



**Abschlussbericht
für die
Deutsche Bundesstiftung Umwelt**

**Untersuchung des Abbaus anthropogen verursachter
organischer Verschmutzungen und der Auswirkung auf
die Behandlung von Niederschlagswasser auf der
photokatalytischen Oberfläche von
wasserundurchlässigen Pflastersteinen**

AZ 25884/01



**Menk'sche Betonsteinwerke GmbH & Co. KG, Monheim
in Zusammenarbeit mit
dem Prüf- und Entwicklungsinstitut für Abwassertechnik
an der RWTH Aachen e.V. (PIA), Aachen und
dem Ingenieurbüro Bokatec, Wilnsdorf**

Aachen, Mai 2010

Inhalt

1	Veranlassung und Projektziele	1
2	Grundlagen	5
2.1	Photokatalyse mittels Titandioxid	5
2.1.1	Titandioxid	5
2.1.2	Das Bändermodell	7
2.1.3	Photokatalyse	8
2.1.4	Potentielle Anwendungen von TiO ₂ -Photokatalysatoren	9
2.2	TiO ₂ -Photokatalysatoren in Pflastersteinen	11
3	Projektverlauf	12
4	Untersuchungen zum Einsatz von Pflastersteinen mit Titandioxid	14
4.1	Untersuchungen zur photokatalytischen Aktivität einzelner Pflastersteine .	14
4.1.1	Schadstoffbeladung der Pflastersteine	15
4.1.2	Bewitterung/Bestrahlung der Pflastersteine.....	15
4.1.3	Bestimmung der Restbelastung	19
4.2	Untersuchungen von Probepflasterflächen hinsichtlich Schadstoffeinträgen (Beregnungsversuche)	19
5	Ergebnisse	20
5.1	Untersuchungen mit künstlicher Bewitterung	20
5.2	Untersuchungen mit Freibewitterung.....	23
5.3	Vergleich künstliche Bewitterung und Freibewitterung	25
5.4	Reinigungspotential.....	26
6	Zusammenfassung	28
	Literatur	30

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Titandioxid, AQUA TITAN, Pflasterfläche.....	3
Abbildung 2: Öltropfen auf Pflastersteinen mit und ohne Titandioxidzusatz.....	4
Abbildung 3: Schadstoffabbau mittels natürlicher und künstlicher Lichtquellen ...	6
Abbildung 4: Mechanismus des photokatalytischen Prozesses von TiO_2	9
Abbildung 5: Versuchsstand Sonnenlichtsimulation.....	16
Abbildung 6: Versuchsstand Freibewitterung mit Wetterstation	17
Abbildung 7: Wetterdatenvergleich	18
Abbildung 8: Prüfstand Beregnung	19
Abbildung 9: Reduktion der Kohlenwasserstoffe in Abhängigkeit von der Bestrahlungsdauer	20
Abbildung 10: Ergebnisse der Bestrahlungsversuche von Altöl (Wiederfindungsrate).....	21
Abbildung 11: Nachweisbare Restbelastung mit KW – nach 4 und 24 Stunden Bestrahlung.....	22
Abbildung 12: Nachweisbare Restbelastung mit KW – unterschiedliche TiO_2 - Anteile	23
Abbildung 13: Freibewitterung – Vergleich zweier Versuchsreihen.....	24
Abbildung 14: Vergleich der Ergebnisse – künstliche Bewitterung und Freibewitterung	25
Abbildung 15: Durchschnittliche tägliche Strahlung in Deutschland (Vaillant)....	26

1 Veranlassung und Projektziele

Mit Schreiben vom 13.05.2008 der Deutschen Bundesstiftung Umwelt wurden die Menk'schen Betonsteinwerke GmbH & Co. KG, das Prüf- und Entwicklungsinstitut für Abwassertechnik an der RWTH Aachen e.V. (PIA e.V.) und das Ingenieurbüro Bokatec beauftragt, im Rahmen des Vorhabens „Untersuchung des Abbaus anthropogen verursachter organischer Verschmutzungen und der Auswirkung auf die Behandlung von Niederschlagswasser auf der photokatalytischen Oberfläche von wasserundurchlässigen Pflastersteinen“ (AZ 25884) Untersuchungen zum Einsatz von Pflastersteinen mit Titandioxid durchzuführen.

Ziele des Vorhabens waren Entwicklung und Optimierung von Pflastersteinen, die anthropogen verursachte Verschmutzungen, wie z. B. Öl auf gewerblich genutzten Flächen, an ihrer Oberfläche durch Photokatalyse abbauen. Auf vom Verkehr genutzten befestigten Flächen kommt es zu Verschmutzungen, z.B. durch Ölverlust oder Reifenabrieb. Die von diesen Flächen bei Niederschlagsereignissen abfließenden, stark verschmutzten Abwässer gelangen in die Gewässer, in das Grundwasser oder in die Kanalisation.

Im Rahmen der Umsetzung der EU-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) ist es sinnvoll, neue Entwicklungen zum Umgang mit Niederschlagswasser zu betrachten. Die WRRL bringt neue Impulse für einen ökologisch ausgerichteten ganzheitlichen Gewässerschutz und schafft einen Ordnungsrahmen für den Schutz von Oberflächengewässern und Grundwasser. Zielsetzung ist das Erreichen eines guten ökologischen, bzw. mengenmäßigen und chemischen Zustandes bis 2015 gemäß der Vorgaben des Anhanges V der WRRL. Die Entsiegelung befestigter Flächen stellt eine Möglichkeit dar, das Erreichen der Umweltziele für Oberflächengewässer und Grundwasser der (WRRL) zu unterstützen.

Die dezentrale Regenwasserbewirtschaftung stellt eine Möglichkeit zum Umgang mit Regenwasser in Siedlungsgebieten dar. Es wird das Ziel verfolgt, das Abflussverhalten und die Wasserbilanz von befestigten Flächen an unbebaute, natürlich bewachsene Flächen anzunähern. Bei befestigten Flächen kann die Regenwasserversickerung einen entscheidenden Beitrag leisten.

Die Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V (DWA) erstellt für die Bereiche Wasserwirtschaft, Kulturbau, Bodenschutz, Abwasser- und Abfalltechnik einheitliche technische Regeln und gibt sie im DWA-Regelwerk heraus. Das Regelwerk enthält Aussagen zu Planung, Bau, Betrieb, Unterhaltung und Überprüfung von Anlagen sowie zur nachhaltigen Nutzung von Wasser und Boden. Im Arbeitsblatt A 138 „Planung, Bau und Betrieb von Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser“ (DWA, 2005) werden durchlässig befestigte Oberflächen, wie z.B. Pflasterungen mit aufgeweiteten Fugen, grundsätzlich nicht mehr als Anlagen der Flächenversickerung angesehen. Daher können diese Flächen nur zur Abflussminderung eingesetzt werden, nicht aber als Behandlungsmaßnahme im Sinne des Bewertungsverfahrens nach dem DWA Merkblatt M 153 verstanden werden.

Zur Erweiterung der Anwendungsmöglichkeiten wasserdurchlässiger Flächen hinsichtlich der Verschmutzung des anfallenden Niederschlagswassers wurden vom Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) die Zulassungsgrundsätze für abwasserbehandelnde Flächenbeläge veröffentlicht. Pflasterflächen, die eine solche Zulassung erhalten haben, gelten als Anlagen zur Begrenzung von Kohlenwasserstoffen, sie können anthropogen verursachte Verschmutzungen durch ihr Rückhaltevermögen speichern. Allerdings muss hier die zeitliche und örtliche Verlagerung des Problems berücksichtigt werden, da aufgrund des begrenzten Aufnahmevermögens die Pflasterflächen nach Erschöpfung der Aufnahmekapazität diese Aufgabe nicht mehr erfüllen können. Die Flächen müssen dann gereinigt werden, d.h. die Verschmutzungen werden aus den Steinen und Fugen entfernt und müssen entsorgt werden. Dies führt zu räumlicher und zeitlicher Verlagerung der Schadstoffproblematik.

Vor diesem Hintergrund wurde ein neuartiger Belag für gepflasterte Flächen konzipiert. Der zugrunde liegende Ansatz basiert auf einem von Dr. Reinhard Boller zum Patent angemeldeten Verfahren zur Reinigung von befestigten Flächen und von abfließendem Niederschlagswasser durch einen aktiven Abbau der organischen Verschmutzungen an der Oberfläche von Steinen. Hierbei handelt es sich um wasserundurchlässige Pflastersteine, welche aufgrund der Fugen und

Versickerungstaschen als versickerungsfähiger Flächenbelag ausgeführt werden. Der oberen Vorsatzschicht dieser Pflastersteine wird Titandioxid zugegeben, wodurch eine photokatalytisch wirksame Oberfläche entsteht. Verschmutzungen können von diesen Pflastersteinen durch den Vorgang der Photokatalyse abgebaut werden. Als Photokatalysator werden neu entwickelte Titandioxidprodukte eingesetzt, die nicht nur UV-Strahlung, sondern auch Teile des sichtbaren Lichtes nutzen können.



Abbildung 1: Titandioxid, AQUA TITAN, Pflasterfläche

Die möglichen Anwendungsgebiete dieses innovativen Pflastersteines liegen sowohl im Bereich von Privatgrundstücken als auch bei Gewerbebetrieben bis hin in den öffentlichen Bereich. Da besonders im öffentlichen Bereich (z.B. Fußgängerzonen) und bei Gewerbebetrieben (z.B. Speditionshöfe) große Flächen zu pflastern sind, kann dieses innovative Produkt bei entsprechender Nachfrage effektiv produziert werden.

Im Rahmen von Vorarbeiten zu diesem Vorhaben wurden qualitative Untersuchungen durchgeführt, die das Verhalten der Pflastersteine hinsichtlich Ölverschmutzungen darstellen. In der folgenden Abbildung sind exemplarisch Ergebnisse dieser Arbeiten dargestellt.

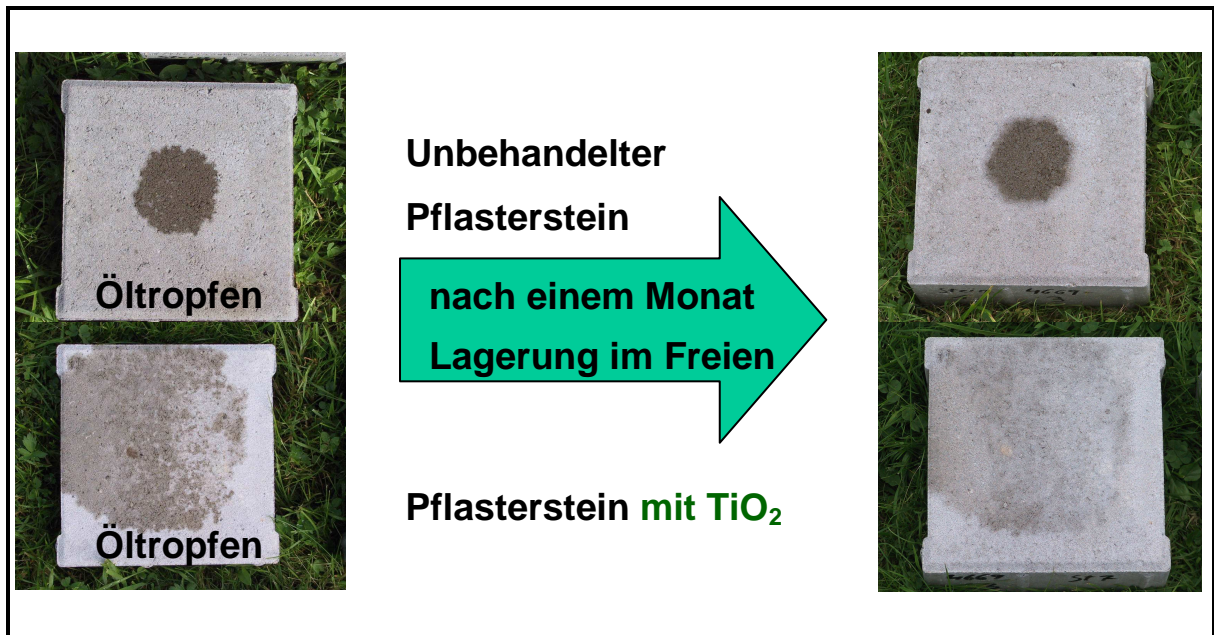


Abbildung 2: Öltropfen auf Pflastersteinen mit und ohne Titandioxidzusatz

Es wurde jeweils die gleiche Menge Altöl (3 ml) auf die Pflastersteine gegeben. Anschließend wurden diese Steine einen Monat lang im Freien gelagert. Der photokatalytisch aktive Stein zeigte zum einen eine größere Spreitung des Öls und zum anderen ein Verblasen des Flecks. Diese Untersuchungen zeigten eine deutlich erkennbare Reduzierung der Verschmutzungen. Im Rahmen dieses Projektes sollte die Quantifizierung der Ergebnisse der Vorarbeiten erfolgen.

2 Grundlagen

2.1 Photokatalyse mittels Titandioxid

2.1.1 Titandioxid

Titandioxid (TiO_2) wird als reines Weißpigment (Anatas / Rutil) bereits seit den 20er Jahren des letzten Jahrhunderts eingesetzt (KRONOS, 1967). Die seit langem bekannten halbleitenden Eigenschaften von TiO_2 (Bandlückenabstand beim Anatas 3,2 eV, entspricht 388 nm Grenzwellenlänge, und beim Rutil 3,0 eV, entspricht 413 nm Grenzwellenlänge) werden zur Absorption von UV-Strahlung genutzt. Diese Absorption der für organische Moleküle äußerst aggressiven Strahlung verhindert die Zerstörung der polymeren Matrix des organischen Bindersystems. Die absorbierte UV-Strahlung erzeugt jedoch an der TiO_2 -Pigmentoberfläche Radikale, welche ihrerseits polymere Moleküle schädigen können (Völz et al., 1976). Um diesen Prozess zu unterbinden, werden TiO_2 -Pigmente entweder mit verschiedenen Metalloxiden, wie Aluminium-, Silizium- oder Zirkonoxid, beschichtet, oder mit geeigneten Rekombinationszentren für das gebildete Elektronen-Loch-Paar im Inneren des TiO_2 -Festkörpers ausgestattet.

Seit den späten 1970'ern werden die halbleitenden Eigenschaften des TiO_2 in der Richtung einer Nutzbarmachung der Photokatalyse erforscht. Jetzt galt es nicht mehr den Prozess zu unterdrücken, sondern zu fördern und auf andere Wellenlängenbereiche als die UV-Strahlung zu erweitern (siehe Abb. 3; Dorgeloh et al., 2009).

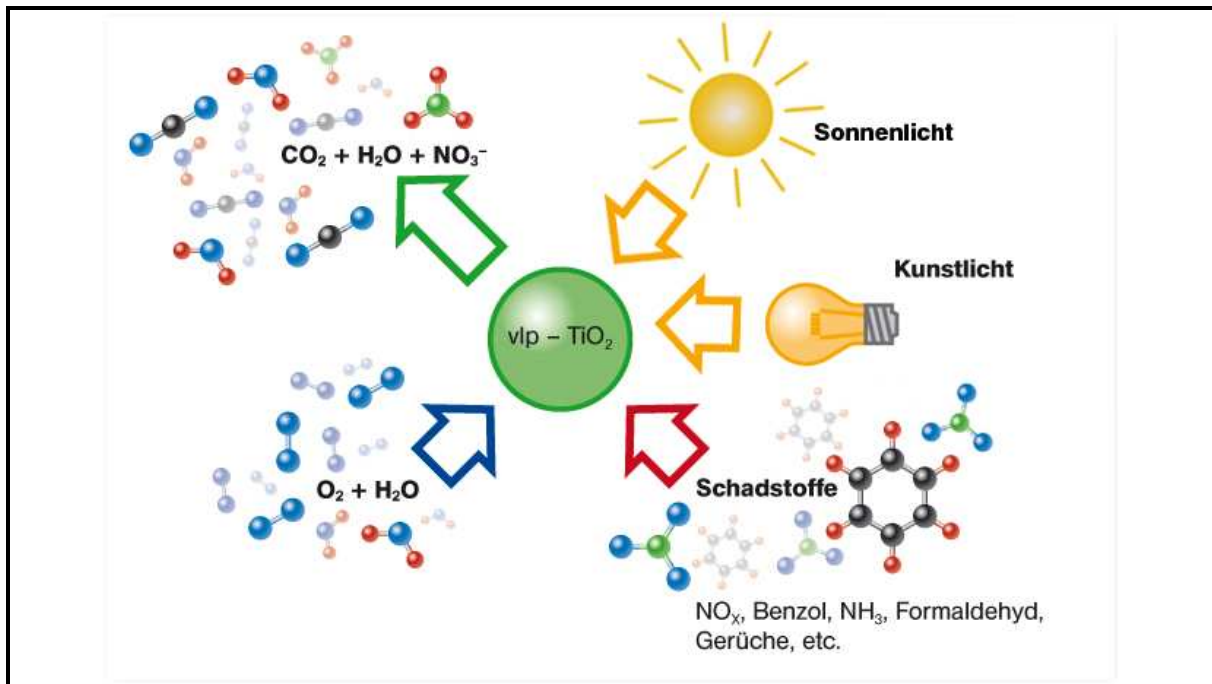


Abbildung 3: Schadstoffabbau mittels natürlicher und künstlicher Lichtquellen

Erste Untersuchungen im Labor haben gezeigt, dass die erzeugten Radikale aus dem photokatalytischen Prozess in der Lage sind Schadstoffe, wie z.B. giftige Gase und unangenehme Gerüche, oxidativ anzugreifen (Böök, 2005).

Umweltverträglichkeit (KRONOS, 2009)

Titandioxid (TiO_2) gilt als unbedenklicher Zuschlagstoff in vielen Bereichen des täglichen Lebens. Dies liegt insbesondere an der chemischen Beständigkeit unter den typischerweise auftretenden Bedingungen. So ist TiO_2 in biologisch-chemischen Medien unlöslich. Aus diesem Grund werden TiO_2 -Pigmente seit Jahren in sensiblen Anwendungen, wie Pharmazie/Medizintechnik, Lebensmittel- und Tabakindustrie erfolgreich und problemlos eingesetzt. Des Weiteren wird Titandioxidpigment bei Inhalationsstudien aufgrund seiner inerten Eigenschaften häufig als negative Kontrollsubstanz eingesetzt.

Titandioxid-Photokatalysatoren unterscheiden sich von den Pigmenten lediglich in der Partikelgröße und können somit in chemischer Hinsicht als gleichwertig angesehen werden. Die Photokatalysatoren werden zwar nanotechnologisch hergestellt, liegen aber als Agglomerate oder Aggregate vor. Bei Agglomeraten handelt es sich um eine Ansammlung schwach gebundener Partikel, Aggregate hingegen bestehen aus fest gebundenen oder verschmolzenen Partikeln.

Die TiO₂-Photokatalysatoren von KRONOS wurden toxikologisch untersucht und sind weder augen- noch hautreizend. Auch konnte keine klastogene oder mutagene Wirkung nachgewiesen werden. Ökotoxikologische Untersuchungen gemäß OECD 201, 202, 203 (an Algen, Daphnien und Fischen) haben gezeigt, dass diese TiO₂-Photokatalysatoren für die Umwelt nicht gefährlich sind.

2.1.2 Das Bändermodell

Das Valenzband (VB) und das Leitungsband (LB) sind bei einem Halbleiter voneinander separiert (Bandlückenabstand 0,4 - 4,0 eV). Durch geeignete Energie, z. B. etwas erhöhte Temperatur als die Raumtemperatur oder normale Strahlung, kann ein Elektron (e-) vom VB ins LB angehoben werden. Das resultierende „verlorene Elektron“ im VB wird Loch (h+) genannt und hat ebenso wie das Elektron die Möglichkeit im Band hin und her zu wandern. Wenn die genutzte Anregungsenergie durch einfallende Lichtstrahlung geliefert wird, spricht man von einem Photo-Halbleiter. Die Strahlung zur Anregung eines Elektrons im Anatas muss maximal 388 nm (UV(A)-Licht), im Rutil maximal 413 nm (violett Licht) betragen. Zusätzlich zu den spezifischen Eigenschaften eines Materials können kleine Änderungen im Bändermodell durch die Dotierung des Feststoffes mit einigen chemischen Elementen erzeugt werden. Hierbei werden gezielt Gitterfehler in die Kristallstruktur eingebaut. Bei Dotierungen werden zumeist punktförmige, bzw. nulldimensionale Gitterfehler erzeugt. Dabei können die Dotiersubstanzen Ionen im anionischen oder kationischen Untergitter ersetzen und somit leichte Verzerrungen in der Gitterstruktur verursachen, oder im Gitter wird ein punktueller Elektronen-Überschuss, bzw. -Unterschuss erzeugt, welcher zu Veränderungen der elektrischen Eigenschaften führt. Diese Verzerrungen resultieren in Änderungen im Bändermodell durch Erzeugung von Zwischenzuständen oder Deformationen der Bänder selbst. Folgt man der Theorie zur Anregung eines Elektrons durch Strahlung, so verschiebt sich die Grenzwellenlänge ebenfalls. Bei der Dotierung von TiO₂ mit Kohlenstoff (Sakthivel et al., 2003; Choi et al., 2004; Kisch et al., 2002; Irie et al., 2003) im kationischen Untergitter, verschiebt sich die Grenzwellenlänge bis in das sichtbare Spektrum. Dies bedeutet, dass z. B. nur noch 2,32 eV statt 3,2 eV im Falle des Anatas überwunden werden müssen.

2.1.3 Photokatalyse

Katalyse ist definiert, als die Beschleunigung/Verlangsamung einer chemischen Reaktion durch spezielle Substanzen (Katalysatoren genannt), welche hierbei nicht verbraucht werden. Meistens findet Katalyse statt, indem die Aktivierungsenergie erniedrigt/erhöht wird. Dies bedeutet, dass die Kinetik einer Reaktion, nicht aber die Thermodynamik, verändert wird. Wichtig für einen definitionsgemäß katalytischen Reaktionsweg ist, dass der Katalysator nach Ablauf der Reaktion im gleichen Zustand wie zu Anfang wieder vorliegt. Folgt man dieser Definition, kann Strahlung oder die Teilchen-Repräsentation einer elektromagnetischen Welle, ein Photon, nicht als Katalysator bezeichnet werden, da die Energie eines Photons aufgenommen und für die chemische Reaktion verbraucht wird. Somit wird am Ende der Reaktion auch kein Photon im selben Zustand wieder emittiert. Wird dies berücksichtigt, müsste die Formulierung präzisiert werden und der Begriff „lichtinduzierte Katalyse“ statt Photokatalyse verwendet werden. Der Begriff „Photokatalyse“ hat sich jedoch der Einfachheit halber durchgesetzt und gilt als etabliert. Ein bekanntes Beispiel aus der Natur für eine lichtinduzierte Katalyse ist die Photosynthese bei Pflanzen. Grundsätzlich ist die Photokatalyse von der Photolyse, also der Spaltung eines Moleküls durch eingebrachte Strahlung, zu unterscheiden. Das sichtbare Licht ist zur reinen Photolyse meist energetisch zu schwach, so dass wieder der Weg über eine Katalysatorstufe genommen werden muss. Halbleiter können ebenso als Photokatalysatoren arbeiten, indem sie die Energie des Lichtes absorbieren und in chemische Energie in Form reaktiver Spezies umwandeln (siehe Bild 4; Dorgeloh et al., 2009).

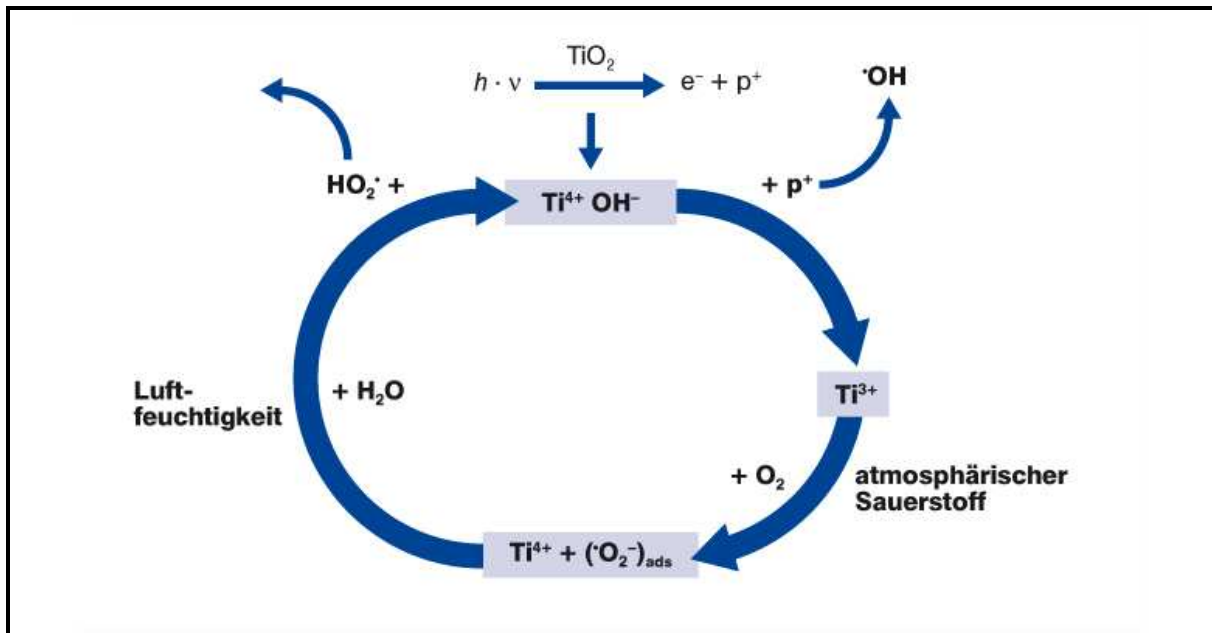


Abbildung 4: Mechanismus des photokatalytischen Prozesses von TiO_2

Der photokatalytische Prozess startet mit der Absorption von Licht einer bestimmten Wellenlänge. Diese Energie reicht aus, ein Elektron vom VB ins LB anzuheben. In den Bändern kann das somit erzeugte Elektronen-Loch-Paar bis zur Kristalloberfläche wandern, wo adsorbiertes Wasser (H_2O) und Sauerstoff (O_2) in Radikale umgewandelt werden. Diese Umwandlung ist in zwei Zweige aufgeteilt:

- Reduzierung des Sauerstoffs durch das Elektron im Leitungsband mit anschließender Bildung eines Perhydroxyl-Radikals (HO_2^\bullet) und
- Oxidation des Wassers durch das Loch im Valenzband mit anschließender Bildung eines Hydroxyl-Radikals (HO^\bullet).

Diese Radikale, die ebenso durch die natürliche UV-Bestrahlung von Wasser in der Stratosphäre erzeugt werden, können organische Moleküle (z. B. aromatische und aliphatische Kohlenwasserstoffe), wie auch nicht voll oxidierte anorganische Moleküle (z. B. Stickoxide, Kohlenmonoxid) durch oxidative Prozesse angreifen. Die Schadstoffe werden dabei bis zu ihrer höchsten Oxidationsstufe oxidiert (z. B. Kohlenstoffdioxid), bzw. mineralisiert (z. B. Kohlensäure).

2.1.4 Potentielle Anwendungen von TiO_2 -Photokatalysatoren

An reinen TiO_2 -Oberflächen wird Wasser und Sauerstoff sehr gut adsorbiert und bildet zusammen mit den sauerstoffhaltenden Radikalen eine hohe Konzentration an polaren Gruppen, welches den Effekt der Superhydrophilie

erzeugt. Dies bedeutet, dass der Kontaktwinkel zwischen der Oberfläche und Wasser unter 5° liegt. Durch diesen Effekt bleibt ein Tropfen Wasser auf der Oberfläche nicht länger rund, sondern spreizt sofort in einen dünnen Film. Einer der Mechanismen zur Reinigung von Oberflächen liegt in diesem Anti-Beschlag-Effekt und stellt damit das Gegenteil zur Superhydrophobie von Fluorsiloxanen oder dem so genannten Lotus-Effekt dar. Während ein Wassertropfen beim Lotus-Effekt die Ablagerung von der Oberfläche aufnehmen und dann abwaschen soll, wird das Wasser beim photokatalytisch aktiven TiO_2 in einem dünnen Film gleichmäßig verteilt und dann das Material mit abgeschwemmt. Wenn der beladene Wassertropfen trocknet, wird das fein verteilte Material am Rand des Tropfens auf der Oberfläche abgelagert. Es bleiben typische für das menschliche Auge gut sichtbare Trocknungsringe zurück.

Im Falle einer unbehandelten Oberfläche erzeugt die Oberflächenpolarität eine mehr oder weniger hydrophobe Situation. Hierbei wird das Material nur teilweise mit gewaschen, trocknende Tropfen erzeugen die typischen Tränenspuren. Das Trocknungsverhalten eines beladenen Wasserfilms endet in einer gleichmäßigen Pulverschicht, welche für das menschliche Auge nur schwer zu erkennen ist. Diese selbstreinigenden Eigenschaften werden schon an Glasoberflächen von Fenstern, Spiegeln und Fliesen eingesetzt. Zusätzlich zu diesem Anti-Beschlag-Effekt unterstützt die Photokatalyse die Reinigungseigenschaften, da anhaftende Schadstoffe zumindest teilweise in flüchtiges Kohlendioxid umgewandelt werden und somit die Haftkräfte zwischen Schmutz und Oberfläche reduziert werden.

Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass der photokatalytische Prozess an der Grenze zwischen TiO_2 und seiner direkten Umgebung abläuft, sollte möglichst viel Oberfläche geschaffen werden. Dies endet in einer Primär-Partikelgröße von wenigen Nanometern. Einer der häufigsten Parameter einen Katalysator zu charakterisieren, ist die spezifische Oberfläche, meistens durch Gas-Adsorption (z. B. BET Methode) gemessen. Werte von über $100 \text{ m}^2/\text{g}$ sind üblich, meist sogar über $250 \text{ m}^2/\text{g}$. Diese große Oberfläche die der Photokatalysator zur Verfügung stellt, sollte in den Anwendungen möglichst erhalten bleiben (z. B. raue Oberflächen). Um den photokatalytischen Kreisprozess aufrecht zu halten, benötigt das TiO_2 den direkten Kontakt zu Luft (Luftfeuchtigkeit und Luftsauerstoff) oder Wasser (gelöster Sauerstoff). Ebenso muss ein direkter Kontakt zu dem

abzubauenen Schadstoff möglich sein, wie auch die Bestrahlung mit Licht erfolgen. Für die meisten Anwendungen ist die Immobilisierung des Photokatalysators auf einem Substrat komfortabel, aber nicht zwingend notwendig.

2.2 TiO₂-Photokatalysatoren in Pflastersteinen

Bereits seit einigen Jahren werden Untersuchungen an Pflastersteinen bzw. Betonprodukten mit Titandioxid (UV-Bereich) hinsichtlich des Abbaus von Stickoxiden in der Umgebungsluft durchgeführt. Es gibt bereits einige Modellprojekte, bei denen diese Produkte in der Praxis eingesetzt wurden.

3 Projektverlauf

Im Rahmen dieses Projektes „Untersuchung des Abbaus anthropogen verursachter organischer Verschmutzungen und der Auswirkung auf die Behandlung von Niederschlagswasser auf der photokatalytischen Oberfläche von wasserundurchlässigen Pflastersteinen“ (AZ 25884) wurden von März 2008 bis Februar 2010 von den Menk'schen Betonsteinwerken, dem Prüf- und Entwicklungsinstitut für Abwassertechnik an der RWTH Aachen e.V. (PIA e.V.) und dem Ingenieurbüro Bokatec Untersuchungen zum Einsatz von Pflastersteinen mit Titandioxid durchgeführt.

Im Rahmen der Projektarbeit wurden Probepflastersteine entwickelt und produziert. Während des Projektverlaufs wurden insgesamt ca. 150 Probesteine untersucht. Bei diesen Probesteinen handelte es sich um unbehandelte Pflastersteine und Pflastersteine mit verschiedenen Titandioxidprodukten und -anteilen (2 bis 8 Gew.-%).

Für die Untersuchungen musste eine neue Methodik zum Nachweis von photokatalytisch aktiven Pflastersteinen entwickelt werden, da bisher keine vergleichbaren Produkte existierten.

Die untersuchten Probesteine stammten aus sechs verschiedenen Probeproduktionen, mit z.T. unterschiedlichen Herstellungsverfahren oder Titandioxidzusätzen. In Abhängigkeit der jeweiligen Analyseergebnisse erfolgte die Entwicklung geeigneter Probesteine.

Aus diesen Gründen konnten ca. 30% der Ergebnisse der untersuchten Probesteine nicht für die Auswertung genutzt werden. Für die Probesteine wurden zunächst handgemischte Rezepturen verwendet, so dass kleine Mengen hergestellt werden konnten. Für eine bessere Verteilung der Titandioxidzusätze wurde jedoch auf maschinelle Fertigung umgestellt. Diese Steine mussten im Anschluss für die Untersuchungen geschnitten werden.

Aufgrund dieser unterschiedlichen Voraussetzungen konnte anhand der Untersuchungen zwar eine photokatalytische Aktivität der neuartigen Pflastersteine hinsichtlich Kohlenwasserstoffen nachgewiesen werden, aber eine statistische Absicherung und allgemeine Quantifizierung konnte nicht erfolgen.

Das Titandioxid wird derzeit in Form einer Slurry dem Zement beigemischt. Im Mai 2009 wurde festgestellt, dass die Slurry der letzten Probeproduktion (Dezember 2008) nicht lagerstabil war. Titandioxidmaterial hatte sich am Boden abgesetzt. Daraufhin fanden umfangreiche Arbeiten zur Entwicklung einer neuen – lagerstabilen – Slurry statt. Diese wurde bei der Probeproduktion im August 2009 eingesetzt. Es zeigten sich erneut Schwierigkeiten. Bei der Vermischung des Zementes mit der Slurry fanden exotherme Reaktionen statt. Die Mischung erwärmte sich und verhärtete innerhalb kurzer Zeit, so dass eine Verarbeitung kaum möglich war. Steine, die optisch dem Qualitätsstandard entsprachen wurden im November 2009 dem PIA für Untersuchungen zur Verfügung gestellt. Es konnte aber weder eine photokatalytische Aktivität noch ein Stickoxidabbau nachgewiesen werden.

Daraufhin wurden Gespräche mit einem neuen Slurryhersteller geführt, um ein Produkt zu entwickeln, das für den Anwendungsfall „photokatalytische Pflastersteine“ geeignet ist. Dieses Produkt steht nun zur Verfügung und soll noch Ende Mai 2010 im Rahmen einer Probeproduktion getestet werden.

Aufgrund dieser produktionstechnischen Schwierigkeiten, konnten weder Freibewitterungsversuche im Sommer, noch Beregnungsversuche durchgeführt werden.

4 Untersuchungen zum Einsatz von Pflastersteinen mit Titandioxid

Im Wesentlichen gibt es zwei verschiedene Untersuchungsansätze. Zum einen muss der Nachweis über die Wirksamkeit der einzelnen Pflastersteine erbracht werden. Zum anderen müssen die Schadstoffeinträge von gepflasterten Flächen in den Boden untersucht werden. Im Rahmen des Projektes wurde der Schwerpunkt zunächst auf den Nachweis der Wirkungsweise einzelner Steine gelegt, da nur diese Untersuchungen die theoretischen Grundlagen der Photokatalyse belegen können und damit eine Schadstoffbilanzierung ermöglichen.

4.1 Untersuchungen zur photokatalytischen Aktivität einzelner Pflastersteine

Im Rahmen des Projektes wurden vom PIA an der RWTH Aachen Untersuchungen zur Wirkungsweise der Pflastersteine durchgeführt. Die Ermittlung der photokatalytischen Aktivität der Pflastersteine erfolgte nach folgender Vorgehensweise:

- Pflastersteine kontrolliert verschmutzen
- Pflastersteine bewittern/bestrahlen (Kunstlicht oder Freibewitterung)
- Bestimmung der verbliebenen Verschmutzungen
- Frachtbilanzierung

Erste Untersuchungen mit den Pflastersteinen zeigten, dass die Versuchsdurchführungen erheblich von den Analysemöglichkeiten abhängig sind. Bei ersten Berechnungen belasteter Steine entstand ein Wasser-Öl-Gemisch, aus dem keine repräsentative Probe entnommen werden konnte. Weiterhin stellten nicht erfassbare Ölrückstände an Steinen, Versuchsaufbauten und Probenahmegefäßen ein Problem dar. Aufgrund der Probleme während dieser Versuche, wurde bei den Untersuchungen auf Berechnungen verzichtet.

Für die Versuche wurden Probesteine entwickelt, deren Größe und Form in Abhängigkeit des Analyseverfahrens gewählt wurden.

4.1.1 Schadstoffbelastung der Pflastersteine

In Anlehnung an Vorarbeiten, die möglichen Einsatzgebiete und die Zulassungsgrundsätze des DIBt für abwasserbehandelnde Flächenbeläge, wurden zunächst Untersuchungen zum Einfluss der photokatalytisch aktiven Pflastersteine auf den Verschmutzungsparameter Öl (Kohlenwasserstoffe) durchgeführt. Die Verschmutzung der Pflastersteine im Rahmen dieser Untersuchungen erfolgte zunächst mit Altöl, da auf diese Weise auch optische Veränderungen der Steine beobachtet werden konnten. Im weiteren Verlauf der Untersuchungen wurde eine Kohlenwasserstoff-Standard-Lösung zur Verschmutzung der Pflastersteine eingesetzt. Zum Monitoring des Abbaus wurde ein Gemisch von $C_{18}H_{38}$, $C_{24}H_{50}$, $C_{28}H_{58}$ in einer Konzentration von jeweils 10 g/l in Hexan eingesetzt. Die Steine wurden mit jeweils 2 ml (entspricht 20 mg jeder Substanz) beaufschlagt. Dies ermöglichte die Zuordnung und Bilanzierung der eingesetzten Kohlenwasserstoffe. Im Verlauf der verschiedenen Versuchsreihen zeigte sich, dass $C_{18}H_{38}$ für eine Bilanzierung zu leichtflüchtig ist.

4.1.2 Bewitterung/Bestrahlung der Pflastersteine

Bei der Bewitterung werden hauptsächlich die primären Wetterfaktoren berücksichtigt, d. h. Sonneneinstrahlung, Temperatur und Wasser (Feuchte).

Die Bewitterung bezieht sich auf die Beanspruchung durch Freiluftklima, d.h. durch die ungefilterte Sonnenstrahlung und natürliche Temperatur- und Feuchtewechsel, inklusive der Benässung durch Niederschläge. Die Bestrahlung hingegen bezieht sich auf die Beanspruchung durch relativ konstante Innenraumklima, d.h. durch die fensterglasgefilterte Sonnenbestrahlung bei relativ konstanter Temperatur und Luftfeuchte (relativer Feuchte), ohne Benässung. Bei der Bewitterung/Bestrahlung im Rahmen des Projektes wurden Mischformen eingesetzt.

Im Projekt wurden zwei Möglichkeiten der Bewitterung betrachtet; Freibewitterung und künstliche Bewitterung. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurde darauf geachtet, dass keine unkontrollierten Abspülungen von Verschmutzungen infolge einer Beregnung erfolgten. Aufgrund der Reproduzierbarkeit und der Zeitersparnis wurden zunächst Versuche mittels künstlicher Bewitterung durchgeführt. Die

Intensität des Strahlers zur Sonnenlichtsimulation war 12-fach höher als die natürliche Sonneneinstrahlung. Damit entsprachen zwei Stunden Bestrahlung ungefähr der Lichtausbeute eines Sommertages, inklusive Dunkelphasen.

Künstliche Bewitterung

Für die künstliche Bewitterung im Rahmen der Untersuchungen wurde ein Gerät genutzt, das natürliches Sonnenlicht simuliert. Es handelte sich um einen Metallhalogenid-Hochdruckstrahler mit einer Leistung von 1000 Watt. Der Transmissionsbereich des eingesetzten Filters beginnt bei 295 nm (UVB, UVA, VIS und IR). Die folgende Abbildung zeigt den Versuchsaufbau.

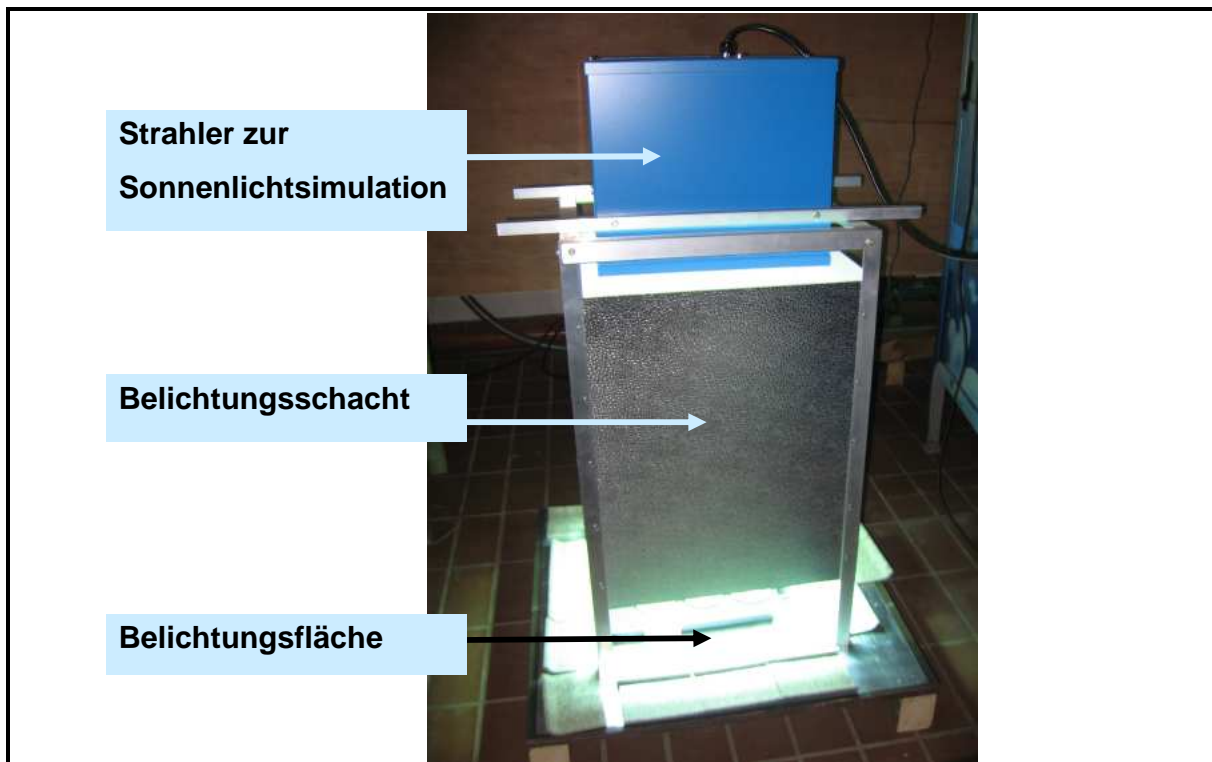


Abbildung 5: Versuchsaufbau Sonnenlichtsimulation

Da die Sonnenlichtsimulation auch Wärmeentwicklungen zur Folge hat, wurde die Temperatur der Probesteine während der Versuche gemessen. Zu Beginn der Bestrahlung stieg die Oberflächentemperatur der Steine innerhalb kurzer Zeit auf etwa 50 bis 55°C an und blieb dann, unabhängig von der Bestrahlungsdauer, konstant. Mit Hilfe eines Lüfters, der neben den Probesteinen auf der Belichtungsfläche aufgestellt wurde, konnte diese Temperatur auf ca. 40 bis 45°C gesenkt werden. Die relative Luftfeuchte im Belichtungsschacht und an der

Steinoberfläche schwankte zwischen 45 und 60%. Die gemessenen Werte waren identisch mit denen in der Versuchshalle.

Freibewitterung

Für die Freibewitterungsversuche wurde auf dem Gelände des PIA ein Versuchsstand aufgebaut, der in Abbildung 5 dargestellt ist. Zur Vermeidung von unkontrollierten Abspülungen von Verschmutzungen, wurden die Pflastersteine durch eine Glasabdeckung vor Niederschlag geschützt. Zur Auswahl einer Glasabdeckung wurden die Transmissionswerte des Glases für UV-Strahlung und VIS-Licht bestimmt.

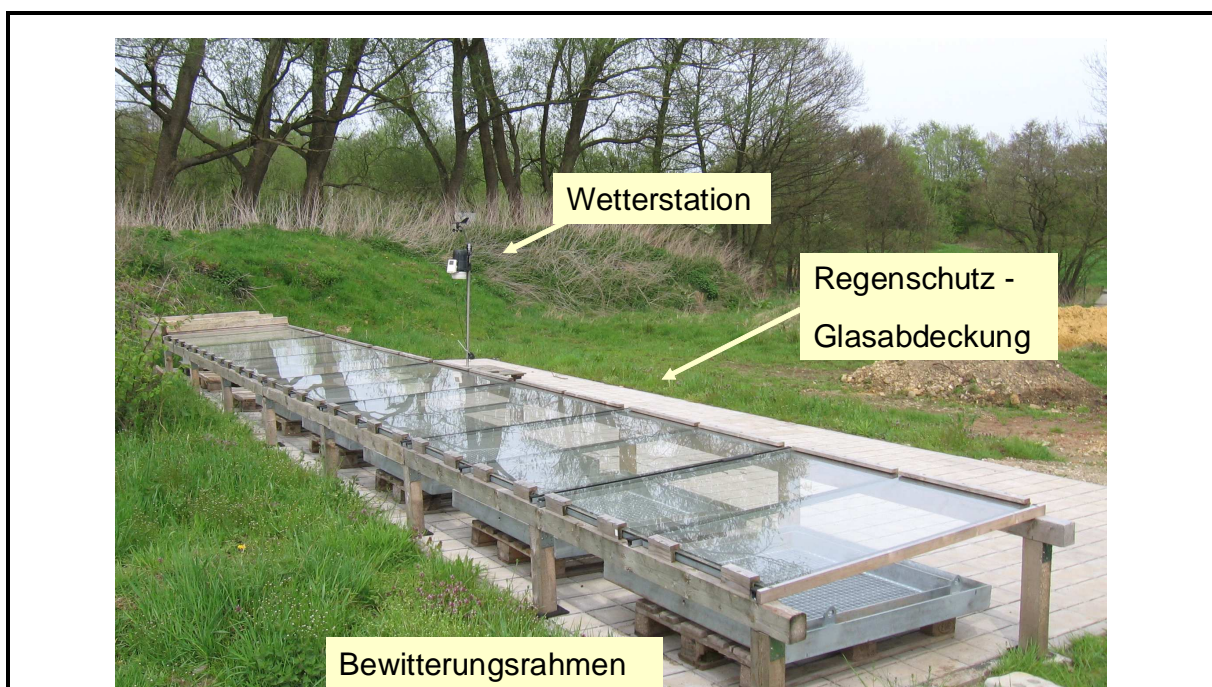


Abbildung 6: Versuchsstand Freibewitterung mit Wetterstation

Mit Hilfe einer Wetterstation, die Sensoren für z. B. Temperatur und Niederschlag, aber auch für die Globalstrahlung besitzt, wurde die für die Photokatalyse zur Verfügung stehende Bestrahlung in MJ/m^2 bestimmt. Da bei Schneefall und den Übergängen Hell-Dunkelphasen die Datenaufzeichnung nicht gewährleistet werden konnte, wurden die Daten mit denen der RWTH Wetterstation Aachen-Hörn verglichen. Die folgende Abbildung zeigt den Datenvergleich zweier Zeiträume.

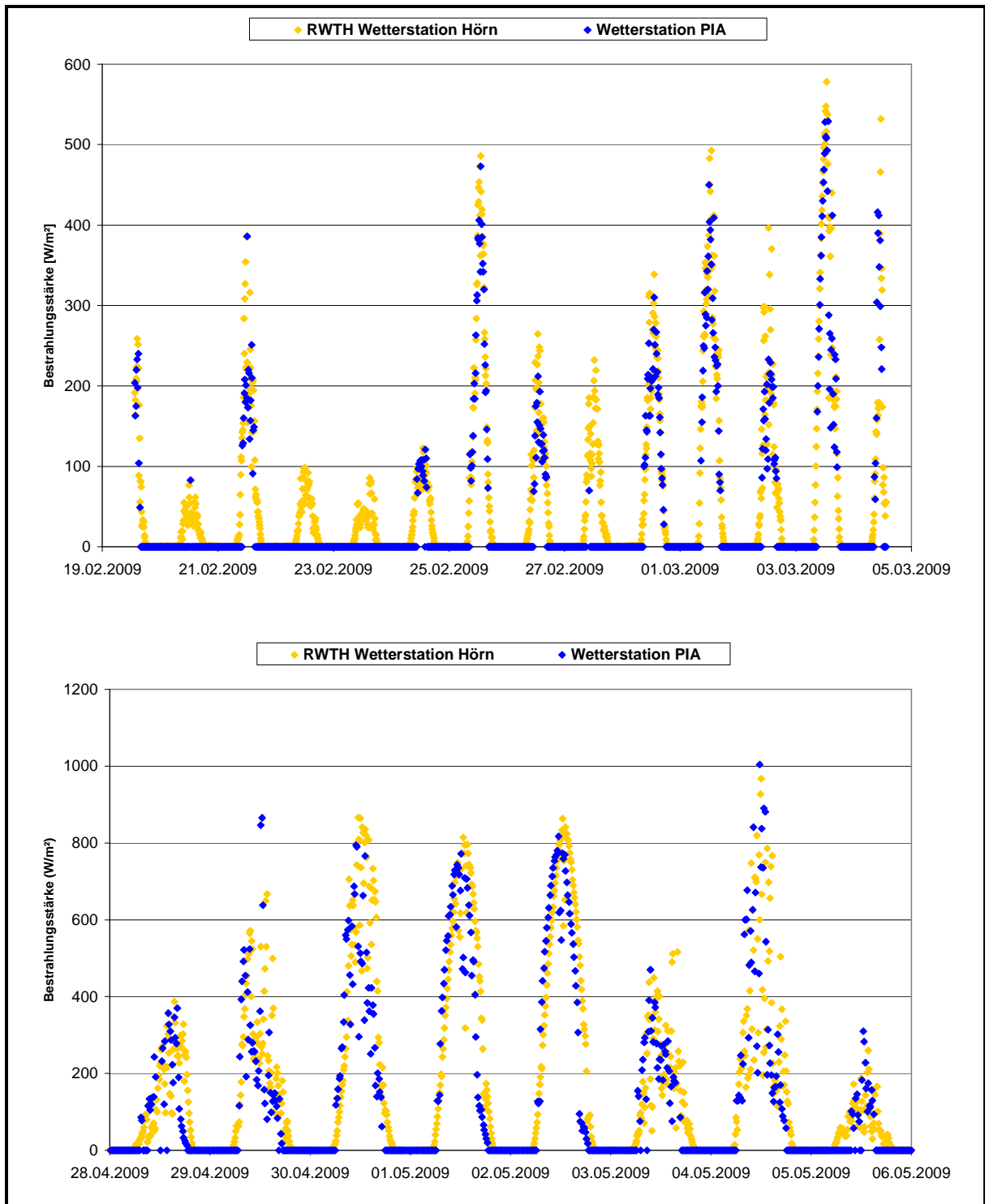


Abbildung 7: Wetterdatenvergleich

Die Abbildung verdeutlicht, dass die Verläufe und Spitzenwerte vergleichbar, bzw. teilweise nahezu identisch sind. Aufgrund der konstanten Aufzeichnung der Messwerte wurden für die Ermittlung der Bestrahlung (Summe über den gesamten Untersuchungszeitraum; MJ/m^2) die Daten der RWTH Wetterstation Hörn verwendet.

4.1.3 Bestimmung der Restbelastung

Nach jeder Versuchsreihe wurden die in den Probesteinen verbliebenen Kohlenwasserstoffe bestimmt. Dafür wurden die Steine in einem Backenbrecher auf eine Korngröße $< 1 \text{ mm}$ zerkleinert, die Probe mit 40 ml eines Cyclohexan/Acetongemisches (1:1) extrahiert und die Kohlenwasserstoffe mittels GC/FID bestimmt.

4.2 Untersuchungen von Probepflasterflächen hinsichtlich Schadstoffeinträgen (Beregnungsversuche)

Neben dem Nachweis der photokatalytischen Aktivität einzelner Pflastersteine muss eine Systembetrachtung erfolgen bei der das Zusammenwirken der Komponenten Pflasterstein, Fuge und Bettung hinsichtlich Schadstoffeinträge in den Boden untersucht wird. Im Rahmen des geförderten Projektes wurde ein Prüfstand für Beregnungsversuche in Anlehnung an die Zulassungsgrundsätze für abwasserbehandelnde Flächenbeläge des DIBt entwickelt und aufgebaut.

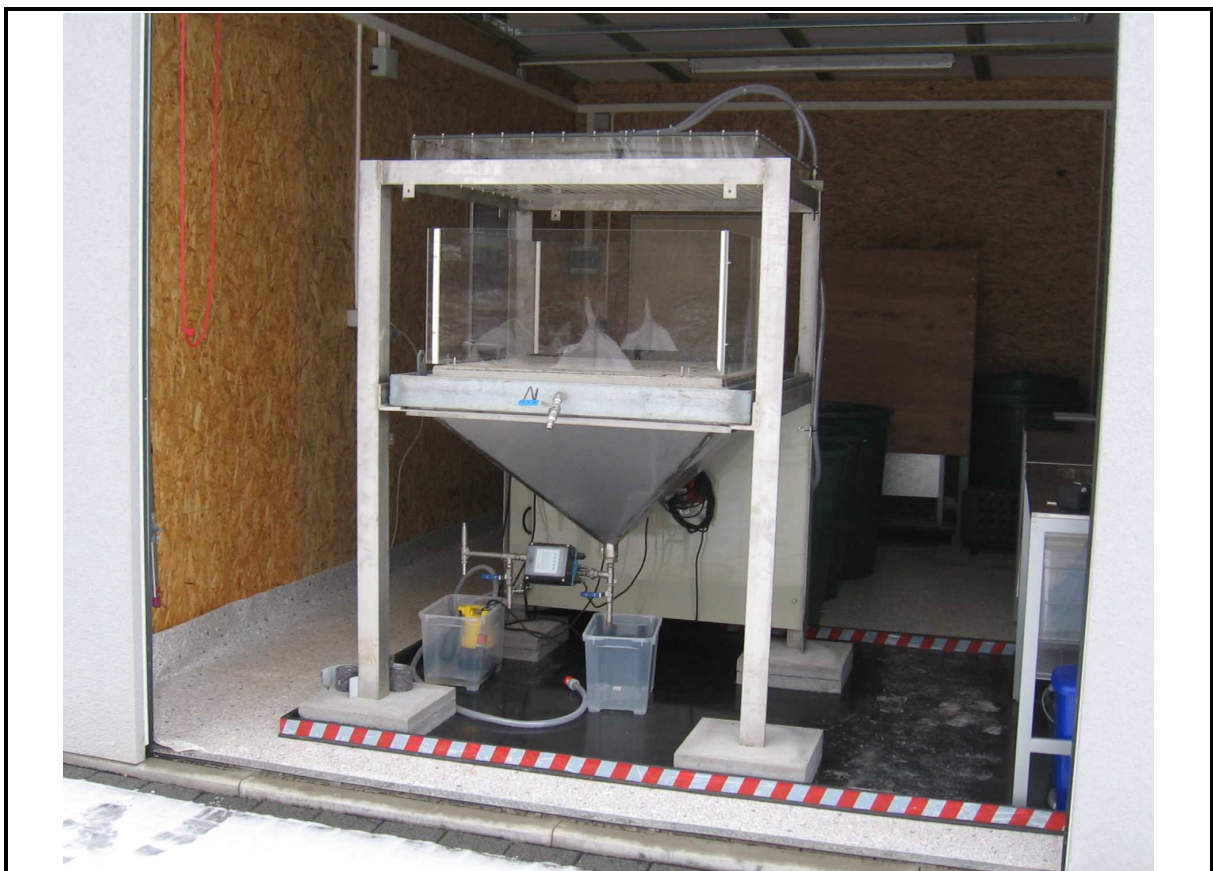


Abbildung 8: Prüfstand Beregnung

5 Ergebnisse

5.1 Untersuchungen mit künstlicher Bewitterung

Versuche mit Altöl

In der folgenden Abbildung ist die Reduktion der Kohlenwasserstoffe bei unbehandelten und behandelten Pflastersteinen von Versuchsreihen mit verschiedenen Bestrahlungsdauern dargestellt.

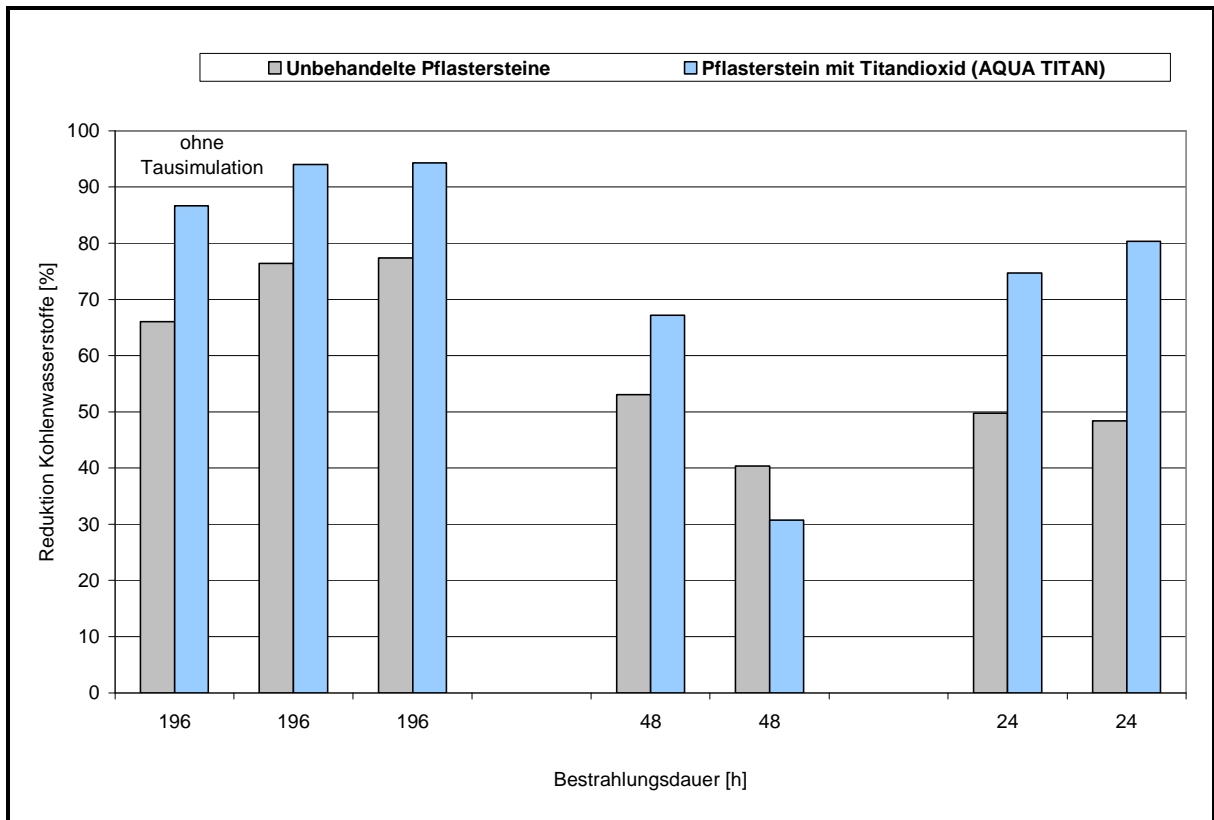


Abbildung 9: Reduktion der Kohlenwasserstoffe in Abhängigkeit von der Bestrahlungsdauer

Die Versuche zeigen, dass bei den behandelten Pflastersteinen in der Regel eine höhere Kohlenwasserstoffreduktion zu beobachten ist als bei unbehandelten Pflastersteinen. Es ist davon auszugehen, dass dies auf den Vorgang der Photokatalyse zurückzuführen ist.

Erstaunlich war, dass auch bei normalen Pflastersteinen eine Reduktion von Kohlenwasserstoffen beobachtet wurde. Um dies zu klären, wurden verschiedene Versuche durchgeführt, die Aufschluss über einen möglichen Einfluss der Bestrahlung auf das Öl geben sollten. Bei den ersten Versuchen wurden keine

Steine eingesetzt, sondern nur Altöl bestrahlt. Es wurden Versuchsreihen von 4 und 24 Stunden durchgeführt. Nach 24 Stunden Bestrahlung war eine Veränderung des Öls zu erkennen. Die Form des Ölflecks veränderte sich und es bildete sich eine Haut auf dem Öl (Verharzung). Nach vier Stunden Bestrahlung waren keine Veränderungen zu erkennen.

Nach der Bestrahlung wurden jeweils das Gewicht und die Kohlenwasserstoffe bestimmt. Die sichtbaren Veränderungen wurden durch die Analyseergebnisse bestätigt.

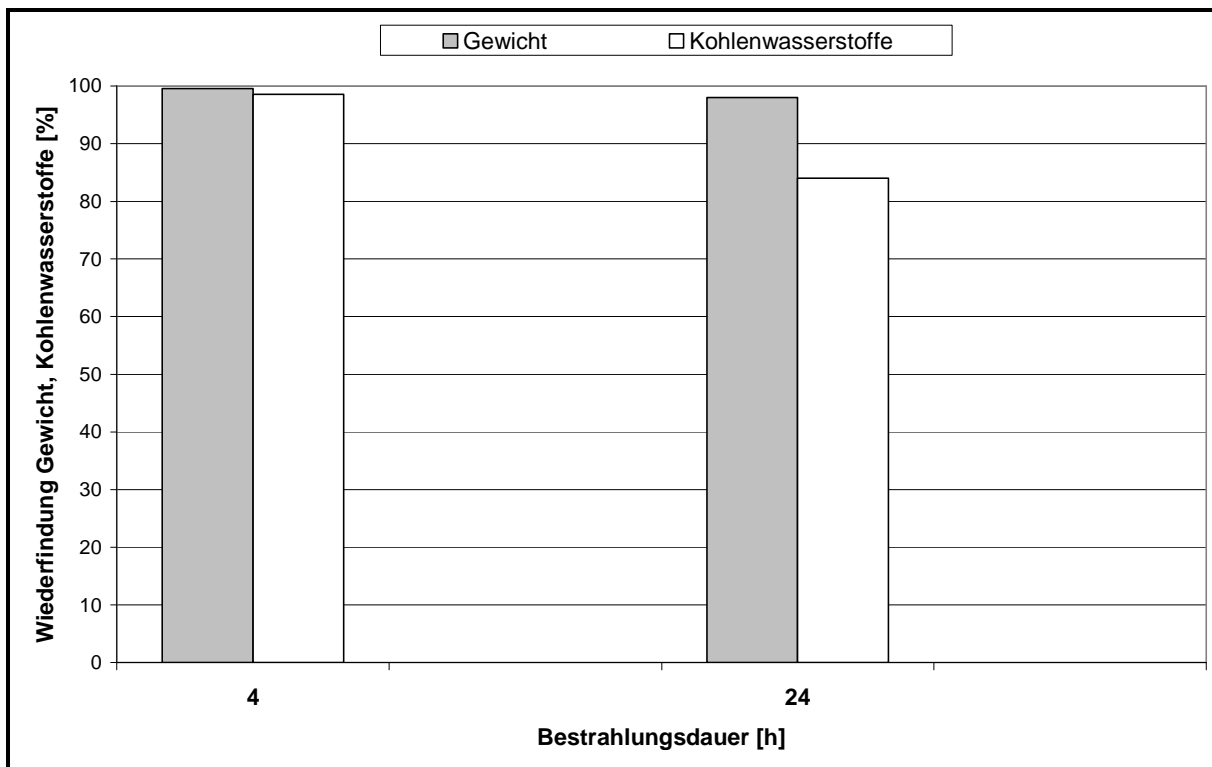


Abbildung 10: Ergebnisse der Bestrahlungsversuche von Altöl (Wiederfindungsrate)

Nach vier Stunden Bestrahlung wurden nahezu 100% des Gewichtes und der Kohlenwasserstoffe wieder gefunden. Anders war dies nach 24 Stunden. Es konnte näherungsweise das Ausgangsgewicht wieder gefunden werden, aber die Kohlenwasserstoffe waren um ca. 15% reduziert. Dies bedeutet, dass allein durch die Bestrahlung eine Umwandlung der Kohlenwasserstoffe in einen noch nicht definierbaren Stoff, bzw. Stoffgemisch erfolgte. Damit lässt sich ein Teil der Kohlenwasserstoffreduktion durch künstliche Bewitterung bei unbehandelten Pflastersteinen erklären.

Versuche mit Kohlenwasserstoff-Standard-Lösung

Weitere Untersuchungen mit der Kohlenwasserstoff-Standard-Lösung zeigten, dass bei Aufgabe der Verschmutzungen auf die Pflastersteine (unbehandelt und behandelt) unmittelbar jeweils ca. 15 bis 30% der Kohlenwasserstoffe durch Adsorption am Stein gebunden werden. Somit lässt sich ein weiterer Teil der Kohlenwasserstoffreduktion, unabhängig von der Bewitterungsart, bei unbehandelten und behandelten Pflastersteinen erklären.

In der folgenden Abbildung sind die Ergebnisse von zwei Versuchsreihen mit unterschiedlicher Bestrahlungsdauer dargestellt.

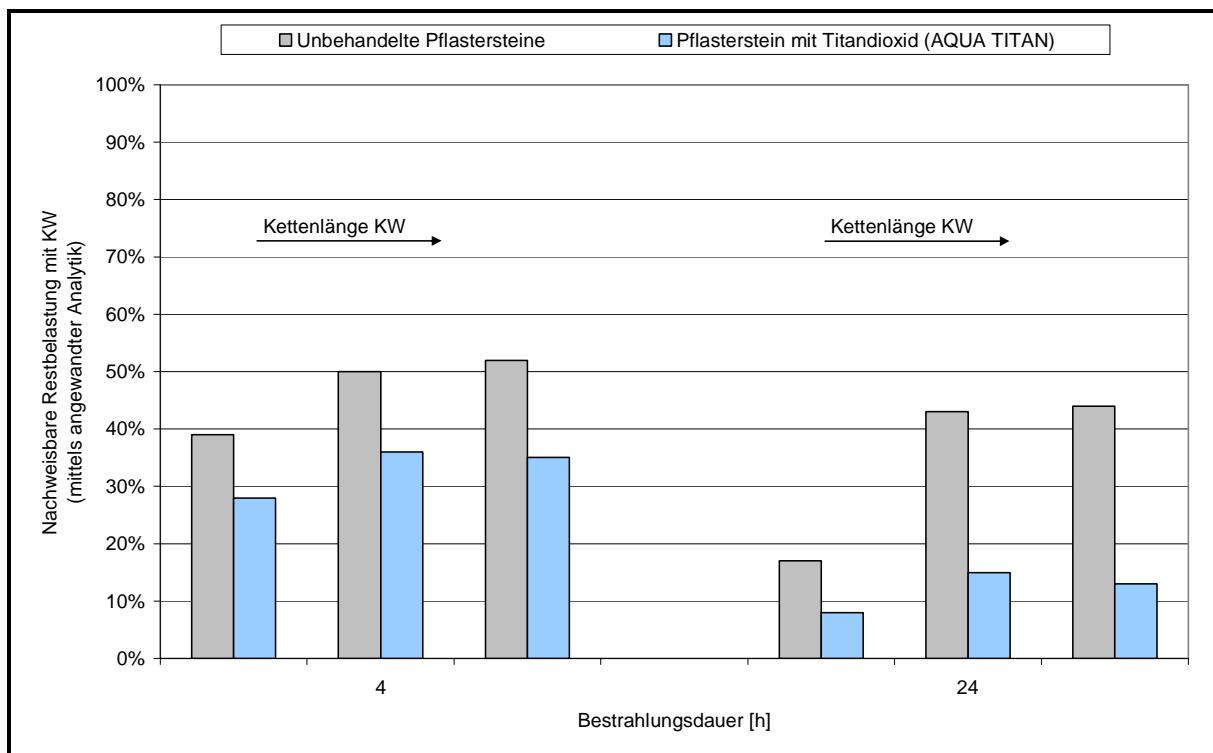


Abbildung 11: Nachweisbare Restbelastung mit KW – nach 4 und 24 Stunden Bestrahlung

Bei der Darstellung der Ergebnisse wurden die, mittels der angewandten Analytik, nachweisbaren Restbelastungen von Kohlenwasserstoffen in Pflastersteinen ohne und mit Titandioxid (AQUA TITAN) nach unterschiedlicher Bestrahlungsdauer verglichen. Die Versuche zeigten, dass bei den unbehandelten Pflastersteinen eine höhere Restbelastung mit Kohlenwasserstoffen zu beobachten war. Weitere Versuchsreihen bestätigten diese Ergebnisse.

Aufgrund der durchgeführten Untersuchungen konnte eine grundsätzliche photokatalytische Aktivität der neuartigen Pflastersteine mit Titandioxid hinsichtlich

Kohlenwasserstoffen nachgewiesen werden. Eine statistische Absicherung und allgemeine Quantifizierung konnte aufgrund nicht ausreichender Versuchsreihen jedoch noch nicht erfolgen.

5.2 Untersuchungen mit Freibewitterung

Die Versuchsreihen, bei denen der Freibewitterungsstand genutzt wurde, wurden analog zu den Untersuchungen mit künstlicher Bewitterung und Kohlenwasserstoff-Standard-Lösung durchgeführt. Nur die Bewitterungsart und -dauer wurden geändert.

In der folgenden Abbildung sind beispielhaft die Ergebnisse einer Versuchsreihe dargestellt.

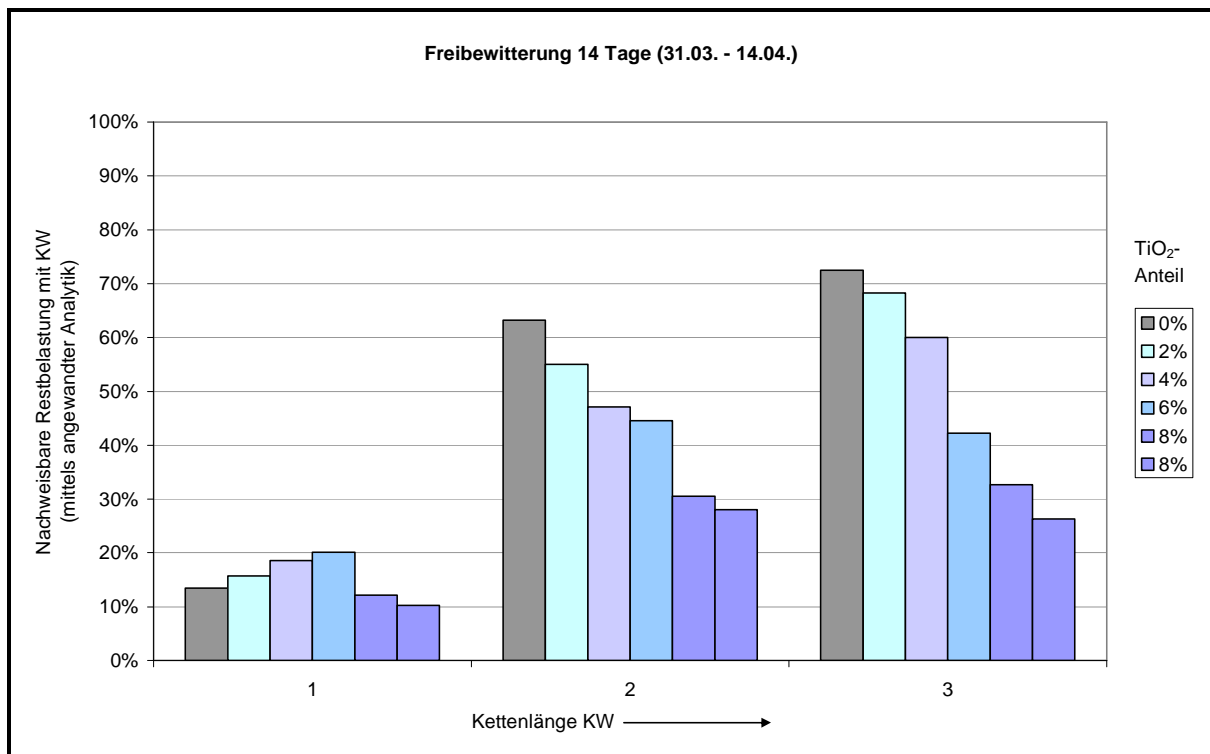


Abbildung 12: Nachweisbare Restbelastung mit KW – unterschiedliche TiO₂-Anteile

Bei der Darstellung der Ergebnisse wurden, wie bereits bei der künstlichen Bewitterung, die, mittels der angewandten Analytik, nachweisbaren Restbelastungen von Kohlenwasserstoffen in Pflastersteinen ohne und mit Titandioxid (AQUA TITAN) verglichen. Diese Ergebnisse zeigten deutlich einen

linearen Zusammenhang zwischen den zugesetzten TiO_2 -Anteilen und der KW-Restbelastung bzw. der photokatalytischen Aktivität.

In der folgenden Abbildung wurden zwei Freibewitterungsversuchsreihen bei unterschiedlichen Witterungsbedingungen verglichen. Die Steine wurden jeweils 14 Tage im Versuchsstand zur Freibewitterung gelagert.

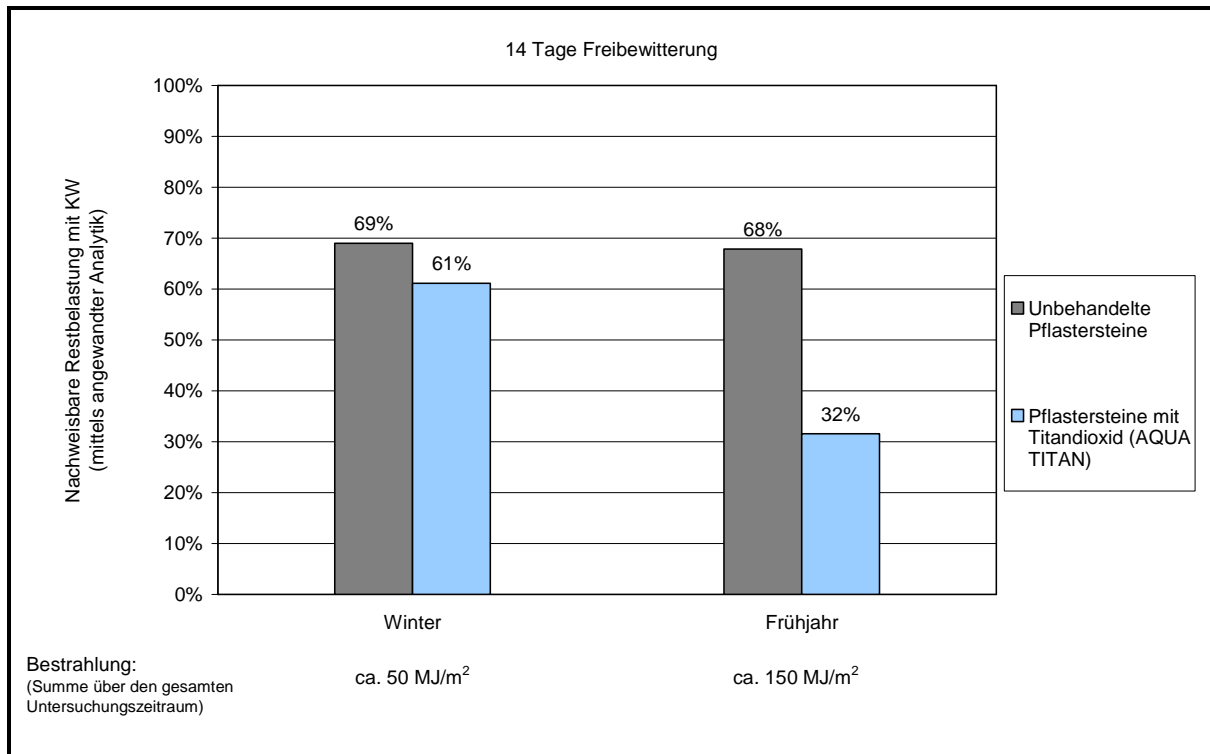


Abbildung 13: Freibewitterung – Vergleich zweier Versuchsreihen

Im Rahmen der zugrundeliegenden Versuche konnten bei den behandelten Pflastersteinen, im Vergleich zu unbehandelten Pflastersteinen, geringere Restbelastungen mit Kohlenwasserstoffen nachgewiesen werden. Die Differenzen betragen im Winter knapp 10% und im Frühjahr ca. 35%.

Aufgrund der bisherigen Untersuchungen ist davon auszugehen, dass die Differenz der nachgewiesenen Restbelastungen mit Kohlenwasserstoffen zwischen unbehandelten und behandelten Pflastersteinen auf den Vorgang der Photokatalyse zurückzuführen ist. Das Diagramm zeigt deutlich den Einfluss der Bestrahlung (Globalstrahlung) während der Versuchsdauer. Die unterschiedliche Bestrahlung hat einen erheblichen Einfluss auf die behandelten Pflastersteine und nahezu keinen Einfluss auf die unbehandelten Pflastersteine. Dies verdeutlicht den Vorgang der Photokatalyse.

5.3 Vergleich künstliche Bewitterung und Freibewitterung

In der folgenden Abbildung werden die Ergebnisse von Versuchsreihen mit künstlicher Bewitterung und Freibewitterung verglichen.

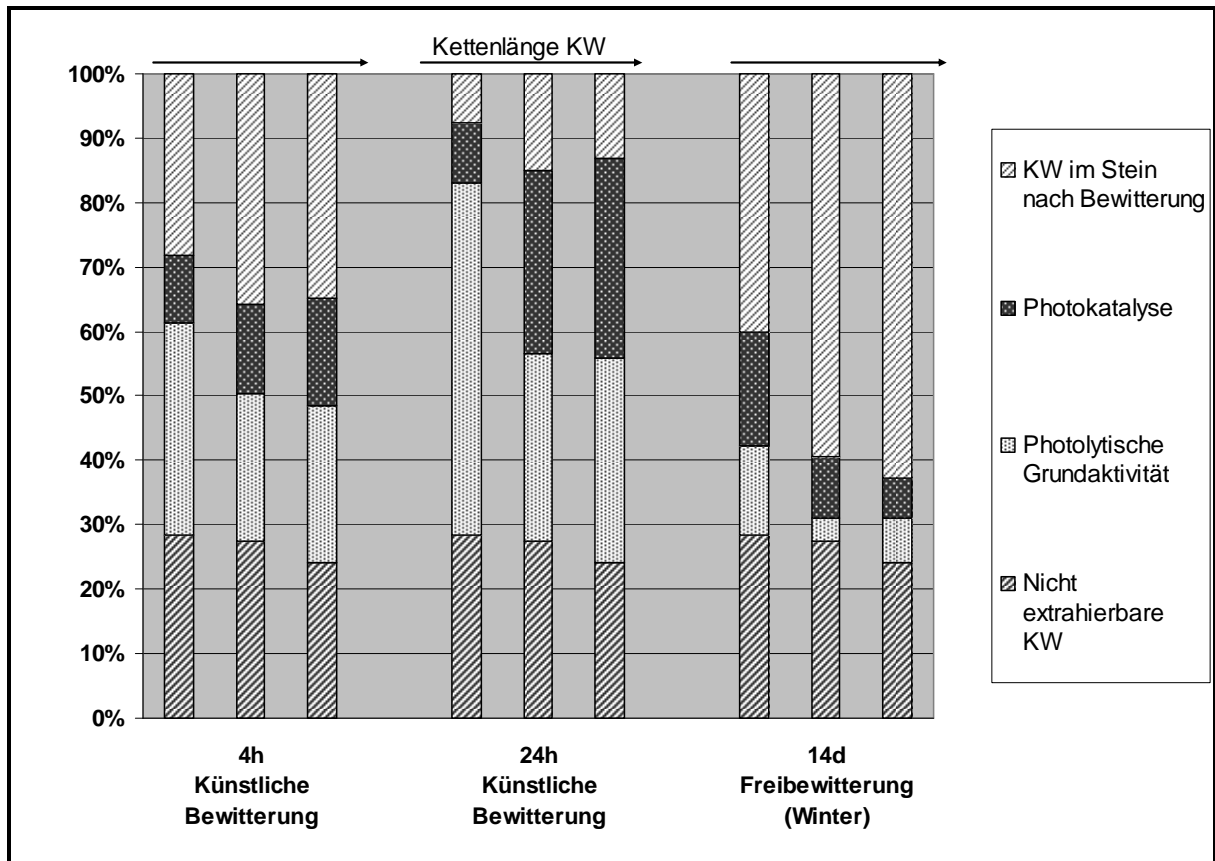


Abbildung 14: Vergleich der Ergebnisse – künstliche Bewitterung und Freibewitterung

Bei allen Versuchsreihen wurde ein Anteil, der auf Photokatalyse zurückzuführen ist, ermittelt. Des Weiteren zeigt das Diagramm den großen Einfluss der Sonnenlichtsimulation bei der künstlichen Bewitterung auf den Anteil der photolytischen Grundaktivität in unbehandelten Pflastersteinen. Somit wurde deutlich, dass die künstliche Bewitterung nur für vergleichende Untersuchungen bzw. Ermittlung von Referenzwerten geeignet ist. Für die Quantifizierung des Potentials von KW-Reduktionen aufgrund photokatalytisch aktiver Pflastersteine müssen die Daten von Freibewitterungsversuchen zugrunde gelegt werden.

5.4 Reinigungspotential

Zur Veranschaulichung wurden die Ergebnisse der vergleichenden Freibewitterungsversuche (siehe Bild 13) in Abhängigkeit der Fläche und der Bestrahlung dargestellt. Bei der Versuchsreihe im Winter konnte eine Reduktion von ca. $10 \text{ mg KW}/(\text{m}^2 \cdot (\text{MJ}/\text{m}^2))$ ermittelt werden und bei der Versuchsreihe im Frühjahr ca. $15 \text{ mg KW}/(\text{m}^2 \cdot (\text{MJ}/\text{m}^2))$.

In den nachfolgenden Ausführungen wurden Betrachtungen hinsichtlich der Abbauraten vorgenommen, die auf einem Berechnungsmodell basieren.

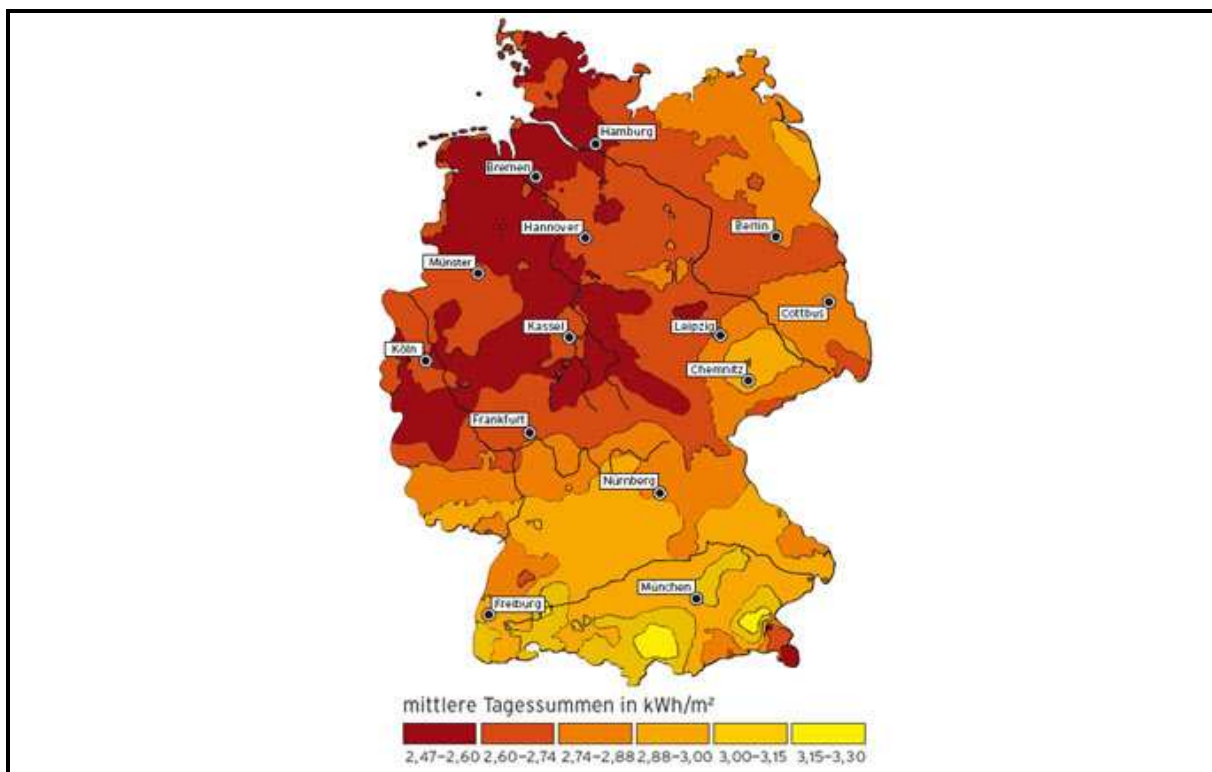


Abbildung 15: Durchschnittliche tägliche Strahlung in Deutschland (Vaillant)

Eine geringe durchschnittliche tägliche Strahlung von $2,6 \text{ kWh}/\text{m}^2$ entspricht ca. $9,4 \text{ MJ}/\text{m}^2$. Mit dieser Annahme und unter Berücksichtigung der niedrigeren Reduktion im Winter von $10 \text{ mg KW}/(\text{m}^2 \cdot (\text{MJ}/\text{m}^2))$ kann eine Reduktion von 94 mg Kohlenwasserstoffe pro Quadratmeter und Tag abgeschätzt werden.

Um diesen Abbau in Anlehnung an den Parameter CSB (chemischer Sauerstoffbedarf) auszudrücken, wird ein Kohlenwasserstoff mit einer Kettenlänge von 25 Kohlenstoffmolekülen zugrunde gelegt.

Die Stoffmenge von 94 mg Kohlenwasserstoffe ($\text{C}_{25}\text{H}_{52}$) ergibt bei einer molaren Masse von $352 \text{ g}/\text{mol}$ ca. $0,267 \text{ mmol}$.

Für einen vollständigen Abbau dieses Alkans zu Kohlendioxid und Wasser ist ein Sauerstoffbedarf von ca. 325 mg erforderlich.

Da dieser Oxidationsprozess durch die Photokatalyse stattfindet, entfällt dieser Sauerstoffbedarf bei der Einleitung in ein Gewässer.

Diese beispielhafte Berechnung soll die grundsätzliche Leistungsfähigkeit des Pflastersteins, beziehungsweise das erhebliche Potential für die Verbesserung der Gewässergüte verdeutlichen.

Die tatsächlichen Abbauraten sind in Versuchen an entsprechend belasteten Pflasterflächen noch zu ermitteln.

6 Zusammenfassung

Im Rahmen des geförderten Projektes konnten folgende Resultate erzielt werden:

- Entwicklung eines Verfahrens zum Nachweis photokatalytischer Aktivität von Pflastersteinen
- Nachweis der grundsätzlichen photokatalytischen Aktivität
- Optimierung der Steinkomponenten und der Steinherstellung
- Aufbau von Prüfständen (Bewitterung, Beregnung)

Entwicklung eines Verfahrens zum Nachweis photokatalytischer Aktivität von Pflastersteinen

Es wurde ein Verfahren zum Nachweis der photokatalytischen Aktivität von Pflastersteinen entwickelt. Wesentliche Faktoren dieses Verfahrens sind die Schadstoffbeladung der Pflastersteine und die anschließende Bewitterung sowie der analytische Nachweis der Schadstoffrestbelastung im Pflasterstein nach der Bewitterung.

Die bisherigen Untersuchungen haben gezeigt, dass die Reduktion der Schadstoffe nicht nur auf die Photokatalyse zurückzuführen ist. Zur Ermittlung des photokatalytischen Anteiles wurden unbehandelte Pflastersteine als Referenz untersucht.

Nachweis der grundsätzlichen photokatalytischen Aktivität

Es konnte eine grundsätzliche photokatalytische Aktivität der neuartigen Pflastersteine mit Titandioxid hinsichtlich Kohlenwasserstoffen nachgewiesen werden. So wurden z.B. im Rahmen von Freibewitterungsversuchsreihen geringere Restbelastungen mit Kohlenwasserstoffen bei behandelten Pflastersteinen, im Vergleich zu unbehandelten Pflastersteinen nachgewiesen. Die Differenzen betragen im Winter knapp 10% und im Frühjahr ca. 35%. Aufgrund der bisherigen Untersuchungen ist davon auszugehen, dass diese Differenzen auf den Vorgang der Photokatalyse zurückzuführen sind.

Eine statistische Absicherung und allgemeine Quantifizierung konnte jedoch nicht erfolgen, da Probleme bei der Steinherstellung die Arbeiten verzögerten. Es müssen weitere Versuchsreihen nach dem entwickelten Nachweisverfahren durchgeführt werden.

Optimierung der Steinkomponenten und der Steinherstellung

Das Titandioxid wurde bis jetzt bei der Produktion der Pflastersteine in Form einer Slurry dem Zement beigemischt. Es wurde festgestellt, dass die Slurry einer Probeproduktion nicht lagerstabil war. Titandioxidmaterial hatte sich am Boden abgesetzt. Daraufhin fanden umfangreiche Arbeiten zur Entwicklung einer neuen – lagerstabilen – Slurry statt. Es zeigten sich erneut Schwierigkeiten, bei der Vermischung des Zementes mit der Slurry fanden exotherme Reaktionen statt. Die Mischung erwärmte sich und verhärtete innerhalb kurzer Zeit, so dass eine Verarbeitung kaum möglich war.

In Zusammenarbeit mit einer Betonprüf- und Überwachungsgesellschaft konnten mittlerweile erfolgversprechende Probeproduktionen durchgeführt werden.

Aufbau von Prüfständen (Bewitterung, Beregnung)

Es wurden Prüfstände zur künstlichen Bewitterung und Freibewitterung von Pflastersteinen entwickelt und aufgebaut, ebenso ein Prüfstand für Beregnungsversuche. Dieser ermöglicht Untersuchungen zur hydraulischen Leistungsfähigkeit und zum Schadstoffeintrag bei gepflasterten Flächen.

Literatur

- Bentjerodt, B.: Grundlagen der Bewitterung, Horb, 2008
- Choi, Y.; Umabayashi, T.; Yoshikawa, M.: J. Mater. Sci. 39, 1837-1839, 2004
- Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA): Handlungsempfehlungen zum Umgang mit Regenwasser (DWA-M 153), Hennef, 2007
- Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA): Leitlinien der integralen Siedlungsentwässerung (DWA-A 100), Hennef, 2006
- Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA): Planung, Bau und Betrieb von Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser (DWA-A 138), Hennef, 2005
- Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt): Zulassungsgrundsätze; Abwasserbehandelnde Flächenbeläge, Berlin, 2005
- Dorgeloh, E.; Khan, P.; Boller, R.; Blöß, S.: Schmutz abbauende Pflastersteine – Photokatalyse durch Titandioxid, GWA 217, Aachen, 2009
- Fach, S.: Retentionswirkung und Stoffrückhalt von ausgewählten wasserdurchlässig befestigten Verkehrsflächen, Shaker Verlag, Aachen, 2007
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Merkblatt für wasserdurchlässige Befestigungen von Verkehrsflächen
- Irie, H.; Watanabe, Y.; Hashimoto, K.: Chem. Lett. 32/8, 772-773, 2003
- Kaiser, M.: Planung und Bemessung von Versickerungsanlagen, Schriftenreihe Siedlungswasserwirtschaft Bochum 56, 2008
- Khan, P.; Dorgeloh, E.: Pflasterflächen als Bausteine der dezentralen Regenwasserbewirtschaftung, GWA 218, Aachen, 2009
- Kisch, H.; Macyk, W.: ChemPhysChem 3, 399-400, 2002
- KRONOS, Informationen zu Titandioxid-Photokatalysatoren in Pflastersteinen, 2009
- KRONOS Leitfaden, Kölnische Verlagsdruckerei GmbH, Köln, 1967
- Richter, D.; Heindel, M.: Straßen- und Tiefbau, Teubner Verlag, Wiesbaden, 2004
- Sakthivel, S.; Kisch, H.: Angew. Chem. Int. Ed. 42, 4908-4911, 2003
- Völz, H.G.; Kämpf, G.; Klaeren, A.: Farben und Lacke 82/9, 805-810, 1976
- Wilhelm, R.; Böök, T.: Ziegelindustrie International 6, 41-45, 2005