



# Ein BMBF-Projekt innerhalb von HighTechMatBau



## Inhalt

1. Photokatalyse – die Chance für urbane Zonen .....	5
2. Die Struktur des Konsortiums.....	8
3. Ergebnisse der Projektarbeit .....	10
3.1 Ergebnisse der Gruppe Werkstoffe .....	11
3.1.1 KRONOS .....	11
3.1.2 F. C. Nüdling Betonelemente GmbH + Co. KG (FCN) .....	11
3.1.3 Dyckerhoff GmbH .....	13
3.1.4 KEIMFARBEN GmbH .....	15
3.1.5 ERLUS AG .....	16
3.2 Ergebnisse der Projektarbeit Analytik .....	17
3.2.1. TCI - Einfluss unterschiedlicher Zusätze auf die photokatalytische Aktivität von TiO <sub>2</sub> .....	17
3.2.2. TCI - Einfluss des pH-Werts auf die Emission des Farbstoffs.....	18
3.2.3 TCI - Korrelation von Ladungsträgerlebensdauer und photokatalytischer Effizienz von TiO <sub>2</sub> .....	19
3.2.4 BAU - Photokatalysatorverteilung und Testsysteme.....	20
3.2.5 KIWA GmbH - Applikationsprüfung .....	22
3.2.6 Fraunhofer IST – Messtechnik für die Probenanalyse.....	23
3.3 Ergebnisse der Arbeitsgruppe Messsystem .....	24
4. Projektpartner .....	27
4.1. KRONOS – Your Choice for a Brighter Life.....	27
4.2. F. C. Nüdling Betonelemente GmbH & Co. KG .....	29
4.3. KEIMFARBEN GmbH .....	31
4.4. Dyckerhoff GmbH .....	33
4.5. ERLUS AG .....	35
4.6. KIWA GmbH.....	37
4.7. Omicron-Laserage Laserprodukte GmbH.....	38
4.8. TCI - Leibnitz Universität Hannover.....	39
4.9. Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik IST .....	41
4.10. BAU – Technische Universität Berlin .....	43
4.11. IHF – Technische Universität Braunschweig.....	44



# 1. Photokatalyse – die Chance für urbane Zonen

Eines der zentralen urbanen Probleme weltweit ist die Luftverschmutzung in den Ballungsräumen. In den letzten 50 Jahren wurde mit der Festlegung von Emissionsgrenzen und der Nutzung von Filteranlagen diesbezüglich schon viel erreicht. Leider wurde dadurch die Umweltbelastung nur begrenzt nicht vermieden. An vielen Stellen ist man mit solchen Maßnahmen schon am wirtschaftlich oder technisch machbaren Limit angekommen. Aktuell setzt sich zum Beispiel in Mitteleuropa die Luftverunreinigung in den Städten wie folgt zusammen: 30% Fahrzeugverkehr, 30% Haushalte und 40% Industrie und Energiegewinnung. Dabei werden heute für alle drei Bereiche zu einem sehr großen Teil fossile Energieträger als Energiequelle eingesetzt. Wenn man die Luftverschmutzung verringern möchte, muss man aktuell zu Fahrverboten oder Fertigungsverbieten greifen, da man beispielsweise im Winter niemandem einfach die Heizung abdrehen kann. Langfristig kann diese Problematik nur durch einen Wechsel von fossilen Energieträgern auf andere Energieträger wie Wasserstoff, Solarenergie und Windkraft oder andere Alternativen gelöst werden. Bis solche Ansätze, wie zum Beispiel eine verstärkte Elektromobilität, voll greifen, können aber gut und gerne noch 20 bis 30 Jahre ins Land gehen.

Für diese Zeit gibt es außer den Verboten mit all ihren wirtschaftlichen Nachteilen weder Lösungen noch Lösungsansätze, die den Kommunen helfen. Städtische Räume besitzen durch die Bebauung eine sehr große Oberfläche, die hauptsächlich durch Baustoffe (Beton, Fassadenfarbe, Dachziegel, Glas usw.) gebildet wird. Fast alle Baustoffe können potenziell durch die Ausrüstung mit Titandioxid ( $\text{TiO}_2$ ) mit einer photokatalytischen Aktivität versehen werden. Diese verspricht enorme Vorteile:

- Abbau von Luftschadstoffen zur Verbesserung des städtischen Klimas
- Abbau von Anhaftungen und dadurch Verringerung der Oberflächenverschmutzung (weniger Wartungsaufwand, längere Lebensdauer)

Wie sich der Einsatz photokatalytischer Materialien auswirkt, kann anhand einer Simulation für eine typische Innenstadtstraße veranschaulicht werden.

In Abb. 1 sieht man das Photo einer Straße in einer Großstadt (Nürnberg). Würde man nun diese Straße flächig mit photokatalytischen Materialien ausstatten, d.h. bei Erneuerungsarbeiten photokatalytisch aktivierte Betonpflastersteine, Fassadenfarben, Dachziegel und photokatalytisch aktivierten Asphalt verwenden, so könnte man bei einer Depositionsrate der Materialien für Stickoxide ( $\text{NO}_x$ ) von 0,4 cm/s im Jahresmittel in etwa 30% der  $\text{NO}_x$ -Moleküle in der Luft in der Straße abbauen.

In Bezug auf den  $\text{NO}_x$ -Abbau käme dies im Mittel einer kompletten Einstellung des Straßenverkehrs oder einer Abschaltung der Heizungen (inklusive der Warmwasserversorgung) in den Gebäuden gleich - oder als hätte man 110 Tage im Jahr sowohl den Straßenverkehr eingestellt, als auch die Heizungen ausgeschaltet.



*Abbildung 1: Beispielstraße für urbane Straßen - ein Blick über die Altstadt von Nürnberg vom Spittlertorturm (Copyright: Manfred Braun, Nürnberg) aus: Fassaden, Dächer, Straße, Fußweg: Abbau von NO, NO<sub>2</sub> O<sub>3</sub> mit einer Depositionsrate 0,4 cm/s => ca. 30% Schadgase pro Jahr weniger <=> 110 Tage absolutes Heiz- und Fahrverbot (fossile Brennstoffe);*

Die Selbstreinigung der Oberflächen und die photokatalytische Reinigung der Luft werden heute im Labor mit hoher Effizienz erzielt. Im Einsatz am Freilandobjekt jedoch können diese Laborergebnisse aktuell nicht erreicht werden. Das Verständnis für die Langzeitwirkung und die Wechselwirkungen der unterschiedlichsten Umwelteinflüsse auf die photokatalytische Oberfläche ist aktuell nicht ausreichend, um die gemessenen Unterschiede zu erklären und die Schaffung neuer Materialien gezielt voranzutreiben. Diese Problematik wollte das Verbundprojekt „PureBau®“ nachhaltig lösen. Drei wesentliche Forschungsschritte waren hierzu erforderlich:

- Erforschung der Wechselwirkungen zwischen dem Photokatalysator und seiner Umgebung (Umwelteinflüsse und Einbettungssysteme)
- Evaluierung der Forschungsergebnisse durch mehrere innovative Werkstoffdemonstratoren
- Schaffung der Grundlagen für robuste, als Standard geeignete Messsysteme für die photokatalytische Aktivität einer Werkstoffoberfläche, um Messungen im Labor und an Objekten im Freiland eindeutig und vergleichbar zu machen

Das Projektconsortium hat diese Schritte im Rahmen des dreijährigen Projekts anhand mehrerer Materialien und Baustoffe durchgeführt. Im Einzelnen sind dies: Spezialzement, Betonwaren (Pflastersteine), Fassadenfarben, Dachziegel und verschiedene TiO<sub>2</sub>-Granulate/Slurries/Pulver/Premixe. Dabei wurde die gesamte Wertschöpfungskette der Werkstoffproduktion einbezogen, von den wissenschaftlichen Grundlagen über Rohstoffe bis hin zur Herstellung von Werkstoffen und industrierelevanten Materialien.

Aus diesem Ansatz sind nun mehrere Demonstratoren hocheffektiver Photokatalysatorwerkstoffe mit Depositionsraten von 1cm/s und darüber hinaus entstanden, die eingesetzt zum Teil mehr als das Dreifache der im Beispiel in Abb. 1 beschriebenen Wirkung haben. Damit sind jetzt hocheffiziente Baustoffe möglich und die Photokatalyse könnte bei flächigem Einsatz das Leben der Menschen in urbanen Räumen erheblich verbessern, ohne sie einschränken zu müssen. Das Projekt hat somit eine herausragende Bedeutung für die städtischen Lebensräume weltweit und für die deutsche Wirtschaft gewonnen und kann bei einem flächigen Einsatz der entwickelten Materialien einen entscheidenden Beitrag zur Verbesserung der Lebensbedingungen für Menschen in Ballungsräumen leisten.

## 2. Die Struktur des Konsortiums

Das Konsortium besteht aus 11 Partnern (siehe Tabelle 1), die in drei miteinander vernetzten Arbeitsgruppen für Analytik (An), Werkstoffe (We) und Messsystem (Me) organisiert sind.

**Tab.1:** Projektpartner und Gruppenzuordnung Analytik (An), Werkstoffe (We), Messsystem (Me)

Logo	Partner	Arbeitsgruppe
	<b>KRONOS INTERNATIONAL, Inc.</b> (KRONOS), <i>Dr. Thomas Koch</i>	An, We
	<b>F.C. Nüdling Betonelemente GmbH &amp; Co. KG</b> (FCN), <i>Andreas Günther-Plönes</i>	We
	<b>Dyckerhoff GmbH</b> (Dyckerhoff), <i>Andrea Kreuzburg</i>	We
	<b>ERLUS AG</b> (ERLUS), <i>Dr. Carsten Ackerhans</i>	We
	<b>Keimfarben GmbH</b> (Keimfarben), <i>Bettina Heyne</i>	We
	<b>Kiwa GmbH</b> (Kiwa), <i>Dr. Ralf Röben</i>	An, We
	<b>Omicron-Laserage Laserprodukte GmbH</b> (Omicron), <i>Sönke-Nils Baumann</i>	Me
	<b>Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik</b> (IST), <i>Frank Neumann</i>	An, Me
	<b>Leibniz Universität Hannover, Institut für Technische Chemie</b> (TCI), <i>Prof. Dr. Detlef Bahnemann</i>	An, We
	<b>Technische Universität Berlin, Institut für Bauingenieurwesen</b> (BAU), <i>Prof. Dr. Dietmar Stephan</i>	An, We
	<b>Technische Universität Braunschweig, Institut für Hochfrequenztechnik</b> (IHF), <i>Dr. Hans-Hermann Johannes</i>	An, Me



Zwischen den Arbeitsgruppen herrscht ein reger Austausch der Arbeitsergebnisse, um den Einbau der Photokatalysatoren in die Baustoffmatrix und die Optimierung des Messverfahrens in Abhängigkeit des sich entwickelnden Grundlagenwissens und der steigenden Erfahrung in der Applikationsentwicklung iterativ weiter voranzutreiben.

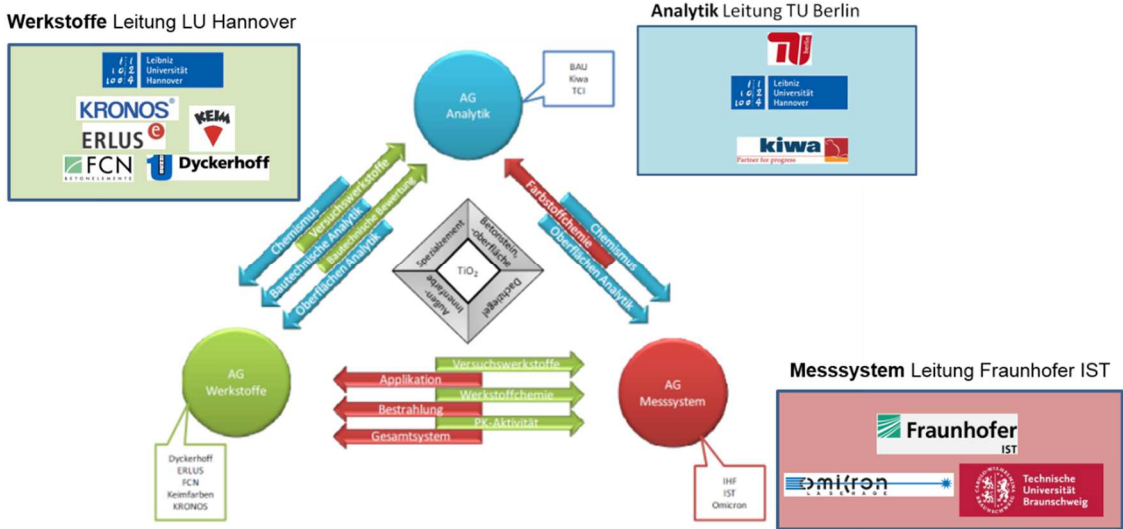


Abbildung 2: Skizze der Arbeitsweise im Projekt

### 3. Ergebnisse der Projektarbeit

Zusammenfassend wurden im Projekt photokatalytisch höchst effektive, langlebige Demonstratoren aller im Projekt vertretenen Baumaterialtypen hergestellt und neben vielen Verfahren zur Charakterisierung der Einsatzmaterialien ein Demonstrator für ein Messgerät entwickelt, das die einfache Messung der Aktivität von Baustoffoberflächen in der Applikation möglich macht.



*Abbildung 3: Überblick über die Ergebnisse von PureBau® - Es wurden Baumaterialien mit Depositionsraten für NO von 1 cm/s und mehr erreicht.*

## 3.1 Ergebnisse der Gruppe Werkstoffe

### 3.1.1 KRONOS

KRONOS hat im Laufe des Projektes bei den iterativen Materialoptimierungen beraten und zusammen mit den Partnern Strategien zur Einbringung des Photokatalysators in die Matrix entwickelt. Zu den bei Projektbeginn bestehenden 3 Produkten wurden 4 neue Photokatalysatoren und 8 weitere Darreichungsformen sowie Mischprodukte der Photokatalysatoren für die verschiedensten Einsatzzwecke entwickelt und untersucht. Weiterhin wurde an der Webseite und an der Außendarstellung des Projektes, sowie an der Konstruktion und Vernetzung der drei Arbeitsplattformen gearbeitet. KRONOS hat die Partner aus allen drei Gruppen bei der Untersuchung der Funktionsmodelle und Precursoren mit Kapazitäten der KRONOS eigenen Labore unterstützt. Alle erfolgreich eingesetzten Photokatalysatoren, die für das Projekt entwickelt wurden, sind zukünftig auch als käuflich erwerbbar bei KRONOS erhältlich.

Photokat	Typ	Beschreibung	BET m <sup>2</sup> /g
K7050	uv	Feinteiliger Anatas sprühgetrocknet, getempert	250
K7453	uv/vis	Opake K7050-Slurry, Verarbeitbarkeit ein Jahr	200
K7454	uv/vis	Transparente K7050-Slurry, Verarbeitbarkeit ein Jahr	300
K1001/2	uv/vis	Anataspigment mit oder ohne Organik	12
K7000	vis	C-dotiertes K7050	250
K7403	vis	Opake Slurry mit K7000, Beständigkeit ein Jahr	200
K7404	vis	Transparente K7000-Slurry, Beständigkeit ein Jahr	300
K7060	uv/vis/proc	K7050 + CaSO <sub>4</sub>	80
K7061	uv/vis/proc	K7060 granuliert	
K7463	uv/vis/proc	K7060-Slurry	
K7020	vis	Fe-dotierter, feinteiliger Anatas	200
Ti-Oxidhydrat	uv	Vorprodukt von K7050	350
Photoment	vis	K7000 + Flugasche + x	70
K7055	uv/vis	K7050+ K1002	80
K7005	uv/vis	K7000 + K1002	80

**Abbildung 4:** Übersicht der Entwicklungsprodukte von KRONOS für PureBau®: rot - Neuentwicklungen während der Projektlaufzeit; grün - neue Darreichungsform während der Projektlaufzeit; blau - vor Projektbeginn bestehende Photokatalysatoren.

### 3.1.2 F. C. Nüdling Betonelemente GmbH + Co. KG (FCN)

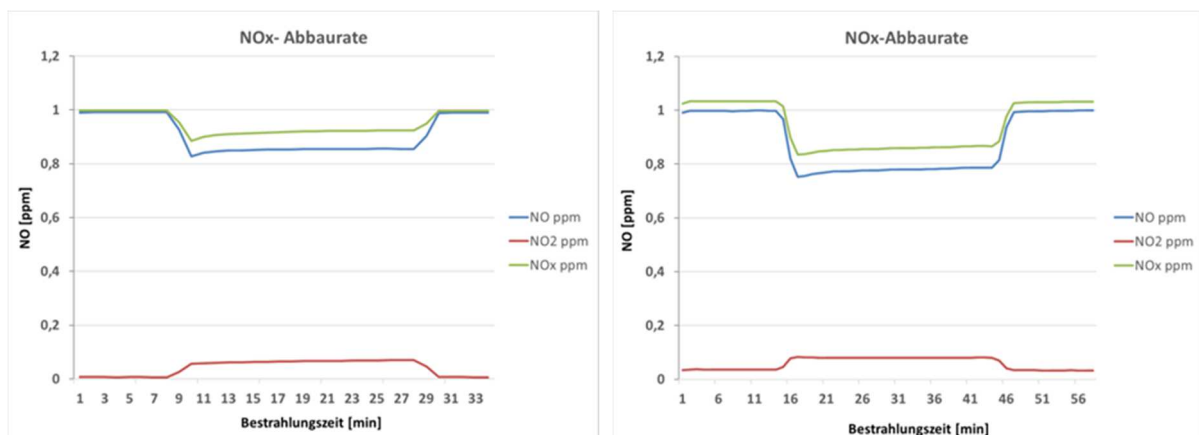
FCN hat bereits vor 10 Jahren das Potenzial photokatalytischer Betonprodukte erkannt und stets deren Weiterentwicklung mit eigenen Forschungsprojekten unterstützt. FCN hat damit

entscheidend zur Verbreitung und stetigen Verbesserung dieser Baustoffe beigetragen (Referenzsystem AirClean®).

Ziel des BMBF-Forschungsprojekts PureBau® war es, das Verständnis für das Verhalten des Baustoffsystems „Betonpflasterstein“ über das bekannte Maß hinaus zu erweitern und hinsichtlich der photokatalytischen Aktivität zu optimieren. Es sollte somit ein Funktionsmuster, das eine deutlich höherer Aktivität als die bisherigen FCN-Produkte aufweist, erzeugt werden. Das Hauptaugenmerk lag auf dem Abbau von gesundheitsschädlichen Stickoxiden.

Es wurde beispielsweise der Einfluss von unterschiedlichen Photokatalysatoren und deren Darreichungsformen, von Betonbinde- und Betonzusatzmitteln sowie der Verfahrenstechnik zur Herstellung von Pflastersteinen und deren Effekt auf die photokatalytische Aktivität untersucht. Die Betonrezepte wurden den wechselnden Anforderungen entsprechend im Vergleich zur Benchmark „AirClean®“ immer wieder angepasst und verbessert.

Zur besseren Vergleichbarkeit wurde dabei auf Labormessungen nach ISO 22197 zurückgegriffen. Zusätzlich wurden bei FCN lichtmikroskopische und beim Partner KRONOS rasterelektronenmikroskopische Analysen durchgeführt. Diese Untersuchungen lieferten neue Erkenntnisse über den entscheidenden Einfluss von Karbonatisierungen.



**Abbildung 5:** Einfluss unterschiedlicher Betonrezepturen mit  $\text{TiO}_2$  auf die  $\text{NO}_x$ -Abbaurates: (links): Referenzsystem AirClean® mit Photokatalysator Evonik P25; (rechts): Projektergebnis PureBau®, Photokatalysator KRONOS 7060;

Die Laboruntersuchungen im Rahmen von PureBau® haben gezeigt, dass mit der Optimierung der Betonrezeptur und einer gezielten Auswahl des Photokatalysators eine deutlich höhere Reduzierung von  $\text{NO}_x$  erzielt werden kann (siehe Abb. 5).

Der Einsatz der photokatalytisch wirkenden Pflastersteine beschränkt sich nicht auf einzelne Pflasterausführungen, sondern kann auf alle FCN-Produkte angewandt werden, die einen mehrschichtigen Pflasteraufbau haben, d.h. eine Vorsatzschicht besitzen. Dadurch entsteht eine

vielfältige Auswahl an Modellen, Farben und Abmessungen. Somit sind Anwendungen sowohl im öffentlichen, als auch im privaten Bereich denkbar.

Besonders erfolgsversprechend für eine Anwendung photokatalytischer Pflastersteine sind Großprojekte wie Flughäfen, Bahnhöfe oder stark frequentierte Verkehrs- und Parkflächen, da diese häufig große Areale für die Photokatalyse zur Verfügung stellen können. Speziell im urbanen Raum, wo die meisten Schadstoffe entstehen, kann durch den Einsatz von photokatalytischen Pflastersteinen Verantwortung für die Erhaltung ökologischer Lebensräume übernommen werden.

### 3.1.3 Dyckerhoff GmbH

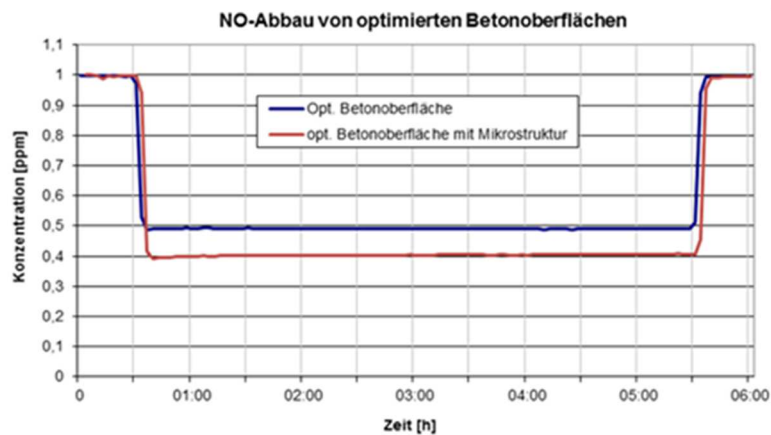
Zu Beginn des Projekts erfolgten Messungen des NO-Abbaus an Musterplatten auf Basis von Normmörtel in Anlehnung an DIN EN 196-1, um die Ausgangslage bei Projektbeginn zu dokumentieren. Dabei wurde mit verschiedenen, in die Baustoffmatrix eingemischten Titandioxid-Photokatalysatoren in einer Konzentration von 3%, bezogen auf den Zementgehalt (vgl. Projekt HelioClean), gearbeitet. Es konnten NO-Abbauraten von max. 9 % an unbewitterten Beton- bzw. Mörteloberflächen nachgewiesen werden.

Nach einer Freiland-Bewitterung der Referenzbetone wurde z. T. eine drastische Reduzierung der photokatalytischen Aktivität beobachtet, die im Extremfall bis zu einer Inaktivierung der Betonoberflächen reichte.

An der HelioClean Demonstrator-Sichtbetonwand wurden nach über vier Jahren Freibewitterung ebenso Vergleichsmessungen durchgeführt. Diese zeigten eine leichte Reduzierung der Aktivität, aber dennoch vergleichsweise hohe NO-Abbauraten.

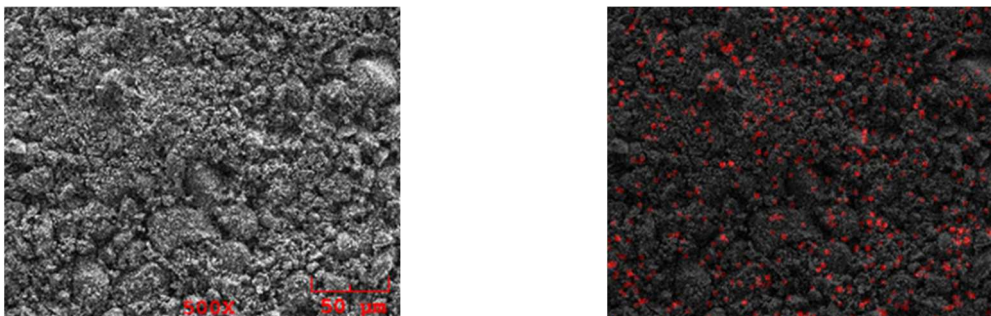
Durch rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen der bewitterten Normmörtel-Musterplatten konnte festgestellt werden, dass die Oberflächen mit calcitischen Ausblühungen belegt sind, die vermutlich das Titandioxid an der Baustoffoberfläche überdecken und eine Aktivierung durch Licht stark einschränken oder sogar unterbinden.

In Konsequenz dessen wurde das Konzept für die Herstellung adäquater Betonmuster überarbeitet. Für weitere Betonmuster, insbesondere für solche mit Oberflächenmodifikationen, wurden ausschließlich fließfähige, selbstverdichtende Hochleistungsbetone mit einem Größtkorn der Gesteinskörnung von 2 mm verwendet, um zusätzliche Artefakte durch Art und Herstellung der Muster zu vermeiden.



*Abbildung 6: Stickoxidabbau verschiedener optimierter Betonoberflächen*

Zudem wurden die Betone hinsichtlich der Dichtigkeit des Gefüges und der Reduzierung von möglichen kapillaren Stofftransporten optimiert, sodass in Verbindung mit dem Einsatz neuer Photokatalysator-Darreichungsformen verschiedene neue Modifikationen zur Anreicherung von Photokatalysatoren an den Betonoberflächen erzielt wurden. Den NO-Abbau einer dieser optimierten Oberflächen zeigt Abb. 6.



*Abbildung 7: links: Freilandbewitterung der Funktionsmuster, rechts: Ergebnis der Farbstabilitätsprüfung*

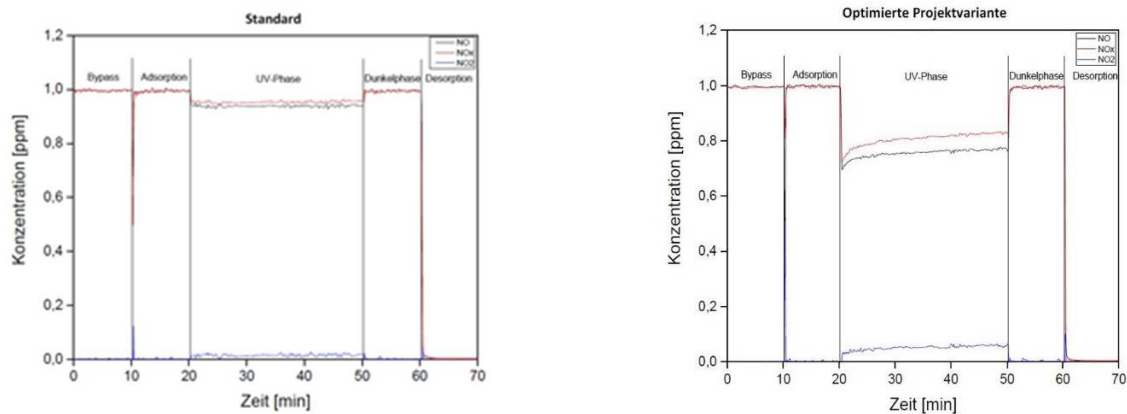
Durch eine zusätzliche Mikrostrukturierung (siehe Abb. 7 rechts), die durch Abguss der Schalungsoberfläche auf die Betonoberfläche appliziert wurde, konnte durch die Vergrößerung der zur Photokatalyse verfügbaren Oberfläche der Stickoxid-Abbau weiter erhöht werden.

Die im Projekt erarbeiteten Optimierungen bzw. Modifizierungen der Betonoberfläche zeigen eine deutliche Leistungssteigerung in Bezug auf die Selbstreinigung und den Stickoxid-Abbau. Der Stickoxid-Abbau frisch präparierter Funktionsmuster konnte um etwa den Faktor vier gesteigert werden. Die Dauerhaftigkeit der photokatalytisch aktiven Oberfläche kann durch die hydrophobe Ausrüstung der Betonmatrix verbessert werden, da kapillare Stofftransporte und damit auch Ausblühungen deutlich reduziert werden (siehe Abb 7 links).



### 3.1.4 KEIMFARBEN GmbH

Die technische Leistungsfähigkeit der photokatalytischen Silikat-Fassadenfarbe (bezeichnet mit „Standard“, siehe Abb. 8 links) zeigt einen Abbau der NO-Konzentration während des Belichtungszeitraums um 4,7%.



**Abbildung 8:** Vergleich – bestehendes Produkt „Standard“ (links) und Projektdemonstrator (rechts)

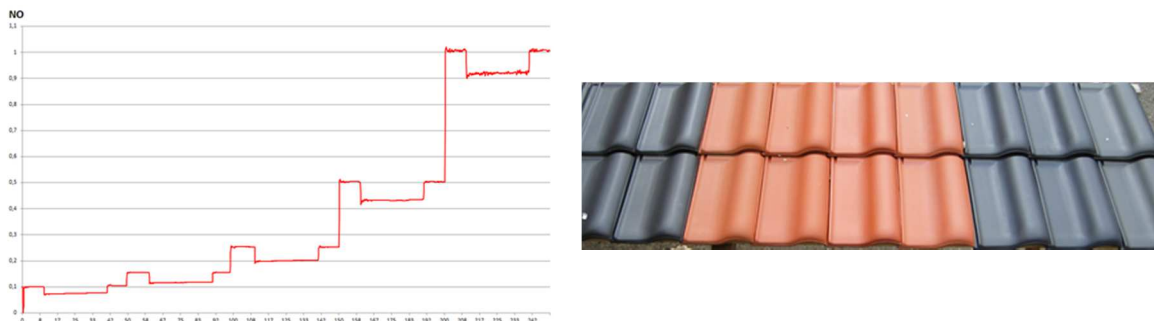
Durch systematische Modifikationen in Bezug auf die Photokatalysatortypen und -mengen und unter Beachtung der im Projekt ermittelten Grundlagenergebnisse sowie diverser Wechselwirkungen zu anderen Rezepturbestandteilen, konnte im Rahmen des Projektes eine eindeutige Verbesserung um zum Beispiel etwa das sechsfache der photokatalytischen Aktivität (bezogen auf den „Standard“) erreicht werden (siehe Abb. 8 rechts). Zudem konnte der Demonstrator so eingestellt werden, dass die für die Applikation erforderliche Langzeitstabilität von Farbe und Anstrich (siehe Abb. 9 rechts) gegeben ist.



**Abbildung 9:** Freilandbewitterung der Funktionsmuster (links) und Ergebnis der Farbstabilitätsprüfung (rechts)

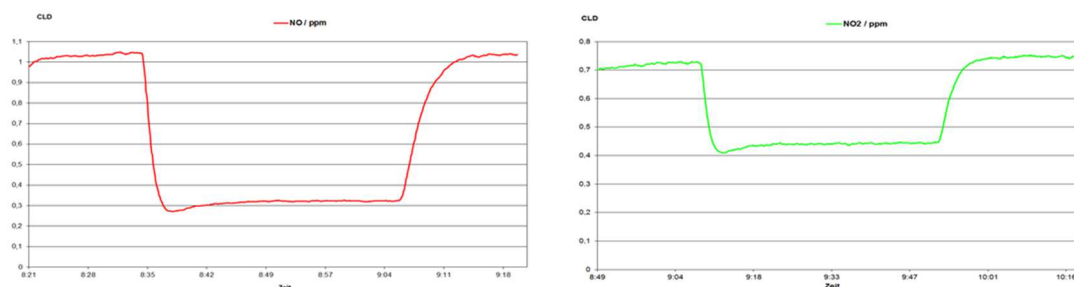
### 3.1.5 ERLUS AG

Im Laufe des Projektes PureBau® konnte die Aktivität zum Abbau von Stickoxiden auf den Dachziegeln um ein Vielfaches gesteigert werden. Dies war einerseits durch verbesserte und angepasste Katalysatoren des Partners Kronos möglich und andererseits durch eine optimierte Herstellung der Beschichtungsdispersion in unserem Labor sowie durch die Neuentwicklung der Engoben. Für das Projekt wurden Demonstratoren in Rot und Schwarz gefertigt (Abb. 10 rechts). Aufgrund der unterschiedlichen Engoben wurden geringfügig verschiedene Aktivitäten für die fertigen Dachziegel gemessen. Mit einem Wert für die Depositionsgeschwindigkeit von 1,08 cm/s (schwarz) bzw. 1,15 cm/s (rot) liegen die Werte etwa viermal so hoch, wie sie für einen vernünftigen Einsatz in der Praxis notwendig wären.



**Abbildung 10:** Bestimmung der Depositionsgeschwindigkeit zum Abbau von NO auf einem Dachziegel: 1,08 cm/s (roter Dachziegel) 1,15 cm/s (schwarzer Dachziegel); gemessen vom Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik (IST) in Braunschweig nach DIN 19279:2016-11 – Entwurf.

In Deutschland werden jährlich viele Millionen Quadratmeter Dachfläche mit Steildächern neu eingedeckt. Bisher wird nur ein verschwindend kleiner Teil dieser Flächen mit photokatalytisch aktiven Oberflächen ausgestattet, was durch die schlechte Nachweisbarkeit der Effekte und die fehlenden Aussagen zu Effizienz und Lebensdauer erklärt wird. Mit den Ergebnissen aus dem PureBau® Projekt können diese Zweifel eindeutig ausgeräumt werden. ERLUS wird die Demonstratoren des Projektes zeitnah in Produkte umsetzen und auf dem Markt platzieren.



**Abbildung 11:** links: NO-Abbau an einem Dachziegel im Erlus-Labor; Fläche: 1092 cm<sup>2</sup>, Fluss: 10 l/min, UV: 1 mW/cm<sup>2</sup>; rechts: NO<sub>2</sub>-Abbau an einem Dachziegel im Erlus-Labor Fläche: 1350 cm<sup>2</sup>, Fluss: 10 l/min, UV: 1 mW/cm<sup>2</sup>.

Wie in Abb. 11 zu sehen ist, bauen die Ziegel nicht nur in hoher Ausbeute NO ab, sondern es wird auch die NO<sub>2</sub>-Konzentration, für die die meisten Grenzwerte gelten, mit hoher Effizienz



reduziert. Die Messungen wurden in Anlehnung an die DIN 22197 durchgeführt, mit geänderter Probengröße (ganzer Dachziegel) und geändertem Gasfluss. Die genannte Norm gilt für den Abbau von NO, kann aber, wie unsere Versuche gezeigt haben, auch für den Abbau von NO<sub>2</sub> angewendet werden. Der Abbau von NO<sub>2</sub> ist naturgemäß geringer als beim NO, da die Geschwindigkeitskonstante für die Reaktion kleiner ist.

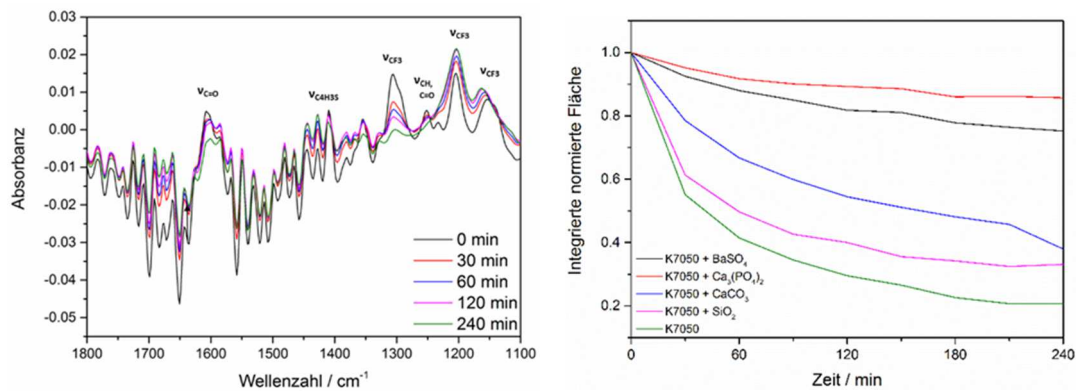
Die zusätzliche Eigenschaft zur Selbstreinigung der photokatalytisch aktiven Dachoberflächen wird zudem auch zu geringeren Wartungsintervallen und zu einer besseren Qualität des Dachablaufwassers führen.

## 3.2 Ergebnisse der Projektarbeit Analytik

### 3.2.1. TCI - Einfluss unterschiedlicher Zusätze auf die photokatalytische Aktivität von TiO<sub>2</sub>

Um den Einfluss unterschiedlicher Zusätze auf die photokatalytische Aktivität von TiO<sub>2</sub> zu ermitteln, wurden verschiedene Mischungen im Volumenverhältnis von 50 % KRONOClean<sup>®</sup> 7050 (K7050, TiO<sub>2</sub>) und 50 % Ca<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>/ SiO<sub>2</sub>/ BaSO<sub>4</sub> bzw. CaCO<sub>3</sub> hergestellt und der Abbau des Farbstoffs mittels Infrarotspektroskopie unter UV-Bestrahlung untersucht. Aus den unterschiedlichen Mischungen wurde jeweils zuerst ein Film und der Farbstoff Europium<sup>III</sup>(thenoyltrifluoracetone)(4'-(4-Methylphenyl)-2,2':6',2''-terpyridin (Eu<sup>III</sup>(TTFA)<sub>3</sub> (MePhTerpy)) hergestellt (siehe Abb. 17). In Abb. 12 (links) ist ein Beispiel dargestellt, welches die Änderung der Infrarotspektren des Farbstoffs auf einer mit K7050 präparierten Oberfläche im Verlauf der Bestrahlungsdauer von vier Stunden zeigt. Den Banden sind dabei jeweils spezifische Molekülschwingungen des Farbstoffs zugeordnet.

Um Aussagen über die photokatalytische Aktivität treffen zu können, wurde die CF<sub>3</sub> Schwingung bei einer Wellenzahl von 1299 cm<sup>-1</sup> ausgewählt und die Fläche unter der Bande integriert und normiert. Dies wurde sowohl für den reinen Katalysator K7050, als auch für die Mischungen mit K7050 durchgeführt. In Abb. 12 (rechts) ist die integrierte Fläche als Funktion der Zeit aufgetragen. Die Kurven nehmen unterschiedlich stark mit der Zeit ab, was darauf hindeutet, dass die Zusätze die photokatalytische Aktivität von K7050 beeinflussen.



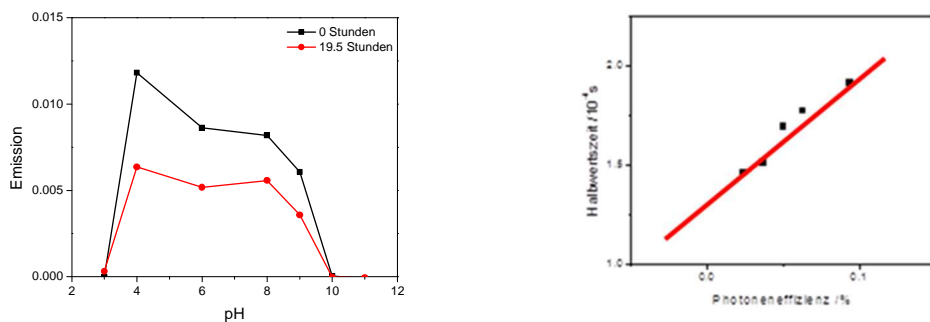
**Abbildung 12:** (links): Schematisches Beispiel der Infrarotspektren des Farbstoffs, abgeschieden auf K7050 während einer Bestrahlungsdauer von vier Stunden. Es wurde die Fläche unter der Bande bei  $1299\text{ cm}^{-1}$  ausgewählt, integriert und normiert; (rechts) Darstellung der integrierten normierten Fläche des Spektrums für reines K7050 und für Mischungen mit Baustoffsalzen als Funktion der Zeit dargestellt.

Der Farbstoff wird den Erwartungen entsprechend ohne Zusatz am besten abgebaut. Die Zugabe von  $\text{SiO}_2$  verringert den Abbau von  $\text{Eu}^{\text{III}}(\text{TTFa})_3(\text{MePhTerpy})$  nur geringfügig und hat den geringsten Effekt auf die photokatalytische Aktivität von K7050 im Vergleich zu den übrigen Zusätzen. Die Zugabe von Phosphat und Sulfat verringert den Abbau des Farbstoffs erheblich, wobei der Effekt von Phosphat am stärksten ist. Dies ist durch eine starke Wechselwirkung von Phosphat und auch von Sulfat mit der  $\text{TiO}_2$ -Oberfläche zu erklären. Phosphat und Sulfat adsorbieren am  $\text{TiO}_2$  und besetzen dadurch Adsorptionsplätze, sodass Sauerstoff-, Wasser- oder Farbstoffmoleküle nicht mehr adsorbieren können und der Abbau des Farbstoffs entsprechend verlangsamt wird. Die Zugabe von Calciumcarbonat verringert ebenfalls den Abbau des Farbstoffs, hat allerdings einen deutlich geringeren Effekt, da Carbonationen nicht so stark an der  $\text{TiO}_2$  Oberfläche adsorbieren wie Phosphat- oder Sulfationen.

### 3.2.2. TCI - Einfluss des pH-Werts auf die Emission des Farbstoffs

Der im Projekt entwickelte Farbstoff  $\text{Eu}^{\text{III}}(\text{TTFa})_3(\text{MePhTerpy})$  soll in der späteren Anwendung an Baustoffoberflächen abgebaut werden, um die photokatalytische Aktivität der Baustoffe schnell und einfach charakterisieren zu können. Natürlicherweise besitzen die Baustoffoberflächen durch den Zusatz verschiedener Chemikalien, vor allem mit basischem Charakter, unterschiedliche Alkalinitäten. Aus diesem Grunde wurde der Einfluss der Zugabe von Wasser mit unterschiedlichem pH-Wert zu einer Acetonitril-Lösung des Farbstoffes analysiert. Detektiert wurde dabei das rote Licht von ca.  $620\text{ nm}$ , welches der Farbstoff nach Anregung mit einem UV Laser bei  $355\text{ nm}$  emittiert. Wird der Farbstoff durch die Änderung des pH-Wertes zersetzt, kann keine Emission mehr detektiert werden. Auf diese Art und Weise wird der pH-Stabilitätsbereich des Farbstoffes sichtbar gemacht.

Der Farbstoff zeigt eine stabile Emission bei den pH-Werten 4-9. Eine Zugabe von Wasser mit höheren oder niedrigeren pH-Werten führt zur Löschung der Emission (siehe Abb. 13). Diese Abnahme der Emission wird auf die Zersetzung des Farbstoffes zurückgeführt, die offenbar im stark sauren oder alkalischen Medium beschleunigt abläuft. Die 19,5 stündige Lagerung des Farbstoffes in den Lösungen mit unterschiedlichem pH-Wert zeigt, dass der Farbstoff in einem Acetonitril-Wasser Gemisch nicht lagerfähig ist. Die Emission des Farbstoffes sinkt durch die Lagerung jeweils auf etwa 50 % ab. Die fehlende Stabilität in wässrigen Medien und die Einschränkung auf pH-Werte von 4-9 machen den Farbstoff in wässrigen Medien ungeeignet für eine Untersuchung der meist stark alkalischen Baustoffoberflächen. Innerhalb des Projektes wurde der Farbstoff daher auf Polymerfilme geankert, womit die beschriebenen Nachteile der Lagerfähigkeit und Stabilität behoben werden konnten. Die Farbstofffolien besitzen im trockenen Zustand eine ausreichende Lagerungsfähigkeit und die Untersuchung der Baustoffoberfläche erfolgt durch einfaches Anpressen der Folie an die zu untersuchende Oberfläche. Der daraus resultierende Spalt zwischen Baustoff und Farbstoff verringert den Einfluss der alkalischen Oberfläche enorm. Weiterhin können die genannten Aspekte der Lagerungsfähigkeit und Stabilität mit der Einstellung der Schichtdicke des Farbstoffes kontrolliert werden.



**Abbildung 13:** links: Stabilität der Emission von  $\text{Eu}^{\text{III}}(\text{TTFA})_3(\text{MePhTerpy})$  gegenüber der Zugabe von Wasser mit unterschiedlichem pH-Wert, direkt nach der Zugabe und nach 19,5 Stunden Lagerungszeit; rechts: Korrelation der Photoneneffizienz von  $\text{TiO}_2$ -basierten Farben und der ermittelten Halbwertszeit der Ladungsträgersignale.

### 3.2.3 TCI - Korrelation von Ladungsträgerlebensdauer und photokatalytischer Effizienz von $\text{TiO}_2$

Der Leibniz Universität Hannover wurden von einem Projektpartner kommerziell erhältliche Farben zur Verfügung gestellt, die  $\text{TiO}_2$  als Photokatalysator enthalten. Die Farben wurden auf ihre Aktivität für den Abbau von Stickstoffmonoxid NO (angelehnt an ISO 22197-1) untersucht, woraus die Photoneneffizienz der Proben berechnet wurde. Weiterhin wurden mit Hilfe der Laser-Blitz-Photolyse-Spektroskopie die Lebensdauern der Ladungsträger nach

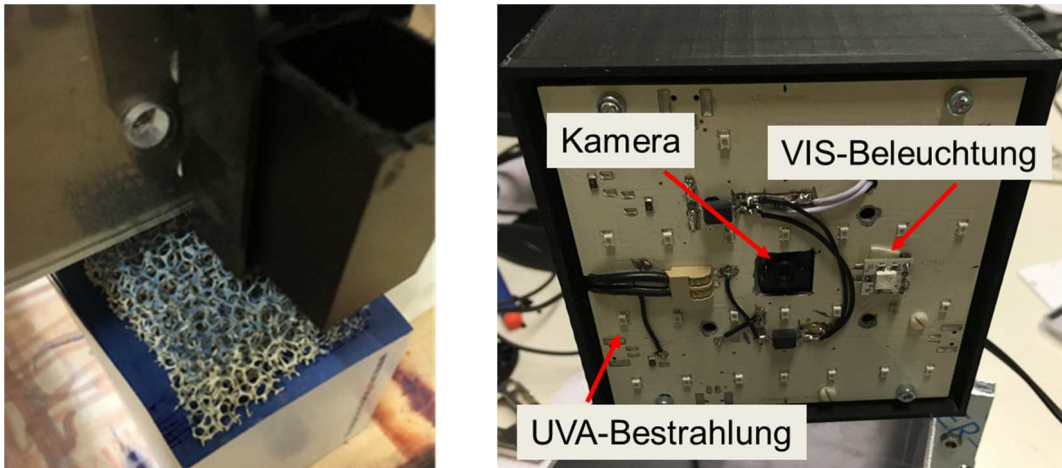
Anregung durch einen Laser-Impuls ermittelt. Die zugehörigen Signale wurden mit zwei Exponentialfunktionen genähert, die den Abfall der Ladungsträgerkonzentration mit zwei Lebenszeiten beschreiben. Abb. 14 rechts zeigt die Korrelation der zweiten Halbwertszeit der Lebensdauer der Ladungsträger der Farben mit der gemessenen Photoneneffizienz des NO-Abbaus.

Für die fünf untersuchten Farben wurde ein linearer Zusammenhang zwischen Photoneneffizienz und Halbwertszeit der Ladungsträger festgestellt (Abb. 13, rechts). Die Proben, die eine größere Lebenszeit der Ladungsträger aufwiesen, zeigten höhere Abbauraten von NO. Dies stellt eine Bestätigung der vor der Untersuchung getroffenen Annahme dar, dass eine längere Lebenszeit der auf dem Katalysator erzeugten reaktiven Zwischenprodukte zu einer höheren photokatalytischen Aktivität führt. Die langlebigeren Zwischenprodukte besitzen mehr Zeit für die Diffusion zur Oberfläche und für die Durchführung von Reaktionen an der Oberfläche.

### 3.2.4 BAU - Photokatalysatorverteilung und Testsysteme

Eine durch das INTEC Konsortium entwickelte Indikatortinte [1] zeigt bei Lichteinfall eine photokatalytische Oberflächenaktivität durch eine Veränderung der Farbe an. Dafür wird meist UVA-Licht benutzt. Durch die wiederholte Erfassung der Probe als farbiges Bitmap kann der Zeitpunkt der Farbänderung des Indikators (engl. Time To Bleach, TTB) für jeden Pixel des Bitmaps bestimmt werden. Je schneller der Farbumschlag geschieht, desto aktiver ist die Probenoberfläche. Geschieht keine Farbveränderung, ist die Probe photokatalytisch inaktiv. Raue und poröse Oberflächen können mit der ursprünglich entwickelten Rezeptur nicht gleichmäßig beschichtet werden. Im Projekt wurde für dieses Indikatortinte-System eine einfache, gleichmäßige Auftragung per Inkjet-Drucktechnik entwickelt.

Hierzu wurde die Rezeptur der Indikatorfarbe grundlegend verändert und an das Druckverfahren angepasst. Die Drucktechnik ermöglicht eine Beschichtung von glatten und auch sehr rauen sowie porösen Oberflächen. Damit ist sie sehr gut geeignet für die Applikation auf die in diesem Projekt weiterentwickelten Baustoffe. Die Leistungsfähigkeit reicht bis zur Beschichtung von photokatalytisch aktiven Schäumen, wie in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**4 (links) zu sehen ist.

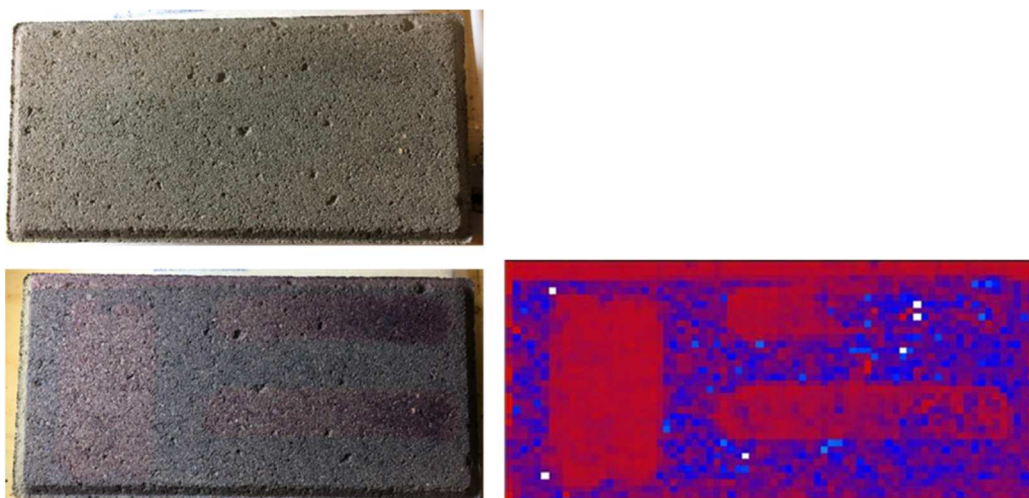


**Abbildung 14:** links: Beschichtungssystem für Indikatorfarbe; Bild des Inkjet-Druckkopfes bei der Beschichtung eines Mörtelschaumes; rechts: Messkopf mit integrierter UVA-Bestrahlung; LED Beleuchtung und Kamerasystem in der Mitte

Der Druckkopf ist an ein X-Y-CNC System gekoppelt. Die Auflösung des Druckkopfes und die Eigenschaften des CNC Systems ergeben eine hohe Druckgenauigkeit von unter 0,05 mm, sodass die Menge und der Ort der Beschichtung genau vorgegeben werden können.

Weiterhin wurde im Projekt zur Analyse der mit Indikator beschichteten Oberflächen ein Messkopfprototyp entwickelt. Dieser integriert, wie in Abb. 14 (rechts) zu sehen ist, eine UVA-Bestrahlungsmatrix, eine VIS-Beleuchtung und ein Kamerasystem. Eine Software steuert die Abfolge von UV-Bestrahlung und optischer Aufnahme der Oberflächen, sodass nach einer Messung eine Abfolge von Oberflächenabbildungen zur Verfügung steht.

Eine Auswertesoftware erstellt aus den Oberflächenbildern für jeden Messpunkt eine Farbe als Maß für die Zeit bis zum Farbumschlag. Diese wird der Oberfläche überlagert und gibt Aufschluss über die photokatalytische Oberflächenaktivität. Der Ablauf der Analyse ist in Abb. 15 dargestellt.





**Abbildung 15:** *Partiell photokatalytisch beschichteter Pflasterstein, oben links: Bild der Betonoberfläche, unten links: Bild der mit Indikatorntinte und beschichteten und analysierten Betonoberfläche, unten rechts: Mapping der von der Analysesoftware berechneten TTB (rot = niedrige TTB/hohe Aktivität, blau = hohe TTB/keine Aktivität).*

- [1] A. Mills, J. Hepburn, D. Hazafy, C. O'Rourke, N. Wells, J. Krysa, M. Baudys, M. Zlamal, H. Bartkova, C.E. Hill, K.R. Winn, M.E. Simonsen, E.G. Sogaard, S. Banerjee, R. Fagan, S.C. Pillai, Photocatalytic activity indicator inks for probing a wide range of surfaces, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* 290 (2014) 63–71.

### 3.2.5 KIWA GmbH - Applikationsprüfung

Die TiO<sub>2</sub>-Bestimmungen in der Beton-Matrix, beispielsweise von Betonpflastersteinen, zeigen erhebliche Unterschiede in den TiO<sub>2</sub>-Gehalten zwischen den angewendeten Bestimmungsverfahren. Wahrscheinliche Ursache dafür ist die unterschiedliche Aufschluss-Effizienz. Aufschlussysteme bzw. -verfahren, die die gesamte Matrix einschließlich der Gesteinskörnung lösen (Flusssäure) bzw. insgesamt erfassen (RFA), führen zwangsläufig zu Überbefunden, da Betonzusatzstoffe und/oder Gesteinskörnung Titan enthalten können. Die höchsten Ausbeuten ergeben sich für das Aufschlussystem Ammoniumsulfat / Schwefelsäure. Die Ergebnisse verhalten sich proportional zu den RFA-Analysen.

Als Fazit aus den Untersuchungen ist zu ziehen, dass die Konzentrationen des TiO<sub>2</sub> innerhalb eines Pflastersteins bzw. zwischen verschiedenen Pflastersteinen sich erheblich unterscheiden. Die Variationskoeffizienten bei einer Teilung des Vorsatzbetons eines Steines in fünf Teilproben und anschließender Messung liegen bei 30 % bis 40 % (Variationskoeffizient bei der Messung aus einer Probe < 3 %). Die Unterschiede zwischen unterschiedlichen Steinen liegen in einer ähnlichen Größenordnung.

Ein weiterer Schwerpunkt lag in der Erforschung des Einflusses von Alterungsprozessen auf die Effizienz der photokatalytischen Aktivität in Baustoffen. Hierzu wurden die Bauprodukte aller Projektpartner mit praxisrelevanten, künstlichen Bewitterungen im Labor beaufschlagt (siehe Abb. 16 links).

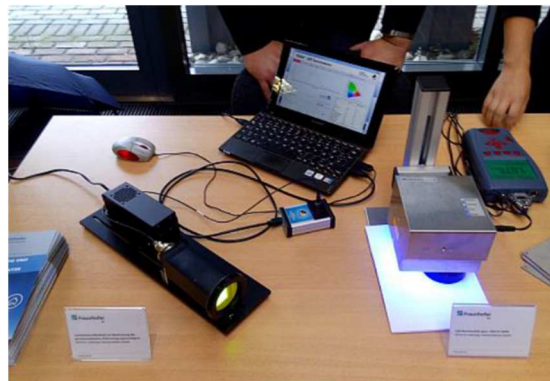
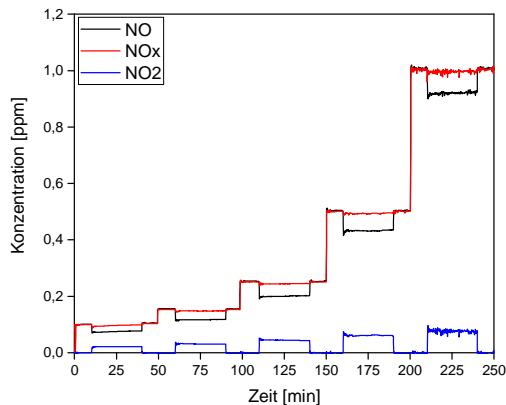
Die Dachziegel der Firma Erlus wurden beispielsweise einer Frostprüfung nach DIN EN 539-2:2013-05 unterzogen und anschließend vom Projektpartner TU Berlin bezüglich der photokatalytischen Effizienz untersucht. Die Silikatfarben der Firma Keim wurden einer Schlagregenprüfung unterzogen und anschließend vom Projektpartner TU Berlin bezüglich der photokatalytischen Effizienz untersucht. Die Mörtelproben der Firma Dyckerhoff und die Pflastersteine der Firma F.C. Nüdling wurden mit einer Klimawechsellagerung beaufschlagt, um Ausblühungen zu provozieren. Diese können bei zementgebundenen Baustoffen auch in der Praxis auftreten und stellen eine potentielle Einschränkung der photokatalytischen Aktivität dar. Durch die Klimawechsellagerung konnte bei den Pflastersteinen ein geringer Grad an Kalkausblühungen provoziert werden (siehe Abb. 16 rechts). Der Einfluss dieser Ausblühungen auf die photokatalytische Effizienz wird im Nachgang vom Projektpartner TU Berlin untersucht.



**Abbildung 16:** (links): Schlagregenprüfstand; (rechts): Ausblühungen nach einer Klimawechsellagerung – linker Stein nicht bewittert - rechter Stein bewittert.

### 3.2.6 Fraunhofer IST – Messtechnik für die Probenanalyse

Am Fraunhofer IST wurde im Rahmen des Projektes die Analytik der photoaktiven Werkstoffoberflächen auf Schadgasabbau und Selbstreinigung optimiert und zur Analyse der Applikationsmuster bereitgestellt. Dazu wurde mit den anderen Partnern der Gruppe Analytik eng kooperiert und an Themen wie Farbstoffwechselwirkung und Beleuchtung geforscht. Darüber hinaus wurden am IST wie beim TCI, bei BAU bei KIWA und bei KRONOS die im Projekt hergestellten Demonstratoren und Meilensteinproben untersucht. Ferner wurde intensiv mit Omicron und dem IHF zusammen an dem Lumineszenz-Messsystem des Projekts gearbeitet (siehe Kapitel 3.3).



**Abbildung XXX:** (links): Bestimmung der photokatalytischen Depositionsgeschwindigkeit einer Baustoff-Meilensteinprobe gem. eDIN 19279:2016; (rechts): Präsentation des ersten Prototyps des Lumineszenz-messkopfs im Rahmen des BAST-Kolloquiums Photokatalyse im September 2015 in Bergisch-Gladbach.

### 3.3 Ergebnisse der Arbeitsgruppe Messsystem

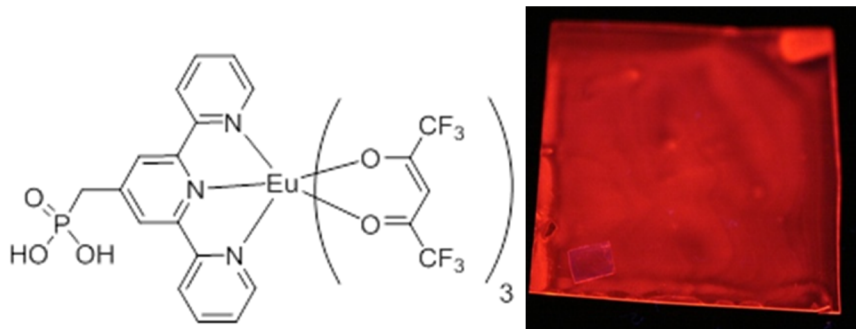
Zur gezielten und nachhaltigen Erforschung neuer Photokatalysewerkstoffe ist es erforderlich, das Langzeitverhalten dieser Werkstoffe außerhalb artifizierlicher Laborumgebungen zuverlässig und mit möglichst geringer Fehlertoleranz bestimmen zu können. Ein geeignetes Messverfahren existiert jedoch noch nicht. Auf Basis des am Fraunhofer IST entwickelten photokatalytisch sensitiven Lumineszenzmessverfahrens soll ein Demonstrator eines Messgeräts erstellt werden, der die Messdauer von Stunden bis Tagen auf einige Minuten senkt (bessere Feldtauglichkeit, Verringerung von Fehlerquellen durch einfachere Handhabung) und damit unabhängig von den sonstigen Oberflächeneigenschaften verlässliche und reproduzierbare Messungen ermöglicht.

Auf Basis der Messung des Abbaus organischer Lumineszenzfarbstoffe durch photokatalytisch wirksame Oberflächen unter Lichtbestrahlung soll das Gerät in der Lage sein, unabhängig von den Oberflächeneigenschaften wie Farbe, Form, Porosität, Struktur und Grad der Verunreinigung quantitative Ergebnisse zu ermitteln. Hierzu müssen neue Ansätze gefunden werden, wie der Farbstoff auf die zu untersuchenden Oberflächen appliziert wird, wie die zu messende Fläche bestrahlt wird, wie der Lumineszenzabbau optimal gemessen wird, und auf welche Art und Weise das Messverfahren wissenschaftlich fundierte und nachprüfbar Daten liefern kann. Im aktuellen Laborverfahren wird ein Farbstoff eingesetzt, der im Vakuum auf die zu untersuchende Fläche aufgedampft und durch das UV-Spektrum angeregt wird und auch im UV-Spektrum luminesziert. Eine Umstellung des Verfahrens auf einen Farbstoff, der auf einen flexiblen Folienträger aufgebracht wird und der im VIS-Spektrum luminesziert, soll in diesem Projekt erreicht werden, damit störende Interferenzen von Anregungsstrahlung und Lumineszenz vermieden werden können.

Zur Aufbringung des Farbstoffs auf einen flexiblen Folienträger ist es notwendig den Farbstoff mit einer Ankergruppe auszustatten. Dies macht eine chemische Anbindung auf dem Folienträger möglich. Als geeignete Lumineszenzfarbstoffe haben sich aus Vorgängerprojekten Europiumkomplexe herauskristallisiert. Diese werden nun mit Phosphonsäuregruppen modifiziert, welche als Ankergruppen fungieren (siehe Abb. 17 links). Des Weiteren ist es notwendig einen geeigneten Trägermaterial zu finden, das die notwendigen mechanischen, chemischen (Lösemittelbeständigkeit, Temperaturbeständigkeit) und optischen (Transparenz) Eigenschaften aufweist und idealerweise eine direkte Anbindung durch entsprechende Gruppen auf der Oberfläche des Materials möglich macht. Auf diese Weise können weitere Zwischenschritte wie zum Beispiel eine Beschichtung mit einem Metalloxid eingespart werden.

Als Material der Wahl stellte sich Neopulim<sup>®</sup>-L3430 heraus (siehe Abb. 17 rechts). Dabei handelt es sich um ein farbloses Polyimid, das sowohl optisch als auch chemisch die benötigten Eigenschaften aufweist.





**Abbildung 17:** (links): Struktur des Europiumkomplexes mit Phosphonsäuregruppe (Anker); (rechts): mit Farbstoff beschichtete Neopulim®-L3430 Folie

Ziel der Arbeitsgruppe Messsystem ist es, nach Projektende einen Demonstrator eines robusten sowie flexiblen und schnellen In-situ-Messgeräts zur quantitativen Bestimmung von photokatalytischen Eigenschaften vorliegen zu haben. Hierbei sollen mehrere, schwer zu vereinende Geräteeigenschaften kombiniert werden. Weiterhin soll das Messsystem sehr schnell (innerhalb weniger Minuten) die gewünschten Parameter erfassen. Zur möglichst flexiblen und mobilen Handhabung soll die Apparatur kleine Abmessungen aufweisen. Dabei ist die technische Zielsetzung vorgesehen, eine starke, hocheffiziente auf LED-basierende Lichtquelle mit geringen Abmaßen und Gewicht zu entwickeln. Es wird eine fasergestützte Lösung zur Kombination der Bestrahlungs- und der Messeinheit bei gleichzeitig möglichst dichtem Kontakt des Farbstoffs auf dem Folienträger zum Photokatalysator (PK) angestrebt.



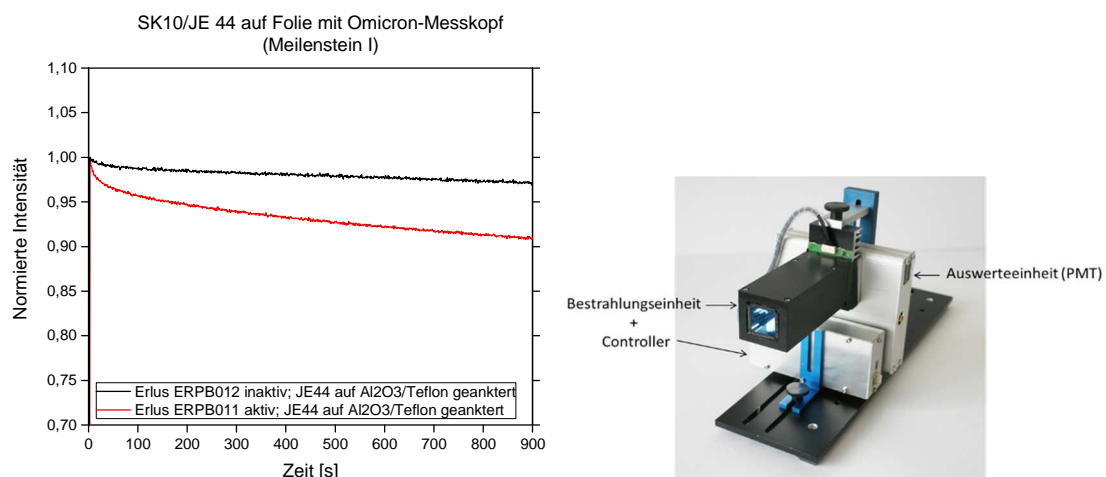
**Abbildung 18:** oben: Bauplan des Demonstrators für das Messgerät in der 3D-Ansicht; unten: Skizze des Innaufbaus des Demonstrators.

Abgerundet werden soll eine bedienerfreundliche Nutzung mit Hilfe einer entsprechend programmierten Firmware sowie einer grafischen Benutzerschnittstelle. Wichtig ist auch die Implementierung einer Kalibrier- und Lade-Methodik, die geeignet ist, im Freiland wissenschaftlich fundierte Daten zu liefern (siehe Abb.18).

Im Zuge dieser Anforderungen wurde am 28.08.2014 ein Gerätepatent zur Realisierung eines „Bidirektionales Messkopfes“ beim Deutschen Patent- und Markenamt eingereicht. Ein erster Prüfbescheid des DPMA erging im September 2015 und wird zurzeit vom DPMA geprüft.

Im Verlauf des Projektes hat sich gezeigt, dass die Bestrahlungseinheit voll funktional ist und ähnliche Ergebnisse im Labor erreicht, wie sie bisher bekannt sind. Die wesentlichen Ergebnisse der Messungen an den neuen Farbstoffsystemen in Kombination mit dem Messkopf von Omircon sind in Abbildung 19 (links) zu sehen. Sie zeigen Abbaumessungen an einem aktiven sowie einem inaktiven Erlus-Vergleichsmuster (Baustoffeingangspollen). Die Lumineszenz der geankerten Farbstofffolien ist mithilfe des neuen Messkopfes deutlich auflösbar, sodass reale Baustoffmuster unter Laborbedingungen prinzipiell zu vermessen und aufgrund ihrer photokatalytischen Aktivität sichtlich voneinander zu unterscheiden sind.

Durch diese Verifikation konnte bestätigt werden, dass der erste Meilenstein („Erstellung eines ersten Funktionsmodells der Bestrahlungseinheit“; „Nachweis zur erfolgreichen Erprobung der Lumineszenzabbaumessung“) wie geplant erreicht wurde!



**Abbildung 19:** links: Nachweis zur erfolgreichen Erprobung der Lumineszenzabbaumessung an exemplarischen Proben von ERLUS (aktiv/inaktiv) mit geankertem Farbstoff SK10 auf Teflon-AlOx-Folie und Omircon- UV-LED-Messkopf; rechts: Funktionsmodell mit Messkopf, Controller und Auswerteeinheit.

## 4. Projektpartner

Die elf Partner des BMBF Projektes PureBau® sind auf den Gebieten der photokatalytischen Applikation von TiO<sub>2</sub> und der Baustoffentwicklung erfahrene Firmen und wissenschaftliche Arbeitsgruppen. In diesem Abschnitt stellen sich die Partner des Projektes vor.



*Abbildung 20: KRONOS hat TiO<sub>2</sub> als Pigment erfunden und damit die Welt grundlegend verändert.*

### 4.1. KRONOS – Your Choice for a Brighter Life

KRONOS ist die TiO<sub>2</sub> Firma. Wir sind stolz darauf die Welt mit dem effektivsten Weißmacher auf Erden zu verschönern.– Titandioxid. Dieses anorganische Oxid wurde von uns vor ca. 100 Jahren für den Einsatz als Weißpigment entdeckt und ist heutzutage in hunderten Produkten des täglichen Lebens enthalten. Von der Computermaus über Wandfarben, Papier, Zahnpasta, Sonnencreme, Kosmetik und fast jedes andere Coating- oder Kunststoffprodukt – egal ob weiß oder farbig – enthält TiO<sub>2</sub>.

1916 wurde von KRONOS das erste Patent für TiO<sub>2</sub> angemeldet. 1939 war KRONOS der erste Anbieter von Rutil und KRONOS gehörte zu den ersten TiO<sub>2</sub>-Produzenten, die den Chloridprozess zur Herstellung von Rutil-Pigmenten einsetzten.

Von den ersten Tagen an bis heute gehört KRONOS zu den führenden TiO<sub>2</sub>-Herstellern. KRONOS legt großen Wert auf Nachhaltigkeit und Qualität.

Die hohe Innovationsfähigkeit von KRONOS ist nicht nur in der großen Palette effizienter und für die jeweilige Anwendung maßgeschneiderter Pigmente messbar, sondern auch über die Photokatalysatoren, die weltweit zu den effizientesten gehören. In PureBau® sind die

Aufgabengebiete von KRONOS die Bereitstellung und Modifikation der  $\text{TiO}_2$ -Photokatalysatoren und deren Darreichungsformen (Granulat/Slurry/Pulver/Premix). Die Hauptforschungsaktivitäten liegen im Vorhaben in diesen beiden Bereichen. Dabei wird eng mit den anderen Mitgliedern der AG Werkstoffe zusammengearbeitet, wenn es um die Erforschung der Einflüsse von Werkstoffmaterialien, Zuschlagstoffen auf den Photokatalysator usw. geht.

Das Hauptthema ist die Erforschung und Anpassung der  $\text{TiO}_2$ -Form (pH-Wert, Additive, Dispergiergrad, Granulation usw.) entsprechend den Untersuchungsergebnissen der Werkstoffsystemwechselwirkungen und die labortechnische Erstellung der angepassten Photokatalysatoren. KRONOS stellt den Partnern im Projekt verschiedenste  $\text{TiO}_2$ -Photokatalysatoren für die Versuche und die Erstellung von Referenzmustern, Funktionsmustern und Demonstratoren zur Verfügung. Zudem führt KRONOS in seinen bestehenden Laborbewitterungsgeräten und Freiland-Anlagen einen Teil der geplanten Bewitterungsversuche der verschiedenen Versuchswerkstoffe durch und analysiert die entwickelten Muster und Demonstratoren mit der Methodenpalette der hauseigenen Labore. Darüber hinaus beschäftigt sich KRONOS als Konsortialleiter mit der Koordinierung und der Außendarstellung des Projektes.



**Abbildung 21**

*:  $\text{TiO}_2$  ist ein Gebrauchsgut, das in unserem Alltag an vielen Stellen zur Anwendung kommt.*



*Abbildung 22: F.C. Nüdling Betonelemente, Freiflächengestaltung mit hochwertigen Betonprodukten*

## **4.2. F. C. Nüdling Betonelemente GmbH & Co. KG**

Das Fuldaer Traditionsunternehmen F. C. Nüdling Betonelemente GmbH + Co. KG stellt zur Freiflächengestaltung öffentlicher und gewerblicher Bauten ein außerordentlich breites Angebot an hochwertigen Betonprodukten zur Verfügung. Tag für Tag arbeiten rund 400 engagierte Mitarbeiter des Familienunternehmens daran, die Baustoffe – orientiert an den Bedürfnissen der Kunden – weiterzuentwickeln und zu veredeln.

Seit seiner Gründung vor fast 125 Jahren ist FCN eng mit dem gewerblichen und öffentlichen Bau verbunden. Bekannt für die hohe Qualität, Langlebigkeit und Innovationskraft seiner Produkte hat sich der Betonspezialist ebenso dank einer umfassenden Beratung und zuverlässigen Lieferung einen Namen gemacht.

FCN ist der erste Hersteller in Deutschland, der bereits 2006 photokatalytische Pflastersteine auf den Markt gebracht hat. Der von FCN erfundene photokatalytische Pflasterstein AirClean® (DE102010055540A1, Abbildung 24) wird nicht nur von FCN selbst, sondern auch über ein System von Lizenznehmern in Deutschland und anderen europäischen Staaten vermarktet. Inzwischen kann FCN auf eine über 10-jährige Erfahrung im Bereich photokatalytischer Baustoffe zurückblicken. In dieser Zeit wurden von uns und unseren Lizenzpartnern über 100.000 m<sup>2</sup> AirClean®-Pflastersteine eingebaut.

Der Photokatalysator Titandioxid TiO<sub>2</sub> (Anatas) ist Bestandteil der Betonrezeptur und wird dauerhaft in der Betonsteinmatrix gebunden, dabei jedoch chemisch nicht verändert. Der Photokatalysator verbraucht sich bei der chemischen Reaktion der Schadstoffreduzierung selbst nicht. Die photokatalytische Wirksamkeit wird somit während der gesamten Nutzungsdauer des Pflasters aufrechterhalten. Die Produktentwicklung AirClean® wurde durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) anerkannt und gefördert.

FCN ist Vorreiter im Bereich der photokatalytisch aktiven Betonelemente und hat durch seine bisherigen Forschungsaktivitäten den aktuellen Stand der Technik definiert. FCN ist auch ein (Gründungs-) Mitglied im Fachverband angewandte Photokatalyse (FAP). Seit 2006 beschäftigt sich FCN ständig aktiv mit der Forschung und Entwicklung verschiedener Bauprodukte (z.B. Betonpflastersteinen, Lärmschutzwänden, Abstreusplitt für



Asphaltschichten) mit photokatalytischer Wirkung in mehreren Forschungsvorhaben (Förderung durch DBU, BMWi und BMBF).



*Abbildung 23: Ausführung AirClean®-Pflastersteine, Bauvorhaben: Stadt Fulda, Mainstraße, Westring und Frankfurter Straße*

In einem noch laufenden Forschungsprojekt (NaHiTAs „Nachhaltiger HighTech-Asphalt: Schadstoff- und lärmindernd mit neuer Materialverarbeitung und -überwachung“) fokussiert FCN auf die Entwicklung eines hochfesten, photokatalytischen Korn-Materials zum Einbau in die Asphaltdecke, die noch zusätzliche Eigenschaften wie Lärminderung und gegebenenfalls Aufhellungseffekte aufweisen soll. Die dadurch erzeugte Straße verfügt über einen hohen ökologischen, sicherheitstechnischen und damit auch ökonomischen Nutzwert.



*Abbildung 24: KEIMFARBEN GmbH, nachhaltige ökologische Fassadengestaltung, Wohnbebauung, Heegstrauchweg, Gießen ausgeführt mit KEIM Soldalit-ME.*

### 4.3. KEIMFARBEN GmbH

Die KEIMFARBEN GmbH ist ein mittelständisches Unternehmen, das in zwei Werken am Stammsitz Diedorf bei Augsburg und im brandenburgischen Luckau produziert und mit insgesamt elf Auslandstochtergesellschaften in Europa und in den Vereinigten Staaten aktiv ist.

Zum Produktprogramm gehören primär silikatische Farbsysteme für den Außen- und Innenbereich, ergänzt um mineralische Putze und Spachtelmassen, Wärmedämm-Verbundsysteme, Naturstein-Instandsetzungssysteme sowie Betoninstandsetzung und Oberflächenschutz. Mit seiner Kernkompetenz „mineralischer Bautenschutz“ hat sich KEIMFARBEN als einer der Branchenführer im Bereich nachhaltiger Bauchemie etabliert. Die Wurzeln des Unternehmens liegen in der Silikatfarbe, für deren Entwicklung der Firmengründer Adolf Wilhelm KEIM im Jahre 1878 ein kaiserliches Reichspatent erhielt. Seitdem fokussiert sich das Unternehmen auf die stetige Weiterentwicklung der silikatischen Bindemitteltechnologie. Die Farben aus dem Hause KEIM schmücken so prominente Objekte wie das „Weiße Haus“ oder auch das Bundeskanzleramt in Berlin. Die Vorteile der silikatischen Beschichtungssysteme sind die enorme Farbton- und Witterungsstabilität, die enorme Lebensdauer und die hervorragenden bauphysikalischen Eigenschaften. Silikatfarben erfüllen wie kein anderes Anstrichsystem die Kriterien der Nachhaltigkeit in Punkto Ökonomie, Ökologie und soziale Aspekte.

Die anorganische Matrix der Silikatfarben ist für den Einsatz dieses Photokatalysators prädestiniert. Diese Bindemittelmatrix auf Basis Kaliumsilikat wird durch den Photokatalysator nicht angegriffen und stellt somit eine langlebige Funktionalität der Anstrichschicht sicher. Die Funktionalisierung von Anstrichen für die Luftreinhaltung mittels Photokatalyse ergänzt in idealer Weise die Performance silikatischer Fassadenfarben.

Die Firma Keimfarben bietet mit dem Farb-System Soldalit-ME eine photokatalytisch aktive Sol-Silikatfarbe (Bindemittelbasis Kieselsol und Kaliumsilikat) an, die an Fassaden, insbesondere in verkehrsstarken Regionen, und an Infrastrukturprojekten wie Straßentunneln oder Lärmschutzwänden, Anwendung findet. Damit kann die photokatalytisch aktive

Silikatfassadenfarbe einen sinn- und wertvollen Beitrag zur Reduzierung der NO<sub>2</sub>-Konzentration in der Umgebungsluft leisten.



*Abbildung 25: Wohngebäude, Gran Via 80, Madrid; ausgeführt mit KEIM Soldalit-ME*

Die technische Leistungsfähigkeit der photokatalytischen Silikat-Fassadenfarbe (bezeichnet mit „Standard“) zeigt einen Abbau der NO-Konzentration während des Belichtungszeitraums um 4,7%. Ohne UV-Belichtung findet keine Verringerung statt, somit ist die Abnahme während der Belichtung direkt auf die Photokatalyse zurückzuführen.

Ziel des vorgestellten PureBau®-Projektes war die Erforschung und Erstellung von optimierten und innovativen Formulierungen und Prototypen, die die bereits verfügbaren Produkte, insbesondere in puncto photokatalytischer Aktivität deutlich verbessern können ohne die Einsatzbedingungen und Eigenschaften der Farbe zu verändern. Dazu wurden in einem iterativen Prozess die im Projekt mit neuen Photokatalysatoren und angepassten Rezepturen hergestellten Muster und Demonstratoren zusammen mit dem aktuellen Produkt immer wieder vergleichend untersucht. Dabei wurden die Erkenntnisse aus der Grundlagenarbeitsgruppe bei den einzelnen Iterationsschritten berücksichtigt und soweit möglich in die Anpassung der Materialherstellung eingebunden.





*Abbildung 26: Dyckerhoff GmbH, Zement und Transportbeton sowie „Dyckerhoff WEISS“ für nachhaltige Betonapplikationen und Sichtbetonanwendungen.*

## 4.4. Dyckerhoff GmbH

Die Dyckerhoff GmbH ist ein internationaler Hersteller von Zement und Transportbeton. Der Hauptsitz befindet sich seit der Gründung vor rund 150 Jahren in Wiesbaden. In Deutschland betreibt Dyckerhoff sieben Zement- und ca. 120 Transportbetonwerke. Seit 2004 gehört Dyckerhoff zur italienischen Buzzi Unicem Gruppe.

Forschung und Entwicklung sind ein wichtiger Teil des Unternehmens. Dabei bilden Bindemittel und Betone für spezielle Anwendungen den Schwerpunkt der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten. Mit dem Wilhelm Dyckerhoff Institut besitzt Dyckerhoff eine technische Einrichtung, die nicht nur die Qualitätskontrollen für die Zementwerke in Deutschland und Luxemburg durchführt, sondern auch an der Entwicklung neuer bzw. an der Weiterentwicklung existierender Bindemittel für spezielle Anwendungen unserer Kunden sowie an der umweltfreundlichen Herstellung von Zementen arbeitet.

Eine Spezialität von Dyckerhoff ist der weiße Portlandzement „Dyckerhoff WEISS“, der sich im Laufe seiner nun über 80-jährigen Geschichte zu einem international bekannten Markenartikel entwickelt hat. Dyckerhoff WEISS ist ein ästhetisch besonders ansprechender Portlandzement, der Architekten, Planern und Bauherren die Umsetzung einer breiten Palette möglicher Farben, Formen und Oberflächenstrukturen von Betonen gestattet.

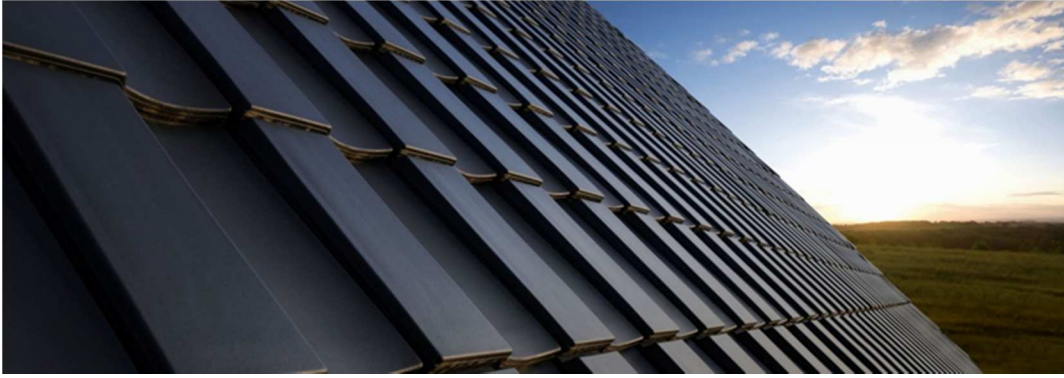
Betonoberflächen sind seit mehr als einem Jahrhundert die weltweit am häufigsten hergestellten mineralischen Oberflächen. Mit Beton werden nicht nur höchste bautechnische Anforderungen wie Tragfähigkeit und Langlebigkeit gelöst, immer stärker rücken neue Aufgabenstellungen wie ästhetisches Aussehen und auch die zusätzliche Funktionalisierung der Betonoberflächen in den Mittelpunkt.

Dyckerhoff ist bereits seit über 10 Jahren in der Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Photokatalyse für selbstreinigende und schadstoffabbauende Baustoffe aktiv. Dabei stehen

insbesondere Modifikationen zur Anreicherung des Photokatalysators an der Betonoberfläche und deren Dauerhaftigkeit im Fokus, um die Effektivität und Effizienz zu erhöhen.

Dyckerhoff erforscht den Einfluss verschiedener anorganischer Zementbestandteile und Betonzusatzmittel auf die Photokatalyseeffizienz zum Abbau von Schadstoffen an der Werkstoffoberfläche. Ergänzend wird auch der Einfluss der Photokatalyse auf die Werkstoffchemie und die Eigenschaften des späteren Baustoffs untersucht. Der Photokatalysator ist im kompletten Werkstoff vorhanden bzw. wird gezielt an den Werkstoffoberflächen angereichert. Daher wird Dyckerhoff auch die Alterung und das Ausblühverhalten des neuen Werkstoffs und dessen Einfluss auf den Schadstoffabbau untersuchen.

Weiterhin wird Dyckerhoff neue Lösungsmöglichkeiten in der Verfahrenstechnik bei der Herstellung zementgebundener Baustoffe erforschen, da davon auszugehen ist, dass die Wirksamkeit von Photokatalysatoren auch von der Herstellungstechnologie der Baustoffe abhängt. Die Dispergierung der Photokatalysatoren im Zement oder Beton sowie die Fixierung der Photokatalysatoren spielen ebenso eine Rolle wie die Zusammensetzung.



*Abbildung 27: ERLUS AG - ein Synonym für Seriosität, Qualität und Innovation*

## **4.5. ERLUS AG**

Die ERLUS AG mit Sitz in Neufahrn/NB ist einer der führenden deutschen Hersteller von Tondachziegeln mit drei Standorten in Deutschland und einem Jahresumsatz von derzeit 106 Mio Euro. Neben dem Hauptprodukt Tondachziegel gehören Kaminbaustoffe und Schornsteinsysteme zum Produkt Portfolio der ERLUS AG.

Wie wird man in der Baubranche zum Synonym für Seriosität, höchste Qualitätsstandards und Innovationsfreudigkeit? Ganz einfach: indem wir in unserer über 100-jährigen Firmengeschichte immer wieder erfolgreich Tradition und Fortschritt in Einklang gebracht haben. Neben Energieeinsparungen arbeiten wir an einer permanenten Erhöhung der Produktqualität unserer Dachziegel auch im Hinblick auf die bereits sehr hohe Hagelwiderstandsfähigkeit. Hinsichtlich dieses Qualitätskriteriums verfügen wir über ein Alleinstellungsmerkmal im Markt. Der verantwortungsbewusste Umgang mit unserer Umwelt ist fester Bestandteil unserer Unternehmenskultur. Bei der Rohstoffgewinnung achten wir auf eine schonende Bewirtschaftung unserer Ressourcen. Seit Jahren verfügt ERLUS über ein integriertes Managementsystem, dessen wesentliche Bestandteile ein Qualitäts- und ein Energiemanagementsystem sind. Beide wurden nach die internationalen Standards ISO 9001 und ISO 50001 zertifiziert. Die Energie- und Qualitätsphilosophie wurde zudem durch die Einführung eines Umweltmanagementsystems nach ISO 14001 erweitert. Das überdurchschnittliche Engagement für den Klima- und Umweltschutz zeigt der 2017 erfolgte Beitritt der Erlus AG zum Umweltpakt Bayern mit dem Ziel, gemeinsam Umwelt und Wirtschaft zu stärken.

Die ERLUS AG betreibt schon seit über 15 Jahren Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Photokatalyse und hat diese als erstes Unternehmen erfolgreich auf Tondachziegel appliziert. Seit 2004 gehört der ERLUS Lotus als selbstreinigender Tondachziegel zur Produktfamilie und wurde bereits 2004 mit dem iF Matriolica Design Award ausgezeichnet.

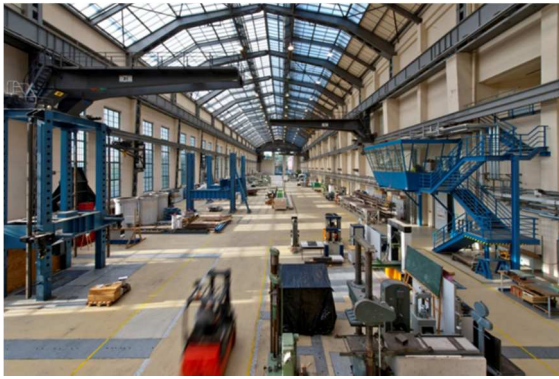
Seit einigen Jahren geht die Entwicklung verstärkt in Richtung der Luftreinigung mit dem Ziel des photokatalytischen Abbaus von Stickoxiden. Die Dachziegel werden hierzu in einem aufwendigen Verfahren mit einer photokatalytisch aktiven Schicht auf Basis von Titandioxid beschichtet, welches dauerhaft auf der Oberfläche fixiert wird (siehe Abb. 28).

ERLUS hat in PureBau® das Ziel, die photokatalytischen Eigenschaften der bestehenden Produkte zu optimieren, um das Potenzial zur Selbstreinigung und Luftreinigung der Applikation optimal auszunutzen.

Anfang 2017 wurde vom FAP eine freiwillige Selbstverpflichtung veröffentlicht für Produkte zur photokatalytischen Luftreinigung, die einen ausreichend hohen NO-Abbau zeigen und damit dem Umwelt- und Gesundheitsschutz durch die luftreinigende Wirksamkeit dienen. Die Erlus AG ist seit vielen Jahren aktives Mitglied im FAP, wird sich an der Selbstverpflichtung beteiligen und mit den photokatalytisch aktiven Dachziegeln die gesetzten Anforderungen übertreffen.



**Abbildung 28:** Photokatalytisch aktive Dachziegel, derzeit in Rot und Schwarz - andere Farben sind möglich.



*Abbildung 29: links: technische Halle an der TU Berlin mit Prüfständen der KIWA, rechts: Mikroskopie von Dünnschliffen.*

## 4.6. KIWA GmbH

Die Kiwa GmbH in Deutschland ist spezialisiert auf Qualitätsprüfungen und Zertifizierungen von Produkten und Systemen sowie auf Umweltschutz-Dienstleistungen. Mit unserem breiten Serviceangebot unterstützen wir unsere Kunden aktiv, ihre Produkte und Prozesse kontinuierlich zu verbessern.

Im Bereich der Bau-, Baustoff- und Bauteilprüfungen sowie der Baugutachten ist die Kiwa GmbH mit 14 Niederlassungen in Deutschland nicht nur flächendeckend präsent, sondern deckt zudem mit ihrem breiten Spektrum nahezu jede Stoffgruppe und jede nach Norm erforderliche Prüfung ab.

Die Begutachtungen geschehen durch unsere Bauexperten vor Ort, die Prüfungen führen wir ebenfalls vor Ort oder in den eigenen Prüflaboren durch. Dem modernsten Stand der Technik entsprechende Geräte und Prüflaboratorien garantieren eine sichere und kompetente Prüfung.

Zudem stehen wir unseren Kunden als bauaufsichtlich zugelassene Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle (PÜZ-Stelle) gemäß Landesbauordnungen und Bauproduktengesetz („notified body“) zur Seite. Unsere Akkreditierungen in den Bereichen Prüfen, Überwachen und Zertifizieren sichern unseren hohen Qualitätsstandard und unsere Unabhängigkeit.

Die Kiwa hat in PureBau® das Ziel die bestehenden Analysetechniken für die Testung von photokatalytischen Materialien auszubauen und zu ergänzen und gegebenenfalls auch neue Testverfahren zu prüfen und in ihren Methodenkatalog aufzunehmen um als unabhängiges Labor auch Materialtestungen in dem Themenbereich bereit zu stellen.



*Abbildung 30: Omicron Laserage GmbH - hochmoderne sechs Kanal Lichtquelle.*

## **4.7. Omicron-Laserage Laserprodukte GmbH**

Seit mehr als 25 Jahren forscht, entwickelt und produziert Omicron in den Bereichen optische Systeme, Elektronik und Systemintegration. Das Unternehmen stellt an sich selbst den Anspruch, ein Technologietreiber in den Bereichen Optik, Elektronik und Applikationen zu sein, was in den letzten Jahren auch erfolgreich erreicht wurde. Die Produktpalette reicht von Lasern (Diodenlaser, DPSS-Laser) über Light-Engines bis hin zu LED-Modulen. In diesen Bereichen bietet das Unternehmen zudem seit mehreren Jahren erfolgreich Forschungsdienstleistungen an. Die wichtigsten Abnehmermärkte von Omicron sind Qualitätssicherung und Messtechnik, Digital Imaging und Datenspeicherung sowie Medizin und Biotechnologie.

Die projektspezifische Kernkompetenz von Omicron besteht in erster Linie durch die Konzentration sämtlicher Prozesskomponenten bei der Entwicklung integrierter Laserdioden- und LED-Modulen. Das hochinnovative Unternehmen ist bei einigen Eigenentwicklungen international technologieführend.





*Abbildung 31: Institut für technische Chemie TCI - Leibniz Universität Hannover*

## 4.8. TCI - Leibniz Universität Hannover

Der von Prof. Detlef Bahnemann geleitete Arbeitskreis am Institut für Technische Chemie der Leibniz Universität Hannover beschäftigt sich intensiv mit den beiden Themen Photokatalyse und Nanotechnologie. Innerhalb dieser großen Fachgebiete liegen die Forschungsschwerpunkte dabei insbesondere in den Bereichen der Farbstoffsolarzellen, der photokatalytischen Luft- und Wasserreinigung, der photokatalytischen Wasserspaltung und der Kinetik schneller photokatalytischer Prozesse. Dabei wird ebenfalls ein Bottom-up Ansatz verfolgt, bei dem Halbleiter- und Metallnanopartikel aus molekularen Vorläufern synthetisiert werden. Diese Partikel werden dann unter anderem zur Herstellung von transparenten und intransparenten Schichten auf unterschiedlichsten Substraten genutzt. Zusätzlich werden bei diesen Synthesen große und reaktive Oberflächen auf den Partikeln oder innerhalb der Schichten gewonnen, beispielsweise durch die Erzeugung mesoporöser Strukturen. Neben photoelektrochemischen Untersuchungen von Photokatalysatoren ist der Arbeitskreis insbesondere auf dem Gebiet der Laserblitzphotolyse spezialisiert; beide Untersuchungsmethoden werden für die Bestimmung der Ladungsträgerbildungs- und Ladungsträgertransferkinetik eingesetzt.

Aktuelle Projekte des Arbeitskreises umfassen neben der photokatalytischen Wasser- und Luftreinigung auf Baustoffoberflächen (BMBF PureBau®) insbesondere die solare Brennstoffsynthese, d.h. die direkte photokatalytische und photoelektrochemische Wasserspaltung. Hierbei steht die Untersuchung der zugrundeliegenden Reaktionsmechanismen im Zentrum des Interesses. Im BMBF-Projekt DuaSol wird die photokatalytische Wasserstofferzeugung mit dem Abbau organischer Schadstoffe in verschmutzten Wasserströmen kombiniert, während im SolHyd-Projekt (BMBF) der Einsatz von Hämatit als Oxidationskatalysator im Detail untersucht wird. Darüber hinaus ist der Arbeitskreis Photokatalyse und Nanotechnologie am DFG-Schwerpunktprogramm „Fuels Produced Regeneratively Through Light-Driven Water Splitting: Clarification of the Elemental Processes Involved and Prospects for Implementation in Technological Concepts“ (SPP 1613)

beteiligt. Weiterhin arbeitet der Arbeitskreis von Prof. Bahnemann gemeinsam mit der Arbeitsgruppe von Prof. Wonyong Choi vom POSTECH (Südkorea) in einem Global Research Laboratory (GRL) an der praktischen Umsetzung unterschiedlicher Konzepte der solaren Brennstoffsynthese.

Im Rahmen von PureBau® wurde neben den Aktivitätsmessungen an den Demonstratoren und Funktionsmodellen auch anhand von Materialmix-Ansätzen der Einfluss von der Baustoffmatrix auf die Photokatalysatoreigenschaften untersucht und es wurden umfangreiche Tests mit den Europium basierten Detektionsmolekülen des Messgerätedemonstrators durchgeführt.





**Abbildung 32:** links: Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik Braunschweig IST; rechts: Messplatz zum  $NO_x$ -Abbau von photokatalytisch aktiven Materialien nach ISO

## 4.9. Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik IST

Das Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik IST bietet als innovativer FuE-Partner Lösungen in der Oberflächentechnik, die gemeinsam mit Kunden aus Industrie und Forschung erarbeitet werden. Das »Produkt« ist die Oberfläche, die durch Modifizierung, Strukturierung und/oder Beschichtung für Anwendungen primär in den Geschäftsfeldern Maschinenbau, Werkzeuge und Fahrzeugtechnik, Energie und Elektronik, Optik, Life Science und Umwelt sowie Luft- und Raumfahrt optimiert wird.

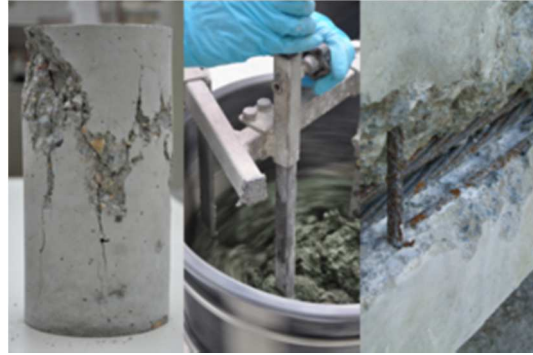
Die Kompetenz des Fraunhofer IST besteht vor allem in der Beherrschung der Prozesse und ihrer Kombination mit einer Vielzahl von Schichten, wobei ein breites Spektrum an Schichtfunktionen realisiert werden kann. Die umfangreichen Erfahrungen in der Schichtherstellung und Schichtanwendung werden unterstützt durch eine entsprechende Schicht- und Oberflächenanalytik, für die die modernsten Geräte zur Verfügung stehen, sowie durch die Simulation der vakuumbasierten Beschichtungsprozesse. Eine der besonderen Stärken des Instituts besteht darin, aus dem vorhandenen Spektrum an Verfahren die für die jeweilige Aufgabenstellung optimale Kombination auszuwählen.

Neben der Erforschung wissenschaftlicher Grundlagen in Kooperation mit Universitäten und Forschungseinrichtungen entwickeln etwa 130 Mitarbeiter in enger Zusammenarbeit mit Anwendern aus der Industrie maßgeschneiderte Oberflächen und Prozesse: vom Prototyp über wirtschaftliche Produktionsszenarien und die Skalierung auf industrielle Maßstäbe bis hin zu Transfer und Implementierung der Technologie beim Kunden.

Das Fraunhofer IST ist Gründungsmitglied der im Jahr 2007 gegründeten Fraunhofer-Allianz Photokatalyse, einem strategischen Zusammenschluss von sechs Instituten unterschiedlicher wissenschaftlich-technischer Ausrichtungen. Seit Ende 2008 ist das IST mit der Arbeitsgruppe von Herrn Neumann aktives Mitglied im DIN-Normenausschuss Photokatalyse und unterstützt

dort als Teil der Fraunhofer-Allianz die nationale und internationale Normung photokatalytischer Messverfahren insbesondere im Bereich photokatalytischer Selbstreinigung. Schwerpunkte der Arbeitsgruppe Photokatalyse in den letzten Jahren waren die Entwicklung photokatalytisch aktiver optischer Beschichtungen primär auf Glas- und Kunststoffoberflächen sowie die Entwicklung spezifischer Messtechnik zur Beurteilung der photokatalytischen Wirksamkeit dieser Oberflächen.

Im Rahmen des Verbundprojekts PureBau® übernimmt das IST die Leitung der AG Messsystem und erforscht den photokatalytischen Farbstoffabbau sowie neue Lumineszenzfarbstoffe und deren Applikationsverfahren. Ein Aufgabenbereich ist dabei die Charakterisierung der Effektivität unterschiedlicher Farbstoffe auf unterschiedlichen Oberflächen. Die Arbeiten des IST dienen auch als Schnittstelle zwischen IHF und Omicron, wobei es die Lumineszenzfarbstoffe auf die Anwendung im Messverfahren im Labor sowie später im Feld optimiert.



*Abbildung 33: links: Peter-Behrens-Halle der TU Berlin im Technologie und Innovationspark Berlin Wedding. Das Fachgebiet Baustoffe und Bauchemie nutzt einen Teil dieser Halle; rechts: Beispiele für Materialien, die am Institut untersucht werden.*

## 4.10. BAU – Technische Universität Berlin

Das Fachgebiet Baustoffe und Bauchemie von Herrn Prof. Stephan an der TU Berlin ist im Bereich Forschung und Lehre der in der Bauwirtschaft verwendeten Werkstoffe aktiv. Wir verfügen über eine interdisziplinäre Kompetenz vor allem bei der Durchführung von synthetischen und analytischen Arbeiten auf der molekularen bis mikroskopischen Ebene. Durch unsere Arbeiten im Projekt wollen wir die Betrachtungsweise bis in die makroskopische Dimension der Baustoffe vertiefen.

Unsere Kernkompetenzen liegen in den Erfahrungen bei der Erforschung und Analyse oberflächenfunktionalisierter Baustoffe, z. B. mit photokatalytisch aktiven Oberflächen. Das Fachgebiet verfügt über ein voll ausgestattetes Baustofflabor einschließlich Einrichtungen zur künstlichen Bewitterung. Zur Analyse von Wechselwirkungen zwischen photokatalytischer Effizienz und den Werkstoffsystemen stehen zahlreiche Methoden zur Verfügung wie Bestimmung der photokatalytischen Aktivität nach ISO 22197, Depositionsratenbestimmung nach aktuellen Verfahren, Anwendung von Indikatorfarbstoffen zur Bestimmung der Photokatalyseaktivität nach Prof. Mills, Belfast oder Röntgendiffraktometrie (XRD) nach aktuellem Stand der Technik.

Im Projekt PureBau® bearbeitetes Thema:

- Laborbasiertes Detektionsverfahren zur Vermessung der Homogenität der Oberflächenverteilung des Photokatalysators an der Oberfläche der Baustoffmatrix.
- Unterstützung der Partner bei messtechnischen Fragestellungen
- Vermessung von Meilensteinproben und Demonstratoren



*Abbildung 34: Institut für Hochfrequenztechnik IFH – Technische Universität Braunschweig.*

## **4.11. IHF – Technische Universität Braunschweig**

Die Arbeitsgruppe von Hans-Hermann Johannes am Institut für Hochfrequenztechnik der Technischen Universität Braunschweig (IFH) beschäftigt sich mit den folgenden Themenschwerpunkten:

- OLED-Materialien
- Materialien für Sensorik
- Polymerentwicklung
- Photolumineszente Materialien für analytische Anwendungen

Erforscht wird die Chemie des Lumineszenzfarbstoffs für das Messsystem mittels der Untersuchung des Einflusses der Oberflächeneigenschaften auf den Farbstoff. Dieser Farbstoff wird auf Basis dieser Ergebnisse modifiziert, um ein Messverfahren zu erhalten, das möglichst robust und zuverlässig funktioniert und keine Abhängigkeit von der gemessenen Oberfläche aufweist. Zudem soll das Spektrum der messbaren Wellenlängen erweitert werden, um die Aussagen zur Photokatalyseeffizienz bei Einstrahlung von Wellenlängen im sichtbaren Bereich zu ermöglichen (VIS-Farbstoff). Das IHF unterstützt Omicron durch die Erforschung eines optimierten Applikationsverfahrens für den Lumineszenzfarbstoff (Verdampfung, Sublimation, Polymerfolien – Spaltabbau).