

**IAB - Institut für Angewandte Bauforschung  
Weimar gGmbH**

# **Entwicklung eines mikrowellenbasierten Aufschlussverfahrens für die Trennung von Verbundbaustoffen**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,  
gefördert unter dem Az: 34241/01 von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Klemens Laub M. Sc., Dr.-Ing. Inna Khripacheva, Dipl.-Ing. Steffen Liebezeit,  
Prof. Dr.-Ing. Anette Müller

Weimar, Januar 2023

**IAB - Institut für Angewandte Bauforschung  
Weimar gGmbH**

## **Entwicklung eines mikrowellenbasierten Aufschlussverfahrens für die Trennung von Verbundbaustoffen**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,  
gefördert unter dem Az: 34241/01 von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Klemens Laub M. Sc., Dr.-Ing. Inna Khripacheva, Dipl.-Ing. Steffen Liebezeit,  
Prof. Dr.-Ing. Anette Müller

Weimar, Januar 2023

**Projektkennblatt  
der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt**



Az	34241/01	Referat	23	Fördersumme	125.000 €
----	----------	---------	----	-------------	-----------

**Antragstitel** Entwicklung eines mikrowellenbasierten Aufschlussverfahrens für die Trennung von Verbundbaustoffen

**Stichworte** Recycling, Baustoff, Mikrowelle, Verfahren

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
<b>12 Monate</b>	<b>10.11.2021</b>	<b>10.11.2022</b>	<b>1</b>

Zwischenberichte

<b>Bewilligungsempfänger</b>	Fritz Kohler Ecomicrowaves Breslauer Str. 6, 35789 Weilmünster	Tel	01713346776
		Fax	
		Projektleitung	Fritz Kohler

<b>Kooperationspartner</b>	IAB Weimar gGmbH Über der Nonnenwiese 1, 99428 Weimar
----------------------------	--

### ***Zielsetzung und Anlass des Vorhabens***

Das Ziel des Vorhabens bestand in der Entwicklung eines mikrowellenbasierten Aufschlussverfahrens für die Trennung von Verbundbaustoffen. Das Abtragen von auf Mauerwerk oder Beton stoffschlüssig aufgetragenen Ausbaustoffen, wie Putzen und Fliesen mittels Mikrowellenbehandlung, war als praxistaugliches In-Place-Verfahren zu entwickeln. Der Anlass dafür ist das bestehende Hemmnis beim Recyceln von Verbundbaustoffen. Diese sind nach dem Abriss von Mauerwerk häufig noch stoffschlüssig miteinander verbunden und erschweren deshalb die sortenreine Trennung der Baustoffe, was aber für ein stoffspezifisches, hochwertiges Recycling unbedingte Voraussetzung ist. Neben der Entwicklung eines Gerätesystems, geeignet für horizontale und vertikale Flächen, sollte eine Schaltschicht entwickelt und erprobt werden, die zwischen den Baustoffen und Ausbaustoffen platziert werden kann und auf Mikrowellen anspricht. Die Schaltschicht soll die Rezyklierbarkeit der Ausbaumaterialien nicht negativ beeinflussen.

### ***Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden***

Das Forschungsvorhaben ist in zwei Teilvorhaben gegliedert, wobei die Firma Fritz Kohler Ecomicrowaves für die Entwicklung der Gerätetechnik und die IAB Weimar gGmbH für die Entwicklung einer mikrowellensensiblen Schaltschicht zuständig war und auch die Erprobung des Gerätesystems vorgenommen hat.

Die dafür erforderlichen und abgearbeiteten Arbeitsschritte sind in den folgenden Arbeitspaketen dokumentiert:

## **Teilvorhaben 1: Entwicklung Schaltschicht**

### **Arbeitspaket 1**

Für die Erprobung der Demonstratoren wurden horizontale und vertikale Musterflächen hergestellt. Diese bestanden aus kleinformatischen Gipskartonelementen, auf die Fliesen aufgebracht wurden. Bei den großformatigen Varianten wurden Musterwände aus Ziegelmauerwerk errichtet und mit Fliesen versehen.

### **Arbeitspaket 2**

Weiterentwicklung der Schaltschicht mit drei Zielrichtungen:

- Integration in handelsübliche Grundierungen und Primer
- Minimierung der Auswirkungen auf den Verbund
- Möglichst rückstandslose Schaltschicht

### **Arbeitspaket 3**

Die Auswirkungen der modifizierten Schaltschicht auf die Haftzugfestigkeit der Verbünde wurden untersucht.

### **Arbeitspaket 4**

Die Schaltschicht sollte so weiterentwickelt werden, dass nach der Trennung möglichst wenig Rückstände zurückbleiben. Dafür mussten Additive, die sich von ihrem Verhalten bei einer thermischen Behandlung eignen könnten, ausgewählt und charakterisiert werden. Anschließend wurden mit diesen Additiven ausgerüstete Verbundprobekörper mit dem IAB-Standardverfahren auf die Trennbarkeit hin untersucht. Neben der Art der Additive wurde auch die eingesetzte Menge untersucht.

### **Arbeitspaket 5**

Der Einfluss der Schaltschicht wurde in Bezug auf die Auswirkungen auf die Rezyklierbarkeit der Wandbaustoffe als Trägermaterial untersucht. Dazu wurden Probekörper hergestellt und nach dem IAB-Standardverfahren in einer Labormikrowelle behandelt. Die wasserwirtschaftlichen Zuordnungswerte des Trägermaterials wurden mit und ohne Beschichtung ermittelt. Daraus konnte geschlossen werden, ob sich die Verwertbarkeit durch die aufgetragene Schaltschicht verändert.

### **Arbeitspaket 6**

Die Prüfung der Rezyklierbarkeit wurde auf die abgetragenen Oberflächenkomponenten ausgedehnt.

## **Teilvorhaben 2: Geräteentwicklung**

### **Arbeitspaket 1**

Zunächst wurden die Anforderungen, die an die Anlage gestellt werden, in einem Pflichtenheft nachfolgenden Kriterien zusammengestellt.

- Es wurden Recherchen und Befragungen bei mit dem Rückbau oder der Sanierung befassten Firmen zu den gegenwärtig verwendeten Werkzeugen, dem Aufwand an Arbeitskräften und Energie sowie zu der erreichten Trenngüte durchgeführt.
- Der erforderliche Energieeintrag und die Größe der Fläche, die zu beaufschlagen ist, wurden anhand der Ergebnisse der Versuche in der Labormikrowelle festgelegt.
- Ein Sicherheitskonzept für das Betreiben der Anlage war in Anlehnung an die Anwendung von offenen Mikrowellenanlagen in anderen Sektoren zu entwickeln.

### **Arbeitspaket 2**

Auf der Grundlage des Pflichtenheftes erfolgte der Entwurf der Anlage. Sie besteht aus einer offenen Mikrowellenquelle, die mobil positioniert werden kann. Die Art des Strahlers wurde modifiziert und deren Wirksamkeit erprobt. Für vertikale Flächen waren Lösungen mit Fahreinheiten oder ebenfalls Roboterlösungen recherchiert.

### **Arbeitspaket 3**

Es erfolgte der Bau eines Demonstrators, der das erarbeitete Sicherheitskonzept erfüllt. Die Leistungsdaten – Energieeintrag und Bearbeitungsdauer – sowie die erreichten Oberflächentemperaturen wurden ermittelt. Da die Leistungsfähigkeit zunächst unbefriedigend war, wurden weitere Entwicklungsschritte erforderlich, die zu einem leistungsstärkeren Mikrowellengerät führten. Mit diesem wurden Demonstratorversuche an verschiedenen Wandaufbauten durchgeführt.

**Arbeitspaket 4**

Es wurde untersucht, ob die Erkenntnisse aus der Bearbeitung der vertikalen und horizontalen Musterflächen miteinander vergleichbar sind. Unter Nutzung der Erkenntnisse aus der Bearbeitung der Musterflächen wurde ein Demonstrator für vertikale Flächen gebaut und an den Musterwänden erprobt.

**Arbeitspaket 5**

Auf der Grundlage der bei den Erprobungen gesammelten Erfahrungen wurde ein Demonstrator diskutiert. Zur Realisierung wurden die erforderlichen technischen Randbedingungen unter Betrachtung der Sicherheitsaspekte erörtert.

**Arbeitspaket 6**

In einer technischen Dokumentation wurden die Parameter der entwickelten In-place-Anlagen und die erreichbaren Abtragsleistungen für verschiedene Verbundsysteme zusammengefasst. Die Handhabung und das Sicherheitskonzept wurden beschrieben.

## **Ergebnisse und Diskussion**

Das Forschungsvorhaben beinhaltete folgende Untersuchungen:

- Variation Zusammensetzung Schaltschicht zur Anpassung an Mikrowellensystem
- Variation der Lage der Schaltschicht im Schichtenaufbau
- Erprobung weiterer Additive
- Erprobung verschiedener Probekörpergeometrien (Fliesengröße)
- Erfassung der Trennerfolge und der dazugehörigen Temperatur und Art des Versagens
- Einfluss der Modifizierung auf Applikation, Haftzugfestigkeit und Rezyklierbarkeit
- Ermittlung und Charakterisierung der Hotspot-Ausbildung offener Mikrowellensysteme
- Variation verschiedener offener Mikrowellen und Strahlertypen
- Zusammenführung aller gewonnenen stofflichen und verfahrenstechnischen Erkenntnisse in einem Demonstrator-Versuch
- Ermittlung der Aufschluss-Geschwindigkeiten in Abhängigkeit von stofflichen und verfahrenstechnischen Randbedingungen

Folgende Effekte wurden dabei festgestellt

- Erhöhung des Wirkstoffgehalts in Schaltschicht im geringere Leistung der eingesetzten Mikrowellensysteme zu kompensieren
- Bereits bekannte Wirkstoffe (Graphit, Blähgraphit) besser geeignet als zusätzlich geprüfte Alternativen dazu
- Trennerfolge unter bestimmten Bedingungen bei moderaten Temperaturen und unter 20 s möglich
- Eingesetzte Wirkstoffe beeinflussen alle weiteren Eigenschaften des Schichtaufbaus nur unwesentlich
- Mikrowellensysteme unterscheiden sich in Leistung untereinander
- Demonstrator-Versuch ergaben geringere Aufschluss-Geschwindigkeiten als Versuche an einzelnen, kleinformatigen Probekörpern, trotz gleichem Mikrowellengerät.

Erreicht wurden damit folgende Ziele

- Ermittlung der maximalen Dosierung
- Bestimmung der optimalen Lage der Schaltschicht
- Ermittlung Aufschluss-Geschwindigkeiten
- Erstellung konzeptionelle Entwürfe, die nach Auffassung der Autoren jedoch wenig praxistauglich erscheinen, da einerseits ein Up-Scaling praktisch nicht möglich ist und die benötigte Messtechnik für ein autonomes Gerät sehr anspruchsvoll ist

## **Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation**

Im Rahmen des Forschungsvorhabens fand keine Öffentlichkeitsarbeit statt. Die Präsentation der Ergebnisse erfolgte im Rahmen mehrerer Projekttreffen.

## **Fazit**

Es ist prinzipiell möglich, Verbundbaustoffe mittels einer darin integrierten Schaltschicht mikrowellenbasiert „in-place“ zu trennen. Die Praxistauglichkeit eines solchen Verfahrens stellt jedoch eine Herausforderung dar, da die in diesen Forschungsvorhaben erzielten Aufschluss-Geschwindigkeiten sehr gering sind und der technische Aufwand sehr hoch ist.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Verzeichnis von Bildern und Tabellen</b> .....	<b>8</b>
<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>10</b>
<b>Einleitung</b> .....	<b>11</b>
<b>Hauptteil</b> .....	<b>12</b>
<b>1 Teilvorhaben 1: Entwicklung Schaltschicht</b> .....	<b>12</b>
1.1 Arbeitspaket 1: Herstellung Demonstrator .....	12
1.2 Arbeitspaket 2: Weiterentwicklung Schaltschicht .....	20
1.2.1 Versuche an großen Fliesen (15 cm x 15 cm).....	20
1.2.2 Detektion Hotspot .....	22
1.2.3 Versuche an kleinen Fliesen (5 cm x 5 cm).....	26
1.2.4 Zusammenfassung .....	29
1.3 Arbeitspaket 3: Auswirkung der Schaltschicht auf Festigkeit der Verbünde ...	31
1.4 Arbeitspaket 4: Auswahl Additive, Untersuchungen Trennbarkeit .....	33
1.4.1 Auswahl Additive .....	33
1.4.2 Versuche mit freiliegender Schaltschicht .....	34
1.4.3 Ansatz für die Herstellung der Schaltschicht .....	35
1.4.4 Ergebnisse .....	36
1.4.5 Fazit .....	37
1.5 Arbeitspaket 5 und 6: Einfluss der Schaltschicht auf die Rezyklierbarkeit .....	38
<b>2 Teilvorhaben 2: Geräteentwicklung</b> .....	<b>41</b>
2.1 Arbeitspaket 1: Anforderungen .....	41
2.1.1 Methoden für den selektiven Rückbau von Fliesen .....	41
2.1.2 Sicherheitshinweise vor und während des Betriebes einer Mikrowelle .....	42
2.1.3 Schwere Gefahr für die Gesundheit.....	42
2.1.4 Brand-/Verbrennungs-/Verbrühungsgefahr .....	42
2.1.5 Gefahr durch Stromschläge .....	43
2.2 Arbeitspaket 2: Entwurf der Anlage.....	44
2.2.1 Positionierung.....	44
2.2.2 Sensorik .....	44
2.2.3 Steuerung.....	45
2.2.4 Fazit .....	45
2.3 Arbeitspaket 3 und Arbeitspaket 4: Einsatz Geräte-Demonstrator an Musterflächen .....	46
2.4 Arbeitspaket 5: Re-Design Geräte-Demonstrator.....	48
2.5 Arbeitspaket 6: Dokumentation .....	48
<b>Fazit</b> <b>49</b>	
<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>50</b>

# Verzeichnis von Bildern und Tabellen

## Abbildungsverzeichnis

Bild 1:	Schlitzstrahler auf Demonstrator.....	12
Bild 2:	Flächenstrahler auf Demonstrator (hinten) .....	13
Bild 3:	Mikrowellengerät mit Hornstrahler (1).....	14
Bild 4:	Min. Temperatur des Hotspots.....	14
Bild 5:	Max. Temperatur des Hotspots.....	14
Bild 6:	Mikrowellengerät it Hornstrahler (2).....	15
Bild 7:	Hotspot mit Temperatur .....	16
Bild 8:	Hornstrahler auf Gipsputz .....	16
Bild 9:	Hotspot auf Gipsputz .....	17
Bild 10:	Hornstrahler und Hotspot.....	17
Bild 11:	Verschiedene Hotspots zwischen Fliese und Fliesenkleber .....	17
Bild 12:	Herstellung Wand-Demonstrator .....	19
Bild 13:	Vorsatzschale verklebt auf Ziegelfertigteil .....	19
Bild 14:	Fertiger Wand-Demonstrator, ohne modifizierte MW-aktive Applikationen.....	19
Bild 15:	Übersicht Herstellung der Probekörper .....	21
Bild 16:	Gipskartonplatte ohne Grundierung.....	21
Bild 17:	Gipskartonplatte mit Fliesenkleber.....	21
Bild 18:	Abgezogener Fliesenkleber auf Gipskartonplatte.....	21
Bild 19:	Platzierung eines Probekörpers vor dem Mikrowellengerät (1).....	21
Bild 20:	Platzierung eines Probekörpers vor dem Mikrowellengerät (2).....	21
Bild 21:	Lösungsansatz für Aufschluss von Verbundbaustoffen, Varianten der Platzierung der Suszeptoren.....	23
Bild 22:	Mikrowellengerät 1 mit Hornstrahler .....	23
Bild 23:	Mit Blähgraphit beschichtete Gipskartonplatte, unmodifizierter Primer .....	23
Bild 24:	Mit Blähgraphit beschichte Gipskartonplatte, modifizierter Primer .....	24
Bild 25:	Mit Blähgraphit beschichte Gipskartonplatte, modifizierter Primer (doppelte Menge) .....	24
Bild 26:	Unbeschichtete Gipskartonplatte mit modifiziertem Primer.....	24
Bild 27:	Angefeuchtetes Thermopapier auf unbeschichteter Gipskartonplatte mit modifiziertem Primer .....	24
Bild 28:	Mikrowellengerät 2 mit rechteckigem Strahler.....	25
Bild 29:	Beschichtete Gipskartonplatte vor rechteckigem Strahler.....	25
Bild 30:	Hotspot-Bildung auf beschichtetem Gipskarton.....	25
Bild 31:	Übersicht Schichtenaufbauten .....	26
Bild 32:	Versuchsaufbau mit Styrodur-Abstandshalter, Hornstrahler mit Mikrowellengerät 1 (oben) und rechteckiger Strahler mit Mikrowellengerät 2 (unten).....	27
Bild 33:	Probekörper 1 mit Trennerfolg, Reihenfolge (v. l. n. r.) 6, 7, 8 .....	29
Bild 34:	Probekörper 1 mit Trennerfolg, Reihenfolge (v. l. n. r.) 9, 13, 14 .....	29
Bild 35:	Probekörper 2 mit Trennerfolg, Reihenfolge (v. l. n. r.) 6, 7, 8, 9, 12 .....	29
Bild 36:	Präparierte Haftzugproben auf Betonoberfläche (links) und Haftzugprüfgerät (rechts) .....	31
Bild 37:	Labormikrowelle .....	34
Bild 38:	radiometrisches Wärmebild mit Messfeld und Temperaturspot .....	34
Bild 39:	Mischung M 1 bis 3 .....	35
Bild 40:	Mischung M 4 bis 7 .....	35
Bild 41:	Mischung M 6 bis M 10 .....	36

Bild 42:	Mischung M 11 bis M 13 .....	36
Bild 43:	Übersicht der Temperaturentwicklung nach 6 min Mikrowelleneinstrahlung .....	36
Bild 44:	Aufheizkurven Rezepturen Vermiculit M 1 bis M 5 .....	36
Bild 45:	Aufheizkurven Rezepturen wassergefüllte Granulate.....	37
Bild 46:	Aufheizkurven Rezepturen.....	37
Bild 47:	Fliesenabtrennung mittels Stemmerhammer [2] bzw. thermischer Behandlung [3] ..	41
Bild 48:	Moibler Roboterarm (1) .....	44
Bild 49:	Mobiler Roboterarm (2).....	44
Bild 50:	Übersicht Wand-Demonstratoren mit Probekörpern (links), Trennerfolge grau schraffiert (rechts) .....	46
Bild 51:	Versuchsaufbau Wand-Demonstrator mit Mikrowellengerät .....	47
Bild 52:	Trennerfolge nach Mikrowellenbehandlung am Wand-Demonstrator .....	47
Bild 53:	PK1, Rückseite Fliesen .....	48
Bild 54:	PK2, expandiertes Blähgraphit .....	48

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Ergebnisse 1. Versuch .....	13
Tabelle 2:	Ergebnisse 4. Versuch .....	15
Tabelle 3:	Ergebnisse 5. Versuch .....	16
Tabelle 4:	Ergebnisse 6. Versuch .....	17
Tabelle 5:	Zusammensetzungen der modifizierten Grundierungen.....	20
Tabelle 6:	Modifikationen der Grundierung (Primer) .....	26
Tabelle 7:	Ergebnisse Mikrowellenversuche an kleinen Fliesen (5 cm x 5 cm), Trennerfolge grün hinterlegt .....	28
Tabelle 8:	Vergleich Mikrowellengeräte, Variation Abstand .....	29
Tabelle 9:	Ergebnisse Haftzugprüfung .....	32
Tabelle 10:	Übersicht alternative Additive .....	33
Tabelle 11:	Gerätetechnik und Kennwertermittlung des IAB Standard-Mikrowellenversuchsstandes .....	34
Tabelle 12:	Standardrezeptur der Schaltschicht.....	35
Tabelle 13:	Übersicht Rezepturen .....	35
Tabelle 14:	Ergebnisse Rezepturentwicklung mit alternativen Additiven .....	36
Tabelle 15:	Zusammensetzung der Materialkombination in Ma.-%.....	38
Tabelle 16:	Zusammensetzung der modifizierten Grundierung.....	38
Tabelle 17:	PAK- und TOC-Gehalte im Feststoff der Probe ohne Modifizierung der Grundierung .....	39
Tabelle 18:	Gehalte im Eluat der Probe ohne Modifizierung der Grundierung.....	39
Tabelle 19:	PAK- und TOC-Gehalte im Feststoff der Probe mit Modifizierung der Grundierung .....	40
Tabelle 20:	Gehalte im Eluat der Probe mit Modifizierung der Grundierung.....	40
Tabelle 21:	Ergebnisse zu Trennerfolgen am Wand-Demonstrator .....	47

## Zusammenfassung

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde ein mikrowellenbasiertes Aufschlussverfahren für die Trennung von Verbundbaustoffen untersucht. Hierfür wurde eine Schaltschicht weiterentwickelt. Verfahrenstechnisch kamen dabei offene Mikrowellensysteme zum Einsatz, deren Wirksamkeit charakterisiert wurde.

Die Untersuchungen zeigen, dass die eingesetzten offenen Mikrowellensysteme eine geringere Leistungsfähigkeit aufweisen, als die geschlossenen Mikrowellensysteme aus vorherigen Untersuchungen. Eine Steigerung der Leistungsfähigkeit des Mikrowellensystems ist mit erheblichem technischen Aufwand verbunden.

Die für das Aufschlussverfahren notwendige Schaltschicht wurde entsprechend angepasst, indem die Wirkstoffgehalte erhöht wurden. Die so erzielten Aufschluss-Geschwindigkeiten sind nach Auffassung der Autoren derzeit noch nicht praxistauglich.

Alternative Wirkstoffe wurden auf ihre prinzipielle Eignung getestet, erwiesen sich aber als weniger geeignet. Zudem wurde festgestellt, dass der Trennerfolg abhängig ist von der Festigkeit des Untergrundes.

Hinsichtlich der Verfahrenstechnik wurden Sicherheitskonzepte erstellt und Entwürfe für eine autonom-agierende Anlage entwickelt. Dabei stellte sich heraus, dass der Einsatz und die Implementierung geeigneter Sensorik eine Herausforderung darstellen, da die Gefahr besteht, dass diese Schaden durch das erzeugte elektromagnetische Feld nimmt.

Es wird empfohlen, die gewonnenen Erkenntnisse zur Schaltschicht für andere Anwendungsgebiete zu nutzen. Dies können beispielweise stationäre, industrielle Prozesse sein, in denen geschlossene Mikrowellensysteme eingesetzt werden können.

Zur Realisierung des Projekts haben sich die folgenden Partner aus Industrie und Forschung zusammengeschlossen:

IAB - Institut für Angewandte Bauforschung Weimar gemeinnützige GmbH mit dem Teilvorhaben 1 „Entwicklung Schaltschicht“

Fritz Kohler Ecomicrowaves mit dem Teilvorhaben 2 „Geräteentwicklung“

Das Projekt wird durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt gefördert (Az: 34241/01).

# Einleitung

Infolge der Zunahme der gestellten Anforderungen wie Wärme-/Kälteschutz, Feuchte- und Schallschutz geht der Trend im Bauwesen zu immer komplexeren Außenwandkonstruktionen. Die Entwicklung der letzten Jahre führte diesbezüglich zu vielschichtigen und dünnen Wandkonstruktionen in Kombination mit Wärmedämmsystemen. Die Auswirkung auf die Qualität des daraus entstehenden Abbruchmaterials spielt dabei eine wichtige Rolle. Der Aufschluss von komplexen Wandaufbauten wird dabei immer wichtiger, insbesondere bei einer Zunahme der Materialvielfalt. Die Grundlage eines effizienten Recyclings bildet die Sortenreinheit. Wird diese durch entsprechende Verfahren ermöglicht, können auch qualitativ hochwertige Recyclingprodukte hergestellt werden.

Das sortenreine Trennen ist möglich, durch die gezielte Kombination aus werkstofflicher und verfahrenstechnischer Entwicklung: Werkstofflich durch die Entwicklung gezielt lösbarer Verbindungen zwischen Untergrund und Ausbaustoff und verfahrenstechnisch durch den Einsatz maßgeschneiderter Gerätesysteme, welche die Trennung vor Ort realisieren lassen. Eine mögliche Kombination auf diesem Gebiet ist das sogenannte „Debonding on Demand“: Eine Schicht wird durch quasi berührungslos z.B. durch ein elektromagnetisches Feld (Mikrowelle) aktiviert, wodurch sich der Materialverbund auflöst.

Im Rahmen der Bearbeitung des Forschungsvorhabens wurde frühzeitig erkannt, dass es einen großen Unterschied in der Wirksamkeit zwischen einem geschlossenen Mikrowellengerät und einem offenen Mikrowellengerät gibt. Während geschlossene Mikrowellengeräte (z.B. Haushaltsmikrowelle) innerhalb weniger Sekunden einen modifizierten Materialverbund (z.B. im IAB-Standardverfahren) auftrennen können, erfolgt dieses Auftrennen mittels eines offenen Mikrowellengeräts teilweise erst nach Minuten. Dieser Umstand wirkte sich auf den Projektverlauf und die Abarbeitung der geplanten Arbeitspakete stark aus, so dass sich lediglich am Arbeitsplan orientiert werden konnte. Die Bearbeitung erfolgte daraufhin ergebnisorientiert, um die angestrebten Ziele zu erreichen. Folgende Arbeitsschritte mussten daher ergänzt und berücksichtigt werden:

## 1 Anpassung offene Mikrowelle

Die zu Beginn des Forschungsvorhabens von der Fa. Kohler bereitgestellten Mikrowellengeräte erwiesen sich als nicht leistungsfähig genug, um die modifizierten Materialverbünde überhaupt oder in einer vertretbaren Zeit aufzutrennen. Es folgte daraufhin die Bereitstellung eines verbesserten offenen Mikrowellengeräts.

## 2 Entwicklung Versuchsaufbau

Unter Berücksichtigung der leistungsfähigeren Mikrowelle 4 erfolgte die Entwicklung eines Versuchsaufbaus, welcher der Rezepturentwicklung der modifizierten Trennschicht dienen sollte.

## 3 Anpassung Rezeptur

Nach dem ein adäquater Versuchsaufbau zur Verfügung stand, wurden Probekörper mit unterschiedlichen Rezepturvariationen hergestellt und hinsichtlich ihrer Trennbarkeit untersucht. Auf Grundlage dieser Ergebnisse wurden zwei Vorzugsrezepturen ausgewählt. Diese wurden für den Wand-Demonstrator verwendet, um den Mikrowellengeräte-Demonstrator zu testen.

Die ausführliche Beschreibung dieser Arbeitsschritte mit den dazugehörigen Ergebnissen befindet sich im Hauptteil.

# Hauptteil

## 1 Teilvorhaben 1: Entwicklung Schaltschicht

### 1.1 Arbeitspaket 1: Herstellung Demonstrator

Die herzustellenden Demonstratoren sollten folgende Zwecke erfüllen, die für alle weiteren Entwicklungen richtungsweisend sind:

- Detektieren möglicher sicherheitsrelevanter und funktionaler Effekte, die durch den Einsatz „offener“ Mikrowellengeräte auftreten können
- Bestimmung der Dauer bis zum Trennen
- Ermittlung der eingestrahlten Leistung / Energieverbrauch
- Messung der Temperaturentstehung an Ober- und ggf. Grenzfläche mittels Wärmebildkamera
- Dokumentation des Materialverhaltens hinsichtlich augenscheinlicher Veränderung
- Bestimmung des Umfangs der aktivierten Schaltfläche.

Hierfür wurden verschiedene Wandaufbauten realisiert, die mit verschiedenen „offenen“ Mikrowellengeräten hinsichtlich der oben genannten Zielstellungen getestet wurden.

Die Wandaufbauten waren mit einer modifizierten Trennschicht ausgestattet und dienen als Demonstrator zur prinzipiellen Überprüfung. Die Modifizierung der Trennschicht basiert auf der vom IAB bereits entwickelten Wirkstoffkombination aus Suszeptor (Graphit) und expansiven Additiv (Blähgraphit), die in einem handelsüblichen Primer eingebracht wurde.

Die Versuchsdurchführung erfolgt wie folgt:

Der präparierte Wandaufbau wurde auf eine Holzpalette gelegt, um einen ausreichenden Abstand zum Betonestrich-Fußboden herzustellen. Der zementöse Estrich koppelt vermutlich gut an und sollte nach Möglichkeit nicht im primären Wirkungsbereich der Mikrowellenstrahlung liegen, um Energieentzug durch Fußbodenmaterial zu verhindern. Eine rückseitige Platzierung von reflektierenden Schichten (Alu-Folie/ Metallblech etc.) wurde nicht angeordnet, um eine unterstützende Wirkung zu vermeiden. Der Versuchsaufbau sollte möglichst identisch zu realen konstruktiven Verhältnissen sein.

### 1. Versuch: Demonstrator 1 + „Schlitzstrahler“

Aufbau Demonstrator	Gerätetechnik	
Gipskartonplatte modifizierte Schaltschicht Fliesenkleber modifizierte Schaltschicht Fliesen (150 x 150 mm im Raster 3 x 6)	Schlitzstrahler (Leistung 1kW), ein Magnetron strahlt in offene Prozesskammer, Mikrowellenstrahlung wird durch acht Schlitze emittiert.	 <p>Bild 1: Schlitzstrahler auf Demonstrator</p>

Hinsichtlich des Versuchsaufbaus wurde eine mittige Geräteposition und Öffnungsschlitze auf dem Fliesenspiegel so gewählt, so dass drei Fliesen abgedeckt wurden. Das Mikrowellengerät wurde auf 4 cm Polystyrol aufgelagert, wodurch ein entsprechender Abstand zwischen Fliesenspiegel und Gerät entstand. Polystyrol ist nahezu „mikrowellentransparent“ und absorbiert daher keine Energie.

Die Versuchsdurchführung beinhaltete eine sukzessive Steigerung der Mikrowellen-Beaufschlagungszeit und Variation der Position des Mikrowellengerätes. Gemessen wurden nach jeder Beaufschlagung die durchschnittliche Temperatur und die maximale Temperatur auf der Vorder- und Rückseite des Fliesenspiegels. Bei allen Versuchen wurde festgestellt, dass es zu keiner Trennung des Materialverbundes kam, weshalb – in Anbetracht der langen Mikrowellen-Beaufschlagungszeiten – der Versuch abgebrochen wurde.

Tabelle 1: Ergebnisse 1. Versuch

1.a)				
t <sub>ges</sub> [min]	Vorderseite		Rückseite	
	T <sub>Ø</sub> [°C]	T <sub>max</sub> [°C]	T <sub>Ø</sub> [°C]	T <sub>max</sub> [°C]
0,5	27,4	37,8		
5,5	48,2	84,7		
11,5	65,0	88,8	52,0	68,7
16,5	74,8	109,6		

## 2. Versuch Demonstrator 1 + „Flächenstrahler“

Aufbau Demonstrator	Gerätetechnik	
Gipskartonplatte modifizierte Schicht Fliesenkleber modifizierte Schicht Fliesen (150 x 150 mm im Raster 3 x 6)	Mikrowellengerät mit im Kasten verbautem offenen Hornstrahler und unbekannter Leistung. Es ist die erste Gerätekonstruktion von Fa. Kohler. Der Hornstrahler befindet sich ca. 3 cm hinter einem blauem PUR-Schaum. Die Einwirkfläche ist unbekannt.	
		Bild 2: Flächenstrahler auf Demonstrator (hinten)

Die Versuchsdurchführung orientierte sich am Ablauf des ersten Versuches. Es wurde auf denselben Demonstrator zurückgegriffen, der jedoch noch nicht abgekühlt war. Durch den Einsatz des zweiten Mikrowellengerätes konnte jedoch nach fünf Minuten nur eine leichte, weitere Erwärmung der Vorderseite des Fliesenspiegels auf durchschnittlich 94,4 °C bzw. maximal 120,4 °C festgestellt werden. Der Versuch wurde daraufhin abgebrochen.

### 3. Versuch: Demonstrator 1 + „Hornstrahler“

Aufbau Demonstrator	Gerätetechnik	
Gipskartonplatte modifizierte Schaltschicht Fliesenkleber modifizierte Schaltschicht Fliesen (150 x 150 mm im Raster 3 x 6)	Hornstrahler aus umgebautem Schlitzstrahler (Leistung 1,0 kW). Direktes Aufsetzen des Gerätes bzw. des Horns auf Fliesenspiegel ergibt eine Einwirkfläche von 8 x 10 cm <sup>2</sup> .	 <p data-bbox="992 763 1393 824">Bild 3: Mikrowellengerät mit Hornstrahler (1)</p>

Die Mikrowellen-Beaufschlagung erfolgte wieder auf den nicht abgekühlten Fliesenspiegel. Der Hornstrahler wurde auf eine Fliese gerichtet. Nach fünf Minuten wurde das Mikrowellengerät abgenommen. Die beaufschlagte Fliese konnte mittels eines Schraubenziehers durch leichtes Hebeln entfernt werden. Während des Versuches war der Zeitpunkt des Strukturversagens unklar. Der Aufschluss im Materialverbund erfolgt zwischen Fliese und Fliesenkleber. Die Temperaturen an dieser Grenzfläche betragen im Mittel 117 °C und als Maximum mehr als 275 °C.



Bild 4: Min. Temperatur des Hotspots



Bild 5: Max. Temperatur des Hotspots

#### 4. Versuch: Demonstrator 1 + Hornstrahler

Aufbau Demonstrator	Gerätetechnik	
Gipskartonplatte modifizierte Schaltschicht Fliesenkleber modifizierte Schaltschicht Fliesen (150 x 150 mm im Raster 3 x 6)	Hornstrahler aus umgebautem Schlitzstrahler (Leistung 1,0 kW). Direktes Aufsetzen des Gerätes bzw. des Horns auf Fliesenspiegel ergibt eine Einwirkfläche von 8 x 10 cm <sup>2</sup> .	 <p>Bild 6: Mikrowellengerät mit Hornstrahler (2)</p>

Um den genauen Zeitpunkt des Ablösens zu bestimmen, wurden in zeitlichen Abständen von zwei Minuten die vier Eckbereiche einer Fliese beaufschlagt und die dabei erzeugten Temperaturen erfasst. Nach einem Umlauf, d.h. nach insgesamt acht Minuten Beaufschlagung löste sich die Fliese selbstständig.

Tabelle 2: Ergebnisse 4. Versuch

2.)		
t <sub>ges</sub> [min]	Vorderseite	
	T <sub>Ø</sub> [°C]	T <sub>max</sub> [°C]
4	96,1	163,5
6	105,4	227,5
8	106,6	160,9
8	<b>85,7</b>	<b>106,9</b>

#### 5. Versuch: Demonstrator 1 + Hornstrahler

Aufbau Demonstrator	Gerätetechnik	
Gipskartonplatte modifizierte Schaltschicht Fliesenkleber modifizierte Schaltschicht Fliesen (150 x 150 mm im Raster 3 x 6)	Hornstrahler aus umgebautem Schlitzstrahler (Leistung 1,0 kW). Direktes Aufsetzen des Gerätes bzw. des Horns auf Fliesenspiegel ergibt eine Einwirkfläche von 8 x 10 cm <sup>2</sup> .	

Da der Zeitpunkt des Ablösens der Fliese nicht akustisch und visuell festzustellen war, wurde das Zeitraster auf eine Minute verkleinert. Nach viermaliger Mikrowellen-Bbeaufschlagung konnte die Fliese mit mechanischer Unterstützung abgelöst werden. Die dabei ermittelten Temperaturen in der Grenzfläche betragen im Mittel 90,9 °C und im Maximum 133,9 °C.

Tabelle 3: Ergebnisse 5. Versuch

t <sub>ges</sub> [min]	Vorderseite	
	T <sub>Ø</sub> [°C]	T <sub>max</sub> [°C]
1	28,3	51,8
2	76,9	227,5
4	89,1	139,0
4	Grenzfläche innen	
	90,9	133,9



Bild 7: Hotspot mit Temperatur

## 6. Versuch: Demonstrator 2 + Hornstrahler

Aufbau Demonstrator	Gerätetechnik	
Gipskartonplatte modifizierte Schaltschicht Gipsputz (ca. 7 mm)	Hornstrahler aus umgebautem Schlitzstrahler (Leistung 1,0 kW). Direktes Aufsetzen des Gerätes bzw. des Horns auf Fliesen Spiegel ergibt eine Einwirkfläche von 8 x 10 cm <sup>2</sup> .	

Bild 8: Hornstrahler auf Gipsputz

Im letzten Versuch wurde ein Demonstrator aus einem Materialverbund, bestehend aus einer Gipskartonplatte, einer modifizierten Schaltschicht und einem Gipsputz, untersucht. Analog zu den Versuchen 3 bis 5 wurde der Hornstrahler eingesetzt. Die Mikrowellen-Beaufschlagung erfolgte in zwei Minuten Schritten. Nach insgesamt vier Minuten konnte ein typisch brennzlicher Geruch und Dampfentwicklung festgestellt werden. Es kam zu einer bräunlichen Verfärbung an den entstehenden Materialrissen. Es ist daher davon auszugehen, dass die Schaltschicht aktiviert wurde. Es kam jedoch zu keinem flächigen Aufschluss des Haftverbunds und der Trennerfolg blieb aus. Die erzeugten Temperaturen waren in etwa in dem Bereich der Versuche 3 bis 5.

Tabelle 4: Ergebnisse 6. Versuch

t <sub>ges</sub> [min]	Vorderseite		Rückseite	
	T <sub>Ø</sub> [°C]	T <sub>max</sub> [°C]	T <sub>Ø</sub> [°C]	T <sub>max</sub> [°C]
0	21,4	22,3		
2	66,3	108,9		
4	87,3	147,8	76,4	116,3



Bild 9: Hotspot auf Gipsputz

## Zusammenfassung

### Versuche 1 - 2

Die Anwendung des Gerätes 1 als Schlitzstrahler und des Gerätes 2 (offene Hornantenne) erwiesen sich als nicht zielführend, da die Beaufschlagungsdauer zu lang war und kein Ablösen erreicht werden konnte. Die Ursache hierfür sind vor allem in der zu geringen Temperaturentwicklung zu suchen, was wiederum an der Mischungsrezeptur der Schaltschicht liegen oder einer zu geringen Leistung der eingesetzten Mikrowellengeräte könnte.

### Versuche 3 - 5

Die Anwendung des Mikrowellengerätes 1 als offene Hornantenne ermöglichte erste Trennerfolge, womit die prinzipielle Machbarkeit gegeben ist. Trotz ausreichender Temperaturentwicklung auf Vorder- und Rückseite in diesen Versuchsserien war jedoch nur eine extrem geringe und lokale Aktivierung der expansiven Zusätze erkennbar im Vergleich zur sonst üblicherweise Ausbildung der Flockenstruktur auf der gesamten Probe in einer geschlossenen Mikrowelle (IAB-Verfahren). Es hafteten am Fliesenkleber nicht aktivierte Blähgraphitpartikel. Ebenso war auf den Fliesen die Ausbildung eines „Hotspots“ deutlich sichtbar.

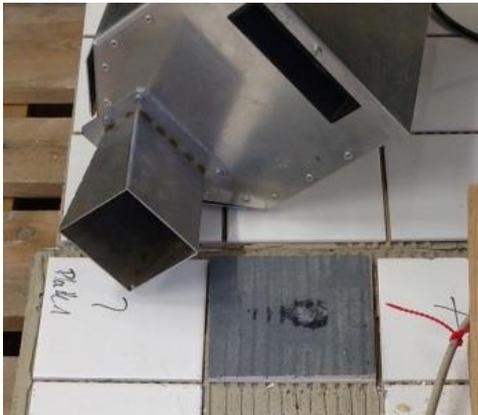


Bild 10: Hornstrahler und Hotspot



Bild 11: Verschiedene Hotspots zwischen Fliese und Fliesenkleber

### Versuch 6

Mittels des Mikrowellengerätes 1 mit offener Hornantenne konnte punktuell die Schaltschicht aktiviert werden. Eine wirksame, flächige Wirkung blieb aber aus. Die Haftung des Schichtverbundes verhinderte das Ablösen von Teilflächen. Für das Abreißen bzw. Teilversagen einer Deckschichtteilfläche reichte die Expansionskraft der Schaltschicht bei den vorliegenden Versuchen nicht aus. Das Mikrowellen-Verfahren ist daher nicht zum Ablösen großer Flächenbereiche geeignet.

## **Schlussfolgerung für die weitere Vorgehensweise**

Die Versuche an den Demonstratoren zeigten, dass sich die Wirksamkeit offener Mikrowellengeräte signifikant von der Wirksamkeit geschlossener Mikrowellengeräte unterscheidet. Schaltschichten konnten wesentlich schlechter aktiviert werden. Dies deutet daraufhin, dass die Energiedichte in geschlossenen Systemen wesentlich höher ist als bei offenen Systemen. Die Ergebnisse der Versuche zeigten, welches der drei möglichen Mikrowellengeräte für eine effektive, weitere Entwicklung geeignet ist. Es wurde daher festgelegt, dass auf Grund der höheren Wirksamkeit auf das Mikrowellengerät 1 mit offenem Hornstrahler zurückgegriffen wird.

Ebenso wurde festgestellt, dass ein Gipsputz durch den Hornstrahler nicht effektiv abgetrennt werden konnte.

Die weiteren Untersuchungen und die Weiterentwicklung der Schaltschicht sollen sich daher auf den Anwendungsfall „Hornstrahler auf Materialverbund Fliesenkleber-Fliese“ mit unterschiedlichen Untergründen beschränken, da die Autoren hier das größte Potenzial sehen, um offene Mikrowellengeräte zielführend einzusetzen.

## **Herstellung Demonstrator für weitere Versuche**

Zur Herstellung des Wand-Demonstrators wurde auf ein Funktionsmuster aus dem Bestand des IAB zurückgegriffen. Jedes Funktionsmuster hatte die Maße von 1,20 x 0,80 m, wobei die tragende Ziegelfertigteilwand eine Wandstärke von 18 cm besaß. Die Stärke der mit Mineralschaum gefüllten Vorsatzschalen betrug ebenso 18 cm. Der mineralische Zementputz, der darauf aufgebracht wurde, hatte eine Schichtstärke von ca. 0,7 cm.

Das Funktionsmuster wurde so konzipiert, dass ein „Einblick“ in das Wandelement möglich war, d.h. der Aufbau des Elements ist für den Betrachter sichtbar. Dies hatte den Vorteil, dass auf verschiedene Material-Untergründe der modifizierte Primer, Fliesenkleber und Fliesen aufgebracht werden konnten. Zu den Untergründen zählen Ziegel und Zementputz. Die dritte Variante – der Material-Verbund auf Gipskarton – wurde auf den Wand-Demonstrator geklebt.



Bild 12: Herstellung Wand-Demonstrator



Bild 13: Vorsatzschale verklebt auf Ziegelfertigteil



Bild 14: Fertiger Wand-Demonstrator, ohne modifizierte MW-aktive Applikationen

## 1.2 Arbeitspaket 2: Weiterentwicklung Schaltschicht

### 1.2.1 Versuche an großen Fliesen (15 cm x 15 cm)

#### 1.2.1.1 Herstellung Probekörper

Die Probekörper für die Mikrowellen-Versuche setzten sich aus folgenden Ausgangsmaterialien zusammen:

Gipskarton: knauf, GKB 9,5  
Grundierung: baumit, PremiumPrimer DG27  
Suszeptor: Graphit Kropfmühl GmbH, Graphit SC20  
Blähgraphit: Graphit Kropfmühl GmbH, Graphit ES 350 F5  
Fliesenkleber: baufix, Fliesenkleber  
Fliese: Rako, 15x15cm Glasierte Wandfliesen.

Der Suszeptor und das Blähgraphit gelten als Additive in der Grundierung und sollten in ihrer Menge variiert werden. Die modifizierte Grundierung wiederum kann auch in ihrer Applikation variiert werden, d.h. in ihrer Anordnung im Schichtenaufbau des Probekörpers. Beispielsweise kann die modifizierte Grundierung zwischen Fliese und Fliesenkleber appliziert werden oder zwischen Gipskarton und Fliesenkleber. An den Versuchen mit großen Fliesen wurde die modifizierte Grundierung lediglich zwischen Gipskarton und Fliesenkleber angebracht.

Die Rezepturentwicklung orientierte sich hierbei an der Referenzrezeptur, die bereits vorlag. Diese und deren erste Variationen können der nachfolgenden Tabelle entnommen werden.

Tabelle 5: Zusammensetzungen der modifizierten Grundierungen

Rezeptur	Grundierung [Ma.-%]	Suszeptor [Ma.-%]	Blähgraphit [Ma.-%]
Referenz	93,1	3,4	3,4
Variation 1	90,1	5,0	5,0
Variation 2	96,1	1,8	1,8

Die Herstellung der Probekörper erfolgte in mehreren Schritten:

1. Mischen des Suszeptors und des Blähgraphits mit der Grundierung
2. Applikation der Grundierung auf den Gipskarton – diese für vier Stunden verfestigen lassen
3. Herstellung des Fliesenklebers in einem Mörtelmischer nach Herstellerangaben
4. Applikation des Fliesenklebers mit einem Zahnpachtel, abziehen mit eben diesem
5. Anpressen der Fliese
6. Aushärten lassen der Probekörper für mindestens 24 Stunden unter Normklima
7. Trocknen der Probekörper auf Massekonstanz.



Bild 15: Übersicht Herstellung der Probekörper



Bild 16: Gipskartonplatte ohne Grundierung



Bild 17: Gipskartonplatte mit Fliesenkleber



Bild 18: Abgezogener Fliesenkleber auf Gipskartonplatte

### 1.2.1.2 Versuchsdurchführung

In der ersten Versuchsreihe sollte zunächst der Versuchsaufbau und das Funktionsprinzip der Schaltschicht bzw. der modifizierten Grundierung überprüft werden. Hierfür wurden die hergestellten Probekörper direkt vor dem Hornstrahler platziert. Das Mikrowellengerät arbeitete auf voller Leistungsstärke. Die Auswirkung der Mikrowellen auf den Probekörper wurde über die Einwirkzeit beobachtet und die erzeugten Temperaturen gemessen. Es wurde eine maximale Einwirkzeit von 5 Minuten festgelegt im Hinblick auf die spätere Praktikabilität.



Bild 19: Platzierung eines Probekörpers vor dem Mikrowellengerät (1)



Bild 20: Platzierung eines Probekörpers vor dem Mikrowellengerät (2)

### **1.2.1.3 Ergebnisse**

Es wurden von jeder Variation je drei Probekörper untersucht. Alle Versuche zeigten dabei keinen Trennerfolg. Lediglich bei einem Probekörper kam es zu einem Sprung in der Fliese. Die erreichten Temperaturen nach 5 Minuten betragen im Maximum 270 °C und reichten damit theoretisch aus, das Blähgraphit expandieren zu lassen, was jedoch nicht bzw. nur an den Rändern der Probekörper beobachtet werden konnte. An diesen kam es teilweise auch zu Ausdampfungen und Rauchbildung.

Als Ursache für die ausbleibenden Trennerfolge können folgende Gründe in Frage kommen:

1. Ein sehr guter Haftverbund zwischen Fliesenkleber und Grundierung/Gipskarton
2. Das punktuelle Einwirken der Mikrowelle (Hotspot-Bildung) auf einer zu kleinen Fläche
3. Grund 1 und 2 in Kombination mit einer zu großen Probekörpergeometrie, d.h. die punktuell erzeugten Kräfte im Hotspot reichen nicht aus, um eine Fliese von einer sehr großen Fläche zu trennen.

Ein möglicher Lösungsansatz war die Fliese zu bewegen, um das Mikrowellenfeld zu homogenisieren. Das wurde jedoch im Rahmen dieses Versuchsaufbaus als zu gefährlich bzw. technisch aufwendig eingeschätzt.

Die Versuche zeigten, dass es zielführend ist, den Einfluss der Größe des Hotspots auf die Probekörper zu untersuchen. Folglich wurde der Versuchsaufbau so modifiziert, dass eine Hotspot-Ausbildung detektiert und lokalisiert werden konnte.

### **1.2.2 Detektion Hotspot**

In Arbeitspaket 1 wurde festgestellt, dass sich die Wirksamkeit offener und geschlossener Mikrowellengeräte maßgeblich unterscheidet. Daher wurde es erforderlich, einen Versuchsaufbau für die Weiterentwicklung der Schaltschicht zu entwickeln. Während geschlossene Mikrowellengeräte durch die kontinuierliche Rotation des Probekörpers relativ homogene Mikrowellenfelder erzeugen, bildet sich nach derzeitigem Stand ein ungleichmäßiges und schwer vorhersehbares Feld bei offenen Mikrowellengeräten aus.

Es ist daher notwendig, diesen Umstand bei der Entwicklung eines neuen Versuchsstandes zu berücksichtigen. Im ersten Schritt wurde daher eine Vorgehensweise entwickelt, um sogenannte Hotspots zu lokalisieren. Dabei wurde auf das Mikrowellengerät mit Hornstrahler zurückgegriffen, da dieses im Arbeitspaket 1 die vielversprechendsten Ergebnisse lieferte. Als Probekörper, auf denen die Hotspots sichtbar werden sollten, wurden verschiedene Varianten von mit Suszeptoren modifizierten Gipskartonplatten eingesetzt (s. Bild 21).

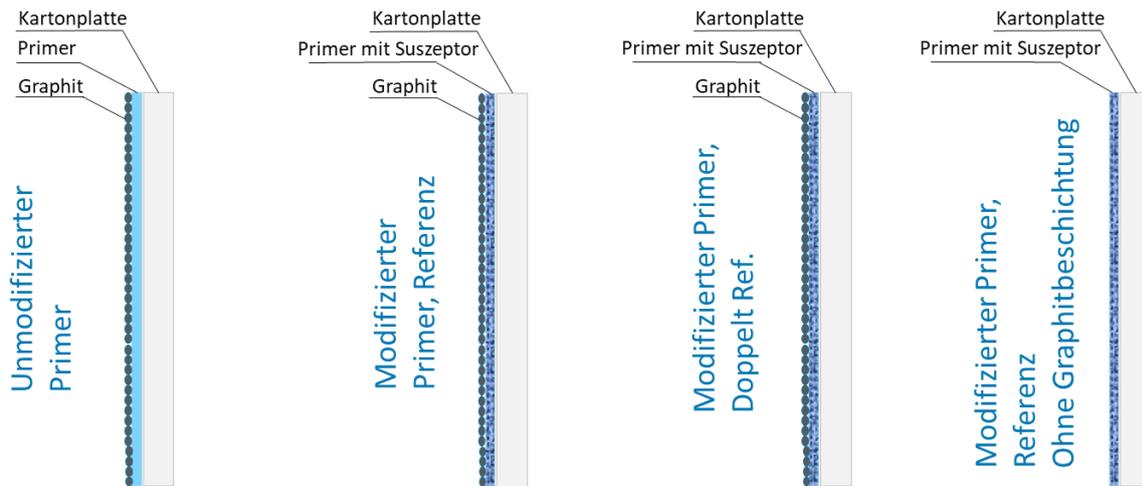


Bild 21: Lösungsansatz für Aufschluss von Verbundbaustoffen, Varianten der Platzierung der Suszeptoren

Die Beschichtung beinhaltete die bereits in Arbeitspaket 1 und Kapitel 1.2.1 verwendeten Materialien. In drei der Schichtenaufbauten kam ein modifizierter Primer zum Einsatz, der für die mikrowellen-induzierte Wärmeentwicklung sorgen sollte. Die oberste Schicht bildete in drei Fällen ein Blähgraphit, welches expandieren sollte, wenn es zur Wärmeentwicklung kommt. Die Hotspots sollten entweder durch eine farbliche Veränderung (Primer mit Suszeptor verkohlt) oder durch eine Volumenveränderung des Blähgraphits sichtbar gemacht werden. Der Versuchsaufbau beinhaltete außerdem eine Variation des Abstands des Hornstrahlers zum Probekörper und die Einwirkdauer der Mikrowelle.

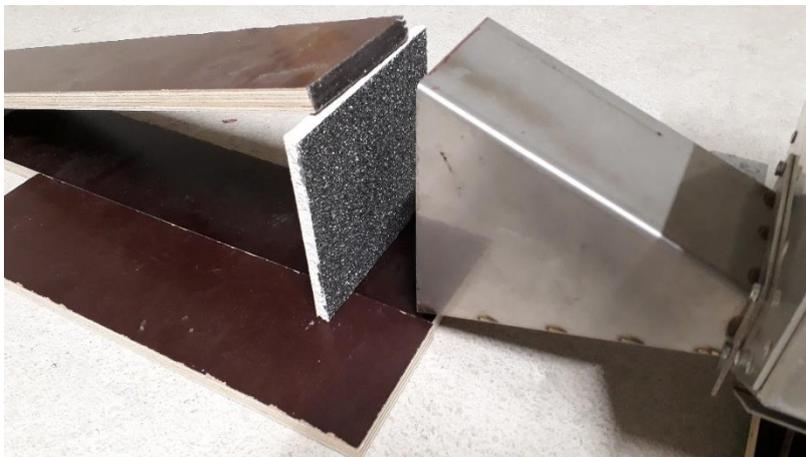


Bild 22: Mikrowellengerät 1 mit Hornstrahler

Die erzielten Ergebnisse können den nachfolgenden Bildern entnommen werden.



Bild 23: Mit Blähgraphit beschichtete Gipskartonplatte, unmodifizierter Primer

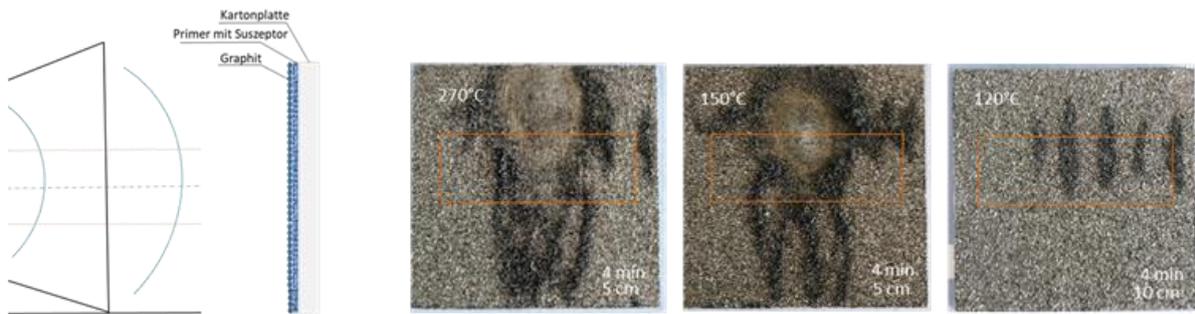


Bild 24: Mit Blähgraphit beschichtete Gipskartonplatte, modifizierter Primer

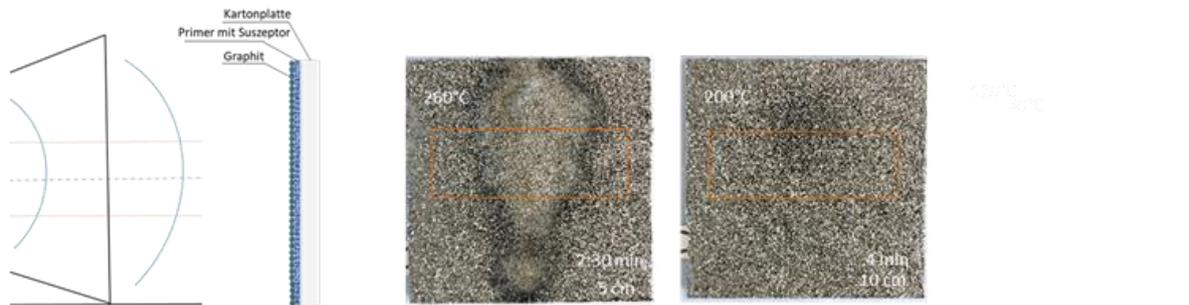


Bild 25: Mit Blähgraphit beschichtete Gipskartonplatte, modifizierter Primer (doppelte Menge)

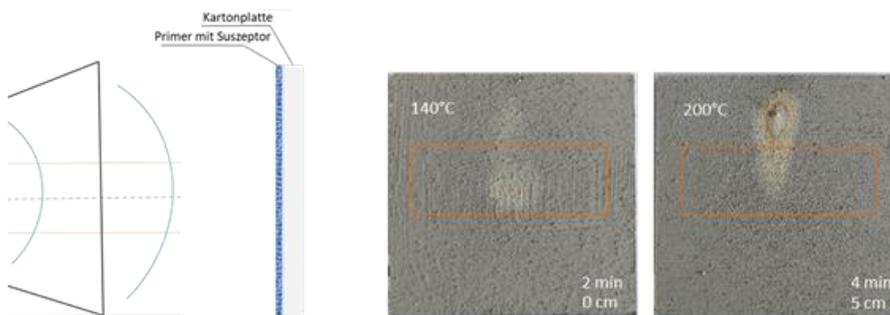


Bild 26: Unbeschichtete Gipskartonplatte mit modifiziertem Primer

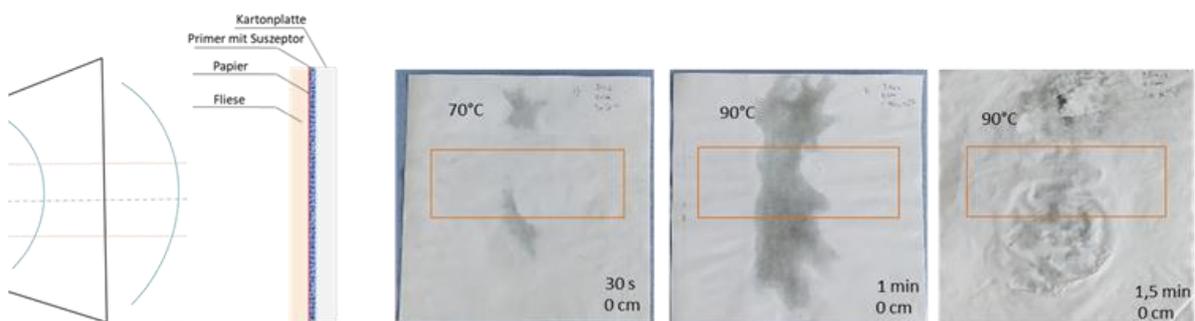


Bild 27: Angefeuchtetes Thermopapier auf unbeschichteter Gipskartonplatte mit modifiziertem Primer

Es wurde festgestellt, dass sich die Position des Hotspots nicht mittig zum Hornstrahler ausbildet, sondern leicht oberhalb der Mitte. Zudem ist die Ausbildung des Hotspots nicht gleichmäßig.

Ausreichende hohe Temperaturen, die das Blähgraphit expandieren lassen, konnten teilweise nach zwei Minuten erreicht werden bei einem Abstand von 5 cm. Mit einem doppelt so großen Abstand (10 cm) wurden wesentliche geringere bis keine sichtbaren Expansionseffekte erzeugt. Mittels des entwickelten Aufbaus wurden Temperaturen von bis zu 270 °C erreicht. Das Expandieren des Blähgraphits erfolgte unter Funkenbildung im Hotspot. Möglicherweise handelte es sich dabei auch um Plasmabildung.

Im Rahmen des Projektes wurde zu einem späteren Zeitpunkt ein zweites, verbessertes Mikrowellengerät eingesetzt. Dieses verfügt über keinen Hornstrahler, sondern über einen quadratischen Hohlleiter. Die Hotspot-Ausbildung wurde mit diesem Geräteaufbau ebenso untersucht. Dabei zeigte sich, dass eine wesentliche kürzere Einwirkzeit notwendig war, die Hotspot-Entwicklung zu beobachten. Der Hotspot bildete sich dabei axial-mittig zum Strahler aus.



Bild 28: Mikrowellengerät 2 mit quadratischen Hohlleiter



Bild 29: Beschichtete Gipskartonplatte vor rechteckigem Strahler



Bild 30: Hotspot-Bildung auf beschichtetem Gipskarton

## Schlussfolgerung

Es ist prinzipiell möglich, den von einem spezifischen Mikrowellengerät erzeugten Hotspot zu lokalisieren. Die Ergebnisse dieser Versuche gaben Aufschluss über die optimale Positionierung von Probekörpern (Höhe und Abstand), sowie die zu erwartenden Temperaturen. Zudem zeigte sich ein deutlicher Unterschied zwischen unterschiedlichen Mikrowellengeräten bzw. Strahlertypen. Folglich wurde in allen weiteren Untersuchungen das Mikrowellengerät genutzt, welches die besseren Ergebnisse (Hotspot-Bildung nach möglichst kurzer Zeit) erzielte: **Mikrowellengerät 2 mit quadratischen Hohlleiter.**

Eine weitere Schlussfolgerung ist, dass für die Rezepturentwicklung eine Verkleinerung der Probekörpergeometrie zielführend ist. Da keine Homogenisierung des Mikrofelds möglich ist, erstreckt sich der Hotspot über einen Großteil des kleineren Probekörpers. Aus diesem Grund wurde in allen nachfolgenden Untersuchungen auf ein Fliesenformat von 5 cm mal 5 cm zurückgegriffen.

### 1.2.3 Versuche an kleinen Fliesen (5 cm x 5 cm)

#### 1.2.3.1 Herstellung Probekörper

Die Herstellung der Probekörper erfolgte analog zu der Vorgehensweise zur Herstellung in Kapitel 1.2.1.1 mit dem Unterschied dass auf das kleine Fliesenformat zurückgegriffen wurde.

#### 1.2.3.2 Modifizierung und Applikation der Grundierung

Aufbauend auf die vorangegangenen Versuche wurden verschiedene Dosierungen an Suszeptor und Blähgraphit in die Grundierung eingebracht. Die einzelnen Rezepturen unterscheiden sich sowohl in der Menge der eingesetzten Additive als auch im Verhältnis der beiden Additive zu einander.

Die Applikation der modifizierten Grundierungen erfolgte an zwei Stellen im Schichtenaufbau der Probekörper:

- Typ Probekörper 1: Applikation der modifizierten Grundierung zwischen Gipskarton und Fliesenkleber
- Typ Probekörper 2: Applikation der modifizierten Grundierung zwischen Fliese und Fliesenkleber
- Typ Probekörper 3: Referenz, Grundierung unmodifiziert, Applikation zwischen Gipskarton und Fliesenkleber.

Tabelle 6: Modifikationen der Grundierung (Primer)

Rezeptur	Primer	Suszeptor	Graphit
	[g]	[g]	[g]
1	19	0,175	0,175
2	19	0,175	0,35
3	19	0,35	0,175
4	19	0,35	0,35
5	19	0,35	0,7
6	19	0,7	0,35
7	19	1,4	0,7
8	19	0,7	1,4
9	19	1,4	1,4
10	19	0	1,4
11	19	0	0
12	19	1,4	0
13	19	0,7	0,7
14	19	0,7	1,05
15	19	1,05	1,05

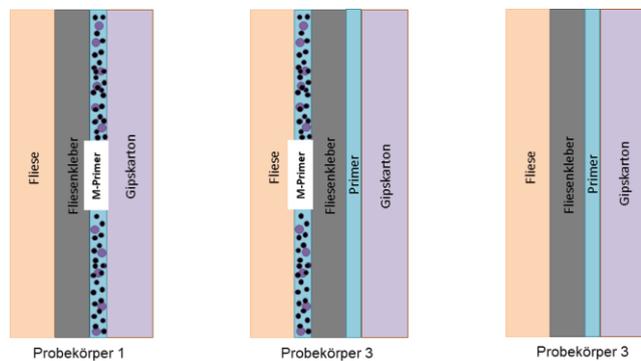


Bild 31: Übersicht Schichtenaufbauten

#### 1.2.3.3 Versuchsdurchführung

Die Versuchsdurchführung an den kleinen Fliesen wurde um einen gefrästen Styrodur-Abstandhalter erweitert. Dieser Abstandhalter sorgt dafür, dass die Probekörper vor dem Strahler des Mikrowellengerätes reproduzierbar fixiert werden konnten. Die Befestigung des Probekörpers erfolgte dabei über eine passgenaue Steckverbindung, welche den Probekörper nur über die Fliese festklemmte. Es wurde Styrodur als Material gewählt, da dieses leicht zu fräsen und mikrowellentransparent ist, d.h. es absorbiert keine Mikrowellen und lässt diese nahezu vollständig durch. Mittels der Materialstärke und der Tiefe der Einfräsung der Steckverbindung

wurde ein Abstand zwischen Oberfläche Probekörper zur Außenkante Strahler von 5 cm eingestellt. Der Versuchsaufbau wurde so gestaltet, dass der „Rücken“ des Probekörpers, d.h. die Gipskartonplatte, abfallen konnte, wenn es zum Trennerfolg kam. Es wurde die Zeit bis zum Trennerfolg gemessen und verschiedene Temperaturen am Probekörper direkt nach dem Trennerfolg. Es wurde aus Praktikabilitätsgründen eine maximale Einwirkzeit von 120 Sekunden festgelegt. Wenn diese Zeit überschritten wurde, wurde der Versuch abgebrochen und die erzeugten Temperaturen bis dahin erfasst.

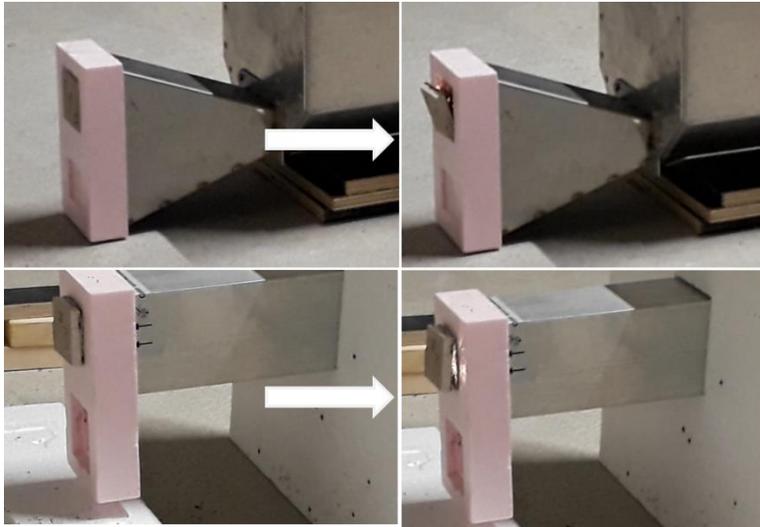


Bild 32: Versuchsaufbau mit Styrodur-Abstandshalter, Hornstrahler mit Mikrowellengerät 1 (oben) und quadratischen Hohlleiter mit Mikrowellengerät 2 (unten)

Bei den Versuchen wurden darauf geachtet, dass sich keine Person im Bereich des Mikrowellenfeldes bewegt. Es wurde daher ein Sicherheitsabstand von zwei Metern eingehalten.

#### 1.2.3.4 Ergebnisse

Die nachfolgenden Ergebnisse basieren auf dem Mikrowellengerät 2 mit quadratischen Hohlleiter. Der Abstand zwischen Strahler und Probekörper betrug 5 cm. Die in Tabelle 7 grün hinterlegten Zeilen stehen für einen Versuch mit Trennerfolg, weshalb auch die inneren Temperaturen gemessen werden konnten.

Tabelle 7: Ergebnisse Mikrowellenversuche an kleinen Fliesen (5 cm x 5 cm), Trennerfolge grün hinterlegt

Probekörper 1							
	Suszeptor	Graphit	Zeit [s]	Fliese [°C]		Gipskarton [°C]	
				außen	innen	innen	außen
1	1	1	120	38,3	–	–	31,7
2	1	2	120	37,3	–	–	31,7
3	2	1	120	44,7	–	–	35,0
4	2	2	120	56,3	–	–	40,0
5	2	4	120	57,0	–	–	41,3
6	4	2	90	67,3	92,0	120,0	86,7
7	8	4	12,3	74,0	86,3	61,0	41,3
8	4	8	12,3	53,0	73,0	71,0	42,3
9	8	8	9,3	57,3	41,7	57,0	34,3
10	0	8	120	38,7	–	–	34,0
12	8	0	40	34,3	–	–	30,6
13	4	4	15,7	50,3	44,0	36,3	24,7
14	4	6	9,3	50,0	38,7	50,3	28,3
15	6	6	10,0	41,7	51,3	50,0	30,7
Probekörper 2							
	Suszeptor	Graphit	Zeit [s]	Fliese [°C]		Gipskarton [°C]	
				außen	innen	innen	außen
4	2	2	120,0	76,7	–	–	51,0
5	2	4	120,0	50,7	–	–	46,7
6	4	2	113,3	152,3	150,0	100,0	74,0
7	8	4	18,0	126,0	147,5	70,5	48,0
8	4	8	10,5	55,0	72,5	57,0	27,5
9	8	8	68,0	148,0	145,3	90,0	56,7
10	0	8	120,0	37,7	–	–	31,7
12	8	0	52,0	199,7	237,0	111,3	73,3
Probekörper 3							
11	0	0	120,0	34,3	–	–	30,6

Die Ergebnisse zeigen, dass sich Trennerfolg mit den modifizierten Grundierungen Nr. 7 – 9 sowohl beim Probekörper-Typ 1 als auch 2 einstellt. Beim Probekörper-Typ 1 wurden Trennerfolge auch mit den modifizierten Grundierungen Nr. 13 -15 erreicht. Die Trennerfolg wurde, bis auf eine Ausnahme, nach 9,3 s bis 18,0 s erzielt. Daraus ergibt sich eine theoretische Aufschlussgeschwindigkeit von ca. 0,5 bis 1,0 m<sup>2</sup>/h.

Der Vergleich zwischen den Temperaturen aufgeschlossener Probekörper ergibt, dass der Schichtenaufbau des Typs Probekörper 1 eine geringere Temperatur aufweist, als die vergleichbaren Schichtenaufbauten des Typs 2. Vergleichbar heißt in diesem Zusammenhang, bei annähernd gleich schnellem Trennerfolg und gleicher Dosierung an Additiven. Damit ist der Schichtenaufbau des Typs Probekörpers 1 praxistauglicher, da durch die geringere Temperaturentwicklung ein geringeres Sicherheitsrisiko (Brandgefahr) besteht.

Das Aufschlussverhalten des Typs Probekörper 1 und Typs Probekörper 2 unterscheidet sich hinsichtlich Schicht, in der sich die Probekörper trennten. Folgendes wurde festgestellt:

- Probekörper 1: Additive zwischen Gipskarton und Fliesenkleber, Aufschluss zwischen Fliesenkleber und Fliese
- Probekörper 2: Additive zwischen Fliese und Fliesenkleber, Aufschluss zwischen Fliesenkleber und Gipskarton.

Die Untersuchungen zeigten damit, dass ein bestimmter Trennerfolg in einer Schicht gezielt erzeugt werden kann.

Bei beiden Probekörpertypen wurde ein „Durchdringen“ des Fliesenklebers durch das expandierte Blähgraphit beobachtet. Der Fliesenkleber wurde in Folge dessen mechanisch zerstört. Die Expansionskraft reichte dabei aus, den Schichtenverbund zu lösen.



Bild 33: Probekörper 1 mit Trennerfolg, Reihenfolge (v. l. n. r.) 6, 7, 8



Bild 34: Probekörper 1 mit Trennerfolg, Reihenfolge (v. l. n. r.) 9, 13, 14



Bild 35: Probekörper 2 mit Trennerfolg, Reihenfolge (v. l. n. r.) 6, 7, 8, 9, 12

Ergänzend zu den vorangegangenen Versuchen wurden der Mikrowellentyp und der Abstand zwischen Strahler und Probekörper variiert. Dabei zeigte sich, dass sich der Trennerfolg unter Verwendung des Mikrowellengeräts mit quadratischen Hohlleiter ca. 10 s früher einstellte als mittels Mikrowellengerät 1 mit Hornstrahler (12 s statt 22 s bei 5 cm Abstand, Rezeptur 7).

Tabelle 8: Vergleich Mikrowellengeräte, Variation Abstand

Rezeptur	Mikrowelle	Abstand [cm]	Zeit [s]	max. Temperatur			
				Fliese		Gipskarton	
				außen [°C]	innen [°C]	innen [°C]	außen [°C]
7	1	10	☀️ 22		70		
		5	☀️ 22		90		93
	2	5	☀️ 12	74	86	61	41
8	1	10	☀️ 15		40		
		5	☀️ 20		58		59
	2	5	☀️ 12	53	73	71	42

Für alle weiteren Versuche, z.B. am Wand-Prototypen, wurden die Rezepturen 7 und 8 favorisiert. Des Weiteren wurden die Schichtenaufbauten des Typs Probekörper 1 und 2 weiter untersucht.

## 1.2.4 Zusammenfassung

### 1.2.4.1 Integration in handelsübliche Grundierungen und Primer

Die Integration der Additive bestehend aus Suszeptor und Blähgraphit wird in erster Linie durch die Verarbeitbarkeit der Grundierung limitiert. Die Applikation der Grundierung erfolgt in

der Regel mit einem Pinsel. Dabei muss die Konsistenz der Grundierung ausreichend sein, damit dies möglich ist.

Da die Additive eine sehr hohe spezifische Oberfläche haben und hydrophob sind, beeinflussen schon geringere Mengen die Konsistenz der Grundierung. Je mehr Additive hinzugegeben werden, desto zähflüssiger wird die Grundierung und die applizierte Schicht wird dicker, was wiederum zu einem höheren Materialverbrauch führt.

Im Rahmen der Untersuchungen konnten maximale Dosierungen von 6,4 % Suszeptor und 6,4 % Blähgraphit erreicht werden. Höhere Dosierungen ließen sich nicht mehr praktikabel verarbeiten und applizieren.

#### **1.2.4.2 Minimierung der Auswirkungen auf den Verbund**

Auswirkungen, von denen potentiell eine Gefährdung ausgeht, gestalten sich wie folgt:

- |                       |  |
|-----------------------|--|
| 1. Funkenschlag       | z.B. Beschaffenheit der Additive                         |
| 2. Brandgefahr        | z.B. durch leicht entzündliche Material im Verbund       |
| 3. Rauchentwicklung   | z.B. durch Verbrennen / Verglühen einzelner Bestandteile |
| 4. Verbrennungsgefahr | z.B. Hohe Temperaturen an den Oberflächen.               |

Der erste Punkt wird vermieden, indem die Additive, die zum Funkenschlag neigen, sich zunächst im Schichtenaufbau befinden und damit keine Funken nach außen dringen können. Kommt es zum Trennerfolg, liegt die aktivierte Trennschicht offen und dies kann zum Funkenschlag führen. Um dies zu verhindern, muss die Mikrowelle umgehend deaktiviert oder auf einen anderen Bereich gerichtet werden. Der Funkenschlag tritt nur unter unmittelbarer Einwirkung des Mikrowellengeräts auf.

Die Punkte 2 bis 4 werden im Wesentlichen dadurch verhindert, indem die punktuelle Temperaturentwicklung so gering wie möglich gehalten wird. Ein Trennerfolg wurde mitunter schon unter 50 °C auf der Oberfläche der Fliese erreicht, womit die Gefährdung relativ gering ist. Brand- und Rauchentwicklung waren nur zu beobachten, wenn das Mikrowellengerät länger als notwendig auf eine Stelle gerichtet wurde. Dies gilt es zu vermeiden.

#### **1.2.4.3 Möglichst rückstandslose Schaltschicht**

Es wurde festgestellt, dass eine rückstandslose Schaltschicht, d.h. eine möglichst homogene Trennschicht nach Trennerfolg, erreicht wurde, wenn es zu einer möglichst flächigen Aktivierung der Schaltschicht kommt. Dies bezüglich ist die Entwicklung des erzeugten Hotspots von entscheidender Bedeutung. Es zeigte sich, dass eine effiziente und gezielte Energieeinbringung zu einem gleichmäßigen Versagen des Schichtenaufbaus führte. Dies war wiederum abhängig vom Mikrowellengerät und Strahler. Eine vollflächige Aktivierung der Trennschicht mit einem stationären, offenen Mikrowellengerät konnte aber nicht erreicht werden. Die offenen Mikrowellengeräte erzeugten nur eine punktuelle Expansion des Blähgraphits, die sich nicht gleichmäßig über die Probekörper verteilt. Selbst bei kleinen Fliesenformaten wurde eine vollflächige Expansion nicht erreicht.

Ein Lösungsansatz ist die Homogenisierung des erzeugten Mikrowellenfeldes durch das dynamische Bewegen des Mikrowellengeräts.

### 1.3 Arbeitspaket 3: Auswirkung der Schaltschicht auf Festigkeit der Verbünde

Für weitere Versuche ist es ratsam, sich auf eine Rezeptur mit dem geringstmöglichen Verbrauch an Bestandteilen zu beschränken, daher wurde Rezeptur 8 für Versuche an vertikalen Wänden gewählt. Außerdem wurden Probekörper hergestellt, um die Haftfestigkeit der Fliesen mit vertikalen Musterflächen zu bewerten.



Bild 36: Präparierte Haftzugproben auf Betonoberfläche (links) und Haftzugprüfgerät (rechts)

Es wurden drei verschiedene Schichtenaufbauten auf drei verschiedenen Untergründen untersucht:

Typ Probekörper 1: Modifizierte Grundierung zwischen Fliesenkleber und Untergrund

Typ Probekörper 2: Modifizierte Grundierung zwischen Fliesenkleber und Fliese

Typ Probekörper 3: Referenz Schichtenaufbau, kein Einsatz von Additiven

Untergrund 1: Beton

Untergrund 2: Gipskarton

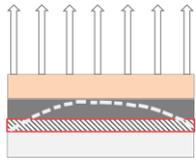
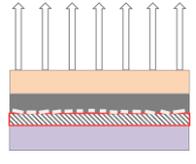
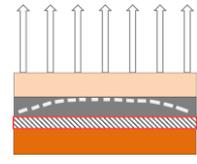
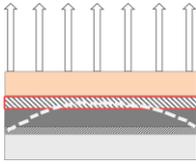
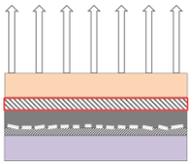
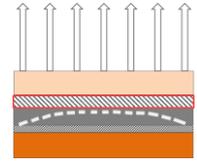
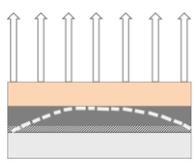
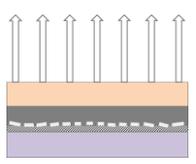
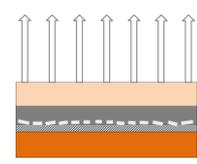
Untergrund 3: Ziegel.

Die Bewertung des Einflusses der eingesetzten Additive erfolgte ausgehend vom unmodifizierten Schichtenaufbau des Typs Probekörper 3.

Dabei zeigte sich, dass der Haftverbund durch den Einsatz der Additive (Rezeptur 8) nicht signifikant verschlechtert wurde. Der Haftverbund zwischen Beton und Ziegel wurde sogar verbessert, wobei die größte Steigerung der Haftzugfestigkeit beim Schichtenaufbau Typ Probekörper 1 erzielt wurde. Eine mögliche Ursache für dieses Verhalten könnte darin liegen, dass der Einsatz der Additive zu einer Verschlechterung der Verarbeitbarkeit der Grundierung führte, wodurch mehr von dieser appliziert wurde. Durch eine größere Menge an Grundierung wurde der Haftverbund zwischen Untergrund und Fliesenkleber verbessert.

Für diese These spricht auch, dass die Trennung zwischen diesen Schichten bei nahezu alle Prüfungen erfolgte. Der Haftverbund an dieser Stelle wurde folglich durch eine größere Menge an Grundierung verbessert, da dieser auf Grund der Konsistenz dicker appliziert werden musste.

Tabelle 9: Ergebnisse Haftzugprüfung

Betonplatte			Kartonplatte			Ziegel		
Schichtenmodell	$f_c$	STABW	Schichtenmodell	$f_c$	STABW	Schichtenmodell	$f_c$	STABW
	[KN]	[KN]		[KN]	[KN]		[KN]	[KN]
 Probekörper 1	4,175	0,391	 Probekörper 1	0,484	0,093	 Probekörper 1	1,303	0,228
 Probekörper 2	3,709	0,297	 Probekörper 2	0,285	0,044	 Probekörper 2	0,867	0,284
 Probekörper 3	3,455	0,209	 Probekörper 3	0,347	0,058	 Probekörper 3	0,774	0,117

	Fliese		Kartonplatte
	Fliesenkleber		Betonplatte
	Primer		Ziegel
	modifizierte Schaltschicht		

## 1.4 Arbeitspaket 4: Auswahl Additive, Untersuchungen Trennbarkeit

### 1.4.1 Auswahl Additive

Es wurden durch Recherchen Alternativen zum bereits eingesetzten Suszeptor (S1 bis S7) und Blähgraphit (A1 und A2) ermittelt und charakterisiert.

Tabelle 10: Übersicht alternative Additive

Nr.	Bezug	Bezeichnung	Bild
Effekt: plattige Materialien mit Zieharmonikastruktur im aktivierten Zustand – vergleichbar mit Blähgraphit			
A 1 Additiv	trockenes Vermiculit: Isola Vermiculite GmbH	Palabora Nr.0 0 – 1 mm	
A 2 Additiv		Palabora Nr.1 0 – 2 mm	
Effekt: weiche Mikrogranulate, bestehend aus Wasserkern und polymerer Hüllstruktur			
S 1 Suszeptor	Alingnat – Polymer-Granulat mit wässrigem Kern in wässriger Lösung geliefert	Musterprobe IAP 3 - blau Auswahl aus den Musterproben (Wassergehalt 90%) Kapselgröße ca. 1 mm	
Effekt: gelartige Makrogranulate, bestehend aus Superabsorbent – starke Volumenzunahme durch Wassereinlagerung in die Struktur			
S 2 Suszeptor	Hydrogel – hochquellfähiger Superabsorber, Einkauf als Blumengranulat	ØGranulate trocken 1,5 mm, feucht 8 mm	
Effekt: feste und wasserspeichernde Granulate			
S 3 Suszeptor	Zeolith pulverförmig Zeolith Umwelttechnik GmbH, Waldsassen	Zeolith B (P2): Clinoptilolith $x_{50} = 9,39 \mu\text{m}$ 0 – 0,25 mm Naturprodukt	

S 4 Suszeptor	Zeolith grob	Zeolith C, Chabasit $x_{50} = 138,50 \mu\text{m}$ 0 – 2,5 mm Naturprodukt	
S 5 Suszeptor	Firma CWK – Dr. Kristin Gleichmann  Zeolithformkörper mit 100 Prozent Aktivkomponentenanteil (Molekularsiebe)	Köstrolith 13xBFK  0,5 – 0,9 mm Industrieprodukt sehr feste Granulate	
S 6 Suszeptor		Köstrolith 4ABFK  1,2 – 2,0 mm Industrieprodukt	
S 7 Suszeptor		Köstrolith 4AK  1,2 – 2,0 mm Industrieprodukt	

#### 1.4.2 Versuche mit freiliegender Schaltschicht

Die Gerätetechnik des IAB-Standard-Versuchsstandes umfasste die Labormikrowelle (850 W) und die IR-Kamera Micro-Epsilon TIM 400.

Tabelle 11:Gerätetechnik und Kennwertermittlung des IAB Standard-Mikrowellenversuchsstandes



Bild 37: Labormikrowelle

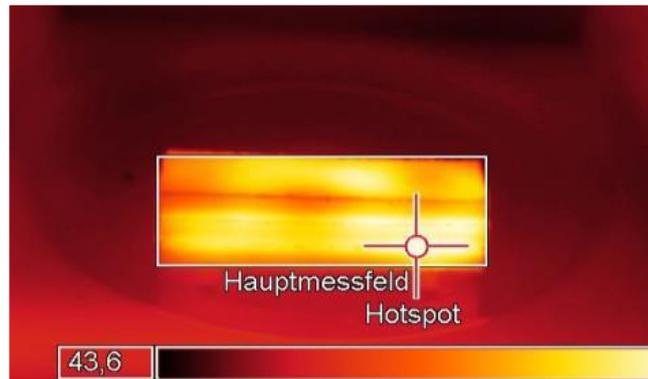


Bild 38: radiometrisches Wärmebild mit Messfeld und Temperaturspot

Die erfassten Kennwerte umfasste die Probekörperoberflächentemperatur als mittlere Oberflächentemperatur und Maximaltemperatur zum Untersuchungszeitpunkt nach einem vorab definierten zeitlichen Raster mit einer Gesamtdauer von 6 min und Zeitschritten von je einer Minute. Die Erstellung der Aufheizkurve über den zeitlichen Verlauf erfolgte bei 100 % Mikrowellenleistung. Getestet wurden im Mikrowellengerät Standardprobekörper, die aus einem Trägerbaustoff aus Gipskartonplatten mit den Abmaßen 15 x 15 cm<sup>2</sup> bestehen.

### 1.4.3 Ansatz für die Herstellung der Schaltschicht

Referenziert wurden die neuen Suszeptoren und Additive an der Ausgangsmischung, die auf der Standardrezeptur basiert.

Tabelle 12: Standardrezeptur der Schaltschicht

Materialbezeichnung	Baumit PremiumPrimer DG 27 mit Sandkörnung	Graphit SC 20	Graphit ES 350 F5
Aufgabe	Trägersubstanz	Suszeptor	volumenexpansives Additiv
Anteil	190g	7g	7g

Die Modifikation dieser Rezeptur erfolgte nach Augenmaß.

- 1. Versuch: Mengen weitgehend nach Standardrezeptur
- 2. Versuch: Steigerung der Materialzugabe nach Augenmaß.

Es wurden 13 Probemischungen realisiert, wie in der nachfolgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 13: Übersicht Rezepturen

	Additiv					Wasserspeicher							
	Vermiculit					PolymerGranulate		Hydrogel	Zeolit		CWK - Molekularsiebe		
	M 1 mit Vermiculit, ohne Graphit	M 2 mit Vermiculit Pal 0, mit Graphit	M 3 mit Vermiculit Pal 1, mit Graphit	M 4 mehr Vermiculit Pal 1, ohne Graphit	M 5 mehr Vermiculit Pal 1, mit Graphit	M 6 IAB 3 IAP, ohne Graphit	M 7 mehr IAB 3 IAP, ohne Graphit	M 8 halbierte Kugeln	M 9 pulverförmiges Zeolit, geringe Menge	M 10 grobes Zeolit mit größerer Menge	M 11 13XBFK	M 12 4ABFK	M 13 4AK
Graphit Sc 20 [g]					2,0								
Vermi Pal 0 [g]	2,0	2,0	2,0										
Vermi Pal 1 [g]			2,0	10,0	10,0								
Alignat GIAB 3 [g]						4,0	12,0	nass	nass	nass			
Hydrogelkugeln [g]								5,6					
Zeolit P2 fein [g]									7,8				
Zeolit C grob [g]										12,4			
CWK 4AK [g]													
CWK 13XBFK [g]													
CWK 4ABFK [g]													
PP DG 27 [g]	56,4	53,9	55,0	54,0	55,0	54,3	54,1	55,7	54,9	27,9	54,9	54,9	54,9
proz. Zugabemenge	3,5	7,4	7,3	18,5	21,8	7,4	22,2	10,1	14,1	44,5	16,1	16,5	20,7
Verbrauch frisch, MW [g/cm <sup>2</sup> ]	0,021	0,037	0,036	0,056	0,063	0,066	0,041	0,043	0,020	0,057	0,083	0,087	0,092
Verbrauch trocken MW [g/cm <sup>2</sup> ]	0,010	0,018	0,017	0,028	0,031	0,033	0,023	0,026	0,014	0,038	0,055	0,059	0,061
	2x Platten	2x Platten	2x Platten	2x Platten	2x Platten	1x Platte	1x Platte	1x Platte	1x Platte	1x Platte	1x Platte	1x Platte	1x Platte



Bild 39: Mischung M 1 bis 3



Bild 40: Mischung M 4 bis 7



Bild 41: Mischung M 6 bis M 10



Bild 42: Mischung M 11 bis M 13

### 1.4.4 Ergebnisse

Tabelle 14: Ergebnisse Rezepturentwicklung mit alternativen Additiven

Datum Herstellung	MW	Dauer Lufttrocknung [d]	Bezeichnung		T DS [°C]	T max [°C]	Aktivierung
<b>Köstrolit</b>							
30.08.2018	06.09.2018	7	M 11 - 13XBFK (T DS)	M 11 - 13XBFK (T max)	153,6	374,5	
30.08.2018	06.09.2018	7	M 12 - 4ABFK (T DS)	M 12 - 4ABFK (T max)	126,4	259,1	
30.08.2018	06.09.2018	7	M 13 - 4AK (T DS)	M 13 - 4AK (T max)	157,7	304,3	
<b>Vermiculit</b>							
27.08.2018	06.09.2018	10	M 1 - Ver 0 (T DS)	M 1 - Ver 0 (T max)	97,3	118,7	ohne Graphit
27.08.2018	06.09.2018	10	M 2 - Ver 0 + Gr (T DS)	M 2 - Ver 0 + Gr (T max)	325,9	608,1	mit Aktivierung
27.08.2018	06.09.2018	10	M 3 - Ver 1 + Gr (T DS)	M 3 - Ver 1 + Gr (T max)	341,4	615,3	mit Aktivierung
27.08.2018	06.09.2018	10	M 4 - ↑ Ver 1 (T DS)	M 4 - ↑ Ver 1 (T max)	111,7	160,9	ohne Graphit
27.08.2018	06.09.2018	10	M 5 - ↑ Ver 1 + Gr (T DS)	M 5 - ↑ Ver 1 + Gr (T max)	402,0	713,7	mit Aktivierung
<b>wassergefüllte Polymer-Granulate IAP</b>							
28.08.2018	06.09.2018	9	M 6 - IAP 3 (T DS)	M 6 - IAP 3 (T max)	95,7	126,8	
28.08.2018	06.09.2018	9	M 7 - IAP 3 + Gr (T DS)	M 7 - IAP 3 + Gr (T max)	97,9	140,5	
<b>Hydrogel</b>							
28.08.2018	06.09.2018	9	M 8 - Hydrogel (T DS)	M 8 - Hydrogel (T max)	103,0	143,7	
<b>Zeolit</b>							
28.08.2018	06.09.2018	9	M 9 - pulverf Zeolit (T DS)	M 9 - pulverf Zeolit (T max)	99,9	159,5	
28.08.2018	06.09.2018	9	M 10 - grobes ↑ Zeolit (T DS)	M 10 - grobes ↑ Zeolit (T max)	113,1	224,0	

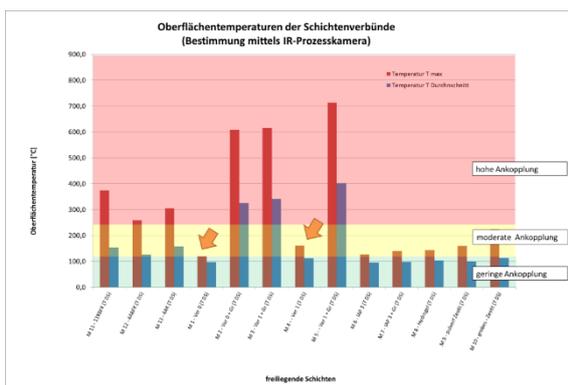


Bild 43: Übersicht der Temperaturentwicklung nach 6 min Mikrowelleneinstrahlung

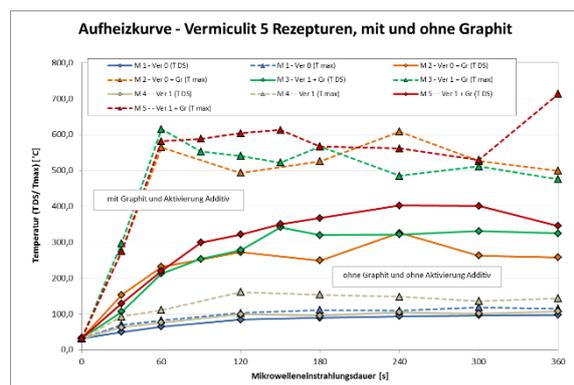


Bild 44: Aufheizkurven Rezepturen Vermiculit M 1 bis M 5

Eine der wesentlichen Schlussfolgerungen ist, dass die Anwendung der Vermiculite am erfolgversprechendsten scheinen.

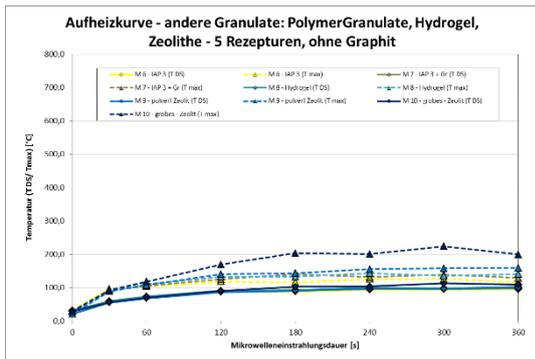


Bild 45: Aufheizkurven Rezepturen wassergefüllte Granulate

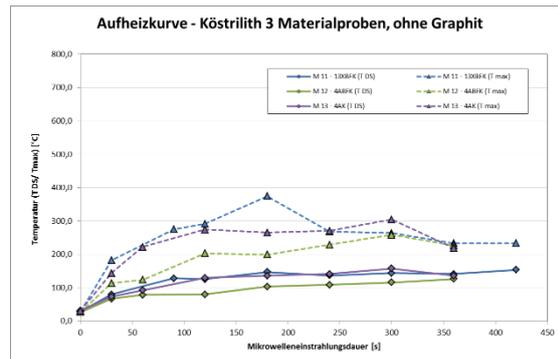


Bild 46: Aufheizkurven Rezepturen

Es wurde außerdem festgestellt, dass die Zeolithe bereits bei Luftlagerung vollständig austrocknen, womit kein physikalisch aktivierbares Wasser mehr vorhanden ist. Daher sind diese Granulate für die Zielstellung des Mikrowellenaufschlusses nicht geeignet.

Alle Mischungen der Köstrilith Molekularsiebe M 11 bis M 13 wiesen einen geringen Temperaturanstieg auf. Es wurden Durchschnittstemperaturen von  $T_{\text{Ø}} = 125 - 160 \text{ °C}$  erreicht. Die Schlussfolgerung daraus lautet: Molekularsiebe weisen nach Luftlagerung kein/ wenig physikalisch aktivierbares Wasser auf, wobei jedoch eine geringe Anregung erfolgte. Die genaue Ursache ist ungeklärt.

#### 1.4.5 Fazit

Die ermittelten Ergebnisse basieren auf dem IAB-Standardverfahren. Dabei ist anzumerken, dass diese Versuche eine wesentlich höhere Energiedichte erzeugen als die bereits untersuchten offenen Mikrowellengeräte. Im Vergleich zu den bereits eingesetzten Additiven erwiesen sich lediglich bestimmte Vermiculit-Produkte als vergleichbar.

Im Rahmen der Untersuchungen wurde jedoch darauf verzichtet, diese einzusetzen. Der Grund hierfür war die noch mangelnde Erfahrung mit diesen Materialien. Die Vermiculite bieten jedoch das Potenzial für weitere Untersuchungen

## 1.5 Arbeitspaket 5 und 6: Einfluss der Schaltschicht auf die Rezyklierbarkeit

Der Einfluss der Schaltschicht wird in Bezug auf die Auswirkungen auf die Rezyklierbarkeit der Wandbaustoffe als Trägermaterial zunächst für die Materialkombination, die in den Trennversuchen verwendet wurde, betrachtet. Die Probekörper, die nach dem IAB-Standardverfahren in einer Labormikrowelle behandelt wurden, hatten die in Tabelle 15 dargestellte Zusammensetzung.

Tabelle 15: Zusammensetzung der Materialkombination in Ma.-%

Gipskarton	Modifizierte Grundierung	Fliesenkleber	Fliese
Ma.-%	Ma.-%	Ma.-%	Ma.-%
36,01%	0,63%	12,74%	50,62%

Die Grundierung hat bei der betrachteten Leichtbauwand einen Anteil von 0,63 Ma.-%. Die Qualitätskriterien für rezyklierte Gipse erlauben einen Gehalt an TOC von < 1 Masse-% [1]. Dieser Wert wird bereits bei der fiktiven Betrachtung, dass die gesamte Grundierung aus TOC besteht, unterschritten.

Tabelle 16: Zusammensetzung der modifizierten Grundierung

Rezeptur	Grundierung [Ma.-%]	Suszeptor [Ma.-%]	Blähgraphit [Ma.-%]
Referenz	93,1	3,4	3,4

Die Grundierung wurde durch Zugabe von Suszeptor + Blähgraphit modifiziert. Die Anteile dieser beiden Komponenten betragen in Summe 6,8 Masse-%. Damit reduziert sich ihr „rechnerischer“ Gehalt bezogen auf die Gesamtwand auf 0,043 Masse-% und ist somit aus umwelttechnischer Sicht, aber auch aus Sicht der Verwertung, völlig unbedenklich.

Zusätzlich zu dieser Betrachtung wurden die TOC- und PAK-Gehalte im Feststoff und die wasserwirtschaftlichen Zuordnungswerte im Eluat an den Probekörpern, die jeweils mit und ohne modifizierte Grundierung hergestellt worden waren, gemessen. Bei der Bestimmung der wasserwirtschaftlichen Parameter kam das S4-Verfahren nach LAGA M 20 zum Einsatz, bei dem die Auslaugung mit einem Wasser – Feststoffverhältnis von 10 zu 1 erfolgt.

Der gemessene TOC-Gehalt steigt von 0,12 Masse-% ohne Modifizierung auf 0,24 Masse-% mit Modifizierung an. Er stammt allerdings nicht nur aus der Modifizierung, sondern auch aus anderen Quellen wie z.B. dem Karton. So weisen aufbereitete Gipskartonplatten TOC-Gehalte von 0,19 bis 3,13 Masse-% auf [Mue18]. Die PAK-Gehalte sind bei beiden Varianten sehr gering. Bei den Eluatwerten ist der Sulfatgehalt bei beiden Varianten erwartungsgemäß sehr hoch.

Aus den Ergebnissen kann geschlussfolgert werden, dass das Einbringen des Suszeptors und des Blähgraphits in die handelsübliche Grundierung, die auf die Gipskartonplatte aufgebracht wurde, keine Auswirkungen auf die Rezyklierbarkeit hat. Bei anderen Materialkombinationen, wie beispielsweise einer Ziegelwand mit Gipsputz, werden die Auswirkungen noch geringer sein, weil hier der Inertanteil „Ziegel + Gips“ noch höher als in der hier gewählten Kombination ist.

Tabelle 17:PAK- und TOC-Gehalte im Feststoff der Probe ohne Modifizierung der Grundierung

Probennummer: **4221 / 01**  
 Probenbezeichnung: **Probe 22737**  
 Analytik PAK und TOC im Feststoff und Eluat nach LAGA

Parameter	Messwert	Prüfverfahren
<b>TOC</b>	<b>0,12 Masse-%</b>	DIN EN 13137:2001-12 - DAkkS
<b>PAK (16), Summe der nachweisbaren Verbindungen</b>	<b>&lt; 0,8 mg/kg TS</b>	DIN ISO 18287:2006-05 - DAkkS
Einzelsubstanzen:		
Naphthalin	< 0,05 mg/kg	
Acenaphthylen	< 0,05 mg/kg	
Acenaphthen	< 0,05 mg/kg	
Fluoren	< 0,05 mg/kg	
Phenanthren	< 0,05 mg/kg	
Anthracen	< 0,05 mg/kg	
Fluoranthren	< 0,05 mg/kg	
Pyren	< 0,05 mg/kg	
Benzo (a) anthracen	< 0,05 mg/kg	
Chrysen	< 0,05 mg/kg	
Benzo (b) fluoranthren	< 0,05 mg/kg	
Benzo (k) fluoranthren	< 0,05 mg/kg	
Benzo (a) pyren	< 0,05 mg/kg	
Indeno(1,2,3-cd) pyren	< 0,05 mg/kg	
Dibenzo(a,h)anthracen	< 0,05 mg/kg	
Benzo(ghi)perylene	< 0,05 mg/kg	

Tabelle 18:Gehalte im Eluat der Probe ohne Modifizierung der Grundierung

Eluat: **DIN EN 12457-4:2003-01 - DAkkS**

Parameter	Messwert	Prüfverfahren
<b>pH-Wert</b>	<b>11,97</b>	DIN 38404-5:2009-07
<b>Elektrische Leitfähigkeit</b>	<b>3740 µS/cm</b>	DIN EN 27888:1993-11 - DAkkS
<b>Chlorid</b>	<b>&lt; 10 mg/l</b>	DIN EN ISO 10304-1:2009-07 - DAkkS
<b>Sulfat</b>	<b>1190 mg/l</b>	DIN EN ISO 10304-1:2009-07 - DAkkS
<b>Cyanid-gesamt</b>	<b>&lt; 5 µg/l</b>	DIN 38405-D13:2011-04 - DAkkS
<b>Phenolindex</b>	<b>55 µg/l</b>	DIN EN ISO 14402 (H37):1999-12 - DAkkS
<b>Arsen (As)</b>	<b>&lt; 1 µg/l</b>	DIN EN ISO 11885:2009-09 - DAkkS
<b>Blei (Pb)</b>	<b>9 µg/l</b>	DIN EN ISO 11885:2009-09 - DAkkS
<b>Cadmium (Cd)</b>	<b>&lt; 0,5 µg/l</b>	DIN EN ISO 11885:2009-09 - DAkkS
<b>Chrom-gesamt (Cr)</b>	<b>19 µg/l</b>	DIN EN ISO 11885:2009-09 - DAkkS
<b>Kupfer (Cu)</b>	<b>10 µg/l</b>	DIN EN ISO 11885:2009-09 - DAkkS
<b>Nickel (Ni)</b>	<b>&lt; 5 µg/l</b>	DIN EN ISO 11885:2009-09 - DAkkS
<b>Quecksilber (Hg)</b>	<b>&lt; 0,2 µg/l</b>	DIN EN ISO 12846:2012-08 - DAkkS
<b>Thallium (Tl)</b>	<b>&lt; 1 µg/l</b>	DIN EN ISO 11885:2009-09 - DAkkS
<b>Zink (Zn)</b>	<b>&lt; 5 µg/l</b>	DIN EN ISO 11885:2009-09 - DAkkS
<b>Natrium (Na)</b>	<b>7,0 mg/l</b>	DIN EN ISO 11885:2009-09 - DAkkS

Legende: \* - Kundendaten \*    \*- DAkkS\* - akkreditiertes Prüfverfahren  
 \*\* - FV\* - Fremdlabor    kursiv - Änderung im Prüfbericht    \*\* - ggf. Änderungsgrund

Tabelle 19:PAK- und TOC-Gehalte im Feststoff der Probe mit Modifizierung der Grundierung

Probennummer: **4222 / 01**  
 Probenbezeichnung: **Probe 22738**  
 Analytik PAK und TOC im Feststoff und Eluat nach LAGA

Parameter	Messwert	Prüfverfahren
<b>TOC</b>	<b>0,24 Masse-%</b>	DIN EN 13137:2001-12 - DAkkS
<b>PAK (16), Summe der nachweisbaren Verbindungen</b>	<b>&lt; 0,8 mg/kg TS</b>	DIN ISO 18287:2006-05 - DAkkS
Einzelsubstanzen:		
Naphthalin	< 0,05 mg/kg	
Acenaphthylen	< 0,05 mg/kg	
Acenaphthen	< 0,05 mg/kg	
Fluoren	< 0,05 mg/kg	
Phenanthren	< 0,05 mg/kg	
Anthracen	< 0,05 mg/kg	
Fluoranthren	< 0,05 mg/kg	
Pyren	< 0,05 mg/kg	
Benzo (a) anthracen	< 0,05 mg/kg	
Chrysen	< 0,05 mg/kg	
Benzo (b) fluoranthren	< 0,05 mg/kg	
Benzo (k) fluoranthren	< 0,05 mg/kg	
Benzo (a) pyren	< 0,05 mg/kg	
Indeno(1,2,3-cd) pyren	< 0,05 mg/kg	
Dibenzo(a,h)anthracen	< 0,05 mg/kg	
Benzo(ghi)perylen	< 0,05 mg/kg	

Tabelle 20:Gehalte im Eluat der Probe mit Modifizierung der Grundierung

Eluat: DIN EN 12457-4:2003-01 - DAkkS

Parameter	Messwert	Prüfverfahren
<b>pH-Wert</b>	<b>12,07</b>	DIN 38404-5:2009-07
<b>Elektrische Leitfähigkeit</b>	<b>4090 µS/cm</b>	DIN EN 27888:1993-11 - DAkkS
<b>Chlorid</b>	<b>&lt; 10 mg/l</b>	DIN EN ISO 10304-1:2009-07 - DAkkS
<b>Sulfat</b>	<b>1310 mg/l</b>	DIN EN ISO 10304-1:2009-07 - DAkkS
<b>Cyanid-gesamt</b>	<b>&lt; 5 µg/l</b>	DIN 38405-D13:2011-04 - DAkkS
<b>Phenolindex</b>	<b>50 µg/l</b>	DIN EN ISO 14402 (H37):1999-12 - DAkkS
<b>Arsen (As)</b>	<b>&lt; 1 µg/l</b>	DIN EN ISO 11885:2009-09 - DAkkS
<b>Blei (Pb)</b>	<b>&lt; 5 µg/l</b>	DIN EN ISO 11885:2009-09 - DAkkS
<b>Cadmium (Cd)</b>	<b>&lt; 0,5 µg/l</b>	DIN EN ISO 11885:2009-09 - DAkkS
<b>Chrom-gesamt (Cr)</b>	<b>24 µg/l</b>	DIN EN ISO 11885:2009-09 - DAkkS
<b>Kupfer (Cu)</b>	<b>6 µg/l</b>	DIN EN ISO 11885:2009-09 - DAkkS
<b>Nickel (Ni)</b>	<b>&lt; 5 µg/l</b>	DIN EN ISO 11885:2009-09 - DAkkS
<b>Quecksilber (Hg)</b>	<b>&lt; 0,2 µg/l</b>	DIN EN ISO 12846:2012-08 - DAkkS
<b>Thallium (Tl)</b>	<b>&lt; 1 µg/l</b>	DIN EN ISO 11885:2009-09 - DAkkS
<b>Zink (Zn)</b>	<b>&lt; 5 µg/l</b>	DIN EN ISO 11885:2009-09 - DAkkS
<b>Natrium (Na)</b>	<b>7,7 mg/l</b>	DIN EN ISO 11885:2009-09 - DAkkS

Legende: \* - Kundendaten \* \* - DAkkS\* - akkreditiertes Prüfverfahren  
 "- FV" - Fremdlabor *kursiv* - Änderung im Prüfbericht \*\* - ggf. Änderungsgrund

## 2 Teilvorhaben 2: Geräteentwicklung

### 2.1 Arbeitspaket 1: Anforderungen

#### 2.1.1 Methoden für den selektiven Rückbau von Fliesen

Unter selektivem Rückbau wird die schrittweise Demontage von Bauteilen oder das Abtragen von stoffschlüssig verbundenen Baustoffen verstanden. Beim Gebäudeabbruch sind die Ziele in der Regel: Die Ausschleusung von Schadstoffen bzw. die Gewinnung von Bauteilen oder sortenreinen Baustofffraktionen.

Dabei werden beispielsweise Abbruchfräsen - die auch ferngesteuert betrieben werden können - bis hin zu Abbruchrobotern verwendet. Bei Sanierungen müssen in vielen Fällen stoffschlüssig verbundene Bauteile oder Schichten selektiv zurückgebaut werden. Oft wird dabei mit händisch geführten Werkzeugen gearbeitet. Als Handwerkzeuge werden beispielsweise Vorschlagshämmer, Fäustel, Meißel, Keile oder Brechstangen eingesetzt. Beispiele für motorbetriebene Geräte sind Abbruchhämmer, Bohrhämmer sowie handgeführte Abbruchzangen. Letztere können auf ein Trägergerät montiert sein und ferngesteuert werden, was hauptsächlich beim selektiven Rückbau von kontaminierten Schichten oder Bauteilen zum Einsatz kommt.

Bei der Fliesenentfernung im Renovierungsfall dominieren der Einsatz von Hammer und Meißel oder von Stemmhämmern. Für die zerstörungsfreie Entfernung einzelner Fliesen wird kommerziell ein Gerät angeboten, das mit einem Heißluftgebläse arbeitet. Als Vorbereitung müssen die Fugenfüllung entfernt und danach die Fugen mit Wasser gefüllt werden, so dass sich das Verfahren nur für waagerechte Fliesenflächen eignet (Bild 47).



Bild 47: Fliesenabtrennung mittels Stemmhammer [2] bzw. thermischer Behandlung [3]

Die Fliesenabtrennung mittels Mikrowellenstrahlung wurde in dem BMBF-Verbundprojekt „Aufschluss von Verbundbaustoffen durch mikrowelleninduziertes Grenzflächenversagen“ [4] erstmals untersucht. Mit einer stationären Anlage konnten gute Trennergebnisse erzielt werden. Die ebenfalls erprobte mobile Version führte aber nur bei relativ kleinen Einwirkungsflächen zu den gewünschten Trenneffekten. Jedoch wären großflächige mobile und offene Mikrowellengeräte, die die erforderliche Feldstärke erzeugen können nicht mehr von Hand tragbar und auch die Stromversorgung von normalen Haushalten nicht ausreichend.

In neueren Untersuchungen wird die Eignung des Elektro-Impuls-Verfahrens, das für die Betonzerkleinerung im Labormaßstab mehrfach untersucht wurde [5], [6], als In-Situ-Verfahren für den selektiven Oberflächenabtrag von Beton- oder Ziegelwänden erprobt [7]. Hinsichtlich der Leistungsfähigkeit war dieses Verfahren den mechanischen Verfahren aber deutlich unterlegen. Die Fliesenabtrennung war dabei nicht Gegenstand der Untersuchungen.

### **2.1.2 Sicherheitshinweise vor und während des Betriebes einer Mikrowelle**

Ein entsprechendes Sicherheitskonzept muss für den Anwendungsfall verfasst, dem Anwender ausgehändigt und durch einführende Schulungen mitgeteilt werden.

Um den sicheren Umgang mit einer Mikrowelle zu gewährleisten, sind folgende Hinweise durchzulesen und während der Benutzung zu beachten:

- Beim Aufbau des Gerätes unbedingt auf offensichtliche Vor- oder Transportschäden prüfen!
- Sind auf den ersten Blick Schäden oder Fehler sichtbar, darf das Gerät auf keinen Fall angeschlossen und in Betrieb genommen werden.
- Die Mikrowelle darf nur zum Energieeintrag einer Wand-/ Boden- oder Deckenfläche verwendet werden.
- Während des Betriebes ist eine persönliche Beaufsichtigung dringend erforderlich. Kinder sollten immer vom Gerät und auch deren Anschlussleitungen ferngehalten werden.

### **2.1.3 Schwere Gefahr für die Gesundheit**

Das Gerät darf niemals ohne eine Ausrichtung auf die zu behandelnde Fläche/Material angeschaltet werden. Die Energieeintragsfläche muss immer komplett von der Öffnung der Mikrowelle abgedeckt werden. Bei Nichtbeachtung besteht die Gefahr nicht vorhersehbarer Mikrowellenpotenziale, welche sich in einem unzulässig hohen Bereich und an nicht definierbaren Positionen im Raum bilden können.

Diese zu hohen Energieansammlungen können zu schweren gesundheitlichen Einschränkungen des Nutzers oder Dritten führen.

### **2.1.4 Brand-/Verbrennungs-/Verbrühungsgefahr**

Bei der Benutzung der Mikrowelle kommt es zu einer sehr stark erhöhten Wärmeentwicklung. Diese Wärmeenergie entsteht nicht nur im Gerät selbst, sondern vor allem auch auf den behandelten Oberflächen der Materialien und den Materialien selber.

Je nach Dauer der Behandlung übersteigen die Temperaturen der durch die Mikrowellenstrahlung behandelten Bauteile die 100 °C deutlich.

Somit ist nach dem Betrieb der Mikrowelle besondere Vorsicht mit dem Handling des Gerätes selber, als auch mit den behandelten Bauteilen geboten. Bei unsachgemäßer oder sorglosem Umgang mit den Bauteilen oder der Mikrowelle nach dem Betrieb kann es daher zu starken Verbrennungen oder Verbrühungen kommen.

Befindet sich die Mikrowelle nicht in einem Einwandfreien Zustand (Sauberkeit oder Rückstände), gerade auf der Auslassseite der Mikrowelle, kann es durch die Wärmeentwicklung auch zu einer Entzündung verschiedener Materialien kommen. Somit dürfen zur Reinigung des Gerätes auch keine Lösemittel oder lösemittelhaltige Produkte verwendet werden.

Das Gerät sollte daher bei Betrieb immer auf einem festen Untergrund oder einer stabilen Halterung montiert werden. Der Betriebszustand und auch der Einsatzort sind immer zu kennzeichnen und vor unbefugtem Zutritt zu sichern.

### **2.1.5 Gefahr durch Stromschläge**

Es darf keine eigenständige und unsachgemäße Reparatur am Gerät durchgeführt werden. Nur ein extra geschulter Techniker oder Kundendienst ist berechtigt, Reparaturen am Gerät selbst oder deren Anschlussleitungen durch zu führen und oder Komponenten zu ersetzen.

Wird ein Defekt am Gerät festgestellt, ist sofort der Netzstecker zu ziehen und beim Kundendienst oder verantwortlichem technischen Personal der Ausfall/Defekt des Gerätes zu melden.

## 2.2 Arbeitspaket 2: Entwurf der Anlage

Ziel der Anlage ist das Abtrennen von Fliesen, die sich auf zuvor modifizierten horizontalen und vertikalen Oberflächenstrukturen befinden. Dabei soll ein Mikrowellengerät eingesetzt werden, welches ein selektives Grenzflächenversagen im Schichtenaufbau initiiert.

Die bisherigen Untersuchungen haben gezeigt, dass der Strahler des Mikrowellengerätes möglichst dicht an den abzutrennenden Fliesen positioniert werden muss, um einen möglichst schnellen Trennerfolg zu erzielen. Der Strahler darf aber nicht direkt Kontakt zur Oberfläche haben, da dieser das Abfallen bzw. Abheben der Fliese blockiert.

Eine wichtige Anforderung an die Anlage ist ein möglichst hoher Grad an Automation und Autonomie. Die eingesetzten Mikrowellengeräte haben ein hohes Eigengewicht und können deshalb nicht von einer Person ohne eine entsprechende Vorrichtung getragen werden. Zudem geht eine direkte gesundheitliche Gefahr für den Anwender von fehlgeleiteten elektromagnetischen Wellen aus.

Eine Anlage muss daher die nachfolgend beschriebenen Leistungsmerkmale besitzen, um möglichst eigenständig arbeiten zu können.

### 2.2.1 Positionierung

Die Anlage muss in der Lage sein, den Mikrowellenstrahler gezielt positionieren zu können.

Eine universell einsetzbare Anlage für das Abtrennen von Fliesen von Wänden und Fußböden stellt ein transportabler Roboterarm dar, welcher die Last des Mikrowellengeräts tragen kann.



Bild 48: Moibler Roboterarm<sup>1</sup> (1)



Bild 49: Mobiler Roboterarm<sup>2</sup> (2)

### 2.2.2 Sensorik

Eine automatisierte Steuerung benötigt eine Reihe von Sensoren, die die wichtigsten Prozesse online überwachen und auf deren Grundlage ein autonomes Agieren möglich wird. Bei dem Einsatz von Sensoren bzw. Messtechnik, die an der Anlage angebracht sind, gibt es ein grundlegendes Problem: Die Sensorik besteht in der Regel aus elektronischen Bauteilen, die in das elektromagnetische Feld des Mikrowellengeräts einkoppeln und damit die Sensorik stören oder gar zerstören. Deshalb muss prinzipiell ein Abstand zum Strahler berücksichtigt werden und eine spezielle Einhausung/Abschirmung der elektronischen Bauteile in Betracht gezogen werden. Diese Umstände führen dazu, dass die Integration der Sensorik äußerst aufwändig ist. Zudem vergrößern Mindestabstände zum Strahler die Größe der Anlage und schränken deren Bewegungsfreiheit damit ein.

---

<sup>1</sup> <https://www.directindustry.de/prod/easyrobotics/product-235036-2362652.html>, abgerufen am 20.01.2023

<sup>2</sup> <https://robotnik.eu/how-to-choose-a-mobile-manipulator-key-factors/>, abgerufen am 20.01.2023

Grundsätzlich werden folgende Sensoren empfohlen, um ein hohes Maß an Automation zu erreichen:

Die Erfassung der **Temperatur** auf der Oberfläche der Fliesen ist ein wesentlicher Parameter, der erfasst werden muss. Er ist ein wichtiges Indikativ für den Trennerfolg, die Funktionsüberprüfung der Anlage und der Arbeitssicherheit.

**Optische Sensoren**, wie eine Kamera, können den Prozess des Trennens ebenso verfolgen (Trennerfolg ja/nein) und dokumentieren. Die so gesammelten Daten können aber auch genutzt werden, um sich im Raum zu orientieren.

Um den nötigen Abstand zum Zielobjekt oder zu umliegenden Objekten sicherzustellen, können **akustische Sensoren** (Ultraschall) eingesetzt werden.

Die Integration von **Rauchmeldern** kann die Einschätzung von gefährlichen Situationen ermöglichen.

### **2.2.3 Steuerung**

In einer zentralen Steuerungseinheit laufen sämtliche Messwerte der Sensorik zusammen. Auf der Grundlage dieser Daten und der durch den Anwender vorgegebenen Zielstellung kann die Anlage autonom im Raum arbeiten.

Die Steuerung muss in der Lage sein, dem Anwender Informationen über den aktuellen Fortschritt zugeben. Zudem muss sie ihm Fehler und Gefahren melden können.

### **2.2.4 Fazit**

Die beim Entwurf der Anlage aufgetretenen Anforderungen und Fragestellungen – gerade im Hinblick auf das Gefährdungspotential, die vom Mikrowellengerät auf Mensch und Material ausgehen – sind sehr anspruchsvoll und komplex. Eine technische Lösung ist daher sehr aufwändig. Während die Programmierung und automatische Positionierung einer solchen Anlage im Bereich des Denkbaren sind, besteht nach Auffassung der Autoren die größte Herausforderung im Bereich adäquater Sensorik und deren Implementierung. Die Kosten einer solchen Anlage scheinen nach gegenwärtigen Abschätzungen sehr hoch und stehen wahrscheinlich in keinem Verhältnis zu deren Nutzen.

## 2.3 Arbeitspaket 3 und Arbeitspaket 4: Einsatz Geräte-Demonstrator an Musterflächen

Auf den Bau einer horizontalen Musterfläche wurde verzichtet, da dieser verhältnismäßig hohe Aufwand keine wesentlichen zusätzlichen Erkenntnisse bringt. Stattdessen wurden die Untersuchungen auf eine vertikale Fläche (Wand-Demonstrator) beschränkt.

Auf dem Wand-Demonstrator (Kapitel 1.1, Bild 14) wurden Musterflächen angelegt, die sich im Schichtenaufbau und Untergrund unterschieden.

Schichtenaufbauten Typ:

1. Probekörper 1 (PK1) Modifizierte Grundierung zwischen Untergrund und Fliesenkleber
2. Probekörper 2 (PK2) Modifizierte Grundierung zwischen Fliese und Fliesenkleber
3. Probekörper 3 (PK3) ohne Modifizierung, Nullprobe

Untergründe:

1. Zementputz
2. Ziegel
3. Gipskarton – eine Probe mit Schichtenaufbau wurde auf den Zementputz geklebt.

Das Mikrowellengerät mit rechteckigem Strahler wurde vor der Durchführung der Versuche auf Zinken eines Gabelstaplers montiert. Dadurch wurde eine freie Positionierung des Mikrowellengeräts ermöglicht, ohne dass der Anwender gefährdet wird. Der Strahler wurde ca. 2 cm über Fliesen positioniert. Das Verschieben des aktiven Strahlers erfolgte direkt nach dem Trennerfolg oder nach spätestens vier Minuten. Die Erfassung der maximalen Temperaturen an der Oberfläche erfolgte mittels einer Wärmebildkamera.

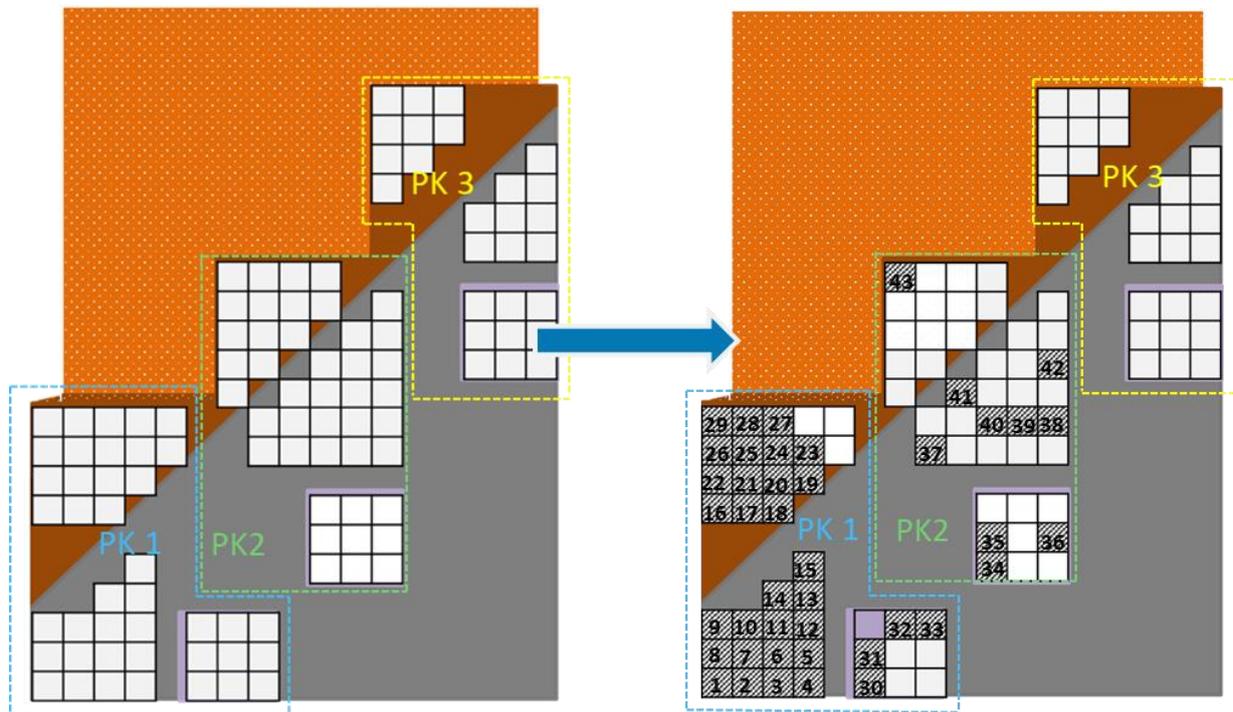


Bild 50: Übersicht Wand-Demonstratoren mit Probekörpern (links), Trennerfolge grau schraffiert (rechts)

Es wurde außerdem überprüft, in wie weit hinter dem Wand-Demonstrator Mikrowellen messbar sind, von denen eine Gefährdung für Personen ausgehen könnte. Mittels eines tragbaren Mikrowellen-Messgerätes konnte ermittelt werden, dass ca. 30 cm hinter der Wand keine Gefährdung für Menschen besteht.



Bild 51: Versuchsaufbau Wand-Demonstrator mit Mikrowellengerät



Bild 52: Trennerfolge nach Mikrowellenbehandlung am Wand-Demonstrator

Folgende Beobachtungen wurden während der Versuchsdurchführung gemacht:

- Es wurden keine Effekte durch Mikrowellen bei den unmodifizierten Schichtenaufbauten (PK3) festgestellt.
- Zuverlässigste Trennerfolge konnten festgestellt werden, wenn sich eine modifizierte Grundierung zwischen Fliesenkleber und Untergrund befindet (PK1).
- Kurzzeitige Funken- evtl. Plasmabildung konnte auf den Grenzflächen/Grundierung bei aktiviertem Mikrowellengerät beobachtet werden.
- Der Schichtenaufbau bei PK2 wies tendenziell die wenigsten Trennerfolge auf.
- Der verwendete Zementputz wies eine geringe Festigkeit auf, der vom expandierenden Blähgraphit zerstört wird. Der Verbund löst sich daraufhin im Zementputz bzw. das Versagen findet zwischen Grundierung und Putz statt. Es fällt Zementputz beim Abschluss ab.

Die Auswertung über den Trennerfolg und den damit verbundenen Parametern kann der Tabelle 21 entnommen werden.

Tabelle 21: Ergebnisse zu Trennerfolgen am Wand-Demonstrator

	Trennerfolg		Ø Zeit [s]		Aufschluss-Geschwindigkeit [m <sup>2</sup> /h]		Max. Temperatur [°C]	
	PK1	PK2	PK1	PK2	PK1	PK2	PK1	PK2
Zementputz	100%	30%	47	107	0,19	0,08	125	206
Ziegel	82%	7%	47	120	0,19	0,08	198	146
Gipskarton	44%	33%	124	35	0,07	0,26	275	243

Die am Wand-Demonstrator erzielten Ergebnisse bzgl. des Untergrunds Gipskartons weichen damit teils erheblich von den Ergebnissen ab, die an einzelnen Probekörpern erzielt wurden, obwohl das gleiche Mikrowellengerät eingesetzt wurde. Die Ursache hierfür ist nach derzeitigem Stand unklar. Aus den Versuchen am Wand-Demonstrator lassen folgende Empfehlungen ableiten:

Die modifizierte Grundierung sollte zwischen **Untergrund und Fliesenkleber** appliziert werden. Des Weiteren sollte sie auf möglichst „weiche“ Untergründe (Putz) aufgebracht werden, da dieses bei der Expansion des Blähgraphits am zuverlässigsten und schnellsten wirkt. Der Untergrund stellt somit einen maßgeblichen Einfluss auf den Trennerfolg dar. Bei diesem Punkt sollten insbesondere die Ergebnisse der Haftzugprüfung berücksichtigt werden (Kapitel 1.3)



Bild 53: PK1, Rückseite Fliesen



Bild 54: PK2, expandiertes Blähgraphit

## 2.4 Arbeitspaket 5: Re-Design Geräte-Demonstrator

Als grundlegendes Problem des eingesetzten Mikrowellengerätes wird die geringe Leistung angesehen. Diese wiederum kann nur gesteigert werden, in dem ein Up-Scaling vorgenommen wird. Die Folge daraus ist ein erhöhter Platzbedarf, der sich maßgeblich aus der Auslegung der Kühlung ergibt. Mit einem Up-Scaling geht außerdem auch die Erweiterung der Sicherheitsvorkehrungen im Umfeld des Gerätes einher. Unter Einbezug der Möglichkeiten bei einer späteren praktischen Anwendung und nach nach derzeitigem Wissensstand scheint eine Leistungssteigerung und die damit verbundene schnellere Aufschluss-Geschwindigkeit sehr kostenintensiv und unrealistisch.

## 2.5 Arbeitspaket 6: Dokumentation

Die technische Dokumentation erfolgte durch die Protokollierung der einzelnen Versuche und der Auswertung in Form dieses Berichtes. Die jeweils erreichten Kennwerte können aus den darin aufgeführten Arbeitspaketen entnommen werden.

Es wurden keine technischen Unterlagen dem VDE zur Verfügung gestellt, da auf Grund des derzeitigen Entwicklungsstandes der getätigten Entwicklung nur geringe Erfolgsaussichten für eine schnelle technische Umsetzung bestehen. Die Ursachen hierfür liegen in den unbefriedigenden Ergebnissen. Der Sicherheitsaufwand, die erzielten Durchsatzleistungen an der Musterfläche sowie die nicht saubere Trennbarkeit der modifizierten Schichtenaufbauten sind ein zu großes wirtschaftliches Risiko.

# Fazit

## **Stoffliche Entwicklung**

Die stoffliche Entwicklung konzentrierte sich auf die Zusammensetzung der Schaltschicht und die Erprobung deren Funktionalität.

Hierbei konnten die in der Schaltschicht eingesetzten Additive in ihrer Dosierung soweit angepasst werden, dass mikrowelleninduzierte Trennerfolge erzielt werden konnten. Die maximale Dosierung wird jedoch limitiert durch die Verarbeitbarkeit der eingesetzten Grundierung. Praktikable Alternativen zu den eingesetzten Graphiten konnten nicht ermittelt werden. Der Einfluss der verwendeten Additive wirkt sich auf Grund ihres geringen Anteils im Wandaufbau nicht wesentlich auf die wasserwirtschaftlichen Zuordnungswerte aus.

Des Weiteren wurde festgestellt, dass der Trennerfolg neben der Auswahl und Dosierung der Additive von der Lage der Schaltschicht im Schichtenaufbau und der Beschaffenheit des Untergrundes abhängig ist. Während sich bei ersteren eine klare Vorzugsvariante ergeben hat (modifizierte Grundierung zwischen Untergrund und Fliesenkleber), ist es für zweiteres schwierig abzusehen, welche Untergründe in der Praxis tatsächlich geeignet sind. Die Untersuchungen wiesen in Richtung von Materialien mit geringerer Festigkeit.

## **Verfahrenstechnische Entwicklung**

Die verfahrenstechnische Entwicklung konzentrierte sich auf die offenen Mikrowellensysteme und die Erprobung ihrer Eignung zur Abtrennung von Fliesen auf vorher präparierten Untergründen.

Die Untersuchungen dieses Forschungsvorhabens zeigen, dass die Übertragung der bereits am IAB bekannten Erkenntnisse zum Grenzflächenversagen in geschlossenen Mikrowellengeräten nicht ohne weiteres auf offene Mikrowellengeräte möglich ist. Als Ursachen hierfür werden zwei wesentliche Punkte gesehen:

1. Die geringere Leistung der getesteten offenen Mikrowellensysteme
2. Die Inhomogenität und zu geringe Größe des elektromagnetischen Feldes, welches von den getesteten Mikrowellensystemen ausgeht.

Folglich konnten nach Auffassung der Autoren nur sehr geringe Aufschlussgeschwindigkeiten zwischen 0,2 bis 1,0 m<sup>2</sup>/h erzielt werden, was aus jetziger Sicht nicht praktikabel erscheint.

Hinsichtlich der Automation des Aufschlussverfahrens mittels eines offenen Mikrowellengeräts wurden die technischen Risiken ermittelt. Hierbei stellt die Entwicklung und Implementierung der Sensorik die größte Herausforderung dar, da vom ausgehenden elektromagnetischen Feld besondere Gefahren und Einflüsse auf handelsübliche Messtechnik ausgehen.

## Literaturverzeichnis

[1] Müller, A.: Baustoffrecycling; Entstehung - Aufbereitung – Verwertung. Springer Vieweg 2018.

[2] <https://www.obi.de/magazin/bad/alte-fliesen-entfernen>

[3] <https://www.karldahm.com/Fliesenentferner+ProFix+ohne+Heissluftgeblaese+Art+40982.htm>

[4] Aufschluss von Verbundbaustoffen durch mikrowelleninduziertes Grenzflächenversagen BMBF-Verbundvorhaben Förderkennzeichen: 033R098: Abschlussbericht 2016

[5] Linß, E.; Müller, A.: HIGH PERFORMANCE SONIC IMPULSES – AN ALTERNATIVE METHOD FOR PROCESSING OF CONCRETE. Int. J. Miner.Processing 74 S (2004), pp 199-208

[6] Seifert, S.; Thome, V.; Christof Karlstetter, C.: Elektrodynamische Fragmentierung – Eine Technologie zur effektiven Aufbereitung von Abfallströmen – Fraunhofer 341-348. Recycling und Rohstoffe – Band 7 Karl J. Thomé-Kozmiensky, Daniel Goldmann. – Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2014. ISBN 978-3-944310-09-1.

[7] Otto, J. et al.: Selektiver Rückbau mittels Elektro-Impuls-Verfahren. Grundlagenermittlung zur Adaption eines innovativen Abbruchverfahrens aus dem Bergbau (EIV – Elektro-Impuls-Verfahren) als neue Bautechnologie für selektiven Rückbau in sensiblen Bereichen. Gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Auftrag des Bundesministeriums des Innern, für Bau und Heimat aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau. Projektlaufzeit: 03.2019–03.2021