2	63,1	63,8	64,1	64,9	65,7	65,6	66,1
63	57,4	57,2	59,2	59,7	59,6	59,9	60,2	60,5
80	54,6	54,7	54,9	55,0	55,0	55,1	55,3	55,3
100	43,8	43,6	43,1	42,8	42,7	42,3	42,2	41,2
125	44,5	44,3	44,8	46,3	47,2	47,6	47,4	48,0
160	47,4	47,7	49,2	49,9	50,2	50,4	50,6	50,9
200	50,9	51,0	51,8	52,4	52,4	52,6	52,8	52,8
250	50,0	50,0	49,7	49,3	49,0	48,8	48,5	47,5
315	49,2	49,4	49,9	50,4	51,3	51,8	52,2	52,8
400	46,9	47,0	48,8	49,5	49,8	50,0	50,3	50,4
500	43,7	43,8	44,0	43,9	44,0	44,1	44,0	44,2
630	48,6	48,8	50,1	50,5	50,5	50,4	50,5	51,5
800	52,9	53,1	54,5	55,3	55,7	55,9	56,1	56,1
1000	50,6	50,8	52,1	52,6	52,8	52,9	52,8	53,5
1250	54,0	54,1	55,6	55,9	56,1	56,5	56,6	58,3
1600	56,9	57,3	58,6	59,9	59,9	60,1	60,1	62,7
2000	59,9	60,3	61,6	62,9	62,9	63,1	63,1	65,7
2500	62,9	63,3	64,6	65,9	65,9	66,1	66,1	68,7
3150	65,9	66,3	67,6	68,9	68,9	69,1	69,1	71,7
4000	68,9	69,3	70,6	71,9	71,9	72,1	72,1	74,7
5000	71,9	72,3	73,6	74,9	74,9	75,1	75,1	77,7
R_w	53,0	53,0	54,0	55,0	55,0	55,0	55,0	55,0

Tabelle 138: FE-Berechnung des Einflusses der Längsstege auf das Schalldämmmaß von Hochlochziegeln. Als Modelle dienen die Modelle aus den wärmetechnischen Berechnungen. Angenommen wurde ein E-Modul von 5 GPa für den Scherben, eine Poissonzahl von $\mu = 0,3$, eine Materialdämpfung von $\delta = 4 \%$ und ein Lochanteil von 60 %

Anzahl der Längsstege (E-Modul = 5 GPa)								
Frequenz	2	3	4	5	6	7	11	21
[Hz]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]
50	60,6	60,7	60,5	61,5	61,4	61,4	62,5	62,5
63	55,6	55,6	56,0	56,1	56,3	56,3	56,7	56,7
80	48,2	48,2	48,4	48,2	48,2	48,2	48,0	47,7
100	41,9	42,0	42,3	42,3	42,3	42,3	43,5	43,7
125	45,5	45,7	45,5	45,7	46,1	46,1	46,5	46,6
160	46,8	46,8	47,2	47,4	47,8	47,8	48,2	48,2
200	46,9	46,9	47,0	47,0	46,9	46,9	46,9	46,8
250	40,6	40,6	41,6	42,5	43,4	43,4	44,3	44,5
315	48,2	48,3	49,2	50,0	50,3	50,3	50,6	50,6
400	41,7	41,8	41,1	40,2	39,1	39,1	37,7	37,3
500	38,6	38,8	38,7	38,5	38,5	38,5	38,7	38,6
630	43,2	43,2	43,1	42,8	42,0	42,0	41,2	41,1
800	46,9	47,0	47,5	47,6	47,7	47,7	48,0	47,7
1000	48,2	48,3	49,3	49,8	50,0	50,0	50,3	50,3
1250	48,0	47,9	48,2	48,3	48,8	48,8	48,4	48,0
1600	54,2	54,5	55,6	56,6	56,9	56,9	59,1	59,1
2000	57,2	57,5	58,6	59,6	59,9	59,9	62,1	62,1
2500	60,2	60,5	61,6	62,6	62,9	62,9	65,1	65,1
3150	63,2	63,5	64,6	65,6	65,9	65,9	68,1	68,1
4000	66,2	66,5	67,6	68,6	68,9	68,9	71,1	71,1
5000	69,2	69,5	70,6	71,6	71,9	71,9	74,1	74,1
R_w	48,0	48,0	48,0	48,0	48,0	48,0	47,0	47,0

Bildverzeichnis

Bild 1: Moderne Hochlochziegel mit zusätzlicher Dämmstoff-Granulat-Füllung (links) oder filigraner Steganordnung mit hoher Anzahl an Lochreihen und Stegversatz (rechts).....	1
Bild 2: Aufbau der Messapparatur TLP 900 ZS zur Bestimmung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit eines Hochlochziegels.....	14
Bild 3: Messaufbau zur Bestimmung des Emissionskoeffizienten verschiedener Proben von links nach rechts: Einstrahlsignal des Schwarzen Strahlers bei Raumtemperatur und bei einer Temperatur von 100 °C; Reflexionssignal der Probe bei Bestrahlung (Schwarzer Strahler 100 °C); Reflexionssignal der Probe bei Raumtemperatur.....	15
Bild 4: Vier-Punkt-Messung des spezifischen elektrischen Widerstandes einer beschichteten Probe.....	15
Bild 5: Messaufbau zur Bestimmung des dynamischen E-Moduls	17
Bild 6: Lagerung und Anregung der Probe für die zerstörungsfreie Bestimmung des Elastizitätsmoduls (Biegeschwingung, links) und des Schubmoduls (Torsionsschwingung, rechts).....	18
Bild 7: Aufnahme der Oberfläche einer Glasprobe mit dem Laser-Scanning-Mikroskop.....	20
Bild 8: Aufnahme der Oberfläche einer geschliffenen Ziegelprobe mit dem Laser-Scanning-Mikroskop	20
Bild 9: Messtechnisch ermittelte Emissionskoeffizienten der Aluminium-Pigmente auf mit Anlegemilch bestrichenen Glassubstraten	21
Bild 10: REM-Aufnahme von „Blitz Aluminiumpulver Aquaral 6221/63W“ mit $\epsilon = 0,339$	22
Bild 11: REM-Aufnahme von „STAPA Metalux 1520“ mit $\epsilon = 0,403$	22
Bild 12: REM-Aufnahme von „Blitz Aluminiumpaste Maxal 66009 SI/70 BG“ bei 500-facher Vergrößerung mit $\epsilon = 0,368$	23
Bild 13: REM-Aufnahme von „Blitz Aluminiumpulver 2014“ bei 500-facher Vergrößerung mit $\epsilon = 0,387$	23
Bild 14: REM-Aufnahme von „Blitz Aluminiumpulver 2051“ bei 500-facher Vergrößerung mit $\epsilon = 0,681$	23
Bild 15: REM-Aufnahme von „Aluminiumpulver 0-150 μm schutzgasverdüst“ bei 500-facher Vergrößerung mit $\epsilon = 0,860$	23
Bild 16: Messtechnisch ermittelte Emissionskoeffizienten der Kupfer- und Goldbronze-Pigmente auf mit Anlegemilch bestrichenen Glassubstraten.....	24
Bild 17: REM-Aufnahme von „Blitz Kupferpulver G2021“ bei 500-facher Vergrößerung mit $\epsilon = 0,367$	25
Bild 18: REM-Aufnahme von „Goldbronzepulver Luminor 2210-01 Kupfer“ bei 500-facher Vergrößerung mit $\epsilon = 0,389$	25
Bild 19: REM-Aufnahme von „Blitz Goldbronzepulver G 2021 Bleichgold“ bei 500-facher Vergrößerung mit $\epsilon = 0,395$	25
Bild 20: REM-Aufnahme von „Goldbronzepulver Luminor 2210 Reichgold“ bei 500-facher Vergrößerung mit $\epsilon = 0,396$	25
Bild 21: REM-Aufnahme von „Goldbronzepulver Offset 6340“ bei 500-facher Vergrößerung mit $\epsilon = 0,673$	26
Bild 22: REM-Aufnahme von „Goldbronzepulver Multiprint 4350“ bei 500-facher Vergrößerung mit $\epsilon = 0,621$	26
Bild 23: REM-Aufnahme von „Edelpudergraphit“ bei 1000-facher Vergrößerung.....	26
Bild 24: REM-Aufnahme von „Flocken-Graphit, feines Puder“ bei 1000-facher Vergrößerung.....	26
Bild 25: REM-Aufnahme von „Graphit Mix 1“ bei 100-facher Vergrößerung.....	27
Bild 26: REM-Aufnahme von „Graphit Mix 2“ bei 100-facher Vergrößerung.....	27
Bild 27: REM-Aufnahme von „ABL 87/90“ bei 500-facher Vergrößerung	27
Bild 28: REM-Aufnahme von „EDM 90/92“ bei 1000-facher Vergrößerung	27
Bild 29: REM-Aufnahme von „Graphit S 40 90/92“ bei 500-facher Vergrößerung	28
Bild 30: REM-Aufnahme von „Graphit TVG/K“ bei 1000-facher Vergrößerung.....	28
Bild 31: REM-Aufnahme „kugelförmiger Graphit SG 2S 99,95“ bei 1000-facher Vergrößerung.....	28
Bild 32: REM-Aufnahme von „Graphit SGB 25 L 99,9“ bei 1000-facher Vergrößerung	28
Bild 33: REM-Aufnahme „Graphit EDM 90/92“ bei 500-facher Vergrößerung	29

Bild 34: REM-Aufnahme „Graphit T1“ bei 500-facher Vergrößerung	29
Bild 35: „Graphit EDM 90/92“ aufgedudert auf ein mit Anlegemilch beschichtetes Glassubstrat (unpoliert) bei 1000-facher Vergrößerung	29
Bild 36: „Graphit EDM 90/92“ wie Bild 35 nach mechanischem Polieren der Oberfläche bei 1000-facher Vergrößerung.....	29
Bild 37: „Graphit T1“ aufgedudert auf ein mit Anlegemilch beschichtetes Glassubstrat (unpoliert) bei 1000-facher Vergrößerung.....	30
Bild 38: „Graphit T1“ wie Bild 37 nach mechanischem Polieren der Oberfläche bei 1000-facher Vergrößerung...	30
Bild 39: Emissionskoeffizienten der mit Graphit bepuderten Glassubstrate (Binder ist Anlegemilch) vor und nach dem mechanischen Polieren im Vergleich.....	30
Bild 40: Lichtmikroskopische Aufnahme bei 30-facher Vergrößerung von Glimmerpartikeln, die mit poliertem Graphit der Sorte Graphit T1 beschichtet wurden ($\epsilon = 0,913$). Die Polierdauer betrug zwei Stunden...	32
Bild 41: Lichtmikroskopische Aufnahme bei 30-facher Vergrößerung von Glimmerpartikeln, die mit poliertem Graphit der Sorte Graphit T1 beschichtet wurden ($\epsilon = 0,916$). Die Polierdauer betrug sechs Stunden	32
Bild 42: Graphitbeschichtete Ziegelprobe 7 nach Reduktionsbrand im Auflichtmikroskop bei 200-facher Vergrößerung. Die Beschichtung erfolgte mit der Graphitsorte EDM 96/97 (nass aufpoliert). Der Emissionskoeffizient betrug $\epsilon = 0,917$	34
Bild 43: Graphit-beschichtete Ziegelprobe 10 nach Reduktionsbrand im Auflichtmikroskop bei 200-facher Vergrößerung. Die Beschichtung erfolgte mit der Graphitsorte Graphit T1 (trocken aufpoliert). Der Emissionskoeffizient betrug $\epsilon = 0,743$	34
Bild 44: LSM-Aufnahme und Auswertung der Oberflächenrauigkeiten eines Glassubstrates nach einer Beschichtung mit Gold mittels Sputtern (Beschichtungsdauer 180 Sekunden).....	35
Bild 45: LSM-Aufnahme und Auswertung der Oberflächenrauigkeiten eines Ziegelsubstrates nach einer Beschichtung mit Gold mittels Sputtern (Beschichtungsdauer 180 Sekunden).....	35
Bild 46: LSM-Aufnahme und Auswertung der Oberflächenrauigkeiten eines Glassubstrates nach einer Beschichtung mit Silber mittels Sputtern (Beschichtungsdauer 180 Sekunden)	36
Bild 47: LSM-Aufnahme und Auswertung der Oberflächenrauigkeiten eines Ziegelsubstrates nach einer Beschichtung mit Silber mittels Sputtern (Beschichtungsdauer 180 Sekunden)	36
Bild 48: LSM-Aufnahme und Auswertung der Oberflächenrauigkeiten eines Glassubstrates nach einer Beschichtung mit Nickel mittels Sputtern (Beschichtungsdauer 180 Sekunden).....	37
Bild 49: LSM-Aufnahme und Auswertung der Oberflächenrauigkeiten eines Ziegelsubstrates nach einer Beschichtung mit Nickel mittels Sputtern (Beschichtungsdauer 180 Sekunden).....	37
Bild 50: Emissionskoeffizienten von Glassubstraten, welche mit Gold, Silber und Nickel für 60, 120 und 180 Sekunden durch Sputtern beschichtet wurde, im Vergleich mit der unbeschichteten Glas-Nullprobe ..	37
Bild 51: Emissionskoeffizienten von Ziegelsubstraten, welche mit Gold, Silber und Nickel für 60, 120 und 180 Sekunden durch Sputtern beschichtet wurden, im Vergleich mit der unbeschichteten Ziegel-Nullprobe	38
Bild 52: Minderung des Emissionskoeffizienten einer mit Gold besputterten Ziegeloberfläche bei schrittweiser Erhöhung der Sputterzeit auf 1080 Sekunden im Vergleich mit einer unbeschichteten Ziegel-Nullprobe (dunkelgrau)	39
Bild 53: Ziegelsubstrat mit einer Beschichtung aus Fluor-dotiertem-Zinnoxid (FTO). Die Oberfläche war teilweise mit einem Stück Aluminiumoxid abgedeckt (heller Streifen)	41
Bild 54: REM-Aufnahme eines mit Fluor-dotiertem-Zinnoxid (FTO) beschichteten Ziegelsubstrates bei 10kx-facher Vergrößerung. Die FTO-Schicht wurde mit dem Pyrolysolverfahren (Russo, 2008) bei einer Temperatur von 440 °C hergestellt	41
Bild 55: Zusammenhang zwischen Emissionskoeffizient und spezifischem Oberflächenwiderstand bei ausgewählten Pigmenten (detaillierte Auflistung im Anhang: Tabelle 30 bis Tabelle 44), welche auf ein mit Anlegemilch bestrichenes Glassubstrat aufgedudert wurden	43
Bild 56: Zusammenhang zwischen Emissionskoeffizient und spezifischer elektrischer Leitfähigkeit von Glassubstraten, welche jeweils 60, 120 und 180 Sekunden mit Gold, Silber und Nickel besputtert wurden	44
Bild 57: Spezifische elektrische Leitfähigkeit der hergestellten metallischen Dünnschichten; aufgetragen gegen den gemessenen Emissionskoeffizienten dieser Schichten.....	45

Bild 58: Spezifische Oberflächenwiderstände verschiedener Metalle und Graphit (die schwarze Linie stellt den für einen Emissionskoeffizienten von $\epsilon = 0,4$ mindestens nötigen spezifischen Oberflächenwiderstand dar). Die Werte für den spezifischen Oberflächenwiderstand sind aus einer Veröffentlichung entnommen (Giese, et al.)	46
Bild 59: Spezifische Oberflächenwiderstände der in Abschnitt 2.2.2 untersuchten Graphitschichten; Vergleich der Oberflächenwiderstände in unpoliertem und poliertem Zustand (die schwarze, gestrichelte Linie stellt den für einen Emissionskoeffizienten von $\epsilon = 0,5$ mindestens nötigen spezifischen Oberflächenwiderstand $\rho_s = 2,72 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ dar)	47
Bild 60: Spezifische Oberflächenwiderstände der untersuchten Graphitschichten; Vergleich der Oberflächenwiderstände im polierten Zustand mit den gemessenen Emissionskoeffizienten.....	48
Bild 61: REM-Aufnahme eines Pigments der Bezeichnung „Goldbronzepulver Luminor 2210“ mit einer mittleren Partikelgröße von $d_{50} = 50 \mu\text{m}$ bei 1000-facher Vergrößerung.....	50
Bild 62: REM-Aufnahme eines Pigments der Bezeichnung „Goldbronzepulver Luminor 2240“ mit einer mittleren Partikelgröße von $d_{50} = 50 \mu\text{m}$ bei 1000-facher Vergrößerung.....	50
Bild 63: REM-Aufnahme eines Pigments der Bezeichnung „Goldbronzepulver Luminor 2250“ mit einer mittleren Partikelgröße von $d_{50} = 30 \mu\text{m}$ bei 1000-facher Vergrößerung.....	50
Bild 64: REM-Aufnahme eines Pigments der Bezeichnung „Goldbronzepulver Luminor 2280“ mit einer mittleren Partikelgröße von $d_{50} = 20 \mu\text{m}$ bei 1000-facher Vergrößerung.....	50
Bild 65: REM-Aufnahme eines Pigments der Bezeichnung „Goldbronzepulver Luminor 2350“ mit einer mittleren Partikelgröße von $d_{50} = 16 \mu\text{m}$ bei 1000-facher Vergrößerung.....	50
Bild 66: REM-Aufnahme eines Pigments der Bezeichnung „Goldbronzepulver Multiprint 4320“ mit einer mittleren Partikelgröße von $d_{50} = 9 \mu\text{m}$ bei 1000-facher Vergrößerung	51
Bild 67: REM-Aufnahme eines Pigments der Bezeichnung „Goldbronzepulver Multiprint 4350“ mit einer mittleren Partikelgröße von $d_{50} = 6 \mu\text{m}$ bei 1000-facher Vergrößerung	51
Bild 68: REM-Aufnahme eines Pigments der Bezeichnung „Goldbronzepulver Offset 6327“ mit einer mittleren Partikelgröße von $d_{50} = 3 \mu\text{m}$ bei 1000-facher Vergrößerung	52
Bild 69: REM-Aufnahme eines Pigments der Bezeichnung „Goldbronzepulver Offset 6340“ mit einer mittleren Partikelgröße von $d_{50} = 2 \mu\text{m}$ bei 1000-facher Vergrößerung	52
Bild 70: REM-Aufnahme der senkrecht stehenden Pigmente „Goldbronzepulver Luminor 2210“ bei 500-facher Vergrößerung.....	53
Bild 71: Schichtdicke eines Pigments der Sorte „Goldbronzepulver Luminor 2210“ bei 50kx-facher Vergrößerung	53
Bild 72: REM-Aufnahme des Pigments der Sorte „Goldbronzepulver Multiprint 4320“ bei 75kx-facher Vergrößerung.....	53
Bild 73: REM-Aufnahme des Pigments der Sorte „Goldbronzepulver Offset 27“ bei 100kx-facher Vergrößerung.	53
Bild 74: Emissionskoeffizient der Goldbronzepigmente der Sorten Luminor, Multiprint und Offset in Abhängigkeit vom Längen/Dicken-Verhältnis (L/D-Verhältnis)	54
Bild 75: REM-Aufnahme einer unbeschichteten Ziegeloberfläche bei 500-facher Vergrößerung, $\epsilon = 0,930$	54
Bild 76: REM-Aufnahme Pigment „STANDARD Goldbronzepulver LACK 900 L Reichgold“ mit Holzleim als Bindemittel bei 500-facher Vergrößerung auf Ziegeloberfläche, $\epsilon = 0,530$	54
Bild 77: Für vollständige Bedeckung der Substrate notwendige Pigmentzugabe zum Binder verdünnter Holzleim (1 Teil Holzleim : 4 Teile dest. Wasser); ermittelt durch Wiegen der Beschichtungslösung nach vollständiger Bedeckung des Substrates, im Vergleich mit den Emissionskoeffizienten der beschichteten Ziegelsubstrate. Die Beschichtung erfolgte mittels Pinselauftrag der Mischung auf die Ziegelsubstrate	56
Bild 78: Einbau des Ziegelprobekörpers in das Plattenmessgerät nach EN 12667 (Halbsteinmessung) für die Betriebsweise als Einplattenmessgerät	60
Bild 79: Beschichteter Probekörper aus Ziegelsorte A.....	62
Bild 80: Beschichteter Probekörper aus Ziegelsorte D	62
Bild 81: Polieren einer Graphitschicht auf einem Kartonträger. Die Beschichtung aus 3 Vol.-% Graphit und 97 Vol.-% verdünntem Holzleim (1 Teil Holzleim : 4 Teile dest. Wasser) wurde mittels Airbrush-Technik aufgesprüht. Nach dem Poliervorgang betrug der Emissionskoeffizient des graphitbeschichteten Karton $\epsilon = 0,46$	63
Bild 82: Ziegel G mit beschichteten Stecklingen (Graphit-beschichtet und poliert) in den Löchern. Der Emissionskoeffizient des graphitbeschichteten Karton beträgt $\epsilon = 0,46$	63

Bild 83: Probekörper aus Ziegelsorte C für die Halbsteinmessung. Die eingebrachten Stecklinge bestehen aus beschichtetem Karton („Aluminiumpaste Blitz Maxal 66012 SI/70 BG“ und „Goldbronzepulver Luminor 2210“). Der Emissionskoeffizient des beschichteten Kartons beträgt jeweils $\epsilon = 0,50$ für beide Pigmente	65
Bild 84: Probekörper aus Ziegelsorte B für die Halbsteinmessung. Die eingebrachten Stecklinge bestehen aus beschichtetem Karton (Aluminiumpaste „Blitz Maxal 66012 SI/70 BG“) ausgestattet. Der Emissionskoeffizient des beschichteten Kartons beträgt $\epsilon = 0,50$	65
Bild 85: Anregung einer Biegeschwingung durch Anschlagen mit einem geeigneten Werkzeug und gleichzeitige Erfassung der Schwingung mittels Piezotaster	67
Bild 86: Piezotaster zur Messung der Frequenz der angeregten Schwingung	67
Bild 87: Zusammenhang zwischen E-Modul und Scherbenrohddichte der Ziegel mit der Bezeichnung A, B, D, E und F: Die messtechnische Ermittlung des E-Moduls erfolgte mittels Impuls-Erregungs-Technologie. 67	67
Bild 88: Zusammenhang zwischen G-Modul und Scherbenrohddichte der Ziegel mit der Bezeichnung A, B, D, E und F: Die messtechnische Ermittlung des E-Moduls erfolgte mittels Impuls-Erregungs-Technologie. 68	68
Bild 89: Zusammenhang zwischen Poissonzahl μ und Scherbenrohddichte der Ziegel mit der Bezeichnung A, B, D, E und F: Die messtechnische Ermittlung des E-Moduls erfolgte mittels Impuls-Erregungs-Technologie	68
Bild 90. Zusammenhang zwischen Dämpfung und Scherbenrohddichte der Ziegel mit der Bezeichnung A, B, D, E und F: Die messtechnische Ermittlung des E-Moduls erfolgte mittels Impuls-Erregungs-Technologie. 69	69
Bild 91: Modellziegel 1 bis 4 versehen mit Thermoelementen zur Bestimmung der Temperaturen an vordefinierten Stellen (Methode „Thermoelemente“).....	71
Bild 92: Ersatzschaltbilder für die Modellziegel 1 bis 4 zur Aufstellung der Wärmebilanzen aus den gemessenen Teilwärmeströmen.....	74
Bild 93: Modellziegel 3 mit Bohrungen für Thermoelemente zur Bestimmung der Wärmeströme im Festkörper L11, L12, L21, L22, der Konvektionsströme in beiden Hohlräumen K1 und K2 und des Wärmeübergangs durch Strahlung in beiden Hohlräumen S1 und S2	78
Bild 94: Messtechnisch ermittelte Wärmeströme von vier unbeschichteten Modellziegeln. Zusammensetzung des gesamten Wärmedurchgangs bestehend aus Strahlung, Leitung und Konvektion (Mittelwerte aus drei Messungen je Modellziegel) (Hintz, et al., 2012).....	83
Bild 95: Messtechnisch ermittelte Wärmeströme von vier beschichteten Modellziegeln. Zusammensetzung des gesamten Wärmedurchgangs bestehend aus Strahlung, Leitung und Konvektion (Mittelwerte aus drei Messungen je Modellziegel) (Hintz, et al., 2012).....	83
Bild 96: Messtechnisch ermittelte Wärmebilanzen für vier unbeschichtete Modellziegel. Zusammensetzung des gesamten Wärmedurchgangs aus Strahlung, Leitung und Konvektion (Mittelwerte aus drei Messungen je Modellziegel).....	84
Bild 97: Messtechnisch ermittelte Wärmebilanzen für vier beschichtete Modellziegel .Zusammensetzung des gesamten Wärmedurchgangs aus Strahlung, Leitung und Konvektion (Mittelwerte aus drei Messungen je Modellziegel).....	84
Bild 98: Gemessene äquivalente Wärmeleitfähigkeiten für Modellziegel in unbeschichtetem ($\epsilon = 0,94$) und beschichtetem Zustand ($\epsilon = 0,30$) (Mittelwerte aus drei Messungen je Modellziegel)	85
Bild 99: Modellziegel 1 mit einer Beschichtung aus Pigment „Goldbronzepulver Luminor 2210“ der in Wärmestromrichtung gegenüber liegenden Strahlungsflächen (Links) und Modellziegel 2 mit Schirmchen aus metallisiertem Papier (rechts).....	86
Bild 100: Vergleich der Modellziegel in unbeschichtetem Zustand (Nullproben) mit beschichteten und verfüllten Varianten. Dabei betrug der Emissionskoeffizient der Beschichtung $\epsilon = 0,3$, der pigmentierte Strahlungsschirm zeigte einen Emissionskoeffizienten von $\epsilon = 0,5$ und das metallisierte Papier zeigte $\epsilon = 0,2$. Die Hohlräume wurden außerdem mit Neopor, Mineralwollegranulat und Perlite gefüllt	87
Bild 101: Finite Elemente Berechnung (SOLIDO) der Wärmebilanzen bei additiver Annahme des gesamten Wärmedurchgangs aus Strahlung, Leitung und Konvektion für unbeschichtete Modellziegel.....	91
Bild 102: Finite Elemente Berechnung (ANSYS CFX) der Wärmebilanzen bei additiver Annahme des gesamten Wärmedurchgangs aus Strahlung, Leitung und Konvektion für unbeschichtete Modellziegel.....	92
Bild 103: Verminderung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit des Ziegels A bei schrittweiser Absenkung des Emissionskoeffizienten (SOLIDO).....	99
Bild 104: FEM-Berechnung (SOLIDO) der äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten des Ziegels A. Vergleich der Beschichtung mit einer Verfüllung aus Neopor, Mineralwollegranulat und Perlite.....	100

Bild 105: Wärmebilanzen des Ziegels A bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,366 \text{ W/mK}$ (Messwert aus Tabelle 5). Berechnung mit SOLIDO (links) und mit ANSYS CFX (rechts).....	100
Bild 106: Minderung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit des Ziegels B bei schrittweiser Absenkung des Emissionskoeffizienten der keramischen Scherbenoberfläche (SOLIDO)	101
Bild 107: FEM-Berechnung (SOLIDO) der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{\text{äquival.}}$ des Ziegels B: Vergleich der Beschichtung mit einer Verfüllung aus Neopor, Mineralwollegranulat und Perlite	102
Bild 108: Wärmebilanzen des Ziegels B bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,332 \text{ W/mK}$ (Messwert aus Tabelle 5). Berechnet mit SOLIDO (links) und mit ANSYS CFX (rechts).....	103
Bild 109: Minderung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{\text{äquival.}}$ des Ziegels C nach Zulassung Z 17.1-906 bei schrittweiser Absenkung des Emissionskoeffizienten der keramischen Scherbenoberfläche um jeweils $\Delta \varepsilon = 0,1$ von $\varepsilon = 1$ bis $\varepsilon = 0$ (Berechnung mit SOLIDO)	104
Bild 110: Finite Elemente Berechnung (SOLIDO) der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit des Ziegels C nach Zulassung Z 17.1-906. Vergleich von Nullprobe (ohne Beschichtung und Verfüllung) mit Beschichtung und Verfüllung mit Neopor, Mineralwollegranulat und Perlite.....	104
Bild 111: Wärmebilanzen von Ziegel C bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,293 \text{ W/mK}$ (Messwert aus Tabelle 5); berechnet mit SOLIDO (links) und mit ANSYS CFX (rechts).....	105
Bild 112: Minderung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit des Ziegels D bei schrittweiser Absenkung des Emissionskoeffizienten der keramischen Scherbenoberfläche (Berechnung mit SOLIDO)	106
Bild 113: Finite Elemente Berechnung (SOLIDO) der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit des Ziegels D: Vergleich der Beschichtung mit jeweils einer Verfüllung aus Neopor, Mineralwollegranulat und Perlite.....	107
Bild 114: Wärmebilanzen des Ziegels D bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,35 \text{ W/mK}$ (Messwert aus Tabelle 5); berechnet mit SOLIDO (links) und mit ANSYS CFX (rechts).....	108
Bild 115: Minderung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit des Ziegels E bei schrittweiser Absenkung des Emissionskoeffizienten der keramischen Scherbenoberfläche (SOLIDO)	109
Bild 116: FE-Berechnung (SOLIDO) der äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten des Ziegels E bei zwei verschiedenen Scherben-Wärmeleitfähigkeiten. Vergleich der Beschichtung mit einer Befüllung aus Neopor, Mineralwollegranulat und Perlite	110
Bild 117: Wärmebilanzen des Ziegels E bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,332 \text{ W/mK}$ (Messwert aus Tabelle 5). Berechnung mit SOLIDO (links) und mit ANSYS CFX (rechts).....	111
Bild 118: Minderung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit des Ziegels F bei schrittweiser Absenkung des Emissionskoeffizienten der keramischen Scherbenoberfläche (SOLIDO)	112
Bild 119: Finite Elemente Berechnung (SOLIDO) der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit des Ziegels F: Vergleich der Beschichtung mit einer Verfüllung aus Neopor, Mineralwollegranulat und Perlite	113
Bild 120: Wärmebilanz des Ziegels F bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,27 \text{ W/mK}$ (Messwert aus Tabelle 5). Berechnet mit SOLIDO (links) und mit ANSYS CFX (rechts)	114
Bild 121: Verminderung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit des Ziegels G bei schrittweiser Absenkung des Emissionskoeffizienten der keramischen Scherbenoberfläche (SOLIDO)	114
Bild 122: FE-Berechnung (SOLIDO) der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit des Ziegels G. Vergleich der Beschichtung mit einer Verfüllung aus Neopor, Mineralwollegranulat und Perlite.....	115
Bild 123: Wärmebilanzen des Ziegels G bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,46 \text{ W/mK}$ (Messwert aus Tabelle 5). Berechnung mit SOLIDO (links) und mit ANSYS CFX (rechts).....	116
Bild 124: Äquivalente Wärmeleitfähigkeiten der Modelle mit 1 bis 20 Hohlräumen in Wärmestromrichtung bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,35 \text{ W/mK}$. Der Pfeil im Modell markiert die Richtung des Wärmestroms	118
Bild 125: Äquivalente Wärmeleitfähigkeiten der Modelle mit 1 bis 20 Hohlräumen senkrecht zur Wärmestromrichtung bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,35 \text{ W/mK}$. Der Pfeil im Modell markiert die Richtung des Wärmestroms.....	120
Bild 126: Äquivalente Wärmeleitfähigkeiten von Modellziegeln in Abhängigkeit von der Anzahl der Hohlräume senkrecht zur Wärmestromrichtung/Lochreihen bei einem Lochanteil von 60 Vol.-% und Scherben-Wärmeleitfähigkeiten von $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,20 \text{ W/mK}$ bis $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,35 \text{ W/mK}$ (FE-Berechnung mit SOLIDO) .	121
Bild 127: Neu entwickelte Lochbildgeometrien mit 10 – 12 Lochreihen, die sich durch einen hohen Wärmestrahlungsanteil auszeichnen. Der Lochanteil beträgt jeweils 60 %	124
Bild 128: Schallschutzmessung im Wandprüfstand nach DIN EN ISI 140-3 mit Sende- und Empfangsraum: zwischen beiden Räumen befindet sich das Messobjekt.....	130

Bild 129: Verschiedene Schwingungsformen eines Einzelsteins: Es treten Dickenschwingungen (oben) und Biegeschwingungen (unten) auf (Maysenhölder, 1993).....	131
Bild 130: Für die Schallschutz-Berechnung gewählte unterschiedliche repräsentative Volumenelemente: die Bezeichnung „EiS“ steht für die Berechnung als einzelner Stein, während mit „EiZ“ die Berechnung als Elementarzelle mit Berücksichtigung des Versatzes der Ziegel bezeichnet wird. Der Zusatz „Mö“ steht für die Berechnung mit Dünnbettmörtelschicht und der Zusatz „MöPu“ beschreibt die Berechnung mit Mörtel und zusätzlicher Putzschicht auf der Innen- und Außenseite.	135
Bild 131: FE-Berechnung für das frequenzabhängige Schalldämmmaß des Ziegels C bei Berechnung mittels Berger'schen Massengesetz oder als einzelner Ziegel und Vergleich mit den im Schallprüfstand gemessenen Werten (graue durchgehende Linie)	136
Bild 132: FE-Berechnung für das frequenzabhängige Schalldämmmaß des Ziegels C bei Berechnung als homogenisiertes Material. Wahl der Elementarzelle als einzelne Steinlage ohne (bezeichnet als „EiS“) und mit Berücksichtigung von Mörtel und Putz (bezeichnet als „EiSMöPu“).....	137
Bild 133: FE-Berechnung für das frequenzabhängige Schalldämmmaß des Ziegels C bei Berechnung als homogenisiertes Material. Wahl der Elementarzelle über drei Steinlagen hinweg mit Berücksichtigung des Steinversatzes ohne (bezeichnet als „EiZ“) und mit Berücksichtigung von Mörtel (bezeichnet als „EiZMö“) und Putz (bezeichnet als „EiZMöPu“).....	138
Bild 134: FE-Berechnung des Einflusses der Querstege auf das Schalldämm-Maß von Hochlochziegeln. Als Modelle dienen die Modelle aus den wärmetechnischen Berechnungen. Angenommen wurde ein E-Modul von 10 GPa für den Scherben, eine Poissonzahl von $\mu = 0,3$, eine Materialdämpfung von $\delta = 4\%$ und ein Lochanteil von 60 Vol.-% (Hintz, et al., 2013)	140
Bild 135: FE-Berechnung des Einflusses der Querstege auf das Schalldämm-Maß von Hochlochziegel. Als Modelle dienen die Modelle aus den wärmetechnischen Berechnungen. Angenommen wurde ein E-Modul von 5 GPa für den Scherben, eine Poissonzahl von $\mu = 0,3$, eine Materialdämpfung von $\delta = 4\%$, und ein Lochanteil von 60 Vol.-% Lochanteil	141
Bild 136: FE-Berechnung des Einflusses der Längsstege auf das Schalldämm-Maß von Hochlochziegeln. Als Modelle dienen die Modelle aus den wärmetechnischen Berechnungen. Angenommen wurde ein E-Modul von 10 GPa für den Scherben, eine Poissonzahl von $\mu = 0,3$, eine Materialdämpfung von $\delta = 4\%$ und ein Lochanteil von 60 Vol.-% (Hintz, et al., 2013)	143
Bild 137: FE-Berechnung des Einflusses der Längsstege auf das Schalldämm-Maß von Hochlochziegeln. Als Modelle dienen die Modelle aus den wärmetechnischen Berechnungen. Angenommen wurde ein E-Modul von 5 GPa für den Scherben, eine Poissonzahl von $\mu = 0,3$, eine Materialdämpfung von $\delta = 4\%$ und ein Lochanteil von 60 Vol.-%.....	144
Bild 138: FE-Berechnung zum Einfluss der Anzahl der Hohlräume bzw. Stege auf das bewertete Schalldämmmaß von Hochlochziegeln. Als Modelle dienen die Modelle aus den wärmetechnischen Berechnungen. Verglichen wurden E-Moduln von $E = 5\text{ GPa}$ und $E = 10\text{ GPa}$ für den Scherben bei einer Poissonzahl von $\mu = 0,3$, einer Materialdämpfung von $\delta = 4\%$ und einem Lochanteil von 60 Vol.-% (Hintz, et al., 2013).....	145
Bild 139: Messergebnisse des frequenzabhängigen Schalldämmmaßes des Ziegels C im Schallprüfstand	207

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Emissionskoeffizienten von Graphit-beschichteten und polierten Glimmerpartikeln bei steigender Polierzeit. Das mit Graphit beschichtete und polierte Trägerpigment (Glimmer) wurde mittels wasserverdünntem Holzleim (1 Teil Holzleim : 4 Teile dest. Wasser) auf Ziegelsubstrate aufgebracht.	32
Tabelle 2: Emissionskoeffizienten graphitbeschichteter Ziegelproben. Der Graphit wurde durch einen Reib- und Poliervorgang auf die plastischen Tonproben aufgebracht. Anschließend erfolgte ein Reduktionsbrand bei 900 °C.....	33
Tabelle 3: Bedeckungsgrad der Substrate bei der in Bild 77 aufgezeigten Pigmentzugabe zum Binder verdünnter Holzleim (1 Teil Holzleim : 4 Teile dest. Wasser); ermittelt durch Wiegen der Beschichtungslösung nach vollständiger Bedeckung des Substrates	57
Tabelle 4: Übersicht der für die Untersuchungen in dieser Arbeit ausgewählten Lochbilder.....	58
Tabelle 5: Scherbenrohddichten und Scherben-Wärmeleitfähigkeiten $\lambda_{10, tr}$ der zur Verfügung gestellten Hochlochziegel. Die Messungen erfolgten an herausgeschnittenen Einzelstegen (Mittelwert aus 10 Einzelstegen).....	59
Tabelle 6: Emissionskoeffizienten der herausgeschnittenen Scherben (mit Sinterhaut) vor und nach einer Beschichtung mit dem ausgewählten Binder (1 Teil Holzleim : 4 Teile dest. Wasser) und Pigmentsystem „Goldbronzepulver Luminor 2210 (Mittelwert aus 4 bis 8 Einzelmessungen).	61
Tabelle 7: Äquivalente Wärmeleitfähigkeiten (Halbsteinmessungen) der von den Projektpartnern zur Verfügung gestellten Hochlochziegel vor und nach einer Beschichtung derselben Probekörper mit dem ausgewählten Pigment „Goldbronzepulver Luminor 2210“ und verdünntem Holzleim als Binder. Die Ergebnisse sind Mittelwerte aus mindestens drei einzelnen Messungen jeweils neu präparierter Probekörper.....	62
Tabelle 8: Äquivalente Wärmeleitfähigkeiten unbeschichteter und mit beschichteten Stecklingen ausgerüstete Hochlochziegel im Vergleich. Die Ergebnisse sind Mittelwerte aus drei einzelnen Messungen jeweils neu präparierter Probekörper.....	64
Tabelle 9: E-Modul und Rohdichte des Ziegels C. Der E-Modul wurde richtungsabhängig bestimmt mit dem Ultraschallverfahren an entnommenen Querstegen bestimmt	66
Tabelle 10: Absolute Wärmeströme \dot{Q} [W] bei Modellziegel ; gemessen bei den Probenmitteltemperaturen 15 °C, 25 °C und 35 °C (Mittelwerte aus je drei Einzelmessungen)	75
Tabelle 11: Prozentuale Anteile der Wärmeströme bei Modellziegel 1; gemessen bei den Probenmitteltemperaturen 15 °C, 25 °C und 35 °C (Mittelwerte aus je drei Einzelmessungen).....	76
Tabelle 12: Absolute Wärmeströme \dot{Q} [W] bei Modellziegel 2, gemessen bei den Probenmitteltemperaturen 15 °C, 25 °C und 35 °C (Mittelwerte aus je drei Einzelmessungen)	77
Tabelle 13: Prozentuale Anteile der Wärmeströme bei Modellziegel 2, gemessen bei den Probenmitteltemperaturen 15 °C, 25 °C und 35 °C (Mittelwerte aus je drei Einzelmessungen).....	77
Tabelle 14: Absolute Wärmeströme \dot{Q} [W] bei Modellziegel 3; gemessen bei den Probenmitteltemperaturen 15 °C, 25 °C und 35 °C (Mittelwerte aus je drei Einzelmessungen)	80
Tabelle 15: Prozentuale Anteile der Wärmeströme bei Modellziegel 3; gemessen bei den Probenmitteltemperaturen 15 °C, 25 °C und 35 °C (Mittelwerte aus je drei Einzelmessungen).....	80
Tabelle 16: Absolute Wärmeströme \dot{Q} [W] bei Modellziegel 4; gemessen bei den Probenmitteltemperaturen 15 °C, 25 °C und 35 °C (Mittelwerte aus je drei Einzelmessungen)	81
Tabelle 17: Prozentuale Anteile der Wärmeströme bei Modellziegel 4; gemessen bei den Probenmitteltemperaturen 15 °C, 25 °C und 35 °C (Mittelwerte aus je drei Einzelmessungen).....	82
Tabelle 18: Messtechnisch ermittelte äquivalente Wärmeleitfähigkeiten der Modellziegel im Vergleich mit entsprechenden Werten aus der FEM mit ANSYS CFX und SOLIDO in unbeschichtetem und beschichtetem Zustand	89
Tabelle 19: Messtechnisch ermittelte äquivalente Wärmeleitfähigkeiten der Modellziegel im Vergleich mit entsprechenden Werten aus der FE-Simulation mit SOLIDO bei Verfüllung mit Dämmstoffen.....	90
Tabelle 20: Vergleich der berechneten Strahlungsanteile am gesamten Wärmeübergang der Modellziegel bei einer direkten Messung (Methode „Thermoelemente“) mit der Finite-Elemente-Berechnung unter Verwendung von ANSYS CFX und SOLIDO	93

Tabelle 21: Vergleich der berechneten Konvektionsanteile am gesamten Wärmeübergang der Modellziegel bei einer direkten Messung (Methode „Thermoelemente“) mit der Finite-Elemente-Berechnung unter Verwendung von ANSYS CFX und SOLIDO	94
Tabelle 22: Vergleich der berechneten Leitungssanteile am gesamten Wärmeübergang der Modellziegel bei einer direkten Messung (Methode „Thermoelemente“) mit der Finite-Elemente-Berechnung unter Verwendung von ANSYS CFX und SOLIDO	94
Tabelle 23: Vergleich der äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten aus FE-Berechnungen mit den Ergebnissen aus den Halbsteinmessungen der von den Projektpartnern zur Verfügung gestellten Hochlochziegel ohne Beschichtung (Annahme der Emissionskoeffizienten nach messtechnischer Ermittlung in Tabelle 6 und Scherben-Wärmeleitfähigkeiten nach Tabelle 8).....	96
Tabelle 24: Vergleich der äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten aus FE-Berechnungen mit den Ergebnissen aus den Halbsteinmessungen der von den Projektpartnern zur Verfügung gestellten Hochlochziegel mit Beschichtung durch Pigment „Goldbronzepulver Luminor 2210“ (Annahme der Emissionskoeffizienten nach messtechnischer Ermittlung in Tabelle 6 und Scherben-Wärmeleitfähigkeit nach Tabelle 8).....	97
Tabelle 25: Vergleich der Ergebnisse bei Abschätzung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von der Lochreihenanzahl und der Scherbenwärmeleitfähigkeit, die Abschätzung wurde exemplarisch für die in dieser Arbeit untersuchten Hochlochziegel durchgeführt und gilt für einen Lochanteil von 60 Vol.-%	122
Tabelle 26: Resultierende äquivalente Wärmeleitfähigkeiten des Lochbildes 12 Q V 1 mit 12 Lochreihen bei Scherben-Wärmeleitfähigkeiten von $\lambda_{10, tr.} = 0,35$; $\lambda_{10, tr.} = 0,30$; $\lambda_{10, tr.} = 0,25$; $\lambda_{10, tr.} = 0,20$ und $\lambda_{10, tr.} = 0,15$ W/mK sowohl unbeschichtet ($\varepsilon = 0,93$), als auch mit Beschichtung (Annahme: $\varepsilon = 0,40$).....	125
Tabelle 27: Resultierende äquivalente Wärmeleitfähigkeiten des Lochbildes 12 Q V 4 mit 12 Lochreihen bei Variation der Scherben-Wärmeleitfähigkeiten $\lambda_{10, tr.} = 0,35$; $\lambda_{10, tr.} = 0,30$; $\lambda_{10, tr.} = 0,25$; $\lambda_{10, tr.} = 0,20$ und $\lambda_{10, tr.} = 0,15$ W/mK sowohl unbeschichtet ($\varepsilon = 0,93$), als auch mit Beschichtung (Annahme: $\varepsilon = 0,40$).....	125
Tabelle 28: Resultierende äquivalente Wärmeleitfähigkeiten des Lochbildes 10 Q V 3 mit 10 Lochreihen bei Scherben-Wärmeleitfähigkeiten $\lambda_{10, tr.} = 0,35$; $\lambda_{10, tr.} = 0,30$; $\lambda_{10, tr.} = 0,25$; $\lambda_{10, tr.} = 0,20$ und $\lambda_{10, tr.} = 0,15$ W/mK sowohl unbeschichtet ($\varepsilon = 0,93$), als auch mit Beschichtung (Annahme: $\varepsilon = 0,40$; $\varepsilon = 0,30$; $\varepsilon = 0,20$; $\varepsilon = 0,10$).....	126
Tabelle 29: Resultierende äquivalente Wärmeleitfähigkeiten des Lochbildes 10 Q V 5 mit 10 Lochreihen bei Scherben-Wärmeleitfähigkeiten von $\lambda_{10, tr.} = 0,35$; $\lambda_{10, tr.} = 0,30$; $\lambda_{10, tr.} = 0,25$; $\lambda_{10, tr.} = 0,20$ und $\lambda_{10, tr.} = 0,15$ W/mK sowohl unbeschichtet ($\varepsilon = 0,93$), als auch mit Beschichtung (Annahme: $\varepsilon = 0,40$; $\varepsilon = 0,30$; $\varepsilon = 0,20$; $\varepsilon = 0,10$).....	127
Tabelle 30: Übersicht der verwendeten Kupfer- und Kupfer-Zinkpigmente.....	160
Tabelle 31: Übersicht der verwendeten Glimmer.....	160
Tabelle 32: Übersicht der verwendeten Pigmente aus Aluminium.....	161
Tabelle 33: Übersicht der verwendeten Carbon-Nano-Tubes.....	161
Tabelle 34: Übersicht der verwendeten Perlglanzpigmente (Pigmente mit Schichtaufbau, Teil 1).....	162
Tabelle 35: Übersicht der verwendeten Perlglanzpigmente (Pigmente mit Schichtaufbau, Teil 2).....	163
Tabelle 36: Übersicht der verwendeten Perlglanzpigmente (Pigmente mit Schichtaufbau, Teil 3).....	164
Tabelle 37: Übersicht der Pigmente aus gemahlene Schwefelverbindungen.....	164
Tabelle 38: Übersicht der verwendeten anorganischen Pigmente/Erdfarben.....	165
Tabelle 39: Übersicht der verwendeten organischen Pigmente/Verbindungen.....	166
Tabelle 40: Übersicht der verwendeten Pigmente mit Spinell-Rutil-Struktur.....	166
Tabelle 41: Übersicht der verwendeten Graphite.....	167
Tabelle 42: Übersicht der verwendeten funktionellen Metalloxid-Glimmerpigmente.....	168
Tabelle 43: Übersicht der verwendeten sonstigen Metall- und Metalloxidpulver.....	168
Tabelle 44: Übersicht der verwendeten Lüster.....	168
Tabelle 45: Übersicht der verwendeten Glasuren.....	169
Tabelle 46: Einfluss der Infrarotabsorption ausgewählter Binder auf den Emissionskoeffizienten der Beschichtungen auf Ziegelsubstrat.....	170
Tabelle 47: Emissionskoeffizienten der Beschichtungen aus 1 Vol.-% Pigment „STANDARD Goldbronzepulver LACK 900 L Reichgold“ durchgeführt mit verschiedenen Bindern und Sprühbeschichtung auf jeweils	

Glas- und Ziegelsubstraten.....	171
Tabelle 48: gemessene Emissionskoeffizienten für Aluminiumpigmente und Aluminiumfolie auf Glasobjektträgern (Binder: Anlegemilch), Nullprobe auf Glassubstrat.....	172
Tabelle 49: Gemessene Emissionskoeffizienten für Kupfer – Goldbronzepigmente und Goldbronzefolie auf Glasobjektträgern (Binder: Anlegemilch); Nullprobe auf Glassubstrat.....	173
Tabelle 50: Emissionskoeffizient bei wiederholtem Schichtauftrag mittels Airbrush. Mischung aus 1 Vol.-% Wasserglas Betol 39 T und Pigment Goldbronze Luminor 2210.....	173
Tabelle 51: Gemessene Emissionskoeffizienten für Sputterbeschichtungen mit den Metallen Gold, Silber und Nickel jeweils auf Glas- und Ziegelsubstrat in Abhängigkeit der Sputter-Dauer.....	174
Tabelle 52: Gemessene Emissionskoeffizienten für Sputterbeschichtungen mit Titan und Kupfer bei Kombination beider Materialien und variabler Schichtdicke.....	174
Tabelle 53: Gemessene Emissionskoeffizienten für Ziegelsubstrate bei Sputterbeschichtungen mit Gold als Beschichtungsmaterial und Erhöhung der Sputterdauer von 180 Sekunden auf 1080 Sekunden.....	174
Tabelle 54: Emissionskoeffizient der oxidierend gebrannten Laborziegel (Mittelwerte aus jeweils drei Proben), Abhängigkeit des Emissionskoeffizienten von der Zusammensetzung und Brenntemperatur	174
Tabelle 55: Emissionskoeffizient der reduzierend gebrannten Laborziegel (Mittelwerte aus jeweils drei Proben) , Abhängigkeit des Emissionskoeffizienten von der Zusammensetzung und Brenntemperatur	175
Tabelle 56: Gemessene Emissionskoeffizienten für Erdfarben (Oxidpigmente) auf Glasobjektträgern (Binder: Anlegemilch); Nullprobe auf Glassubstrat.....	175
Tabelle 57: Gemessene Emissionskoeffizienten für Carbon-Nanotubes (leitfähige Kohlenstoffröhrechen) auf Glasobjektträgern (Binder: Anlegemilch); Nullprobe auf Glassubstrat.....	175
Tabelle 58: Gemessene Emissionskoeffizienten für Perlglanzpigmente (Pigmente mit Schichtaufbau) auf Glasobjektträgern (Binder: Anlegemilch); Nullprobe auf Glassubstrat.....	176
Tabelle 59: Gemessene Emissionskoeffizienten für Spinelle (elektrisch leitfähig) auf Glasobjektträgern (Binder: Anlegemilch); Nullprobe auf Glassubstrat.....	177
Tabelle 60: Gemessene Emissionskoeffizienten für Sulfosalze auf Glasobjektträgern (Binder: Anlegemilch); Nullprobe auf Glassubstrat	177
Tabelle 61: Gemessene Emissionskoeffizienten für Lüster auf Glasobjektträgern (Binder: Anlegemilch; Nullprobe auf Glassubstrat.....	177
Tabelle 62: gemessene Emissionskoeffizienten für Glasuren (Metallkomplex) auf Glasobjektträgern (Binder: Anlegemilch), Nullprobe auf Glassubstrat.....	178
Tabelle 63: Emissionskoeffizient, spezifischer Widerstand und spezifische elektrische Leitfähigkeit von metallischen Dünnschichten auf Glasobjektträgern.....	178
Tabelle 64: Emissionskoeffizient und spezifischer elektrischer Widerstand ausgewählter Pigmente auf Glasobjektträgern (Binder: Anlegemilch).....	179
Tabelle 65: Zusammenhang zwischen Emissionskoeffizient und spezifischer elektrischer Leitfähigkeit von Glassubstraten, welche jeweils 60, 120 und 180 Sekunden mit Gold, Silber und Nickel besputtert wurden	179
Tabelle 66: Spezifische Oberflächenwiderstände der in Abschnitt 2.2.2 untersuchten Graphitschichten; Vergleich der Oberflächenwiderstände in unpoliertem und poliertem Zustand.....	180
Tabelle 67: Für vollständige Bedeckung der Substrate notwendige Pigmentzugabe zum Binder verdünnter Holzleim (1 Teil Holzleim : 4 Teile dest. Wasser); ermittelt durch Wiegen der Beschichtungslösung nach vollständiger Bedeckung des Substrates, im Vergleich mit den Emissionskoeffizienten der beschichteten Ziegelsubstrate. Die Beschichtung erfolgte mittels Pinselauftrag der Mischung auf die Ziegelsubstrate	181
Tabelle 68: Oxidische Haupt-, Neben- und Spurengehalte in den zur Verfügung gestellten Ziegeln der Projektpartner (Teil I); Analyse von Schmelztabletten mittels Röntgenfluoreszenzanalyse	182
Tabelle 69: Messwerte der Rohdichte an einzelnen Stegen für Ziegel B.....	182
Tabelle 70: Oxidische Haupt-, Neben- und Spurengehalte in den zur Verfügung gestellten Ziegeln der Projektpartner (Teil II); Analyse von Schmelztabletten mittels Röntgenfluoreszenzanalyse	183
Tabelle 71: Scherben-Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{10, tr}$ der Längs- und Querstege von Ziegel C bei Messung von zusammengesetzten Probekörpern im Plattengerät TLP 200.....	183
Tabelle 72: Messwerte der Rohdichte an einzelnen Stegen für Ziegel D.....	184

Tabelle 73: Messwerte der Rohdichte an einzelnen Stegen für Ziegel A.....	184
Tabelle 74: Messwerte der Rohdichte an einzelnen Stegen für Ziegel E.....	184
Tabelle 75: Messwerte der Rohdichte an einzelnen Stegen für Ziegel F.....	185
Tabelle 76: Messergebnisse der äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten (Halbsteinmessungen) der von den Projektpartnern zur Verfügung gestellten Hochlochziegel (Teil I).....	186
Tabelle 77: Messergebnisse der äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten (Halbsteinmessungen) der von den Projektpartnern zur Verfügung gestellten Hochlochziegel (Teil II).....	187
Tabelle 78: E-Modul und Rohdichte des Ziegels B. Der E-Modul wurde mittels Ultraschallverfahren richtungsabhängig an entnommenen Quersteinen bestimmt.....	188
Tabelle 79: Messwerte elastischer Materialkennwerte der Ziegel A, B, D, E und F bestimmt mittels Impuls-Erregungs-Technologie durch Anregung von Biege- und Torsionsschwingungen	188
Tabelle 80: Messtechnisch ermittelte äquivalente Wärmeleitfähigkeiten der Modellziegel mit unterschiedlicher Ausrüstung	189
Tabelle 81: Vergleich Messung und Simulation der äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten $\lambda_{\text{äquiv.}}$ der Modellziegel bei Beschichtung und Verfüllung mit Dämmstoffen.....	190
Tabelle 82: Vergleich Messung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten $\lambda_{\text{äquiv.}}$ der Modellziegel ohne, mit Beschichtung und mit beschichteten Stecklingen	190
Tabelle 83: Ergebnisse für die Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{10,\text{tr.}}$ ausgewählter Dämmstoffe, gemessen als Schüttung oder Platte (Ergebnisse aus je drei Einzel-Messungen des Dämmmaterials).....	190
Tabelle 84: Experimentell ermittelte Wärmebilanzen der unbeschichteten Ziegel-Modelle bei 15 °C Probenmitteltemperatur (Messpunkt 1 bei 15 °C Probenmitteltemperatur im Einplattenmessgerät) ..	190
Tabelle 85: Experimentell ermittelte Wärmebilanzen der beschichteten Ziegel-Modelle bei 15 °C Probenmitteltemperatur (Messpunkt 1 bei 15 °C Probenmitteltemperatur im Einplattenmessgerät) ..	190
Tabelle 86: Experimentell ermittelte Wärmebilanzen der unbeschichteten Ziegel-Modelle bei 25 °C Probenmitteltemperatur (Messpunkt 1 bei 15 °C Probenmitteltemperatur im Einplattenmessgerät) ..	191
Tabelle 87: Experimentell ermittelte Wärmebilanzen der beschichteten Ziegel-Modelle bei 25 °C Probenmitteltemperatur (Messpunkt 1 bei 15 °C Probenmitteltemperatur im Einplattenmessgerät) ..	191
Tabelle 88: Experimentell ermittelte Wärmebilanzen der unbeschichteten Ziegel-Modelle bei 35 °C Probenmitteltemperatur (Messpunkt 1 bei 15 °C Probenmitteltemperatur im Einplattenmessgerät) ..	191
Tabelle 89: Experimentell ermittelte Wärmebilanzen der beschichteten Ziegel-Modelle bei 35 °C Probenmitteltemperatur (Messpunkt 1 bei 15 °C Probenmitteltemperatur im Einplattenmessgerät) ..	191
Tabelle 90: FE-Berechnung (ANSYS CFX) der äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten $\lambda_{\text{äquiv.}}$ von Modell 1 und Aufstellung einer Wärmebilanz mittels FE-Simulation: „II“ bedeutet ohne Wärmestrahlungsübergang, „III“ bedeutet ohne Wärmestrahlungs- und Konvektionsübergang, „IV“ bedeutet ausschließlich Leitung im Festkörper.....	191
Tabelle 91: FE-Berechnung (ANSYS CFX) der äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten $\lambda_{\text{äquiv.}}$ von Modell 2 und Aufstellung einer Wärmebilanz mittels FE-Simulation: „II“ bedeutet ohne Wärmestrahlungsübergang, „III“ bedeutet ohne Wärmestrahlungs- und Konvektionsübergang, „IV“ bedeutet ausschließlich Leitung im Festkörper.....	192
Tabelle 92: FE-Berechnung (ANSYS CFX) der äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten $\lambda_{\text{äquiv.}}$ von Modell 3 und Aufstellung einer Wärmebilanz mittels FE-Simulation: „II“ bedeutet ohne Wärmestrahlungsübergang, „III“ bedeutet ohne Wärmestrahlungs- und Konvektionsübergang, „IV“ bedeutet ausschließlich Leitung im Festkörper.....	192
Tabelle 93: FE-Berechnung (ANSYS CFX) der äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten $\lambda_{\text{äquiv.}}$ von Modell 4 und Aufstellung einer Wärmebilanz mittels FE-Simulation: „II“ bedeutet ohne Wärmestrahlungsübergang, „III“ bedeutet ohne Wärmestrahlungs- und Konvektionsübergang, „IV“ bedeutet ausschließlich Leitung im Festkörper.....	192
Tabelle 94: FE-Berechnung (SOLIDO) der äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten $\lambda_{\text{äquiv.}}$ von Modell 1 und Aufstellung einer Wärmebilanz mittels FE-Simulation: „II“ bedeutet ohne Wärmestrahlungsübergang, „III“ bedeutet ohne Wärmestrahlungs- und Konvektionsübergang, „IV“ bedeutet ausschließlich Leitung im Festkörper	193
Tabelle 95: FE-Berechnung (SOLIDO) der äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten $\lambda_{\text{äquiv.}}$ von Modell 2 und Aufstellung einer Wärmebilanz mittels FE-Simulation: „II“ bedeutet ohne Wärmestrahlungsübergang, „III“ bedeutet ohne Wärmestrahlungs- und Konvektionsübergang, „IV“ bedeutet ausschließlich Leitung im Festkörper	193

Tabelle 96: FE-Berechnung (SOLIDO) der äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten $\lambda_{\text{äquiv.}}$ von Modell 3 und Aufstellung einer Wärmebilanz mittels FE-Simulation: „II“ bedeutet ohne Wärmestrahlungsübergang, „III“ bedeutet ohne Wärmestrahlungs- und Konvektionsübergang, „IV“ bedeutet ausschließlich Leitung im Festkörper	193
Tabelle 97: FE-Berechnung (SOLIDO) der äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten $\lambda_{\text{äquiv.}}$ von Modell 4 und Aufstellung einer Wärmebilanz mittels FE-Simulation: „II“ bedeutet ohne Wärmestrahlungsübergang, „III“ bedeutet ohne Wärmestrahlungs- und Konvektionsübergang, „IV“ bedeutet ausschließlich Leitung im Festkörper	194
Tabelle 98: FE-Wärmebilanzen der unbeschichteten Modellziegel nach Berechnung mit der Software ANSYS CFX bei 15 °C Probenmitteltemperatur (analog zu Messpunkt 1 bei 15 °C Probenmitteltemperatur im Einplattenmessgerät)	194
Tabelle 99: FE-Wärmebilanzen der unbeschichteten Modellziegel nach Berechnung mit der Software SOLIDO bei 15 °C Probenmitteltemperatur (analog zu Messpunkt 1 bei 15 °C Probenmitteltemperatur im Einplattenmessgerät)	194
Tabelle 100: Minderung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{\text{äquiv.}}$ von Ziegel C nach Zulassung Z 17.1-906 bei schrittweiser Absenkung des Emissionskoeffizienten der keramischen Scherbenoberfläche um jeweils $\Delta\varepsilon = 0,1$ von $\varepsilon = 0,0$ bis $\varepsilon = 1,0$ bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{\text{Scherben}} = 0,25$ W/mK (Berechnung mit SOLIDO).....	194
Tabelle 101: Minderung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{\text{äquiv.}}$ von Ziegel C nach Zulassung Z 17.1-906 bei schrittweiser Absenkung des Emissionskoeffizienten der keramischen Scherbenoberfläche um jeweils $\Delta\varepsilon = 0,1$ von $\varepsilon = 0,0$ bis $\varepsilon = 1,0$ bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{\text{Scherben}} = 0,293$ W/mK (Berechnung mit SOLIDO).....	195
Tabelle 102: Finite Elemente Berechnung (SOLIDO) der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit des Ziegels C nach Zulassung Z 17.1-906. Vergleich der unverfüllten und unbeschichteten Nullprobe mit verfüllten bzw. beschichteten Proben (Verfüllung mit Neopor, Mineralwollegrenulat und Perlite)	195
Tabelle 103: Minderung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{\text{äquiv.}}$ von Ziegel D bei schrittweiser Absenkung des Emissionskoeffizienten der keramischen Scherbenoberfläche um jeweils $\Delta\varepsilon = 0,1$ von $\varepsilon = 0,0$ bis $\varepsilon = 1,0$ bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{\text{Scherben}} = 0,35$ W/mK (Berechnung mit SOLIDO)	195
Tabelle 104: Minderung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{\text{äquiv.}}$ von Ziegel D bei schrittweiser Absenkung des Emissionskoeffizienten der keramischen Scherbenoberfläche um jeweils $\Delta\varepsilon = 0,1$ von $\varepsilon = 0,0$ bis $\varepsilon = 1,0$ bei einer Scherbenwärmeleitfähigkeit von $\lambda_{\text{Scherben}} = 0,25$ W/mK (Berechnung mit SOLIDO)....	196
Tabelle 105: Finite Elemente Berechnung (SOLIDO) der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit des Ziegels D. Vergleich der unverfüllten und unbeschichteten Nullprobe mit verfüllten bzw. beschichteten Proben (Verfüllung mit Neopor, Mineralwollegrenulat und Perlite).....	196
Tabelle 106: Minderung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{\text{äquiv.}}$ von Ziegel F bei schrittweiser Absenkung des Emissionskoeffizienten der keramischen Scherbenoberfläche um jeweils $\Delta\varepsilon = 0,1$ von $\varepsilon = 0,0$ bis $\varepsilon = 1,0$ bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{\text{Scherben}} = 0,27$ W/mK (Berechnung mit SOLIDO)	196
Tabelle 107: Minderung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{\text{äquiv.}}$ von Ziegel F bei schrittweiser Absenkung des Emissionskoeffizienten der keramischen Scherbenoberfläche um jeweils $\Delta\varepsilon = 0,1$ von $\varepsilon = 0,0$ bis $\varepsilon = 1,0$ bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{\text{Scherben}} = 0,25$ W/mK (Berechnung mit SOLIDO)	197
Tabelle 108: Finite Elemente Berechnung (SOLIDO) der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit des Ziegels F. Vergleich der unverfüllten und unbeschichteten Nullprobe mit verfüllten bzw. beschichteten Proben (Verfüllung mit Neopor, Mineralwollegrenulat und Perlite).....	197
Tabelle 109: Minderung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{\text{äquiv.}}$ von Ziegel B bei schrittweiser Absenkung des Emissionskoeffizienten der keramischen Scherbenoberfläche um jeweils $\Delta\varepsilon = 0,1$ von $\varepsilon = 0,0$ bis $\varepsilon = 1,0$ bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{\text{Scherben}} = 0,332$ W/mK (Berechnung mit SOLIDO)	197
Tabelle 110: Minderung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{\text{äquiv.}}$ von Ziegel B bei schrittweiser Absenkung des Emissionskoeffizienten der keramischen Scherbenoberfläche um jeweils $\Delta\varepsilon = 0,1$ von $\varepsilon = 0,0$ bis $\varepsilon = 1,0$ bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{\text{Scherben}} = 0,25$ W/mK (Berechnung mit SOLIDO)	198
Tabelle 111: Finite Elemente Berechnung (SOLIDO) der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit des Ziegels B. Vergleich der unverfüllten und unbeschichteten Nullprobe mit verfüllten bzw. beschichteten Proben (Verfüllung mit Neopor, Mineralwollegrenulat und Perlite)	198
Tabelle 112: Minderung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{\text{äquiv.}}$ von Ziegel E bei schrittweiser Absenkung des Emissionskoeffizienten der keramischen Scherbenoberfläche um jeweils $\Delta\varepsilon = 0,1$ von $\varepsilon = 0,0$ bis $\varepsilon = 1,0$ bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{\text{Scherben}} = 0,332$ W/mK (Berechnung mit SOLIDO)	198
Tabelle 113: Minderung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{\text{äquiv.}}$ von Ziegel E bei schrittweiser Absenkung des Emissionskoeffizienten der keramischen Scherbenoberfläche um jeweils $\Delta\varepsilon = 0,1$ von $\varepsilon = 0,0$ bis $\varepsilon = 1,0$ bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{\text{Scherben}} = 0,25$ W/mK (Berechnung mit SOLIDO)	199

Tabelle 114: Finite Elemente Berechnung (SOLIDO) der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit des Ziegels E. Vergleich der unverfüllten und unbeschichteten Nullprobe mit verfüllten bzw. beschichteten Proben (Verfüllung mit Neopor, Mineralwollegrenulat und Perlite)	199
Tabelle 115: Minderung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{\text{äquival.}}$ von Ziegel A bei schrittweiser Absenkung des Emissionskoeffizienten der keramischen Scherbenoberfläche um jeweils $\Delta\varepsilon = 0,1$ von $\varepsilon = 0,0$ bis $\varepsilon = 1,0$ bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{\text{Scherben}} = 0,366 \text{ W/mK}$ (Berechnung mit SOLIDO)	199
Tabelle 116: Minderung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{\text{äquival.}}$ von Ziegel A bei schrittweiser Absenkung des Emissionskoeffizienten der keramischen Scherbenoberfläche um jeweils $\Delta\varepsilon = 0,1$ von $\varepsilon = 0,0$ bis $\varepsilon = 1,0$ bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{\text{Scherben}} = 0,25 \text{ W/mK}$ (Berechnung mit SOLIDO)	200
Tabelle 117: Finite Elemente Berechnung (SOLIDO) der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit des Ziegels A. Vergleich der unverfüllten und unbeschichteten mit verfüllten bzw. beschichteten Proben (Verfüllung mit Neopor, Mineralwollegrenulat und Perlite)	200
Tabelle 118: Minderung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{\text{äquival.}}$ von Ziegel G bei schrittweiser Absenkung des Emissionskoeffizienten der keramischen Scherbenoberfläche um jeweils $\Delta\varepsilon = 0,1$ von $\varepsilon = 0,0$ bis $\varepsilon = 1,0$ bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{\text{Scherben}} = 0,46 \text{ W/mK}$ (Berechnung mit SOLIDO)..	200
Tabelle 119: Minderung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{\text{äquival.}}$ von Ziegel G bei schrittweiser Absenkung des Emissionskoeffizienten der keramischen Scherbenoberfläche um jeweils $\Delta\varepsilon = 0,1$ von $\varepsilon = 0,0$ bis $\varepsilon = 1,0$ bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{\text{Scherben}} = 0,25 \text{ W/mK}$ (Berechnung mit SOLIDO)..	201
Tabelle 120: Finite Elemente Berechnung (SOLIDO) der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit des Ziegels G. Vergleich der unverfüllten und unbeschichteten Nullprobe mit verfüllten bzw. beschichteten Proben (Verfüllung mit Neopor, Mineralwollegrenulat und Perlite)	201
Tabelle 121: Äquivalente Wärmeleitfähigkeiten der Modellziegel mit 1 bis 20 Hohlräumen in Wärmestromrichtung bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10,\text{tr.}} = 0,35 \text{ W/mK}$	201
Tabelle 122: Äquivalente Wärmeleitfähigkeiten der Modellziegel mit 1 bis 20 Hohlräumen in Wärmestromrichtung bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10,\text{tr.}} = 0,30 \text{ W/mK}$	202
Tabelle 123: Äquivalente Wärmeleitfähigkeiten der Modellziegel mit 1 bis 20 Hohlräumen in Wärmestromrichtung bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10,\text{tr.}} = 0,25 \text{ W/mK}$	202
Tabelle 124: Äquivalente Wärmeleitfähigkeiten der Modellziegel mit 1 bis 20 Hohlräumen in Wärmestromrichtung bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10,\text{tr.}} = 0,20 \text{ W/mK}$	203
Tabelle 125: Äquivalente Wärmeleitfähigkeiten der Modellziegel mit 1 bis 20 Hohlräumen senkrecht zur Wärmestromrichtung bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10,\text{tr.}} = 0,35 \text{ W/mK}$	203
Tabelle 126: Äquivalente Wärmeleitfähigkeiten der Modellziegel mit 1 bis 20 Hohlräumen senkrecht zur Wärmestromrichtung bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10,\text{tr.}} = 0,30 \text{ W/mK}$	204
Tabelle 127: Äquivalente Wärmeleitfähigkeiten der Modellziegel mit 1 bis 20 Hohlräumen senkrecht zur Wärmestromrichtung bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10,\text{tr.}} = 0,25 \text{ W/mK}$	204
Tabelle 128: Äquivalente Wärmeleitfähigkeiten der Modellziegel mit 1 bis 20 Hohlräumen senkrecht zur Wärmestromrichtung bei einer Scherben-Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10,\text{tr.}} = 0,20 \text{ W/mK}$	205
Tabelle 129: Resultierende äquivalente Wärmeleitfähigkeiten des Lochbildes 12 Q V 1 mit 12 Lochreihen bei Scherben-Wärmeleitfähigkeiten von $\lambda_{10,\text{tr.}} = 0,35 \text{ W/mK}$, $\lambda_{10,\text{tr.}} = 0,30 \text{ W/mK}$, $\lambda_{10,\text{tr.}} = 0,25 \text{ W/mK}$, $\lambda_{10,\text{tr.}} = 0,20 \text{ W/mK}$ und $\lambda_{10,\text{tr.}} = 0,15 \text{ W/mK}$ sowohl unbeschichtet ($\varepsilon = 0,93$), als auch mit Beschichtung (Annahme $\varepsilon = 0,40$)	205
Tabelle 130: Resultierende äquivalente Wärmeleitfähigkeiten des Lochbildes 12 Q V 3 mit 12 Lochreihen bei Scherben-Wärmeleitfähigkeiten von $\lambda_{10,\text{tr.}} = 0,35 \text{ W/mK}$, $\lambda_{10,\text{tr.}} = 0,30 \text{ W/mK}$, $\lambda_{10,\text{tr.}} = 0,25 \text{ W/mK}$, $\lambda_{10,\text{tr.}} = 0,20 \text{ W/mK}$ und $\lambda_{10,\text{tr.}} = 0,15 \text{ W/mK}$ sowohl unbeschichtet ($\varepsilon = 0,93$), als auch mit Beschichtung (Annahme $\varepsilon = 0,40$)	205
Tabelle 131: Resultierende äquivalente Wärmeleitfähigkeiten des Lochbildes 12 Q V 4 mit 12 Lochreihen bei Scherben-Wärmeleitfähigkeiten von $\lambda_{10,\text{tr.}} = 0,35 \text{ W/mK}$, $\lambda_{10,\text{tr.}} = 0,30 \text{ W/mK}$, $\lambda_{10,\text{tr.}} = 0,25 \text{ W/mK}$, $\lambda_{10,\text{tr.}} = 0,20 \text{ W/mK}$ und $\lambda_{10,\text{tr.}} = 0,15 \text{ W/mK}$ sowohl unbeschichtet ($\varepsilon = 0,93$), als auch mit Beschichtung (Annahme $\varepsilon = 0,40$)	206
Tabelle 132: Resultierende äquivalente Wärmeleitfähigkeiten des Lochbildes 10 Q V 3 mit 12 Lochreihen bei Scherben-Wärmeleitfähigkeiten von $\lambda_{10,\text{tr.}} = 0,35 \text{ W/mK}$, $\lambda_{10,\text{tr.}} = 0,30 \text{ W/mK}$, $\lambda_{10,\text{tr.}} = 0,25 \text{ W/mK}$, $\lambda_{10,\text{tr.}} = 0,20 \text{ W/mK}$ und $\lambda_{10,\text{tr.}} = 0,15 \text{ W/mK}$ sowohl unbeschichtet ($\varepsilon = 0,93$), als auch mit Beschichtung (Annahme $\varepsilon = 0,40$)	206
Tabelle 133: Resultierende äquivalente Wärmeleitfähigkeiten des Lochbildes 10 Q V 5 mit 12 Lochreihen bei Scherben-Wärmeleitfähigkeiten von $\lambda_{10,\text{tr.}} = 0,35 \text{ W/mK}$, $\lambda_{10,\text{tr.}} = 0,30 \text{ W/mK}$, $\lambda_{10,\text{tr.}} = 0,25 \text{ W/mK}$, $\lambda_{10,\text{tr.}} = 0,20 \text{ W/mK}$ und $\lambda_{10,\text{tr.}} = 0,15 \text{ W/mK}$ sowohl unbeschichtet ($\varepsilon = 0,93$), als auch mit Beschichtung (Annahme $\varepsilon = 0,40$)	206

Tabelle 134: FE-Berechnung für das frequenzabhängige Schalldämmmaß des Ziegels C bei Wahl unterschiedlicher repräsentativer Volumenelemente als Grundlage für die Homogenisierung bzw. als einzelner Ziegel und Vergleich mit den im Schallprüfstand gemessenen Werten	208
Tabelle 135: FE-Berechnung des Einflusses der Querstege auf das Schalldämmmaß von Hochlochziegeln. Als Modelle dienen die Modelle aus den wärmetechnischen Berechnungen. Angenommen wurde ein E-Modul von 10 GPa für den Scherben, eine Poissonzahl von $\mu = 0,3$, eine Materialdämpfung von $\delta = 4$ % und ein Lochanteil von 60 %	208
Tabelle 136: FE-Berechnung des Einflusses der Querstege auf das Schalldämmmaß von Hochlochziegeln. Als Modelle dienen die Modelle aus den wärmetechnischen Berechnungen. Angenommen wurde ein E-Modul von 5 GPa für den Scherben, eine Poissonzahl von $\mu = 0,3$, eine Materialdämpfung von $\delta = 4$ % und ein Lochanteil von 60 %	209
Tabelle 137: FE-Berechnung des Einflusses der Längsstege auf das Schalldämmmaß von Hochlochziegeln. Als Modelle dienen die Modelle aus den wärmetechnischen Berechnungen. Angenommen wurde ein E-Modul von 10 GPa für den Scherben, eine Poissonzahl von $\mu = 0,3$, eine Materialdämpfung von $\delta = 4$ % und ein Lochanteil von 60 %	209
Tabelle 138: FE-Berechnung des Einflusses der Längsstege auf das Schalldämmmaß von Hochlochziegeln. Als Modelle dienen die Modelle aus den wärmetechnischen Berechnungen. Angenommen wurde ein E-Modul von 5 GPa für den Scherben, eine Poissonzahl von $\mu = 0,3$, eine Materialdämpfung von $\delta = 4$ % und ein Lochanteil von 60 %	210

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Georg-Simon-Ohm-Hochschule Nürnberg in der Fakultät Werkstofftechnik und wurde zwischen März 2009 und Mai 2013 durchgeführt.

Dem Projektleiter dieser Forschungsarbeit, Prof. Dr. Wolfgang Krcmar möchte ich für die Anregung dieses Themas und für die Möglichkeit zur selbstständigen Bearbeitung danken. Darüber hinaus danke ich ihm für seine Bereitschaft zur Durchsicht dieser Arbeit, für zahlreiche gute Ratschläge während der Durchführung der Promotion sowie für die hervorragende Ausbildung während des Studiums an der Georg-Simon-Ohm-Hochschule Nürnberg.

Herrn Prof. Dr. Dr. Pöllmann, Leiter des Fachbereichs Geowissenschaften an der Martin Luther Universität- Halle-Wittenberg, danke ich für die Betreuung und die Durchsicht der Arbeit.

Den Geschäftsführern des Zentrums für Werkstoffanalytik Lauf GmbH, Herrn Dr. Jürgen Göske und Dipl.-Ing. Werner Kachler sowie deren Mitarbeiter möchte ich für die Messmöglichkeiten an den Rasterelektronenmikroskopen danken.

Mein besonderer Dank gilt darüber hinaus dem Mitarbeiter des Rechenzentrums der Georg-Simon-Ohm-Hochschule Nürnberg, Herrn Bernhard Kronner, der jedes PC-Problem stets schnell und zu meiner vollsten Zufriedenheit gelöst hat.

Darüber hinaus möchte ich Herrn Dipl.-Ing (FH) Klaus Ullermann und Herrn Dipl.-Phys. Matthias Petermair für Ihre Unterstützung danken. Den Sekretärinnen Frau Geesen und Frau Hofmann möchte ich für die Unterstützung während der vergangenen Jahre danken. Zudem danke ich allen nicht namentlich erwähnten Personen für die Unterstützung bei der Durchführung dieser Arbeit.

Vor allem möchte ich meinen Eltern Maria-Anna Hintz und Wolfgang Hintz von Herzen danken, ohne deren fortwährende Unterstützung und Geduld diese Arbeit nicht zustande gekommen wäre. Leider konnte meine Mutter Maria-Anna das Ende dieser Arbeit nicht mehr erleben, obwohl gerade sie entscheidend zum Gelingen beigetragen hat. Weiterhin danke ich Maurice für seine große Geduld und Unterstützung besonders während der Fertigstellung dieser Arbeit.

Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Nürnberg, 30. Oktober 2013

Barbara Hintz

Lebenslauf

Persönliche Daten:

Name: Barbara Hintz
Geburtsdatum: 27.09.1985
Geburtsort: Erlangen
Familienstand: ledig

Schulbildung:

1992 - 1996: Volksschule Nürnberg, Zugspitzstraße (Grundschule)
1996 - 2005: Neues Gymnasium Nürnberg/ humanist. Ausrichtung
2003 – 2005: Kollegstufe: Leistungskurs Mathematik/Physik
2005: Allgemeine Hochschulreife

Hochschulstudium:

2005 - 2006: Friedrich Alexander Universität Erlangen
Fakultät Physik
2006 – 2009: Georg-Simon-Ohm-Hochschule
Fakultät Werkstofftechnik
Abschluss: Diplom-Ingenieur (FH)
2009 – 2013: Martin-Luther-Universität-Halle-Wittenberg
Promotionsstudium

Berufliche Tätigkeit:

2006 - 2009: Werkstudententätigkeit bei der Ceramix AG
2009 – 2013: Wissenschaftliche Mitarbeiterin
Georg-Simon-Ohm-Hochschule
Fakultät Werkstofftechnik
2009 – 2013: Weitere Tätigkeiten:
Bestimmung werkstofftechnischer Parameter
Wärmetechnische Simulationen und Messungen
Forschungsprojekte mit Industriepartnern
Seit 09/2013 CADFEM GmbH
Service, Benchmark und Seminare

Nürnberg, 30. Oktober 2013

Barbara Hintz