

Thomas Braun, Jörg Franke

# **Baustoff-integrierte Flächenheizung (BiFH)**

F 3177

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2019

ISBN 978-3-7388-0396-9

Vervielfältigung, auch auszugsweise,  
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail [irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)

[www.irb.fraunhofer.de/tauforschung](http://www.irb.fraunhofer.de/tauforschung)

# Abschlussbericht

## Baustoff-integrierte Flächenheizung (BiFH)

Projektlaufzeit: 01.07.2017 – 30.06.2019

Forschungsstelle:

**Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg**  
**Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik**  
**Prof. Dr.-Ing. J. Franke**

Autoren:

**Dipl.-Ing. Thomas Braun**  
**Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke**



### Projektpartner:

LUXHAUS, Georgensgmünd,  
Lehmorange®, Altstadt an der Waldnaab  
Knauf Gips KG, Iphofen  
Plasma Innovations GmbH, Regensburg

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert.

(Aktenzeichen: SWD-10.08.18.7-17.31)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>ELEKTRISCHE BAUSTOFF-INTEGRIERTE WANDFLÄCHENHEIZUNG FÜR EIN BEHAGLICHES WOHLFÜHLKLIMA IM RAUM .....</b>	<b>4</b>
1.1	Motivation zum Forschungsvorhaben .....	4
1.2	Anforderungen an Heizungssysteme .....	6
1.3	Ziele des Forschungsvorhabens.....	8
1.4	Umsetzung des Forschungsvorhabens.....	8
<b>2</b>	<b>DURCHGEFÜHRTE UNTERSUCHUNGEN UND ERGEBNISSE IM FORSCHUNGSPROJEKT</b>	<b>11</b>
2.1	AP 1: Erstellung eines Anforderungsprofils .....	12
2.2	AP 2: Materialauswahl und -charakterisierung .....	14
2.3	AP 3: Herstellung von einfachen Probekörpern .....	18
2.3.1	Versuche Plasmadust®-interner Pulverförderer .....	20
2.3.2	Versuche Plasmadust®-alternatives Pulverzuführ-System .....	22
2.3.3	Auswahl geeigneter Beschichtungslayouts .....	23
2.3.4	Aufstellung des Versuchsplanes mit internem Pulverzuführ-System .....	24
2.3.5	Aufstellung des Versuchsplanes mit alternativem Pulverzuführ-System .....	26
2.4	AP 4: Charakterisierung der generierten Strukturen .....	27
2.4.1	Qualitätsanalyse mittels optischer Untersuchung.....	27
2.4.2	Qualitätsuntersuchung der elektrischen Kennwerte .....	29
2.4.3	Qualitätsuntersuchung der geometrischen Eigenschaften .....	31
2.4.4	Qualitätsuntersuchung der Hafteigenschaften .....	34
2.4.5	Qualitätsuntersuchung der thermischen Eigenschaften .....	36
2.4.6	Untersuchung der Materialien mit PCM .....	39
2.5	AP 5: Charakterisierung der Eigenschaften des Verbundes nach Auftrag von Farbe, Lack, Tapete .....	41
2.6	AP 6: Zuverlässigkeitsuntersuchungen unter realen Bedingungen.....	43
2.6.1	Untersuchung der Heizstrukturen unter äußeren, zyklischen klimatischen Einflüssen.....	43
2.6.2	Untersuchung der Langzeitzuverlässigkeit bei zyklischer Aktivierung der Heizstrukturen.....	45
2.7	AP 7: Erstellung eines thermischen Simulationsmodells .....	47
2.7.1	Ermittlung der Parameter für die Simulation .....	47
2.7.2	Aufbau eines Simulationsmodells anhand von thermischen Untersuchungen	47
2.7.3	Validierung der Simulationsergebnisse mit den Messungen aus den praktischen Versuchen .....	49

2.7.4	Ermittlung der Leiterbahnabstände bei Variation der Oberflächentemperaturen.....	49
<b>2.8</b>	<b>AP 8: Entwicklung von Kontaktierungsmöglichkeiten .....</b>	<b>50</b>
2.8.1	Herstellung der Probenplatten .....	52
2.8.2	Ergebnisse der beschichteten Probenplatten ohne Verbindungsmedium ....	52
2.8.3	Verbindungsverfahren zur elektronischen Kontaktierung mit Verbindungsmedium .....	54
2.8.4	Elektrische Untersuchung der Verbindungs-Arten.....	60
2.8.5	Untersuchung und Vergleich der Langzeitzuverlässigkeit der elektrischen Verbindungs-Arten .....	60
2.8.6	Zusammenfassende Betrachtung und Auswahl einer Verbindungs-Art zur elektrischen Kontaktierung von Flächenheizsegmenten .....	61
<b>2.9</b>	<b>AP 9: Entwicklung einer geeigneten Ansteuerung und Regelung.....</b>	<b>62</b>
2.9.1	Berechnung der Heizflächengröße in Abhängigkeit der Energieeffizienzklasse des Gebäudes .....	62
2.9.2	Aktivierung der Flächenheizsegmente durch Personentracking .....	64
2.9.3	Intuitive Ansteuerung der Heizflächensegmente innerhalb einer Smart-Home- Umgebung .....	66
<b>2.10</b>	<b>AP 10: Aufbau eines Demonstrationsraums .....</b>	<b>68</b>
2.10.1	Anforderungen an den Demonstrationsraum.....	68
2.10.2	Umsetzung und Aufbau des Demonstrationsraumes.....	69
2.10.3	Berechnung des Heizbedarfes .....	70
2.10.4	Verbaute Komponenten .....	72
2.10.5	Installation der Komponenten im Demonstrationshaus.....	75
<b>2.11</b>	<b>AP 11: Untersuchung der Behaglichkeit im Demonstrationsraum.....</b>	<b>77</b>
2.11.1	Grundbegriffe zur thermischen Behaglichkeit .....	77
2.11.2	Messkomponenten für thermische Behaglichkeit - Klimamessgerät testo 480 78	
2.11.3	Behaglichkeitsmessung.....	79
2.11.4	Auswertung des Fragebogens zur Behaglichkeit .....	86
2.11.5	Energie- Leistungsmessung .....	89
<b>2.12</b>	<b>AP 12: Erstellen eines kinematischen Simulationsmodells zur Integration in bestehende Produktionsprozesse .....</b>	<b>91</b>
2.12.1	Festlegen eines Standard-Leiterbahnelementes.....	93
2.12.2	Entwicklung möglicher Heizsegmente .....	93
2.12.3	Abschätzung der Dauer der Leiterbahnbeschichtung und der elektrischen Leistung der Leiterbahnen .....	95
2.12.4	Beschreibung des Produktionsprozesses eines Fertighausherstellers.....	97
<b>3</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....</b>	<b>104</b>

**LITERATURVERZEICHNIS ..... 107**

# 1 Elektrische Baustoff-integrierte Wandflächenheizung für ein behagliches Wohlfühlklima im Raum

## 1.1 Motivation zum Forschungsvorhaben

Das Ziel der Bundesregierung im Hinblick auf die Energiewende ist die Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen bis zum Jahr 2050 um 80 - 95 % gegenüber 1990. Damit verbunden ist der Umstieg von heute dominierenden fossilen Energieträgern wie Erdöl, -gas sowie Kohle auf erneuerbare Energien. Ein großes Potential für die Umsetzung der Energiewende zeigen Haushalte, da sie mit ca. 26 % einen sehr großen Bedarf an Energie am deutschen Energiemarkt aufweisen. Innerhalb davon werden wiederum ca. 70 % der Energie für die Erwärmung von Wohnräumen benötigt, wie in Abbildung 1 grafisch dargestellt ist. Dieser hohe Wärmebedarf wird derzeit mit ca. 70 % durch Öl/Gasbrennwerttechnik sowie mit ca. 17 % Niedertemperaturtechnik erzeugt, während 8 % der Haushalte eine Wärmepumpe installiert haben und lediglich ca. 4 % Energie aus Biomasse nutzen. Dies bedeutet, dass ca. 87 % der in Deutschland verbauten Heizsysteme mit fossilen Brennstoffen betrieben werden und dies somit entgegen den Bestrebungen der Bundesregierung steht. [3–5]

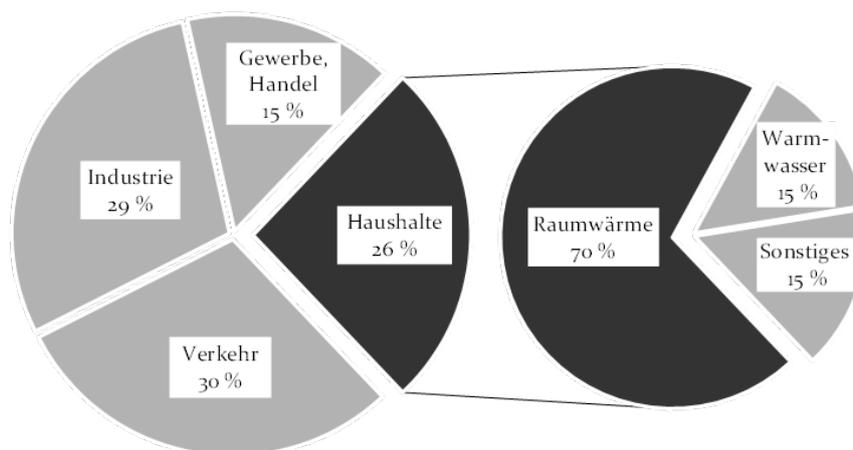


Abbildung 1: Endenergieverbrauch zur Erzeugung von Raumwärme in Deutschland im Vergleich [1; 2]

Zur Erreichung der energiepolitischen Ziele, was unter Beachtung des gesetzlichen Grundsatzes der wirtschaftlichen Vertretbarkeit einen nahezu klimaneutralen Gebäudebestand bis zum Jahr 2050 beinhaltet, hat die Bundesregierung u. a. die Energieeinsparverordnung (EnEV) 2002 ins Leben gerufen. In den vergangenen Jahren wurde diese mehrmalig überarbeitet und besitzt aktuell unter dem Begriff EnEV 2014 Gültigkeit. Die Verordnung gibt u. a. den für einen Neubau oder Sanierung nötigen Wärmedämmstandard eines Gebäudes vor. Durch die immer fortwährende Steigerung der energetischen Ansprüche an die Gebäudehülle, diese nahezu thermisch isolierend zu gestalten und damit die Transmissionswärmeverluste stetig zu senken, ändern sich

auch die Anforderungen an Beheizungssysteme zur ausreichenden Wärmeeinbringung in Räumen bzw. Gebäuden. Ist bei einer unzureichenden Dämmung eine Heizenergiemenge von über 250 kWh/m<sup>2</sup>a nötig, liegt der Wert mittlerweile bei einem Energiesparhaus (Energieeffizienzklasse A+) bei weniger als 30 kWh/m<sup>2</sup>a, bzw. bei einem Passivhaus unter 15 kWh/m<sup>2</sup>a. Diese Entwicklung zur Reduzierung des Endenergiebedarfs innerhalb der letzten Jahren ist in Abbildung 2 grafisch dargestellt. [1, 2]

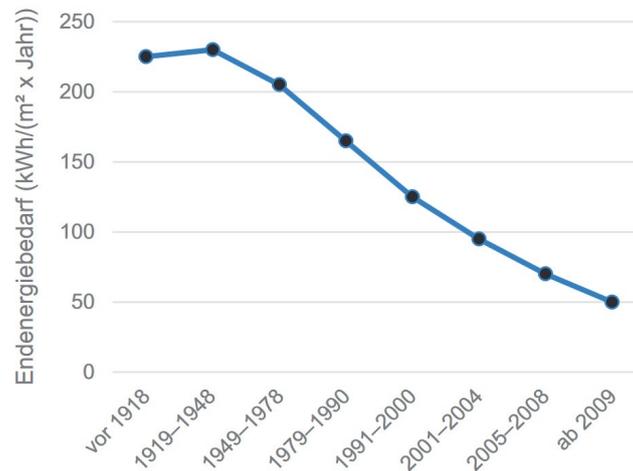


Abbildung 2: Energieverbrauch der Gebäude in Abhängigkeit vom Baualter ([6] Daten aus DENA (2016) dena-Gebäudereport 2016, Berlin)

Aufgrund des mittlerweile geringen Energiebedarfs zur Erwärmung von Räumen sind Zentralheizungen oftmals überdimensioniert und in der Anschaffung sowie häufig auch in der Wartung kostenintensiv. Dies beinhaltet auch die aufwendige Verrohrung von dem Zentralheizungssystem zu den jeweiligen Heizflächen. Einen Vorteil bieten daher dezentrale Heizungs-Systeme. Gibt es derzeit unterschiedliche Systeme (siehe Abbildung 3), bieten vor allem strombetriebene Geräte einen Vorteil, da keine Verbrennung stattfindet und somit ein flexibler Aufstellungsort, unabhängig von einem Schornstein etc., gewählt werden kann.

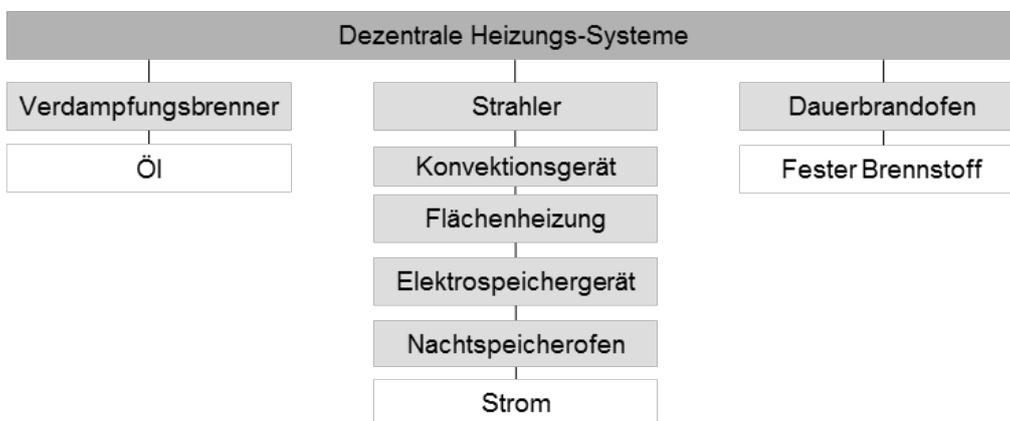


Abbildung 3: Systematisierung verschiedener dezentraler Heizungssysteme in Gebäuden (eigene Darstellung, in Anlehnung an [5, 7-9])

Mit dem Ziel zur weiteren Reduktion des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes für private Haushalte stellt die strombasierte Heizung bei steigenden zur Verfügung stehenden regenerativen Energien weiterhin eine ideale Alternative zu fossilen Brennstoffen dar. Laut einer Prognose des Fraunhofer Institutes für Solare Energiesysteme (ISE) werden die Stromerzeugungskosten aus regenerativen Energien bis zum Jahr 2035 deutlich sinken, was neben dem ökologischen auch den ökonomischen Ansatz zum Heizen mit Strom nochmals unterstützt und verstärkt. [10]

Sind dezentrale, strombetriebene Heizungssysteme als vielversprechende Wärmeeinbringungssysteme für die Zukunft identifiziert worden, wird anhand der folgenden Anforderungen eine geeignete Möglichkeit aufgezeigt, Wärme auf einer behaglichen Weise Personen in einem Raum in ausreichender Menge zur Verfügung zu stellen.

## 1.2 Anforderungen an Heizungssysteme

Die thermische Behaglichkeit ist einer der wichtigsten Begriffe in der Heizungs- und Klimatechnik, unter dem der Umgebungs- und Luftzustandsbereich zu verstehen ist, in dem sich ein Mensch am wohlsten fühlt. Dies wird im Behaglichkeitsprofil nach Bedford und Liese (siehe Abbildung 4) in der Darstellung des Zusammenhangs zwischen Raumluft- und Wandtemperatur anschaulich präsentiert [2]. Im Diagramm wird deutlich, dass z. B. eine Raumlufttemperatur von 20 °C ausreicht, um ein behagliches Klima zu erzeugen, sofern sich die Wandtemperatur zwischen 20 °C und 26 °C beläuft. Die kühle Luft wirkt somit angenehm und sorgt für eine deutliche Energieeinsparung, welche sich durch die weiterhin geringeren Lüftungsverluste vergrößern lässt. [3; 4; 5; 6]

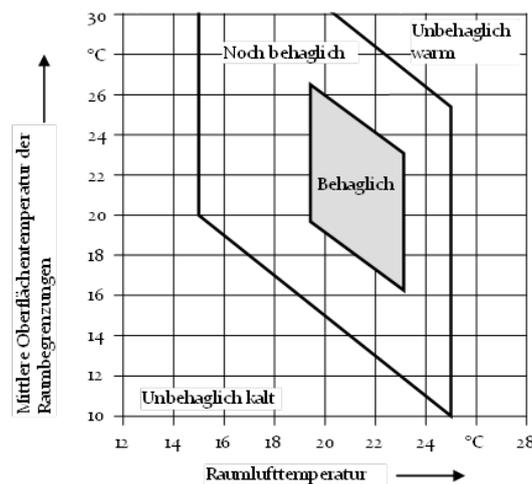


Abbildung 4: Zusammenhang des Behaglichkeitsfeldes zwischen Raumlufttemperatur und Umschließungsflächen [5]

Neben den genannten Kriterien der Raumluft- und Oberflächentemperatur der raumumschließenden Flächen, spielt auch die Strahlungstemperatursymmetrie eine wichtige Rolle für die Behaglichkeit. Viele Strahlungsheizungshersteller bieten kleine Heiz-

flächen mit relativ hohen Temperaturen (ca. 80 °C – 100 °C) an, welche durch die einseitig hohe Wärmeeinbringung im Raum als unangenehm empfunden werden können. [7]

Weiterhin ist bei der Lufttemperaturverteilung die vertikale Komponente für die gefühlte Temperatur von entscheidender Bedeutung. So gibt die Luftschichtung den Verlauf der Temperatur in Relation zur Raumhöhe über dem Boden an, was bei einem Unterschied von bereits einem Kelvin als unangenehm wahrgenommen werden kann. Mit einer niedrig temperierten Flächenheizung kann dieser Effekt durch die symmetrische Wärmeeinbringung weitestgehend vermieden werden, was aus Abbildung 5 hervorgeht. So gleicht das Raumluf-Temperaturprofil der Wandflächenheizung (8) am nächsten der idealen Kurve der Temperaturverteilung (1). [3; 4; 8]

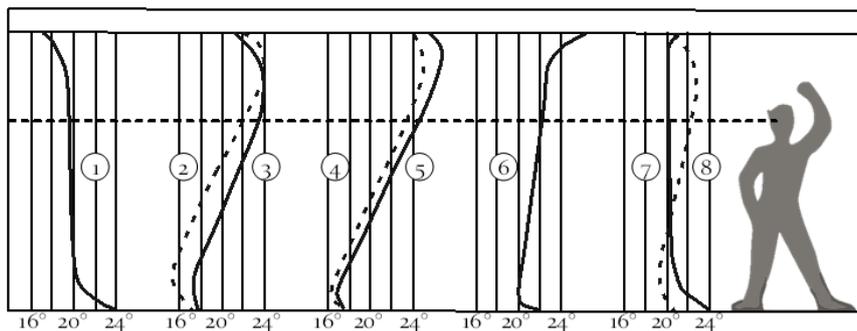


Abbildung 5: Raumluf-Temperaturprofile verschiedener Heizungsarten (Theoretisch ideale Temperatur-Verteilung (1), Radiatoren an Innenwand (2) an Außenwand (3), Einzelöfen an Innenwand (4), Luftheizung (5), Decken Strahlungsheizung (6), Fußbodenheizung (7), Wandheizung (8)) [3; 9]

Einen weiteren Vorteil der Flächenheizung zeigt Abbildung 6. Diese unterscheidet sich wesentlich in der Wirkungsweise der Wärmeeinbringung von herkömmlichen Heizkörpern. Wird bei Heizkörpern vorwiegend die Luft erwärmt und somit ein Luftstrom zwischen warmer und kalter Luft erzeugt (Luftschichten), so wird zusätzlich Staub aufgewirbelt, der sich vor allem bei Allergikern negativ auf die Gesundheit bzw. das Wohlbefinden auswirken kann. Bei Flächenheizungen erfolgt der Wärmeeintrag bei deutlich geringeren Temperaturen gleichmäßig im Raum und sorgt somit nachgewiesener Weise für eine angenehme Wohlfühlwärme. [3]

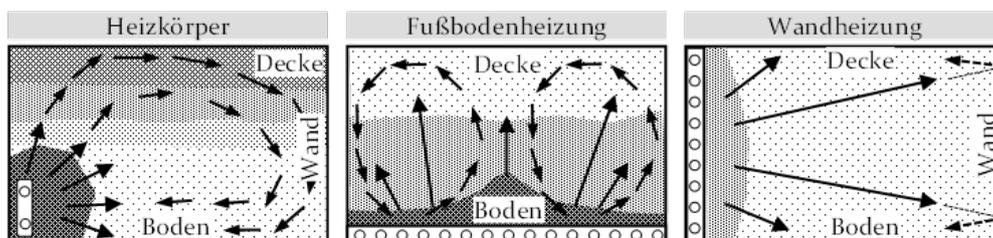


Abbildung 6: Ausbreitung von Konvektion und Strahlung verschiedener Heizungssystem-Arten [3]

### 1.3 Ziele des Forschungsvorhabens

Das Gesamtziel des geplanten Forschungsvorhabens war die Entwicklung eines flexiblen Heizungssystems, das die Nachteile bestehender Systeme eliminiert und die Vorteile bereits am Markt verfügbarer Heizungen weiter ausbauen soll. Wie anhand der Anforderungen deutlich wird, nähern sich Wandflächenheizsysteme aus physiologischer Sicht am nächsten der idealen Kurve des vertikalen Temperaturverlaufs. Gibt es derzeit am Markt wassergeführte Wandflächenheizsysteme, weisen diese einerseits eine relativ hohe Trägheit auf, bis die Wärme an die Oberfläche gelangt, andererseits haben diese Systeme einen hohen Ressourcenbedarf und sind im Fall eines Schadens nur aufwendig zu reparieren. Vorteile bieten elektrisch betriebene Wandflächenheizsysteme, welche eine schnelle Reaktionszeit aufweisen. Infrarot(IR)-Heizungen bieten diese Vorteile und werden in verschiedenen Varianten, als z. B. Fläche aus Stahlblech, Marmorplatte, Spiegel usw. angeboten. Weisen diese Flächenstrahler eine typische operative Temperatur von 80 °C – 100 °C innerhalb einer kleiner Fläche im Raum auf, entspricht dieses System nicht den zuvor genannten Anforderungen hinsichtlich der Strahlungstemperatursymmetrie. Eine weitere derzeit verfügbare Wandflächenheizungs-Variante bietet die elektrische Heizmatte, welche niedrigere Temperaturen aufweist und damit großflächig im Raum die Wärme einbringen kann. Hierbei handelt es sich jedoch um biegeschlaffe Bauteile in Form von Folien oder Drähten, deren Verarbeitung nur mit einem hohen wirtschaftlichen Aufwand reproduzierbar ist. Weisen die Folien eine gewisse Höhe auf, sind zusätzliche Deckschichten (z. B. Putz) für eine planare Oberfläche nötig. Dies stellt einerseits einen höheren Installationsaufwand dar und andererseits führt das zusätzlich aufgebrachte Material zu einem höheren Wärmedurchlasswiderstand, der das System wiederum thermisch träge agieren lässt. [11–13]

Die Lösung zur Umsetzung der Anforderungen ist daher eine direkt auf, bzw. in die Oberfläche des Baustoffes integrierte Wandflächenheizung mit minimalen Abmaßen. Somit entfällt die Installation weiterer Bauteile und damit Prozessschritte, während gleichzeitig eine schnelle Reaktion des Systems durch die Substitution der Deckschicht sowie eine hohe physiologische Behaglichkeit gewährleistet werden kann. Wird die Heizung mit Strom aus regenerativen Energien betrieben, trägt dies zeitgleich zur Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes und somit zur Nachhaltigkeit bei. Erfolgt die Fertigung der Baustoff-integrierten Wandflächenheizung weitgehend automatisiert, kann diese in bestehende Produktionsanlagen z. B. beim Baustoff- oder Fertighaushersteller integriert werden.

### 1.4 Umsetzung des Forschungsvorhabens

Das Forschungsvorhaben bestand darin, mit Hilfe eines kaltaktiven Atmosphärendruckplasmas und Metallpulver eine Heizstruktur additiv auf Oberflächen im wohnlichen Umfeld aufzutragen. Mit Hilfe der innovative Beschichtungs-Technologie wurde

untersucht, auf einer Vielzahl von Baustoffen eine elektrisch leitende Struktur additiv zu applizieren, um somit ein großes Heiz-Anwendungspotential im häuslichen Umfeld bieten zu können. Dafür sollte die elektrische Flächenheizung bereits in Gipskarton-, Lehm-, Holzplatten o. ä. integriert sein und die aufgedruckten Strukturen dabei als elektrische Widerstandsheizung dienen. Somit sollen im Neubau oder im Falle der Renovierung thermisch funktionalisierte Materialien verbaut werden können, was einen zusätzlichen Einbau eines Heizungssystems überflüssig macht. Dadurch sollen Bauprojekte schneller realisiert werden können, während zeitgleich zusätzlicher Platzbedarf für Zentralheizungen und ggf. Brennstofflager eingespart werden kann.

Die Untersuchungen des Forschungsprojektes beinhalteten eine elektrische, thermische und mechanische Charakterisierung des Flächenheizsystems unter definierten Umwelteinflüssen, um Aussagen über die Langzeitzuverlässigkeit treffen zu können. Eine intelligente Steuerung soll zudem nur die Heizsegmente aktivieren, die sich im Einflussbereich eines Menschen befinden, um weiterhin Energie einzusparen. Abbildung 7 zeigt additiv applizierte Heizstrukturen auf Wänden, welche gezielt selektiv aktiviert werden können. Die verwendete, automatisierte Technologie zum additiven Auftrag von Heizstrukturen wurde hinsichtlich einer möglichen Integration in bereits bestehende Produktionssysteme virtuell untersucht und analysiert.



Abbildung 7: Selektiv aktivierte Heizelemente erzeugen nur lokal Wärme, um Energie einzusparen

#### **Projektpartner:**

**Luxhaus GmbH & Co. KG** ist ein mittelständischer Fertighaushersteller mit Unternehmenssitz im mittelfränkischen Georgensgmünd. Im Fokus der Firma steht die Bauplanung und -ausführung von individuellen Einfamilienhäusern in Fertigbauweise. Innerhalb des Forschungsprojektes sorgten die Mitarbeiter des Unternehmens für den Aufbau eines Demonstrationsraumes, in welchem die plasmagefertigten Flächenheizsegmente hinsichtlich des praktischen Einsatzes bewertet wurden.

**Knauf Gips KG** zählt zu den führenden Herstellern von Baustoffen und Bausystemen und ist weltweit in 86 Ländern an über 220 Standorten mit Produktionsstätten und Vertriebsorganisationen vertreten. Die Knauf Werke produzieren Trockenbausysteme,

Putze und Zubehör, Wärmedämm-Verbundsysteme, Farben, Fließestriche etc. Im Projekt unterstützten Mitarbeiter der Firma in der Auswahl der geeignetsten Basismaterialien für Flächenheizsegmente und stellten diese zur Verarbeitung präpariert zur Verfügung. Weiterhin verfügt die Firma über ein Labor, welches zur Durchführung von mechanischen und optischen Tests der Flächenheizsegmente genutzt werden konnte.

**Lehmorenge®** ist ein Hersteller von Lehm- und Gipsbauplatten für den Trockenbau. Neben verschiedenen Basis-Lehm- und Gipsbauplatten mit variierenden Maßen, stellt das Unternehmen Lehm-Latentwärmespeicher mit Phase Change Materials (PCM) an. Dies ermöglicht eine natürliche Klimatisierung des Raumes ohne hohen Einsatz von Energie durch eine hohe Wärmespeicherkapazität des Materials. Die Firma beriet hinsichtlich der Auswahl des geeignetsten Materials und stellte speziell präpariertes Material zum Aufbringen von Heizstrukturen innerhalb des Forschungsprojektes zur Verfügung.

**Plasma Innovations GmbH** mit Sitz in Regensburg ist ein innovatives Forschungs-, Entwicklungs- und Fertigungsunternehmen im Bereich der Digitalen Direkt Metallisierung (DDM). Die Firma hat einen hohen Erfahrungsschatz im Bereich der Plasmabeschichtung und unterstützte innerhalb des Forschungsprojektes mit ihrer Expertise und Wissen im Bereich der additiven Metallstrukturierung.

**Ley Elektrotechnik GmbH** mit Hauptsitz in Schlüsselfeld ist ein Elektrotechnik-Unternehmen, welches die Planung, Durchführung, Wartung und Reparatur von Elektroinstallationen durchführt. Dabei hat sich die Firma auf maßgeschneiderte und zukunftsichere Installationen spezialisiert, welche sich den räumlichen und technischen Gegebenheiten anpasst. Im Forschungsprojekt brachte sich die Firma mit Beratungsleistungen hinsichtlich der elektrotechnischen Fragestellung mit ein und führte die Planung und Ausführung der Elektroinstallation im Demonstrationshaus aus.

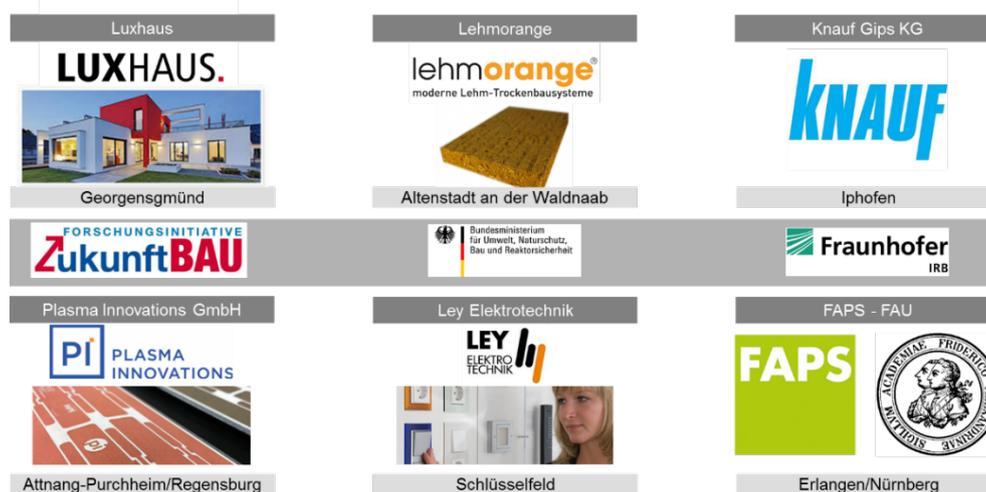


Abbildung 8: Die im Projekt aktiv mitwirkenden Partner

## 2 Durchgeführte Untersuchungen und Ergebnisse im Forschungsprojekt

Der Arbeitsplan unterteilte sich in mehrere Teilbereiche. Zunächst wurden Grundlagenversuche mit verschiedenen Substratmaterialien und Beschichtungspulvern bei einer Variation der Parameter an der Plasmaanlage durchgeführt. Die Auswertung erfolgte anhand elektrischer Widerstandsmessungen der Leiterbahnen sowie Aufnahmen mit der Wärmebildkamera, um die Zieltemperatur bei Anlegen eines definierten Stromes zu bekommen. Weiterhin wurden mittels eines Schertesters Haftprüfungen durchgeführt, um die Verbindung zwischen Grundsubstrat und Metallisierung untersuchen zu können. Ein Laserscanmikroskop half die Geometrie, bzw. den Querschnitt der erzeugten Bahnen zu vermessen. Mit Hilfe eines Temperaturwechseltests in einem entsprechenden Ofen, wurden Alterungsprozesse nachgestellt, so dass die Qualität der Heizstrukturen nach einem mehrjährigen Einsatz bezüglich ihrer spezifischen Eigenschaften untersucht werden konnten. Dabei wurden reale Bedingungen erzeugt, so dass die Bahnen teilweise mit Tapete, Farbe oder Lacken überzogen wurden.

Ebenso wichtig war die Layoutgestaltung der Heizwendel auf dem Grundsubstrat. Es wurden entsprechende Anordnungen ermittelt, so dass ein gleichmäßiges Aufheizen der Oberfläche gewährleistet werden konnte. Nachdem optimale Parameter für die individuellen Baustoffe gefunden wurden, wurden Beschichtungsversuche von großflächigeren Proben verwirklicht, welche ebenso bezüglich ihrer spezifischen Eigenschaften untersucht wurden.

Nachdem die Behaglichkeit eines Heizungssystems neben den Energiewerten die wichtigste Größe ist, wurde ein Raum mit einer symmetrischen Anordnung der Flächenheizung real aufgebaut. In einer eigens entwickelten Steuerung ist ebenfalls erforscht worden, welche Flächenheizungsmodule aktiv sein müssen, um ein Wohlbefinden erzeugen zu können. Zur Integration der Beschichtungsanlage in bestehende Systeme wurde exemplarisch die Fertigungslinie der Modulherstellung eines Fertighausherstellers nachgebildet und der Beschichtungsprozess virtuell integriert.

Innerhalb der zwei Jahre Bearbeitungszeit konnten alle im Arbeits- und Zeitplan (Tabelle 1) angegebenen Arbeitspakete (AP) ordnungsgemäß und erfolgreich durchgeführt werden. Alle Zielvorgaben und deren Umsetzung sowie die erzielten Forschungsergebnisse werden im Folgenden in den einzelnen Arbeitspaketen jeweils detailliert erläutert und diskutiert.

Tabelle 1: Übersicht der einzelnen Arbeitspakete (AP) innerhalb der Projektlaufzeit

AP	Arbeitspakete	Zeitraum Projektvorhaben BIFH																								
		Monat																								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
AP1	Erstellung eines Anforderungsprofils	■																								
AP2	Materialauswahl und -charakterisierung	■	■																							
AP3	Herstellung von einfachen Probekörpern		■	■	■	■																				
AP4	Charakterisierung der generierten Strukturen (Haftfestigkeit, Widerstand...)				■	■	■																			
AP5	Charakterisierung nach Auftrag von Farbe, Lack, Tapete							■	■																	
AP6	Zuverlässigkeitsuntersuchungen unter realen Bedingungen								■	■	■															
AP7	Erstellung eines thermischen Simulationsmodells									■	■	■	■													
AP8	Entwicklung von Kontaktierungsmöglichkeiten												■	■												
AP9	Entwicklung einer geeigneten Ansteuerung und Regelung															■	■									
AP10	Aufbau eines Demonstrationsraums																	■	■	■	■	■				
AP11	Untersuchen der Behaglichkeit und der Funktionsweise																						■	■	■	
AP12	Erstellen eines kinematischen Simulationsmodells zur Integration																					■	■	■	■	
AP13	Auswertung und Dokumentation																								■	■

## 2.1 AP 1: Erstellung eines Anforderungsprofils

Innerhalb von AP 1 wurden die Anforderungen hinsichtlich des Basiswerkstoffes und der Beschichtung für die Fertigung von Flächenheizsegmenten definiert. Da laut einer Studie von Roland Berger aus dem Jahr 2016 das Bauvolumen des Renovierungsmarkts mit ca. 115 Milliarden Euro nahezu zweieinhalbmal so groß ist wie das des Neubaumarkts, müssen die Grundwerkstoffe sowohl für den Neubau als auch vor allem für den Bestandsbau geeignet sein. Weiterhin darf der Grundwerkstoff aus den zwei folgenden Gesichtspunkten nicht brennbar sein. Während der Plasmabeschichtung wird der Grundwerkstoff kurzzeitig hohen Temperaturen ausgesetzt und darf daher nicht entflammbar sein. Um aus Brandschutzgründen das generelle Sicherheitsrisiko während des Betriebes des Flächenheizsegmentes zu minimieren, darf das verwendete Substratmaterial im Falle einer Beschädigung bzw. bei einem Entflammen der Heizstrukturen, nicht selbst brennbar sein.

Aus den Vorversuchen der additiven Plasmabeschichtung ging hervor, dass der Grundwerkstoff eine gewisse Oberflächenrauigkeit für eine permanente Anhaftung der Metallpartikel benötigt. Deshalb ist es wichtig, dass der Grundwerkstoff selbst eine ausreichende Rauheit besitzt oder durch entsprechende Nacharbeit (lackieren oder mechanische Nachbearbeitung) diese erzeugt werden kann.

Um einen zuverlässigen Gebrauch zu gewährleisten, sind weiterhin die Dauergebrauchseigenschaften unter Umwelteinflüssen des Werkstoffes entscheidend. Somit muss das Flächenheizsegment einerseits für eine hohe Luftfeuchtigkeit, für beispielsweise den Einsatz im Badezimmer oder Keller geeignet sein, andererseits darf der

Basiswerkstoff durch eine permanente Wärmebeibringung nicht durch Austrocknung geschädigt werden können.

Weiterhin ist bedeutend, dass die Werkstoffe auch ohne spezielle Werkzeuge leicht zu verarbeiten sind und ein geringes Eigengewicht aufweisen, damit diese ggf. auf der Baustelle leicht transportiert und gehandhabt werden können.

Um Energie in Form von Wärme über einen längeren Zeitraum direkt im Flächenheizsegment speichern zu können, ist eine Betrachtung von speziellen Materialien mit einer hohen Wärmespeicherkapazität z. B. durch eingearbeitete „Phase Change Materials“ (PCM), mit in die Untersuchungen einbezogen worden. Für eine wirtschaftliche Fertigung der Flächenheizsegmente ist ein angemessener Preis des Grundwerkstoffes ebenso von hoher Bedeutung.

Neben den Anforderungen an den Grundwerkstoff muss die Beschichtung für ein funktionierendes Heizsystem spezifische Eigenschaften aufweisen. Allen voran ist eine gute Haftung zwischen Grundsubstrat und metallischer Beschichtung von hoher Bedeutung. Zudem müssen die Schichten einen konstanten elektrischen Widerstand aufweisen, um im Betrieb für eine gleichmäßige Erwärmung sorgen zu können. Ebenso wurde für eine ausreichende Wärmeentwicklung ein entsprechend hoher Widerstand der elektrischen Leiterbahn angestrebt.

Sollen die Flächenheizsegmente in großen Stückzahlen gefertigt werden, ist auf eine wirtschaftliche Beschichtungs-Technologie zu achten, welche in bestehende Prozessketten integriert werden kann und leicht zu bedienen ist. Dies impliziert eine ausreichende Beschichtungsgeschwindigkeit, leichte Wartung sowie Handhabung. In Abbildung 9 sind alle Anforderungen bzgl. des Grundwerkstoffes und an die Beschichtung zusammengefasst dargestellt.

Anforderung an den Grundwerkstoff	Anforderung an die Beschichtung
<ul style="list-style-type: none"> <li>– Für Neubau/Sanierung geeignet</li> <li>– Nicht brennbar/entflammbar</li> <li>– Angepasste Oberflächenrauheit</li> <li>– Dauergebrauchseigenschaften unter Umwelteinflüssen (Luftfeuchtigkeit, Temperaturwechsel...)</li> <li>– Leichte Verarbeitbarkeit/Gewicht, für Baustellen geeignet</li> <li>– Evtl. mit Wärmespeicherung</li> <li>– Kostengünstig</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Gute Haftung zwischen Grundsubstrat und Beschichtungswerkstoff</li> <li>– Gleichmäßiger Auftrag → konstanter elektrischer Widerstand → gleichmäßige Erwärmung</li> <li>– Angepasster elektrischer Widerstand</li> <li>– Wirtschaftliche Beschichtung</li> <li>– Integration in bestehende Prozesse</li> <li>– Einfaches/schnelles Fertigungsverfahren</li> </ul>

Abbildung 9: Zusammenfassende Betrachtung der Anforderungen an den Grundwerkstoff bzw. an die Beschichtung zur Fertigung von Flächenheizsegmenten

## 2.2 AP 2: Materialauswahl und -charakterisierung

In AP 2 wurden Materialien entsprechend den Anforderungen aus AP 1 ausgewählt und ihre Eigenschaften charakterisiert. Abbildung 10 gibt einen Überblick über mögliche Grundwerkstoffe zum additiven Auftrag elektrisch leitender Strukturen für Flächenheizsegmente wieder.



Abbildung 10: Überblick der ausgewählte Basiswerkstoffe zum additiven Auftrag elektrisch leitender Strukturen für Flächenheizsegmente im häuslichen Umfeld

Das größte Potential für den Einsatz als Flächenheizung bietet Gipskarton, da dieser der häufigste verwendete Plattenwerkstoff im Innenausbau ist. Zudem ist er nicht brennbar und ist durch eine spezielle Herstellung gegen Aufquellen bei Feuchtebelastung resistent. Ebenso ist im Gegensatz zu Holzwerkstoffen nicht mit einem Schädigungsbefall zu rechnen. Verwendet wurden Gipskartonplatten (GK) des Typs „GKBI“ mit einem grünen bzw. „GKP“ mit einem grau ummantelten Karton mit einer Plattendicke von jeweils 12,5 mm und einer Wärmeleitfähigkeit von  $\lambda = 0,21 \text{ W/(m K)}$  nach DIN 18180 für Basis-Systeme im Trockenbau der Firma Knauf Gips KG. Weiterhin kam die qualitativ hochwertigere Gipskartonplatte mit blauer Kartonummantelung mit Herstellerbezeichnung „Diamant GKFI 12,5“ (Wärmeleitfähigkeit  $\lambda = 0,27 \text{ W/(m K)}$ ), welche als besonders robust ausgewiesen ist und eine höhere Festigkeit aufweist, für Forschungszwecke zum Einsatz. Um etwaige Unebenheiten der Oberfläche auszugleichen, erfolgte teilweise der Auftrag eines sogenannten Tiefengrunds bei der GK-Platte „Diamant GFKI 12,5“. Dieser besteht aus einer Materialbasis aus einer wässrigen Dispersion von Copolymeren und feinstteiligen Acrylsäureestern.

Gegenüber Gipskartonplatten besitzen Holzwerkstoffplatten eine deutlich höhere Festigkeit und werden daher häufig als Trockenunterböden eingesetzt. Weiterhin finden sie bei der Modulfertigung im Fertighausbau Anwendung. Da die Grobspanplatte (engl. Oriented Strand Board, „OSB-Platte“) eine sehr raue Oberfläche aufweist (siehe Untersuchungen zu Oberflächenrauigkeiten in Abbildung 14), erfolgte die Beschichtung einiger Platten mit einem handelsüblichen Klarklack, der Unebenheiten der Oberfläche ausgleichen sollte.

Großes Potential bieten ebenso Lehmbauplatten. Diese sorgen auf natürliche Weise durch eine hohe thermische Masse für ein gutes Raumklima durch Selbstregulierung der Feuchtigkeit und beugen somit Schimmelbildung vor. Der Werkstoff Lehm ist ebenso in Plattenbauweise verfügbar, aufgrund der hohen Oberflächenrauigkeit dieses Materials ist jedoch eine direkte additive Plasmabeschichtung nicht möglich, was aus den Voruntersuchungen hervorging. Für eine vergleichende Betrachtung wurden

Beschichtungsversuche mit alternativen bauspezifischen Materialien wie Laminat, Spiegel, Fliesen und Holz durchgeführt.

Großes Potential bieten Baustoffe mit integriertem Phase Change Materials (PCM). Dabei speichert das PCM die thermische Energie in großer Menge und gibt diese über einen längeren Zeitraum hinweg kontrolliert wieder ab. Dabei wird mikroverkapseltes Paraffinwachs in das Grundmaterial eingebracht, welche bei einer bestimmten Temperatur aufschmelzen und somit Energie aufnehmen, welche beim Abkühlen in Form von Wärme wieder abgegeben wird. Die Paraffinwachse sind in sehr kleine Kugeln aus Acrylglas eingeschlossen, welche einen Durchmesser von 2 – 20 µm aufweisen. Bei den verwendeten PCM-Lösungen handelt es sich um die PCM-Lehmbauplatte von der Firma Lehorange und eine Gipsbauplatte des Unternehmens Rigips mit Bezeichnung Alba Balance 25. [14–16]

Der Aufbau des Lehm-Latentwärmespeichers ist in Abbildung 11 dargestellt. Basis bildet eine Holzfaser-Trägerplatte auf der Papierwaben aufgebracht sind, in denen die Lehm-PCM-Mischung eingebracht wird. Den Abschluss des Baustoffes bildet eine Lehm Deckschicht. Der PCM-Gehalt beträgt 3 kg pro Quadratmeter, bei einem Flächengewicht von 15 kg/m<sup>2</sup>, was einer Rohdichte von 1.300 kg/m<sup>3</sup> entspricht. Beträgt die Raumtemperatur 23 °C, entziehen die PCM-Platten dem Raum die Hitze und speichern diese in Wärme. Ergänzende Eigenschaften sind dem Datenblatt [14] zu entnehmen. [14, 16]

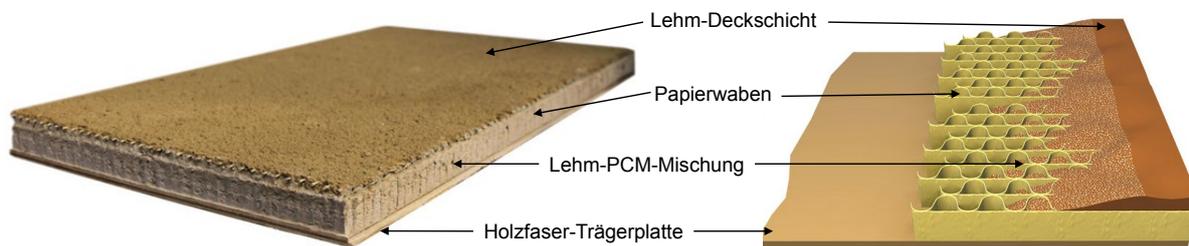


Abbildung 11: Aufbau der Lehmbauplatte mit integriertem PCM zur natürlich Raum-Wärme-Regulierung [14]

Die Firma Rigips bietet eine PCM-Vollgipsplatte mit Gips als Basismaterial an und ist ebenso mit Paraffinkügelchen versehen, wie die Mikroskop-Aufnahme in Abbildung 12 rechts zeigt. Der Schmelzpunkt des integrierten Materials liegt bei 25 °C, während das Flächengewicht bei ca. 25 kg/m<sup>2</sup> und damit die Rohdichte bei 1.000 kg/m<sup>3</sup> beträgt. Eine genaue Angabe über den Füllstoffanteil des PCMs bleibt seitens Hersteller aus. Alle weiteren Eigenschaften können dem Datenblatt [15] entnommen werden. [15, 16]

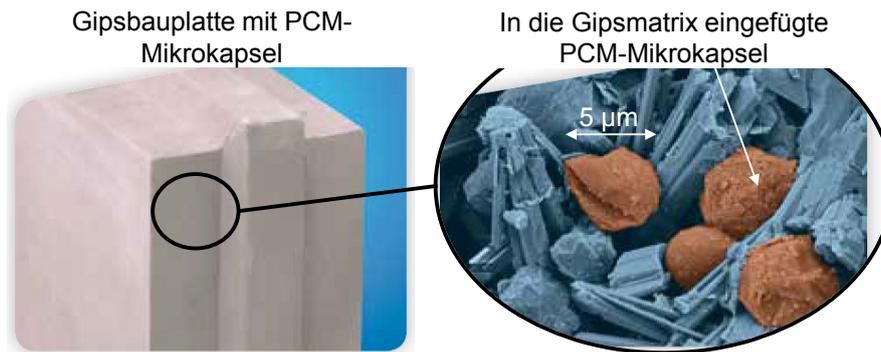


Abbildung 12: Die Mikroskop-Aufnahme zeigt das eingelagerte PCM-Material im Gipsverbund [15]

Für den Auftrag der elektrischen Heizstruktur wird bei der Lehm- oder Gipsbauplatte die Holzfaserverträgerplatte ausgewählt, da diese hinsichtlich der Oberflächenbeschaffenheit (gleichmäßige Rauheitswerte, geringere Rauheit im Gegensatz zur Lehmdeckschicht) mehr den Anforderungen für die additive Plasmabeschichtung entspricht. Bei dem Produkt der Firma Rigips ist keine Trägerplatte vorhanden, so dass das PCM gleichmäßig im sowie auf der Oberfläche im Gips verteilt ist. Eine bevorzugte Beschichtungsoberfläche ist somit nicht vorhanden.

Potentielle Materialien zum additiven Plasmaauftrag für thermisch aktivierbare Oberflächen	
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Gipskarton               <ul style="list-style-type: none"> <li>– Am häufigsten verwendete Plattenwerkstoff</li> <li>– Nicht brennbarer Kern</li> <li>– Geringes Aufquellen bei Feuchtbelastung</li> <li>– Ausbleibender Schädigungsbefall</li> </ul> </li> <li>■ Lehm- oder Gipsbauplatten               <ul style="list-style-type: none"> <li>– Sorgt für gutes Raumklima</li> <li>– Reguliert Feuchtigkeit → Schimmelbildung</li> <li>– Leichtbauweise, hohe Wärmespeicherkapazität</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Andere bauspezifische Materialien:               <ul style="list-style-type: none"> <li>– Laminat, Fliesen, Spiegel, Holz...</li> </ul> </li> <li>■ Baustoffe (Gips, Lehm) mit PCM               <ul style="list-style-type: none"> <li>– Hohe Wärmespeicherkapazität</li> <li>– Kontrollierte Wärmeaufnahme/-abgabe</li> </ul> </li> <li>■ Grundierungs-/Beschichtungswerkstoffe               <ul style="list-style-type: none"> <li>– Tiefengrund bei Gipskarton</li> <li>– Klarlack bei Holzbeschichtung</li> <li>– Tapete (Tapetenkleister), Farbe</li> </ul> </li> </ul>

Abbildung 13: Darstellung der Vorteile und Eigenschaften potentieller Materialien für den Plasmaauftrag zur Generierung einer Baustoff-integrierten Flächenheizung

Aufgrund der Abhängigkeit der Haftung von der Oberflächenrauigkeit, wie aus den Vorversuchen bekannt, wurden alle Werkstoffe dementsprechend mit einem Laserscan-Mikroskop vermessen. Abbildung 14 zeigt die Werte der gemessenen Oberflächenrauheiten der relevantesten Materialien. Haben Laminat und Spiegel einen eher geringen Wert, ist die gemessene Rauheit vor allem bei Holz und Fliese (Keramik) besonders hoch. Die Rauheitswerte ( $R_z$ ) von unbehandeltem (Holz U) und lackiertem Holz (Holz L) zeigen in der vergleichenden Darstellung, dass das Lackieren der Oberfläche, entgegengesetzt der Annahme, zu einer deutlichen Erhöhung der Oberflächenrauheit beiträgt. Die Oberflächenstrukturen der unterschiedlichen Gipskartonplatten zeigen annähernd gleiche Werte, so dass der Prozessschritt der Vorbehandlung obsolet ist.

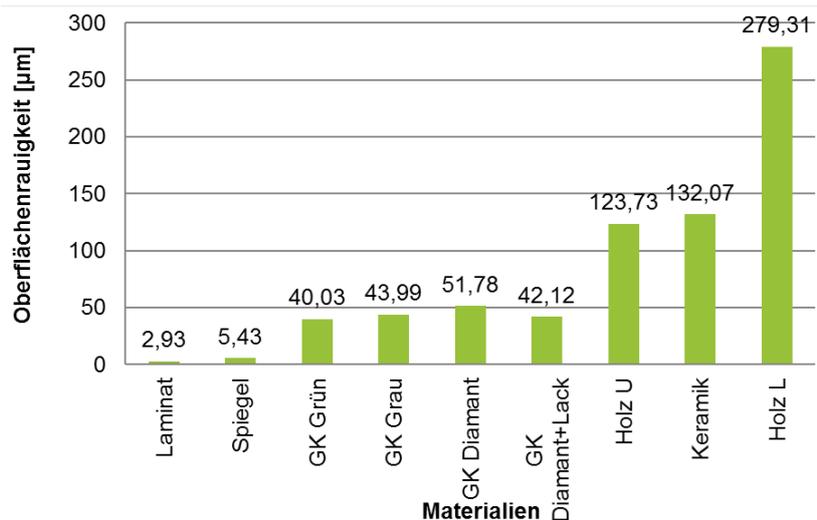
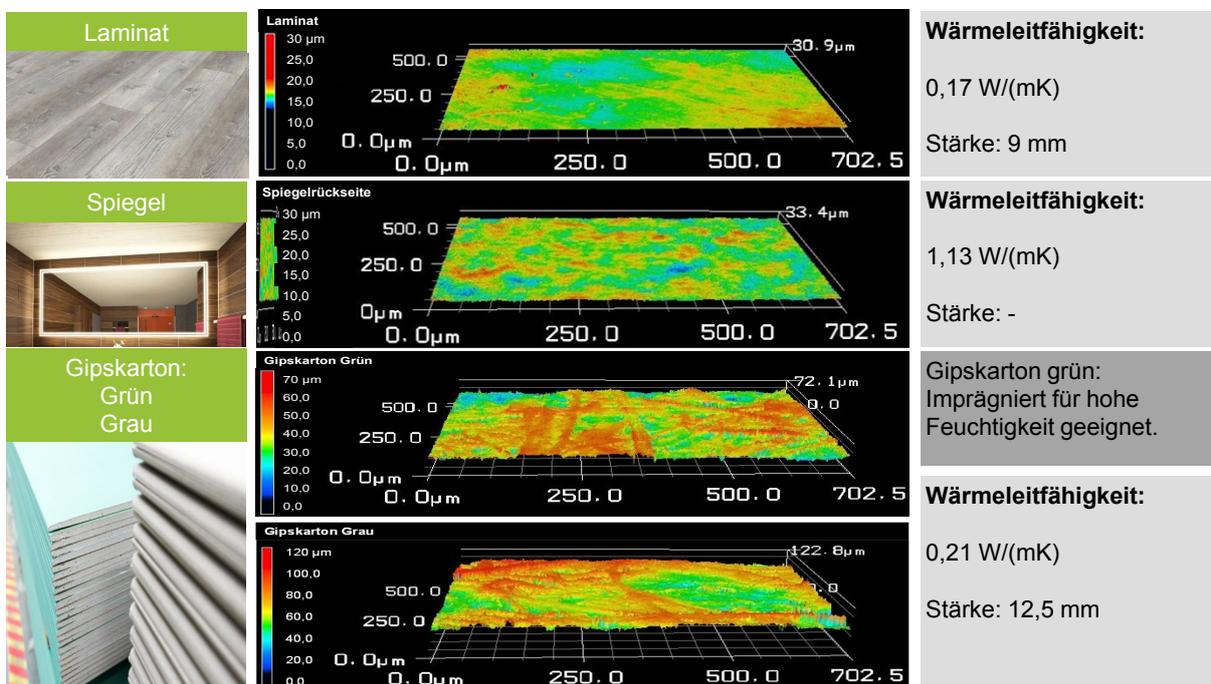


Abbildung 14: Vergleichende Darstellung der durchschnittlichen Oberflächenrauheit ausgewählter Werkstoffe für die Plasmabeschichtung

Eine detaillierte Betrachtung der Oberflächen gibt Abbildung 15 wieder. Die Grafiken zeigen die glatte Oberfläche des Laminats und der Rückseite des Spiegels (oben), während sich die Fasern der Gipskartonplatten deutlich erkennen lassen (Mitte). In Abbildung 15 unten links ist die Rückseite einer Fliese mit einem großen Relief dargestellt, während unten rechts die hohen Oberflächenrauheit der Holzoberfläche grafisch verdeutlicht wird.



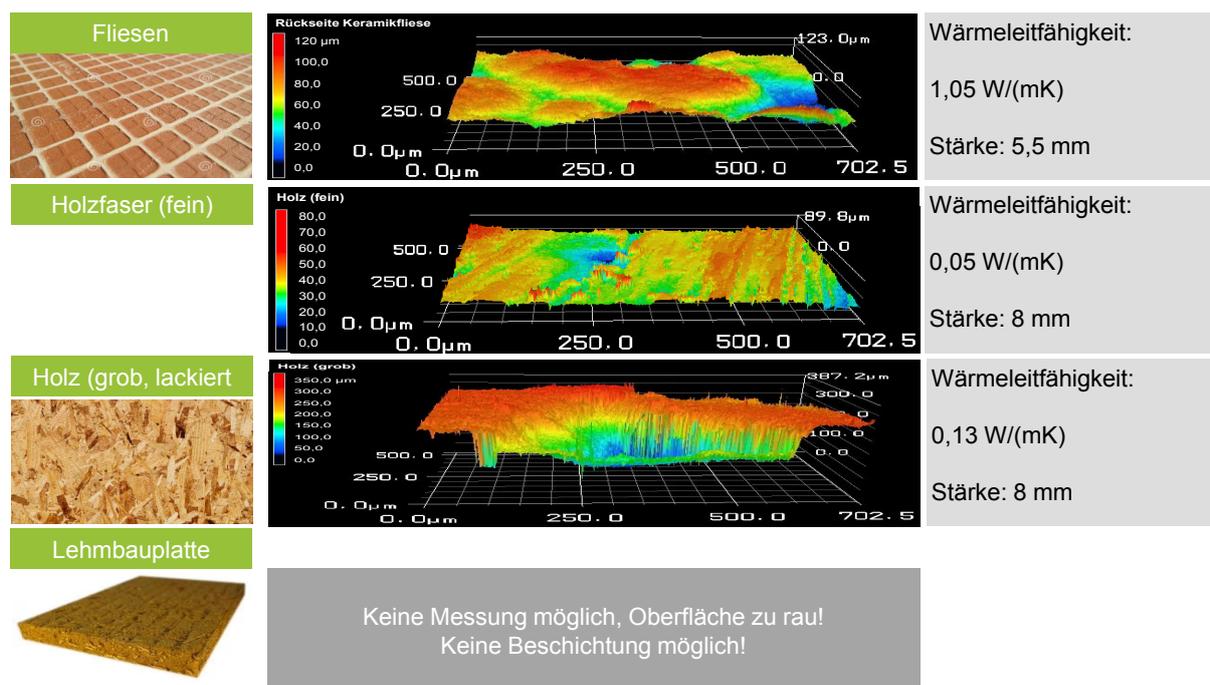


Abbildung 15: Mikroskopische Betrachtung der 3D-Oberflächen der Höhenprofile, der für die Plasmabeschichtung ausgewählten Werkstoffe (Laminat, Spiegel-Rückseite, Gipskarton grün/grau, Flies-Rückseite, Holzfaser fein, Holzfaser grob + lackiert, Lehmbauplatte)

Vor allem bei der Verwendung von Gipskartonplatten als Wandmaterial ist es üblich, diese aus optischen Gründen mit sogenannten Wanddekorationstoffen zu verkleiden. Hierzu fiel die Auswahl auf eine handelsübliche Struktur-Tapete der Fa. OBI, welche zu den Papierwandbekleidungen nach DIN EN 235 zählt. Zur Fixierung der Tapete an der Wandoberfläche wurde ein herkömmlich verfügbarer Tapetenkleber/-kleister der Fa. OBI mit Bezeichnung „Kraftkleister“ verwendet. Weiterhin kam nach DIN EN 13300 Wandfarbe als ein Beschichtungsstoff, mit schützenden, dekorativen und/oder anderen spezifischen Eigenschaften zum Einsatz. Verwendet wurde ein handelsübliches Produkt der Fa. OBI mit Bezeichnung „Arcticweiss“.

### 2.3 AP 3: Herstellung von einfachen Probekörpern

Die Beschichtung der verschiedenen Materialien erfolgte mit dem Plasmabeschichtungsverfahren „Plasmadust®“ der Firma Relyon-Plasma mit einer Leistung von 2 kW, wie Abbildung 16 zeigt. Die Pulverzufuhr erfolgte aus der Pulverbar über mechanische Vibrationsschwingungen, erzeugt durch einen Turbinenvibrator mittels Druckluft. Ferner wurde an die bestehende Anlage ein weiteres Pulverzuführsystem installiert, welches mittels Rührwerk und einer Präzisionsdosierscheibe das Pulver ebenso mittels inerten Gasstrom zuführt, was im weiteren Verlauf näher erläutert wird.

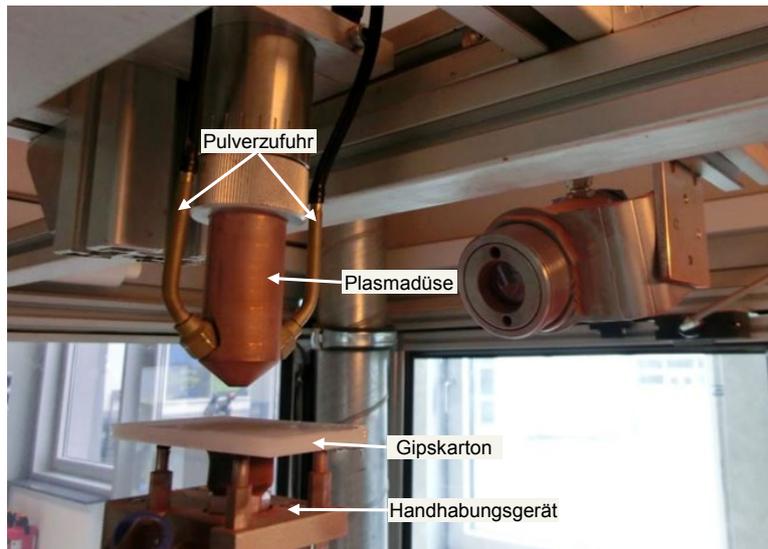


Abbildung 16: Darstellung des Aufbaus der Düse und der Handhabungsstation des Plasmabeschichtungsverfahrens „Plasmadust®“

Der Plasmabeschichtungsprozess hat eine Vielzahl an Parametern, die Einfluss auf die Qualität und die Eigenschaften der additiv applizierten Schicht ausüben. Eine detaillierte Aufzählung der Einflussfaktoren erfolgt nach der 5M-Methode: Mensch, Maschine, Material, Methode und Mitwelt, wie in Abbildung 17 dargestellt.

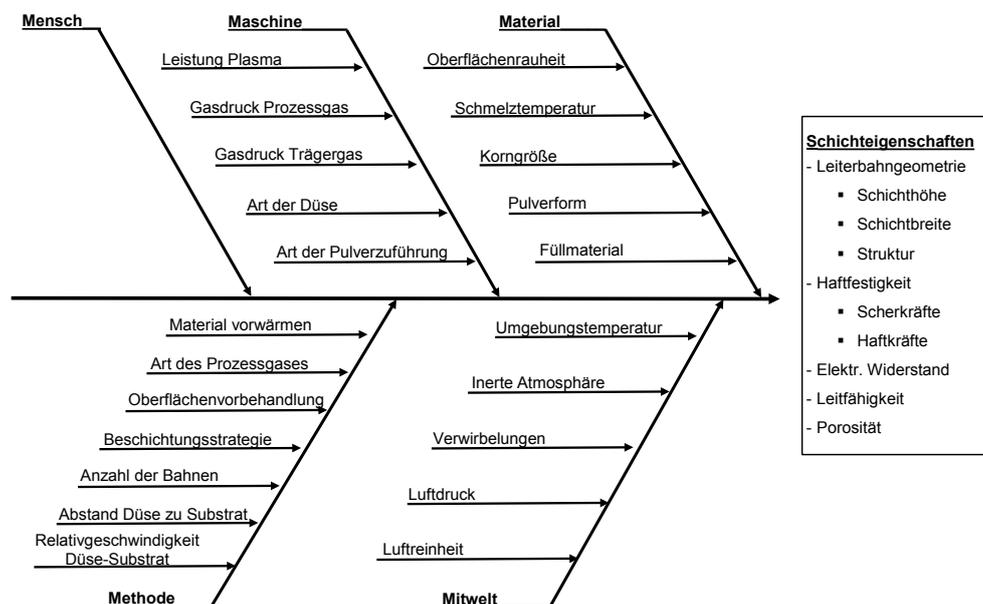


Abbildung 17: Vergleichende Darstellung der Einflussfaktoren auf die Schichteigenschaften des Plasmabeschichtungsprozesses nach der 5M-Methode

Um geeignete Beschichtungsparameter für die Heizstrukturen zu finden, wurden zunächst Probekörper mit einer Variation der Einflussgrößen hergestellt. Angestrebt werden Parameter mit einer möglichst homogenen Erwärmung beim Anlegen einer Spannung und einer daraus resultierenden gleichmäßigen Erwärmung.

### 2.3.1 Versuche Plasmadust®-interner Pulverförderer

Bei der Probenherstellung an der „Plasmadust®“-Prozesseinheit wurden drei Parameter für den Beschichtungsprozess verändert, da diese in den Vorversuchen den größten Einfluss auf das Beschichtungsergebnis ausübten. Zum einen wird der Abstand zwischen Substrat und Düse ( $a$ ) variiert, zum anderen werden die Vorschubgeschwindigkeit ( $V_v$ ) und die Anzahl der Überfahrten ( $n$ ) verändert, wie in Abbildung 18 dargestellt. Neben den variablen Parametern wurden auf Basis der Ergebnisse aus den Voruntersuchungen die Parameter Gasart (Stickstoff), Gasfluss (45 l/min), Pulverwerkstoff (Kupfer), Fördermenge (100 %), Förderdruck (1,2 bar) und Substrattemperatur (Raumtemperatur) konstant gehalten.

Parameter	Formelzeichen	Einheit	Einfluss auf Probekörper und Leiterbahn
Abstand zwischen Substrat und Düse	$a$	mm	Temperaturbelastung Substrat, Breite der aufgetragenen Leiterbahn
Vorschubgeschwindigkeit	$v_v$	mm/s	Schichtdicke, Temperaturbelastung Substrat
Anzahl der Überfahrten	$n$	-	Schichtdicke

Abbildung 18: Beschreibung der Prozessfaktoren des Versuchsplans für die additive Plasmabeschichtung

Ausgehend von der Parameterkonfiguration aus den Voruntersuchungen ( $a = 15$  mm,  $V_v = 60$  mm/s und  $n = 6$ ) wurden unterschiedliche Konfigurationen hinsichtlich ihrer Eignung zum Auftragen der Leiterbahnen getestet. Dazu wurden zwei Probekörper ( $150 \times 150$  mm<sup>2</sup>) mit acht verschiedenen Konfigurationen beschichtet. Pro Parameterkonfiguration wurden zwei Leiterbahnen aufgebracht, um etwaige Toleranzen beim Beschichtungsprozess oder der Basissubstratoberfläche zu berücksichtigen und somit eine verlässliche Aussage hinsichtlich der Qualität der Leiterbahn gewährleisten zu können. Die ausgewählten Parameterkonfigurationen für die beschichteten Bahnen sind in Abbildung 19 aufgeführt.

Bahn Nr.	Abstand $a$ [mm]	Vorschubgeschwindigkeit $V_v$ [mm/s]	Anzahl Überfahrten $n$
1 - 2	15	60	6
3 - 4	15	60	4
5 - 6	10	60	4
7 - 8	10	80	4
9 - 10	15	80	6
11 - 12	10	175	4
13 - 14	10	200	4
15 - 16	10	225	4

Abbildung 19: Parameterkonfigurationen für die Plasmabeschichtung der untersuchten Bahnen

Die Bahnen eins und zwei wurden mit den Ausgangsparametern aufgetragen. Bei den beiden folgenden Bahnen wurde die Anzahl der Überfahrten auf vier reduziert. Wie in Abbildung 20 links zu erkennen ist, sind die Bahnen eins und zwei im Vergleich zu den Bahnen drei und vier etwas dunkler, was auf die höhere Schichtdicke durch die zusätzlichen Überfahrten zurückgeführt werden kann. Im Hinblick auf die Breite der Leiterbahnen, in Abbildung 20 mit dem Buchstaben „b“ gekennzeichnet, besteht zwischen den Konfigurationen 1 – 2 und 3 - 4 nahezu kein Unterschied. Zudem weisen beide eine geschlossene homogene Oberfläche ohne Unterbrechungen auf. Für die Bahnen fünf und sechs wurden die Parameter  $V_v$  und  $n$  im Vergleich zu den Vorgängerbahnen beibehalten, der Abstand  $a$  jedoch auf 10 mm reduziert. Die entstandenen Leiterbahnen sind aufgrund des geringeren Abstandes schmaler und dunkler gefärbt, was auf eine höhere Temperaturbelastung schließen lässt. Bei den beiden folgenden Bahnen wurden die Vorschubgeschwindigkeit auf  $V_v = 80$  mm/s erhöht, wodurch die Verweilzeit des Substrats unterhalb der Düse und somit auch die Temperaturbelastung sinkt. Die Leiterbahnen dieses Parametersatzes sind verglichen mit den vorherigen Bahnen etwas heller.

Leiterbahn Nummer neun und zehn wurden mit der Parameterkombination  $a = 5$  mm,  $V_v = 80$  mm/s und  $n = 6$  aufgetragen. Resultierend aus der erhöhten Vorschubgeschwindigkeit im Vergleich zu den Einstellungen bei Bahn eins und zwei kann von einer geringeren Schichtdicke der Leiterbahn ausgegangen werden, zumal die hellere Färbung der Bahn auch darauf schließen lässt. Um die Temperaturbelastung bei den Bahnen 11 bis 16 bei einem Abstand von  $a = 10$  mm und vier Überfahrten zu reduzieren, wurden die Vorschubgeschwindigkeit von Bahn elf und zwölf von  $V_v = 175$  mm/s über  $V_v = 200$  mm/s (Bahn 13 und 14) auf  $V_v = 225$  mm/s bei Bahn 15 und 16 erhöht. Durch den verringerten Abstand ergaben sich dünnere Leiterbahnen, die jedoch auch aufgrund der hohen Vorschubgeschwindigkeit eine eher inhomogene Oberfläche aufweisen, wie in Abbildung 20 rechts zu erkennen ist und eignen sich daher nicht als Leiterbahnen für Heizstrukturen.

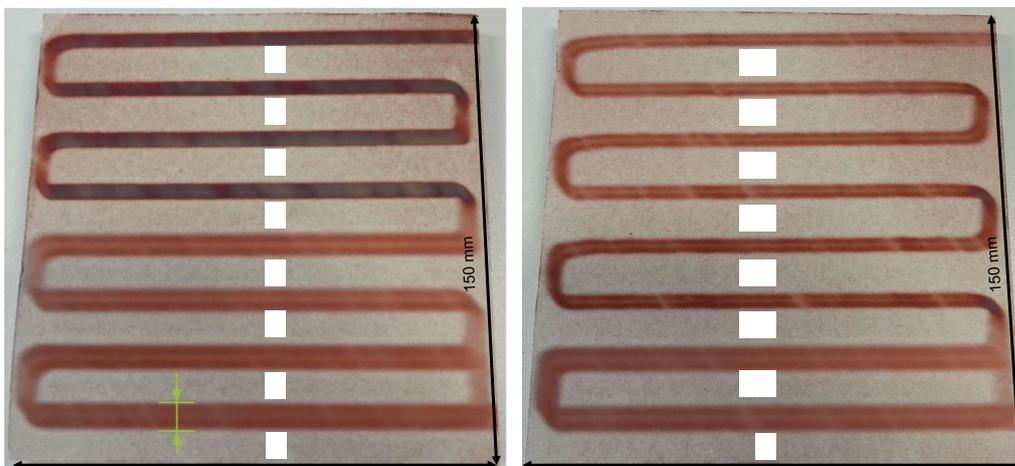


Abbildung 20: Vergleichende Betrachtung der Ergebnisse bei Variation der einflussreichsten Parameter bei der Plasmabeschichtung von Gipskartonplatten

Nach einer Sichtprüfung der Leiterbahnen wurden die Parameterkonfigurationen von Bahn eins und zwei ausgewählt, um diese in weiteren Versuchen auf ihre Eignung als Heizstruktur hin zu prüfen. Positiv an den Bahnen ist zu bewerten, dass die Oberfläche homogen ist und dass sie verglichen mit den anderen Bahnen breiter sind. Folglich ist die Fläche, die Wärmestrahlung emittiert, größer und die Abstrahlung gleichmäßiger, was sich positiv auf die Anwendung der Leiterbahnen als Heizstruktur auswirkt.

### 2.3.2 Versuche Plasmadust®-alternatives Pulverzuführ-System

Wie aus der Vorstellung der Ergebnisse aus der Qualitätsanalyse der plasmabeschichteten Strukturen innerhalb dieses Berichtes noch hervorgehen wird, weisen die Messungen des Aufheizverhaltens, wie in Abbildung 40 dargestellt, teilweise lokal sehr große Schwankungen auf. Ebenso kann dieses Phänomen in der hohen Standardabweichung bei der Messung der elektrischen Widerstände der Heizstrukturen, welche mit dem internen Pulverförderer gefertigt wurden, in Abbildung 27 beobachtet werden. Diese wiederum lassen sich auf einen variierenden elektrischen Widerstand zurückzuführen, welcher sich durch eine inhomogene Pulverzuführung erklären lässt.

Mittels Pulverdurchfluss-Messungen wurde die Kontinuität des Materialzuflusses in die Plasmabeschichtungsdüse gemessen. Dafür wurde eine Präzisionswaage unter der Plasmadüse platziert, auf der sich ein luftdurchlässiger Behälter befand. Somit wurde das aus der Düse austretende Pulver im Sekundentakt vermessen, während das Trägergas durch die Membran des Behälters entweichen konnte. Abbildung 21 zeigt im unteren Graphen starke Schwankungen des Pulverstroms, welcher für eine ungleichmäßige Beschichtung verantwortlich ist. Zurückzuführen ist dies einerseits auf das verwendete Pulver, das eine „Flakes“-artige Form aufweist und dadurch eine schlechtere Rieselfähigkeit aufweist.

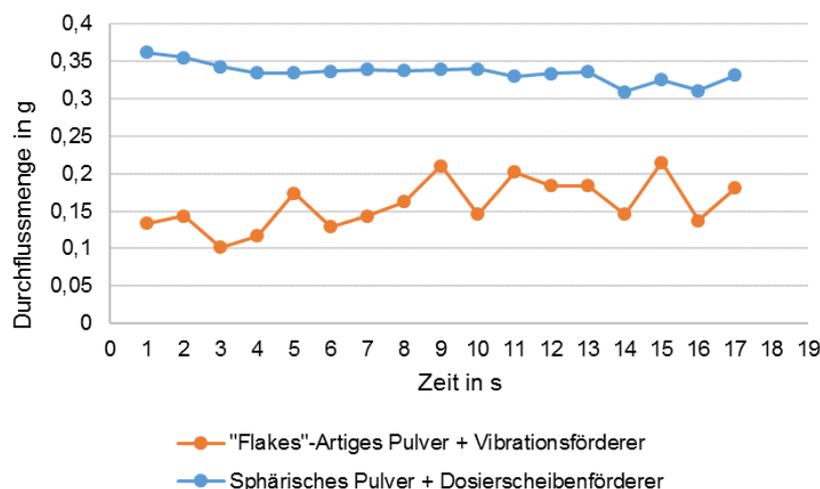


Abbildung 21: Pulverdurchfluss-Messungen bei Verwendung zweier unterschiedlicher Pulverzuführsysteme und –arten

Andererseits werden diese Schwankungen durch den Aufbau des Pulverförderers hervorgerufen. Dieser dosiert das Pulver mittels Vibrationsschwingungen, welcher eine Abhängigkeit vom jeweiligen Pulverfüllstand erkennen lässt, was die Analyse des elektrischen Widerstandes in Abhängigkeit des Füllstandes der Kupfer-Kartusche in Untersuchungen aus Abbildung 22 erkennen lässt. So ist eine deutliche Verringerung der Leitfähigkeit nach der Fertigstellung mehrerer Proben zu erkennen. Dies zeigt, dass für eine gleichmäßige Beschichtung ein konstanter Pulverdruck bzw. Füllstand vorhanden sein muss, der in dieser Form nicht gewährleistet werden konnte.

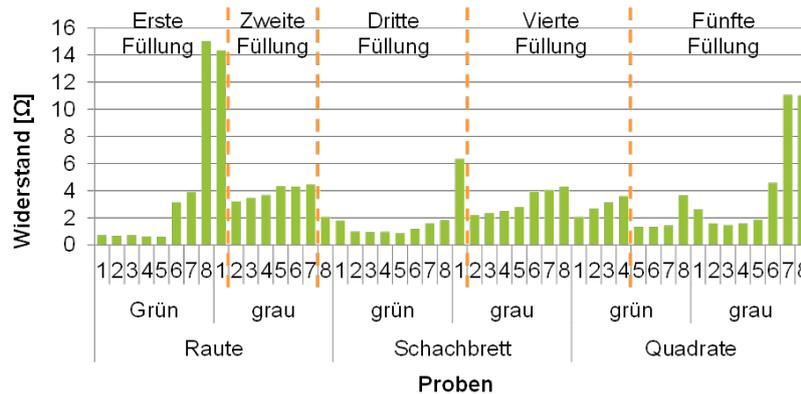


Abbildung 22: Die Widerstände der Proben sind vom Füllstand der Kupferkartusche abhängig

Als Lösung bot sich hierfür die Verwendung eines alternativen Pulverzuführsystems bei gleichzeitiger Benutzung eines rieselfähigeren Pulvers mit sphärischer Form an. Aus diesem Grund wurde ein alternatives Pulverzuführsystem, in Kombination mit einem dafür abgestimmten Pulver, für vergleichende Versuche herangezogen. Hat die Plasmabeschichtungsanlage einen internen Pulverförderer, welcher das Pulver durch induzierte Vibrationsschwingungen innerhalb eines inerten Gasstromes befördert, so rieselt bei dem alternativen Pulverzuführsystem das in einem Trichter gelagerte Pulver gleichmäßig in eine rotierende Nut (Dosierscheibe) bis zur Zuführöffnung, von der es das Trägergas mittels Zuführschläuche zur Plasmadüse transportiert und von beiden Seiten, wie in Abbildung 16 dargestellt, zugeführt wird.

Ebenso der Grafik in Abbildung 21 zu entnehmen ist die Pulverdurchfluss-Messung mit dem alternativen Setup (sphärisches Pulver, Dosierscheibenförderer), welches ein deutlich gleichmäßigeres Zuführverhalten aufweist und somit ein gleichmäßiges Aufheizverhalten verspricht.

### 2.3.3 Auswahl geeigneter Beschichtungslayouts

Nach der Auswahl des Parametersetups ist es wichtig ein geeignetes Beschichtungslayout zu definieren. Eine Schlangen-Struktur, wie in Abbildung 23 oben dargestellt, bietet den Vorteil, dass innerhalb des additiven Auftrags überall der gleiche elektrische Widerstand auftritt, da es nur eine Linie, ohne weitere Überkreuzungen der Struktur

gibt. Bei der Berücksichtigung möglicher Einsatz-Szenarien der Gipskartonplatten im Haus fällt jedoch auf, dass eine Schlangen-Struktur einen großen Nachteil aufweist. Da keinerlei Redundanz vorhanden ist, würde der komplette Stromkreis unterbrochen werden, sobald beispielsweise ein Loch in die Wand gebohrt wird, der auf eine Leiterbahn trifft. Um dies zu verhindern, wurden verschiedene Layouts entwickelt, die eine solche Redundanz aufweisen und somit die Ausfallwahrscheinlichkeit der Heizelemente senken. Dabei wurde darauf geachtet, dass die entworfenen Leiterbahn-Muster eine möglichst große Fläche des Basismaterials abdecken und somit deren Großteil erwärmen können. Weiterhin wurde darauf geachtet, dass für eine frei skalierbare Fläche, eine elektrische Verbindung zwischen mehreren Flächenheizsegmenten geschaffen werden konnte. Zur Veranschaulichung sind die verwendeten Leiterbahnlayouts (Rauten-, Schachbrett-, Quadrat-, Rippenstruktur) in Abbildung 23 dargestellt. Weiterhin zeigt die Abbildung die Funktionalität der Heizstrukturen, trotz Ausfall einzelner Teilstücke durch Unterbrechung der Leiterbahn.

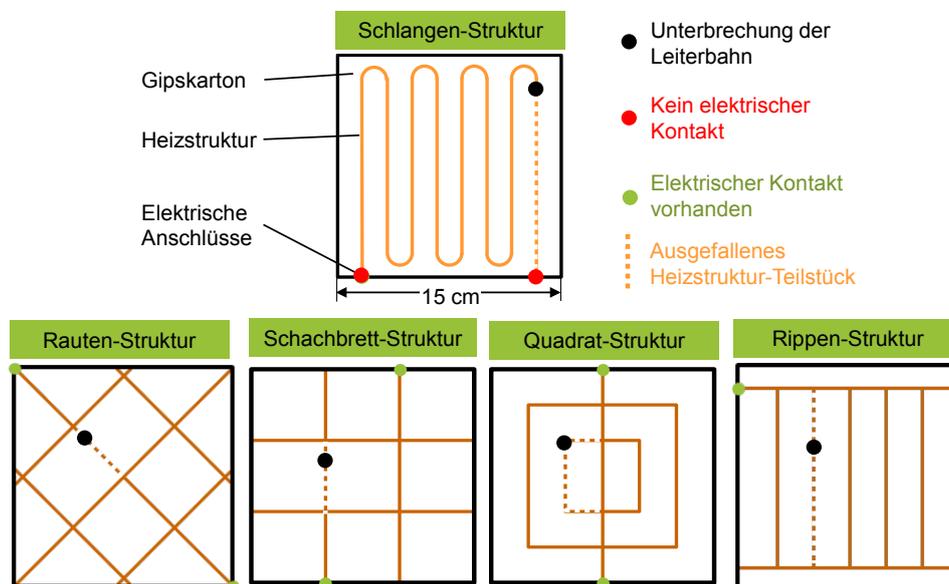


Abbildung 23: Schematische Darstellung der redundant abgesicherten Beschichtungs-Layouts für Flächenheizsegmente

### 2.3.4 Aufstellung des Versuchsplanes mit internem Pulverzuführ-System

Wurde Gipskarton im Vorhergehenden als vielversprechendster Basis-Bauwerkstoff für additiv applizierte Heizstrukturen für Flächenheizungen identifiziert und konnten ideale Beschichtungsparameter gefunden werden, wurden alle weiterführenden Versuche mit diesem Baustoff durchgeführt. Dabei wurden die Analysen sowohl auf der Gipskartonplatte „GKBI“ mit einem grünen bzw. „GKP“ mit einem grau ummantelten Karton durchgeführt. Insgesamt wurden 48 Proben mit einer Größe von 15 x 15 cm<sup>2</sup> erstellt. Tabelle 2 zeigt den Versuchsplan aller erzeugter Gipskartonproben mit internem Pulverförderer. Dabei erfolgte die Untergliederung neben der Gipskartonart

(„GKBI“=grün, „GKP“=grau), des Beschichtungslayouts (Rauten-, Schachbrett-, Quadratstruktur), der Deckschicht (Tapeziert, Gestrichen) und in der Art der weiteren qualitativen Untersuchungen, welche an späterer Stelle dieses Berichts beschrieben werden.

Tabelle 2: Tabellarische Darstellung des Versuchsplans aller plasmabeschichteten Gipskarton-Proben mit internem Pulverförderer

#	Probe	Gipskarton	Form	Behandlung	Untersuchung
1	GrüR1	grün	Raute	Tapeziert	Klimaschrank ohne Strom
2	GrüR2	grün	Raute	Tapeziert	Klimaschrank mit Strom
3	GrüR3	grün	Raute	Gestrichen	Klimaschrank ohne Strom
4	GrüR4	grün	Raute	Gestrichen	Klimaschrank mit Strom
5	GrüR5	grün	Raute	Keine Behandlung	Klimaschrank mit Strom
6	GrüR6	grün	Raute	Lackiert	Stromtragtest
7	GrüR7	grün	Raute	Keine Behandlung	Klimaschrank ohne Strom
8	GrüR8	grün	Raute	Keine Behandlung	Ersatz
9	GraR1	grau	Raute	Keine Behandlung	Ersatz
10	GraR2	grau	Raute	Lackiert	Stromtragtest
11	GraR3	grau	Raute	Keine Behandlung	Klimaschrank ohne Strom
12	GraR4	grau	Raute	Keine Behandlung	Klimaschrank mit Strom
13	GraR5	grau	Raute	Gestrichen	Klimaschrank mit Strom
14	GraR6	grau	Raute	Gestrichen	Klimaschrank ohne Strom
15	GraR7	grau	Raute	Tapeziert	Klimaschrank ohne Strom
16	GraR8	grau	Raute	Tapeziert	Klimaschrank mit Strom
17	GrüS1	grün	Schachbrett	Keine Behandlung	Ersatz
18	GrüS2	grün	Schachbrett	Lackiert	Stromtragtest
19	GrüS3	grün	Schachbrett	Keine Behandlung	Klimaschrank ohne Strom
20	GrüS4	grün	Schachbrett	Keine Behandlung	Klimaschrank mit Strom
21	GrüS5	grün	Schachbrett	Gestrichen	Klimaschrank mit Strom
22	GrüS6	grün	Schachbrett	Gestrichen	Klimaschrank ohne Strom
23	GrüS7	grün	Schachbrett	Tapeziert	Klimaschrank ohne Strom
24	GrüS8	grün	Schachbrett	Tapeziert	Klimaschrank mit Strom
25	GraS1	grau	Schachbrett	Keine Behandlung	Ersatz
26	GraS2	grau	Schachbrett	Lackiert	Stromtragtest
27	GraS3	grau	Schachbrett	Keine Behandlung	Klimaschrank mit Strom
28	GraS4	grau	Schachbrett	Keine Behandlung	Klimaschrank ohne Strom
29	GraS5	grau	Schachbrett	Gestrichen	Klimaschrank ohne Strom
30	GraS6	grau	Schachbrett	Gestrichen	Klimaschrank mit Strom
31	GraS7	grau	Schachbrett	Tapeziert	Klimaschrank ohne Strom
32	GraS8	grau	Schachbrett	Tapeziert	Klimaschrank mit Strom
33	GrüQ1	grün	Quadrat	Tapeziert	Klimaschrank ohne Strom
34	GrüQ2	grün	Quadrat	Tapeziert	Klimaschrank mit Strom
35	GrüQ3	grün	Quadrat	Gestrichen	Klimaschrank ohne Strom
36	GrüQ4	grün	Quadrat	Gestrichen	Klimaschrank mit Strom
37	GrüQ5	grün	Quadrat	Keine Behandlung	Klimaschrank ohne Strom
38	GrüQ6	grün	Quadrat	Lackiert	Stromtragtest
39	GrüQ7	grün	Quadrat	Keine Behandlung	Klimaschrank mit Strom
40	GrüQ8	grün	Quadrat	Keine Behandlung	Ersatz
41	GraQ1	grau	Quadrat	Tapeziert	Klimaschrank mit Strom
42	GraQ2	grau	Quadrat	Tapeziert	Klimaschrank ohne Strom

43	GraQ3	grau	Quadrate	Gestrichen	Klimaschrank mit Strom
44	GraQ4	grau	Quadrate	Gestrichen	Klimaschrank ohne Strom
45	GraQ5	grau	Quadrate	Lackiert	Stromtragtest
46	GraQ6	grau	Quadrate	Keine Behandlung	Klimaschrank ohne Strom
47	GraQ7	grau	Quadrate	Gestrichen	Ersatz
48	GraQ8	grau	Quadrate	Keine Behandlung	Klimaschrank mit Strom

Neben Gipskarton wurde auch eine prinzipiell mögliche Beschichtung der weiteren zuvor ausgewählten, im häuslichen Umfeld typischer Materialien, untersucht. Wie folgende Tabelle 3 zeigt, wurden die Rückseite des Spiegels, der Keramikfliese und des Laminats sowie OSB-Platten unbehandelt bzw. lackiert und Holzfasern mit einer feinen Oberflächenstruktur, mit einer plasmabasierten Schlangenlinien- bzw. Rippenstruktur versehen.

Tabelle 3: Darstellung des Versuchsplans zur metallischen Beschichtung mittels internem Pulverförderer alternativer Basismaterialien für Flächenheizungen mit unterschiedlichem Beschichtungslayouts

#	Material	Beschichtungslayout
49	Rückseite Spiegel	Schlangenlinien-Struktur
50	Rückseite Spiegel	Rippen-Struktur
51	Rückseite Keramikfliese	Schlangenlinien
52	Rückseite Keramikfliese	Rippen-Struktur
53	Rückseite Laminat	Schlangenlinien
54	Rückseite Laminat	Rippen-Struktur
55	Holz grob, unbehandelt	Rauten-Struktur
56	Holz grob, lackiert	Rippen-Struktur
57	Holz fein	Rippen-Struktur

### 2.3.5 Aufstellung des Versuchsplanes mit alternativem Pulverzuführ-System

Vor allem für die Herstellung von Proben mit einem größeren Ausmaß, welche zusätzlich für die praktischen Untersuchungen in einem Demonstrationsraum untereinander elektrisch verbunden werden müssen, ist eine hohe Reproduzierbarkeit der Heizstrukturen unabdingbar. Tabelle 4 beinhaltet den Versuchsplan zur additiven Beschichtung von großflächigeren Proben mit den Maßen 40 x 50 cm<sup>2</sup> (maximal in der Anlage bearbeitbare Probengröße) mit dem zuvor vorgestellten alternativen Pulverzuführsystem. Als Basismaterial für die Flächenheizsegmente diente der hochwertige Gipskarton mit der Bezeichnung „Diamant GKFI 12,5“, welche eine blaue Kartonummantelung aufweist und sich durch eine besondere Robustheit und höhere Festigkeit von zuvor getesteten Gipskarton-Arten unterscheidet. Die Wahl auf das höherwertige Produkt fiel einerseits darauf zurück, dass möglichst viele unterschiedliche Gipskartonarten getestet werden sollten und weiterhin, dass für den Aufbau des Demonstrationsraumes ein möglichst stabiles Material verwendet werden sollte, das den Belastungen während der Installation der Komponenten standhält.

Aus fertigungstechnischen Gründen mit der zur Verfügung stehenden Größe der Plasmabeschichtungs-Anlagentechnik können nur Flächenheizsegmente mit einer maxi-

malen Größe von 40 x 50 cm<sup>2</sup> realisiert werden. Deshalb wurde als Beschichtungslayout die Schlangen-Struktur (siehe Abbildung 24) gewählt, da es zur Realisierung einer größeren Heizflächenwand nötig ist mehrere Heizsegmente miteinander zu verbinden. Müssen bei Verwendung der Schlangenstruktur je Segment nur zwei elektrische Verbindungstellen realisieren werden wie Abbildung 83 zeigt, konnte der Herstellungsaufwand damit reduziert werden.

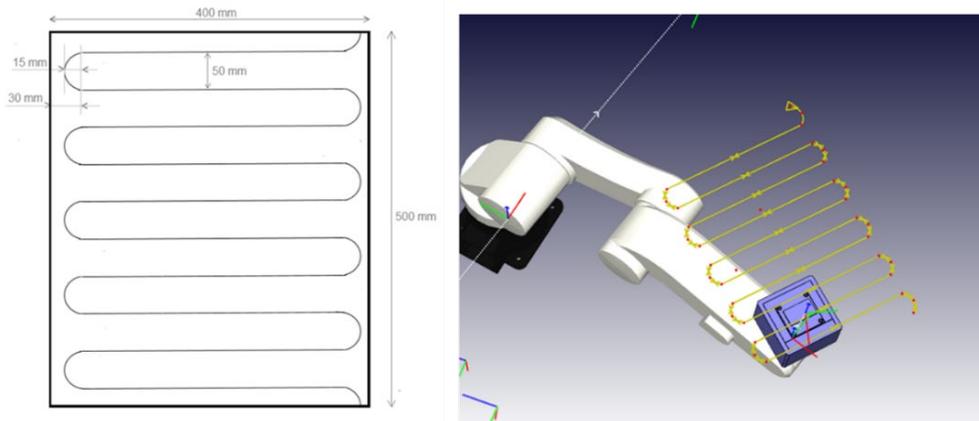


Abbildung 24: Darstellung des Leiterbahnlayouts zur Beschichtung der 40 x 50 cm<sup>2</sup> großen Gipskartonproben „Diamant GKFI 12,5“ (links) und zugehöriges Roboterbahnplan-Programm für die Beschichtung (rechts)

Weiterhin wurden Proben aus Gips und Lehm mit integriertem PCM als Basismaterialien für Flächenheizsegmente mit dem alternativen Pulverzuführsystem mit Heizstrukturen versehen. Für eine mögliche vergleichende Betrachtung wurde ebenso das Schlangenstruktur-Layout gewählt (siehe Tabelle 4).

Tabelle 4: Darstellung des Versuchsplans mit alternativem Pulverzuführsystem hergestellter Proben

#	Material	Beschichtungslayout
58	Gipskarton Diamant GKFI 12,5 (40 x 50 cm <sup>2</sup> )	Schlangenlinien-Struktur
59	Gipskarton Diamant GKFI 12,5 (40 x 50 cm <sup>2</sup> )	Schlangenlinien-Struktur
60	Gipskarton Diamant GKFI 12,5 (40 x 50 cm <sup>2</sup> )	Schlangenlinien-Struktur
61	Lehmbauplatte mit PCM	Schlangenlinien-Struktur
62	Gipsverbund mit PCM	Schlangenlinien-Struktur

## 2.4 AP 4: Charakterisierung der generierten Strukturen

### 2.4.1 Qualitätsanalyse mittels optischer Untersuchung

Abbildung 25 zeigt das Ergebnis der beschichteten Gipskartonproben sowie Proben aus alternativen Basismaterialien nach dem Versuchsplan aus Tabelle 2 und Tabelle 3. Die Sichtprobe deutet mit dem gewählten Parametersatz auf eine erfolgreiche Beschichtung hin. Neben Gipskarton konnten Kupferstrukturen jeweils auf der Rückseite des Spiegels, der Keramikfliese und des Laminats aufgebracht werden. Keine Beschichtung konnte auf das unbehandelte Holz ohne Lackierung aufgebracht werden.

Positive Ergebnisse wurden ebenso bei Holz mit feiner Struktur und einer entsprechenden Vorbehandlung mit Lack erzielt. Es ist jedoch optisch zu erkennen, dass die Kupferbahnen auf den verschiedenen Materialien unterschiedlich dick wirken.

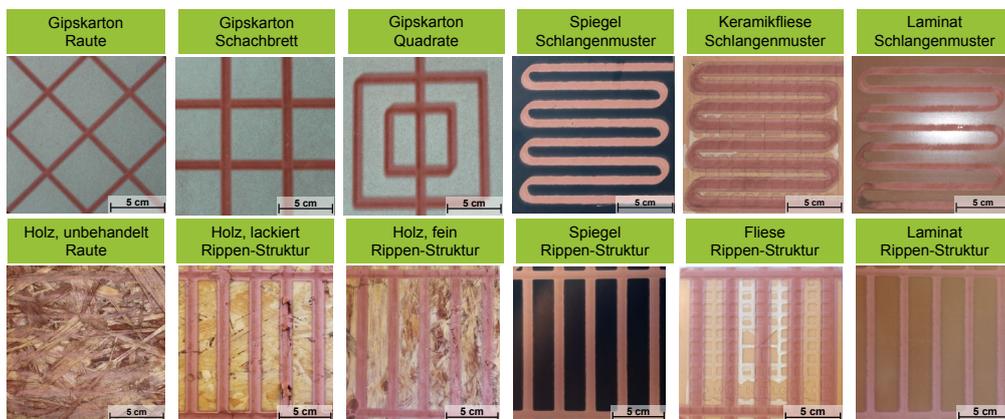


Abbildung 25: Optische Analyse der plasmabeschichteten Proben auf Gipskarton und alternativen Basis-Substratmaterialien

Obwohl bei allen Beschichtungen der gleiche Abstand der Materialoberfläche zur Düse von 15 mm, die einheitliche Vorschubgeschwindigkeit von 60 mm/s und die identische Anzahl an Überfahrten ( $n = 6$ ) eingehalten wurden, variieren die Breiten der erzeugten Kupferschichten stark. Während die aufgetragenen Bahnen auf dem Laminat und der Spiegelrückseite mit Schichtbreiten von 8 mm und 9 mm sehr schmal sind, weisen die lackierte Holzprobe mit einer Schichtbreite von 11,5 mm und die Rückseite der Keramikfliese mit sogar 13 mm deutlich breitere Kupferbahnen auf. Das nicht vorbehandelte Holz liegt mit einer Leiterbahnbreite von 10 mm im Mittelfeld. Es ist ein deutlicher Unterschied zwischen den Leiterbahnen auf dem lackierten und dem unbehandelten Holz zu erkennen. Während auf dem unbehandelten Material die Leiterbahnen blass wirken, weist die lackierte Probe klar zu erkennende Kupferbahnen auf. Es ist anzumerken, dass die Kupferschicht auf dem Lack an manchen Stellen stark abblätterten, wie Abbildung 26 („Holz lackiert“) zeigt.

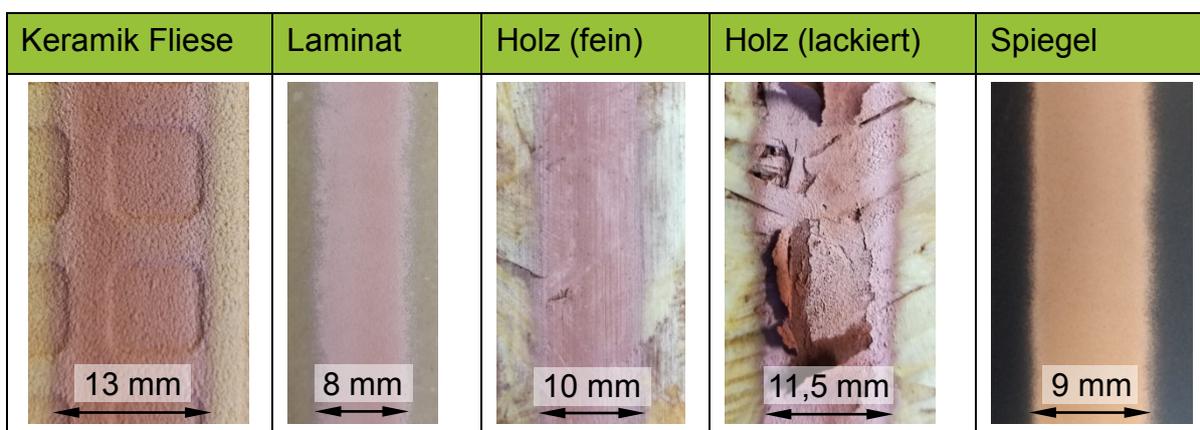


Abbildung 26: Vergleichende Betrachtung der Schichtbreiten bei gleichen Beschichtungsparametern auf unterschiedlichen Basis-Substratmaterialien

### 2.4.2 Qualitätsuntersuchung der elektrischen Kennwerte

Ein Vergleich der Mittelwerte der Widerstände, der nach dem im Versuchsplan in Tabelle 2 bzw. in Tabelle 3 gefertigten Proben auf grauem bzw. grünem Gipskarton mit unterschiedlichen Beschichtungslayouts, zeigt Abbildung 27. Die unterschiedlichen Widerstandswerte der Beschichtungslayouts (Raute, Schachbrett, Quadrate) innerhalb des gleichen Basissubstrats (grüner bzw. grauer Gipskarton) lassen sich durch die verschiedenen Längen der Heizstrukturen bzw. mehrmaligen Überfahrten durch Überkreuzen der Leiterbahnen, wie in Abbildung 25 dargestellt, erklären. Sollten alle gleichen Beschichtungslayouts den gleichen elektrischen aufweisen, ist jedoch eine Abhängigkeit des elektrischen Widerstandes von dem jeweiligen Basissubstrat festzustellen. Somit lassen sich auf dem grünen Gipskarton insgesamt geringere Widerstände aufweisen als auf dem grauen, was auf eine schlechtere Haftung des Pulvers auf den grauen Gipskartonplatten, trotz annähernd gleicher Oberflächenrauigkeit der beiden Basiswerkstoffe (Gipskarton grün: 40,03  $\mu\text{m}$ ; Gipskarton grau: 43,99  $\mu\text{m}$ , siehe Abbildung 14) schließen lässt.

Bei Betrachtung der jeweils hohen Standardabweichungen der einzelnen Versuchsgruppen stellte sich eine geringe Stetigkeit des Beschichtungsprozesses heraus. Diese lässt sich wiederum durch eine ungleichmäßige Pulverzuführung erklären, was die bereits vorgestellten Messungen aus Abbildung 21 und Abbildung 22 gezeigt haben.

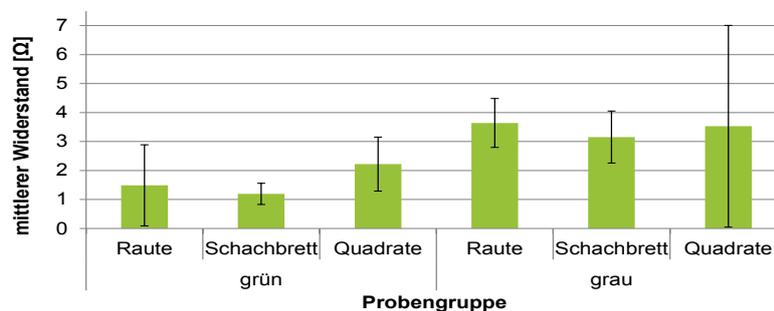


Abbildung 27: Mittlere Widerstände der beschichteten Gipskartonproben mit Standardabweichung in Abhängigkeit des Basis-Substratmaterials und des Beschichtungslayouts

Aufgrund der hohen Standardabweichungen, welche aus den Ergebnissen der elektrischen Widerstandsmessungen aus Abbildung 27 deutlich hervorgehen, werden im Folgenden die Versuchsergebnisse der Proben, welche nach dem Versuchsplan aus Tabelle 4 mit einem alternativen Pulverzuführsystem gefertigt wurden, für eine vergleichende Betrachtung aufgezeigt. Die Ergebnisse aus Abbildung 28 sollen die Auswirkungen, bei Verwendung eines alternativen Pulverzuführsystems inkl. des dafür abgestimmtes Pulvers, auf den Beschichtungsprozess deutlich machen.

Zur Untersuchung der Gleichmäßigkeit der elektrischen Widerstandswerte auf der Heizstruktur wurden einzelne Messabschnitte der untersuchten Proben mit einer

Länge von jeweils 10 cm innerhalb der Schlangenstruktur gemäß der Einteilung nach Abbildung 28 (links) durchgeführt. Die Buchstaben betiteln die einzelnen horizontalen Bahnen. Somit wurden je Bahn drei Messwerte gebildet, welche den Verlauf der Widerstandswerte darstellen (siehe Abbildung 28, rechts). Es ist zu erkennen, dass alle Bahnen die gleiche Trendlinie aufweisen. Der Widerstand steigt bei jeder Bahn leicht von Messabschnitt eins zu Messabschnitt drei bzw. von links nach rechts an. Außerdem ist weiterhin zu erkennen, dass das Niveau der Widerstände innerhalb der gleichen Messabschnitte jeder Bahn von Bahn A zu Bahn J steigt. Der Widerstand nimmt dementsprechend von oben nach unten stetig zu. Der vertikale Verlauf der Widerstände ist somit ähnlich dem horizontalen Verlauf. Dieses Phänomen lässt sich auf die Handhabung der Probe während der Beschichtung zurückzuführen. Durch die Länge der Probe entsteht ein gewisser Hebel, da die Gipskartonplatte aufgrund der unzureichenden Länge des Roboterarms nicht mittig fixiert werden konnte und somit der Abstand zwischen Düse und Substrat lokal vergrößert wurde, was wiederum zu einer partiellen Erhöhung des elektrischen Widerstandes führte. Die entsprechend niedrigen Standardabweichungen zeigen weiterhin die hohe Gleichmäßigkeit, welche mit dem alternativen Pulversetup erreicht werden konnte.

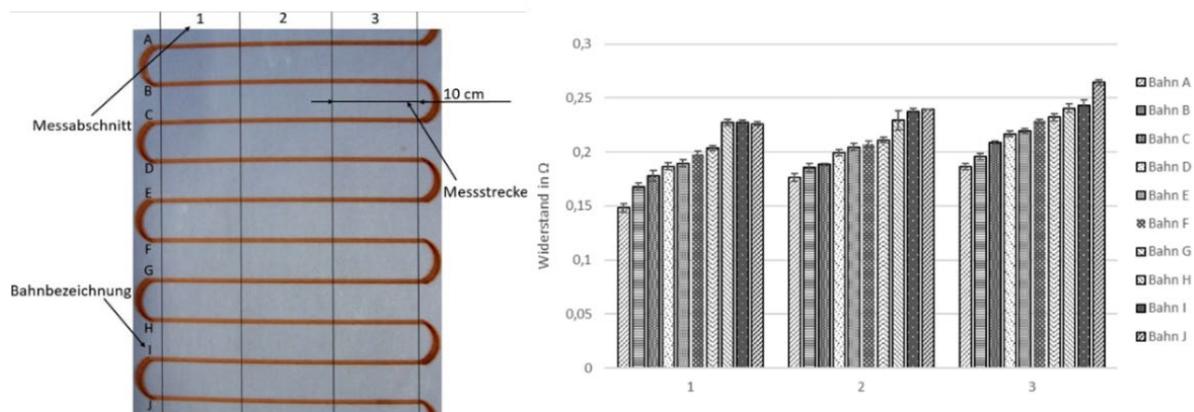


Abbildung 28: Elektrische Widerstandswerte bei einer Gipskarton-Probenfläche von  $40 \times 50 \text{ cm}^2$  bei Verwendung des alternativen Pulverzuführsystems

Neben den Werten der horizontalen Heizstrukturen sind auch die Widerstände in den kurvigen Abschnitten von Bedeutung. Die Kurvenabschnitte beinhalten die jeweilige Kombination der Verbindung der Bahnen A bis J, wie in Abbildung 29 dargestellt. Die beiden halben Kurven am Plattenanfang und -ende wurden dabei nicht berücksichtigt. Die jeweilige Messstrecke entspricht der Kurvenlänge von 7 cm. Es ist die gleiche Entwicklung der Widerstände wie in Abbildung 28 erkennbar. Die Widerstände steigen von Kurve AB bis Bahn IJ immer weiter an. Außerdem weisen die Kurven auf der rechten Seite der Platte ein höheres Widerstandsniveau auf. Diese Beobachtungen sind analog dem Verlauf der Widerstände der horizontalen Bahnabschnitte zu deuten und resultieren hauptsächlich aus den unterschiedlichen Düsenabständen an der jeweiligen Position der Bahnpunkte während des Beschichtungsvorgangs.

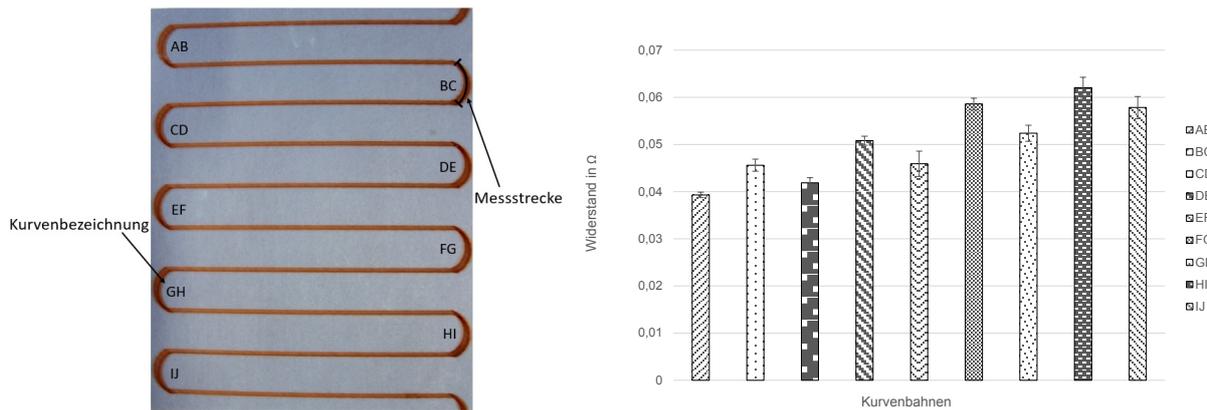


Abbildung 29: Elektrische Widerstands-Werte im Kurvenbereich der Heizstrukturen innerhalb der Probenfläche von 40 x 50 cm<sup>2</sup> bei Verwendung des alternativen Pulverzuführsystems

### 2.4.3 Qualitätsuntersuchung der geometrischen Eigenschaften

Zur Messung der Schichtdicken wurde wie bei der Ermittlung der Oberflächenrauheiten das Lasermikroskop der Firma Keyence verwendet. Das in Abbildung 30 dargestellte Höhenprofil einer auf dem grauen Gipskarton aufgetragenen Kupferbahn zeigt, dass diese kaum abzugrenzen ist. Dieser Effekt lässt sich durch das Verschmelzen des Kupfers in den Karton erklären. Die Messungen des Höhenprofils ergaben bei den Proben auf grauem Gipskarton niedrigere Werte, was auf einen geringeren Schichtauftrag zurückzuführen ist, was wiederum zu einem höheren elektrischen Widerstandswert führt und daher die Messungen aus Abbildung 27 bestätigt. Die Abbildung zeigt beispielhaft das Höhenprofil einer Kupferbahn in Rautenstruktur auf dem grauen Gipskarton.

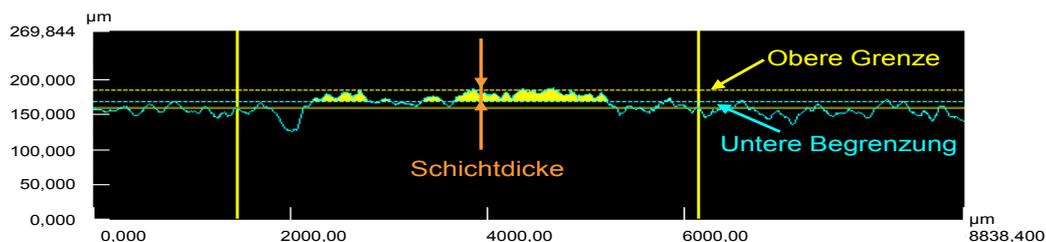


Abbildung 30: Mikroskop Aufnahme des Oberflächenprofils einer Kupferleiterbahn mit Rauten-Struktur auf grauem Gipskarton

Die Messung des Höhenprofils der beschichteten Gipskartonproben zeigt Abbildung 31, gruppiert nach Gipssorte und dem jeweiligem Beschichtungslayout, analog der Darstellung der elektrischen Widerstandsmessungen aus Abbildung 27. Es sind die durchschnittlichen Schichtdicken für jede Probengruppe mit ihrer jeweiligen Standardabweichung dargestellt.

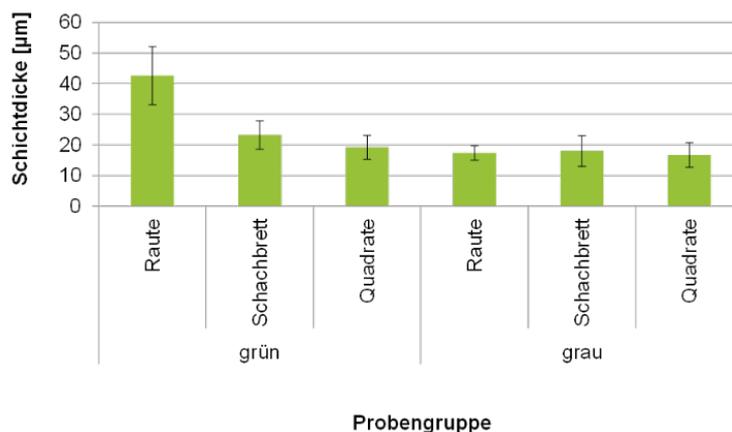


Abbildung 31: Durchschnittliche Schichtdicken der verschiedenen Beschichtungs-Layouts auf dem grauen und grünen Gipskarton

Hinsichtlich der Schichtdicken weist die Verwendung des grünen Gipskartons insgesamt einen höheren Materialauftrag auf, als dies bei dem grauen Basismaterial der Fall ist, was die Messungen des elektrischen Widerstandes aus Abbildung 27 widerspiegeln. Entgegen der hohen Varianz der Widerstandsmessungen, welche aus Abbildung 27 hervorgeht, ist eine annähernd homogene Schichtdicken, mit Ausnahme der Rauten-Struktur auf dem grünen Gipskarton, über alle Proben hinweg erkennbar.

Abbildung 32 zeigt die gemittelten Schichtdicken und deren jeweiligen Standardabweichungen der aus alternativen Basismaterialien erzeugten Proben nach dem Versuchsplan aus Tabelle 3. Für eine vergleichende Betrachtung sind weiterhin in Abbildung 32 die gemittelten Schichtdicken der auf grünen und grauen Gipskarton erzeugten Kupferstrukturen aufgetragen. Es ist festzuhalten, dass die Schichtdicken mit Ausnahme von Laminat und Holz in einen gewissen Toleranzbereich konstant sind, welcher auch auf die unregelmäßige Pulverzuführung zurückgeführt werden kann.

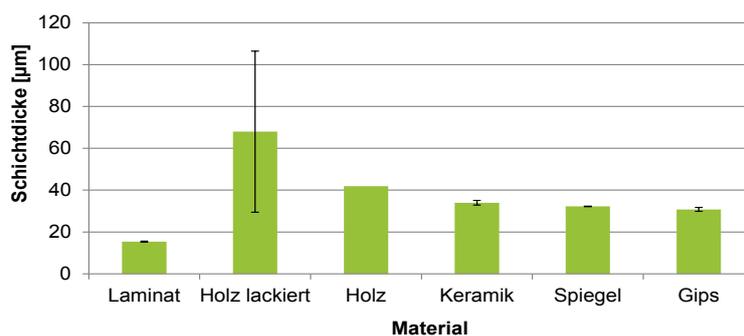


Abbildung 32: Gemittelte Schichtdicken der Kupferbahnen auf unterschiedlichen alternativen Basis-Substratmaterialien und deren Standardabweichungen

Zur weiteren Untersuchung der Kupferschicht wurde ein Querschnitt einer auf grünem Gipskarton aufgetragenen Leiterbahn untersucht. Der Schliff wurde dazu mit dem Digitalmikroskop DVM6 der Firma Leica betrachtet. Eine Aufnahme in 943-facher Vergrößerung des Schliffs ist in Abbildung 33 dargestellt.

Zur Überprüfung der mittels Laserscan-Mikroskop gemessenen Schichtdicken wurde die Kupferschicht an mehreren Stellen im Schliffbild vermessen. Eine Messung ist in Abbildung 33 exemplarisch eingezeichnet. Die Mittelung aller Messungen ergibt eine durchschnittliche Schichtdicke von  $23,72\ \mu\text{m}$  und entspricht annähernd der mittels Laserscan-Mikroskop gemessenen durchschnittlichen Schichtdicke der Kupferbahnen auf dem grünen Gipskarton von  $23,24\ \mu\text{m}$ . Es kann daher davon ausgegangen werden, dass trotz Einbrennen des Kupfers in den Karton die mittels des Laserscan-Mikroskops gemessenen Schichtdicken plausibel sind. Darüber hinaus ist in der vergrößerten Ansicht zu erkennen, dass die Kupferbahn porös ist, was ihren Einsatz als Heizstruktur durch die damit hervorgerufene Erhöhung des elektrischen Widerstandes begünstigt.

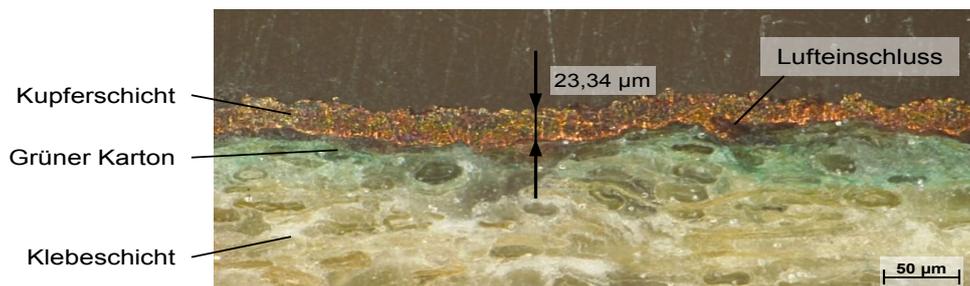


Abbildung 33: Mikroskop Aufnahme des Querschnitts einer Kupferleiterbahn auf Gipskarton in 943-facher Vergrößerung

Abbildung 34 zeigt einen Ausschnitt einer Struktur im Schliffbild bei Verwendung eines alternativen Pulverzuführsystems und Pulver für die Plasmabeschichtung. Für die markierten Stellen wurden die Höhen an den jeweiligen Punkten ermittelt. Messpunkt 1 stellt die höchste Erhebung über die gesamte Struktur dar und misst  $87\ \mu\text{m}$ . An Messpunkt 2 ist eine besonders geringe Schichthöhe zu erkennen. Die Schichtdicke beträgt hier  $27\ \mu\text{m}$ . Im Messpunkt 3 beträgt die Schichtdicke  $52\ \mu\text{m}$ . Dies zeigt, dass mit dem alternativ verwendeten Pulver inkl. Zuführung eine deutlich höhere Schichtdicke erreicht werden kann.

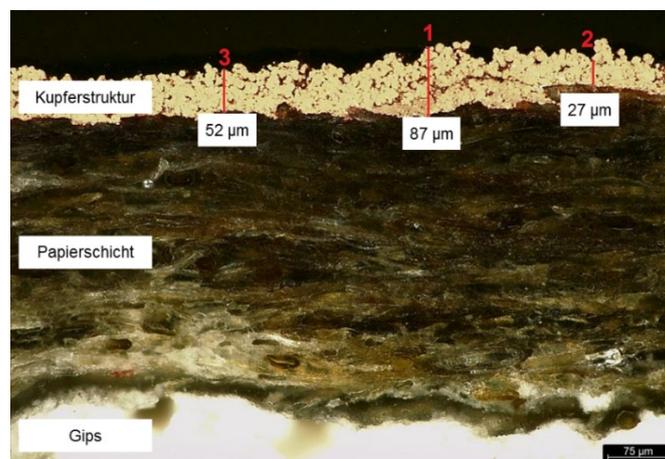


Abbildung 34: Ausschnitt eines Schliffbildes mit Heizstruktur mit alternativem Pulverzuführsystem und Pulver

#### 2.4.4 Qualitätsuntersuchung der Hafteigenschaften

Um die Haftung der Kupferschicht auf den verschiedenen Materialien zu bestimmen, wurden Schertests durchgeführt. Hierbei misst das Prüfgerät Condors 150-3 der Firma XYZTEC die Kraft, die benötigt wird, um Kupferquadrate der Größe  $2,5 \times 2,5 \text{ mm}^2$  vom Trägersubstrat abzuscheren. Abbildung 35 links zeigt die Maske für einen definierten Kupferauftrag während Abbildung 35 rechts den Aufbau eines Schertests schematisch darstellt. Der Objektisch mit der Probe wird von unten an einen festen Schermeißel bis auf die Scherhöhe manuell herangefahren. Dabei ist darauf zu achten, den Meißel so zu positionieren, dass er einen ausreichend guten Angriffspunkt an der abzuscherenden Probe hat, ohne dabei die Substratoberfläche zu berühren. Anschließend wird die Probe in Richtung des Schermeißels gefahren bis dieser auf eines der Kupferquadrate trifft und es abschert. Die aufgewandte Kraft wird dabei aufgezeichnet. Je größer die gemessene Scherkraft ist, desto höher ist die Haftfestigkeit der Beschichtung.

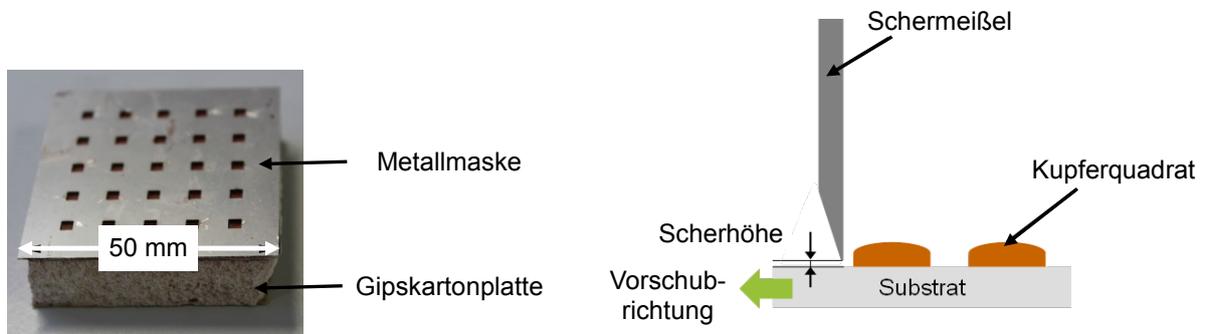


Abbildung 35: Für einen definierten Kupferauftrag erfolgt die Kupfer-Beschichtung mittels Strukturierungsmaske (links); Schematische Darstellung zur Durchführung des Schertests zur Ermittlung der Scherkräfte zwischen Kupferbeschichtung und Basissubstrat (rechts)

Die Proben mit plasmaerzeugten Kupferquadraten sind in Abbildung 36 links dargestellt. Im Rahmen des Schertests wurde jedoch festgestellt, dass die aufgetragenen Kupferquadrate nicht abgelöst werden können, da der Schermeißel keinen Angriffspunkt aufgrund des niedrigen Kupferauftrages findet. Das in Abbildung 36 rechts dargestellte Querschnittsprofil eines Kupferquadrats auf dem grünen Gipskarton zeigt, dass die Kupferschicht zu dünn ist, um abgeschert werden zu können.

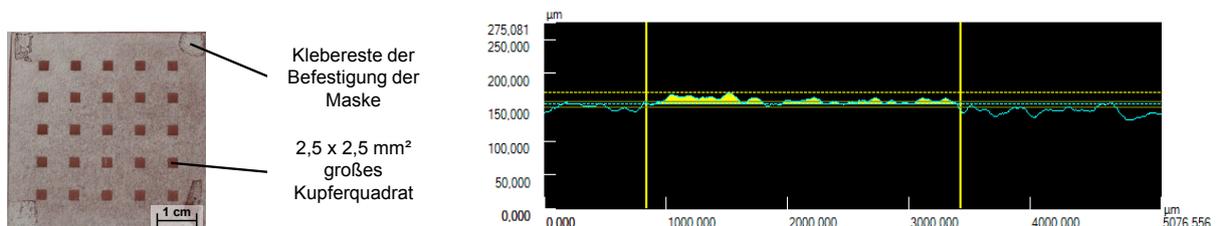


Abbildung 36: Darstellung der Ergebnisse der Kupfer-Beschichtung mittels Strukturierungs-Maske (links); Das Querschnittsprofil der Kupferstruktur zeigt im Mikroskop die geringe Höhe, welche für ein direktes Abschneiden nicht ausreicht (rechts)

Aus diesen Gründen wurden in weiteren Versuchen elektronische Bauteile (Widerstände) auf die Kupferquadrate gelötet, um einen größeren Angriffspunkt für den Schermeißel zu gewähren. In Abbildung 37 links ist das Versuchsssetup aufgezeigt, womit valide Messergebnisse erzeugt werden konnten. Es wurden sowohl Untersuchungen an Kupferquadraten, welche mit dem Standard-Kupferzuführsystem gefertigt wurden, als auch Scherkraftmessungen an Proben, welche mit dem alternativen Pulverzuführsystem hergestellt wurden, durchgeführt. Der Versuchsplan zur Scherkraftmessung zwischen Basis-Substratmaterial und Kupferstruktur ist in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5: Darstellung des Versuchsplans zur Durchführung der Scherkraftmessungen zwischen Basis-Substratmaterial und Kupferstruktur

#	Material	Anzahl der Scherproben
63	2,5 x 2,5 mm <sup>2</sup> Kupferquadrate auf Gipskarton „GKBI“ (grün), <b>Standard Pulverzuführung</b>	150 Schertests mit je 25 Kupferquadraten/Probe (50 x 50 mm <sup>2</sup> )
64	2,5 x 2,5 mm <sup>2</sup> Kupferquadrate auf Gipskarton „Diamant GKFI 12,5“ (40 x 50 cm <sup>2</sup> ), <b>Alternatives Pulverzuführsystem</b>	16 Schertests auf 1 Probe (50 x 50 mm <sup>2</sup> )

In Abbildung 37 links sind die abgescherten Kupferquadrate, nach dem in Tabelle 5 (#64) im Versuchsplan aufgeführten Setup, abgebildet. Die Ergebnisse aller Scherkraftmessungen repräsentieren eine intensive Verbindung zwischen Basissubstrat und Kupferstruktur, wie in Abbildung 37 (rechts) aufgezeigt. Mit ca. 53 N (8,5 N/mm<sup>2</sup>) zeigten die Messungen eine höhere Verbindungskraft zwischen Basis-Substrat und Kupferstruktur bei Fertigung mit dem alternativen Pulverzuführsystem und dem Gipskarton „Diamant GKFI 12,5“ gegenüber dem Setup nach Tabelle 5 (#63), welche einen Wert von ca. 44 N (7 N/mm<sup>2</sup>) aufweisen. Ist bei allen durchgeführten Schertests die Verbindung zwischen Kartonschicht und Gips das Versagenskriterien, so dass der Karton aus der Oberfläche gerissen wurde, kann keine exakte Aussage über die Haftfestigkeit zwischen Gipskartonoberfläche und Kupferstruktur gegeben werden. Die Werte zeigen lediglich, dass bei dem hochwertigeren Gipskarton „Diamant GKFI 12,5“ eine intensivere Verbindung zwischen Gips und Karton vorherrscht.

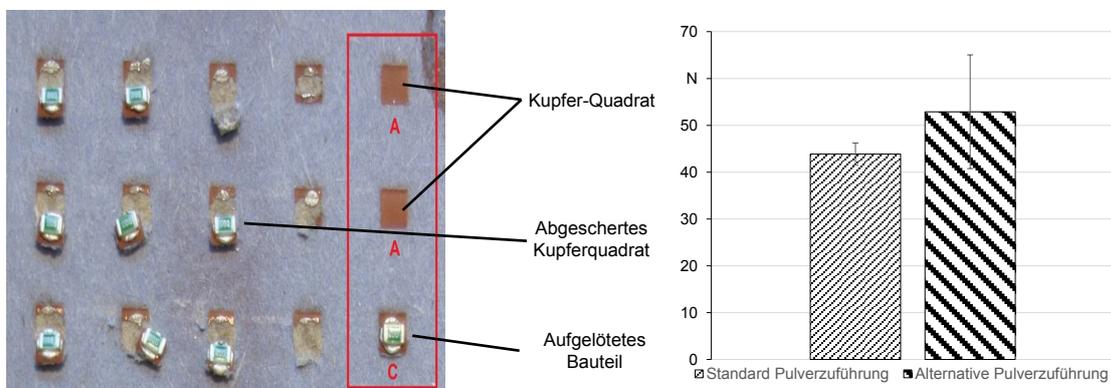


Abbildung 37: Schertests auf Gipskarton mit alternativem Pulverzuführsystem

### 2.4.5 Qualitätsuntersuchung der thermischen Eigenschaften

Für die Untersuchung der thermischen Eigenschaften wurden die Proben (Basismaterial: Gipskarton grün; Beschichtungslayout: Schlangenstruktur; Standard Pulverzuführsystem) zur Einstellung eines einheitlichen Emissionsgrades mit einer schwarzen Farbe überzogen. Anschließend wurden die Proben mittels Anschlussklemmen mit einer Leistung von 5,57 W (3,48 V, 1,45 A) mit elektrischer Energie versorgt. Zeitgleich wurde die Wärmeentwicklung mit einer Infrarot-Wärmebildkamera, wie im Setup in Abbildung 38 (links) aufgezeichnet. In Abbildung 38 ist das Aufheizverhalten einer 15 x 15 cm<sup>2</sup> Probe dargestellt. Innerhalb von zehn Minuten heizte die Probe von anfänglich 22 °C auf knapp 36 °C auf, bis sie nach ca. 31 Minuten die maximale Temperatur von 40 °C erreicht hat, welche über den Messzeitraum von einer Stunde beibehalten wurde. Das zeitliche Aufheizverhalten ist in Abbildung 38 detailliert dargestellt und bestätigt die Funktionserfüllung der Heizstrukturen.

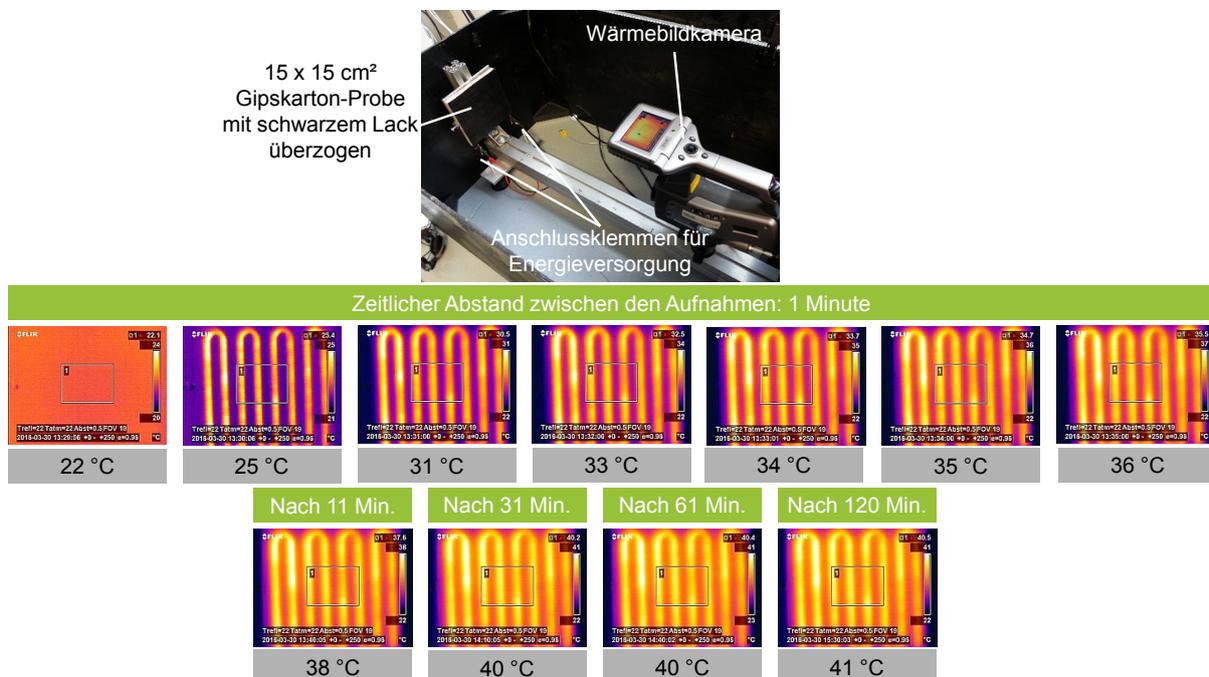


Abbildung 38: Die Aufnahmen der Wärmebildkamera zeigen das Aufheizverhalten der 15 x 15 cm<sup>2</sup> Proben in definierten Zeitabständen

In einem weiteren Versuch wurden Proben (Basismaterial: Gipskarton grün; Beschichtungslayout: Schlangenstruktur; Standard Pulverzuführsystem) in einem Klimaschrank unter definierten Randbedingungen aufgeheizt, wie das Setup in Abbildung 39 rechts zeigt. Dafür wurde die Umgebung auf 12 °C bzw. 20 °C abgekühlt, bevor der Aufheizvorgang der Probe startete. Im Diagramm in Abbildung 39 links sind die Leistungskennwerte ersichtlic. Somit erreichte die Probe nach ca. zwei Minuten die jeweiligen Zieltemperaturen von 22 °C, 24 °C, 26 °C, 28 °C bzw. 30 °C. Bei einer Umgebungstemperatur von 12 °C waren ca. 11 Watt zum Erreichen der Zieltemperatur nötig, während nach Erwärmung des Systems lediglich eine Leistung von 5 Watt aufgewendet

werden musste. Entsprechend niedriger fielen die Werte bei einer Umgebungstemperatur von 20 °C auf, siehe Abbildung 39.

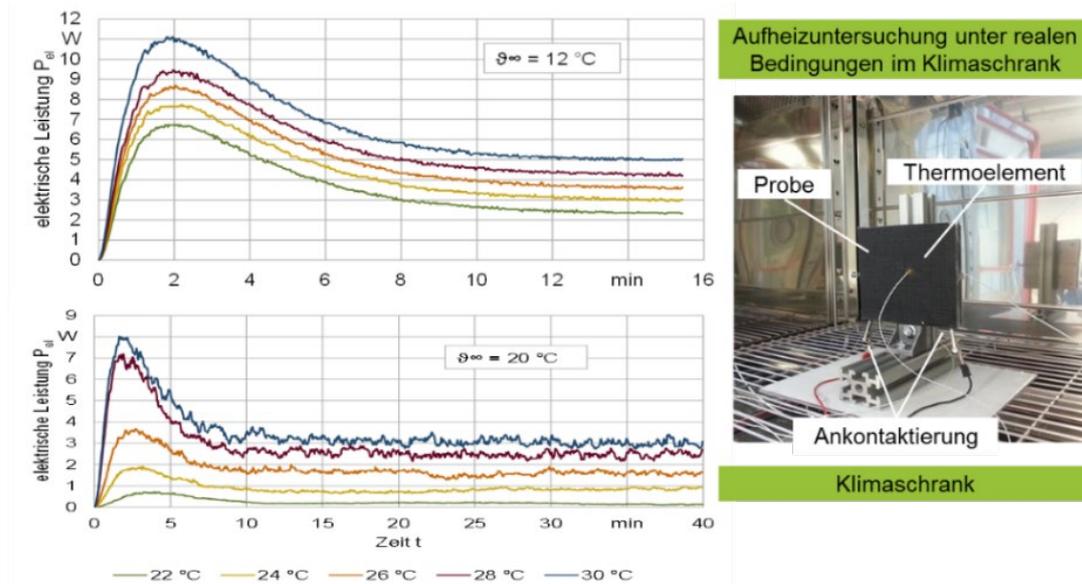


Abbildung 39: Darstellung der Leistungskennlinien des Flächenheizsegmentes unter definierten Umgebungsbedingungen in einem konditionierten Klimaschrank

Wie bereits beschrieben, führt die ungleichmäßige Pulverzuführung zur Prozessdüse zu einem ungleichmäßigen Auftrag der Kupferstrukturen. Dies spiegelt sich in den Aufheizuntersuchungen verschiedener Layouts in Abbildung 40 wieder. So war bei einigen Proben ein lokales Temperaturmaximum festzustellen, was bei einer Erhöhung der Temperatur zu einem Durchbrennen und damit zu einem Ausfall eines Teilbereichs führen könnte.

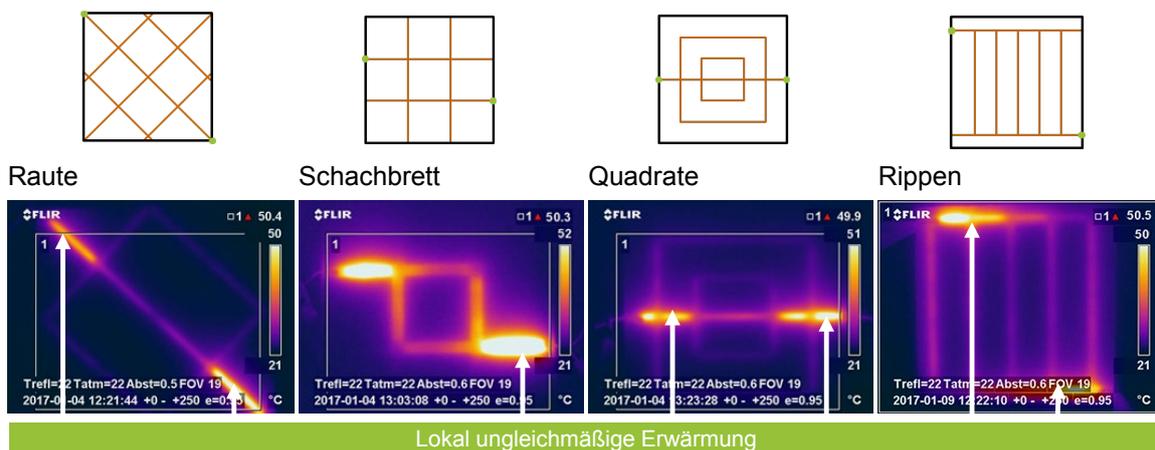


Abbildung 40: Ungleichmäßiges Aufheizverhalten aufgrund unregelmäßiger Pulverzuführung während des Plasmabeschichtungsprozesses

Im Folgenden werden die Aufheizuntersuchungen der Strukturen auf den 40 x 50 cm<sup>2</sup> Gipskarton-Platten „Diamant GKFI 12,5“ mit alternativem Pulverzuführsystem und Pulver vorgestellt. Die hierbei getestete Platte hat einen Widerstand von 7,5 Ω. Bei den

Messungen der Proben wurden als Zieltemperaturen der Heizstrukturen 40 °C, 50 °C bzw. 60 °C definiert, während die Temperaturen der Leiterbahnzwischenräume ebenfalls aufgenommen wurden. Abbildung 41 zeigt die Wärmeverteilung innerhalb der Probe mit einer maximalen Bahntemperatur von 40 °C (weiße Umrandung) und einer Oberflächentemperatur zwischen den Heizstrukturen von 33,9 °C (rote Umrandung).



Abbildung 41: Aufnahme mittels Wärmebildkamera einer 40 x 50 cm<sup>2</sup> Platte bei 40 °C Höchsttemperatur innerhalb der gesamten Platte, 33,9 °C im Messpunkt 2 auf der Leiterbahn und 29,1 °C im Messpunkt 1 zwischen zwei Heizstrukturen

In der rechten oberen Ecke des Bildes sind drei Temperaturen zu sehen. Die Oberste gehört zu Messpunkt 1, welcher in der Mitte der Abbildung zwischen zwei Bahnen gesetzt ist. Messpunkt 2 stellt die durchschnittliche Temperatur der Heizstruktur dar und ist auf der obersten Leiterbahn positioniert. Die unterste Temperatur stellt die maximale Temperatur des Messbereichs 1 dar. Messbereich 1 entspricht in diesem Fall der gesamten Platte. Abbildung 42 zeigt dieselbe Platte mit den maximalen Bahntemperaturen von 50 °C und 60 °C.

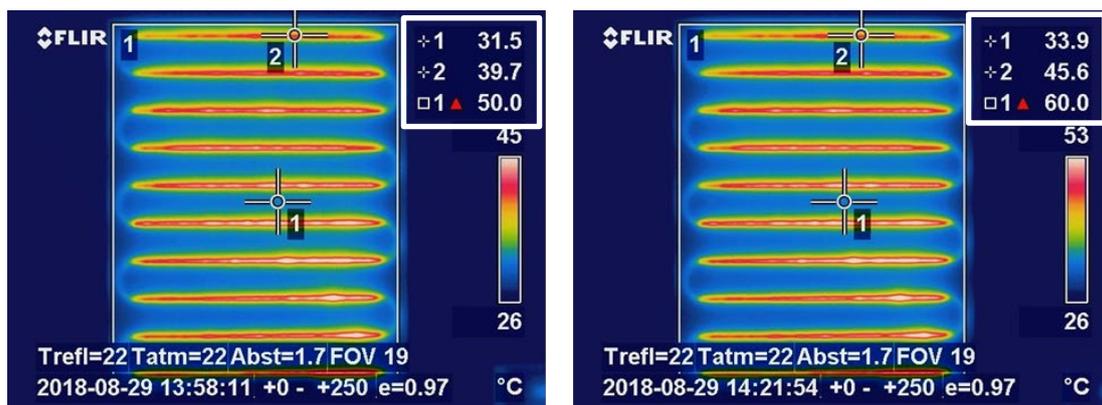


Abbildung 42: Aufnahme mittels Wärmebildkamera einer 40 x 50 cm<sup>2</sup> Platte bei 50 °C, bzw. 60 °C Höchsttemperatur innerhalb der gesamten Platte

Tabelle 6 zeigt aufsteigend alle gemessenen elektrischen Leistungswerte nach dem Setup aus Abbildung 41 bzw. Abbildung 42 zum Erreichen definierter maximaler Temperaturen, während die daraus resultierenden elektrischen Widerstandswerte mit aufgezeichnet wurden. Weiterhin wurden die durchschnittlichen Temperaturen der Heizstrukturen und die Temperaturen zwischen den Heizstrukturen gemessen und aufgezeichnet und sind Tabelle 6 zu entnehmen. Für die Einhaltung der Herstellerlimitierungen des Gipskarton-Basis-Materials eignen sich nur die ersten beiden Einstellungen, da die maximale, dauerhafte Oberflächentemperatur des Gipskartons auf 50 °C begrenzt ist [17].

Tabelle 6 Zusammenfassende Darstellung der Leistungs- und Widerstandsdaten plasmabeschichteter Gipskartonproben in Abhängigkeit vorgegebener Zieltemperaturen

Spannung [V]	Stromstärke [A]	Leistung [W]	Ø Temp. [°C]	Max. Temp. [°C]	Temp. Zwischenraum [C]	Widerstand [Ω]
10,8	1,4	15,1	34	40	29	7,71
14,6	1,9	27,7	40	50	31,8	7,68
17,8	2,3	40,9	46	60	34	7,74
20,2	2,5	50,5	50	68,5	35,5	8,08
24,6	3,0	73,8	60	87	39,5	8,20
30	3,6	108	72,2	111	42,5	8,33

#### 2.4.6 Untersuchung der Materialien mit PCM

Im direkten Vergleich zu Gipskarton als Basismaterial für die Flächenheizung wurden auch Lehmbauplatten mit PCM von der Firma Lehorange (siehe Abbildung 11) nach dem Versuchsplan aus Tabelle 4 untersucht. Zurückzuführen auf eine andere Oberflächenbeschaffenheit bzw. Materialzusammensetzung der Holzfaser-Trägerplatte (siehe Abbildung 11), ist der Widerstand im Vergleich zu den Gipskartonplatten, trotz der selben Beschichtungs-Parametereinstellungen, um circa 66 % erhöht. Abbildung 43 zeigt eine Aufnahme mittels Wärmebildkamera der Kupferstruktur auf der Holzfaser-Trägerplatte. Wird der Vergleich der Proben zwischen Gipskarton (z. B. aus Abbildung 41) und der Holzfaser-Trägerplatte aus Abbildung 43 als Substrat in Betracht gezogen, so ist ein deutlicher Unterschied im Ausmaß der Ungleichmäßigkeiten des Kupferauftrages zu erkennen. Aufgrund der hohen lokalen Ungleichmäßigkeiten des Schichtauftrages der Leiterbahn auf der Oberfläche, welche zu einem Durchbrennen der Leiterbahn führen könnten, wurde dieses Basis-Substratmaterial für die weiteren Untersuchungen ausgeschlossen.

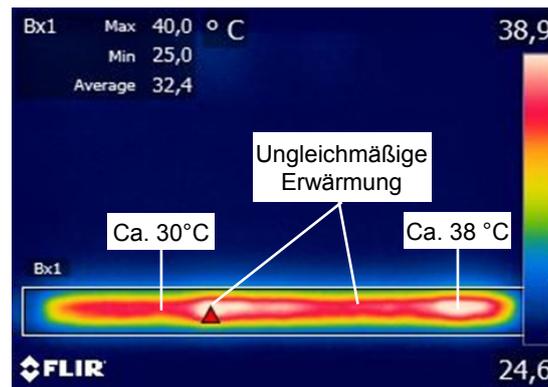


Abbildung 43: Die Wärmebildaufnahmen der Leiterbahn auf der Holzfaser-Trägerplatte der Lehmbauplatte mit PCM zeigt starke lokale Schwankungen des elektrischen Widerstandes und damit des Schichtauftrages auf

Weiterhin wurden die PCM-Vollgipsplatten der Firma Rigips, wie in Abbildung 12 dargestellt, untersucht. Hierfür wurden die Proben nach dem Versuchsplan aus Tabelle 4 gefertigt. Abbildung 44 zeigt die Probe nach dem Beschichtungsprozess. Es ist eine deutliche Ablagerung der Kupferstruktur auf der Oberfläche erkennbar. Jedoch sind auch deutliche Unterbrechungen der Leiterbahn optisch erkennbar, was auf die raue Oberflächenstruktur zurückzuführen war. Die Widerstandsmessung ergab keine elektrische Leitfähigkeit der Strukturen, weshalb dieses Basis-Material für die weitere Betrachtung als Flächenheizung ausgeschlossen wurde.

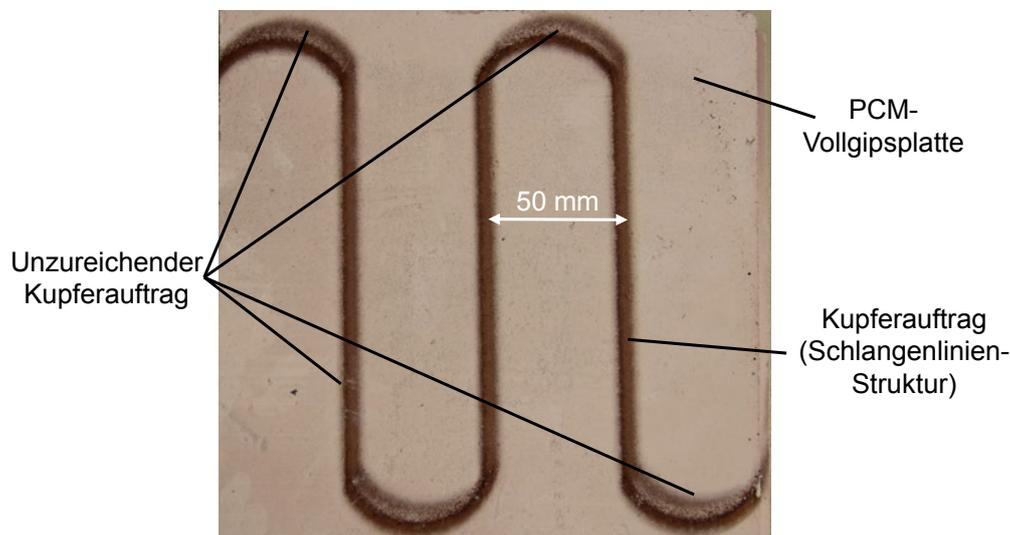


Abbildung 44: Darstellung der additiv plasmabeschichteten PCM-Vollgipsplatte mit optisch erkennbarem unzureichendem Metallauftrag

Aufgrund der unzureichenden Beschichtungsmöglichkeiten der Materialien mit PCM, wurden mit diesen Substraten, trotz des hohen Potentials im Wohnungsbau, keine weiteren Untersuchungen innerhalb diesen Forschungsprojektes durchgeführt.

## 2.5 AP 5: Charakterisierung der Eigenschaften des Verbundes nach Auftrag von Farbe, Lack, Tapete

Um die Anwendbarkeit von additiv aufgetragenen Heizstrukturen im Haus zu testen, wurden die beschichteten Proben den für das häusliche Umfeld typischen Bedingungen ausgesetzt. Zu diesem Zweck wurden jeweils zwei Proben pro Beschichtungsstruktur (Raute, Schachbrett, Quadrate) und Gipskartonsorte (grau, grün) gestrichen und zwei weitere tapeziert, wie aus dem Versuchsplan aus Tabelle 2 zu entnehmen ist. Es wurde die handelsübliche Wandfarbe „Arcticweiss“ sowie Tapete und Tapetenkleister der Fa. Obi verwendet. Abbildung 45 zeigt die mit Tapete und Wandfarbe beschichteten Proben, welche jeweils ein unterschiedliches Leiterbahnbild (Raute, Schachbrett, Quadrate) aufweisen. Weiterhin wurden die Enden der Leiterbahnen mit Lot und Kupferband elektrisch ankontaktiert, um elektrische Widerstandsmessungen durchführen zu können.

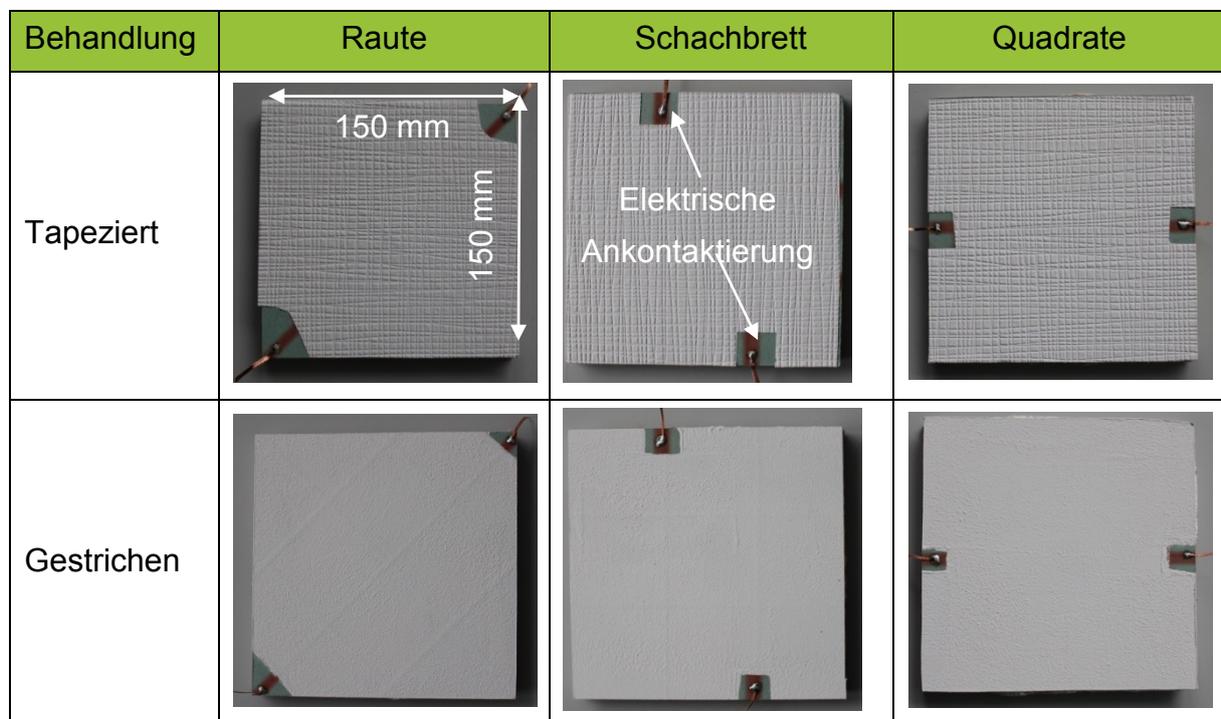


Abbildung 45: Oberflächen von tapezierten und gestrichenen Gipskartonproben mit unterschiedlichen Leiterbahnlayouts (Rauten-, Schachbrett- und Quadrate-Struktur)

Um herauszufinden, ob die Wanddekorationswerkstoffe einen Einfluss auf die Heizstrukturen haben, wurden die elektrischen Widerstände der Gipskartonproben sowohl vor und nach dem Streichen, als auch vor und nach dem Tapezieren gemessen und miteinander verglichen. Die ermittelten Werte sind in Abbildung 46 (Streichen) und in Abbildung 47 (Tapezieren) graphisch dargestellt. Die Probenbezeichnung ist aus Tabelle 2 zu entnehmen.

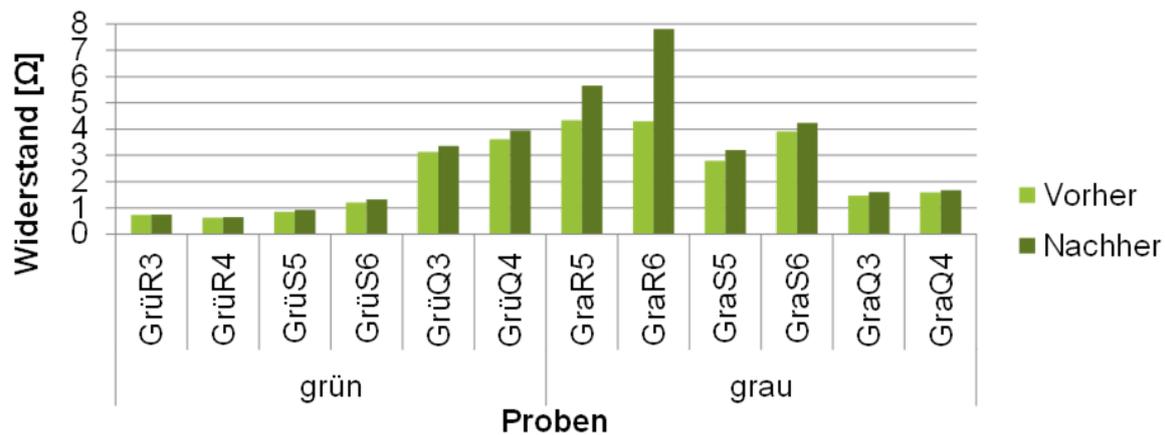


Abbildung 46: Gemessene Widerstände vor und nach dem Streichen

Es ist zu erkennen, dass die Widerstände nach dem Streichen bei allen Proben erhöht sind. Besonders bei den beiden „Rauten-Strukturen“ auf dem grauen Gipskarton ist diese Erhöhung deutlich zu erkennen. Abgesehen von zwei Ausreißern („GraR5“ und „GraR6“), liegt der Anstieg der Widerstände im Bereich von 1,37 % bis 14,70 %. Außerdem ist anzumerken, dass der Unterschied auf dem grauen Gipskarton mit einem mittleren Anstieg des Widerstands um 25 % (9,52 % bei Vernachlässigung der Extremwerte von „GraR5“ und „GraR6“) größer ist, als die gemittelte Erhöhung von 6,65 % bei den grünen Proben.

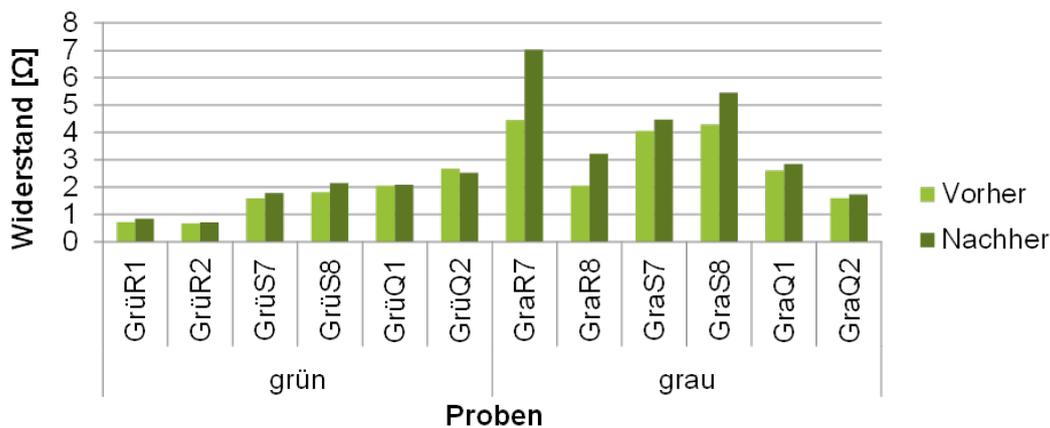


Abbildung 47: Gemessene Widerstandswerte vor und nach dem Tapezieren

Auch das Tapezieren der Proben führt zu einer Erhöhung des Widerstandes. Es lassen sich dieselben Ausreißer bei der Probengruppe „GraR“ (Gipskarton grau, Rauen-Struktur) erkennen, wie es auch bei den gestrichenen Proben der Fall ist. Diese Analogie widerspricht damit der ursprünglichen Annahme, dass es sich um eine zufällige Streuung handelt. Eine weitere Analogie zu den gestrichenen Proben ist, dass auch hier der relative Anstieg der elektrischen Widerstände bei den grauen Proben größer ist, als der bei den Grünen. Mit einer durchschnittlichen relativen Erhöhung von 8,00 % bei den grünen Gipskartonproben in Verbindung mit einem Wert von 28,28 % (13,85 % bei Vernachlässigung der beiden Extremwerte der grauen „Rauten-Strukturen“) bei

den grauen Proben hat das Tapezieren jedoch einen größeren Einfluss auf die Widerstände der Heizstrukturen als das Streichen. Eine Besonderheit ist bei der Probe „GrüQ2“ festzustellen. Hier hat sich der Widerstand nach der Behandlung um 5,97 % verringert.

Eine mögliche Erklärung der Veränderung der Widerstandswerte nach dem Überzug mit Wanddekorationstoffen ist, dass sich die Farbe, bzw. der Kleister zum Auftrag der Tapete, in die offene Porenstruktur der Kupfer-Leiterbahn ablegt. Beginnt die Trocknung der Farbe bzw. des Kleisters, können mechanische Spannungen innerhalb der Leiterbahn auftreten, die zu einer minimalen Veränderung des Querschnitts und damit Änderung des Widerstandwertes führen. Unterstützt wird dieses Phänomen durch die unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten des Kupfers und der Farbe bzw. Lack. Analog zu den erhöhten elektrischen Widerstandswerten auf grauem Gipskartonproben (Abbildung 27), die wiederum auf eine schlechtere Haftung des Kupferpulvers auf dem grauen Gipskarton hindeuten, zeichnet sich die Auswirkung der mechanischen Spannungen innerhalb des Kupfer-Farbe/Kleister-Verbundes auf dem grauen Gipskarton in einer Erhöhung des elektrischen Widerstandes deutlicher ab.

## **2.6 AP 6: Zuverlässigkeitsuntersuchungen unter realen Bedingungen**

Das Ziel dieses Arbeitspaketes beinhaltete das Treffen von Aussagen über die Dauergebrauchseigenschaften bzw. Zuverlässigkeit der Flächenheizung über mehrere Jahre hinweg. Dafür wurden einerseits die Flächenheizsegmente im Klimaschrank externen klimatischen Umwelteinflüssen (Temperaturwechsel, Luftfeuchte) ausgesetzt, um den Verbund Gipskarton-Kupferstruktur, welche jeweils einen unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten aufweisen, hinsichtlich der Dauergebrauchseigenschaften (z. B. beim Wechsel der Jahreszeiten), zu untersuchen. Weiterhin wurden in einem weiteren Test die Heizstrukturen selbst unter definierten Umweltbedingungen (feste Temperatur und Luftfeuchtigkeit) zyklisch erwärmt/abgekühlt, um somit Einschaltvorgänge für eine Dauer von ca. zehn Jahren zu simulieren.

### **2.6.1 Untersuchung der Heizstrukturen unter äußeren, zyklischen klimatischen Einflüssen**

Zunächst wurde ein Satz Proben (18 Stück), bestehend aus je einer gestrichenen, einer tapezierten und einer unbehandelten Probe je Probengruppe (Abbildung 48, links), wie im Versuchsplan aus Tabelle 2 „Klimaschrank ohne Strom“ im Klimaschrank der Firma Vötsch zyklisch erwärmt und wieder abgekühlt. Dafür wurde der Klimaschrank zunächst auf 10 °C (z. B. Kellertemperatur im Winter) und 70 % Raumluftfeuchten (z. B. Luftfeuchtigkeit im Badezimmer) abgekühlt. Zur Messung und Aufzeichnung der aktuellen Oberflächentemperatur des Flächenheiz-Segments diente ein Thermoelement. Der Temperaturverlauf ist in Abbildung 48 rechts („gemessene Temperatur“) gezeigt. Sobald die Oberfläche der Probe die definierten 10 °C erreicht hatte, erfolgte die

20-minütige Haltezeit, gefolgt von einer Aufheizphase des Klimaschranks auf 45 °C (z. B. Sonneneinstrahlung durch Fenster auf die Heizflächen) welche technisch bedingt eine Dauer von ca. 13 Minuten einnahm. Im Anschluss erfolgte die 20-minütige Haltephase bei ca. 45 °C, bevor in der Kühlphase der Klimaschrank wieder auf die Anfangstemperatur von 10 °C abkühlt wurde, was eine Dauer von technisch bedingt ca. 28 Minuten einnahm. Ein Zyklus bestand somit aus zwei Haltephasen und je einer Aufheiz- und Abkühlphase, welcher insgesamt eine Dauer von 81 Minuten einnahm. Die Zyklusanzahl wurde frei auf 80 festgelegt, was einer Testdauer von insgesamt 108 Stunden entspricht und somit ausreicht, um etwaige Ausfälle oder Änderungen des elektrischen Widerstandes detektieren zu können. Wie in Abbildung 48 rechts zu erkennen ist, unterschreitet bzw. übertrifft die tatsächliche Temperatur den eingestellten Vorgaben. Dieses Phänomen lässt auf die träge automatische Temperaturregelung des Klimaschranks zurückzuführen.

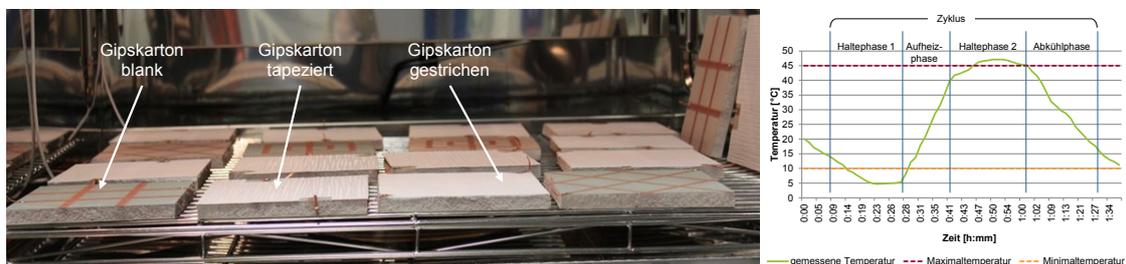


Abbildung 48: Unterschiedlich beschichtete Proben im Klimaschrank (links); Temperaturverlauf eines Zyklus beschichteter Proben unter externen Umwelteinflüssen (rechts)

Um den äußeren Einfluss der Temperaturschwankungen auf die Heizstrukturen zu untersuchen, werden im Folgenden die gemessenen Widerstände der Proben vor, während und nach den zyklischen Temperaturwechseluntersuchungen verglichen. Abbildung 49 zeigt die ermittelten Werte.

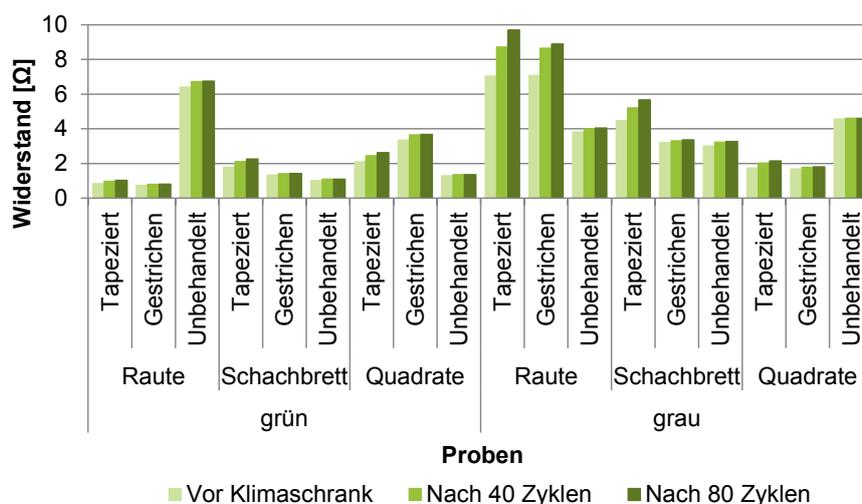


Abbildung 49: Vergleich der Widerstandswerte unter Aussetzung von externen Umwelteinflüssen

Die Betrachtung der Widerstände der Proben vor dem Klimaschrank, nach 40 Zyklen und nach 80 Zyklen zeigt, dass diese mit der Zeit ansteigen. Dieser Anstieg ist jedoch je Probe verschieden stark ausgeprägt. Während die unbehandelten Proben nach 80 Zyklen eine durchschnittliche Erhöhung des Widerstands um 5,72 % aufweisen, ist die Differenz bei den gestrichenen Proben mit einem durchschnittlichen Anstieg um 10,74 % wesentlich höher. Am stärksten wirken sich die Umgebungseinflüsse auf die tapezierten Proben aus, die einen mittleren Anstieg des Widerstands um 27,01 % aufweisen. Es wird vermutet, dass der Grund dafür die Anfälligkeit der Tapete für die hohe Luftfeuchtigkeit ist. Darüber hinaus fällt auf, dass bei vielen Proben ein großer Teil der Differenz nach 80 Zyklen bereits nach 40 Zyklen erreicht ist. Auch hier ist es stark von der Art der Behandlung abhängig, wie groß dieser Anteil ist. Im Durchschnitt sind bei den tapezierten Proben nur 67,11 % der Gesamtdifferenz bereits nach 40 Zyklen erreicht. Bei den gestrichenen Proben sind es 84,64 % und bei den unbehandelten Proben 89,17 %. Auch hier ist als mögliche Erklärung anzuführen, dass die Tapete am stärksten von der umgebenden Luftfeuchtigkeit beeinflusst wird. Es ist anzunehmen, dass sowohl die gestrichenen als auch die unbehandelten Proben auch bei längerem Einsatz ihre Widerstände nicht mehr erheblich ändern werden.

### **2.6.2 Untersuchung der Langzeitzuverlässigkeit bei zyklischer Aktivierung der Heizstrukturen**

In einer weiteren Langzeit-Untersuchung erfolgte die Analyse der Heizstrukturen hinsichtlich der Einschaltvorgänge über einen Zeitraum von annähernd 10 Jahren. Wird die Heizung täglich einmal aktiviert, ergeben sich bei einer durchschnittlichen Heizperiode von 185 Tagen (ca. 6 Monate) ca. 1850 Zyklen. Für die Tests wurden die zu untersuchenden Proben in einem Klimaschrank platziert und bei konstanten Umgebungsbedingungen von 5 °C und 70 Luftfeuchtigkeit, zyklisch bis zur Grenztemperatur von 50 °C (max. Dauergebrauchs-Temperatur Gipskarton [17, 18]) erwärmt. Anschließend erfolgte die erneute Abkühlung der Heizstrukturen auf 10 °C (unbeheizter Raum). Untersucht wurden plasmastrukturierte Gipskartonproben (grün, grau) nach dem Versuchsplan aus Tabelle 2 („Klimaschrank mit Strom“). Die Zeit zum Erreichen der Zieltemperatur von 50 °C betrug - wie in Abbildung 50 dargestellt - ca. 40 Sekunden, während sich die Abkühlphase zum Einstellen der Oberflächentemperatur von 5 °C auf ca. 2 Minuten beläuft.

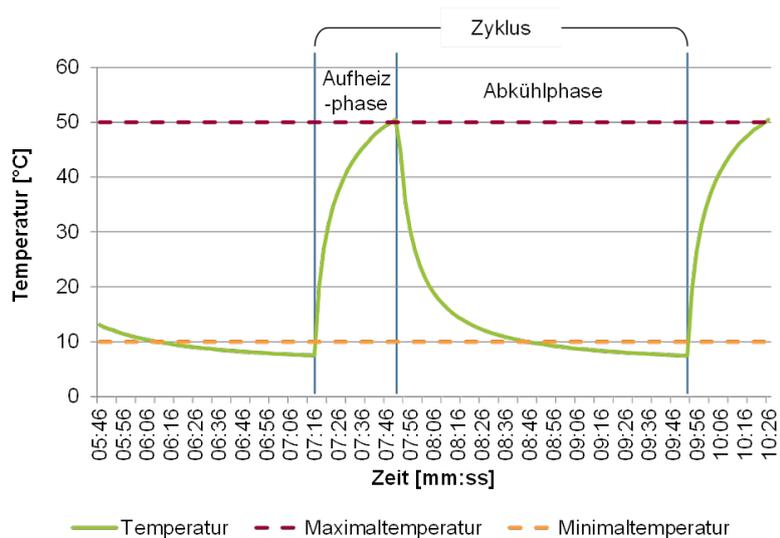


Abbildung 50: Darstellung eines Test-Zyklus im Klimaschrank, aufgeteilt in Aufheiz- und Abkühlphase

Wie in Abbildung 51 aufgezeigt, erfolgte nur eine minimale Erhöhung der elektrischen Widerstände nach 500 bzw. 1680 Zyklen, welche die Leistungsfähigkeit der Heizstrukturen nicht beeinflussen dürfte. Weiterhin zeigt die Abbildung, dass eine schützende Deckschicht der Kupferstrukturen nicht benötigt werden, bzw. aber auch keinen negativen Einfluss auf das Heizsystem auswirkt. Trotz hoher Belastungen, zeigte die additiv hergestellte Flächenheizung keine Ausfallerscheinungen, womit der Dauereinsatz des plasmabehandelten Gipskartons nachgewiesen ist.

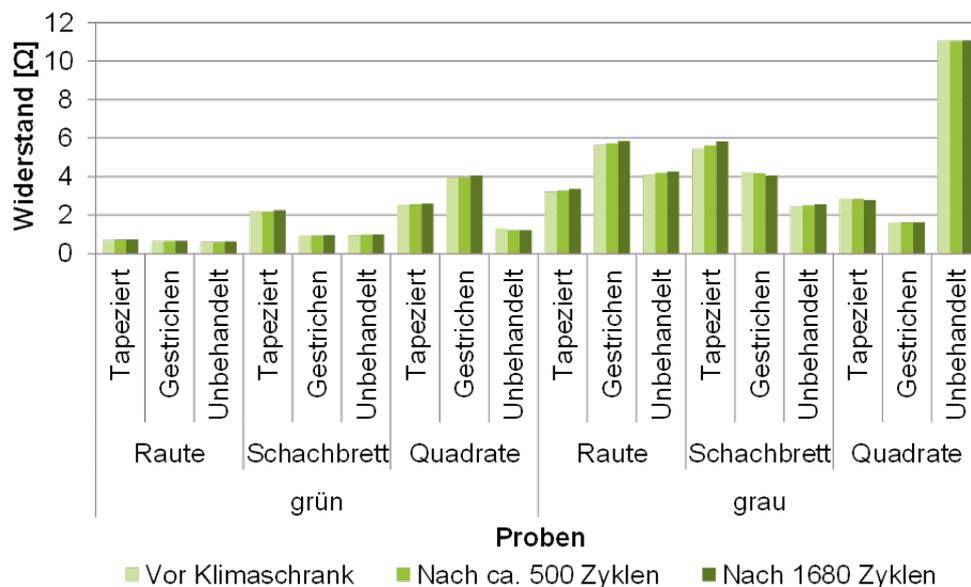


Abbildung 51: Elektrische Widerstandswerte vor, während und nach den zyklischen Belastungsuntersuchungen

## 2.7 AP 7: Erstellung eines thermischen Simulationsmodells

### 2.7.1 Ermittlung der Parameter für die Simulation

Für die Erstellung eines thermischen Simulationsmodells wurden die relevanten Daten aus AP2, welche in der Materialcharakteristik gewonnen wurden, verwendet und sind in Tabelle 7 zusammengefasst dargestellt. So ist neben der Wärmeleitfähigkeit des Gipses bzw. des Kartons (Kaschierung) als Deckschicht, der Emissionsgrad der Oberfläche und der Wärmeübergangskoeffizient der Umgebung für ein aussagekräftiges Simulationsergebnis entscheidend. Weiterhin wurden die gemessenen Werte, wie z. B. der elektrische Widerstand (aus Abbildung 28), die Geometrie der Leiterbahn (Abbildung 34) und das Aufheizverhalten (Tabelle 6) aus AP4 verwendet, welche nicht in der Literatur zu finden sind.

Tabelle 7: Die Parameter für die Simulation werden nach Literaturwerten und Versuchsmessungen eingestellt

Parameter	Wert	Bemerkung
Wärmeleitfähigkeit Gips	$0,30 \frac{W}{m \cdot K}$ (konstant)	Literaturwert: $\lambda \approx 0,29 \dots 0,58 \frac{W}{m \cdot K}$
Wärmeleitfähigkeit Karton	$0,1096 \frac{W}{m \cdot K}$ (konstant)	Berechnet, damit $\lambda_{ges} = \lambda_{GKP} = 0,27 \frac{W}{m \cdot K}$
Emissionsgrad	0,97	Homogener Emissionsgrad analog zum Versuch (schwarz lackierte Platte)
Wärmeübergangskoeffizient	$2,0 \frac{W}{m^2 \cdot K}$	Literaturwert für freie Konvektion durch ruhende Luft: $\alpha \approx 2 \dots 10 \frac{W}{m^2 \cdot K}$
Umgebungs- & Anfangstemperatur	22 °C	Analog zum Versuch

### 2.7.2 Aufbau eines Simulationsmodells anhand von thermischen Untersuchungen

Aus den Aufnahmen der Wärmebildkamera (Abbildung 41, Abbildung 42) wurde das reale thermische Verhalten der additiv erzeugten Plasmastruktur in ein Modell innerhalb des Simulationsprogrammes ANSYS übertragen. Als Substratmaterial fand die Gipskartonplatte „Diamant GFKI 12,5“ der Firma Knauf Gips KG Anwendung. In Abbildung 52 rechts sind die mittels Wärmebildkamera aufgenommenen Werte der Temperaturverteilung der Heizstruktur auf dem Gipskarton dargestellt, während sich auf der linken Seite der Abbildung das daraus generierte Simulationsmodell findet. Zur Gewinnung einer breiten Datenbasis wurde die Probe in definierten Schritten bis auf die gewünschte Zieltemperatur von 100 °C aufgeheizt.

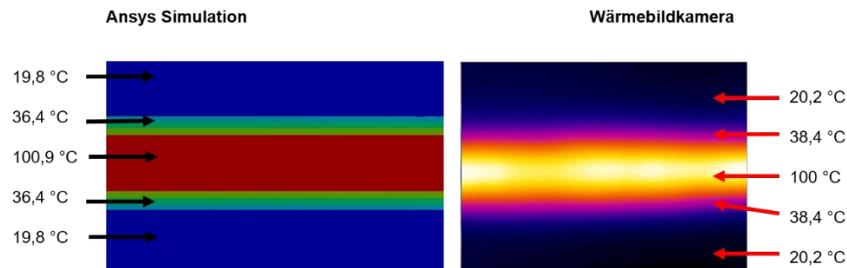


Abbildung 52: Generierung eines Simulationsmodells (links) anhand realer Messdatenerfassung durch eine Wärmebildkamera (rechts)

Mit den ermittelten Daten kann im „DesignModeler“ innerhalb des Simulationsprogrammes ANSYS die Geometrie erstellt werden. Zunächst wurde der Probekörper mit 150 mm Breite, 150 mm Länge und 12,5 mm Höhe skizziert und extrudiert. Die Kupferleiterbahn wurde im Vorversuch mit dem Beschichtungs-Layout „Schlangen-Struktur“ aufgebracht. Die Bahn ist insgesamt ca. 1085 mm lang, 8 mm breit und 0,1 mm hoch. Auch diese wurde erst skizziert und anschließend extrudiert. Um ein voll definiertes CAD-Modell zu erhalten, war es notwendig, die beiden Volumenkörper zu einer Baugruppe zusammen zu fügen. Diese ist in Abbildung 53 (links) dargestellt.

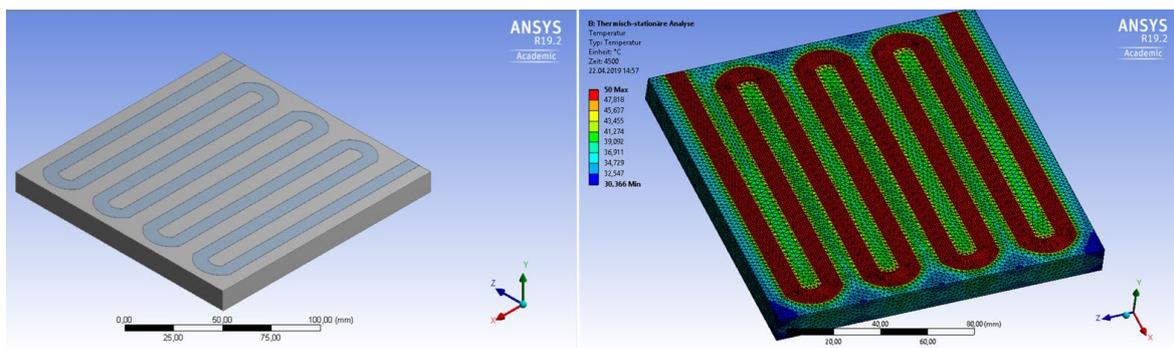


Abbildung 53: Erstellung des geometrischen Modells (links) und fertiges Simulationsmodell mit 50 °C Leiterbahntemperatur (rechts)

Im nächsten Schritt wurden die Einstellungen zur Generierung des Netzes festgelegt. Anschließend wurden die Lasten auf die Geometrie aufgetragen. Als Anfangstemperatur wurden 20°C hinterlegt. Das entspricht der Umgebungstemperatur des realen Versuchsaufbaus.

Als erste Last wurde die Temperatur auf die Kupferleiterbahn aufgetragen, indem die Geometrie der Heizstruktur dazu ausgewählt wurde. Die Randbedingung wurde auf den gesamten Volumenkörper angewendet. Die Temperatur betrug 50 °C und entspricht der Leiterbahntemperatur, die im realen Versuchsaufbau im stationären Zustand gemessen wurde. Weiterhin wurden noch die Konvektion und Strahlung als Lasten aufgetragen. Mit diesen Einstellungen kann das System gelöst werden. In Abbildung 53 (rechts) ist die Wärmeverteilung der Probe nach Einstellung aller Parameter dargestellt.

### 2.7.3 Validierung der Simulationsergebnisse mit den Messungen aus den praktischen Versuchen

Abbildung 54 zeigt die Validierung des erstellten Simulationsmodells mit den realen Messungen mittels Infrarot-Wärmebildkamera. Dafür wurde die Leiterbahnoberfläche und die Materialoberfläche zwischen den Heizstrukturen gemessen. Es wurden jeweils die Werte des realen Modells bei 40 °C, 50 °C bzw. 60 °C (aus Abbildung 41, Abbildung 42) mit den Werten der Simulationsergebnisse verglichen. Es zeigt sich eine annähernde Übereinstimmung der Ergebnisse mit einer Differenz von ca. 2 °C, welche im Toleranzbereich der Wärmebildkamera liegt. Somit konnte ein validierbares Modell erstellt werden, das sich für weitere Untersuchungen eignet.

Vorderseite	$T_{\max} = 40\text{ °C}$	$T_{\max} = 50\text{ °C}$	$T_{\max} = 60\text{ °C}$																								
Wärmebildkamera-Messung																											
Simulationsergebnis für die Vorderseite	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Results</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>P Minimum</td> <td>26,809 °C</td> </tr> <tr> <td>P Maximum</td> <td>40, °C</td> </tr> <tr> <td>P Average</td> <td>29,946 °C</td> </tr> </tbody> </table>	Results		P Minimum	26,809 °C	P Maximum	40, °C	P Average	29,946 °C	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Results</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>P Minimum</td> <td>29,233 °C</td> </tr> <tr> <td>P Maximum</td> <td>50, °C</td> </tr> <tr> <td>P Average</td> <td>34,128 °C</td> </tr> </tbody> </table>	Results		P Minimum	29,233 °C	P Maximum	50, °C	P Average	34,128 °C	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Results</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>P Minimum</td> <td>31,49 °C</td> </tr> <tr> <td>P Maximum</td> <td>60, °C</td> </tr> <tr> <td>P Average</td> <td>38,148 °C</td> </tr> </tbody> </table>	Results		P Minimum	31,49 °C	P Maximum	60, °C	P Average	38,148 °C
Results																											
P Minimum	26,809 °C																										
P Maximum	40, °C																										
P Average	29,946 °C																										
Results																											
P Minimum	29,233 °C																										
P Maximum	50, °C																										
P Average	34,128 °C																										
Results																											
P Minimum	31,49 °C																										
P Maximum	60, °C																										
P Average	38,148 °C																										
Unterschied der Minimaltemperaturen	$29,1\text{ °C} - 26,809\text{ °C} = 2,291\text{ °C}$ <b>OK</b>	$31,5\text{ °C} - 29,233\text{ °C} = 2,267\text{ °C}$ <b>OK</b>	$33,9\text{ °C} - 31,490\text{ °C} = 2,410\text{ °C}$ <b>OK</b>																								

Abbildung 54: Vergleich der Simulationsergebnisse der Heizstruktur auf Gipskarton mit den realen Ergebnissen aus Messungen mittels Wärmebildkamera

### 2.7.4 Ermittlung der Leiterbahnabstände bei Variation der Oberflächentemperaturen

Im Folgenden werden im Simulationsmodell verschiedene Heizstrukturen-Abstände bei unterschiedlichen Leiterbahntemperaturen hinsichtlich der Wärmeverteilung innerhalb der Gipskartonplatte simulativ betrachtet. Ziel war die simulative Auslegung des Heizsystems nach vorgegebenen Randbedingungen, ohne eine aufwendige und teure Versuchsreihe durchführen zu müssen. In Abbildung 55 ist die Materialerwärmung des Gipskartons und der entsprechenden Oberfläche exemplarisch dargestellt.

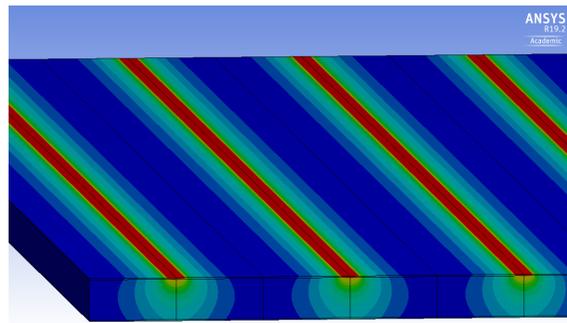


Abbildung 55: Wärmeverteilung in der Gipskartonplatte nach dem Aufheizen der plasmaerzeugten Leiterbahnstrukturen

In Abbildung 56 sind in einer Matrix-Darstellung verschiedene Leiterbahnabstände mit jeweils unterschiedlichen Heizleistungen bzw. Oberflächentemperaturen gegenüber aufgetragen. Soll möglichst viel Wärme in einen Raum eingebracht werden und dennoch die maximale Oberflächentemperatur von 40 °C nicht überschritten werden, bietet sich ein Leiterbahnabstand von 25 mm an. Soll die Wärme möglichst gleichmäßig im Raum über eine große Fläche eingebracht werden, eignet sich beispielsweise ein Abstand von 100 mm.

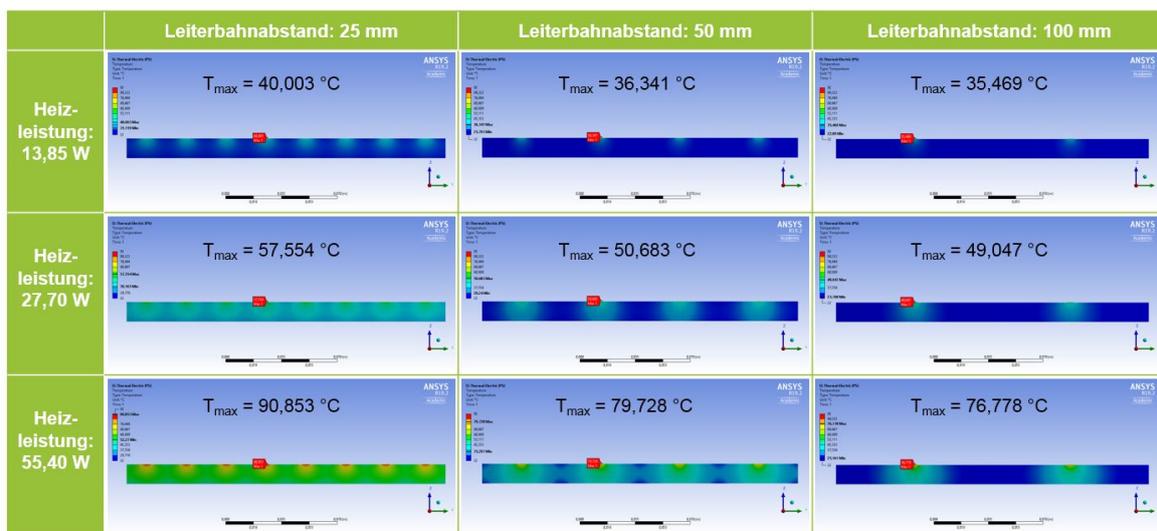


Abbildung 56: Matrix zu Auswirkungen des Leiterbahnabstands und der Heizleistung auf die maximale Leiterbahntemperatur sowie die Temperaturverteilung über den Querschnitt

## 2.8 AP 8: Entwicklung von Kontaktierungsmöglichkeiten

Die elektrische Kontaktierung soll eine gute Leitfähigkeit sowie eine geringe Erwärmung innerhalb der Verbindungsstelle garantieren. Hierzu wurden unterschiedliche Verbindungstechniken und Verbindungsmedien eingesetzt und bewertet. Einen wesentlichen Punkt stellte ein möglichst geringer elektrischer Eigenwiderstand dar, wodurch ein zu starkes Erwärmen des Verbindungsmediums verhindert wird. Eine zu

starke Erwärmung könnte zur Beschädigung des Innenraums innerhalb eines Gebäudes führen oder ein Durchbrennen der Heizstruktur zur Folge haben. Aufgrund dessen, dass die Oberfläche die abschließende Schicht zum Innenraum bildet, auf welche beispielsweise eine Tapete direkt aufgetragen werden kann, musste das Auftragen des Verbindungsmediums möglichst dünnschichtig erfolgen. Hierdurch sollte das Ausbilden von Konturen an der Oberfläche verhindert werden. Weiterhin musste eine mechanische Festigkeit garantiert werden, so dass bei Einwirkungen geringer Belastungen auf die Verbindungsstelle die Funktionalität weiterhin gewährleistet bleibt. Belastungen können zum Beispiel durch Materialausdehnungen des Trägermaterials erfolgen, welche durch die Wechselwirkungen von Wärme und Kälte hervorgerufen werden. Ein weiteres Merkmal für eine qualitativ hochwertige, elektronische Verbindung ist ein geringer Kontaktwiderstand zwischen dem Verbindungsmedium und der Kupferleiterbahn. Hieraus resultiert eine geringe Wärmeausbildung im Bereich des Verbindungsmediums.

Um die Anforderungen an eine elektrische Kontaktierung erfüllen zu können, wurden geeignete Verbindungsverfahren sowie -medien herangezogen und genauer betrachtet. Neben den technischen Anforderungen ist auf die Umsetzbarkeit, sprich die Herstellung der elektrischen Kontaktierung unter Baustellenbedingungen, zu achten. Neben der elektrischen Kontaktierung ohne Verbindungsmedium, wurden weiterhin folgende drei Verbindungsmedien herangezogen:

- Lot
- Kupferfolie
- Silberleitkleber

Diese drei Materialien weisen einen sehr geringen spezifischen Widerstand auf, weshalb sie für die Versuchsdurchführung attraktiv erschienen. Zu erwarten war ein geringer Eigenwiderstand der Materialien, welcher eine geringe Erwärmung der Verbindungsstellen zur Folge hatte. Nachfolgende Tabelle 8 zeigt die Werte des spezifischen Widerstands von Lot, Kupferfolie und Silberleitkleber sowie die Werte des Durchgangswiderstands der Klebeschicht einer Kupferfolie bei Raumtemperatur auf.

Tabelle 8 : Spezifischer elektrischer Widerstand und Durchgangswiderstand geeigneter Verbindungsmedien bei Raumtemperatur

Verbindungsmedium	Spezifischer Widerstand in $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$	Durchgangswiderstand in $\Omega$
<b>Lot (Sn97,1 AG2,6 Cu0,3)</b>	0,13	-
<b>Kupferfolie (3M, Nr. 1181)</b>	0,0171	0,005
<b>Silberleitkleber (PC 3001)</b>	0,003	-

### 2.8.1 Herstellung der Probenplatten

Zur Durchführung der Kontaktierungsversuche war es notwendig, Probenplatten aus Gipskarton („GKBI“ grün) herzustellen. Diese stellen mit den Abmaßen von 50 x 100 mm<sup>2</sup> die Ausgangsform für jede Probenplatte dar. Je nach Formgebung, wie in Abbildung 57 dargestellt (Gerader Stoß, Falzverbindung, Schräger Stoß, Feder-Nut-Verbindung), erfolgte eine entsprechende Weiterverarbeitung der jeweiligen Probenplatten. Ein Auszug der technischen Zeichnungen für die Herstellung der Probenplatten ist in Abbildung 57 zu entnehmen.

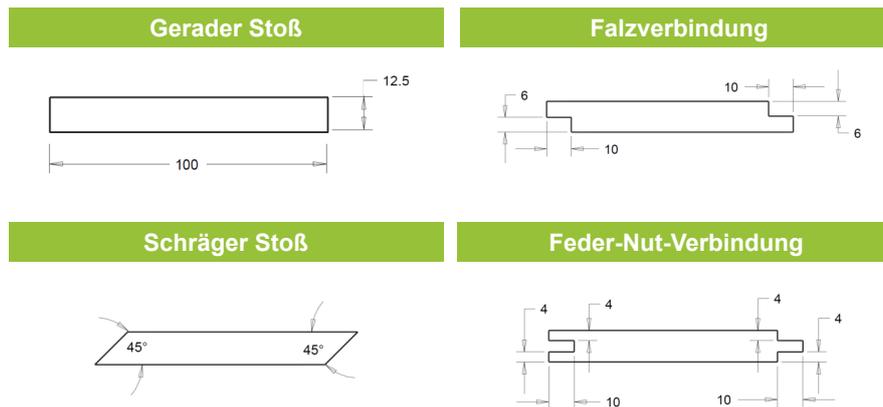


Abbildung 57: Auszüge aus den technischen Zeichnungen zur Fertigung von Probenplatten aus Gipskarton mit unterschiedlichen Verbindungsformen (in mm)

### 2.8.2 Ergebnisse der beschichteten Probenplatten ohne Verbindungsmedium

Zur Evaluierung der beschichteten Probenplatten wurden diese dahingehend überprüft, ob eine elektrische Leitfähigkeit über die gesamte Leiterbahn hinweg gewährleistet ist. Hierzu wurde eine elektrische Widerstandsmessung über drei verschiedene Bereiche hinweg durchgeführt. Zum einen an der Oberseite, zum anderen an der Verbindungsfläche sowie an der Oberseite über die Verbindungskante zur Verbindungsfläche hinweg. Wurde bei dieser Vierpunktmessung ein elektrischer Widerstand nachgewiesen, ist die aufgetragene Leiterbahn elektrisch leitfähig. Abbildung 58 zeigt diese Messbereiche zur besseren Verständlichkeit am Beispiel des schrägen Stoßes auf.

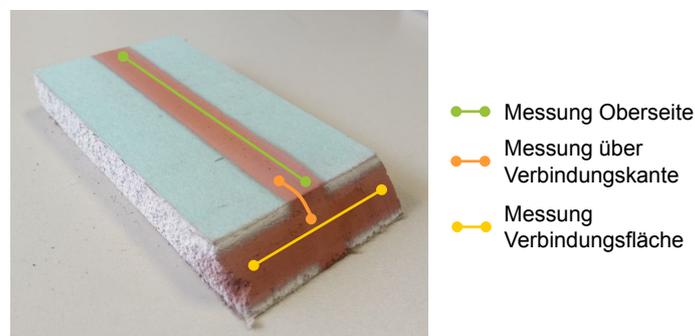


Abbildung 58: Messpunkte zum Nachweis der elektrischen Leitfähigkeit am Beispiel des schrägen Stoßes

Für alle Probenplatten aus Gipskarton konnte eine erfolgreiche Messung an der Oberseite der Proben durchgeführt werden. Demnach konnte eine elektrische Leitfähigkeit erfolgreich nachgewiesen werden. Bei einer aufgetragenen Kupferschicht an der Verbindungsfläche konnte die elektrische Leitfähigkeit nur bei neun von zwölf Proben nachgewiesen werden (Tabelle 9 „Verbindungsfläche“).

Wird die Leitfähigkeit über die Verbindungskante hinaus betrachtet, wiesen vier von zwölf Messungen einen Widerstand auf (Tabelle 9 „Verbindungskante“). Die Rundung an den Kanten scheint in diesem Fall ein entscheidendes Kriterium für die Leitfähigkeit darzustellen. So konnte lediglich bei den Probenplatten mit einer abgerundeten Kante eine funktionsfähige Leiterbahn aufgetragen werden. In Tabelle 9 wird die Anzahl der erfolgreichen Messungen aufgelistet. Als Resultat der Versuche kann zusammengefasst werden, dass eine Verbindung ohne Verbindungsmedium aufwendig in der Vorbereitung (präparieren der Kanten) ist und keine zuverlässige Funktionsweise garantieren kann.

Tabelle 9: Zusammenfassende Betrachtung der elektrischen Leitfähigkeit von unterschiedlichen elektrischen Verbindungen von Flächenheizsegmenten ohne Verbindungsmedium

Geometrie	Ausprägung	Proben-Nr.	Oberseite	Verbindungsfläche	Verbindungskante
<b>Gipskarton, imprägniert</b>					
Gerader Stoß	Spitze Kante	1	✓	✓	x
	Spitze Kante	2	✓	x	x
	Spitze Kante	3	✓	✓	x
	Abgerundete Kante	4	✓	x	x
	Abgerundete Kante	5	✓	✓	✓
	Abgerundete Kante	6	✓	✓	✓
Schräger Stoß	Spitze Kante	7	✓	✓	x
	Spitze Kante	8	✓	✓	x
	Spitze Kante	9	✓	x	x
	Abgerundete Kante	10	✓	✓	✓
	Abgerundete Kante	11	✓	✓	✓
	Abgerundete Kante	12	✓	✓	x

Die Vor- und Nachteile der Kontaktierung ohne Verbindungsmedium werden beim geraden als auch beim schrägen Stoß ersichtlich. Abbildung 59 zeigt die Kontaktierung dieser beiden Verbindungsformen auf. Beim geraden Stoß ist hierbei zu erkennen, dass eine ungenaue Montage der Probenplatten eine Lückenbildung nach sich zieht. Dies resultiert hauptsächlich daher, dass die Probenplatten lediglich durch Druckkräfte

auf der Holzunterkonstruktion fixiert werden. Eine Fixierung in Querrichtung liegt nicht vor. Es erfolgte somit kein Anpressen der Verbindungsflächen. Zum Sicherstellen einer funktionsfähigen Verbindung muss beim geraden Stoß eine sehr genaue Montage erfolgen. Bei der Montage des schrägen Stoßes drückt die Anziehungskraft die abgeschrägte Verbindungsfläche der einen Probenplatte auf die Darunterliegende. Neben der Fixierung entsteht folglich eine Anpresskraft. Hierdurch kann eine elektrische Kontaktierung stets gewährleistet werden.

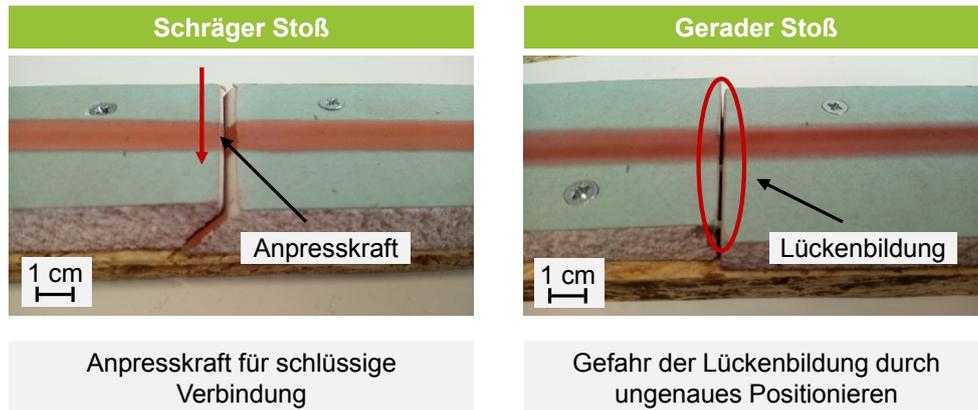


Abbildung 59: Kontaktierung zweier Heizsegmente auf Gipskarton ohne Verbindungsmedium beim schrägen Stoß (links) und geraden Stoß (rechts)

Aufgrund der teilweise sehr unzuverlässigen Verbindungen werden Kontaktierungen ohne Verbindungsmedien nicht für den praktischen Einsatz empfohlen und finden in diesem Forschungsprojekt keine weitere Berücksichtigung.

### 2.8.3 Verbindungsverfahren zur elektronischen Kontaktierung mit Verbindungsmedium

#### Löten

Lötverbindungen zählen zu den stoffschlüssigen Verbindungsformen, weshalb ein geringer elektrischer Kontaktwiderstand zwischen Leiterbahn und Lot zu erwarten war. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein bleifreies Lot mit der chemischen Zusammensetzung von 97,1 % Zinn, 2,6 % Silber und 0,3 % Kupfer der Firma MULTICOMP verwendet. Dieses besitzt im aufgewickelten Rohzustand einen Nenndurchmesser von 1 mm und eine Schmelztemperatur von 217 °C.

Beim Auftragen des Lötzinns kam das Weichlöten zum Einsatz. Hierbei wurde der Kolben auf eine Temperatur von ca. 240 °C erhitzt. Um die beiden Fügeteile vorzuwärmen, wurde die Lötspitze des LötKolbens mit etwas Lötzinn vorverzinnt und auf die Probenplatten gepresst. Anschließend wurde eine definierte Menge an Lot hinzugegeben, wobei darauf zu achten war, dass ein Kontakt zwischen Lot und den vorgewärmten Fügestellen besteht. Damit eine Reproduzierbarkeit hinsichtlich der gleichen Lotmenge sichergestellt werden konnte, erfolgte eine Portionierung des Lötzinns mittels Markierungen. Sobald das Lot aufgeschmolzen war und auf der Fügestelle zerfloss,

wurde der LötKolben von der Fügestelle zurückgezogen. Durch das Erstarren des aufgetragenen Lotes bildete sich die Lötverbindung aus.

Das Lot wurde auf zwei verschiedene Verbindungsformen aufgetragen, welche dem geraden Stoß ohne und mit Fase entsprachen (siehe Abbildung 57). Bei dem geraden Stoß ohne Fase wurden an der Oberseite der Probenplatten die beiden Kupferbahnen miteinander verbunden. Demgegenüber erfolgte beim geraden Stoß mit einer Fase das Auftragen der Lötverbindung innerhalb der v-förmigen Vertiefung. Abbildung 60 zeigt die jeweils aufgetragenen Lötverbindungen bei den beiden Verbindungsarten auf.

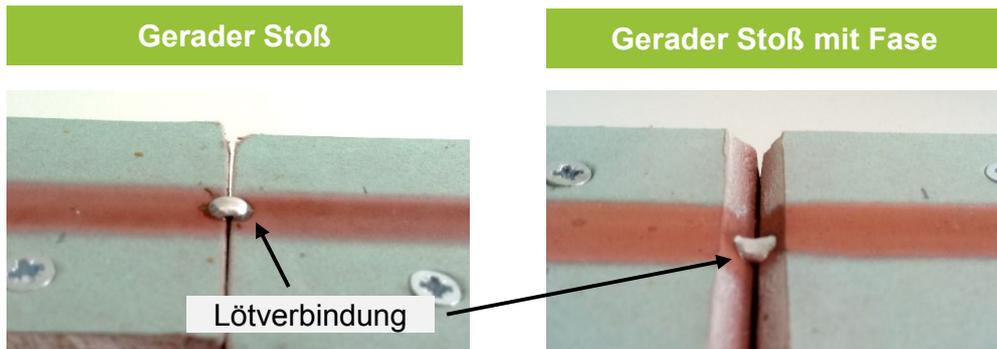


Abbildung 60: Aufgetragene Lötverbindung beim geraden Stoß mit sowie ohne Fase

Wurde Lot als Verbindungsmedium verwendet, bestand aufgrund der stoffschlüssigen Verbindung keine Gefahr einer Lückenbildung. Das Lötten auf einer Kupferleiterbahn erwies sich als äußerst leicht, wodurch mit wenig Aufwand eine elektrische Kontaktierung hergestellt werden konnte. Es konnte zu keinem Zeitpunkt eine fehlerhafte Kontaktierung festgestellt werden, weshalb sich diese Art der Kontaktierung als äußerst erfolgreich herausgestellt hat.

Jedoch wurde bei dieser Kontaktierungs-Art eine neue Problematik ersichtlich, welche in Abbildung 61 (links) aufgezeigt wird. So zeichnete sich durch das Aufbringen des Lotes beim geraden Stoß eine Erhöhung an der Oberfläche ab. Auf Basis mikroskopischer Untersuchungen ließ sich eine Profilhöhe des Lotes von 1,78 mm messen. Aufgrund dieser Erhöhung würden sich beim Tapezieren, als auch beim Streichen Konturen abbilden. Weiterhin ist das Lot auf der Oberfläche ungeschützt, was die Kontaktierung anfällig für Beschädigungen macht. Beim geraden Stoß mit Fase stellt die v-förmige Vertiefung einen Schutz für die Kontaktierungsstelle dar. Hierbei bilden die beiden Fasen eine v-förmige Vertiefung, in welcher das Auftragen des Lotes erfolgte. Liegt somit die Verbindung unterhalb der Gipskarton-Oberfläche, kann die Fase weiterhin verspachtelt werden, wodurch sichtbare Konturen vermieden werden.

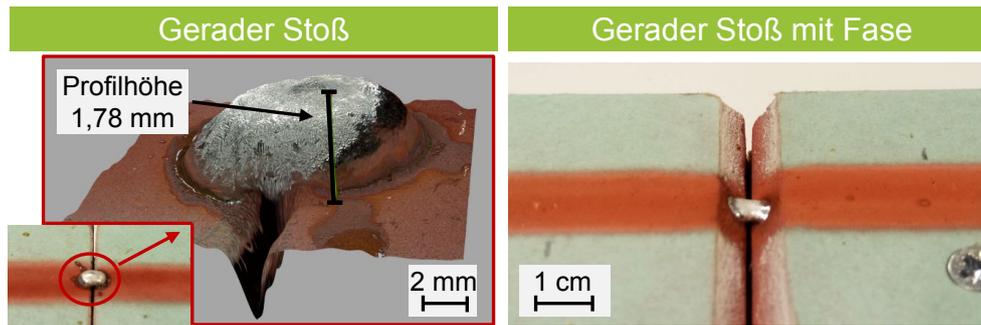


Abbildung 61: Kontaktierung mit Lot als Verbindungsmedium beim geraden Stoß (links) und beim geraden Stoß mit Fase (rechts)

Trotz der guten elektrischen Verbindung eignet sich diese Verbindungs-Art aufgrund der Vorbereitung der Gipskartonkanten und der aufwendigen und teilweise gefährlichen Verarbeitung des Lotes, nicht für den Einsatz unter Baustellenbedingungen.

### Silberleitkleber

Neben Lot ist Silberleitkleber ebenfalls als Verbindungsmedium für eine stoffschlüssige Verbindung geeignet. Zur Anwendung kam der Silberleitkleber PC 3001 der Firma Heraeus. Bei dem Silberleitkleber PC 3001 handelt es sich um einen thermisch härtenden Polymer-Silberleitkleber, welcher sich durch ein geringes Ausgasen, einer niedrigen ionischen Verunreinigung und einer hohen Zuverlässigkeit auszeichnet. Dieser härtet bei einer Temperatur von 150 °C innerhalb von zehn Minuten und bei einer Temperatur von 120 °C innerhalb von 20 Minuten aus. Der Silberleitkleber verfügt über einen Silber-Massenanteil von  $81,5 \pm 1,5 \%$  und besitzt eine Dichte von  $4,4 \text{ g/cm}^3$ .

Zur Vorbereitung muss der Silberleitkleber PC 3001 aus seinem tiefgekühlten Zustand auf Raumtemperatur erwärmt werden, wofür dieser für mindestens eine Stunde aus der Tiefkühltruhe entnommen werden muss. Das Auftragen des Silberleitklebers erfolgte mithilfe des Dispenser MARTIN. Durch die am Dispenser angeschlossene Kartusche wurde der Silberleitkleber mit einer Düse, welche einen Durchmesser von 0,5 mm aufwies, auf die Proben aufgetragen. Das Auftragen einer stetig gleichbleibenden Menge des Silberleitklebers wurde durch Einstellmöglichkeiten des Dispensdrucks, der Dispenszeit sowie der Viskosität gewährleistet. Der Aufbau des Dispenser MARTIN sowie das Auftragen des Silberleitklebers können Abbildung 62 entnommen werden. Eine abschließende Aushärtung des Silberleitklebers erfolgte im Trockenschrank der Firma BINDER. Dieser wurde hierzu auf eine Temperatur von 150 °C vorgeheizt, so dass die Proben darin innerhalb von 15 - 20 Minuten ausgehärtet werden konnten.

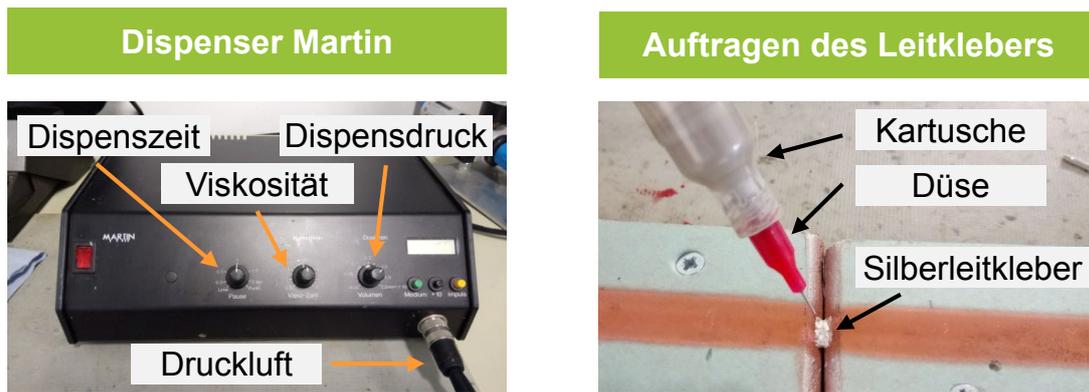


Abbildung 62: Funktionalität des Dispenser Martin (links) und das Auftragen des Silberleitklebers (rechts)

Die Abbildung 63 zeigt eine Gegenüberstellung einer qualitativ hochwertigen sowie mangelhaften Kontaktierungsstelle auf, bei welcher eine Rissbildung im Randbereich festzustellen war. Die Rissbildung ist nicht lokal beschränkt, sondern erstreckt sich über die gesamte Breite des aufgetragenen Silberleitklebers. Zu vermuten ist, dass der Ursprung der Rissbildung im Aushärtungsprozess lag, bei welchem Materialschwung auftrat. Weiterhin ist zu bemerken, dass die Stärke der Rissbildung mit der Größe der aufgetragenen Fläche zusammenhing. Je breiter und großflächiger das Auftragen des Silberleitklebers erfolgte, desto stärker ist die Rissbildung. Es ist zu vermuten, dass beim Aushärtungsvorgang das Eigengewicht des aufgetragenen Silberleitklebers diesen nach unten zieht. Der Kleber konnte sich nicht an Ort und Stelle halten und floss in geringem Umfang auf die Seiten. Der Silberleitkleber befand sich folglich in Bewegung, während der Aushärtungsvorgang noch nicht abgeschlossen war, wodurch die Rissbildung zustande kam.

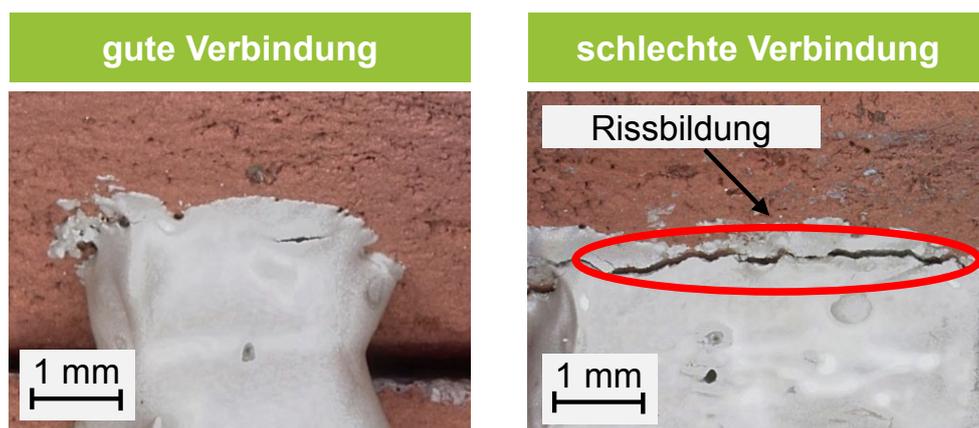


Abbildung 63: Gute (links) und schlechte (rechts) Verbindungsstelle mit Silberleitkleber als Verbindungsmedium

Aufgrund der notwendigen Aushärtung des Silberleitklebers ist dieser als Verbindungsmedium unter Baustellenbedingungen eher untergeordnet zu betrachten und wird im weiteren Verlauf nicht weiterverfolgt.

## Kupferfolie

Kupfer weist ebenfalls einen sehr geringen, spezifischen elektrischen Widerstand auf. In Betracht gezogen wurde daher eine elektrische Kontaktierung mittels einer aufgetragenen Kupferfolie. Dabei wurde auf die selbstklebende Kupferfolie der Firma 3M, mit einer Bandbreite von 12 mm, zurückgegriffen. Das Trägermaterial besteht aus einer glatten Kupferschicht und verfügt über einen leitfähigen Acrylklebstoff. Folglich konnte die selbstklebende Kupferfolie mit etwas Anpressdruck manuell aufgebracht werden. Die selbstklebende Kupferfolie verfügt über eine Dicke von 0,66 mm, weshalb auf der Oberseite der Probenplatten mit keinen sichtbaren Konturen zu rechnen war. Die Klebeschicht besitzt eine Dicke von 0,036 mm und einen Durchgangswiderstand von 0,005 Ohm. Die selbstklebende Kupferfolie besitzt eine Klebkraft von 3,8 N/cm sowie eine Reißkraft von 44 N/cm und ist mit einer Gebrauchstemperatur von bis zu 150 °C für eine elektrische Kontaktierung geeignet.

Bei der Kontaktierung der Probenplatten mit einer Kupferfolie erfolgte zunächst die exakte Positionierung dieser Folie und anschließend das Aufkleben durch eine manuell erzeugte Anpresskraft. Eine vorbereitende Maßnahme stellte das maßgenaue Zerteilen der Kupferfolie in Streifen dar. Für jeden Streifen wurde eine Länge von vier Zentimetern gewählt. Die Breite der Kupferfolie beträgt 12 mm und entspricht damit der Breite einer Leiterbahn. Zum Auftragen wurde die schützende Folie der klebenden Seite langsam abgezogen und unter leichtem Anpressdruck auf die Leiterbahn angebracht. Eine Kontaktierung mit Kupferfolie bedarf keiner Vorbereitung der Proben, so dass dies bei Gipskartonproben mit geradem Stoß erfolgen konnte. Abbildung 64 zeigt das Aufbringen der Kupferfolie auf einer plasmabeschichteten Gipskartonprobe auf.

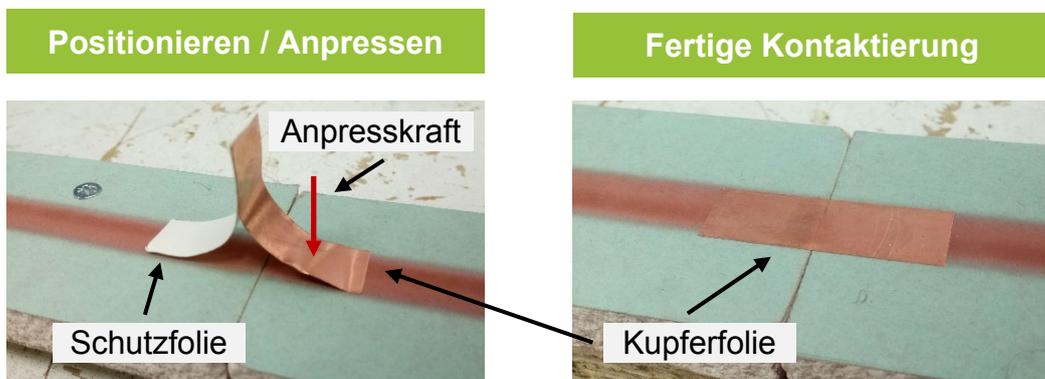


Abbildung 64: Aufkleben der Kupferfolie durch Positionierung und Anpressen (links) und fertiger elektrischer Kontaktierung (rechts) bei Gipskartonproben mit geradem Stoß

Bei der selbstklebenden Kupferleitfolie ist insbesondere im Schnitt- sowie Randbereich eine größere Profilhöhe zu verzeichnen. Abbildung 65 zeigt eine gute Ausprägung der Schnitt- und Randbereiche im Vergleich zu einer unzureichenden auf. Hierbei wurde bei der unzureichenden Ausprägung eine Profilhöhe, ausgehend von der Oberseite der Gipskartonplatte, von 167 µm gemessen, während bei einer guten Ausprägung

eine Profilhöhe von 111  $\mu\text{m}$  verzeichnet werden konnte. Diese Erhöhung kann auf einen zu geringen Anpressdruck an den Schnitt- sowie Randbereichen während des Montageprozesses der Kupferleitfolie zurückgeführt werden.

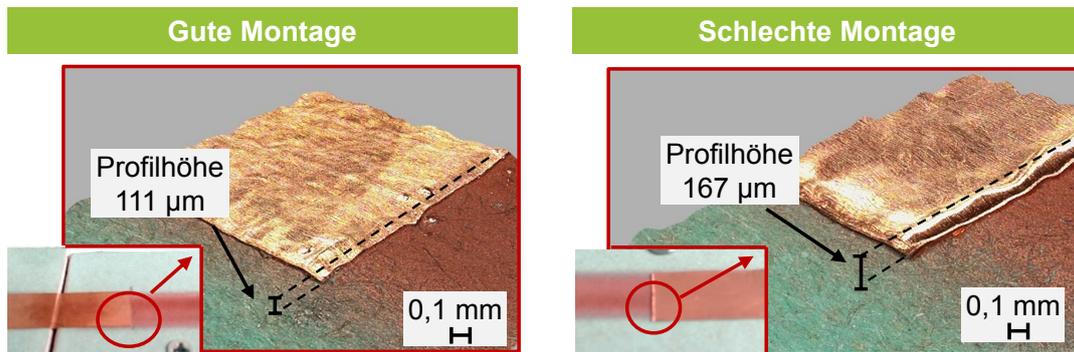


Abbildung 65: Kontaktierung mit Kupferfolie als Verbindungsmedium mit ausreichenden Anpressdruck (links) sowie einem unzureichenden Anpressdruck (rechts)

Mithilfe der Wärmebildkamera wird die Wärmeentwicklung der Kupferleitfolie in Abbildung 66 aufgezeigt. Hierbei ist erkennbar, dass die Kupferleitfolie eine Temperatur von ca. 35 bis 40  $^{\circ}\text{C}$  aufweist, während die Messung der Leiterbahntemperatur ca. 50  $^{\circ}\text{C}$  ergab. Damit ist die Voraussetzung einer geringeren Wärmeentwicklung in der Verbindungsstelle, als auf der plasmastrukturierten Heizbahn, erfüllt.

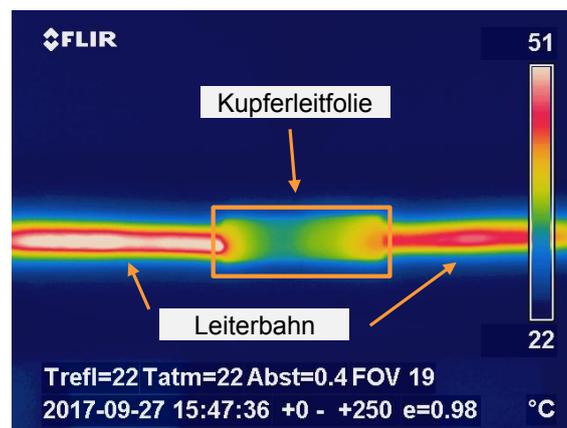


Abbildung 66: Die Aufnahme der Wärmebildkamera zeigt eine geringere Wärmeentwicklung bei Kupferleitfolie als Verbindungsmedium im Gegensatz zur Heizstruktur

Bedarf es bei der Montage der Kupferleitfolie keiner Vorbereitung des Gipskarton-Bassissubstrates sowie keiner weiteren Werkzeuge oder Fachwissen zur Verarbeitung des Verbindungsmediums, stellte sich diese Verbindungsart als die Vielversprechendste heraus. Weiterhin ist durch den im Vergleich geringeren elektrischen Widerstand der Folie als bei Heizstruktur, eine geringere Wärmeentwicklung zu beobachten, womit die Anforderung an eine elektrische Verbindungsart weiterhin erfüllt ist.

### 2.8.4 Elektrische Untersuchung der Verbindungs-Arten

Abbildung 67 gibt einen Überblick über die durchschnittlichen Kontaktwiderstände der eingesetzten Verbindungsmedien wieder. Diesem Balkendiagramm ist zu entnehmen, dass die niedrigsten Kontaktwiderstandswerte beim Lötzinn sowie Silberleitkleber vorliegen. Beim geraden Stoß mit Fase weist das Lötzinn einen durchschnittlichen Kontaktwiderstand von  $0,0054 \Omega$  mit einer Standardabweichung von  $0,0058 \Omega$  auf. Dies stellt das beste Ergebnis dar. Beim geraden Stoß weist das Lötzinn einen höheren Kontaktwiderstand von  $0,0087 \Omega$  mit einer Standardabweichung von  $0,0057 \Omega$  auf. Diesen Werten folgt der Silberleitkleber mit  $0,0063 \Omega$  und einer Standardabweichung von  $0,0058 \Omega$ . Beim schrägen Stoß wurde für die Kupferfolie ein durchschnittlicher Kontaktwiderstand von  $0,0255 \Omega$  mit einer Standardabweichung von  $0,003 \Omega$  ermittelt. Die höchsten Standardabweichungen und damit die schlechteste Reproduzierbarkeit der Verbindungen weisen Kontaktierungs-Arten ohne Verbindungsmedium (Gipskarton mit geradem und schrägen Stoß, vgl. Abbildung 59) auf. Den höchsten elektrischen Widerstand erzielte der gerade Stoß ohne Verbindungsmedium mit einem durchschnittlichen Kontaktwiderstand von  $0,084 \Omega$  und einer Standardabweichung von  $0,06 \Omega$ . Einen geringeren Kontaktwiderstandswert von  $0,0182 \Omega$ , mit einer Standardabweichung von  $0,019 \Omega$ , zeigte der schräge Stoß ohne Verbindungsmedium auf.

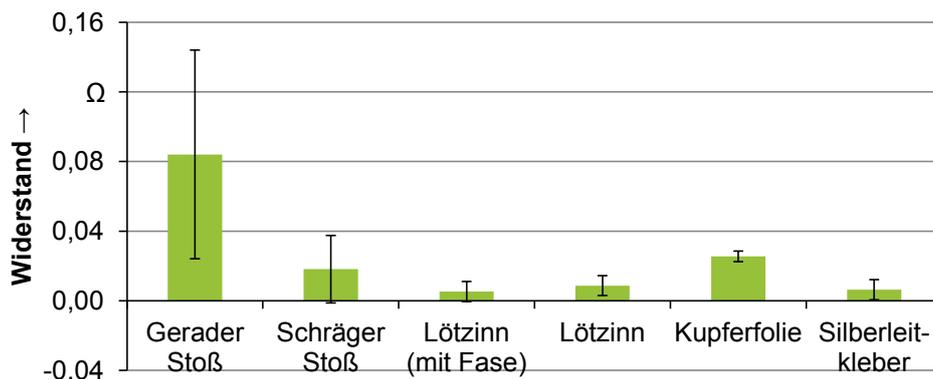


Abbildung 67: Durchschnittliche Kontaktwiderstände bei den eingesetzten Verbindungsmedien und Formgebung

### 2.8.5 Untersuchung und Vergleich der Langzeitzuverlässigkeit der elektrischen Verbindungs-Arten

Analog zu Kapitel 2.6.2 (Untersuchung der Langzeitzuverlässigkeit bei zyklischer Aktivierung der Heizstrukturen) wurde die Zuverlässigkeit der elektrischen Verbindungs-Arten in einem Klimaschrank analysiert. Dafür wurden die Proben über 2000 Zyklen hinweg von  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  auf  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  erwärmt und wieder abgekühlt. Abbildung 68 zeigt einen Vergleich der Widerstände vor und nach der Durchführung der Untersuchung im Klimaschrank.

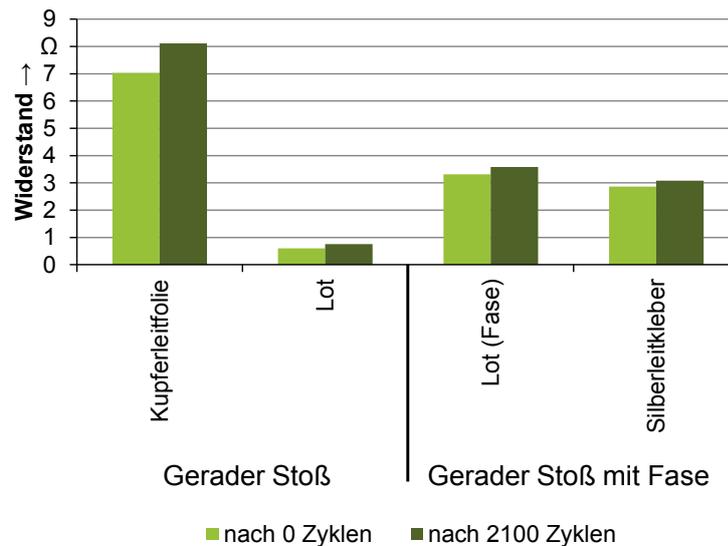


Abbildung 68: Gegenüberstellung der elektrischen Widerstände der Verbindungsarten vor und nach der Durchführung der zyklischen Aufheizuntersuchungen

Die Auswertung zeigt, dass es während der thermischen Aufheiztests zu keinem Ausfall der elektrischen Verbindungen gekommen ist. Lediglich führte die Untersuchung im Klimaschrank zu einer teilweise minimalen Erhöhung des Gesamtwiderstandes, welche vermutlich auf eine Oxidation der der Kupferstrukturen aufgrund der hohen Luftfeuchtigkeit im Klimaschrank zurückzuführen ist.

### 2.8.6 Zusammenfassende Betrachtung und Auswahl einer Verbindungs-Art zur elektrischen Kontaktierung von Flächenheizsegmenten

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass bei der Inbetriebnahme eines Wandheizsystems eine selbstklebende Kupferleitfolie mit leitendem Acrylkleber für die Kontaktierung am besten geeignet ist. Diese bietet eine hohe Montagefreundlichkeit, während eine langfristige Funktionalität im Versuch nachgewiesen werden konnte. Ein weiterer Vorteil ist der Wegfall der zusätzlichen Bearbeitung der Kanten des Gipskartons. Ausreichend hierfür sind lediglich ein gerader Stoß sowie das additive Auftragen der Kupferleiterbahn mittels Plasmabeschichtungs-Technologie.

Eine erfolgreiche praktische Umsetzung der elektrischen Verbindung mittels Kupferklebeband ist in Abbildung 69 links dargestellt. Für die elektrische Energieversorgung der Flächenheizsegmente kommen Labornetzteile zum Einsatz, welche eine für die Flächenheizsegmente individuelle Energiebereitstellung erlauben. Dabei wird das als Ankontaktierung verwendete Kupferklebeband mittels Klemmen verbunden, Abbildung 69 rechts.

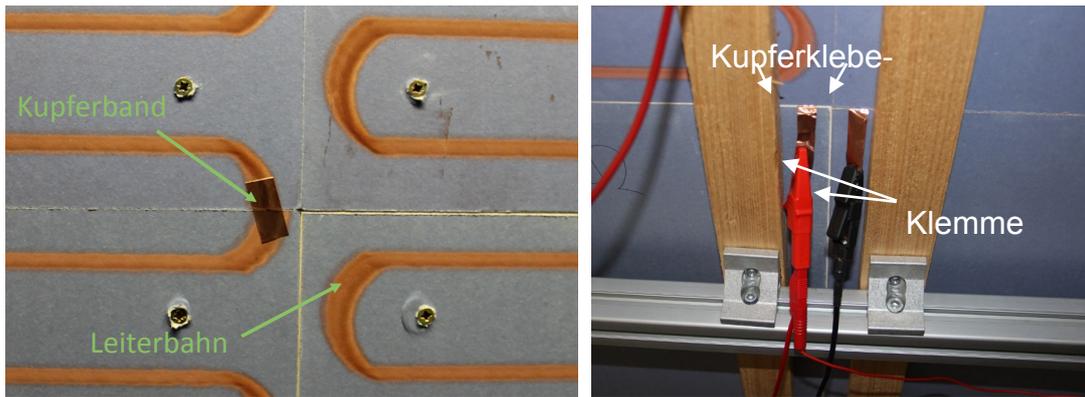


Abbildung 69: Verbindung der Flächenheizsegmente mittels Kupfer-Klebeband (links), Ankontaktierung zur Stromversorgung mittels Klemmen und Kupfer-Klebeband (rechts)

## 2.9 AP 9: Entwicklung einer geeigneten Ansteuerung und Regelung

Zur Auslegung einer geeigneten Steuerung für das Flächenheizsystem wurden zunächst die benötigten Heizflächen innerhalb eines Raumes bei unterschiedlichen energetischen Standards auf Basis der Voruntersuchungen berechnet. Zur Ansteuerung respektive Regelung der Flächenheizsegmente wurden daraufhin zwei Strategien mit dem einheitlichen Ziel verfolgt, Energie einzusparen, bei gleichzeitiger Gewährung der Bedienerfreundlichkeit. Zum einen wurde ein Personentracking-System entwickelt, das die gezielte Aktivierung der Heizsegmente nur bei Bedarf erfolgen lässt, sobald sich eine Person in definierter Nähe zum Segment befindet. Zum anderen erfolgte die Ansteuerung intuitiv innerhalb einer Smart-Home-Umgebung mittels Smartphone/Tablet.

### 2.9.1 Berechnung der Heizflächengröße in Abhängigkeit der Energieeffizienzklasse des Gebäudes

Auf Basis der Proben aus den Grundlagenuntersuchungen aus vorhergehenden Kapiteln konnte die Leistungsfähigkeit für real skalierbare Flächenheizsegmente berechnet werden. Eine 15 x 15 cm<sup>2</sup> große Gipskartonplatte („GKBI“ grün) mit Beschichtungslayout Schlangen-Struktur weist bei einer Leiterbahnlänge von ca. 1085 mm einen elektrischen Widerstand von 2,6  $\Omega$  auf und benötigt zum Erreichen einer Oberflächentemperatur von ca. 30 °C eine elektrische Leistung von 5,1 W, was einer Flächenleistung von 226 W/m<sup>2</sup> entspricht. Im Folgenden wird in Abbildung 70 die benötigte Heizfläche eines Beispielraumes von 25 m<sup>2</sup> in Abhängigkeit des jeweiligen energetischen Standards eines Hauses aufgezeigt. Wie bereits erwähnt, wurden im Zuge der Energieeinsparverordnung (EnEV) Häuser nach ihrem Jahresprimärenergiebedarf in Kilowattstunden pro Quadratmeter und Jahr eingeteilt [19, 2]. Laut [20] wird die jährliche Laufleistung der Heizung auf 1.900 Jahresvolllaststunden festgesetzt. Somit lässt sich der spezifische

Wärmebedarf in Watt pro Quadratmeter Wohnfläche errechnen, woraus sich die benötigte Größe der Wandflächenheizung bestimmen lässt, wie in Abbildung 70 dargestellt. Es wird illustriert, dass ein Passivhaus lediglich eine Heizfläche von 0,9 m<sup>2</sup> zum Erreichen der geforderten Heizleistung benötigt, während bei einem gering isolierten Gebäude eine Fläche von 7,5 m<sup>2</sup> Flächenheizung innerhalb eines 25 m<sup>2</sup> großen Raumes installiert werden müsste. Weisen derzeit gebaute Häuser meist eine Energieeffizienzklasse von A<sup>+</sup> auf, reicht eine Heizfläche von 1,8 m<sup>2</sup> aus, um selbst bei den niedrigsten anzunehmenden Temperaturen eine ausreichende Wärmemenge in das Haus einbringen zu können.

Energieeffizienzklasse	PH	A <sup>+</sup>	A		B		C		D	
Endenergie in kWh/(m <sup>2</sup> a)	< 15	30	40	50	60	75	90	100	115	130
Spez. Wärmebedarf bei 1.900 Volllaststunden in W/m <sup>2</sup>	8	16	21	26	32	39	47	53	61	68
Benötigte Fläche Wandheizung in m <sup>2</sup> bei Raum mit 25 m <sup>2</sup> Grundfläche	0,9	1,8	2,3	2,9	3,5	4,3	5,2	5,9	6,9	7,5

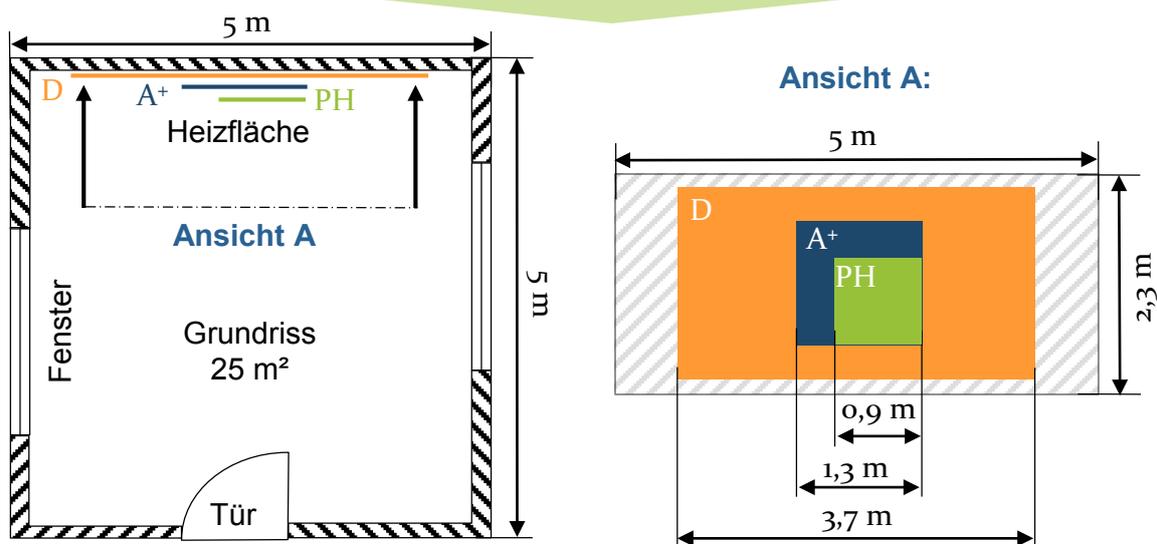


Abbildung 70: Beispielhafte Illustration der benötigten Heizflächengröße bei unterschiedlichen Energieeffizienz-Gebäudestandards

Wird bei einem Gebäude mit hohem energetischen Standard nur eine kleine Heizfläche benötigt, um ausreichend Wärmeenergie in einen Raum zu bringen, ist eine partielle Aktivierung überflüssig. Soll jedoch Wärme bei einem Gebäude mit hohem Wärmebedarf oder Raum mit großen Abmaßen eingebracht werden, bietet sich eine gezielte Aktivierung einzelner Heizsegmente an, um ein Aufheizen des gesamten Raumes zu vermeiden. Im Folgenden werden zwei Konzepte zur Ansteuerung der Flächenheizsegmente vorgestellt.

## 2.9.2 Aktivierung der Flächenheizsegmente durch Personentracking

Als Ergebnis der Analyse verschiedener Lokalisierungs-Systeme, stellte sich die optische Methode zur Personenerkennung als die Passabelste heraus. Als Sensorhardware kam das Kamerasystem Kinect v2 der Fa. Microsoft zum Einsatz, da es alle Anforderungen erfüllt und zudem als Massenprodukt zu einem akzeptablen Preis bezogen werden kann. Dieser Sensor wurde an einen Standard-PC angeschlossen, auf dem eine speziell programmierte Software läuft, welche die Messdaten auswertet, weiterverarbeitet und somit die Labornetzgeräte zur Aktivierung der Heizflächen individuell schaltet. Eine Übersicht über den Grundaufbau des Konzeptes zeigt Abbildung 71.

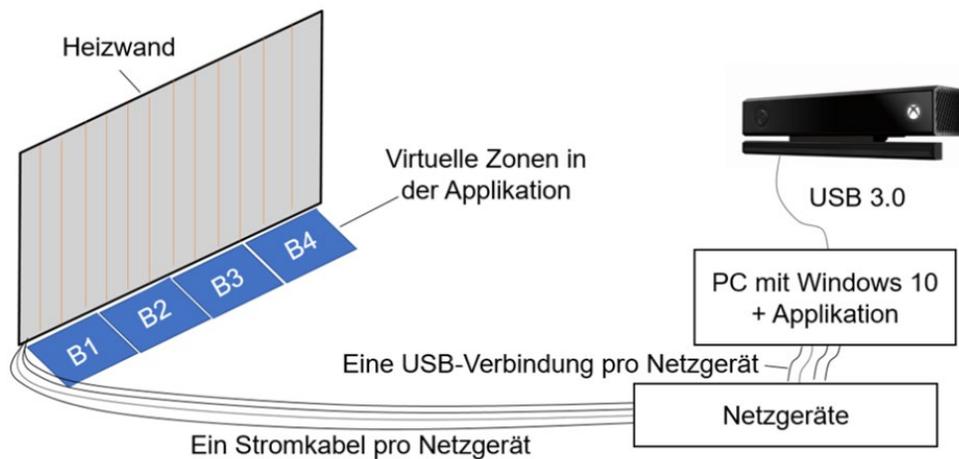


Abbildung 71: Schematischer Aufbau des Personenerkennungs-Systems zur Ansteuerung der Heizflächensegmente

Hierbei wurde der Sensor in einem Raum platziert und dessen Sichtfeld auf die betroffene Heizwand gerichtet. Anschließend wurde der Kinectsensor mit einem geeigneten PC per USB 3.0 verbunden und auf diesem die eigens programmierte Software gestartet. Diese bildete anschließend den Raum virtuell ab und zeichnet die zu trackenden Personen darin ein. In diesem virtuellen Raum kann der Nutzer bestimmte Bereiche anlegen, welches Heizsystem aktiviert werden soll, wenn sich eine Person in einem bestimmten Feld (in Abbildung 71 mit B1-B4 bezeichnet) befindet. Betritt daraufhin eine Person einen Bereich, schickt der PC ein Schaltsignal an die jeweiligen Netzgeräte, um das betroffene Heizsegment zu schalten bzw. aktivieren.

Der Kinectsensor bietet die Möglichkeit, dass bis zu sechs Personen gleichzeitig den Sichtbereich betreten können und sofort geortet werden, ohne eine vorherige Kalibrierung durchführen zu müssen. Des Weiteren kann der Sensor Gesten unterscheiden, die im Programm zur intelligenten Netzgerätsteuerung verwendet werden konnten, wie beispielsweise die Regulierung der Stromabgabe per definierter Handzeichen.

Die eigens entwickelte Programmoberfläche ist in Abbildung 72 dargestellt. Jeder Raumbereich wurde durch eine Zone in der Draufsicht abgebildet. Mit dem Klick auf den Button „Einfügen“ werden neue Raumbereiche bzw. Zonen erstellt (grüne Rechtecke). Diese wurden im oberen linken Bereich der Anwendung eingefügt und können

angeklickt werden. Mit einem Single-Klick und anschließender Betätigung der Tasten „W-A-S-D“ wird die Zone verschoben. Um ein Netzgerät einer Zone zuzuweisen, muss dieses mit dem PC per USB verbunden und die Taste N gedrückt werden. Das Windows-Betriebssystem schreibt in die ListBox alle erkannten COM-Ports hinein.

Das Personentracking erfolgt automatisch, sobald sich Personen bei eingeschaltetem Sensor in dessen Sichtbereich (siehe weiße Kegel-Fläche in Abbildung 72) befinden. Hierbei werden ausschließlich die Bauchpositionen getrackt und die Kamera sollte so aufgestellt sein, dass sie freie Sicht auf diese hat. Falls sich eine Person dem Randbereich nähert, erscheinen links bzw. rechts in der Anwendung rote Balken, die ein Überschreiten signalisieren. Außerhalb des Sichtbereiches ist ein Personentracking nicht mehr möglich.

Zur Steuerung der Leistungsabgabe per Gesten muss sich die Person im Sichtbereich des Sensors befinden und die rechte Hand über die Schulter heben. Die offene Handfläche zeigt den aktuellen Strom- und Spannungszustand aller Netzgeräte im oberen linken Bereich des Programms an. Die geschlossene Faust senkt die Stromstärke aller Netzgeräte. Ausgestreckte Zeige- und Mittelfinger erhöhen die Stromstärke bis zum vorher definierten maximalen Wert. Wird eine Person innerhalb des Sichtfelds von der Kamera detektiert, wird diese als rotes Rechteck in der Programmoberfläche dargestellt, während sich die Farbe der Raum-Zone von grün auf orange ändert, wie in Abbildung 72 grafisch aufgezeigt.

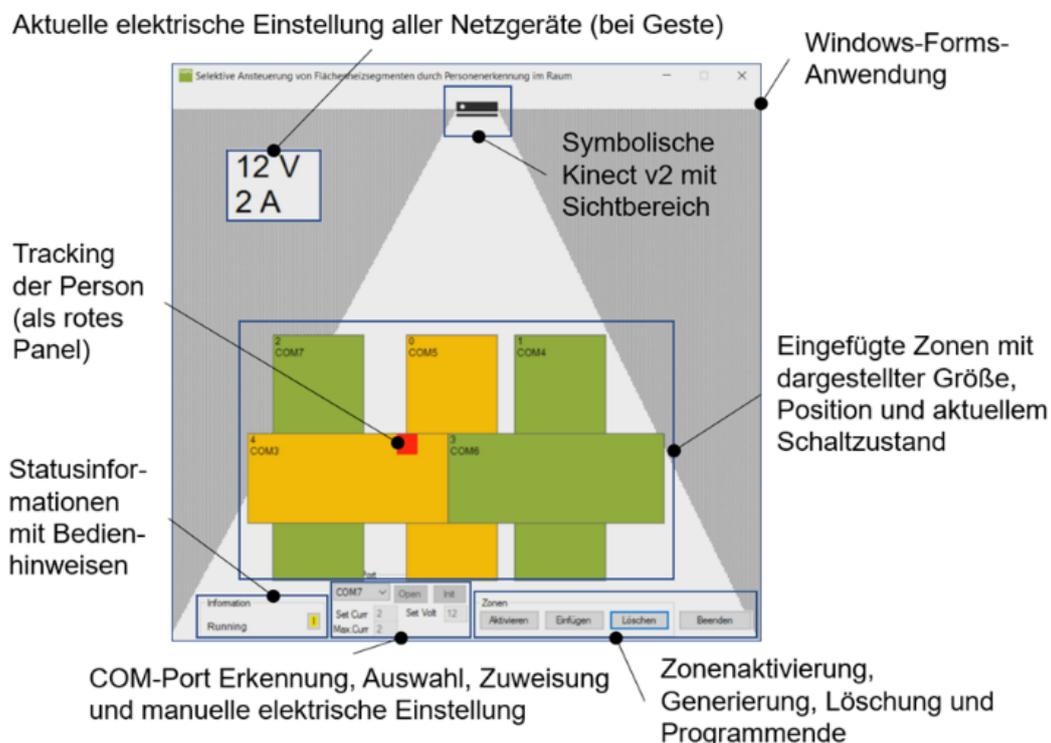


Abbildung 72: Oberfläche des PC-Programms zur Einteilung der Raumfläche und Zuweisung der entsprechenden Heizsegmente

In Abbildung 73 wird Funktionsweise des Systems anschaulich demonstriert. Links sind die Heizwände dargestellt, die zur besseren Visualisierung anstatt mit einer Heizwendel mit LED-Lichterketten versehen wurden, da diese eine Reaktion in Echtzeit erlauben. Die Person (rotes Rechteck, rechts) befindet sich in zwei Zonen, so dass die Wärme von zwei Seiten auf die Person einwirken kann.

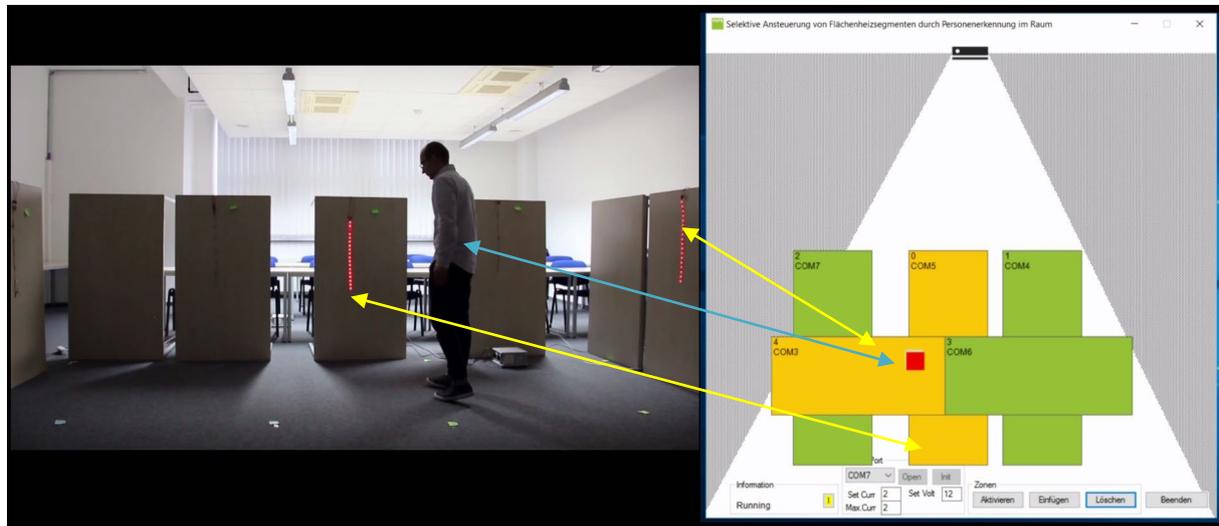


Abbildung 73: Realisierung der Personenerkennung (links), visuelle Darstellung in der Benutzeroberfläche (rechts)

### 2.9.3 Intuitive Ansteuerung der Heizflächensegmente innerhalb einer Smart-Home-Umgebung

Als alternative Ansteuerungsmöglichkeit erfolgt die intuitive Bedienung der Flächenheizsegmente mittels Fernbedienung innerhalb einer Smart-Home-Umgebung. Neben der Wandheizung können so z. B. das Licht oder Rollläden gesteuert werden sowie Zustände (Fenster, Türe, elektrische Leistung der Geräte) abgefragt werden. Zur Lauffähigkeit des Steuerungssystems wurde ein Computer benötigt, auf dem die entsprechenden Softwarekomponenten arbeiteten. Dieser war über den Router mit einem Smartphone bzw. Tablet des Anwenders verbunden und tauschte Daten innerhalb des Heimnetzwerkes aus. Daneben kamen mehrere Netzgeräte zum Einsatz, die die Wandheizungen mit Strom versorgten. Als „Thing“ werden die Komponenten wie z. B. Rollläden, Lichter usw. bezeichnet, welche über ein sog. „Binding“ mit dem Server verbunden sind. Alle genannten Komponenten und ihr Zusammenwirken werden in der folgenden Abbildung schematisch aufgezeigt.

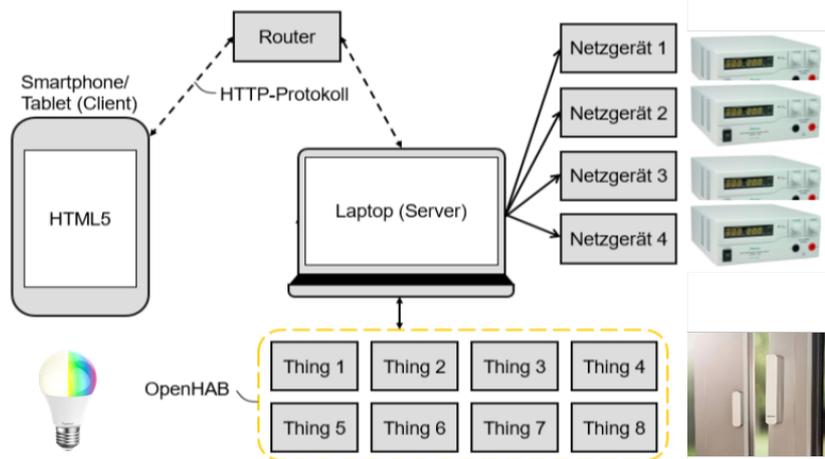


Abbildung 74: Schematischer Aufbau des Smart-Home-Netzes mit Heizungssteuerung (Netzgeräte) und Things (Smart-Home-Komponenten)

Die visuelle Darstellung der Oberfläche zur Steuerung der Heizelemente und Smart-Home-Komponenten erfolgte mittels eines virtuellen Rundgangs, womit auch z. B. Gäste sich schnell mit der Steuerung intuitiv vertraut machen können, wie in Abbildung 75 dargestellt.



Abbildung 75: Visuelle Darstellung der Benutzeroberfläche am Tablet/Smartphone mittels virtuellen Rundgangs

Beide Varianten der Ansteuerung konnten erfolgreich umgesetzt werden. Kann mit einer Kinect-Kamera nur jeweils eine kleine Fläche für die Personenerkennung abgedeckt werden, eignet sich dieses System nur bedingt für einen kommerziellen Einsatz, zumal die Einrichtung Fachwissen voraussetzt. Dagegen ist die Integration der Ansteuerung der Flächenheizsegmente in eine vorhandene Smart-Home-Umgebung aufgrund der einfachen und intuitiven Bedienung sehr gut für einen alltäglichen Einsatz geeignet. Weiterhin können in Echtzeit die elektrischen Leistungswerte der jeweiligen Heizflächen abgerufen werden, welche stets einen Überblick über die aktuellen Energieverbrauchskosten erlaubt.

## 2.10 AP 10: Aufbau eines Demonstrationsraums

### 2.10.1 Anforderungen an den Demonstrationsraum

Um die Heizung hinsichtlich ihrer Funktionen unter realen Bedingungen zu untersuchen, musste zu Beginn das Anforderungsprofil des Heizsystems, welches sich aus definierten User Storys ableitete, erstellt werden. Anhand der Anforderungen konnte der Raum geplant und mithilfe einer Heizlastberechnung der Leistungsbedarf der Heizwände ermittelt werden. Weiterhin werden die verbauten Komponenten sowie die Installation der Heizwände nachfolgend vorgestellt.

Tabelle 10: User Storys zur Ableitung der Anforderungen an den Demonstrationsraum

Nr.	User Story
1	Als Nutzer möchte ich eine intuitive Bedienung einer Heizung mit hoher thermischer Behaglichkeit, um eine einfache, für jeden bedienbare Steuerung zu erhalten.
2	Als Nutzer möchte ich eine Steuerung mittels WLAN-fähiger Geräte ohne Einrichtungsaufwand, um die Steuerung jedem Berechtigten durch WLAN-Schlüssel zugänglich zu machen.
3	Als Nutzer möchte ich eine einheitliche Steuerung der Heizung und aller Smart-Home-Komponenten (Ein, Aus und Leistungsregulierung) sowie die Darstellung aller relevanter Daten in Echtzeit, um eine einheitliche Übersicht zu erhalten.
4	Als Nutzer möchte ich eine eingestellte Temperatur halten können, ohne weitere Einstellungen vornehmen zu müssen, um eine zeitsparende Bedienung zu erhalten.
5	Als Nutzer möchte ich eine Steuerung durch einen virtuellen Raum, in dem ich alle vorhandenen Geräte sehen und steuern kann.
6	Als Nutzer möchte ich eine automatische Heizungsabschaltung bei geöffnetem Fenster, um Energie zu sparen.

Aus den zuvor erarbeiteten User Storys wurde ein Anforderungsprofil für den Demonstrationsraum erstellt, der neben den Anforderungen an das Heizsystem auch Anforderungen an die Smart-Home-Komponenten stellte.

User Story 1 und 3 lagen den Grundstein dafür, dass ein Steuerungssystem benötigt wird, welches die Smart-Home-Komponenten genauso wie die Heizelemente ansteuern kann und dabei eine benutzerfreundliche und intuitive Bedienung der Benutzeroberfläche bietet. Neben der Steuerung in Echtzeit muss dieses zentrale Steuerungssystem in der Lage sein, Sensordaten direkt und übersichtlich in der GUI anzuzeigen. Um dies, wie in User Story 5 gefordert, durch einen virtuellen Raum zu realisieren, wurde ein Panoramabild des Demonstrationsraumes als Grundlage für die Benutzeroberfläche herangezogen, wobei alle Geräte und Sensoren interaktiv bedient und abgelesen werden sollten. Ein Beispiel für ein zentrales Steuerungssystem stellt die „OpenHAB“-Plattform dar, welche zusätzlich noch den Vorteil bietet, dass es sich dabei um eine Free- und Open Source Software handelt.

Um eine Steuerung durch alle WLAN-fähigen Geräte, wie in User Story 2 gefordert, zu ermöglichen, bot sich die Visualisierung der Benutzeroberfläche in einem Browser an. Auch dies ließ sich mit „OpenHAB“ darstellen. Um User Story 4 und 6 zu erfüllen, sind Temperatursensoren sowie Fenstersensoren notwendig, welche „OpenHAB“ mit Daten versorgen und somit eine automatische Heizungseinschaltung und -abschaltung ermöglichen.

Abbildung 76 fasst die aus den User Storys abgeleiteten Anforderungen in Form einer Mindmap zusammen und diente dazu, aus dem Anforderungsprofil auf die benötigten Komponenten zu schließen.

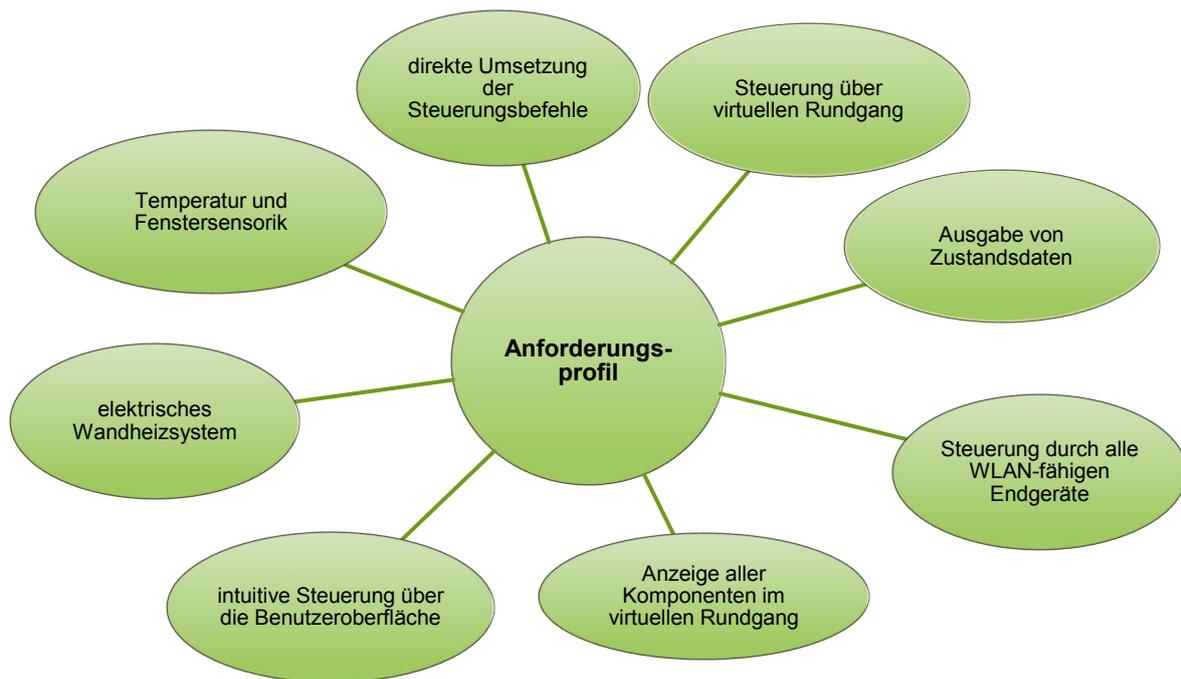


Abbildung 76: Zusammenfassende Betrachtung der wichtigsten Anforderungen an das Demonstrationshaus und seine Steuerung

### 2.10.2 Umsetzung und Aufbau des Demonstrationsraumes

Um einen Raum zu schaffen, der dem Anforderungsprofil gerecht wird, stellte die Firma LUXHAUS ein eigens dafür erbautes Demonstrationshaus zur Verfügung. Bei diesem handelt es sich um einen 31,02 m<sup>2</sup> großen Kubus mit einem Grundriss von 4,7 m auf 6,6 m. Insgesamt besitzt das Demonstrationshaus ein Raumvolumen von 81,12 m<sup>3</sup>. Das Haus ist auf der Außenseite mit einer Vorsatzschale verkleidet, welche für eine bessere Schall- und Wärmedämmung sorgt. Die Innenseite des Hauses besteht aus Gipsplatten, auf welcher die Heizwände in Trockenbaukonstruktion verbaut werden konnten. Weiterhin befinden sich in den Außenwänden eine Haustüre und zwei Außenfenster, wobei nur eines davon geöffnet werden kann. Abbildung 77 zeigt das Demonstrationshaus in der Außenansicht.



Abbildung 77: Demonstrationshaus in der Außenansicht

### 2.10.3 Berechnung des Heizbedarfes

Für die Bestimmung des Leistungsbedarfes der Heizung im Demonstrationsraum war eine Heizlastberechnung notwendig. Die Heizlastberechnung wurde in der DIN EN 12831-1 definiert und ist neben dem Raumvolumen hauptsächlich abhängig von der Beschaffenheit der raumumschließenden Flächen. Um eine möglichst genaue Heizlastberechnung zu erhalten, wurde diese von der Firma LUXHAUS durchgeführt. Ziel der Heizlastberechnung war es, die Norm-Heizlast zu ermitteln, die angibt, welche Leistung (Wärmestrom) für die Erreichung der Norm-Innentemperatur unter Norm-Außenbedingungen notwendig ist. [10]

Abbildung 78 stellt den ersten Teil der Heizlastberechnung dar und beinhaltet die Raumgeometrie des Demonstrationshauses sowie Kennwerte zur Lüftung und die erwähnte Innentemperatur. Der Mindest-Luftwechsel  $n_{\min}$  gibt den notwendigen „Luftvolumenstrom in  $\text{m}^3/\text{h}$ , bezogen auf das Volumen einer Nutzungseinheit beziehungsweise eines Raumes in  $\text{m}^3$ “ [11] an. Bei der Luftwechselrate  $n_{50}$  wird der Luftwechsel bei 50 Pa Differenzdruck angegeben. [11]

<b>Innentemperatur</b>	$\theta_{\text{int}}$	<u>21</u> °C	<b>Lüftung</b>		
<b>Geometrie</b>			<b>Mindest-Luftwechsel</b>	$n_{\min}$	<u>0,50</u> $\text{h}^{-1}$
Raubbreite	$b_R$	<u>6,60</u> m	Luftwechselrate	$n_{50}$	<u>3,00</u> $\text{h}^{-1}$
Raumlänge	$l_R$	<u>4,70</u> m	Koeffizient Abschirmklasse	$e$	<u>0,02</u> -
Raumfläche	$A_R$	<u>31,02</u> $\text{m}^2$	Höhe über Erdreich	$h$	<u>1,00</u> m
Geschosshöhe	$h_G$	<u>2,88</u> m	Höhen-Korrekturfaktor	$\epsilon$	<u>1,00</u> -
Deckendicke	$d$	<u>0,27</u> m	Zuluft-Volumenstrom	$\dot{V}_{\text{zu}}$	<u>          </u> $\text{m}^3/\text{h}$
Raumhöhe	$h_R$	<u>2,62</u> m	-Temperatur	$\theta_{\text{su}}$	<u>          </u> °C
Raumvolumen	$V_R$	<u>81,12</u> $\text{m}^3$	-Temp. Reduktionsfaktor	$f_{\text{Vsu}}$	<u>          </u> -
<b>Erdreich</b>			Abluft-Volumenstrom	$\dot{V}_{\text{ex}}$	<u>          </u> $\text{m}^3/\text{h}$
Tiefe unter Erdreich	$z$	<u>0,00</u> m	-Temperatur	$\theta_{\text{su}}$	<u>          </u> °C
Erdreich berührter Umfang	$P$	<u>0,00</u> m	-Temp. Reduktionsfaktor	$f_{\text{V,mech,inf}}$	<u>          </u> -
B'-Wert raumweise ( )	$B'$	<u>          </u> m	<b>Zusatzheizung</b>		
			Wiederaufheizfaktor	$f_{\text{RH}}$	<u>          </u> $\text{W}/\text{m}^2$

Abbildung 78: Teil 1 der Heizlastberechnung für das Demonstrationshaus

Abbildung 79 zeigt den zweiten Teil der Heizlastberechnung. Die linke Seite diente zur Berechnung der Nettoflächen aller Umschließungsflächen. Im Fall des Demohauses waren dies zwei Fenster (AF), eine Tür (AT), die Außenwände (AW), sowie Decke

(DE) und Boden (FB). Die angrenzende Temperatur stellt die niedrigste Außentemperatur dar, bei der die Norm-Innentemperatur gehalten werden kann. [10]

Die Temperaturkorrekturfaktoren dienen dazu, die Wärmeverluste bezüglich Erdreich (g), Außenluft (e) und beheizten (u) beziehungsweise unbeheizten (i, j) Innenräumen auszugleichen. Der Korrekturfaktor 1 gilt für die Außenluft. [12] [10]

Der U-Wert, auch Wärmedurchgangskoeffizient genannt, ist der Kehrwert des Wärmedurchgangswiderstands und zeigt die Größe der Wärmeleitung pro Quadratmeter Bauteiloberfläche und pro Kelvin Temperaturdifferenz an. Er ist ein Kennwert über die Dämmeigenschaften der Raumumschließungsflächen; je höher der U-Wert, desto schlechter ist die Wärmedämmung. [12] [10]

Der Wert der korrigierten Wärmebrücke dient bei Wandflächen mit Verbindung zur Außenluft zur Korrektur der U-Werte. Der korrigierte U-Wert kommt durch Addition der korrigierten Wärmebrücke mit dem U-Wert zustande. [12] [10]

Der Wärmeverlustkoeffizient errechnet sich als Produkt der Nettofläche, des Korrekturfaktors sowie des korrigierten U-Wertes und gibt den Wärmedurchgang pro Kelvin Temperaturdifferenz an. Um den, in Teil zwei der Heizlastberechnung zu berechnenden Transmissionswärmeverlust zu erhalten, war der Wärmeverlustkoeffizient mit der Temperaturdifferenz von der angrenzenden und der in Teil 1 gegebenen Innentemperatur zu multiplizieren. [12] [10]

Im letzten Schritt war der Gesamt-Wärmeverlustkoeffizient und der Gesamt-Transmissionswärmeverlust des Hauses durch Addition der Einzelwerte zu berechnen. [12]

Orientierung	Bauteil	Anzahl	Breite	Länge / Höhe	Bruttofläche	Abzugsfläche	Nettofläche	grenz an	angrenzende Temperatur	Korrekturfaktoren	U-Wert	Korrekturwert Wärmebrücke	korrigierter U-Wert	Wärmeverlustkoeffizient	Transmissionswärmeverlust	
																n
			m		m <sup>2</sup>			g/b	°C	$f_{e2}/f_{i1}$	W/m <sup>2</sup> K			W/K	W	
N	AW	1	5,36	2,62	14,0	1,9	12,1	e	-16		0,15	0,05	0,20	2,42	90	
	IW	1						b								
	AF	1	0,82	2,35	1,9		1,9	e	-16		1,3	0,05	1,35	2,60	96	
O	AT	1						e				0,05	0,05			
	IT	1						b								
	AW	1	7,26	2,62	19,0	1,9	17,1	e	-16		0,15	0,05	0,20	3,42	127	
S	IW	1						b				0,05	0,05			
	AF	1	1,52	1,26	1,9		1,9	e	-16		1,3	0,05	1,35	2,58	96	
	AT	1						e				0,05	0,05			
W	IT	1						b				0,05	0,05			
	AW	1	5,36	2,62	14,0		14,0	e	-16		0,15	0,05	0,20	2,81	104	
	IW	1						e				0,05	0,05			
H	AF	3						e				0,05	0,05			
	AT	1						e				0,05	0,05			
	IT	1						b								
H	AW	1	7,26	2,62	19,0	2,6	16,4	e	-16		0,15	0,05	0,20	3,28	122	
	IW	1						b								
	AF	1						e				0,05	0,05			
H	AT	1	1,18	2,20	2,6		2,6	e	-16		0,9	0,05	0,95	2,47	91	
	IT	1						b								
	FB01	1	6,60	4,70	31,0		31,0	e	-16	0,32	0,14	0,05	0,05	0,50	18	
H	DE01	1	6,60	4,70	31,0		31,0	e	-16		0,19	0,05	0,24	7,32	271	
	FB02	1						e				0,05	0,05			
H	DE02	1						e				0,05	0,05			
<b>TRANSMISSIONSWÄRMEVERLUST</b>														<b>H<sub>T</sub> / Φ<sub>T</sub></b>	<b>27,41</b>	<b>1014</b>

Abbildung 79: Teil 2 der Heizlastberechnung zur Berechnung des Transmissionswärmeverlustes im Demonstrationshaus

Der dritte Teil der Heizlastberechnung, in dem der Lüftungswärmeverlust errechnet wurde, ist in Abbildung 80 dargestellt. Um den Mindest-Luftwechsel  $\dot{V}_{\min}$  zu berechnen, war der prozentuale Mindest-Luftwechsel  $n_{\min}$  aus Teil eins mit dem Raumvolumen zu multiplizieren. Das Produkt aus Mindestluftwechsel und der Temperaturdifferenz aus Innenraum- und angrenzender Temperatur lieferte den Lüftungswärmeverlust. [10]

Mindest-Luftwechsel	$\dot{V}_{\min}$	40,56	m <sup>3</sup> /h	510
natürliche Infiltration	$\dot{V}_{\text{inf}}$	9,73	m <sup>3</sup> /h	
mechanischer Zuluftvolumenstrom	$\dot{V}_{\text{su}} \cdot f_{\text{V, su}}$		m <sup>3</sup> /h	
Abluftvolumenüberschuss	$\dot{V}_{\text{mech, inf}} \cdot f_{\text{v, mech, inf}}$		m <sup>3</sup> /h	
<b>thermisch wirksamer Luftvolumenstrom</b>	$\dot{V}_{\text{therm}}$	<b>40,56</b>	<b>m<sup>3</sup>/h</b>	
<b>LÜFTUNGSWÄRMEVERLUST</b>	<b>H<sub>v</sub> / Φ<sub>v</sub></b>			<b>13,79</b>   <b>510</b>

Abbildung 80: Teil 3 der Heizlastberechnung zur Berechnung des Lüftungswärmeverlustes im Demonstrationshaus

Wie in Abbildung 81 zu sehen ist, wird im vierten und letzten Teil der Heizlastberechnung der Lüftungswärmeverlust mit dem Transmissionswärmeverlust addiert, um die Netto-Heizlast zu erhalten. Ist im Gebäude keine Zusatz-Aufheizung vorhanden, ist die Netto-Heizlast gleich der Norm-Heizlast. [10]

<b>NETTO-HEIZLAST</b>	<b>Φ<sub>HL, Nett</sub></b>	49,1 W/m <sup>2</sup>	18,8 W/m <sup>3</sup>	<b>1524</b>
<b>ZUSATZ-AUFHEIZLEISTUNG</b>	<b>Φ<sub>RH</sub></b>			
<b>NORM-HEIZLAST</b>	<b>Φ<sub>HL</sub></b>			<b>1524</b>

Abbildung 81: Teil 4 der Heizlastberechnung zur Berechnung der Norm-Heizlast im Demonstrationsgebäude

Aus der Heizlastberechnung resultiert, dass **1 524 W** Wärmeleistung benötigt werden, um den Raum auch bei extremen Außentemperaturen von -16 °C noch auf 21 °C heizen zu können.

#### 2.10.4 Verbaute Komponenten

Für die Umsetzung aller Anforderungen aus der Heizlastberechnung und dem Anforderungsprofil werden folgende Hard- und Softwarekomponenten vorgestellt und ihr Zweck genauer erläutert.

##### Fritz!Box, Philips Hue Bridge, CCU2

Zum Erstellen und Betreiben eines lokalen Netzwerkes, in dem alle Komponenten miteinander kommunizieren können, wurde als Router eine Fritz!Box verwendet. Um weitere Komponenten der Hersteller Homematic und Philips zu integrieren, wurden noch eine Philips Hue Bridge sowie eine CCU2 verbaut. Abbildung 82 zeigt die miteinander verbundenen Komponenten.

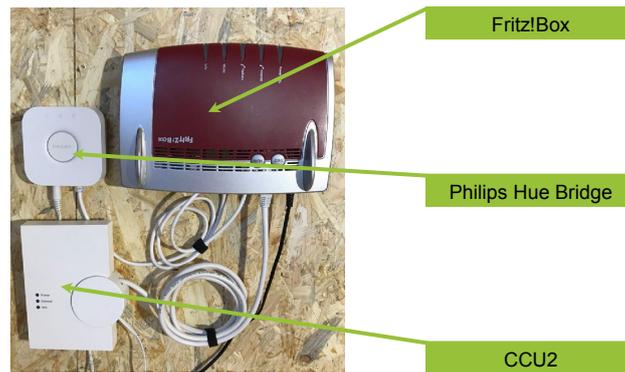


Abbildung 82: Darstellung der Fritz!Box und Philips Hue Bridge, CCU2 zur digitalen Vernetzung der verbauten Komponenten

### Heizwände

Nach der erfolgreichen Durchführung der Grundlagenuntersuchungen wurden die Flächenheizsegmente unter realen Bedingungen getestet. Dafür wurden zunächst aus den einzelnen, plasmabeschichteten (alternatives Pulverzuführsystem) Gipskartonplatten, komplette Wandheizflächen auf Basis der vorhergehenden Ergebnisse erstellt: Bei der Demonstrationswand wurden 16 Platten mit den Abmaßen von 40 x 50 cm<sup>2</sup> nach dem Layout aus Abbildung 83 elektrisch verbunden bzw. ankontaktiert. Dafür wurden jeweils vier Platten zu einem separat angesteuerten Segment mit einer Leistung von ca. 200 Watt (bei 40 V und 5 A) angeordnet. Es wurden jeweils zwei Platten in Reihe geschaltet und diese wiederum mit einer Parallelschaltung miteinander verbunden. Die auf dem Pfeil aufgetragenen 60 V und 5 A beziehen sich hier auf die maximale Leistung, die auf zwei in Reihe bzw. parallel geschalteten Platten in diesem Schaltplan angelegt werden können. Nach der Kontaktierung der einzelnen Flächen ergab sich eine gesamte max. Leistung der Wandflächenheizung von 800 Watt bei einer Oberflächentemperatur von ca. 45 °C.

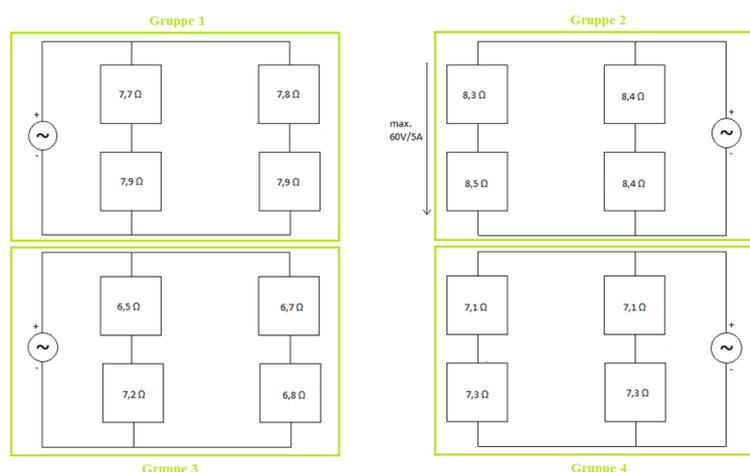


Abbildung 83: Schematische Darstellung der elektrischen Verschaltung der einzelnen Platten zu einer real skalierten Wandflächenheizung

## Netzgeräte

Zur Versorgung der Heizwände wurden programmierbare Labornetzgeräte der Firma Manson mit der Bezeichnung HCS-3404-USB genutzt. Abbildung 84 zeigt eines der verwendeten Labornetzgeräte zur Stromversorgung.



Abbildung 84: Netzgerät zur Gleichstromversorgung der Heizwände [13]

Die Netzgeräte dienen dazu, die Netzspannung (230 V und 50 Hz) auf die für das Heizsystem nötige Gleichspannung zu transformieren. Vier Heizplatten wurden jeweils von einem Labornetzgerät mit Gleichstrom versorgt.

## Sensoren

Für die Realisierung der automatischen Heizungsabschaltung wurden Temperatursensoren und Fensterkontaktsensoren verwendet. Als Temperatursensor wurde der Homematic IP Funk-Temperatursensor 150180A0A verwendet, der neben seiner Primärfunktion auch die Luftfeuchtigkeit misst. Insgesamt wurde für jede der vier Heizwände ein Sensor, wie in Abbildung 85 (links) zu sehen, verbaut, um die Temperatur ortsabhängig zu messen. Für eine automatische Erkennung des geöffneten oder geschlossenen Zustandes der Fenster wurde der Homematic IP Funk-Fensterkontaktsensor HMIP-SWDO verbaut, der in Abbildung 85 (rechts) gezeigt wird. Die Kontaktsensoren wurden an Fenster und Tür angebracht.



Abbildung 85: Temperatursensor und Fensterkontaktsensor zur automatischen Heizungssteuerung [14] [15]

## Philips Hue Lampen

Neben den oben genannten, für die Heizungssteuerung relevanten Komponenten, wurden auch Philips Hue Lampen für die Beleuchtung des Raumes in die Smart-Home-Umgebung integriert.

## Software

Zur Realisierung der intuitiven Bedienung war der virtuelle Rundgang erforderlich. Als Grundlage für die Steuerung diente wie bereits erwähnt die Free und Open Source Software „OpenHAB“, welche mit einem Netzgeräteprogramm für die Heizungssteuerung erweitert wurde. Außerdem war für den Abgleich und die Speicherung von Daten eine Datenbank und ein Webserver erforderlich.

### Homematic IP Funk-Schalt- und Messsteckdose HMIP-PSM

Die Schalt- und Messsteckdosen dienen zur Leistungs- und Energiebedarfsmessung der Heizwände. Sie wurden zwischen den Netzgeräten und der Hauptstromversorgung geschaltet. Abbildung 86 zeigt die Funk-Schalt- und Messsteckdose HMIP-PSM.



Abbildung 86: Darstellung der Homematic IP Funk-Schalt- und Messsteckdose HMIP-PSM zur Regelung des Heizungs-Systems [16]

Die Steckdosen sind in der Lage, die Werte der anliegenden Spannung, des Stroms und der Leistung sowie der, an die Heizwände abgegebenen, Energie an die CCU2 zu senden.

### 2.10.5 Installation der Komponenten im Demonstrationshaus

Für die Erfüllung der Anforderungen an das Demonstrationshaus wurden die Heizwände und die aufgezählten Komponenten im und am Demonstrationshaus montiert. Um die vier Heizwände mit Gleichstrom zu versorgen, wurde an der Rückseite des Gebäudes ein Vorbau für die Unterbringung der Netzgeräte, wie in Abbildung 87 zu sehen, angebracht. Neben den Netzgeräten wurden in diesem Anbau noch die Schalt- und Messsteckdosen hinter den Netzgeräten angeschlossen. Weiterhin ist der Sicherungskasten darin verbaut, um ihn vor Nässe o. ä. zu schützen.



Abbildung 87: Versorgungsanbau mit Netzgeräten und Sicherungskasten

Die im Inneren verbauten Heizwände wurden mittels Trockenbaukonstruktion auf die OSB-Platten montiert. Die Gipskartonplatten wurden, wie in Abbildung 88 aufgezeigt, direkt auf eine Holz-Lattung geschraubt. Sobald die Heizplatten an der Lattung installiert wurden, erfolgte die elektrische Verbindung der einzelnen Segmente und die Ankontaktierung an den von den Netzgeräten kommenden Kabel mittels Klemmen und Kupfer-Klebeband.

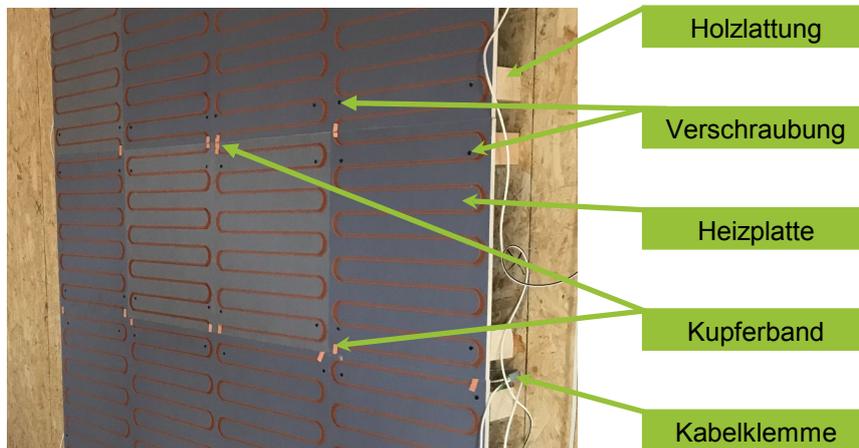


Abbildung 88: Mechanische und elektrische Installation der Heizwände in Trockenbauweise im Demonstrationsraum

Beträgt die nötige Heizlast nach den Berechnungen 1.524 W, wurden zur Untersuchung der Behaglichkeit an allen vier Wänden Flächenheizungen installiert, womit die maximale Leistung insgesamt 3.247 W beträgt und somit mehr als doppelt so hoch wie erforderlich ist. Damit sollte der Einfluss der lokalen Wärmeeinbringung untersucht werden, deren Ergebnispräsentation im weiteren Verlauf erfolgt.

Die für die Heizungsabschaltung benötigten Temperatur- und Fenstersensoren wurden wie in Abbildung 89 verbaut. Auf der linken Seite der Abbildung ist ein Temperatursensor zu sehen, der circa 15 cm über der Heizwand angebracht wurde. Der Fenstersensor, zu sehen auf der rechten Seite in Abbildung 89, wurde direkt unter dem Fenster angebracht. Der Türsensor ist in der gleichen Art an der Seite der Tür verbaut.

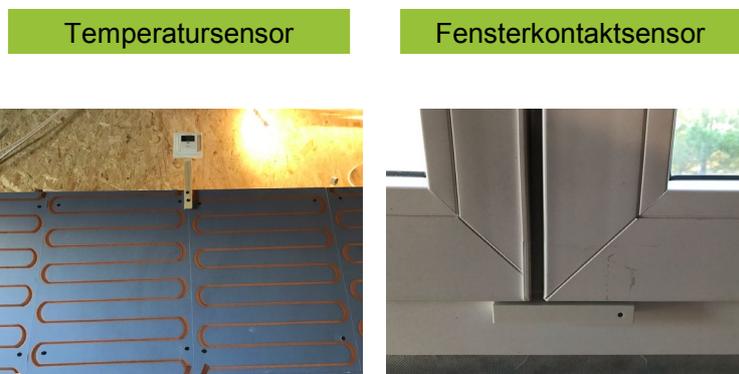


Abbildung 89: Zur Datenerfassung für die Steuerung der Heizwände installierte Temperatur- und Fenstersensoren

Um einen Überblick über im Demonstrationsraum installierten Komponenten zu verschaffen dient Abbildung 90, in der einem Panoramabild den Montageort aller Komponenten im Innenraum zeigt.



Abbildung 90: Darstellung der verbauten Komponenten im Demonstrationshaus im Überblick

## 2.11 AP 11: Untersuchung der Behaglichkeit im Demonstrationsraum

Allgemein wird das Empfinden eines Menschen als Maß zur Beurteilung des Raumklimas herangezogen. Das Leistungsvermögen, die Gesundheit und damit auch die Behaglichkeit eines Menschen sind dann am besten, wenn er sich in physiologischer, physischer und sozialer Hinsicht wohlfühlt. Es wird zwischen thermischer, olfaktorischer, visueller und akustischer Behaglichkeit unterschieden. Entscheidend für die Qualifizierung der Flächenheizsegmente im Demonstrationsraum ist die thermische Behaglichkeit. [17] [18]

### 2.11.1 Grundbegriffe zur thermischen Behaglichkeit

Um eine Aussage zur Behaglichkeit in einem geschlossenen Raum zu treffen, wird zwischen Wärmebilanzmodellen und adaptiven Modellen unterschieden. Eines der bekanntesten und das am weitesten verbreitete Wärmebilanzmodell ist das Modell nach Fanger, welches als Grundlage für die DIN EN ISO 7730 dient. Für die Bewertung der thermischen Behaglichkeit werden in der DIN EN ISO 7730 die Indizes, vorausgesagtes mittleres Votum und vorausgesagter Prozentsatz Unzufriedener, definiert. [19] [18]

#### Vorausgesagtes mittleres Votum

Das PMV (engl.: predicted mean vote) dient dazu, einen Durchschnittswert für die Klimabeurteilung durch eine große Personengruppe vorherzusagen. Der PMV-Index untergliedert sich in eine siebenstufige Klimabeurteilungsskala, wie sie in Tabelle 11

dargestellt ist. Auf dieser Skala stellt der Wert „0“ die optimale thermische Behaglichkeit dar. [17] [19]

Tabelle 11: Sieben Punkte der Klimabeurteilungsskala nach DIN EN ISO 7730 [19]

heiß	warm	etwas warm	neutral	etwas kühl	kühl	kalt
+3	+2	+1	0	-1	-2	-3

Das PMV wird angewandt, wenn zu prüfen ist, ob ein gegebenes Umgebungsklima den Behaglichkeitskriterien entspricht oder um bestimmte Anforderungen an unterschiedliche annehmbare Grenzen festzulegen. Im Bereich der thermischen Behaglichkeit liegt der Wert zwischen -0,5 und 0,5. [19]

### Vorausgesagter Prozentsatz Unzufriedener

Um den oben beschriebenen PMV-Index tritt eine gewisse Streuung auf; weshalb es nützlich ist, die Anzahl der Personen, welche das Umgebungsklima als zu warm oder zu kalt empfinden, voraussagen zu können. Der PPD (engl.: predicted percentage of dissatisfied) trifft eine quantitative Voraussage über die mit dem Umgebungsklima unzufriedenen Personen in Prozent. Nach der DIN EN ISO 7730 sind unzufriedene Personen solche, „die nach der 7-stufigen Klimabeurteilungsskala [...] mit heiß, warm, kühl oder kalt urteilen“ [19].

Ist der PMV-Index berechnet, resultiert daraus der PPD-Index:

$$PPD = 100 - 95 * e^{(-0,03353 * PMV^4 - 0,2179 * PMV^2)}$$

### 2.11.2 Messkomponenten für thermische Behaglichkeit - Klimamessgerät testo 480

Das Klimamessgerät testo 480 wurde zur objektiven Beurteilung der thermischen Behaglichkeit im Demonstrationsraum eingesetzt. Neben dem Messgerät selbst, welches sich in Abbildung 91 auf der linken Seite befindet, besteht das testo 480 noch aus dem Globe-Thermometer, welche einen Hohlkugeldurchmesser von 150 mm besitzt und zur Messung der Strahlungstemperatur im Messbereich von 0 °C bis +120 °C eingesetzt wurde. Für die PMV/PPD Messung wurden von dem Messgerät die Faktoren Strahlungstemperatur, Raumlufttemperatur, Luftgeschwindigkeit, rel. Luftfeuchtigkeit aufgenommen, während die Bekleidung bzw. die Aktivität als Parameter manuell eingegeben werden musste. [20]



Abbildung 91: Klimamessgerät testo 480 und Globe-Thermometer zur Erfassung der Strahlungswärme [20]

Zusätzlich wurde die Turbulenzgradsonde zur Bestimmung der Luftgeschwindigkeit, die in Abbildung 92 abgebildet ist, für die PMV/PPD-Messung benötigt. Für die CO<sub>2</sub>-Messung wurde die Raumluftqualitätssonde genutzt, die in Abbildung 92 auf der rechten Seite zu sehen ist. Mit ihr wurden auch die Raumlufttemperatur, die Luftfeuchtigkeit und der Absolutdruck gemessen. [20]



Abbildung 92: Turbulenzgradsonde und Raumluftqualitätssonde [20]

### 2.11.3 Behaglichkeitsmessung

Für die subjektive Bestimmung der Behaglichkeit dienen die PMV/PPD-Werte. Zur Messung der PMV/PPD-Werte nach DIN EN ISO 7730 wurden zur Beurteilung fünf verschiedene Szenarien herangezogen, welche in Tabelle 12 vorgestellt werden. Diese erfüllten den Zweck, neben der reinen Funktion, noch Auswirkungen auf Zugluft und lokale thermische Unbehaglichkeit überprüfen zu können.

Tabelle 12: Versuchsplan zur Untersuchung der fünf Szenarien zur jeweiligen Bewertung der Behaglichkeit der Flächenheizsegmente

Messung Nr.	Szenario
1 und 2	Alle Heizwände sind gleichzeitig aktiv
3 und 4	Nur Heizwand 1 ist aktiv
5 und 6	Heizwand 1 und Heizwand 2 sind aktiv
7 und 8	Die oberen Hälften aller Heizwände sind aktiv
9 und 10	Die unteren Hälften aller Heizwände sind aktiv

Außerdem wurde eine Vergleichsmessung durchgeführt, bei der das Demonstrationshaus mittels Heizlüfter erwärmt wurde. Um validierbare Ergebnisse zu erlangen, wurde jedes Szenario zwei Mal durchgeführt und gemessen. Es wurden insgesamt zehn Messungen an dem Wandheizsystem durchgeführt und eine Weitere am Heizlüfter. Jedes Szenario aus Tabelle 12 wurde jeweils 20 Minuten lang durchgeführt und gemessen, wobei Bekleidungs- und Aktivitätswerte von 1 clo und 1 met verwendet wurden, was leichter Geschäftskleidung und einer sitzenden Tätigkeit entspricht. Die automatische Heizungsabschaltung war bei allen Messungen auf 23 °C eingestellt. Neben den PMV/PPD-Messungen wurde pro Szenario eine Turbulenzgradmessung durchgeführt, um mittels der Zugrate Luftströmungen feststellen zu können.

Für die Durchführung der Behaglichkeitsmessungen wurde das Klimamessgerät mittig im Raum platziert. Im Folgenden werden die Messungen beschrieben und die Ergebnisse visualisiert. Zusätzlich zur PMV/PPD-Messung wurde zu jedem Szenario eine Turbulenzgradmessung durchgeführt, welche bei allen Messungen immer bei 0 % lagen, weshalb auf diese in den nachfolgenden Beschreibungen der einzelnen Szenarien nicht näher eingegangen wird.

### Szenario 1

Die Messungen mit allen vier aktiven Heizwänden liefert die in Tabelle 13 gelisteten Mittelwerte:

Tabelle 13: Die Messwerte für Szenario 1 basieren auf vier aktiven Heizwänden

Nr.	Strahlungstemperatur	Raumtemperatur	rel. Feuchte	Luftbewegung	CO <sub>2</sub> -Gehalt
1	24,3 °C	23,6 °C	28,1 %	0,02 m/s	564 ppm
2	24,2 °C	23,6 °C	28,4 %	0,02 m/s	489 ppm

Abbildung 93 zeigt die PMV/PPD-Werte beider Messungen, welche aus den Werten aus Tabelle 7 resultieren. Bei beiden Messungen wurde ein PMV-Wert von 0,09 und ein PPD-Wert von 5,17 % ermittelt.

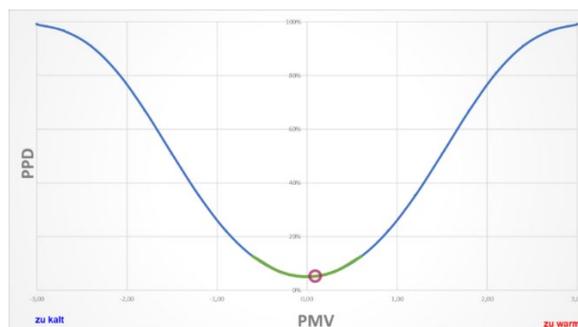


Abbildung 93: PMV/PPD-Wert der Behaglichkeitsmessung in Szenario 1

In Szenario 1 (alle Heizwände eingeschaltet) liegt die Heizleistung bei 1.723 W über der Norm-Heizlast. Die Heizungsabschaltung war bei diesem Szenario auf 23 °C eingestellt. Trotz der leicht erhöhten Temperatur erreicht das erste Szenario annähernd ideale Behaglichkeitswerte.

### Szenario 2

Für das zweite Szenario wurde nur Heizwand 1 aktiviert. Hier sollte festgestellt werden, ob es zu Verwirbelungen oder höherer Luftbewegung durch einseitige Wärmezugabe führt. Weiterhin sollte festgestellt werden, ob die Leistung einer Heizwand ausreicht, um das Demonstrationshaus zu erwärmen und die Temperatur für die Behaglichkeitsmessungen annähernd konstant zu halten. In Tabelle 14 sind die Mittelwerte aller Fühler eingetragen.

Tabelle 14: Die Messwerte für Szenario 2 basieren auf einer aktiven Heizwand

Nr.	Strahlungstemperatur	Raumtemperatur	rel. Feuchte	Luftbewegung	CO <sub>2</sub> -Gehalt
3	23,0 °C	22,5 °C	27,8 %	0,02 m/s	457 ppm
4	22,7 °C	22,3 °C	29,6 %	0,02 m/s	474 ppm

Der sich aus Tabelle 14 errechnete PMV-Wert liegt bei Messung Nummer 3 bei -0,25 und der PPD-Wert bei 6,31 %. Messung Nummer 4 berechnet für den PMV-Wert -0,30 und für den PPD-Wert 6,89 %. Die beiden Wertepaare sind in Abbildung 94 in das Diagramm eingezeichnet.

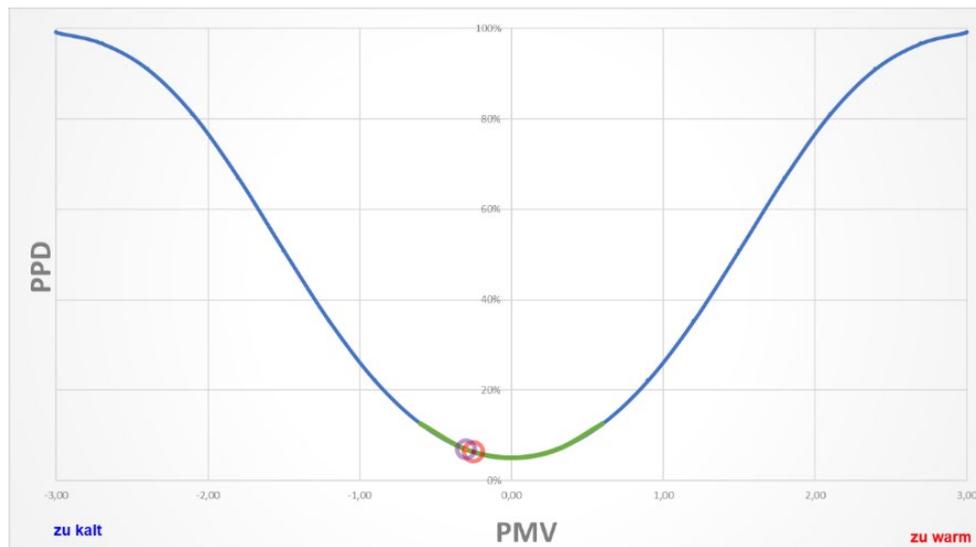


Abbildung 94: PMV/PPD-Wert der Behaglichkeitsmessung in Szenario 2

In Szenario 2 wurde nur Heizwand 1 aktiviert, womit der Raum mit 723 W weniger Leistung beheizt wurde, als die Norm-Heizlast vorgibt. Dieses Szenario diente hauptsächlich der Untersuchung, ob eine einseitige Wärmeeinbringung in den Raum, Luft Verwirbelungen und erhöhtes Zugverhalten zur Folge haben, weshalb die Luftbewegung und die Zugrate genauer betrachtet wurden. Die Luftbewegung war mit 0,02 m/s sehr gering und zeigt keinen Unterschied zu Szenario 1. Die für Szenario 2 durchgeführte Turbulenzgradmessung mit einer Zugrate von optimalen 0 % bewies, dass die einseitige Wärmeeinbringung keine merkliche Zugluft verursacht und damit auch keine, von konvektiven Heizungen bekannte Staub Verwirbelungen, mit sich bringt.

Da die optimale operative Temperatur im Mittel, durch eine minimal zu niedrige Raumtemperatur und Strahlungstemperatur, leicht unterschritten wurde, ergaben sich PMV-Werte von -0,25 bzw. -0,30 und PPD-Werte von 6,31 % bzw. 6,89 %. Diese Behaglichkeitskennwerte liegen absolut im Bereich für ein akzeptables Raumklima.

### Szenario 3

Für das dritte Szenario wurden zwei Heizwände aktiviert. Die aufgebrachte Leistung reichte nun nach der Heizlastberechnung aus, um den Raum bei sehr niedrigen Außentemperaturen vollständig zu wärmen. Auch hier sollte getestet werden, ob die gemessenen Werte, Die entsprechend ermittelten Messwerte können Tabelle 15 entnommen werden.

Tabelle 15: Die Messwerte für Szenario 3 basieren auf zwei aktiven Heizwänden

Nr.	Strahlungstemperatur	Raumtemperatur	rel. Feuchte	Luftbewegung	CO <sub>2</sub> -Gehalt
5	22,8 °C	22,5 °C	30,6 %	0,02 m/s	489 ppm
6	23,4 °C	23,0 °C	31,8 %	0,02 m/s	537 ppm

Die durchschnittlichen Messwerte aus Tabelle 15 ergaben für die Messung des PMV-Index einen Wert von -0,25 und für den PPD-Index den Wert 6,31 % im ersten Durchgang. Beim zweiten Durchgang konnte ein PMV-Wert von -0,09 und ein PPD-Wert von 5,17 % gemessen werden. In Abbildung 95 werden die zwei Behaglichkeitsgrößen im Diagramm dargestellt.

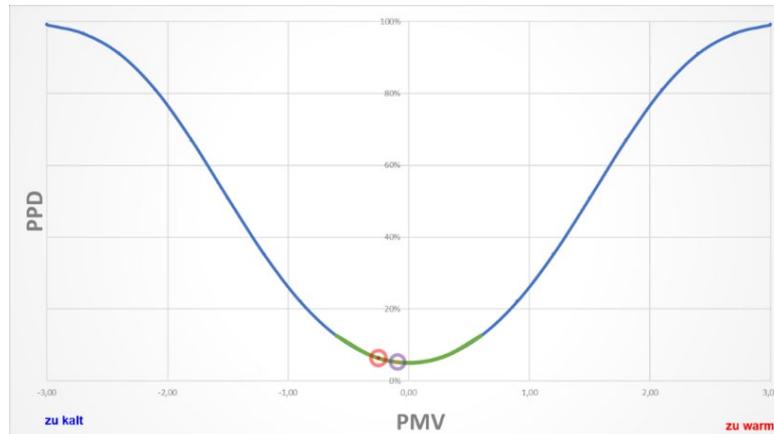


Abbildung 95: PMV/PPD-Wert der Behaglichkeitsmessung in Szenario 3

In Szenario 3 wurden Heizwand 1 und 2 zur Beheizung des Raumes verwendet. Die Leistung der eingesetzten Heizwände lag 114 W über der Norm-Heizlast. Auch in diesem Szenario lagen alle Werte der relativen Luftfeuchtigkeit und des CO<sub>2</sub>-Gehaltes innerhalb der akzeptablen Grenzen.

Die operative Temperatur in Szenario 3 ergab einen PMV-Wert von -0,25 bzw. -0,09. Die daraus resultierenden PPD-Werte ergaben damit einen Wert von 6,31 % bzw. 5,17 %. Die sechste Messung liegt damit nahe an der optimalen thermischen Behaglichkeit, aber auch Messung Nummer 5 liegt vollkommen im Bereich des akzeptablen Raumklimas.

#### Szenario 4

Im vierten Szenario wurden bei allen vier Heizwänden nur die oberen Hälften aktiviert. Dadurch sollte festgestellt werden, ob durch die Anordnung der Flächenheizsegmente im oberen Wandbereich Verwirbelungen oder Zug entsteht. Die gegebene Leistung der oberen Heizpanels reichte nach Heizlastberechnung zum vollständigen Heizen des Gebäudes aus. Aus den gemessenen Werten des Klimamessgerätes entstehen die in Tabelle 16 gelisteten Werte.

Tabelle 16: Die Messwerte für Szenario 4 bei aktivieren der oberen Hälfte der vier Flächenheizsegmente

Nr.	Strahlungstemperatur	Raumtemperatur	rel. Feuchte	Luftbewegung	CO <sub>2</sub> -Gehalt
7	24,1 °C	23,5 °C	33,1 %	0,02 m/s	700 ppm
8	22,9 °C	22,6 °C	30,6 %	0,02 m/s	676 ppm

Das testo 480 berechnete für die in Tabelle 16 angegebenen Mittelwerte zwei unterschiedliche PMV/PPD-Werte. Bei Messung Nummer 7 wurde ein PMV-Wert von 0,09 bzw ein PPD-Wert von 5,17 % erreicht. Bei Messung Nummer 8 wurde ein PMV-Wert von -0,21 ermittelt. Der daraus abgeleitete PPD-Wert lag bei 5,92 %. In Abbildung 96 sind die beiden Wertepaare in einem Diagramm abgebildet.

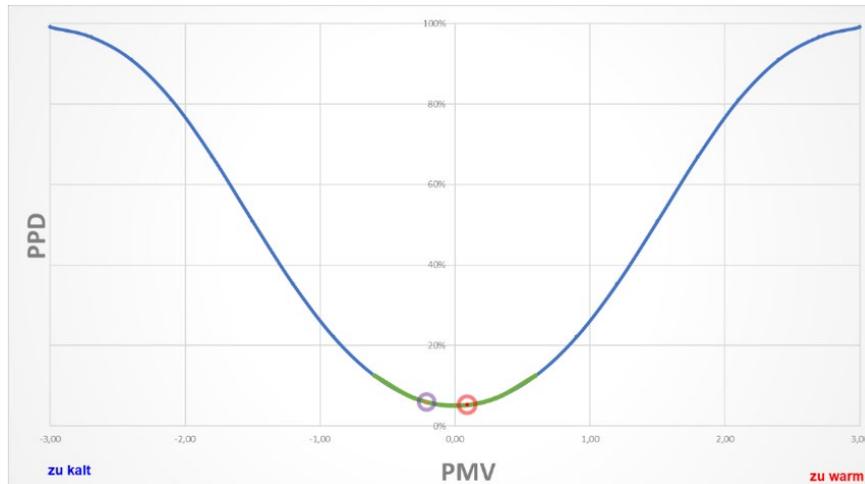


Abbildung 96: PMV/PPD-Wert der Behaglichkeitsmessung in Szenario 4

Auch in dieser Messung wurde nur eine Luftbewegung von 0,02 m/s gemessen. Die Messung der Zugrate mit 0 % bestätigte nochmals, dass durch die Erwärmung der oberen Heizelemente keine Verwirbelungen und Luftströmungen erzeugt wurden. Die Werte der relativen Luftfeuchtigkeit liegen mit 33,1 % und mit 30,6 % im akzeptablen Bereich. Die siebte Messung lag mit dem PMV-Wert von 0,09 und dem PPD-Wert von 5,17 % nahe am Optimum. In der achten Messung verschlechterten sich die PMV/PPD-Werte auf -0,21 und 5,92 % als Folge der niedrigeren Temperatur. Die Analyse zeigt dennoch, dass auch in Szenario 5 annähernd ideale Behaglichkeitswerte erreicht werden konnten.

### Szenario 5

In Szenario 5 werden nur die unteren Hälften der Heizwände aktiviert. Hierbei sollte getestet werden, ob bezüglich der Behaglichkeit ein Unterschied zu Szenario 4 besteht. Auch hier reichte die Heizleistung aus, um das ganze Haus unter Extrembedingungen zu beheizen. Aus den beiden Messungen resultieren die Mittelwerte aus Tabelle 17.

Tabelle 17: Die Messwerte für Szenario 5 bei aktivieren der unteren Hälfte der Flächenheizsegmenten

Nr.	Strahlungstemperatur	Raumtemperatur	rel. Feuchte	Luftbewegung	CO <sub>2</sub> -Gehalt
9	23,6 °C	23,7 °C	31,9 %	0,02 m/s	786 ppm
10	23,4 °C	23,5 °C	30,6 %	0,02 m/s	662 ppm

Die sich aus Tabelle 17 errechneten Behaglichkeitswerte liegen bei Messung Nummer 9 für das vorausgesagte mittlere Votum bei 0,02 und der vorausgesagte Prozentsatz an Unzufriedenen bei 5,01 %. Messung Nummer 10 erreichte einen PMV-Wert von -0,04 und einen PPD-Wert von 5,03 %. Die Behaglichkeitswerte werden in Abbildung 97 grafisch dargestellt.

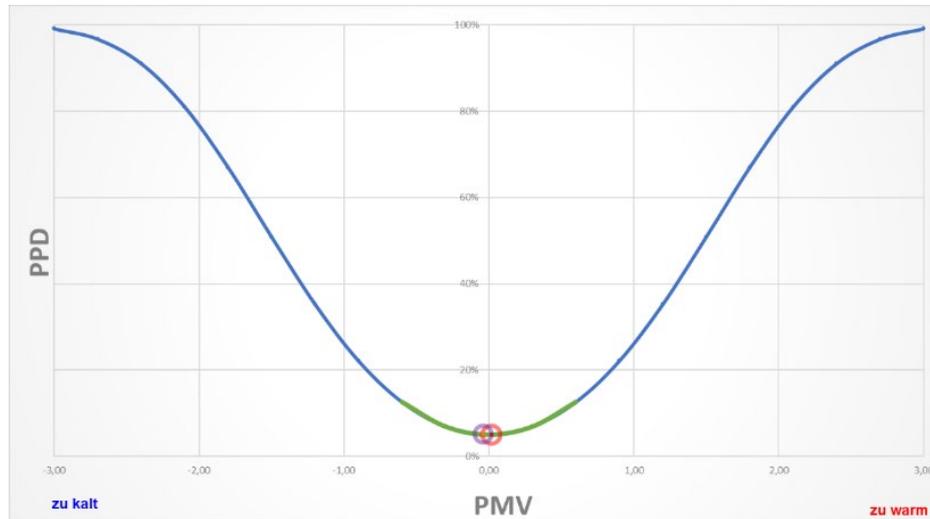


Abbildung 97: PMV/PPD-Wert der Behaglichkeitsmessung in Szenario 5

Im letzten Szenario lag die Leistung des Heizsystems 77 W unter der Norm-Heizleistung. In diesem Szenario war in beiden Messungen die Raumlufttemperatur um 0,1 °C höher als die Strahlungstemperatur. Der sehr geringe Temperaturunterschied führte nicht zu einer Beeinträchtigung der Behaglichkeit, wie an den PMV/PPD-Werten zu erkennen ist. Aus beiden Messwerten, der Luftbewegung mit 0,02 m/s und der Zuglufttrate von 0 %, lies sich in diesem Szenario eine Luftrotation beziehungsweise Luftverwirbelung durch die Heizung ausschließen. Die relative Feuchte lag mit 31,9 % und mit 30,6 % im akzeptablen Bereich.

Die Behaglichkeitskennwerte in diesem Szenario erreichten beide nahezu perfekte Werte. Das vorausgesagte mittlere Votum erreichte Werte von 0,02 und -0,04. Daraus resultieren für den vorausgesagten Prozentsatz an Unzufriedenen die Werte 5,01 % und 5,03 %.

### Szenario Heizlüfter

Für eine vergleichende Betrachtung wurde zur Untersuchung eine Behaglichkeitsmessung mit einem Heizgerät durchgeführt, das einen hohen Konvektionsanteil aufweist. Für die Messung wurden die gleichen Voraussetzungen wie für die Heizszenarien der Wandheizung angenommen. Es wurde eine Messung über 20 Minuten durchgeführt und ein Bekleidungsindex von 1,0 clo sowie ein Aktivitätsgrad von 1,0 met eingestellt. In Tabelle 18 werden die gemittelten Werte der Behaglichkeitsmessung des durch eines Heizlüfters erwärmten Raumes aufgelistet.

Tabelle 18: Messwerte zur Behaglichkeitsmessung bei einer Raumerwärmung mittels Heizlüfter

Nr.	Strahlungstemperatur	Raumtemperatur	rel. Feuchte	Luftbewegung	CO <sub>2</sub> -Gehalt
11	20,5 °C	22,9 °C	19,1 %	0,12 m/s	473 ppm

Die Messwerte der PMV/PPD-Messung Nummer 11 ergaben einen PMV-Wert von -0,89 und einen vorausgesagten Prozentsatz an Unzufriedenen von 21,84 %. Die Behaglichkeitsmesswerte sind in Abbildung 98 eingetragen.

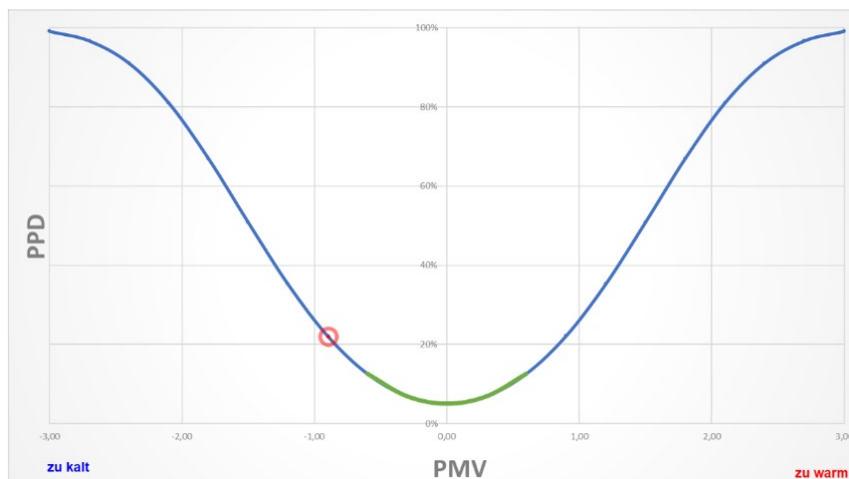


Abbildung 98: PMV/PPD-Wert der Behaglichkeitsmessung in Szenario Heizlüfter

Im Fall des Heizlüfters lag die Rauminnentemperatur bei 2,4 °C über der Strahlungstemperatur, was zu einem schlechteren Wohlbefinden als bei der Wandheizung geführt hat. Auch die, um einiges höhere, Luftbewegung von 0,12 m/s reduziert die Behaglichkeit durch ein Zuggefühl. Aufgrund der genannten negativen Einflüsse auf die Behaglichkeit, lag der PMV-Wert bei -0,89 und der PPD-Wert bei 21,84 %. Diese Behaglichkeitskennwerte stehen nach DIN EN ISO 7730 außerhalb eines akzeptablen Raumklimas.

Allgemein ist für die Behaglichkeitsmessungen zu sagen, dass allen Messungen der Wandheizung ein akzeptables Raumklima zugrunde lag. Abweichungen von den optimalen PMV/PPD-Werten sind jedoch, außer von der Trägheit, nicht vom Heizsystem abhängig, sondern von den Temperatursensoren und der automatischen Abschaltung. Jedes der fünf Szenarien bestätigt, dass keine Luftverwirbelung durch das Heizsystem entstand.

#### 2.11.4 Auswertung des Fragebogens zur Behaglichkeit

Der Fragebogen diente zur Feststellung, ob starke Abweichungen zwischen den gemessenen beziehungsweise errechneten Werten und den von den Probanden wahrgenommenen Werten entstanden. Weiterhin wurden im Fragebogen Einflüsse abgefragt, die in der PMV/PPD-Messung nicht berücksichtigt werden konnten. Durch die

geringe Teilnehmerzahl von vier Personen konnte kein allgemein gültiges repräsentatives Ergebnis für die Wandheizung erzielt werden. Die Befragung diente dennoch als Vergleichsergebnis zur PMV/PPD-Messung. Im Folgenden wird der Fragebogen mit den Angaben der Probanden dargestellt.

Im ersten Teil der Befragung geben alle Probanden an, dass die Außentemperatur einen relativ starken Einfluss auf die Behaglichkeit habe. Die Kleidung geben die Probanden wie in 1.3 zu sehen an.

### 1.1 Wie empfinden Sie die jetzige Außentemperatur?

heiß	warm	leicht warm	neutral	leicht kühl	kühl	kalt
					3	1

### 1.2 Wie wirkt sich die Außentemperatur auf Ihr Wohlbefinden aus?

stark		3	1					gering
-------	--	---	---	--	--	--	--	--------

### 1.3 Wählen Sie Ihren aktuellen Bekleidungsfaktor:

Leichte Sommerkleidung	
Leichte Arbeitskleidung	1
Winterbekleidung für Innenräume	3
Arbeitswinterbekleidung	

Hinsichtlich der Wärme im Haus geben im zweiten Teil der Befragung 4 Probanden an, zufrieden mit der Temperatur zu sein. Ein Proband gibt an, dass der Raum zu kühl sei. Bei der Frage, ob unterschiedliche Wärmequellen im Raum wahrgenommen werden können, gaben zwei der Probanden an, unterschiedliche Wärmequellen feststellen zu können. Sie lag bei ihren Vermutungen jedoch nicht richtig, erkannten also nicht, welche Heizwände ein- bzw. ausgeschaltet waren. Eine gleichmäßige Wärmeverteilung am Körper empfindet die Hälfte der Teilnehmer, jedoch empfand ein Proband eine stärkere Erwärmung des Kopfes und ein Proband ein Auskühlen der Füße.

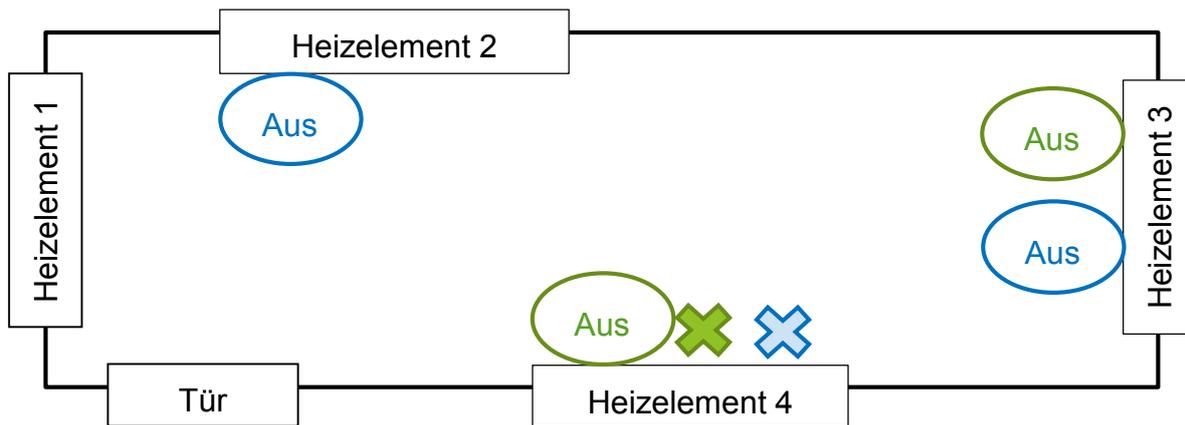
### 2.1 Fühlen Sie sich hinsichtlich der Wärme im Haus wohl?

zu warm			1	2		1		zu kalt
---------	--	--	---	---	--	---	--	---------

### 2.2 Können Sie feststellen, von wo / welchem Heizelement die Wärme ausgeht?

JA	NEIN
2	2

Falls JA zeichnen Sie bitte ein:



2.3 Spüren Sie eine gleichmäßige Wärmeverteilung am ganzen Körper?

JA	NEIN
2	2

2.4 Falls nein, welcher Körperbereich wird zu stark / zu schwach erwärmt: (einkreisen)



Einen Unterschied zwischen Konvektions- und Strahlungswärme erkannte nur die Hälfte der Probanden in Teil drei, wobei hier beide die Strahlung als leicht warm und die Konvektion als neutral einstufen. Eine vertikale Temperaturdifferenz nimmt keiner wahr. Die Luftfeuchtigkeit wurde von allen als neutral bis niedrig empfunden. Luftströme fielen keinem Probanden auf.

3.1 Können Sie einen Unterschied zwischen Konvektionswärme und Strahlungswärme feststellen?

JA	NEIN
2	2

3.2 Falls bei 3.1 JA:

3.2.1 Wie empfinden Sie die Strahlungstemperatur?

Heiß	warm	leicht warm	neutral	leicht kühl	kühl	kalt
		2				

3.2.2 Wie empfinden Sie die Raumlufttemperatur?

heiß	warm	leicht warm	neutral	leicht kühl	kühl	kalt
			2			

3.3 Können Sie ein Temperaturgefälle von oben nach unten im Raum feststellen?

JA	NEIN
	4

3.4 Wie empfinden Sie die aktuelle Luftfeuchtigkeit im Raum?

extrem hoch	sehr hoch	hoch	neutral	niedrig	sehr niedrig	extrem niedrig
			3	1		

3.5 Wie wirkt sich dies auf Ihr Wohlbefinden aus?

stark		1		1	1	1		gering
-------	--	---	--	---	---	---	--	--------

3.6 Können Sie Luftströmungen im Raum wahrnehmen?

JA				NEIN			
				4			

3.7 Falls ja, wie wirken sich die Luftströmungen auf Ihre Behaglichkeit aus?

stark								gering
-------	--	--	--	--	--	--	--	--------

### 2.11.5 Energie- Leistungsmessung

Die Energiemessung wurde mithilfe von Schalt- und Messsteckdosen durchgeführt. Die Speicherung der Daten erfolgte durch die CCU2. Für die Messung der Energiewerte wurde bei einer Außentemperatur von ca. 4 °C der Demonstrationsraum von 18 °C auf 23 °C operativer Innenraumtemperatur erwärmt. Der Aufwärmvorgang dauerte 1 Stunde und 40 Minuten. Abbildung 99 zeigt die Leistungsdaten der einzelnen Heizwände in Abhängigkeit der Zeit während des Aufheizvorganges. Nachdem nach 100 Minuten die optimale operative Raumtemperatur erreicht wurde, schalteten alle 16 Netzgeräte annähernd gleichzeitig ab. Abbildung 99 zeigt weiterhin, dass zu Beginn die Heizperioden aller vier Heizwände annähernd gleichzeitig starteten und endeten. Da jede Heizwand über ihren eigenen Temperatursensor verfügte, sind diese Zeiten zu Beginn leicht versetzt. Im Laufe der Zeit passte sich die Innenraumtemperatur genau an die eingestellte Temperatur an, so dass eine geringe Abweichung zwischen den vier Sensoren dazu führte, dass Heizwand 3 nicht mehr aktiviert wurde. Die drei restlichen Heizwände begannen zum Ende hin zu unterschiedlichen Zeiten zu heizen.

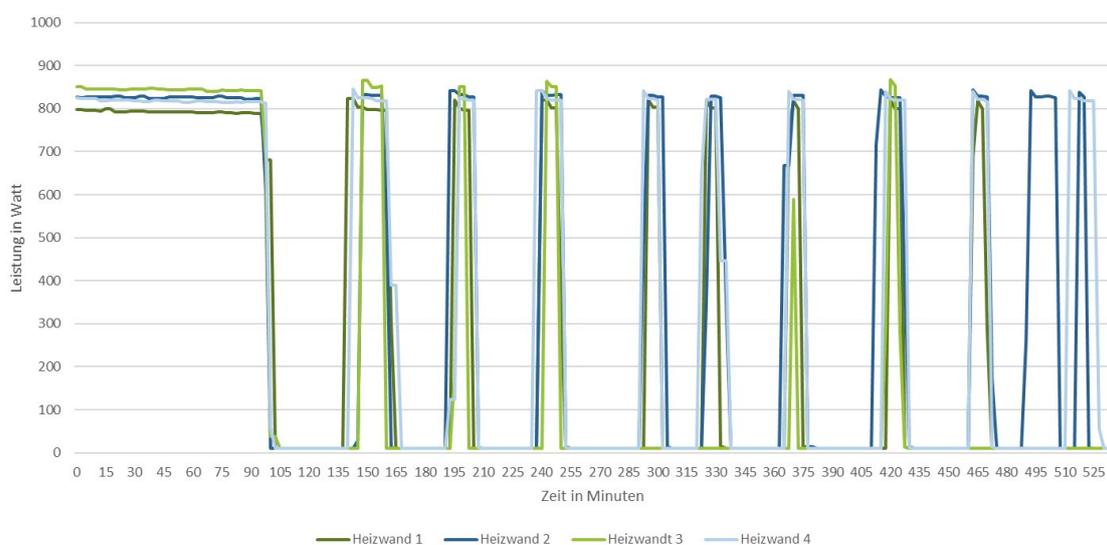


Abbildung 99: Leistungsdaten der einzelnen Heizwände über den gesamten Heizprozess zum Aufheizen des Demonstrationshauses

## Wirkungsgrad

Für die Bewertung der Effizienz der Heizung, musste der Wirkungsgrad der Heizung gemessen und berechnet werden. Dafür musste die Leistung an der Heizwand mit der Leistung, die an der Steckdose zur Verfügung gestellt wurde, ins Verhältnis gesetzt werden. Tabelle 19 gibt die Wirkungsgrade der vier Heizwände an. Die Erwärmung der Heizplatten führte zu einem minimalen Abfall des Wirkungsgrades.

Tabelle 19: Errechnete Wirkungsgrade der Heizwände unter Last

Heizwand Nr.	Leistung Netzgeräte	Leistung Steckdose	Wirkungsgrad $\eta$
1	710,63 W	797,70 W	0,891
2	756,00 W	853,20 W	0,886
3	831,32 W	950,20 W	0,875
4	909,89 W	1056,5 W	0,861

## Energiebedarfsmessung

Der wichtigste Kennwert für die Praxistauglichkeit des Heizvorgangs ist die benötigte Energie in Wh. Abbildung 100 zeigt in den ersten 1,66 Stunden den Energiebedarf für die Aufheizung des Raumes und danach das Halten der Temperatur auf 22 °C. Die Durchführung der Energiemessung fand simultan der Behaglichkeitsmessung statt. In Abbildung 100 fällt auf, dass die zum Halten einer Temperatur benötigte Energie niedriger als im Dauerbetrieb zum Aufheizen ist. Die Tabelle unter dem Diagramm zeigt die benötigte Energie je Heizwand pro Stunde. Weiterhin ist in Abbildung 100 zu sehen, dass zum Ende hin Heizwand 3 temperatursensorbedingt nur noch Energie für den Betrieb der Netzgeräte, nicht aber für die Heizwand benötigte.

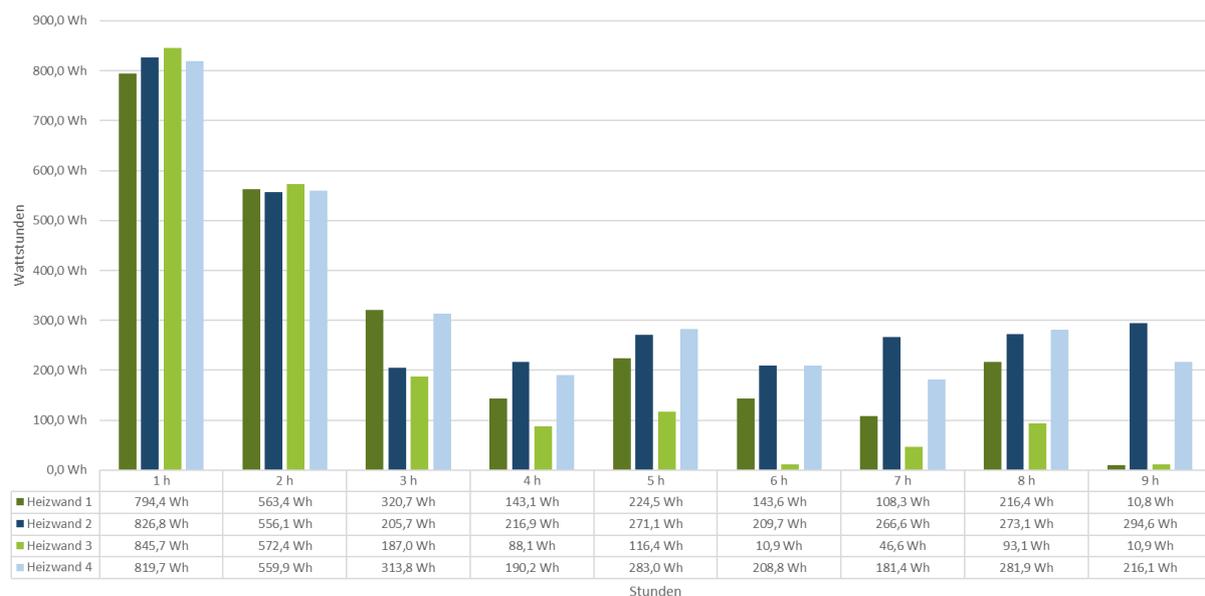


Abbildung 100: Benötigte Energie der Wandheizung in Wattstunden für Szenario 1

## Aufheizvorgang

Die Leistungs- und Energiemessung zeigte, dass die Aufheizphase zu Beginn die meiste Energie benötigte. Um diesen Vorgang besser beobachten zu können, wurden mit einer Wärmebildkamera im 30-Sekunden-Takt Bilder aufgenommen. In Abbildung 101 wird der 42-minütige Aufwärmvorgang einer Heizwand dargestellt, indem die Bildaufnahmen aneinandergereiht abgebildet werden. Schwarze Stellen zeigen eine Temperatur von 5 °C und weiße Stellen liegen bei 41 °C. Im Verlauf der Erwärmung ist klar zu sehen, dass sich zu Beginn nur die Kupferbahnen erwärmen. Sobald sich die ganze Platte aufgeheizt hat, läuft die Erwärmung schneller ab.

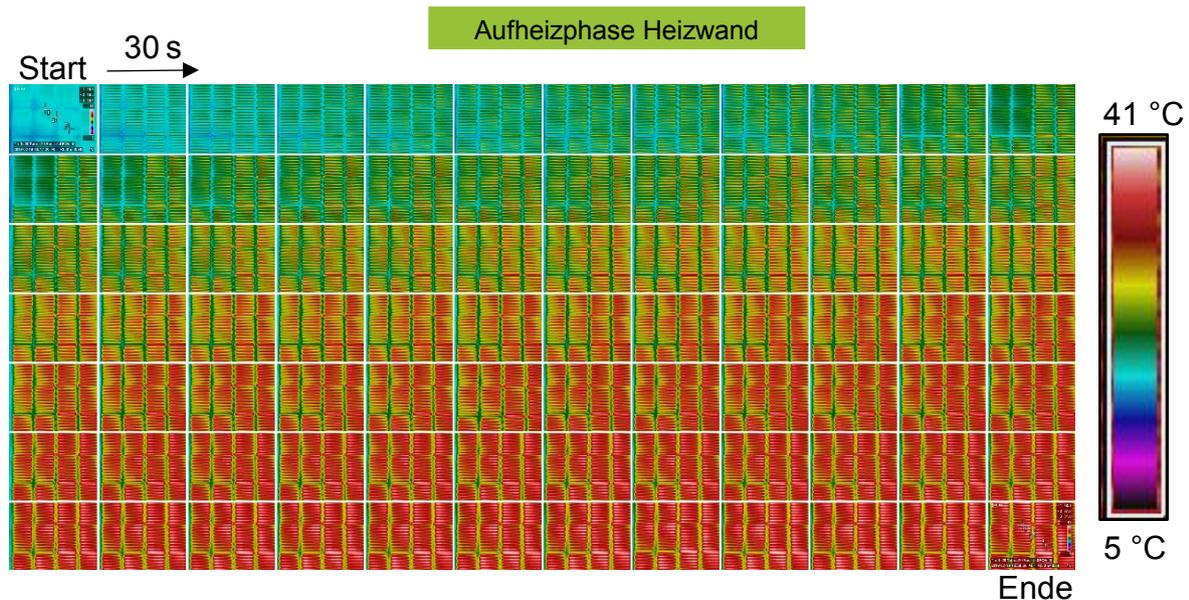


Abbildung 101: Aufwärmvorgang einer Heizwand im 30-Sekunden-Takt

## 2.12 AP 12: Erstellen eines kinematischen Simulationsmodells zur Integration in bestehende Produktionsprozesse

Im Folgenden werden die Ergebnisse zur simulativen Integration des Plasma-Beschichtungsprozesses in eine bestehende Produktionslinie eines Fertighausherstellers vorgestellt. Exemplarisch wird dafür die Fertigungsumgebung der Fa. Luxhaus aus Georgensgmünd ausgewählt. Die Betrachtung wurde am Beispiel eines typischen Wohnraums vorgenommen, dessen Grundriss eine Fläche von 55 m<sup>2</sup> beträgt und in dieser Form aufgebaut wurde. Die detaillierten Maße des Referenzraumes sind Abbildung 102 zu entnehmen.

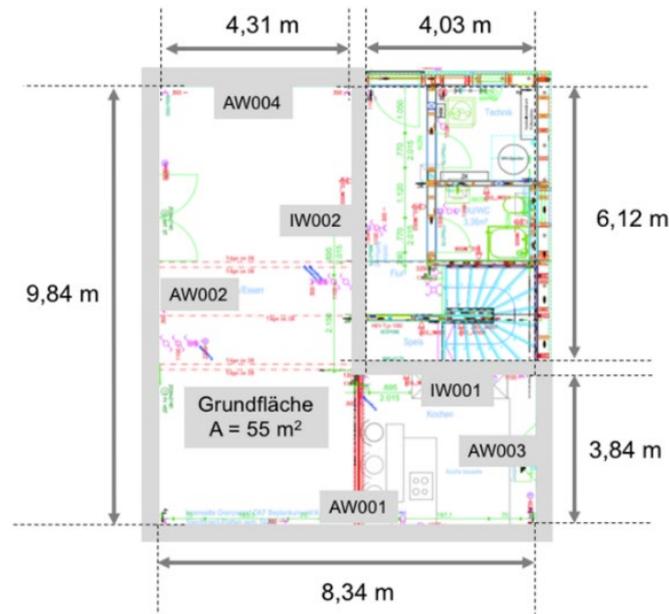


Abbildung 102: Grundriss des exemplarisch ausgewählten Wohnraums zur virtuellen Integration des Beschichtungsprozesses

Die Firma Luxhaus erreicht mit ihrem konstruktiven Aufbau der Wände bzw. der Häuser einen Dämmstandard der Energieeffizienzklasse A<sup>+</sup>. Bei einer Raumgröße von 55 m<sup>2</sup> besteht demnach ein Heizwärmebedarf von 1.650 kWh/a, was bei 1.900 Volllaststunden pro Jahr einem Energiewert von ca. 870 W entspricht (siehe Abbildung 70). Aus den vorhergehend aufgezeigten Grundlagenuntersuchungen der 15 x 15 cm großen Proben, deren Daten aus den Voruntersuchungen zusammenfassend in Abbildung 103 dargestellt sind, ging hervor, dass bei einer Oberflächentemperatur von 30 °C eine Leistung von 5,1 W auf einer Leiterbahnlänge von 1.085 mm erreicht werden kann. Somit beläuft sich die Mindestlänge der Heizstruktur im exemplarisch ausgewählten Wohnraum von 55 m<sup>2</sup>, zum Einbringen einer ausreichenden Wärmemenge, mind. 185.000 mm.

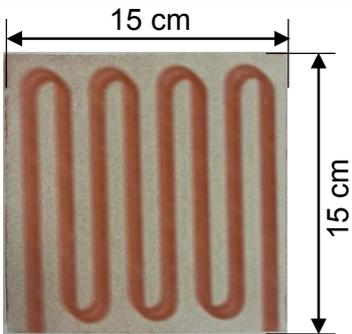
<b>Probengröße</b>	15 cm x 15 cm	<b>Ausgangsprüfung</b> 
<b>Leiterbahntemperatur</b>	30 °C	
<b>Leiterbahnlänge</b>	1,085 m	
<b>Elektrischer Widerstand</b>	2,6 Ω	
<b>Stromstärke</b>	1,35 A	
<b>Spannung</b>	3,8 V	
<b>Elektrische Leistung (225 cm<sup>2</sup>)</b>	5,1 W	
<b>Elektrische Leistung auf 1 m<sup>2</sup></b>	226 W/m <sup>2</sup>	

Abbildung 103: Zusammenfassende Darstellung, der aus den Grundlagenuntersuchungen gewonnenen Eigenschaften der plasmaerzeugten Heizstruktur

Sorgt eine gleichmäßige Wärmeeinbringung von allen Seiten innerhalb eines Raumes für eine angenehmere Behaglichkeit (siehe Abbildung 4), wurde bei der Integration des Plasmabeschichtungsprozesses in die Fertigungslinie untersucht, ob eine vollflächige Beschichtung von Heizstrukturen auf allen Wandflächen innerhalb des Fertigungsprozesses der Wandmodule realisiert werden kann.

### 2.12.1 Festlegen eines Standard-Leiterbahnelementes

Auf Basis der Voruntersuchungen wurde für die serienmäßige Fertigung der Heizstrukturen mittels Plasmabeschichtungsprozess ein Standard-Leiterbahnelement (LE) definiert, das je nach Wärmeforderungen des Raumes beliebig oft vervielfältigt werden kann. Diese Modulbauweise bietet den Vorteil der leichteren Berechnung der Wärmeerzeugung, bzw. einfacheren praktischen Fertigung der Heizelemente auf dem Wandelement sowie einer standardisierten elektrischen Leistungsversorgung der Flächenheizsegmente.

Das LE ergab sich aus den Gegebenheiten der Wandelemente hinsichtlich Breite und Höhe. Die Breiten der einzelnen Wandabschnitte (WA) bzw. der Abstand zwischen zwei Elementen (z. B. Türen) waren unterschiedlich, betragen aber mindestens 1,9 m. Das gewählte Standard-Leiterbahnelement wurde deshalb unter Einberechnung eines Sicherheitsfaktors nicht breiter als 1,6 m gewählt. In Abbildung 104 ist dieses Leiterbahnelement in Relation zur Wandbreite dargestellt. Die Anzahl der Windungen wurde auf drei festgelegt, so dass sich eine Länge des Standard-Heizstrukturen-Elementes von 5 Metern ergibt.

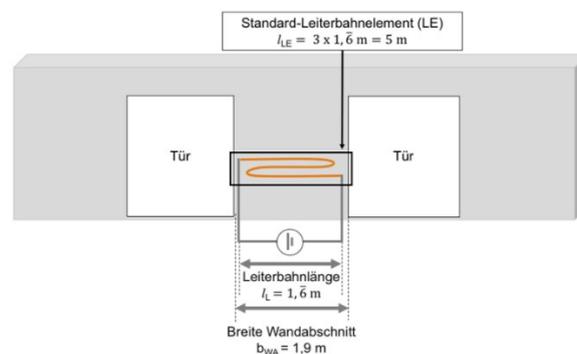


Abbildung 104: Darstellung des Standard-Leiterbahnelements in Relation zur Wandbreite

### 2.12.2 Entwicklung möglicher Heizsegmente

Um eine ausreichende Heiz-Leistung für den Raum aufbringen zu können, wurden mehrere Leiterbahn-Elemente zu Heizsegmenten (HS) in Parallelschaltung zusammengeschlossen. Wurde die Länge des LE zuvor auf 5 m festgelegt, bei einer Breite von 1,66 m, kann die Anzahl der LE pro Heizsegment durch die Abstände der Leiterbahnwindungen variiert werden. Eine Limitierung liegt durch die Höhe der Wand mit

2,5 m vor. Für die Variation der Leiterbahnstruktur, d. h. für verschiedenen Leistungsdichten pro Fläche, wurden die Mittenabstände 58 mm, 78 mm und 118 mm gewählt. In Abbildung 105 wird dargestellt, was unter Mittenabstand zu verstehen ist.

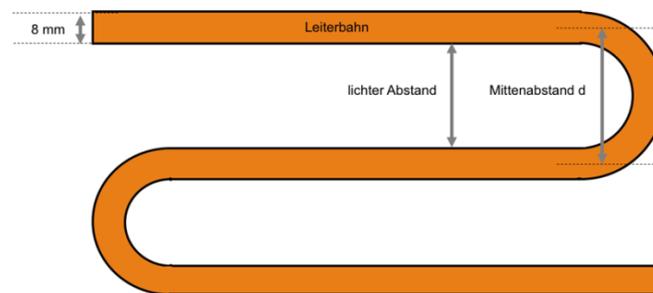


Abbildung 105: Definition der Bezeichnung der Leiterbahnabstände

Bei einem Leiterbahn-Mittenabstand von 58 mm und einer Wandhöhe von 2.500 mm können 43 gewundene Leiterbahnen übereinander angeordnet werden:

$$n_{\text{Leiterbahnen}} = \frac{h_{\text{Wand}}}{d_{\text{Leiterbahn}}} = \frac{2500 \text{ mm}}{58 \text{ mm}} = 43,1$$

Da ein Leiterbahnelement bei der betrachteten Leiterbahnstruktur aus drei Windungen besteht, können 14 Leiterbahnen untereinander angeordnet werden:

$$n_{\text{Leiterbahnelemente}} = \frac{n_{\text{Leiterbahnen}}}{3} = \frac{43}{3} = 14,3$$

Die weiteren Werte für einen Mittenabstand von 78 mm bzw. 118 mm können Tabelle 20 entnommen werden

Tabelle 20: Anzahl der Leiterbahnelemente in Abhängigkeit des Leiterbahnmittenabstandes und der nutzbaren Wandhöhe

<ul style="list-style-type: none"> <li>Anzahl Windungen pro Standard-Leiterbahnelement: 3</li> <li>Nutzbare Wandhöhe: 2.500 mm</li> </ul>		
Mittenabstand der Leiterbahnen [mm]	Anzahl der Leiterbahnen pro Wandhöhe	Resultierende Anzahl Standard-LE
58	43	14
78	32	10
118	21	7

Abbildung 106 zeigt die Heizsegmente für die in Tabelle 20 angegebenen Leiterbahnmittenabstände.

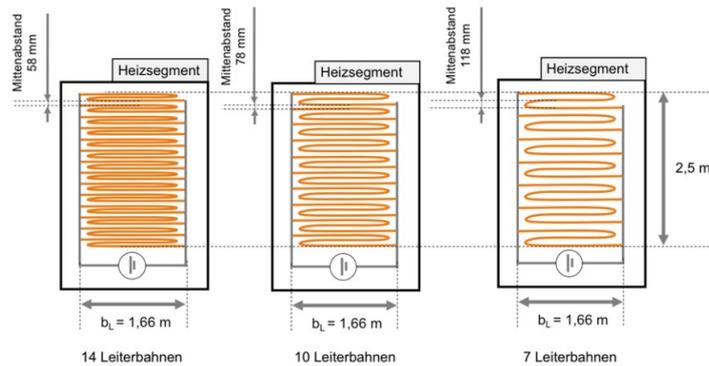
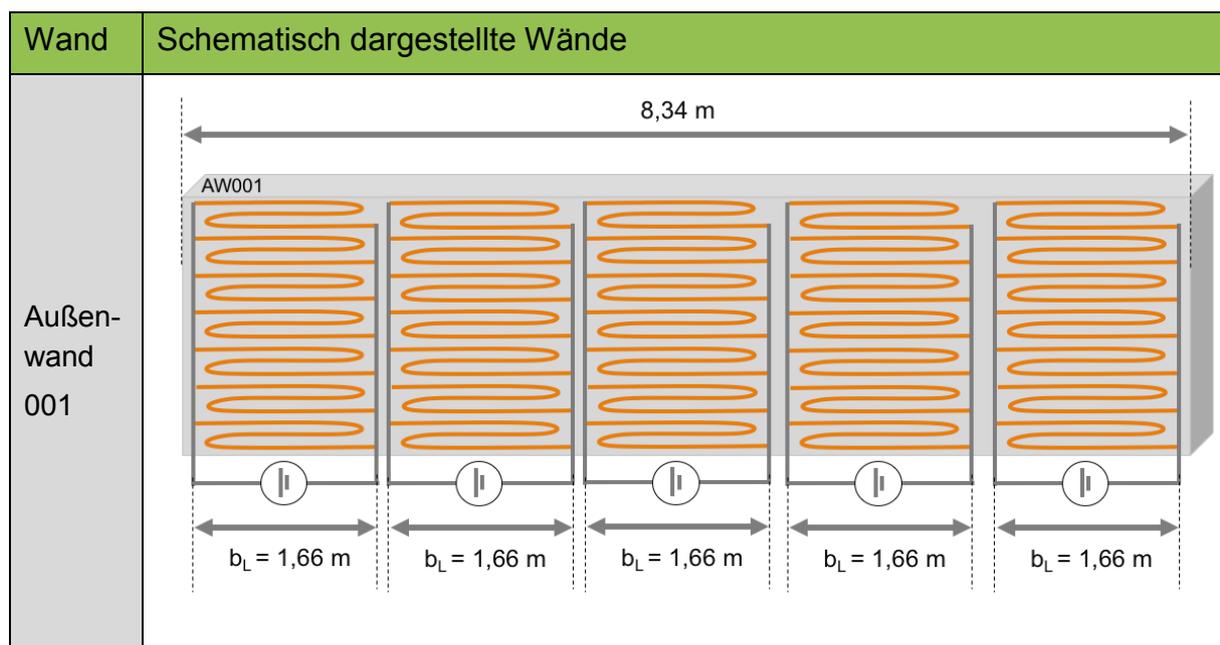


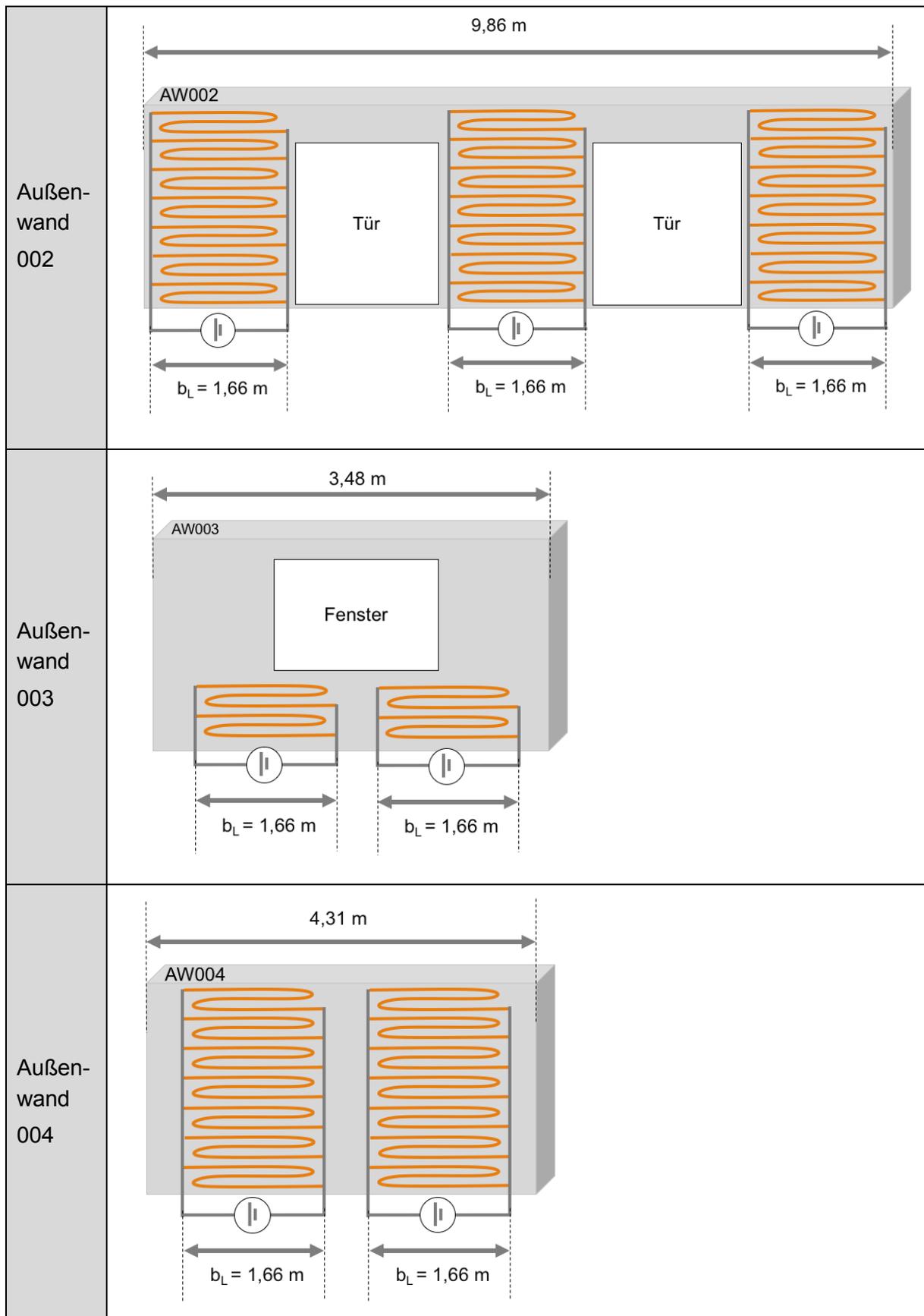
Abbildung 106: Schematische Darstellung von Heizsegmenten mit unterschiedlichen Leiterbahnabständen

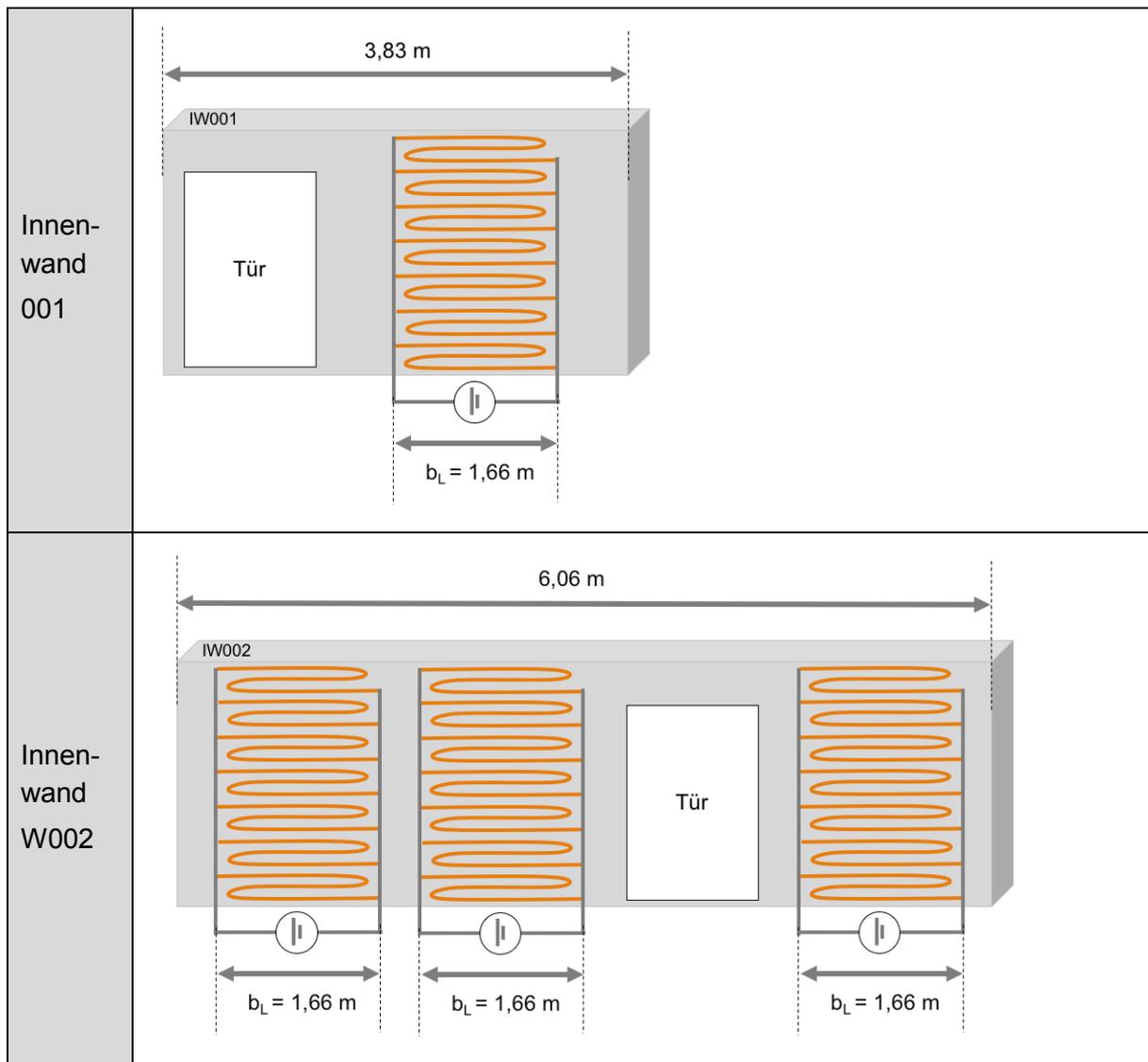
### 2.12.3 Abschätzung der Dauer der Leiterbahnbeschichtung und der elektrischen Leistung der Leiterbahnen

Zur Veranschaulichung sind in Tabelle 21 alle Wände des Referenzraumes (nach Abbildung 102) mit entsprechenden Heizsegmenten dargestellt. Ist eine Beschichtung aller Wände für die erforderliche Heizleistung vollkommen überdimensioniert, wie die Berechnung im Vorhergehenden gezeigt haben, wurde in den simulativen Untersuchungen von einer maximal möglichen Beschichtung ausgegangen, um eine gleichmäßige Erwärmung aller raumumschließenden Flächen realisieren zu können. Weiterhin ist eine Strukturierung aller Wände in dem Maße sinnvoll, so dass in der späteren Wohnraumgestaltung keine Limitationen vorherrschen und je nach Anforderung beliebige Heizsegmente aktiviert werden können und somit die Flexibilität gewahrt werden kann.

Tabelle 21: Schematische Darstellung aller Wände des Referenzraums mit Heizstrukturen (Außenwand = AW, Innenwand = IW)







#### 2.12.4 Beschreibung des Produktionsprozesses eines Fertighausherstellers

Im Folgenden wird die Produktion eines Fertighauses exemplarisch an dem Vorgehen der Firma Luxhaus beschrieben. Je nach Kapazitätsauslastung kann ein Fertighaus in zwei bis drei Tagen hergestellt werden. Abbildung 107 zeigt die Bearbeitungsstationen in der Fertigungshalle sowie die chronologische Prozessfolge in gelber Farbe.

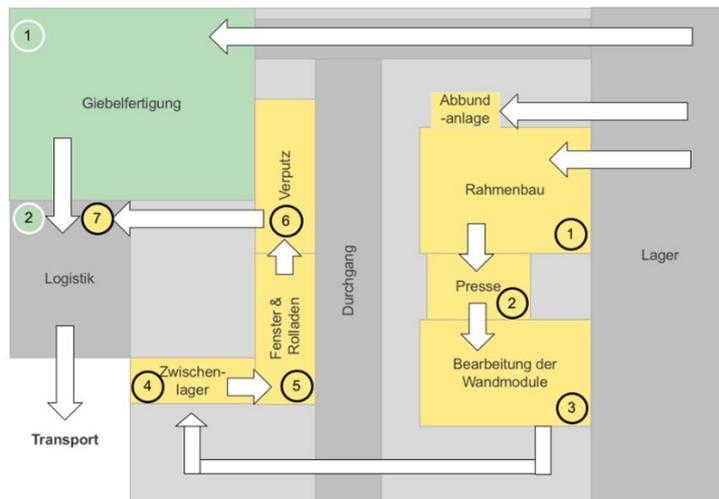


Abbildung 107: Schematische Darstellung eines exemplarischen Produktionsprozesses zur Fertighausherstellung

Zunächst wurden die für den Rahmen verwendeten Fichtenhölzer in der Abbundanlage auf die gewünschte Länge zugeschnitten und mit Bohrungen versehen, die für geplante Versorgungsleitungen benötigt werden. Im Rahmenbau (Station 1) wurden die Fichtenholzplanken miteinander zu einem Rahmen verschraubt. Anschließend wurden OSB-Platten passend auf die Rahmen gesetzt und mit Leim und Klammern fixiert (Station 1).

Außen- und Seitenwände wurden an dieser Stelle unterschiedlich behandelt. Innenwände wurden auf beiden Seiten mit OSB-Platten bestückt, bevor sie in die Presse zur Verbindung von Rahmen und Platten kamen. Die Füllung der Innenwände mit Dämmmaterial und die Vorinstallation der Versorgungsrohre erfolgte deshalb vor der Pressung. Die Außenwände erhielten eine OSB-Platte hingegen nur auf der Innenseite. Die Innenwände wurden nun mit einem Butterflyförderer um 180° gewendet, damit das Dämmmaterial in den Rahmen eingelegt werden kann und die Vorbereitungen für Elektroinstallationen getroffen werden konnten. Abbildung 108 zeigt das Foto einer Innenwand mit Dämmmaterial. In der Vergrößerung sind Leerrohre und eine gebohrte Durchführung zu sehen.

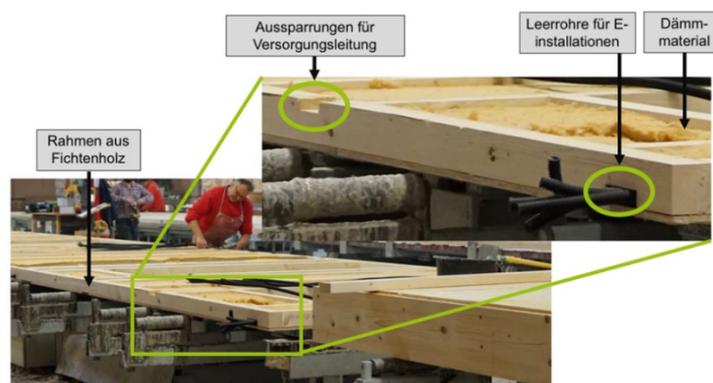


Abbildung 108: Einlegen Dämmmaterial und Leerrohre in den Rahmen

Sind die Arbeiten an der Innenwand abgeschlossen, wird diese auch von der zweiten Seite mit einer OSB-Platte beplankt. Nach Abschluss des Fertigungsschrittes wurden die Wände in die sogenannte Einetagenoberkolbenpresse (Station 2) befördert, die für einen festen Verbund der Rahmen mit den OSB-Platten sorgen. In ihr findet mittels einer Oberflächentemperatur von 130 °C und einem Auflagegewicht von 390 t die Aushärtung des vorher aufgetragenen Leims innerhalb von 20 min statt, Abbildung 29.



Abbildung 109: Presse zur Aushärtung des Klebers für einen dauerhaften Verbund zwischen Rahmen und OSB-Platten

Nach der Presse (Station 3) wurde der Wandaufbau vervollständigt. Die Wandrohlinge erhielten die noch fehlenden Aufbauschichten und Installationen für die Versorgungsleitungen. Wie beschrieben wurden die Außenwände mit Holzfaserdämmplatten beplankt, nachdem das Wandinnere mit Dämmmaterial gefüllt wurde.

Die notwendigen Aussparungen an den Wandinnenflächen für die elektrische Versorgung und andere mögliche Belange wurden mit Werkzeugmaschinen erledigt, wie in Abbildung 110 dargestellt. Zu diesem Zweck wurden Fräs-, Säge- und Drehmeißel-Werkzeuge computergesteuert eingesetzt. Sie wurden dafür über eine Bühne an die gewünschte Wandstelle gefahren. Abbildung 110 zeigt ein Foto dieser Bearbeitungsstation.

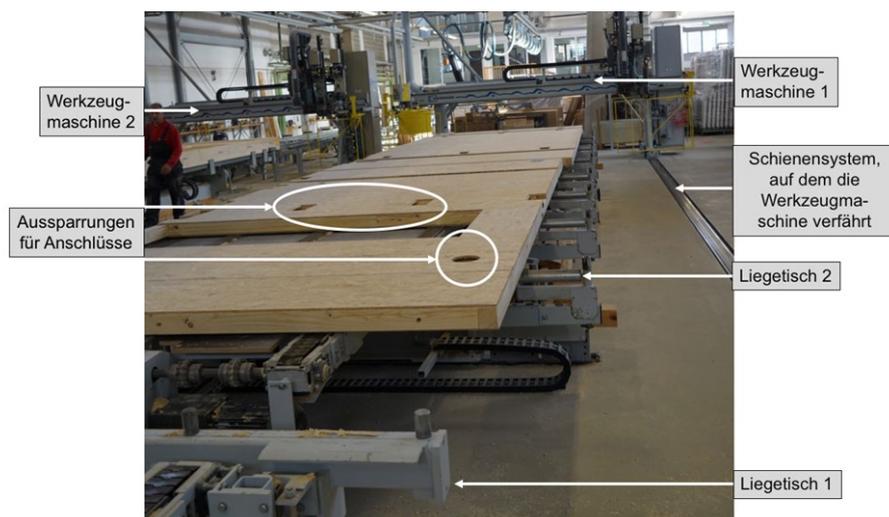


Abbildung 110: Automatisierte Bearbeitung der Wandmodule nach der Presse mittels Werkzeugmaschine

Die fertigmontierten Wände wurden zunächst zwischengelagert (Station 4). Vor Auslieferung erfolgte noch der Einbau der Fenster und Rollläden (Station 5) sowie der Verputz (Station 6). Abbildung 111 zeigt, wie die Wände in der Fertigungshalle platzsparend über ein Schienensystem transportiert werden.

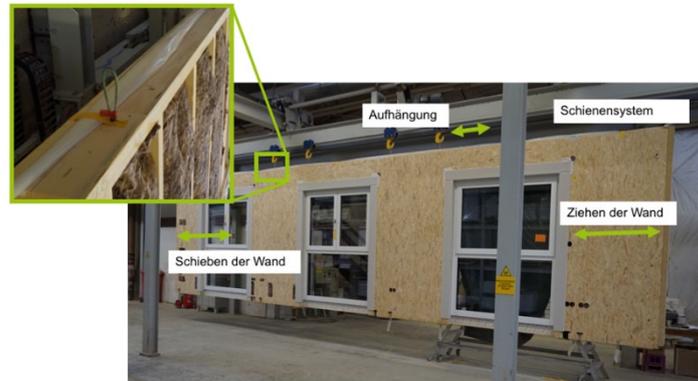


Abbildung 111: Transport der Wände durch die Fertigung über ein Schienensystem

Nach Analyse des gesamten Fertigungsprozesses wurde Station 3 für die Integration der Wandbeschichtung mit Hilfe des Plasmaschichtungsverfahrens als die geeignetste identifiziert. Sind die Bearbeitungsmaschinen 1 bzw. 2 für das Fräsen bzw. Klammern zuständig, kann die vorhandene Technik um Plasmadüsen ergänzt werden. In Abbildung 112 ist schematisch die räumliche Aufteilung des Produktionsbereichs 3 dargestellt, innerhalb dessen der Beschichtungsprozess bei Bearbeitungsmaschine 1 oder 2 integriert werden könnte.

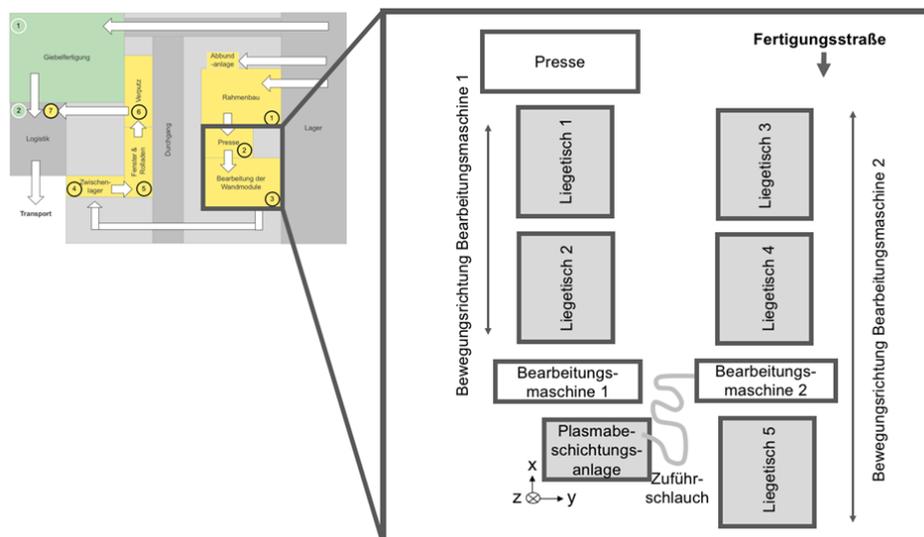


Abbildung 112: Übersicht des Fertigungsabschnitts für die Bearbeitung der Wandmodule

Die Wände werden nach der Presse zunächst auf Liegetisch 1 geschoben. Dort werden die OSB-Platten mit Gipskarton beplankt. Mit der Werkzeugmaschine werden die notwendigen Fräsarbeiten, also die Vorbereitungen für die Installationen der Sanitär

und Elektroeinrichtungen durchgeführt. Mit Hilfe des Werkzeugrevolvers können die Fräs- oder Drehwerkzeuge automatisch gegen die Plasmabeschichtungs-Düsen ausgetauscht werden, so dass auch die anderen Bearbeitungsschritte in gewohnter Weise erfolgen können.

In Abbildung 113 bzw. Abbildung 114 sind beispielhaft sechs Düsen (dunkelgrau) in die Bearbeitungsmaschine integriert. Die durch die Maschine mögliche Bewegungsfreiheit in y-Richtung ist durch die hellgrauen Felder gekennzeichnet und beträgt im Beispiel mit sechs Düsen in etwa 0,4 m bei einer Maschinenbreite von etwa 3,5 m. Es besteht somit die Möglichkeit, mit den Düsen jeden Bereich der Wand zu erreichen. Die Verwendung mehrerer paralleler Düsen hat den Vorteil der Verkürzung der Beschichtungsdauer.

Weiterhin wird neben der Beschichtungsdüse das Pulverzuführsystem und die Plasmaerzeugungseinheit benötigt, welche je nach Ausführung (z. B. Größe des eingefüllten Pulvers) aufgrund des modularen Aufbaus der einzelnen Geräte annähernd beliebig klein und flexibel gestaltet werden können. Platz für die Peripherie der Beschichtungsanlage steht neben der Werkzeugmaschine bereit, ebenso wäre auch die Mitführung möglich, um lange Zuführleitungen und somit z. B. Schwankungen in der Pulverzufuhr zu vermeiden.

In Abbildung 113 ist der Beschichtungsprozess sowie eine mögliche Leiterbahnstruktur dargestellt. Neben der Maschine befindet sich ein Werkzeugrevolver, der die Werkzeuge für die Bearbeitungsschritte beinhaltet.

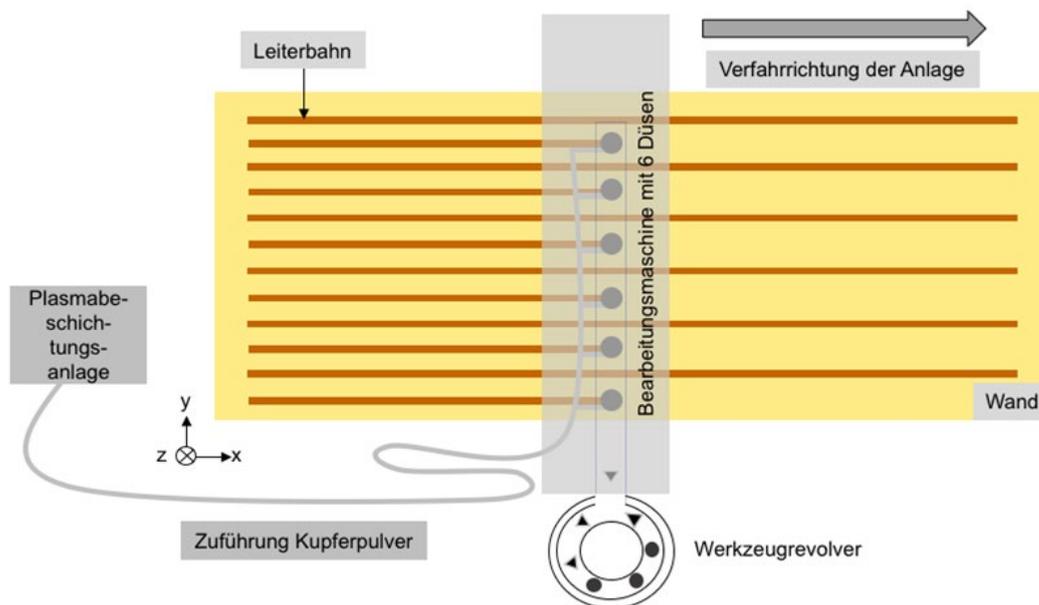


Abbildung 113: Schematisch dargestellter Beschichtungsprozess

Generell erscheint es möglich, das Plasmabeschichtungsverfahren für die Beschichtung der Innenwände mit Kupferleiterbahnen in den bestehenden Fertigungsprozess zu integrieren. Die notwendigen Anpassungen scheinen nach aktuellem Stand nicht unüberbrückbar zu sein. Betroffen ist primär die Bearbeitung der Wandrohlinge auf

den Liegetischen nach der Presse. Die Presse stellt den Taktgeber für den Durchlauf der Wände durch den Fertigungsprozess dar. Die Wandrohlinge aus der Abbundanlage benötigen in der Presse 20 Minuten damit der Kleber, der das Rahmenfachwerk mit den Spanplatten verbindet, aushärten kann. Somit verzögert die zusätzliche Leiterbahnbeschichtung den Fertigungsprozess nicht, sofern die Beschichtungsdauer 20 Minuten nicht überschreitet.

Nun galt es anhand der Vorgaben wie Taktzeit (20 min), der Länge des Standard-LE, der Verfahrensgeschwindigkeit während des Beschichtungsprozesses (60 mm/s) und der Anzahl der Überfahrten, welche auf Basis der Grundlagenuntersuchungen auf sechs festgelegt wurde, die Anzahl der LE pro Wand bzw. die Düsenanzahl während der Beschichtung festzulegen. Die Leiterbahnmittenabstände wurden bereits zuvor in Abbildung 106 mit 35 mm, 50 mm bzw. 70 mm festgelegt. Abbildung 114 zeigt den schematischen Aufbau der Bearbeitungsstation zum additiven Auftrag der Heizstrukturen mittels Plasmabeschichtung. Werden wie im Beispiel in Abbildung 114 sechs Düsen parallel betrieben, beträgt der Handlungsspielraum in Y-Richtung pro Düse ca. 0,5 m, werden dagegen drei bzw. 12 Düsen parallel für die Beschichtung eingesetzt, müssen die Düse eine Länge von jeweils 1 m bzw. 25 cm bearbeiten. Mehr als 12 simultan betriebene Düsen sollten aufgrund des sonst zu klein ausfallenden Bearbeitungsbereichs in Y-Richtung nicht eingesetzt werden, zumal die Zuführung mit den benötigten Medien andernfalls einen zu hohen Aufwand einnehmen würde.

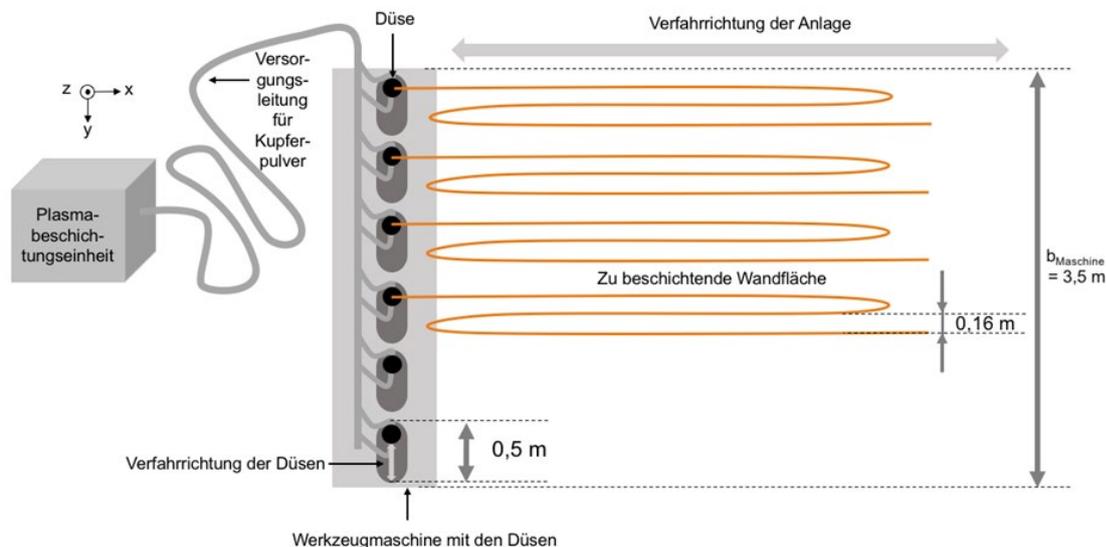


Abbildung 114: Bei Integration von sechs Düsen beträgt die Verfahrhöhe in Y-Richtung ca. 0,5 m

Tabelle 22 zeigt die Beschichtungsdauer der Wände des Referenzraums in Abhängigkeit der zuvor festgelegten Leiterbahnmittenabstände und Anzahl paralleler Düsen. Die Kombinationen, welche innerhalb der Taktzeit von 20 Minuten, eine vollflächige Beschichtung der einzelnen Wandflächen hervorbringen, sind in der Tabelle hellgrün unterlegt. Wie zuvor erwähnt, beträgt die minimale Länge der Heizstruktur, welche zum

Beheizen des Raumes insgesamt eingebracht werden muss 185.000 mm. Eine komplette Beschichtung der 185.000 mm kann im Beispielraum unter allen Annahmen auf drei Wänden (blau) realisiert werden. Stehen nur kleinere Flächen zur Verfügung, können die einzelnen LE auf mehrere Wände aufgeteilt werden.

Tabelle 22: Beschichtungsdauer der Wände in Abhängigkeit des Leiterbahnmittenabstandes

<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Taktzeit 20 Minuten</li> <li>▪ Leiterbahnlänge 5.000 mm</li> <li>▪ Verfahrensgeschwindigkeit 60 mm/s</li> <li>▪ Beschichtungsdurchläufe 6</li> </ul>						
	Anzahl LE pro Wand	Länge Leiterbahn gesamt [mm]	Dauer mit 3 Düsen [min]	Dauer mit 6 Düsen [min]	Dauer mit 12 Düsen [min]	
Außenwand 001	70	350.000	194,4	97,2	48,6	
	50	250.000	138,9	69,4	34,7	
	35	175.000	97,2	48,6	24,3	
Außenwand 002	42	210.000	116,7	58,3	29,2	
	30	150.000	83,3	41,7	20,8	
	21	105.000	58,3	29,2	14,6	
Außenwand 003	10	50.000	27,8	13,9	6,9	
	8	40.000	22,2	11,1	5,6	
	4	20.000	11,1	5,6	2,8	
Außenwand 004	28	140.000	77,8	38,9	19,4	
	20	100.000	55,6	27,8	13,9	
	14	70.000	38,9	19,4	9,7	
Innenwand 001	14	70.000	38,9	19,4	6,5	
	10	50.000	27,8	13,9	4,6	
	7	35.000	19,4	9,7	3,2	
Innenwand 002	42	210.000	116,7	58,3	29,2	
	30	150.000	83,3	41,7	20,8	
	21	105.000	58,3	29,2	14,6	

### 3 Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel dieses Forschungsprojektes war die Fertigung eines Wandflächenheizsystems mittels Plasmabeschichtungsverfahren und die anschließende Untersuchung der Behaglichkeit.

Nach der Erstellung eines Anforderungsprofils und der Charakterisierung der Materialien, haben sich Gipskartonplatten als die ideale Basis für Flächenheizungen herausgestellt. Während der Herstellung von Probekörpern haben die verschiedenen Charakterisierungsmethoden eine starke Schwankung des Beschichtungsergebnisses erkennen lassen. Nach der Modifizierung des Plasmabeschichtungsprozesses mit einer geeigneten Pulverzuführung und einem speziellen Metallpulver konnten diese Hürden überwunden und ein optimales Beschichtungsergebnis erzielt werden.

Es wurden verschiedene Beschichtungslayouts hinsichtlich ihres redundanten Verhaltens bei einer lokalen Unterbrechung der Heizstruktur, aufgrund von z. B. Bohren eines Loches in der Wand, untersucht. Dabei führt eine Unterbrechung des Schlangenlinien-Layouts zu einem größeren partiellen Ausfall eines Heizsegmentes, im Vergleich zu alternativ untersuchten Strukturen (Rauten-, Schachbrett-, Quadrat-, Rippenstruktur). Dennoch wurde dieses Beschichtungs-Layout einerseits aufgrund der Realisierung einer hohen Leistungsdichte an Heizstrukturen auf dem Gipskarton-Basis-Substrat und andererseits aufgrund der einfacheren elektrischen Regelung für die Erstellung der Demonstrationswände gewählt.

Die Qualitätsuntersuchungen des Gipskarton-Heizstrukturen-Verbundes zeigen, dass plasmabasierte Flächenheizsegmente sowohl in elektrischer, thermischer, als auch mechanischer Hinsicht alle Voraussetzungen zum Einsatz als Wandflächenheizung erfüllen. Ebenso erfüllten die Heizsegmente nach Auftrag von Farbe, Lack und Tapete weiterhin ihren Bestimmungszweck. Für einen dauerhaften Einsatz wurden die Proben unter realen Bedingungen getestet, um etwaige Schädigungen der Metallstruktur auf dem Gipskarton detektieren zu können. Zum einen sind die Proben wechselnden äußeren klimatischen Bedingungen ausgesetzt worden und zum anderen wurden die Proben bei konstanten Umgebungsbedingungen zyklisch erwärmt, um die Einschaltvorgänge über mehrere Jahre hinweg simulieren zu können. Neben einer leichten Erhöhung des elektrischen Widerstandes konnten keine Ausfälle verzeichnet werden, was das System für einen dauerhaften Einsatz qualifiziert.

Auf Basis der Grundlagenuntersuchungen wurde ein thermisches Simulationsmodell erstellt, mit Hilfe dessen die Wärmeverteilung im Material errechnet werden konnte. Mit diesem Modell können somit zukünftig je nach Heizwärmebedarf das entsprechende Layout bzw. der Abstand zwischen den Leiterbahnen rechnerisch ermittelt werden, ohne aufwendige Versuche durchführen zu müssen.

Auf Basis der Grundlagenuntersuchungen konnte die jeweils nötige Größe der Wandflächenheizung in Abhängigkeit des Dämmstandards bzw. Energieeffizienz nach

EnEV errechnet werden. So zeigte sich, dass bei einem gut gedämmten Gebäude eine relativ geringe Fläche ausreicht, um genügend Wärme in einem Raum generieren zu können, während bei einem schlecht isolierten Haus eine relativ große Fläche zum Ausgleich der Transmissionswärmeverluste nötig ist.

Zur Versorgung der Flächenheizsegmente mit elektrischer Leistung wurden geeignete Ankontaktierungs-Verfahren bzw. Möglichkeiten zur Verbindung der einzelnen Segmente untereinander gefunden und auf ihren Dauereinsatz hin untersucht. Aufgrund der Erfüllung aller Anforderungen, wie z. B. der einfachen Handhabung und des zuverlässigen Einsatzes, hat sich das Kupferklebend für einen dauerhaften Einsatz für geeignet erwiesen.

Für eine angenehme Wohlfühlwärme sorgt eine gleichmäßige Wärmeeinbringung der raumumschließenden Flächen. Führt das aktivieren aller Flächenheizsegmente jedoch zu einem hohen Energieaufwand, kann eine gezielte Aktivierung der Flächenheizsegmente helfen, Energie einzusparen. Für eine bedarfsgerechte Regelung wurden deshalb zwei Systeme zur Ansteuerung und Regelung entwickelt. Zum einen wird mit Hilfe eines Tracking-Systems eine Person im Raum erkannt und die für diese Position definierten Heizsegmente werden aktiviert. Einen sinnvollen Einsatz findet dieses System jedoch nur, wenn alle raumumschließenden Flächen mit Heizstrukturen versehen sind. Ist die Heizfläche entsprechend dem Wärmebedarf angepasst, welcher bei einem gut isolierten Gebäude einer Heizfläche von ca. 1 m entspricht, bietet sich die Steuerung und Regelung der Heizsegmente über eine leicht und intuitiv bedienbare Steuerung an. Deshalb wurde eine Ansteuerung der Flächenheizsegmente entwickelt, welche sich in eine Smart-Home-Umgebung integrieren und mittels Smartphone oder Tablet intuitiv steuern lässt. Bietet dieses System die Möglichkeit der einfachen Bedienung, hat dieses auch im Demonstrationsraum erfolgreich Anwendung gefunden.

Werden nur kleine Heizflächen zum ausreichenden Erwärmen des Raumes benötigt, bzw. werden durch eine automatische Personenerkennung nur einzelne Heizsegmente aktiviert, kann sich wie bei einem herkömmlichen Heizungssystem partiell Feuchtigkeit an den Wänden bilden. Um Schimmelbildung vollends ausschließen zu können ist es demnach notwendig, alle raumumschließenden Flächen mit einer Heizstruktur zu versehen.

Das Ziel des aufgebauten Demonstrationsraumes war die Schaffung einer realen Testumgebung der Flächenheizsegmente. Die additiv hergestellten Flächenheizsegmente konnten erfolgreich auf allen vier Seiten im Testgebäude integriert und in Betrieb genommen werden. Die Auslegung des Raumes erfolgte mit einer höheren als der geforderten Heizleistung, da eine variierende Wärmeeinbringung innerhalb der vier Raumumschließungsflächen mittels verschiedener Heizszenarien untersucht wurde. Nach Einbau und vollständiger Integration des Heizsystems wurden die Heizwände bezüglich Behaglichkeit und Energiebedarf qualifiziert und näher untersucht. Mit Hilfe eines Behaglichkeitsmessgerätes konnte objektiv nachgewiesen werden, dass mit der

plasmastrukturierten Wandflächenheizung eine ideale Behaglichkeit erzeugt werden kann, was ebenso von Probanden bestätigt werden konnte. Die Energie- und Leistungsmessungen wurden mit Schalt- und Messsteckdosen durchgeführt, womit der für die Heizung benötigten Energiebedarf ermittelt werden konnte.

Ebenso konnte die Integration des Beschichtungsprozesses in bestehende Fertigungslinien zur Herstellung von Fertighäusern mittels virtueller Integration erfolgreich nachgewiesen werden, auch wenn eine vollflächige Beschichtung aller Wände nur teilweise aufgrund der Randbedingungen gegeben war.

Somit wurden alle geplanten Forschungsziele erreicht und die Funktionsfähigkeit des Systems mittels intensiver Qualitätsuntersuchungen ausgiebig nachgewiesen. Jedoch bedarf es noch weiterer Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, um eine noch gleichmäßigere additive Beschichtung zur Verbesserung des thermischen Verhaltens zu erreichen. Konnten erste Aussagen über die Leistungsfähigkeit des Heizsystems im Demonstrationsraum getroffen werden, so bedarf es weiterer intensiver Studien über das Langzeitverhalten und die Bedienerfreundlichkeit unter realen Bedingungen.

Vor allem auch für Baustoffhersteller können die Forschungsergebnisse relevant sein, da eine Aufwertung ihrer Produkte durch eine thermische Funktionalisierung von Oberflächen erfolgen kann. Deshalb bietet es sich an, die Ergebnisse in entsprechender Fachliteratur zu veröffentlichen.

## Literaturverzeichnis

- [1] PLAßMANN, W. und D. SCHULZ, Hg. *Handbuch Elektrotechnik. Grundlagen und Anwendungen für Elektrotechniker. 7.*, neu bearbeitete Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016. ISBN 9783658070489
- [2] TUSCHINSKI, M., F.A.+ FACHAUTORIN und STUTTGART. *EnEV 2014: Alte Heizkessel erneuern - Nachrüstpflichten im Baubestand* [online]. 25 Mai 2018 [Zugriff am: 19. Juli 2018]. Verfügbar unter: [http://www.enev-online.com/enev\\_praxishilfen/151220\\_enev\\_alte\\_heizkessel\\_heizung\\_erneuern\\_altbau\\_bestand\\_baubestand\\_pflicht.htm](http://www.enev-online.com/enev_praxishilfen/151220_enev_alte_heizkessel_heizung_erneuern_altbau_bestand_baubestand_pflicht.htm)
- [3] N. N. *Energieverbrauch nach Energieträgern, Sektoren und Anwendungen* [online], 2019 [Zugriff am: 10. April 2019]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energieverbrauch-nach-energetraegern-sektoren>
- [4] N. N. *Energieverbrauch privater Haushalte* [online], 2018. 23 Februar 2018 [Zugriff am: 10. April 2019]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/private-haushalte-konsum/wohnen/energieverbrauch-privater-haushalte>
- [5] HERING, E. und B. SCHRÖDER. *Wärmeschutz und Heizungstechnik. Ein Überblick*. Wiesbaden: Springer, 2015. essentials. ISBN 9783658086008
- [6] UNNERSTALL, T. *Energiewende verstehen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018. ISBN 978-3-662-57786-8
- [7] PISTOHL, W., C. RECHENAUER und B. SCHEUERER. *Handbuch der Gebäudetechnik. Planungsgrundlagen und Beispiele. 9.*, überarbeitete Auflage. Köln: Bundesanzeiger Verlag, 2016. ISBN 9783846205891
- [8] TIATOR, I. *Heizungsanlagen mit der neuen EnEV 2014. 4.*, aktualisierte und erweiterte Auflage, 2016. Die neue Meisterprüfung. ISBN 978-3-8343-3356-8
- [9] ALBERS, K.-J., Hg. *Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik 2017/2018. Einschließlich Trinkwasser- und Kältetechnik sowie Energiekonzepte. 78.* Auflage. München: DIV Deutscher Industrieverlag GmbH, 2017. einschließlich Trinkwasser- und Kältetechnik sowie Energiekonzepte. ISBN 9783865673328
- [10] KOST, C. und T. SCHLEGL. *Studie: Stromgestehungskosten erneuerbare Energien*. Freiburg, 20. August 2018
- [11] HESTERMANN, U. und L. RONGEN. *Frick/Knöll Baukonstruktionslehre 1. 36.*, vollst. überarb. und akt. Aufl. 2015. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015. ISBN 3834825654
- [12] HEIN, M., R. STÖBER, G. FISCHERAUER, J. BAUER, J. BÜRNER, A. KETTSCHAU, J. FRANKE und M. FELLER. Heizsystem zur Schaffung eines angenehmen und belastungsarmen Raumklimas in Altbauten. In: VDE, Hg. *9. Deutscher AAL-Kongress*. Berlin: VDE-Verlag GmbH, 2016
- [13] LOTTER, B., J. DEUSE und E. LOTTER. *Die Primäre Produktion. Ein praktischer Leitfaden zur verlustfreien Wertschöpfung*. Berlin: Springer Vieweg, 2016. VDI-Buch. ISBN 9783662532119

- [14] N. N. *PCM - Lehmbauplatte* [online]. *Lehm - Latentwärmespeicher mit PCM*, 2019 [Zugriff am: 17. Juni 2019]. Verfügbar unter: <https://lehm-bau-shop.de/marken/lehmoren/pcm-lehmbauplatte.html>
- [15] N. N. *Alba®balance* [online]. *Die PCM-Vollgipsplatten für Energieeffizienz und maximalen Komfort*, 2019 [Zugriff am: 17. Juni 2019]. Verfügbar unter: [http://www.rigips.com/fileadmin/Rigips\\_Daten/App/Broschueren/Alba\\_balance\\_Rigips\\_12\\_18.pdf](http://www.rigips.com/fileadmin/Rigips_Daten/App/Broschueren/Alba_balance_Rigips_12_18.pdf)
- [16] MEHLING, H. und L.F. CABEZA. *Heat and cold storage with PCM. An up to date introduction into basics and applications ; with 28 tables*. Berlin: Springer, 2008. Heat and mass transfer. ISBN 9783540685562
- [17] N. N. *Datenblatt: Knauf Bauplatte GKB. die wirtschaftliche Gipsplatte für Basis-Systeme im Trockenbau*. Iphofen
- [18] N. N. *Datenblatt: Knauf Bauplatte imprägniert. die wirtschaftliche Gipsplatte GKBI für Basis-Systeme im Trockenbau*. Iphofen
- [19] SCHULZ, M. und H. WESTKÄMPER. *Die neue Heizung. Umweltfreundlich und wirtschaftlich heizen mit Gas, Holz, Strom und Sonnenenergie. 2., verbess. Aufl.* Staufen bei Freiburg: Ökobuch-Verl., 2013. ISBN 9783936896633
- [20] SCHMIDT, M. *Auf dem Weg zum Nullemissionsgebäude. Grundlagen, Lösungsansätze, Beispiele*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013. ISBN 978-3-8348-2193-5