

Umweltfreundlicher Straßenbelag mit Abgasnachbehandlung durch photokatalytischen Stickstoffdioxidabbau unter Nutzung der Nanotechnologie

FA 9.146

Forschungsstellen: RWTH Aachen, Institut für Straßenwesen (Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. M. Oeser)

Fraunhofer-Institut für Molekularbiologie und Angewandte Oekologie (IME), Aachen

Bearbeiter: Wang, D. / Oeser, M. / Hüben, M. / Steinauer, B.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn

Abschluss: Februar 2014

1 Problemstellung und Zielsetzung

Unsere Atmosphäre wird in immer stärkerem Ausmaß mit NO_x (NO und NO₂) belastet [Görgen, 2008] [Rabl, 2003]. Da NO₂ besonders schädlich für Mensch und Umwelt ist, sind gemäß der 39. Bundes-Immissionsschutzverordnung (BlmSchV) seit 2010 in Deutschland zwei Luftqualitätsgrenzwerte für Stickstoffdioxid einzuhalten [BlmSchV, 2010]:

- Der Jahresmittelwert ist auf 40 µg/m³ begrenzt und
- der maximale Ein-Stunden-Mittelwert von 200 µg/m³ darf maximal an 18 Tagen im Kalenderjahr überschritten werden.

Allerdings zeigen aktuelle Untersuchungen des Umweltbundesamts [UBA, 2012], dass von 2000 bis 2011 das emittierte Stickstoffdioxid trotz Verschärfung der Emissionsgrenzwerte bei Kraftfahrzeugen (durch Euro 3 bis 6 für Pkw und Euro III bis VI für Lkw) nahezu unverändert geblieben ist. Dies trägt dazu bei, dass eine Einhaltung der vorgesehenen NO₂-Grenzwerte in vielen Kommunen ohne weitere wirksame Maßnahmen kaum möglich ist [Diegmann, 2006] [Görgen, 2008].

Eine Möglichkeit zur Stickoxidreduktion bietet der Einsatz von Titandioxid (TiO₂). Durch Titandioxid kann NO_x unter UV-Licht durch Oxidation zersetzt werden. Bei vollständiger Reaktion bilden sich aus Stickoxiden wasserlösliche Nitrate. Da über 40 % der gesamten Emissionen von Stickoxiden aus dem Straßenverkehr stammen, ist das primäre Ziel dieses Forschungsvorhabens daher, TiO₂-Partikel auf die Straßenoberfläche aufzubringen, um das durch die Abgase des Kraftfahrzeugs emittierte NO_x möglichst schnell und effektiv abzubauen.

Da das Titandioxid durch Oxidation das Bitumen angreift und zersetzt und eine Verträglichkeit von Bitumen und Titandioxid nach gegenwärtigem Kenntnisstand ausgeschlossen ist, wird im Rahmen dieses Forschungsprojekts ein Verfahren entwickelt, bei dem Titandioxid nicht dem Bitumen zugegeben, sondern im Abstreumaterial vermischt und auf die Fahrbahnoberfläche aufgebracht wird (s. Bild 1). Daraus ergeben sich folgende Vorteile:

- Die TiO₂-Partikel müssen nicht in der gesamten Deckschicht, sondern lediglich an der Oberfläche verwen-

det werden, sodass der teure Rohstoff TiO₂ effektiv und wirtschaftlich eingesetzt werden kann.

- Die TiO₂-Partikel im Abstreumaterial stehen "im direkten Kontakt" mit dem NO_x aus den Abgasen und können somit die volle Wirksamkeit entfalten.

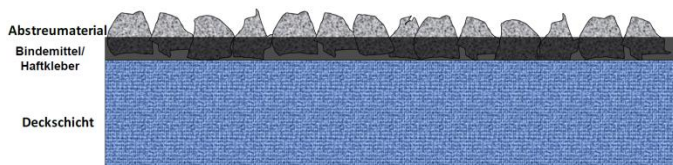


Bild 1: Asphaltbefestigungen mit TiO₂-haltigem Abstreumaterial

2 Voruntersuchungen

Im Rahmen der Voruntersuchungen wurden insgesamt acht TiO₂-Produkte (VU0 bis VU7, die Probe VU0 diente als Referenzvariante und wurde aus der kommerziell erhältlichen, photokatalytisch aktiven Zementmischung hergestellt) ausgewählt und auf ihre photokatalytische Aktivität bezüglich eines NO-Abbaus untersucht. Zusätzlich wurden verschiedene Einflussfaktoren auf die photokatalytische Aktivität näher betrachtet.

2.1 Differenzierung verschiedener TiO₂-Produkte

Die Auswahl der zu untersuchenden TiO₂-Produkte erfolgte anhand der Kriterien (s. Tabelle 2)

- photokatalytische Wirksamkeit,
- Marktrelevanz und
- Spreizung in den Charakteristika (Korngröße, Modifikation, Zusammensetzung etc.).

Mit den ausgewählten TiO₂-Produkten wurden Probekörper mit den Abmessungen 100 x 50 x 10 mm³ in Anlehnung an [DIN EN 196-1] hergestellt und dann hinsichtlich ihrer photokatalytischen Eigenschaften mittels der Testapparatur des Fraunhofer-Instituts für Molekularbiologie und Angewandte Oekologie (IME) analysiert (s. Tabelle 1).

Tabelle 1: Zusammenstellung der gemessenen Muster, der gemittelten NO-Abbauwerte und Standardabweichungen

Variante	Ø NO-Abbau Zeitraum 15-60 Minuten frische Proben [%]	Standardabweichung [%]
VU0	59,1	4,8
VU1	31,2	6,2
VU2	37,9	7,1
VU3	13,5	5,1
VU4	15,6	1,3
VU5	54,2	6,4
VU6	62,2	7,3
VU7	67,2	2,2

Anhand der Ergebnisse des NO-Abbaus konnte festgestellt werden, dass alle Proben einen NO-Abbau zeigen, wobei ein großer Unterschied in den Abbauraten zwischen 14 und 67 %

bei den acht TiO₂-Varianten beobachtet wurde. Bezüglich ihrer photokatalytischen Aktivität können die Varianten in drei Gruppen unterteilt werden. Die Proben VU3 und VU4 zeigten die geringste photokatalytische Aktivität. Die NO-Abbauraten bewegten sich bei ca. 15 %. Mit 30-40 % NO-Abbau lagen die

Proben VU1 und VU2 im mittleren Bereich, beide noch deutlich unter der Referenzprobe VU0 mit einer Abbaurrate von ca. 60 %. Die höchsten NO-Abbauraten zeigten die Proben VU5, VU6 und VU7. Die Abbauraten dieser Proben lagen im Bereich der Referenz oder etwas darüber.

Tabelle 2: Übersicht der in die Untersuchungen einbezogenen TiO₂-Partikel

Variante	Kristallmodifikation	Kristallitgröße [nm]*	Spezifische Oberfläche (BET) [m ² /g]	TiO ₂ -Gehalt [M.-%]	Sonst. Bestandteil
VU1	Anatas	ca. 15	> 225	87,5	unbekannt
VU2	Anatas	ca. 15	> 225	85	unbekannt
VU3	Rutil/Anatas	ca. 120	10	65	Fe ₂ O ₃ + SiO ₂
VU4	Rutil/Anatas	ca. 150	10	59	Fe ₂ O ₃ + SiO ₂
VU5	Anatas	ca. 150	10	ca. 100	-
VU6	Anatas	ca. 15	90	90	WO ₃ + SO ₄
VU7	Anatas	ca. 15	90	99	SO ₄

2.2 Untersuchungen der Einflussfaktoren auf die photokatalytische Aktivität des TiO₂

Die NO-Messungen an den Probekörpern mit variierendem Titandioxidgehalt zeigten auf, dass die photokatalytische Aktivität von der Menge der TiO₂-Partikel im Probekörper signifikant beeinflusst wurde und mit erhöhtem Titandioxidgehalt näherungsweise proportional zugenommen hat (s. Bild 2 und Bild 3). Des Weiteren konnte festgestellt werden, dass die photokatalytische Aktivität von der Bestrahlungsintensität der NO-Messung abhängt: Je stärker die Bestrahlungsenergie der NO-Messung ist, desto schneller kann NO abgebaut werden.

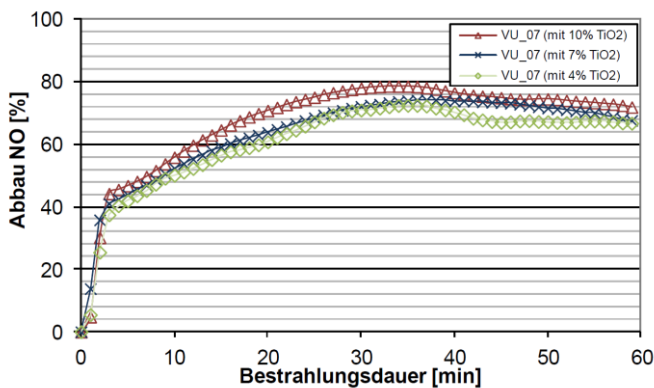


Bild 2: Einfluss des TiO₂-Gehalts auf die photokatalytische Aktivität mit einer Bestrahlungsenergie von 46 W/m² im Wellenlängenbereich von 300-400 nm

Die Varianten mit einem sehr feinem Titandioxid (VU1 und VU2) bergen die Gefahr, dass die Titandioxidpartikel agglomerieren und daher nicht gleichmäßig verteilt im Mörtel wirken können. Der Grad der Dispergierung ist vor allem vom Herstellungsprozess abhängig. Um diese herstellungsbedingten Einflüsse zu ermitteln, wurden weitere Probekörper der Varianten VU1 und VU2 unter Variation folgender Einflussfaktoren hergestellt:

- Mischdauer,
- Mischkinematik und
- Art der Homogenisierung beziehungsweise Zugabereihenfolge der Mischungskomponenten.

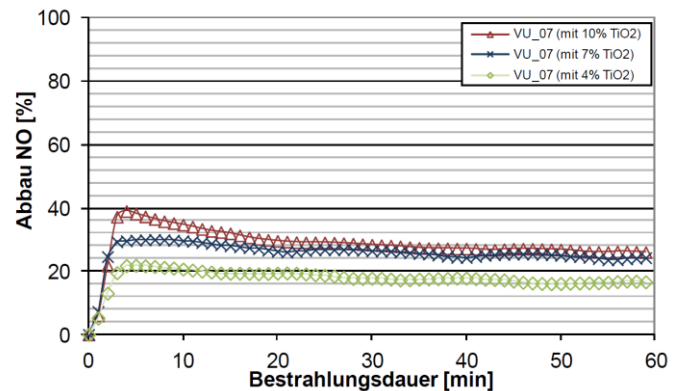


Bild 3: Einfluss des TiO₂-Gehalts auf die photokatalytische Aktivität mit einer Bestrahlungsenergie von 10 W/m² im Wellenlängenbereich von 300-400 nm (in Anlehnung an [ISO 22197])

Anhand der Ergebnisse konnten grundsätzlich nachfolgende Feststellungen gemacht werden:

- Mit längerer Mischzeit können die TiO₂-Partikel besser im Mörtel homogenisiert werden, sodass die Mischzeit einen bestimmenden Einfluss auf die photokatalytische Aktivität der hergestellten Mörtelproben besitzt (s. Bild 4 und Bild 5).
- Durch den Vergleich der mit unterschiedlichen Mischprozeduren erstellten Mörtelproben wurde gezeigt, dass der Einfluss der Mischkinematik auf die Messergebnisse nicht als signifikant einzustufen ist (s. Bild 6 und Bild 7).

Straßenentwurf

- Der Einfluss der Art der Homogenisierung auf die photokatalytische Aktivität, sprich ob die Titandioxidpartikel besser im Wasser oder im Zement homogenisiert werden, ist nicht eindeutig belegbar. Der Unterschied

zwischen den Varianten hinsichtlich der mittleren NO-Abbauwerte liegt im Bereich der Messschwankung des Prüfverfahrens (s. Bild 8 und Bild 9).

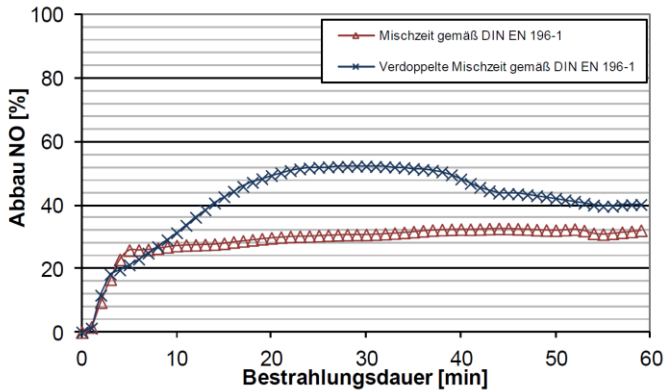


Bild 4: Einfluss der Mischdauer auf die photokatalytische Aktivität (VU1)

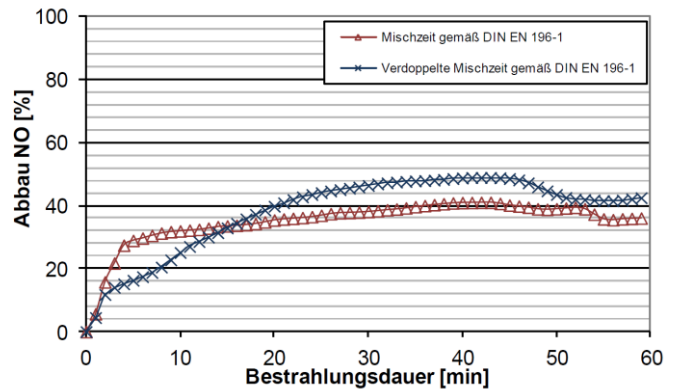


Bild 5: Einfluss der Mischdauer auf die photokatalytische Aktivität (VU2)

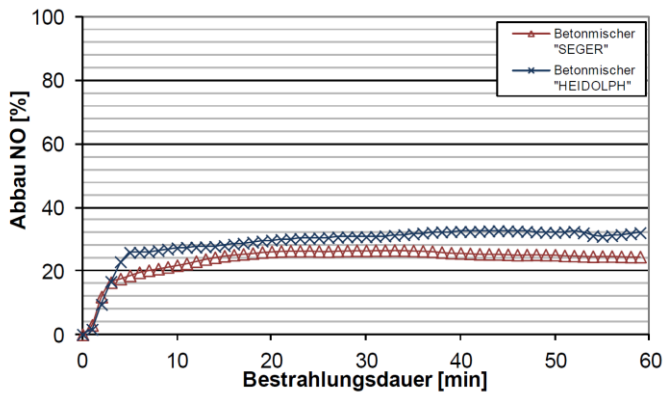


Bild 6: Einfluss der Mischkinematik auf die photokatalytische Aktivität (VU1)

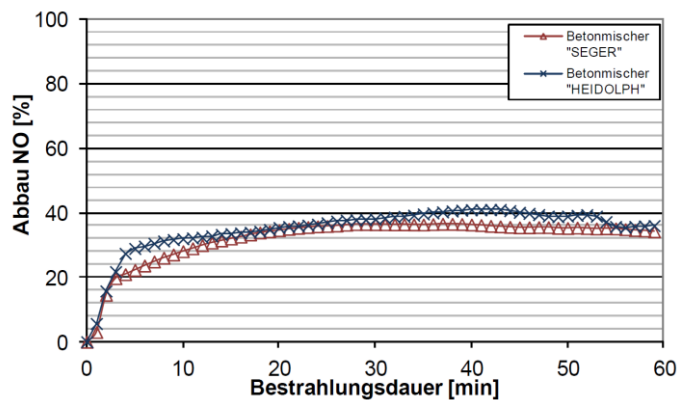


Bild 7: Einfluss der Mischkinematik auf die photokatalytische Aktivität (VU2)

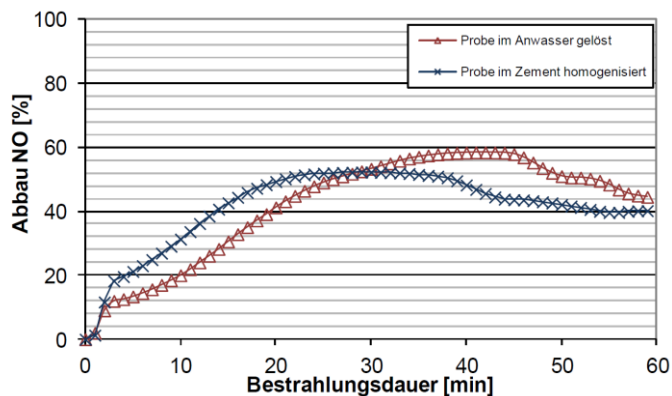


Bild 8: Einfluss der Zugabereihenfolge auf die photokatalytische Aktivität (VU1)

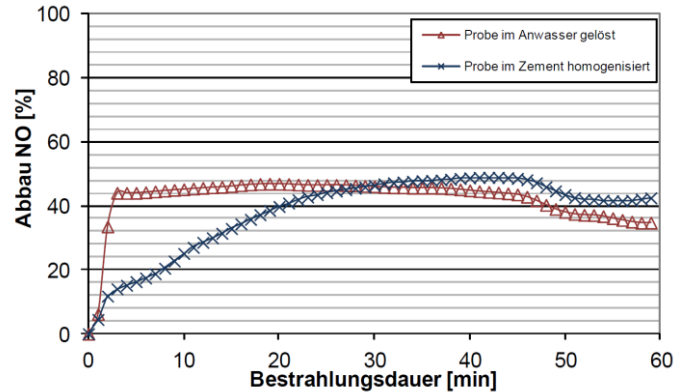


Bild 9: Einfluss der Zugabereihenfolge auf die photokatalytische Aktivität (VU2)

3 Hauptuntersuchungen

Basierend auf den Ergebnissen der Voruntersuchungen wurde die TiO₂-Variante VU7 für die Hauptuntersuchungen ausgewählt, die die besten Ergebnisse hinsichtlich der NO-Eliminierung lieferte.

3.1 Herstellung und Untersuchungen abgestreuter Asphaltplatten

Zur Entwicklung einer TiO₂-haltigen Gesteinskörnung, die als Abstreumaterial auf Asphaltdeckschichten verwendet werden kann und hier eine dauerhafte NO_x-reduzierende Wirkung entfalten soll, werden die folgenden drei Konzepte hinsichtlich ihrer praktischen Umsetzbarkeit in den Hauptuntersuchungen näher untersucht:

- Alternative 1: Ummantelung/Beschichtung von Gesteinskörnern mit TiO₂,
- Alternative 2: Verfüllung poröserer Basaltlava mit TiO₂ und
- Alternative 3: Herstellung TiO₂-haltiger Mörtelkörner.

Die Herstellungsprozesse und die Zusammensetzung der drei genannten Alternativen werden hinsichtlich der Festigkeit, des Polier- und Verschleißwiderstands durch systematische Untersuchungen optimiert, sodass die gemäß den Regelwerken an das Abstreumaterial gestellten Anforderungen eingehalten werden können:

- Schlagzertrümmerungsprüfung nach DIN EN 1097-2 (Richtwert: SZ₁₈),
- Polierwert (PSV) nach DIN EN 1097-8 (Richtwert: 51) und
- Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel nach DIN EN 1367-1 (Richtwert: F₁).

Die TiO₂-modifizierte Abstreukörner werden dann auf einer Asphaltunterlage mit den Abmessungen 320 x 260 mm² sowie einer Höhe von 40 mm aufgestreut. Die Asphaltplatte wird sowohl im Labor im Walzsektor-Verdichtungsgerät nach TP Asphalt-StB hergestellt als auch aus der institutseigenen Einbaustrecke entnommen. Es wird darauf geachtet, dass alle Platten einheitliche, praxisadäquate Ausgangseigenschaften besitzen. Die Platten werden mit Epoxidharz bestrichen und die TiO₂-haltigen Gesteinskörnungen in Anlehnung an ZTV Asphalt-StB 07 aufgestreut, angedrückt und das überschüssige Abstreumaterial entfernt. Die hergestellten, abgestreuten Asphaltplatten werden dann einer polierenden Beanspruchung in der ARTE unterzogen und hinsichtlich der Dauerhaftigkeit der photokatalytischen Eigenschaften analysiert. Zusätzlich zur Erfassung der photokatalytischen Eigenschaften wird noch überprüft, ob die hergestellten Probekörper auch die verkehrssicherheitsrelevanten Eigenschaften aufweisen. Die polierten Probekörper werden daher noch hinsichtlich der Griffigkeit mittels PWS (Prüfstand nach Wehner/Schulze) und dem SRT-Pendel (Skid Resistance Tester) untersucht.

3.2 Dauerhaftigkeit der photokatalytischen und mechanischen Eigenschaften abgestreuter Asphaltplatten im Labor

Für Alternative 1 wird ein Diabas ausgewählt und mit TiO₂-Variante VU7 umhüllt. Der Diabas erfüllt alle Anforderungen, die gemäß TL Gestein-StB 04 an das Abstreumaterial gestellt werden. Die dauerhafte photokatalytische Wirksamkeit wird überprüft, indem die Probekörper einer fünfständigen Polierdauer in der ARTE unterzogen werden und die Veränderung des NO-Abbaus durch diese Beanspruchung ermittelt wird. Für die unpolierten Gesteinskörner wird eine mittlere NO-Abbaurrate von ca. 41,6 % erreicht. Im Vergleich dazu weisen die polierten Gesteinskörner deutlich geringere Abbauraten auf, die bei 9,7 % liegen (s. Bild 10). Hauptursache für die verminderte photokatalytische Aktivität ist die Tatsache, dass durch die Polierbeanspruchung die TiO₂-Partikel von den Gesteinskörnern entfernt werden.

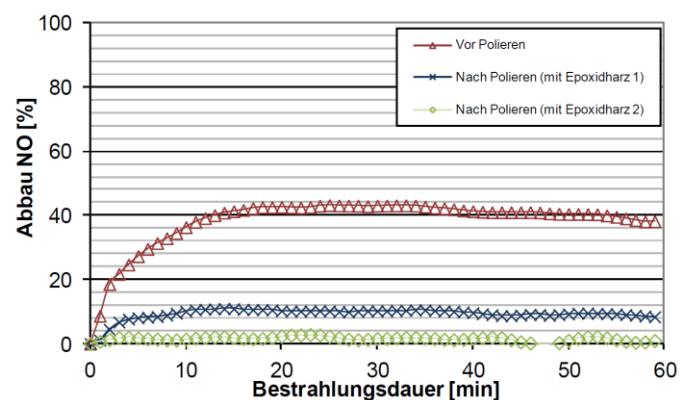


Bild 10: Abbau des Stickstoffmonoxids vor und nach der Polierbeanspruchung in Abhängigkeit von der Bestrahlungsdauer und den verwendeten Haftmitteln (Alternative 1)

Bei der Verfüllung der porösen Basaltlava mit TiO₂-haltigem Mörtel wird durch Mikroskopie festgestellt, dass bei Basaltlava die meisten inneren Luftporen geschlossen und von der Oberfläche aus nicht zugänglich sind. Das meiste TiO₂ setzt sich nur auf der Oberfläche ab. Mit Unterdruck und Optimierung der Viskosität des Bindemittels (Mörtel aus Zement und Wasser) kann nur ein sehr geringer Teil des TiO₂ in die Hohlräume einfließen. Vor dem Polieren liegt die gemittelte NO-Abbaurrate bei ca. 41,9 %, welche nach dem Polieren auf ca. 14,7 % absinkt (s. Bild 11). Die photokatalytische Wirkung lässt also – analog zur vorherigen Variante – stark nach. Die Ursachen hierfür sind die Verluste des TiO₂-haltigen Mörtelfilms durch einen klassischen Poliereffekt der Gesteinskörner. Allerdings weist Alternative 2 noch höhere NO-Abbauraten auf als Alternative 1. Mittels Mikroskopie werden noch viele TiO₂-Partikel in den Hohlräumen auf der stets rauen Oberfläche der Basaltlava beobachtet. Diese Partikel werden vermutlich sehr gering bis gar nicht durch die Reifen beansprucht.

Bei Alternative 3 wurde vom projektbegleitenden Betreuer Ausschuss beschlossen, eine Mischung von titandioxidhaltigen Körnern in der Kornklasse 2/4 mm und schlag- und verschleißresistenten natürlichen Körnern (zum Beispiel Diabas) in der Kornklasse 4/5 mm herzustellen, um einen ausreichenden Widerstand gegen Schlagzertrümmerung sicherzustellen. Die mechanische Beanspruchung soll von herausragenden Diaba-

sen aufgenommen werden, die stabilisierend auf die photokatalytisch aktiven Gesteinskörner wirken (s. Bild 12).

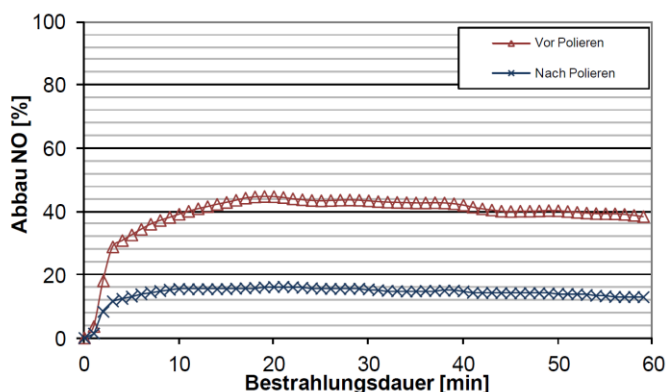


Bild 11: Abbau des Stickstoffmonoxids vor und nach der Polierbeanspruchung in Abhängigkeit von der Bestrahlungsdauer (Alternative 2)

Die NO-Abbauraten lagen vor dem Polieren bei etwa 13 % und danach bei 11,6 %, sodass die NO-Eliminierung durch die Polierbeanspruchung sehr gering beeinflusst wird (s. Bild 13). Die NO-Abbauraten vor der Polierbeanspruchung ist niedriger als bei den Alternativen 1 und 2, was auf den Anteil des photokatalytisch nicht aktiven Diabases zurückzuführen ist. Im Gegensatz zu den oben genannten Alternativen besitzt Alternative 3 einen wesentlichen Vorteil, nämlich dass Titandioxid nicht nur auf der Oberfläche der Körner, sondern auch in den Körnern ist. Durch die Polierbeanspruchung wird zwar die oberste Schicht der Körner ständig abgefahren, jedoch kommen immer noch Titandioxidpartikel zum Vorschein, die die photokatalytische Aktivität sicherstellen.

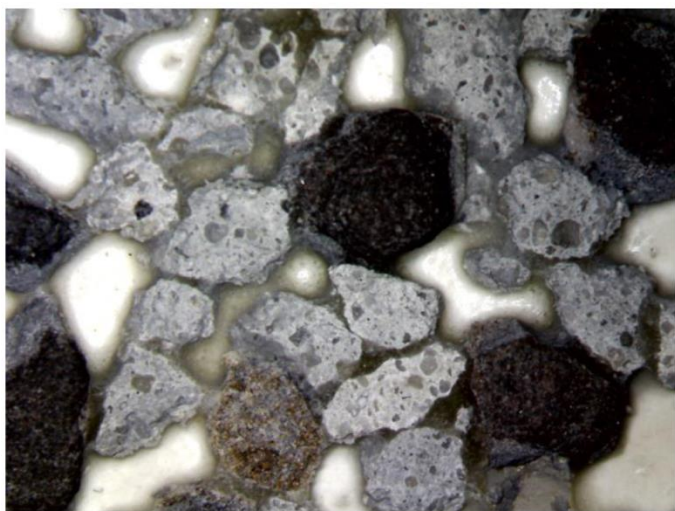


Bild 12: Mischung von titandioxidhaltigen Körnern in der Kornklasse 2/4 mm (hellere Körner) und schlagresistentem Diabas in der Kornklasse 4/5 mm (dunklere Körner)

Neben den Abbauraten von Stickstoffmonoxid treten auch andere Eigenschaftsänderungen bei einem Vergleich zwischen unpolierten und polierten Gesteinskörnern auf. Zusätzlich zur Erfassung der photokatalytischen Eigenschaften wird mit Bezug auf die Griffigkeit überprüft, ob die hergestellten Probekörper auch die verkehrssicherheitsrelevanten Eigenschaften aufweisen. Durch die Polierbeanspruchung werden viele herausra-

gende Spitzen der Gesteinskörner stark abgetragen und die Mikrotextrur damit geglättet. Die Griffigkeit fällt bis zum Ende der Polierbeanspruchung ständig ab. Nach dem Polieren weisen drei Varianten allerdings noch eine hohe Griffigkeit auf (s. Tabelle 3), die die Anforderungswerte im Regelwerk [FGSV, 2012] deutlich übertrifft. Die Ausflusszeit bleibt hingegen während des Poliervorgangs erwartungsgemäß nahezu konstant und liegt mit ca. 1 Sekunde deutlich unter dem Richtwert von 30 Sekunden gemäß Regelwerk. Es ist trivial, dass abgestreute Oberflächen kein Drainageproblem aufweisen.

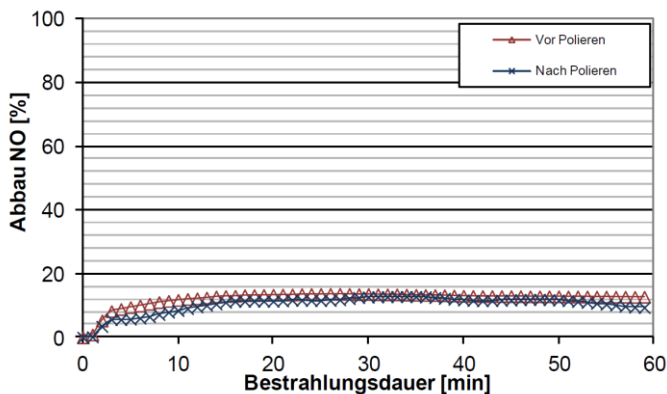


Bild 13: Abbau des Stickstoffmonoxids vor und nach der Polierbeanspruchung in Abhängigkeit von der Bestrahlungsdauer (Alternative 3)

Tabelle 3: Griffigkeit nach dem Poliervorgang

	SRT-Wert	PWS-Wert
Alternative 1	65,4±0,3	0,491
Alternative 2	68,8±0,7	0,493
Alternative 3	73,0±0,5	0,610

3.3 Dauerhaftigkeit der photokatalytischen Aktivität abgestreuter Asphaltplatten aus Einbaustrecke

Um die Ergebnisse der Hauptuntersuchungen hinsichtlich der Praxistauglichkeit zu überprüfen, wird anhand der Ergebnisse der photokatalytischen und mechanischen Analysen die Alternative 3 für die Untersuchungen auf der institutseigenen Einbaustrecke ausgewählt. Dies lässt sich nachfolgend begründen:

- Alternative 3 ist im Vergleich zu den anderen Alternativen leicht herzustellen.
- Alternative 3 weist eine höhere Rauheit als die anderen Alternativen auf.
- Alternative 3 besitzt auf langfristige Sicht eine höhere NO-Eliminierung als Alternative 1. Alternative 2 weist zwar langfristig einen besseren NO-Eliminierungseffekt auf, jedoch liegt die Kornformkennzahl nach DIN EN 933-4 bei 49. Die Basaltlavakörner mit schlechter Kornform besitzen einen wesentlich geringeren Widerstand gegen Schlagzertrümmerung und Polierbeanspruchung als die Richtwerte gemäß Regelwerke. Es muss daher darauf geachtet werden, dass eine Eliminierung der Körner mit schlechter Kornform per Hand

in der Praxis im Rahmen einer großen Baumaßnahme schwierig umzusetzen ist.

Der Einbau des Asphalts erfolgt nicht im Laboratorium mit dem Walzsektorverdichter oder ähnlichen Verdichtungsgeräten, sondern mit einem Asphaltfertiger und einer Walze. Anschließend werden Probekörper aus der Einbaustrecke entnommen, in Betonplatten eingebettet und einer Polierbeanspruchung in der ARTe unterzogen (s. Bild 14). An den polierten Probekörpern wird die Messung der NO-Eliminierung durchgeführt.

Die NO-Abbauwerte liegen im gleichen Bereich, wie sie für die im Labor erzeugten Proben der Alternative 3 bestimmt wurden. Im Gegensatz zu diesen Proben weisen die Proben aus der Ausbaustrecke allerdings einen Unterschied in den NO-Abbauraten vor und nach der Polierbeanspruchung auf. Unpoliert wird eine NO-Abbaurrate von 25,2 % gemessen, während nach der Polierbeanspruchung eine geringere NO-Abbaurrate von 10,7 % bestimmt wird (s. Bild 15). Die Polierbeanspruchung kann also bei diesen Proben einen Einfluss auf die photokatalytische Aktivität ausgeübt haben.



Bild 14: Bohrkern aus der Einbaustrecke nach 300 Minuten Polierdauer

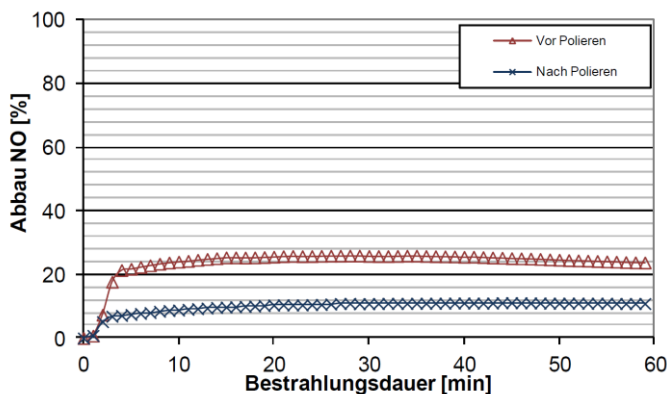


Bild 15: Abbau des Stickstoffmonoxids vor und nach der Polierbeanspruchung (Alternative 3 aus der Einbaustrecke)

Alternative 3 aus der Einbaustrecke weist eine höhere NO-Abbaurrate als die im Labor hergestellten Asphaltplatten auf.

Dies liegt zum einen an der Genauigkeit der Messmethode, bei der mit Abweichungen von bis zu 10 % zu rechnen ist. Zum anderen könnte die Oberflächentextur mit dem Walzsektor-Verdichtungsgerät im Labor anders sein als die mit dem Fertiger sowie der Walze auf der Einbaustrecke. Dies führt dazu, dass die Asphaltproben mit dem Abstreumaterial unterschiedlich bedeckt werden und mit demselben Abstreumaterial leicht unterschiedliche Abbauraten resultieren.

4 Schlussfolgerung

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden verschiedene Möglichkeiten untersucht, TiO₂ auf die Straßenoberfläche aufzubringen. Unterschiedliche Abstreumaterialien wurden im Labor hergestellt, getestet und abschließend auf ihrer Tauglichkeit für den Einsatz in Praxis geprüft. Als Ergebnis kann festgehalten werden, dass mit dem erarbeiteten Verfahren und für die hier untersuchten Abstreumaterialien ein langfristiger NO-Abbau auf Asphaltstraßen durch den Einsatz der TiO₂-Partikel mit photokatalytischen Eigenschaften erzielbar ist. Damit ist ein wichtiger Schritt hin zur Herstellung des umweltfreundlichen Straßenbelags mit photokatalytischem Stickstoffdioxidabbau unter Nutzung der Nanotechnologie genommen.

5 Literatur

BlmSchV: Neununddreißigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (39. BImSchV) vom 2. August 2010

Diegmann, Hartmann: Vergleich von berechneten Luftschadstoffbelastungen mit gemessenen Luftqualitätsdaten im Straßenraum, Zeitschrift Immissionsschutz, 2/2006

DIN EN 196-1: Prüfverfahren für Zement, Teil 1: Bestimmung der Festigkeit, 2005

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Merkblatt zur Bewertung der Straßengriffigkeit bei Nässe (M BGRIF), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe "Infrastrukturmanagement", Köln, 2012

Görgen, Lambrecht: Hohe Stickstoffdioxidbelastungen. Können die NO₂-Luftqualitätsgrenzwerte im Jahr 2010 eingehalten werden?. Zeitschrift Immissionsschutz, 1/2008

ISO 22197-1: Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) – test method for air purification performance of semiconducting photocatalytic materials – part 1: removal of nitric acid, 2008

Rabl: Information über Abgase des Kraftfahrzeugverkehrs, Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, www.bayern.de/lfu, April 2003

Umweltbundesamt: Luftqualität 2011 – vorläufige Auswertung, Presse-Hintergrundpapiere, 2012