

Wirksamkeit von Tunnelwänden als Träger photokatalytischer Oberflächen

Hauptstudie

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Verkehrstechnik Heft V 360

bast

Wirksamkeit von Tunnelwänden als Träger photokatalytischer Oberflächen

Hauptstudie

von

Dietmar Aloys Stephan
Clemens Ehm
Sameena Kamaruddin

Institut für Bauingenieurwesen
Fachgebiet Baustoffe und Bauchemie
Technische Universität Berlin

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Verkehrstechnik Heft V 360

bast

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

- A - Allgemeines
- B - Brücken- und Ingenieurbau
- F - Fahrzeugtechnik
- M - Mensch und Sicherheit
- S - Straßenbau
- V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Ed. Schünemann KG, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** stehen zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.
<https://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 6317018
Hauptstudie zur Wirksamkeit von Tunnelwänden als Träger photokatalytischer Oberflächen

Fachbetreuung

Anja Baum

Referat

Umweltschutz, Immissionen

Herausgeber

Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0

Redaktion

Stabsstelle Presse und Kommunikation

Druck und Verlag

Fachverlag NW in der
Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48
www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9331

ISBN 978-3-95606-692-4

Bergisch Gladbach, Juli 2022

Kurzfassung – Abstract

Hauptstudie zur Wirksamkeit von Tunnelwänden als Träger photokatalytischer Oberflächen

Das Ziel dieses Projekts war die Konzeptionierung und der Bau abgeschlossener photokatalytischer Reaktoren (Tunnelkassetten), mit denen die Stickoxidbelastung im Tunnel „Rudower Höhe“ in Berlin in einem relevanten Maß von 15 % reduziert werden kann. Grundsätzlich teilte sich das Projekt in zwei Phasen auf, wobei in der Phase 1 ein geschlossenes System mit geeignetem Photokatalysator und Leuchtmittel entwickelt werden sollte. Im Rahmen des Projekts stellte sich heraus, dass sich für diese Fragestellung eine Tunnelkassette mit den Abmessungen $1,5 \times 3 \times 4 \text{ m}^3$ sowie drei Lüftern mit einem Volumenstrom von je $1.500 \text{ m}^3/\text{h}$ geeignet zeigte. Zum photokatalytischen Abbau der Stickoxide dienen 13 mit einem Zement-Photoment-Gemisch beschichtete Schaumstoffmatten. Als Leuchtmittel eignen sich die Leuchtstoffröhren Philips Cleo Performance 80. Anhand von Simulationen zeigte sich, dass für eine Stickoxidreduktion von 15 % jeweils 50 Tunnelkassetten auf beiden Seiten am Ende des Tunnels installiert werden sollten.

Die Umsetzung dieser Ergebnisse war in Phase 2 des Projekts geplant. Aufgrund des Ausfalls eines Unterauftragnehmers, der für die Herstellung, den Einbau und den Betrieb der Tunnelkassetten verantwortlich war, konnte diese Phase jedoch lediglich in Ansätzen verwirklicht werden. So stellte die TU Berlin eigenständig eine Demonstrator-Tunnelkassette her, an der die Funktionalität durch einen längeren Testbetrieb nachgewiesen werden konnte. Bezüglich des Photokatalysators ergab sich jedoch die Problematik, dass diese infolge der Alterung geringere Abbauraten erreicht.

Als Grundlage für die Konzeption der Tunnelkassetten wurden zudem umfangreiche Messungen am Tunnel „Rudower Höhe“ vorgenommen. Labortechnische Bewertungen der photokatalytischen Materialien erfolgte an Messaufbauten nach DIN ISO 22197-1. Zudem wurde ein Reaktor speziell für die Abschätzung der Wirksamkeit der Tunnelmatten erarbeitet, der eine beidseitige Beleuchtung sowie eine Durchströmung erlaubt.

Main study on the effect of tunnel walls with photocatalytic surfaces

The aim of this project was the conception and construction of enclosed, photocatalytic reactors (tunnel cassettes) to reduce the nitrogen oxide concentration in the tunnel “Rudower Höhe” in Berlin by 15%. The project was separated in two phases. Phase 1 included the development of an enclosed system with suitable photocatalysts and light sources. According to different investigations and simulations, a tunnel cassette with the dimension of $1.5 \times 3 \times 4 \text{ m}^3$ was designed including three fans with a volume flow of $1,500 \text{ m}^3/\text{h}$ for each fan. For the photocatalytic degradation, 13 foam mats were integrated being coated with a cement-Photoment mixture. As light sources, the fluorescent tubes Philips Cleo Performance 80 were used. Based on simulations, 50 tunnel cassettes are needed on each side in the end of the tunnel for the reduction of the concentration of nitrogen oxide by 15%.

In phase 2, the realization of the tunnel cassettes in the tunnel “Rudower Höhe” was planned. However, the practical application could not be realized because of the failure of a subcontractor being responsible for the production, installation and service of the cassettes. Nevertheless, to demonstrate the functionality of the determined tunnel cassette, the TU Berlin produced a demonstrator tunnel cassette by itself and carried out a test mode for a longer period. Concerning the photocatalyst, the problem occurred that the photocatalytic degradation decreased due to ageing.

Furthermore, comprehensive measurements at the tunnel “Rudower Höhe” were carried out used as basis for the conception of the tunnel cassette. For the evaluation of the photocatalytic materials, measurements according to DIN ISO 22197-1 were used. Furthermore, a special reactor (CST reactor) was designed and constructed for the estimation of the efficiency of foam mats allowing a two-sided UV radiation and the flow of the air through the sample.

Summary

Main study on the effect of tunnel walls with photocatalytic surfaces

1 Introduction and objectives

In recent years, measurements of the air quality show the excess of the annual NO_2 limit of $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ according to the 39. Federal Immission Control Act (Bundesimmissionsschutzverordnung BImSchV) in many places. In particular, the concentration of the nitrogen oxides can be very high in tunnels and at tunnel portals. These high concentrations can be reduced by the use of photocatalytic titanium dioxide (TiO_2). In this context, the photocatalytic effect could be proved in different laboratory investigations and simulations [1-5].

In this project, technical solutions for the reduction of nitrogen oxides should be developed. The aim of this main study is the conception and construction of enclosed photocatalytic reactors (tunnel cassettes) as well as the validation of these reactors in the tunnel "Rudower Höhe" in Berlin.

In a first phase, an enclosed system should be developed including suitable photocatalysts and suitable light sources. Based on this system, the concentration of nitrogen oxides in the tunnel "Rudower Höhe" should be reduced significantly (15%). In the following second phase, the tunnel cassettes should be manufactured in a sufficient scale and installed in the tunnel. However, in spite of the successful development of a prototype, the application of the cassettes in the tunnel "Rudower Höhe" could not be realized because of the failure of a subcontractor.

2 Phase 1

In phase 1, the preparation, choice of material and conception of the prototype of the tunnel cassette occurred.

2.1 Method for the determination of the photocatalytic deposition velocity

The measurement of the photocatalytic deposition velocity was carried out according to ISO 22197-1

[6]. For this method, satisfactory repeatability and reproducibility were obtained in different round robin tests.

2.2 Choice of the suspension of TiO_2 , carrier material and light sources

Numerous coating experiments were carried out to find suitable suspensions and carrier material for the TiO_2 . As TiO_2 suspensions, various photocatalytic paints from different companies as well as own developed and manufactured cement paste with the photocatalytic additive Photoment were considered. These TiO_2 suspensions were applied on different carrier materials like e.g. fiber glass mats or foam mats. Furthermore, a photocatalytic modified glass wool and a photocatalytic filter material were investigated. Thereby, the highest photocatalytic degradation could be determined for the combination of cement-Photoment mixture and foam mats. A further advantage of this own manufactured suspension was that the composition could be modified to adapt the properties.

As suitable light source, the fluorescent tubes Philips Cleo Performance 80 were identified. In this content, it is important to note that UV sources containing mercury must not be sold after 2020 due to a European guideline. In this project, the transition to alternative light sources was not useful because of the expected costs. However, this problem should be considered in future projects.

2.3 Site preparation

To evaluate the conditions in the tunnel "Rudower Höhe", comprehensive measurements were carried out in the considered tunnel. For this, three measurement points were installed within the tunnel analyzing the concentration of nitrogen oxides (NO , NO_2 , NO_x), carbon monoxide (CO), carbon dioxide (CO_2) as well as the meteorological data. Furthermore, the traffic data, the particulate matter pollution as well as the air velocity in the tunnel were measured.

2.4 Construction, conception and simulations of the tunnel cassettes

For the conception of the tunnel cassettes, the photocatalytic surface was the critical parameter which was varied concerning the roughness and

the form. According to the investigations, the foam mats were the most suitable material. To evaluate different surfaces or rather materials, a test stand of the prototype was developed in which the photocatalytic degradation of a defined volume flow could be investigated. Furthermore, the expected degradation was evaluated based on simulations. In this context, on the one hand, the distribution of the flow velocity and the concentration of the nitrogen oxides within the cassettes were modelled. On the other hand, the whole tunnel "Rudower Höhe" was considered in the simulation to detect the three-dimensional flow and the spread of nitrogen oxide in the whole tunnel.

Based on the experiments and modellings, a tunnel cassette was formulated with the dimensions $1.5 \times 3 \times 4 \text{ m}^3$ including three fans with a volume flow of $1,500 \text{ m}^3/\text{h}$ for each fan and 13 photocatalytic foam mats. According to the simulations, 100 tunnel cassettes are necessary for the reduction of 15% of the concentration of nitrogen monoxide in the tunnel "Rudower Höhe". Thereby, 50 cassettes should be installed on the right and 50 cassettes on the left tunnel wall being positioned in the end of the tunnel and without any distances between the cassettes.

3 Phase 2

Initially, phase 2 included the realization of the results obtained in phase 1. However, the phase 2 could be solely complied in parts because of the failure of a subcontractor.

3.1 Construction of a demonstrator tunnel cassette

The construction of the demonstrator cassette should be originally carried out by the subcontractor WB Engineering based in Sofia. However, the provided tunnel cassettes did not correspond to the discussed specifications. For this reason, the TU Berlin constructed a demonstrator and the necessary electronics by itself (see Figure 1).

The functionality of this demonstrator could be proved in a test mode. However, in principle, the efficiency of the tunnel cassette decreases with increasing ageing of the photocatalytic coated foam mats.

3.2 Problems with the realization of the tunnel cassettes

For the realization of the tunnel cassettes in the tunnel "Rudower Höhe", a subcontractor was included in the project. Because of the failure of this subcontractor, the TU Berlin was looking for an alternative company to produce the tunnel cassettes. In this context, a company working on ventilation technology prepared a construction design and submitted an offer. However, this offer exceeded the costs which were initially planned because of the late project entry and the necessary adaption of the cassettes.

As a further problem, because of the missing technical and personal resources, the TU Berlin could not install the produced cassettes in the tunnel "Rudower Höhe". Therefore, the TU Berlin was also

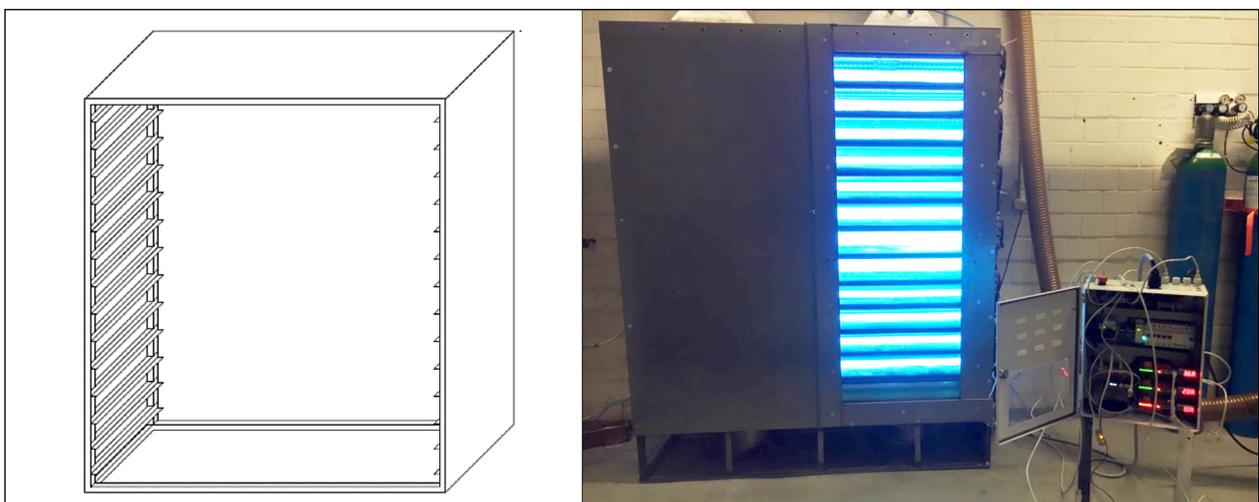


Fig. 1: Demonstrator tunnel cassette of the TU Berlin

looking for an alternative company for the installation of the cassettes which could be even found. However, for the realization of the cassettes in the tunnel, the company needed information about the conditions for the installation. Because the responsible authority did not give this information, the installation could not be planned. Due to these problems concerning the high cost and the missing cooperation, the realization of the tunnel cassettes was rejected.

3.3 Modification of materials and measurement methods

Concerning the materials, no further optimization of the composition of the material could be achieved because the improvement of the mechanical properties always caused the deterioration of the photocatalytic properties. However, investigation on the coated foam mats stored for longer showed that the plastic of the foam mats became "brittle" and the stability of the mats decreased. Because of this, in further studies, the interaction between the plastic of the mats and the coating needs to be optimized e.g. with a barrier layer between these two components. Regardless the ageing of the plastic, in further optimizations, the coating process of the mats could be improved allowing the coating to a greater extend. The most effective solution is an immersion process of the mats whereby excess material should be removed by rolling, spinning or beating.

Furthermore, for an improved evaluation of the photocatalytic degradation, a special CST reactor (continuously stirred tank reactor) was designed and produced. In this reactor, the photocatalytic material can be irradiated with UV radiation on both sides and the nitrogen oxide containing air has to flow through the sample.

3.4 Measurements in the tunnel "Rudower Höhe"

In the tunnel, the concentration of nitrogen oxides was measured for a longer period of time with an active measuring instrument. The results of these measurements were very plausible because the concentration of NO_x was lower on Sundays and public holidays demonstrating the less traffic congestion.

In addition to this temporal dependency, the spatial distribution of the nitrogen oxides was investigated at the southern end of the tunnel. For this, modified Palmes Tubes were used for a passive sampling. According to the results of these investigations, the highest concentration of NO_2 could be found in the end of the tunnel. After leaving the tunnel, the concentration of NO_2 in the air halved and remained constant for several meters. In spite of the halving, the concentration of NO_2 exceeded the reference values captured at a road section being not influenced by the tunnel. In the surrounding area of the tunnel end outside the road, the concentration of NO_2 was relatively low and fell below the threshold values.

Despite of the comprehensive measurements, the detailed distribution of the nitrogen oxides could not be identified because the influences of thermal, wind and traffic could not be captured sufficiently.

4 Summary

The aim of this project was the conception and construction of enclosed, photocatalytic reactors (tunnel cassettes) to reduce the nitrogen oxide concentration in the tunnel "Rudower Höhe" in Berlin by 15%. The project was separated in two phases. Phase 1 included the development of an enclosed system with suitable photocatalysts and light sources. According to different investigations and simulations, a tunnel cassette with the dimension of $1.5 \times 3 \times 4 \text{ m}^3$ was designed including three fans with a volume flow of $1,500 \text{ m}^3/\text{h}$ for each fan. For the photocatalytic degradation, 13 foam mats were integrated being coated with a cement-Photoment mixture. As light sources, the fluorescent tubes Philips Cleo Performance 80 were used. Based on simulations, 50 tunnel cassettes are needed on each side in the end of the tunnel for the reduction of the concentration of nitrogen oxide by 15%.

In this context, it has to be mentioned that UV sources containing mercury will not be authorized for sale after 2020 due to a European guideline. Therefore, alternative light sources needs to be found for the future application of the tunnel cassettes.

In phase 2, the realization of the tunnel cassettes in the tunnel "Rudower Höhe" was planned. However, the practical application could not be realized

because of the failure of a subcontractor being responsible for the production, installation and service of the cassettes. Nevertheless, to demonstrate the functionality of the determined tunnel cassette, the TU Berlin produced a demonstrator tunnel cassette by itself and carried out a test mode for a longer period. Concerning the photocatalyst, the problem occurred that the photocatalytic degradation decreased due to ageing. Furthermore, the foam mats showed an increasing embrittlement due to ageing. To solve these problems, in further studies, the interaction between the cement coating and the foam mats needs to be optimized.

Furthermore, comprehensive measurements at the tunnel "Rudower Höhe" were carried out used as basis for the conception of the tunnel cassette. During these measurements, the concentration of nitrogen oxides, carbon monoxide and carbon dioxide as well as the meteorological data, the traffic data, the particulate matter pollution and the air velocity in the tunnel were captured. For the evaluation of the photocatalytic materials, measurements according to ISO 22197-1 were carried out. Furthermore, a special reactor (CST reactor) were designed and constructed for the estimation of the foam mats allowing a two-sided UV radiation and the flow of the air through the sample.

References

- [1] FLASSAK, TH., BOLTE, G. (2013): Numerical simulation of the effectiveness of photocatalytic active concrete surfaces, In: 1st International Conference on the Chemistry of Construction Materials, October 7-9, 2013, Berlin.
- [2] FLASSAK, TH., RIFFEL, S. UND REUTER, U. (2013): Photokatalyse konkret – Modellierung und Messung im Modellprojekt „Hohenheimer Straße“ der Stadt Stuttgart. In: 57. Betontage, 5. - 7. Februar 2013, Neu-Ulm.
- [3] BOLTE, G. UND FLASSAK TH. (2012): Saubere Luft dank Photokatalyse. Immissionsschutz Ausgabe 2/2012, 54-58.
- [4] FLASSAK, TH., SÖRGEL, C., BURGETH, G., DUTTLINGER, W., MABAN M. UND KLEFFMANN J. (2011): Numerische Modellierung des photokatalytischen Stickoxidabbaus durch TiO₂-dotierte Gebäudefassaden, Kolloquium Luftqualität an Straßen 2011 der Bast, 30. und 31. März 2011, Bergisch Gladbach.
- [5] UEHLEND AHL, S., KURTENBACH, R. UND FLASSAK, TH. (2013): Dortmunder Pilotprojekt „Park der Partnerstädte“ / Leonie-Reygers-Terrasse mit photokatalytisch aktiver Betonoberfläche. Kolloquium Luftqualität an Straßen 2013 der Bast, 20. und 21. März 2013, Bergisch Gladbach.
- [6] International Standard ISO 22197-1 Fine ceramis (advanced ceramics, advanced technical ceramics) - Test method for air-purification performance of semiconducting photocatalytic materials, Part 1 - Removal of nitric oxide. 2007.

Inhalt

1	Einleitung	11	3.4.1	Spezifikationen für Gehäuse, Technik und Ventilatoren.....	27
1.1	Stand der Wissenschaft und Technik	11	3.4.2	Aufbau und Modifikationen des Prototyps für Laboruntersuchungen	28
1.2	Gesamtziel und Konzept.....	12	3.4.3	Umsetzung der Labormessergebnisse auf das Design und den Bau der Tunnelkassetten.....	33
1.3	Wirtschaftliche, wissenschaftliche und technische Bedeutung	12	3.5	Simulation der dreidimensionalen Strömung, der Ausbreitung von Stickoxiden und des photokatalytischen Abbaus in den Tunnelkassetten	35
2	Informationen zum Standort Tunnel Rudower Höhe	13	3.5.1	Theorie zu nicht-diffusionslimitierter Abbaurrate bzw. theoretischem Wirkungsgrad einer Tunnelkassette.....	36
3	Phase 1 – Konzeptionierung der Tunnelkassetten	13	3.5.2	Basislayout der Tunnelkassette	36
3.1	Anforderungen an die Tunnelkassetten gemäß Ausschreibung	14	3.5.3	Abschätzung der nicht-diffusionslimitierten Abbaurrate bzw. des theoretischen Wirkungsgrades für das Basislayout der Tunnelkassette.....	37
3.2	Versuchsstand zur Bestimmung von Depositionsgeschwindigkeiten	14	3.5.4	Simulation der Strömung und des Schadstoffabbaus für das Basislayout der Tunnelkassette mit der CFD-Software PHOENICS	38
3.3	Auswahl von Leuchtmitteln, TiO ₂ -Suspensionen und Trägermaterialien	15	3.5.5	Tunnelkassettenvariante mit fünf hinterströmten Leitblechen und zusätzlichen Spoilern	40
3.3.1	Untersuchung und Auswahl von Leuchtmitteln.....	15	3.5.6	Tunnelkassettenvariante mit 11 horizontalen Leitblechen	41
3.3.2	Photokatalytische Materialien	16	3.5.7	Tunnelkassette mit photokatalytischen Oberflächen in Wabenstruktur	42
3.3.3	Fazit zu den Photokatalytischen Materialien verschiedener Hersteller	19	3.5.8	Tunnelkassette mit photokatalytisch beschichteten röhrenförmigen Netzen	44
3.3.4	Trägermaterialien	19	3.5.9	Tunnelkassette mit beschichteten Schaummatten.....	45
3.3.5	Beschichtung der Trägermaterialien mit Photokatalytischer Suspension.....	19	3.6	Simulation der dreidimensionalen Strömung und der Ausbreitung von Stickoxiden im Tunnel mit photokatalytischen Tunnelkassetten	46
3.3.6	Photokatalytische Beschichtungen von Glasfasermatten mit eigens hergestelltem TiO ₂	20	3.6.1	Theoretische Abschätzung der notwendigen Anzahl von Tunnelkassetten	46
3.3.7	Hauptversuch.....	21	3.6.2	Abschätzung der Tunnelluftgeschwindigkeit.....	48
3.3.8	Fazit Beschichtungen von Glasfasermatten mit selbst hergestelltem TiO ₂	22			
3.3.9	Alternative zur Verwendung photokatalytischer Farben.....	22			
3.3.10	Filtermaterial	24			
3.3.11	Schaummatten mit photokatalytischer Beschichtung	25			
3.4	Bau und Konzeptionierung der Tunnelkassetten	27			

3.6.3	CFD-Simulation der Konzentrationsverteilung im Tunnel.....	49
3.6.4	Prozentuale Minderung der Konzentration am Tunnelaustritt durch 100 Demonstrator-Tunnelkassetten.....	50
3.6.5	CFD-Simulation der Wirkung des Luftvolumenstroms durch die Tunnelkassetten auf die Strömung im Tunnel	51
3.7	Standortvorbereitung	52
3.7.1	Eingesetzte Messtechnik	52
3.7.2	Messcontainer der Messstellen im Tunnel Rudower Höhe	53
3.7.3	Zusammenfassung und Erkenntnisse der Nullmessungen der Phase 1.....	53
3.8	Schlussfolgerungen der Phase 1	57
4	Phase 2 – Umsetzung in die Praxis.....	57
4.1	Bau einer Demonstrator-Tunnelkassette.....	57
4.2	Weiterentwicklung der photokatalytischen Materialien.....	59
4.3	Weiterentwicklung der Labormessungen	61
4.4	Stickoxidverteilung im und am Tunnel	65
5	Zusammenfassung und Ausblick	70
Literatur		74
Bilder		75
Tabellen		80
Anhang		82

1 Einleitung

1.1 Stand der Wissenschaft und Technik

In den vergangenen Jahren haben bundesweite Messungen der Luftqualität ergeben, dass der derzeit gültige NO_2 -Jahresmittelgrenzwert von $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ gemäß 39. Bundesimmissionsschutzverordnung (BImSchV) speziell an verkehrsintensiven Standorten teilweise starke Überschreitungen aufweist. NO_2 und durch NO_2 entstehendes Ozon können eine gesundheitliche Gefährdung sein und zum Beispiel zu einer reduzierten Lungenfunktion führen, wie die Weltgesundheitsorganisation (WHO) warnt [1].

Die Reduktion von Stickoxiden durch die Verwendung von photokatalytisch wirkendem Titandioxid (TiO_2) wird daher in der Fachöffentlichkeit besonders mit Blick auf deren Ertüchtigung im Verkehrsbereich analysiert. Laboruntersuchungen und Simulationen weisen auf ein hohes Reduktionspotenzial hin [2-6].

Kristallines TiO_2 verfügt aufgrund der speziellen Bindungsenergien und Anordnung der Atome im Kristallgitter über Photohalbleitereigenschaften. Hieraus resultiert die photokatalytische Aktivität, welche TiO_2 die Fähigkeit verleiht, zahlreiche Verbindungen unter Einwirkung elektromagnetischer Strahlung ($< 380 \text{ nm}$, UVA) zu zersetzen. Die Strahlung führt zu einer Anregung eines Elektrons vom höchsten besetzten Molekülorbital (HOMO) des Valenzbandes in das niedrigste besetzte Molekülorbital des Leitungsbandes (LUMO). Sowohl das dabei entstehende Defektelektron (Loch) als auch das angeregte Elektron können, wenn sie an die Oberfläche des Partikels diffundieren, ohne dabei vorher zu rekombinieren, Oxidations- und Reduktionsreaktionen induzieren. Die photokatalytische Wirksamkeit von TiO_2 und TiO_2 -haltigen Produkten wurde bereits vielfach in verschiedenen Laboruntersuchungen nachgewiesen [7-9]. Neben Ländern wie Japan, Italien, Belgien usw. findet TiO_2 auch in Deutschland als Photokatalysator mehr und mehr Verwendung, insbesondere in verschiedenen Baustoffprodukten wie Farben, Gläsern, Lacken und Dachziegeln. Meist handelt es sich bei dem TiO_2 um Nanopartikel entsprechend der Definition der EU-Kommission [10], welches wegen seiner großen wirksamen Oberfläche eine höhere photokatalytische Effektivität besitzt. Für die Verbesserung der Luftqualität und für die Einhaltung von Grenzwerten

steht hierzulande die Umwandlung von schädlichen Stickoxiden zu Nitraten unter Sonneneinstrahlung oder künstlicher UV-Strahlung im Fokus. Hierfür werden geeignete Bauwerksoberflächen z. B. mit TiO_2 -Suspensionen beschichtet [7,8,11].

Eine Methode zur Bestimmung der photokatalytischen Effektivität eines Materials ist z. B. die Messung des Abbaus von Stickstoffmonoxid (NO) nach ISO 22197-1 [12]. Hierbei wird unter definierten Randparametern ein Gasstrom bekannten NO -Gehaltes über den belichteten Prüfkörper geleitet und durch NO -Messung im Auslass die Abbaurate bestimmt.

Im europäischen Raum wird mittlerweile mehr und mehr großflächig die Effektivität von TiO_2 in Baustoffen zur Schadstoffreduzierung untersucht. In Deutschland z. B. wurde eine Versuchsstrecke der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) zur Anwendung einer TiO_2 -Suspension auf einer Lärmschutzwand an der BAB A1 zwischen den Anschlussstellen Osnabrück-Nord und Osnabrück-Hafen nördlich von Osnabrück eingerichtet. Darüber hinaus wird derzeit ein weiteres Projekt zum Einsatz von TiO_2 im Auftrag der BASt am Krohnstiegtunnel an der B433 am Flughafen Hamburg durchgeführt und befindet sich in der Abschlussphase [13].

In Abhängigkeit vom Lüftungssystem eines Tunnels können die Stickoxidkonzentrationen im Tunnel selbst und an den Portalen sehr hoch sein. Es kommt hinzu, dass für eine photokatalytische Maßnahme keine UV-Strahlung aus natürlichem Sonnenlicht in einem Tunnel zur Verfügung steht. Ein Beispiel für die Anwendung von TiO_2 in europäischen Tunneln ist der Tunnel „Umberto I“ im Zentrum Roms, der mit 9.000 m^2 photokatalytisch modifizierter Farbe auf Zementbasis ausgestattet ist. Diese photokatalytisch modifizierte Farbe führte in Untersuchungen zu einer Abbaurate des NO_x von mehr als 20 % [14]. Weitere photokatalytisch modifizierte Tunnel befinden sich z. B. in den Niederlanden, Österreich und Belgien [13-16].

Die genannten Beispiele für photokatalytisch modifizierte Tunnel bedienen sich Strahlungsquellen, welche auch Einfluss auf die Umgebung, insbesondere auf Menschen und Tunnelausstattung haben können. Eine Alternative ist, die photokatalytische Reaktion in einem abgeschlossenen System ablaufen zu lassen, um auf diese Weise potenzielle Auswirkungen, die von UV-Strahlern auch auf die Umgebung ausgehen, zu vermeiden. In Deutschland

existiert bis zum jetzigen Zeitpunkt keine vergleichbare Studie in einem Tunnel.

Im Rahmen des Projektes FE 09.0184/2011/ARB „Hauptstudie zur Wirksamkeit von Tunnelwänden als Träger photokatalytischer Oberflächen“ sollten technische Lösungen zur Stickoxidreduktion an einem Tunnelstandort erarbeitet werden. Dabei wurde künstliches UV-Licht als Energiequelle für den Schadstoffabbau eingesetzt. Das Ziel des Vorhabens war die Konzeptionierung und der Bau von abgeschlossenen photokatalytischen Reaktoren (Tunnelkassetten) sowie deren Validierung am Standort Rudower Höhe in Berlin.

1.2 Gesamtziel und Konzept

Das Gesamtziel dieses Projekts war die Umsetzung des Einsatzes von TiO_2 in Form von geschlossenen Kassetten im Tunnel Rudower Höhe an der BAB A113 in Berlin und die Bewertung der Effektivität des konzipierten Ansatzes. Als Zielvorgabe wurde eine Stickoxidreduktion von 15 % angestrebt. Die Bearbeitung des Projekts sollte in enger Zusammenarbeit mit dem Auftraggeber erfolgen und zudem auf den Erkenntnissen der Vorstudie FE 09.0167/2011/IRB „Wirksamkeit von Tunnelwänden als Träger photokatalytischer Oberflächen zur Minderung der NO_x -Belastung im Vergleich zu Lärmschutzwänden und Fahrbahnoberflächen“ aufbauen. Auf dieser Vorstudie beruht die Wahl des Tunnels Rudower Höhe, wobei neben einer Standortsuche weiterhin auch die Planung der Messungen sowie eine Machbarkeitsuntersuchung für die Ausstattung des Standortes mit den notwendigen technischen Einrichtungen durchgeführt wurden.

Zum Erreichen des Gesamtziels erfolgte die Bearbeitung dieser Hauptstudie in zwei Phasen. In der ersten Phase zielte das Projekt darauf ab, ein geeignetes geschlossenes System zu entwickeln, welches den TiO_2 -Photokatalysator und geeignete Leuchtmittel enthält. Nach der Entwicklung des Prototyps in der ersten Projektphase sollten in der zweiten Phase die Umsetzung und Validierung der Tunnelkassetten erfolgen. Dafür waren in der Phase 2a zunächst der Bau, die Montage und der Testbetrieb von 10 Tunnelkassetten geplant, um die im Labor erarbeitete Kassette weiterzuentwickeln. Zur Optimierung der Tunnelkassetten sollten somit wissenschaftliche Erkenntnisse aus Laboruntersuchung und Testbetrieb kombiniert werden, während

die Konzeption zudem durch Modellierungen begleitet wurde.

In der Phase 2b sollte der Bau, die Montage und der Betrieb weiterer Tunnelkassetten umgesetzt werden.

Für die zweite Phase sollten die konzipierten Tunnelkassetten im Tunnel installiert und betrieben werden. Während der Projektlaufzeit konnte die Validierung jedoch aufgrund der Insolvenz eines Unterauftragnehmers nicht im ursprünglich geplanten Umfang durchgeführt werden. Um dennoch Aussagen über die Funktionsfähigkeit der konzipierten Tunnelkassetten treffen zu können, wurde ein Prototyp hergestellt, um das photokatalytische Abbaupotenzial dieser Kassetten grundsätzlich abschätzen zu können.

Darüber hinaus sollten die Ergebnisse zweier weiterer Projekte zum photokatalytischen Stickoxidabbau an Tunnel- bzw. Lärmschutzwänden mit den Resultaten und Erkenntnissen dieses Projektes zusammengeführt, gegenübergestellt und bewertet werden.

1.3 Wirtschaftliche, wissenschaftliche und technische Bedeutung

Die wirtschaftliche, wissenschaftliche und technische Bedeutung des Projektes wurde bereits in der Vorstudie diskutiert. Nach dieser Diskussion könnte der Einsatz von photokatalytischen Oberflächen in Planfeststellungsverfahren berücksichtigt werden, sofern für diese eine hohe Effektivität zum Abbau von Stickoxiden in Tunnelstandorten nachgewiesen werden kann. Auf diese Weise könnte der Neu- und Ausbau von Straßen mit Tunnelportalen auch an Stellen ermöglicht werden, an denen die Umsetzung durch prognostizierte Grenzwertüberschreitungen gefährdet wäre oder die mit Verkehrsbeschränkungen belegt werden müssten [13].

Die im Rahmen dieses Projekts betrachtete Hauptstudie war ein erster Schritt für den Nachweis, ob langfristig der Einsatz von TiO_2 , mittels entsprechenden Aufbringungsverfahren und Leuchtmitteln, eine Verbesserung der Schadstoffsituation an Tunnelausfahrten bedeuten kann. Die wirtschaftliche Bedeutung war daher groß.

Auch die wissenschaftliche Bedeutung des Vorhabens war hoch, da erstmals in Deutschland die Min-

derung von Stickoxiden durch photokatalytische Reaktoren in einem Tunnel untersucht wurde. Weiterhin wurde zu diesem Zweck ein geschlossenes, photokatalytisches System (Tunnelkassette) entwickelt, welches in dieser Art bisher in anderen Projekten noch nicht zum Einsatz gekommen war. Hierfür wurden geeignete Trägermaterialien für das Titandioxid sowie photokatalytische Farben, Dispersionen und Beschichtungsmethoden untersucht. Weiterhin wurden geeignete Leuchtmittel eruiert. Sowohl aus wirtschaftlicher, wissenschaftlicher als auch aus technischer Sicht stellte die Planung und die Umsetzung von Tunnelkassetten zur Umsetzung als TiO_2 -Reaktoren eine Herausforderung dar. Zumal im Tunnel die Beeinflussung der eingesetzten Materialien wie UV-Lampen, Glasfasermatten und Trägermittel durch den in der Tunnelluft befindlichen Ruß sowie die Wechselwirkungen der einzelnen Komponenten untereinander nicht zu unterschätzen war.

Aus diesem Grund war ein optimales Zusammenspiel der einzelnen Faktoren wie optimale photokatalytische Effektivität, Langlebigkeit der eingesetzten Komponenten und geringstmöglicher Energieverbrauch anzustreben. Im Rahmen des Projekts wurde dies durch Laboruntersuchungen, Modellierungen sowie schrittweisen Verbesserungen der TiO_2 -Aufbringung und der Leuchtmittel erreicht.

2 Informationen zum Standort Tunnel Rudower Höhe

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde der Tunnel Rudower Höhe an der Bundesautobahn A113 in Berlin näher betrachtet, der im Rahmen der

Vorstudie FE 09.0167/2011/IRB ausgewählt und tiefergehend untersucht wurde. Der längsbelüftete und im Richtungsverkehr betriebene Tunnel weist eine Länge von 960 m auf und verfügt über Notgehwege und Seitenstreifen. Die geringste Höhe im Tunnel beträgt 4,80 m.

Sowohl die nördlichen- als auch die südlichen Tunnelaus- und -einfahrten sind über weite Strecken mit Lärmschutzwänden eingefasst. Beide Richtungsfahrbahnen sind jeweils mit drei Fahrstreifen sowie einem Seitenstreifen versehen.

3 Phase 1 – Konzeptionierung der Tunnelkassetten

In der ersten Phase des Projekts standen verschiedene Arbeiten zur Konzeptionierung der Tunnelkassetten an. Im Folgenden werden zunächst die geforderten Randbedingungen an die Tunnelkassette beschrieben, sowie die Grundlagen zur Messung des photokatalytischen Stickoxidabbaus vorgestellt. Anschließend erfolgt eine Beschreibung der verwendeten Leuchtmittel, der Erarbeitung einer geeigneten photokatalytischen Suspension und der Auswahl eines geeigneten Trägermaterials für die photokatalytische Suspension. Aufbauend auf diesen Ergebnissen erfolgten die Konzeptionierung der Tunnelkassette sowie die Simulation der Strömung und Ausbreitung der Stickoxide in der Tunnelkassette selbst und im Tunnel Rudower Höhe. Abschließend wird die Standortvorbereitung beschrieben, bei der umfangreiche Messungen zur Erfassung der Bedingungen im Tunnel Rudower Höhe durchgeführt wurden.

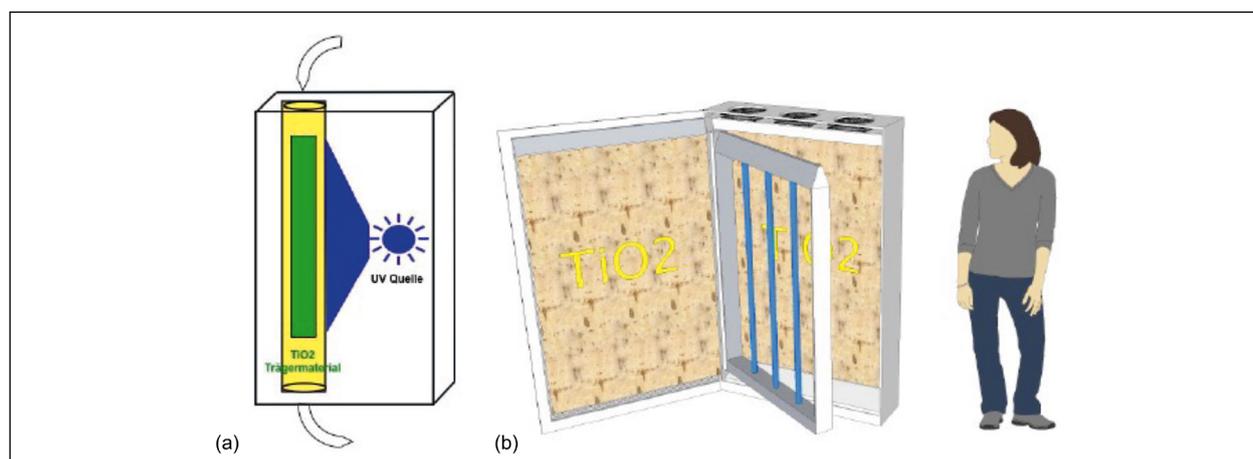


Bild 1: Tunnelkassette als geschlossenes System: (a) Grundprinzip und (b) mögliche technische Lösung mit Größenmaßstab

3.1 Anforderungen an die Tunnelkassetten gemäß Ausschreibung

Gemäß der Ausschreibung soll die photokatalytische Reaktion in einem abgeschlossenen System stattfinden, um sowohl die Gesundheit von Fahrzeuginsassen als auch des Betriebspersonals vor schädlicher UV-A-Strahlung zu schützen und darüber hinaus die im Tunnel eingesetzten Kunststoffe nicht der Gefahr einer frühzeitigen Alterung auszusetzen. Bild 1 zeigt das Grundprinzip dieses abgeschlossenen Systems sowie eine mögliche technische Lösung zur Umsetzung.

Die Grundidee dieses geschlossenen Systems ist, dass die Tunnelluft mittels Ventilatoren aktiv ansaugt und in einen geschlossenen Kreislauf überführt wird, in dem sich eine oder mehrere UV-Quellen sowie ein geeignetes, mit TiO_2 beschichtetes Material befinden. Die schadstoffbelastete Luft soll somit direkt an die photokatalytisch aktive Oberfläche geleitet und durch die im System mittels Leuchtmitteln erzeugte UV-Strahlung zur Reaktion mit der TiO_2 -Beschichtung gezwungen werden, um einen möglichst hohen Wirkungsgrad zu erreichen. Danach soll die gereinigte Luft dem Tunnel wieder zugeführt werden.

Im Zuge der Projektbearbeitung mussten somit geeignete Leuchtmittel, ein geeignetes photokatalytisches Material und ein geeigneter Aufbau gefunden werden. Das photokatalytische Material sollte dabei möglichst porös sein, um die aktive Oberfläche zu vergrößern. Darüber hinaus waren die photokatalytischen Oberflächen vorzukonditionieren, um das photokatalytische Potenzial zu entwickeln. Die Anzahl der einzusetzenden Tunnelkassetten war durch Modellrechnungen und Simulationen zu bestimmen.

3.2 Versuchsstand zur Bestimmung von Depositionsgeschwindigkeiten

Die Messapparatur zur Bestimmung der Depositionsgeschwindigkeiten wurde auf Grundlage der ISO 22197-1 [12] entwickelt. Hauptelement des Versuchsaufbaus ist neben der Gasversorgungseinheit die Reaktorzelle, die komplett aus Polymethylmethacrylat (PMMA) besteht. Die Reaktorzelle wird nach Einlegen der Probe ($100 \times 50 \text{ mm}^2$) luftdicht mit einer UV-durchlässigen Quarzglasplatte abgedeckt (vgl. Bild 2). Während der Messung über-

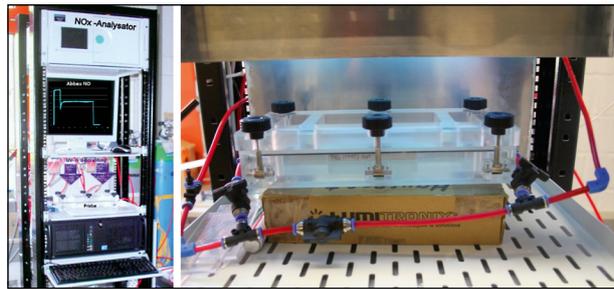


Bild 2: Messapparatur zur Bestimmung des photokatalytischen Abbaus von NO

strömt Luft mit definierter Konzentration an Stickstoffmonoxid die Probe durch einen 5 mm hohen Spalt, wodurch eine laminare Strömung ermöglicht wird.

Als Lichtquelle dienen Philips Cleo UV-A Röhren, da sie ein schmales Spektrum mit einem Maximum bei ca. 350 nm im Bereich der Bandlücke von TiO_2 aufweisen. Der größte Teil der Strahlungsenergie wird unterhalb von 400 nm abgegeben. Beim Messvorgang wird mittels computergesteuertem Massflussregler (MFC) die Luft auf 50 % r. F. eingestellt und anschließend das Prüfgas mit einer Konzentration von 1 ppm hinzudosiert. Die Stickoxidkonzentrationen werden mit einem NO_x -Analysator (APNA 370 von Horiba) gemessen. Dies ermöglicht, Aussagen über den photokatalytischen Stickoxidabbau und dadurch über die photokatalytischen Eigenschaften des geprüften Materials zu treffen [17].

Eine Apparatur gleicher Bauart wurde mehrfach in Ringversuchen für die Neufassung einer deutschen Norm zur Bestimmung der Depositionsgeschwindigkeit von NO für photokatalytische Materialien benutzt. Die Ergebnisse des Ringversuches haben gezeigt, dass mit dem verwendeten Aufbau reproduzierbare Messwerte gewonnen werden können, die mit denen anderer Labore vergleichbar sind.

Alternativ wurde in diesem Projekt auch noch ein CST-Reaktor (continuously stirred tank reactor) verwendet, in dem auch größere Proben vermessen werden können. Zudem war es in diesem Reaktor auch möglich, Probenmaterial zu durchströmen, was für die im Laufe des Projektes entwickelten photokatalytischen, porösen Matten wichtig war.

3.3 Auswahl von Leuchtmitteln, TiO₂-Suspensionen und Trägermaterialien

3.3.1 Untersuchung und Auswahl von Leuchtmitteln

Als Leuchtmittel sollten kommerziell erhältliche Leuchtstoffröhren im relevanten Spektralbereich dienen. Die Emission der Leuchtmittel sollte vorrangig im UV-A-Bereich liegen.

Als Strahlungsquelle im Prototyp für Labormessungen wurde zuerst eine Niederdruck-Leuchtstoffröhre vom Hersteller A verbaut. Die Gesamtleistungsaufnahme beträgt 40 W bei einer Lampenlänge von 120 cm. Da jedoch nicht alle Typen von Leuchtstoffröhren in allen Längen produziert werden, musste der Reaktor für Röhren unterschiedlicher Länge angepasst werden.

Das Spektrum ist in Bild 3 zu sehen, wobei die Strahlung der UV-A-Lichtquelle im Prototypreaktor mithilfe des UV-Spektrometers BLUE-wave der Firma StellarNet mit der Seriennummer 813-855-8687 ermittelt wurde.

In einer zweiten Entwicklungsstufe wurden als Strahlungsquellen Leuchtstoffröhren B1 eines Herstellers B eingesetzt, da diese wie in Bild 4 zu sehen den Großteil ihrer Strahlungsleistung im für die Photokatalyse wichtigen UV-A-Bereich abgeben. In dieser Ausbaustufe wurden fünf Strahler im Reaktor verbaut. Die somit erreichbare maximale UV-A-Beleuchtungsstärke wurde durch eine Öffnung in der Seitenwand des Prototypreaktors gemessen und überschritt den Messbereich des Spektrometers, welcher bei 40 W/m² liegt.

Zusätzlich wurden weitere am Markt erhältliche UV-A-Niederdruckstrahler B2, B3, C1 und D1 auf ihre Spektren getestet. Die betrachteten Lampen der Firmen B, C und D zeigten größtenteils einheitliche Leistungsspektren. Unterschiede der Spektren waren in den unteren Wellenlängenbereichen der UV-A-Peaks zu finden. Während die Strahler B2, C1 und D1 bis 350 nm Strahlung abgeben, erreichen die Modelle B1 und B3 300 nm. Die Messdaten sind in Bild 5 gezeigt.

In Bezug auf die UV-A-Röhren bleibt zu beachten, dass diese zukünftig auf dem Markt nicht mehr zu erhalten sein werden. Der Grund dafür ist, dass nach einer internationalen Konvention (sog. Mina-

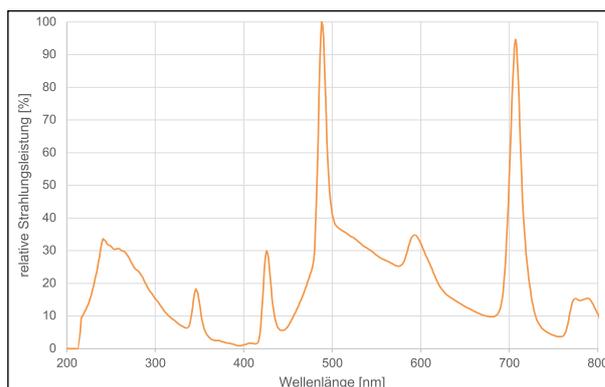


Bild 3: Spektrum der UV-A-Lichtquelle A1 des Herstellers A

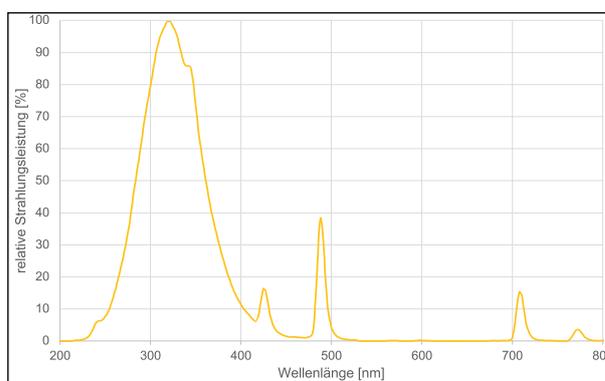


Bild 4: Leistungsspektrum des Niederdruckstrahlers B1 des Herstellers B

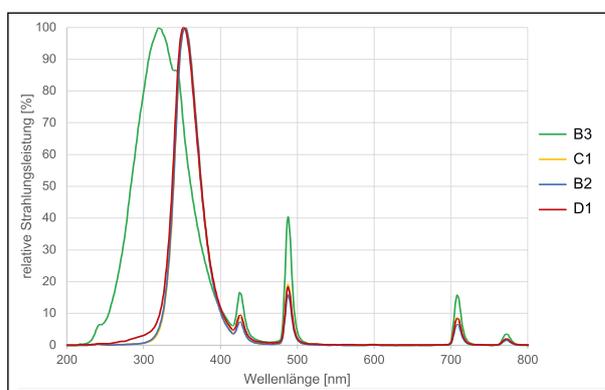


Bild 5: Spektren weiterer getesteter UV-A-Niederdruckstrahler

mata-Konvention) und einer darauf aufbauenden und für Deutschland und die EU geltenden Verordnung (Verordnung (EU) 2017/852 des europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2017 über Quecksilber und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 1102/2008) bis 2021 alle Quecksilberdampf lampen vom Markt genommen werden müssen. Zusätzlich dürfte die höhere Effizienz und längere Lebensdauer alternativer UVEDs das Verschwinden der Quecksilberdampf lampen vom Markt beschleunigen. Aus Gründen der nur noch eingeschränkten Verfügbarkeit der konventionellen

UV-A-Leuchtstoffröhren, des damit verbundenen deutlich gestiegenen Preises sowie des 2021 einsetzenden Verbots kann die Konstruktion der Tunnelkassetten mit Leuchtstoffröhren nur eine Zwischenlösung sein, die für einen Testbetrieb eingesetzt werden. Mittel- und langfristig müssten entsprechende Tunnelkassetten auf jeden Fall auf alternative UV-Quellen umgerüstet werden.

3.3.2 Photokatalytische Materialien

Für den Einsatz von TiO_2 in den Tunnelkassetten wurden zunächst photokatalytische Materialien verschiedener Hersteller¹ untersucht, wobei diese in weiteren Schritten an die Erfordernisse in den Tunnelkassetten angepasst wurden.

Zu den untersuchten Materialien zählten zum einen die photokatalytischen Farben A, B und C von drei verschiedenen Herstellern sowie zum anderen eine modifizierte Glaswolle D eines weiteren Herstellers, die alle mit dem gleichen Verfahren analysiert wurden (vgl. Tabelle 1, Bild 6 und Bild 7). Die photokatalytische Glaswolle wurde kurzfristig in das Projekt aufgenommen, da in einem anderen Projekt bekannt wurde, dass dieses Material in verschiedenen Geräten zur photokatalytischen Luftreinigung für Innenräume eingebaut wird. Alle Materialien wurden bezüglich ihrer Wirksamkeit in Anlehnung an ISO 22197-1 zum Abbau von NO und NO_x getestet (vgl. Kapitel 3.2) [12].

Die drei Farben wurden hierzu mit einer Stärke von $250 \mu\text{m}$ auf Aluminiumplatten aufgetragen. Für die Beschichtung der Aluminiumplatten wurde eine Rakelschablone verwendet, die ein gleichmäßiges Auftragen auf die Aluminiumplatten gewährleisten konnte. Für die Farben B und C wurde eine Mischung aus einem Teil Wasser und einem Teil Farbe angefertigt und diese ebenfalls auf Aluminiumbleche aufgetragen. Bei der Farbe C erfolgte dies anhand der Herstellerangaben. Die Farbe B war im Vergleich zu den Farben A und C sehr dickflüssig und musste wegen der ansonsten schlechten Verarbeitbarkeit verdünnt werden. Von allen Proben wurden $5 \times 5 \text{ cm}^2$ große Probestücke für die Messungen im Reaktor zugeschnitten (vgl. Bild 7).

Die photokatalytische Glaswolle D ist nach Angaben des Herstellers gebrauchsfertig und wurde ohne weitere Veränderungen den Untersuchungen zugeführt. Bild 8 zeigt rasterelektronenmikroskopische

Produkt	Farbe A	Farbe B	Farbe C	Glaswolle D
Trägermaterial	Aluminium	Aluminium	Aluminium	Glasfaser
Behandlung	unverdünnt	1:1 Wasser/Farbe	1:1 Wasser/Farbe	-
Belichtung	24h	24h	24h	24h

Tab. 1: Photokatalytische Produkte



Bild 6: TiO_2 -modifizierte Farben verschiedener Hersteller

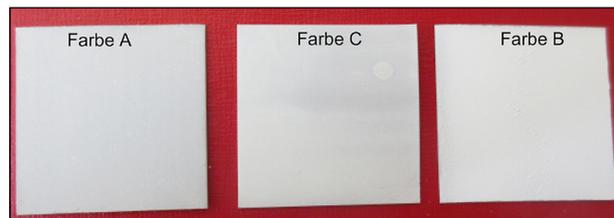


Bild 7: Beschichtete Aluminiumplatten

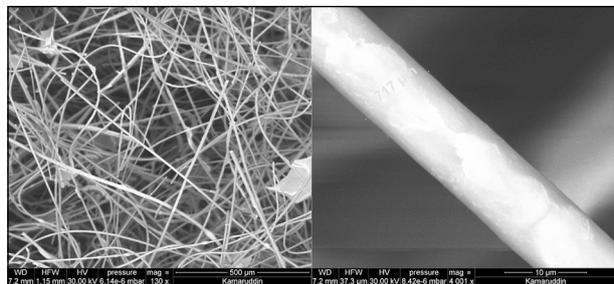


Bild 8: REM-Aufnahmen der photokatalytisch modifizierten Glaswolle D_8.jpg

Aufnahmen (REM-Aufnahmen) dieser photokatalytisch modifizierten Glaswolle.

Die Proben wurden 24 h, 72 h und 4 Wochen in einer Klimakammer unter UV-A-Strahlung und 50 % r. F. vorbelichtet. Anschließend erfolgte die Messung der Proben in Anlehnung an die ISO 22197-1. Die 72 h vorbestrahlten Proben wurden vor der Messung mit entionisiertem Wasser abgespült. Ebenso wurden auch die 4 Wochen vorbestrahlten Proben einmal pro Woche vorbehandelt.

Die Ergebnisse des photokatalytischen NO_x -Abbaus nach 24 h Vorbestrahlung sind in Bild 9 und Bild 10 dargestellt. In Bild 9 wird der Abbau an Stickstoffmonoxid (NO) und der dabei resultierende Ge-

¹ Die Hersteller sind im Rahmen dieses Berichts anonymisiert.

halt des Zwischenproduktes Stickstoffdioxid (NO_2) dargestellt. In Bild 10 wird der Gesamtabbau an Stickoxiden (NO_x) im Verlauf der Messzeit gezeigt. Nach diesen Ergebnissen ließ sich für die Farben A und B kein signifikanter photokatalytischer Abbau des NO sowie des NO_2 feststellen, während für die Farbe C sowie die untersuchte Glaswolle D grundsätzlich ein Abbau sichtbar wurde.

Anhand der durchgeführten Messungen wurden die Photoneneffizienzen ζ über die Formel 1 und Formel 2 nach [18] ermittelt.

mit:

$$I_0 = \frac{I\lambda}{N_A h c} \quad \text{Gl 1}$$

$$\zeta [\%] = \frac{\Delta n_{\text{NO}}}{I_0 \cdot A} \quad \text{Gl 2}$$

I_0 Lichtfluss [$\text{s}^{-1} \text{cm}^{-2}$]

I Lichtintensität [$\text{J s}^{-1} \text{cm}^{-2}$]

λ Wellenlänge [m]

N_A Avogadro Konstante [mol^{-1}]

h Planck Konstante [Js]

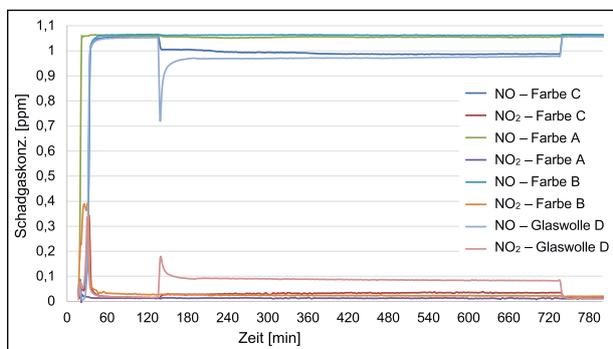


Bild 9: Darstellung des Stickstoffmonoxid- und Stickstoffdioxidverlaufes in Abhängigkeit der Zeit für die einzelnen Proben (Vorbehandlung: 24 h UV-Bestrahlung)

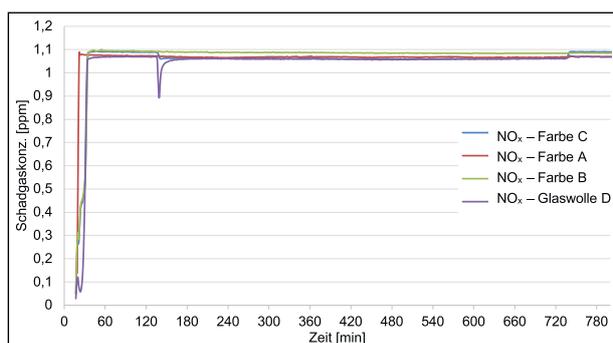


Bild 10: Darstellung des NO_x -Abbaus in Abhängigkeit der Zeit für die einzelnen Proben (Vorbehandlung: 24 h UV-Bestrahlung)

c Lichtgeschwindigkeit [ms^{-1}]

Δn_{NO} Differenz des NO -Flusses beim Ein- und Auslass [mol s^{-1}]

A Bestrahlte Fläche [cm^2]

Die Tabelle 2 enthält die Daten der Proben nach einer 24-stündigen Vorbelichtungszeit zum Ende der Belichtungszeit bei der Messung. Ergaben sich aus der Berechnung negative Werte für NO_2 , wurde während der Messung mehr NO_2 gebildet als abgebaut. Dies konnte für die Farbe C und die Glaswolle D beobachtet werden.

Allgemein war durch die organischen Bindemittel in den Farben eine Aktivierungsphase notwendig. Die Photokatalysatoren waren nach Applikation der Farben von den organischen Bindemitteln umhüllt. Diese Bindemittelhülle wurde während der Aktivierung durch die photokatalytisch entstehenden Sauerstoffradikale oxidiert, damit abgetragen und der Katalysator für die Schadgase zugänglich. Aus diesem Grund wurden weitere Proben für 72 h und 4 Wochen vorbewittert und mit demselben Messprogramm auf ihre photokatalytische Aktivität untersucht. Wie den Ergebnissen in Tabelle 3 und Tabelle 4 zu entnehmen ist, brachte dies in keinem Fall die gewünschte Verbesserung.

Hersteller	Farbe A	Farbe B	Farbe C	Farbe D
	Photoneneffizienz [%]			
NO	0,012	0,007	0,211	0,215
NO_2	0,000	0,007	-0,137	-0,192
NO_x	0,013	0,014	0,074	0,022

Tab. 2: Photoneneffizienzen der einzelnen photokatalytischen Produkte nach 24 h Vorbelichtung am Ende der Messung

Hersteller	Farbe A	Farbe B	Farbe C	Farbe D
	Photoneneffizienz [%]			
NO	0,008	0,000	0,000	0,202
NO_2	-0,006	0,006	-0,001	-0,199
NO_x	0,002	0,006	-0,002	0,001

Tab. 3: Photoneneffizienzen der einzelnen photokatalytischen Produkte nach 72 h Vorbestrahlung am Ende der Messung

Hersteller	Farbe A	Farbe B	Farbe C	Farbe D
	Photoneneffizienz [%]			
NO	0,045	0,015	0,337	0,128
NO_2	0,004	0,007	-0,230	-0,126
NO_x	0,048	0,023	0,107	0,003

Tab. 4: Photoneneffizienzen der einzelnen photokatalytischen Produkte nach 4 Wochen Vorbestrahlung

Weiterhin wurden aus den Messungen die Depositionsgeschwindigkeiten für NO bestimmt. Diese stellen eine Größe dar, die unabhängig von der Geometrie des Reaktors für die späteren Modellierungen maßgeblich war. Die Berechnung der Depositionsgeschwindigkeit v_{surf} erfolgte bei einer Probenfläche von 50 cm² durch die folgenden Formeln nach [19]. Diese gelten für einen in der ISO 22197-1 beschriebenen Reaktor.

$$k_{\text{rnx}} = \frac{-\ln(c_{\text{out}}/c_{\text{in}})}{\frac{V_{\text{surf}}}{\dot{V}}} = \frac{-\ln(c_{\text{out}}/1000\text{ppb})}{\frac{25\text{cm}^3}{3000 \frac{\text{cm}^3}{60\text{s}}}} = \frac{\ln\left(\frac{c_{\text{out}}}{1000}\right)}{0,5 \text{ s}} \quad \text{Gl. 3}$$

mit:

k_{rnx} Geschwindigkeitskoeffizient nach Reaktion 1. Ordnung [s⁻¹]

c_{in} Eingangskonzentration [ppb]

c_{out} Auslasskonzentration [ppb]

V_{surf} Volumen über der Probe [cm³]

\dot{V} Volumenstrom durch den Reaktor [cm³/s]

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{8 \cdot 8,314 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{mol} \cdot \text{K}} \cdot 298\text{K}}{3,14 \cdot 0,03001\text{kg/mol}}} = 458,6 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 458,6 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \text{Gl. 4}$$

mit:

\bar{v} Mittlere Molekülgeschwindigkeit [m/s]

$$\gamma = \frac{4 \cdot k_{\text{rnx}}}{458,6 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \frac{0,005\text{m}^2}{0,000025\text{m}^3}} = \frac{\frac{-\ln\left(\frac{c_{\text{out}}}{1000}\right) \cdot 4}{0,5 \text{ s}}}{458,6 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 200 \frac{1}{\text{m}}}$$

mit: γ Uptake-Koeffizient [-]

$$\left[\frac{-\ln\left(\frac{c_{\text{out}}}{1000}\right)}{0,5 \text{ s}} \right] \cdot 43,61 \text{ s} \cdot 10^{-6} \quad \text{Gl. 5}$$

mit:

γ Uptake-Koeffizient [-]

$$v_{\text{surf}} = \frac{\gamma \cdot 458,6 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{4} = \gamma \cdot 114,65 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \text{Gl. 6}$$

mit:

v_{surf} Depositionsgeschwindigkeit [m/s]

Wird ein CST-Reaktor eingesetzt, berechnet sich die Geschwindigkeitskonstante k_{rnx} der Reaktion abweichend nach folgender Formel:

$$k_{\text{rnx}} = \frac{1}{t_{\text{rnx}}} \cdot \frac{c_{\text{in}} - c_{\text{out}}}{c_{\text{out}}} \quad \text{Gl. 7}$$

mit:

t_{rnx} Aufenthaltsdauer des Schadgases im Reaktor, die sich aus Volumenstrom und Gesamtgröße des Reaktors ergibt [s]

Die berechneten Depositionsgeschwindigkeiten für die betrachteten Materialien sind in Tabelle 5 zusammengefasst.

Von einigen der untersuchten Materialien war aus eigenen vorangegangenen Analysen bekannt, dass sie sowohl beim Abbau von NO als auch beim Abbau von NO_x nach dem angewandten Untersuchungsverfahren deutlich effizientere Ergebnisse liefern. Dabei wurden jedoch Proben untersucht, die schon von den Herstellern vorbewittert wurden. Recherchen hatten ergeben, dass diese Vorbewitterungen meistens über längere Zeiträume durch UV-Bestrahlung über mehrere Tage bis Wochen und regelmäßiges Waschen mit deionisiertem Wasser bzw. mittels WOM (Weather-O-Meter) durchgeführt wurden, was einer vielfach stärkeren Konditionierung entsprach als im Rahmen dieses Projektes vorgesehen war und in den Kassetten später realisiert werden konnte. Mit den durchgeführten Untersuchungen in diesem Projekt konnte gezeigt werden, dass auch durch eine längere Bewitterung von vier Wochen und ein regelmäßiges Abspülen der Proben lediglich eine leichte Erhöhung der Aktivität

Probe	Uptake-Koeffizient [*10 ⁻⁶]	Depositionsgeschwindigkeit [cm/s]
Farbe A – 24 h	0	0,01
Farbe A – 72 h	0	0,00
Farbe A – 4 Wochen	0	0,03
Farbe B – 24 h	0	0,00
Farbe B – 72 h	0	0,00
Farbe B – 4 Wochen	0	0,01
Farbe C – 24 h	10	0,10
Farbe C – 72 h	0	0,00
Farbe C – 4 Wochen	20	0,23
Glaswolle D – 24 h	10	0,15
Glaswolle D – 72 h	10	0,12
Glaswolle D – 4 Wochen	20	0,25

Tab. 5: Depositionsgeschwindigkeiten für den NO-Abbau (zum Ende der Messung)

erreicht werden konnte. Auch wenn die in diesem Projekt zur Verfügung stehenden Proben wahrscheinlich durch eine Konditionierung mittels WOM erheblich aktiver wären, kam dies für das Projekt nicht in Frage, da eine derart aufwendige Vorbehandlung in den Tunnelkassetten nicht möglich wäre.

3.3.3 Fazit zu den Photokatalytischen Materialien verschiedener Hersteller

Keines der auf dem freien Markt erhältlichen und getesteten photokatalytischen Materialien erfüllte auch nur annähernd die Anforderungen für die im Projekt notwendigen Abbauraten. Aus diesem Grund mussten Alternativen dazu untersucht werden. Eine Alternative war die Herstellung und Anbindung von selbst hergestelltem TiO_2 auf Glasfasermatten. Weiterhin wurden Versuche durchgeführt, bei denen ein Gemisch aus Zement und Photokatalysator mit Wasser angemischt und auf Gewebematten aufgebracht wurde. Ein Nachteil dieser Varianten war, dass nicht auf fertige Produktlösungen zurückgegriffen werden konnte. Der große Vorteil bestand jedoch darin, dass der direkte Einfluss auf die Rezepturen die Optimierung des Materials erheblich vereinfachte. Die Erarbeitung sowie die Bewertung beider Varianten werden nachfolgend dargestellt.

3.3.4 Trägermaterialien

Als Trägermaterialien lagen zwei Arten von Glasfasergeweben vor. Diese Glasfasergewebematten hatten unterschiedliche Stärken und Webmuster und lagen in nicht karamellisierter und karamellisierter Form vor. Zu diesen Materialien gehörten die zwei Thermo-E-Glasgewebe I und II. Das Gewicht des Gewebes I betrug 200 g/m^2 sowie das des Gewebes II 600 g/m^2 . Von diesen Materialien war das Gewebe I nicht karamellisiert und lag in einem durchgehend gewobenen Muster vor. Dagegen war das Gewebe II karamellisiert und in einem Karomuster gewoben (vgl. Bild 11).

Es wurden rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen gemacht, um die Trägermaterialien näher zu analysieren (vgl. Bild 12). Nach diesen Aufnahmen ist die Oberfläche dieser Filamente bis auf einige kleine Unebenheiten weitestgehend glatt. Laut Herstellerangaben beträgt der Durchmesser der Filamente in beiden Fällen $< 6 \mu\text{m}$, was durch die REM-Aufnahmen bestätigt werden konnte.

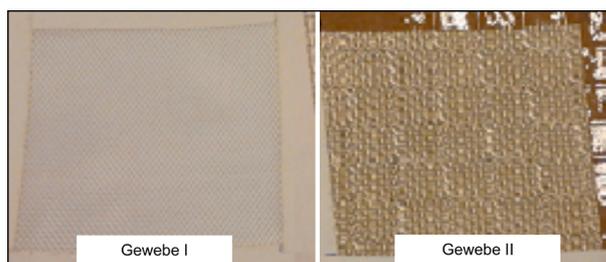


Bild 11: Glasfasergewebematten als Trägermaterial

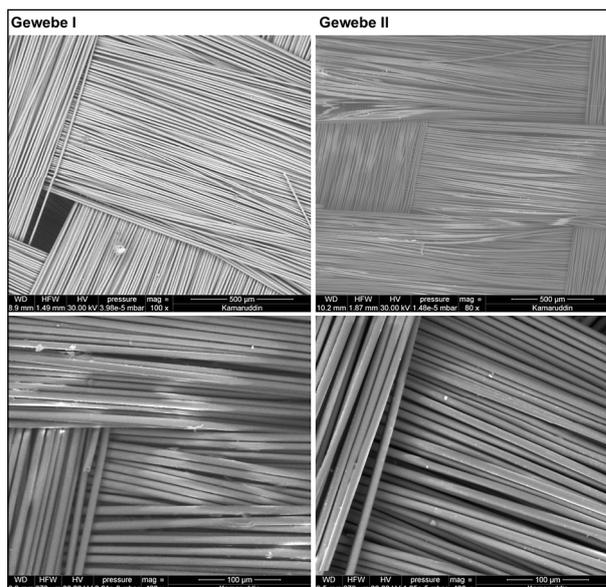


Bild 12: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen der Glasfasermatten Gewebe I (links) und Gewebe II (rechts)

Hersteller	Farbe A	Farbe B	Farbe C
	Photoneneffizienz [%]		
NO	0,003	0,018	0,193
NO ₂	0,001	0,006	-0,101
NO _x	0,003	0,025	0,092

Tab. 6: Photoneneffizienzen der einzelnen photokatalytischen Produkte auf Gewebe I nach 24 h Vorbelichtung am Ende der Messung

Hersteller	Farbe A	Farbe B	Farbe C
	Photoneneffizienz [%]		
NO	0,024	0,019	0,084
NO ₂	0,007	-0,004	-0,012
NO _x	0,031	0,015	0,072

Tab. 7: Photoneneffizienzen der einzelnen photokatalytischen Produkte auf Gewebe II nach 24 h Vorbelichtung

3.3.5 Beschichtung der Trägermaterialien mit Photokatalytischer Suspension

Die Glasfasermatten Gewebe I und II wurden mit den Farben A, B und C beschichtet. Das Probenmaterial wurde wie folgt vorbereitet: Das Glasfasergewebe wurde in ca. $7 \times 7 \text{ cm}^2$ große Stücke geteilt und zur Stabilisierung rund herum mit einem Klebe-

streifenrand von ca. 1 cm abgeklebt, sodass in der Mitte eine Fläche von $5 \times 5 \text{ cm}^2$ verblieb.

Alle Proben wurden wie die Farben für die vorherigen Messungen in einer Klimakammer mit 50 % r. F. und unter 24 h UV-Bestrahlung vorbereitet und anschließend auf die gleiche Weise auf ihre photokatalytische Aktivität überprüft. Die Effizienz war jedoch auch für diese Proben wieder relativ gering (vgl. Tabelle 6 und Tabelle 7).

3.3.6 Photokatalytische Beschichtungen von Glasfasermatten mit eigens hergestelltem TiO_2

Neben der Beschichtung der Glasfasermatten mit den photokatalytisch aktiven Farben wurden Versuche mit eigens hergestelltem TiO_2 durchgeführt. Hierzu wurde das Glasfasermaterial Gewebe I für den Vorversuch 1 auf folgende Weise behandelt:

Es wurde ein $5 \times 5 \text{ cm}^2$ großes Stück des TG 200 abgeschnitten und in eine Lösung mit 5 M.-% Tetraisopropylorthotitanat (TPO) getaucht. Hierfür wurden 50 g Lösung mittels Propan-2-ol hergestellt und anschließend 50 g demineralisiertes Wasser hinzugegeben, wodurch eine milchig weiße Suspension entstand. Das Gewebe wurde für 1 h in der Suspension belassen und anschließend bei $100 \text{ }^\circ\text{C}$ im Trockenschrank getrocknet. Das trockene Gewebe wurde anschließend zwei weitere Male in die Suspension getaucht und im Trockenschrank bei $100 \text{ }^\circ\text{C}$ getrocknet. Nach dem letzten Trocknen wurde die Probe auf ihre photokatalytische Aktivität und den NO_x -Abbau untersucht. Bei dieser Messung wurde kein Abbau von NO festgestellt.

Nun wurde das bereits beschichtete Glasfasertuch auf eine Plexiglasoberfläche gegeben und mit der 3 h gealterten Mischung aus dem ersten Teil des Versuches bestrichen. Die Suspension war leicht geliert (dickflüssig) und ließ sich präzise auf das Tuch auftragen. Die Plexiglasplatte mit dem Gewebe wurde nun in den Trockenschrank bei $100 \text{ }^\circ\text{C}$ gegeben und getrocknet. Anschließend wurde dieser Vorgang zwei weitere Male durchgeführt. Danach wurde das Tuch mit einer weichen Bürste von losen Titan-IV-oxid Resten befreit. Zuletzt wurde die Probe bei $400 \text{ }^\circ\text{C}$ für 1 h einer Temperaturbehandlung unterzogen.

Diese Probe des Vorversuchs wurde mit einer verkürzten Messdauer (1,5 h Messung bei UV-Strahlung und jeweils 15 min Vorlauf und Nachlaufzeit

ohne UV-Licht) hinsichtlich ihrer photokatalytischen Aktivität zum NO_x -Abbau untersucht. Die Photoneffizienzen und die Messung des Vorversuchs 1 sind in Tabelle 8 und Bild 13 dargestellt. Nach diesen Ergebnissen konnte anhand der erarbeiteten Probe ein gegenüber den zuvor untersuchten Farben deutlich verstärkter photokatalytischer Abbau des NO festgestellt werden, wobei sich für das bei der Reaktion entstandene NO_2 lediglich eine vergleichsweise geringe Abbaurrate einstellte.

Die REM-Aufnahmen der beschichteten Glasfasergewebematten in Bild 14 zeigen deutlich die Beschichtung auf den Glasfaserfilamenten.

Für den Vorversuch 2 wurde ebenfalls ein $5 \times 5 \text{ cm}^2$ großes Stück des Glasfasergewebes Gewebe I abgeschnitten. Dieses Stück Gewebe wurde anschließend bei $400 \text{ }^\circ\text{C}$ für 1 h getempert, um organische Reste zu entfernen. Eine Behandlung bei höheren Temperaturen war laut Hersteller nicht zu empfehlen. Anschließend wurde das Gewebe in eine Porzellanschale gegeben und leicht mit TPO-Lösung (5 M.-%, Propan-2-ol) überschichtet. Nun wurde

	NO	NO_2	NO_x
	Photoneneffizienz [%]		
Vorversuch 1	0,714	-0,647	0,067

Tab. 8: Photoneneffizienzen des Vorversuchs 1 am Ende der Messung

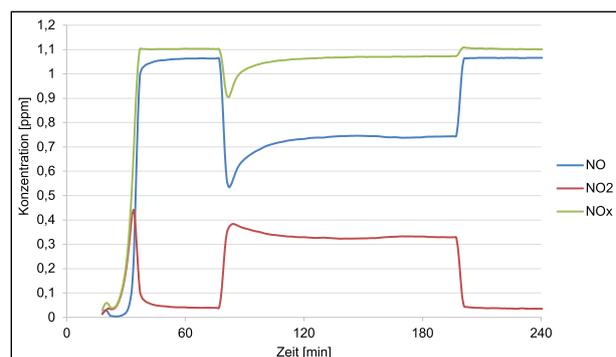


Bild 13: Messverlauf des photokatalytischen NO_x -Abbaus der Probe des Vorversuchs 1

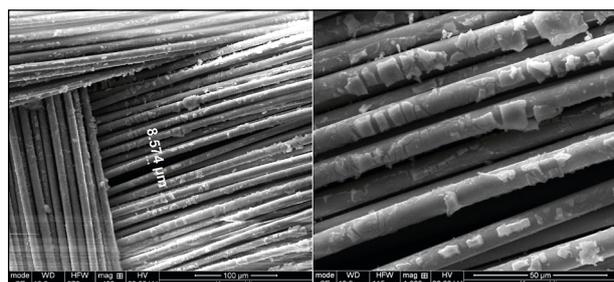


Bild 14: REM-Aufnahmen der beschichteten Glasfasermatte aus dem Vorversuch 1

eine geringe Menge an Wasser hinzugegeben und diese Mischung anschließend über Nacht im Trockenschrank bei 100 °C belassen. Die Probe wurde anschließend mit einer weichen Bürste von losen Titan-IV-oxid befreit und für 1 h bei 400 °C kalziniert. Die photokatalytische Aktivität wurde ebenfalls mit einer verkürzten Messdauer (1,5 h Messung bei UV-A-Strahlung und jeweils 15 min Vorlauf und Nachlaufzeit ohne UV-A-Licht) bestimmt. Die Photoneneffizienzen und die Messung sind in Tabelle 9 und Bild 15 dargestellt. Gegenüber der Probe aus dem ersten Vorversuch zeigte sich bei dieser eine insgesamt geringere photokatalytische Abbaurrate.

In Bild 16 zeigen die REM-Aufnahmen der Probe des Vorversuchs 2 größere TiO_2 -Agglomerate auf den Glasfaserfilamenten, wodurch sich eine geringere aktive Oberfläche und ein geringeres photokatalytisches Potenzial ergaben. Aus diesem Grund wurden alle weiteren Beschichtungen mit TPOT in Anlehnung an den ersten Vorversuch durchgeführt.

	NO	NO ₂	NO _x
	Photoneneffizienz [%]		
Vorversuch 2	0,196	-0,158	0,039

Tab. 9: Photoneneffizienzen des Vorversuchs 2 am Ende der Messung

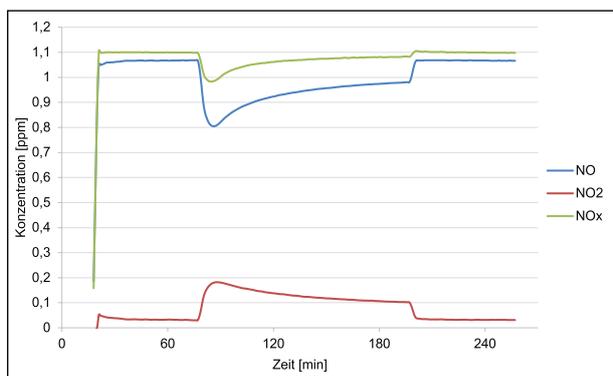


Bild 15: Messverlauf des photokatalytischen NO_x-Abbaus der Probe des Vorversuchs 2

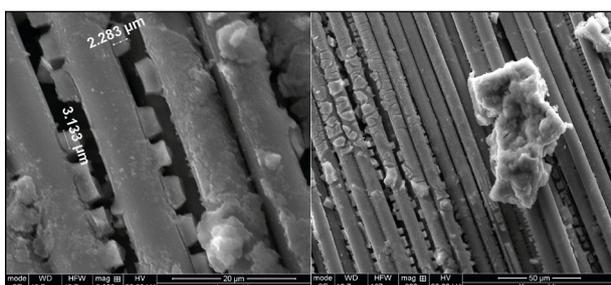


Bild 16: REM-Aufnahmen der beschichteten Glasfaserplatte aus Vorversuch 2

3.3.7 Hauptversuch

Für den Hauptversuch wurde wie folgt vorgegangen: Eine TiO_2 -Dispersion wurde aus 5 g Tetraiso-propyltitanat und 95 g Isopropanol hergestellt. 20 ml dieser Lösung wurden in ein verschließbares Gefäß gegeben und anschließend mit 20 ml deionisiertem Wasser vermischt und kräftig geschüttelt, wobei weißes Titandioxid ausfiel. Daraufhin wurde die entstandene Suspension für 24 h stehen gelassen. Die Mischung wurde anschließend mit einer Pasteurpipette auf das Glasfasergewebe aufgetragen und für 15 min im Trockenschrank bei 105 °C getrocknet. Das Auftragen und Trocknen wurde zweimal wiederholt. Im Anschluss wurde das Glasfasergewebe



Bild 17: TPOT beschichtetes Glasfasergewebe I vor dem Entfernen von losem TiO_2

	NO	NO ₂	NO _x
	Photoneneffizienz (Ende) [%]		
Gewebe I – TPOT	0,079	-0,046	0,034
Gewebe –TPOT	0,375	-0,296	0,079

Tab. 10: Photoneneffizienz des Hauptversuchs (Ende der Messung)

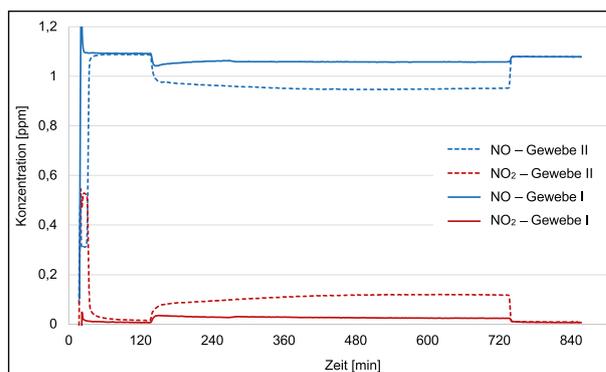


Bild 18: Messverlauf der NO- und NO₂-Konzentration der TPOTbeschichteten Glasfasergewebematten nach 24 h Vorbelichtung

Vorversuche			
Probe E1	Netz	50 M.-% Zusatzstoff E 50 M.-% CEM I	Ohne Vorbestrahlung 25 °C, 50 % r.F.
Probe E2	Netz	75 M.-% Zusatzstoff E 25 M.-% CEM I	Ohne Vorbestrahlung und mit 24 h UV-A, 25 °C, 50 % r.F.
Hauptversuche			
Probe E3	Vollflächig 5 x 10 cm ²	50 M.-% Zusatzstoff E 50 M.-% CEM I	Mit Vorbehandlung 24 h UV-A, 25 °C, 50 % r.F.
Probe E4	Vollflächig 5 x 10 cm ²	62,5 M.-% Zusatzstoff E 37,5 M.-% CEM I	Mit Vorbehandlung 24 h UV-A, 25 °C, 50 % r.F.
Probe E5	Vollflächig 5 x 10 cm ²	75 M.-% Zusatzstoff E 25 M.-% CEM I	Mit Vorbehandlung 24 h/ 72 h/ 4 Wochen UV-A, 25 °C, 50 % r.F.
Photokatalytisches Gewebe D	5 x 10 cm ²		Mit Vorbehandlung 24 h/ 72 h/ 4 Wochen UV-A, 25 °C, 50 % r.F.
Farbe F	5 x 10 cm ²	auf Alublech mit einer Dicke von 250 µm aufgetragen	Mit Vorbehandlung 24 h/ 72 h/ 4 Wochen UV-A, 25 °C, 50 % r.F.

Tab. 11: Übersicht der Proben der Vorversuche und des Hauptversuches

umgedreht und die gleiche Prozedur mit der anderen Seite wiederholt. Für diesen Hauptversuch wurden sowohl das Trägermaterial Gewebe I als auch das Gewebe II verwendet. Bild 17 zeigt beispielhaft das beschichtete Gewebe I.

Nach Beenden dieses Vorganges wurde das Glasfasergewebe mit einem Pinsel von nicht haftenden Titandioxidrückständen befreit. Anschließend wurde der Klebestreifenrand mit einer Schere entfernt. Die Proben wurden 24 h in einer Klimakammer vorbestrahlt und anschließend wie die vorhergehenden Proben bezüglich des NO_x-Abbaus analysiert. Die Ergebnisse sind in Tabelle 10 und Bild 18 dargestellt. Grundsätzlich zeigten sich für das Gewebe II deutlich höhere Abbauraten als für das Material des Gewebes I TG 200, wobei weiterhin negative Photoneneffizienzen für das NO₂ ermittelt wurden.

3.3.8 Fazit Beschichtungen von Glasfasermatten mit selbst hergestelltem TiO₂

Die im Projektplan vorgesehene Beschichtung von Glasfasermatten mit selbst hergestelltem TiO₂ erweist sich als effektiv und ohne eine Vorbewitterung den photokatalytischen Farben gegenüber deutlich überlegen. Obwohl das Verfahren gute Ergebnisse bringt, bietet es jedoch keine schnelle Alternative zu den Farben. Nachteilig zeigt sich dabei, dass die Laborprozesse aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit der Rohstoffe sowie der fehlenden technischen Möglichkeit nicht problemlos auf einen großtechnischen Maßstab übertragen werden können, was jedoch für die Herstellung der Tunnelkassetten erforderlich wäre.

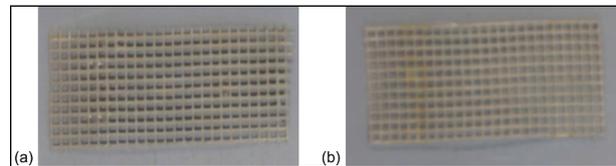


Bild 19: Beschichtete Netze mit Probe E1 (50 M.-% Zusatzstoff E, 50 M.-% CEM) und Probe E2 (75 M.-% Zusatzstoff E, 25 M.-% CEM I)

3.3.9 Alternative zur Verwendung photokatalytischer Farben

Aufgrund eigener langjähriger Erfahrungen wurden alternative Ansätze entwickelt, durch die die Defizite der wenig aktiven Farben bzw. der aufwendigen Beschichtung des Glasfasergewebes aufgefangen werden konnten. Dabei kam ein speziell für zementbasierte Systeme entwickelter photokatalytischer Zusatzstoff E zum Einsatz, der den Auftragnehmern aus anderen Projekten zur Photokatalyse schon vor der Markteinführung bekannt war. In verschiedenen Testversuchen wurden daher Gemische aus einem handelsüblichen Portlandzement mittlerer Festigkeitsklasse (CEM I 42,5 R) mit dem Zusatzstoff E in verschiedenen Verhältnissen gemischt, mit Wasser angerührt und auf verschiedene Untergründe wie Fasernetze oder ebene Platten aufgebracht. Daneben wurde eine weitere spezielle Farbe F (gleicher Hersteller wie Farbe C) mit verbesserter Rezeptur zur Verfügung gestellt sowie ein photokatalytisches Gewebe G in die Analysen einbezogen und untersucht.

Die Proben wurden teilweise direkt ohne eine weitere Vorkonditionierung mit UV-Bestrahlung im ISO-Reaktor gemessen und anschließend nach 24 h, 72 h und 4 Wochen Vorbewitterung unter UV-A-

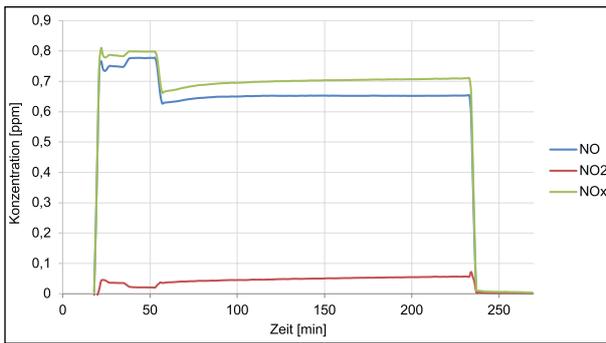


Bild 20: Messverlauf des photokatalytischen NO_x-Abbaus der Probe E1 (50 M.-% Zusatzstoff E, 50 M.-% CEM I; Auftragung auf Netz; ohne Vorbestrahlung; verkürzte Messung)

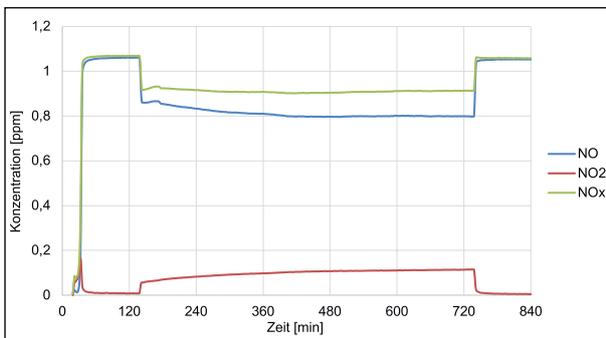


Bild 21: Messverlauf des photokatalytischen NO_x-Abbaus der Probe E2 (75 M.-% Zusatzstoff E, 25 M.-% CEM I; Auftragung auf Netz; 24 h Vorbestrahlung)

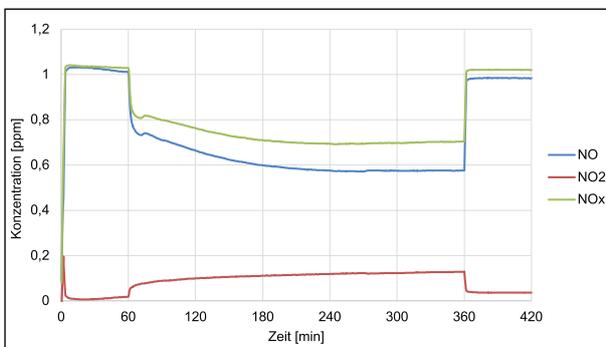


Bild 22: Messverlauf des photokatalytischen NO_x-Abbaus der Probe E5 (75 M.-% Zusatzstoff E, 25 M.-% CEM I; vollflächig; 72 h Vorbestrahlung; 7 h Messdauer)

Strahlung bei 50 % r. F. untersucht. Tabelle 11 gibt einen Überblick über die alternativen Produkte, während Bild 19 beispielhaft zwei mit Netze zeigt, die mit Proben aus Zement sowie dem Zusatzstoff E beschichtet sind.

In Bild 20 und Bild 21 sind exemplarisch die Ergebnisse der Vorversuche für den photokatalytischen Abbau von Stickoxiden von den in Tabelle 11 aufgeführten Proben auf Basis des Zusatzstoffes E t gezeigt. Die Bestrahlungszeit während der Messung betrug 1,5 h, die Vor- und Nachlaufzeit ohne UV-A-Bestrahlung etwa 18 Minuten. Die Depositionsge-

	NO	NO ₂	NO _x
	Photoneneffizienz [%]		
Probe E5 (75/25, vollfl.)	0,044	-0,006	0,038
Gewebe G	0,068	-0,035	0,033

Tab. 12: Photoneneffizienzen ohne Vorbelichtung am Ende der Messung

	NO	NO ₂	NO _x
	Photoneneffizienz [%]		
Probe E3 (50/50, vollfl.)	0,416	-0,146	0,270
Probe E4 (63/37, vollfl.)	0,240	-0,072	0,168
Probe E5 (75/25, vollfl.)	0,418	0,107	0,310
Gewebe G	0,045	0,027	0,019
Farbe F	0,147	0,076	0,070

Tab. 13: Photoneneffizienzen nach 24 h Vorbelichtung am Ende der Messung

	NO	NO ₂	NO _x
	Photoneneffizienz [%]		
Probe E5 (75/25, vollfl.)	0,687	-0,165	0,522
Gewebe G	0,079	-0,046	0,032
Farbe F	0,427	-0,258	0,170

Tab. 14: Photoneneffizienzen der einzelnen photokatalytischen Produkte nach 72 h Vorbelichtung am Ende der Messung

	NO	NO ₂	NO _x
	Photoneneffizienz [%]		
Probe 5 (75/25, vollfl.)	0,606	-0,396	0,210
Gewebe G	0,101	-0,054	0,046
Farbe F	0,398	-0,300	0,098

Tab. 15: Photoneneffizienzen nach 4 Wochen Vorbelichtung am Ende der Messung

	NO	NO ₂	NO _x
	Photoneneffizienz [%]		
Probe 5 (75/25, vollfl.)	0,190	-0,298	-0,108
Gewebe G	0,061	-0,013	0,048
Farbe F	0,055	-0,065	-0,010

Tab. 16: Photoneneffizienzen aus den Langzeitmessungen (72 h Messzeit) am Ende der Messung

schwindigkeiten für die Probe mit 50 % des Zusatzstoffes E betrug 0,17 cm/s und für die Probe mit 75 % des Zusatzstoffes E 0,38 cm/s.

Bild 22 zeigt beispielhaft die Messung der Probe E5 aus Tabelle 11, da diese sehr effektive Ergebnisse vorwies. Die Messungen erfolgten jeweils mit einer Bestrahlungszeit von 5 h sowie einer Vor- und Nachlaufzeit ohne UV-A-Bestrahlung von jeweils 1 h.

Tabelle 12 bis Tabelle 16 stellen die Ergebnisse in Form der Photoneneffizienzen der untersuchten

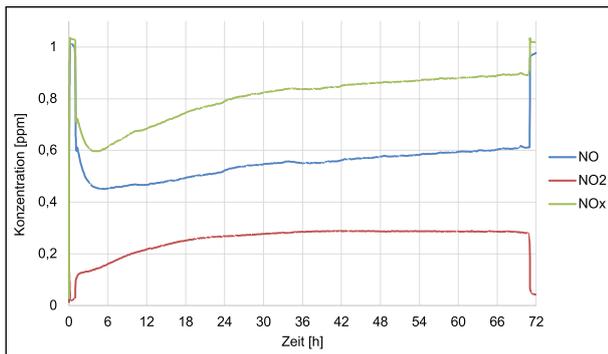


Bild 23: Messverlauf des photokatalytischen NO_x -Abbaus der Probe E5 (75 M.-% Zusatzstoff E, 25 M.-% CEM I; vollflächig; 72 h Vorbestrahlung; 72 h Messdauer)

Probe	Uptake-Koeffizient [$\cdot 10^{-6}$]	Depositionsgeschwindigkeit [cm/s]
Farbe F - Langzeit	3,68	0,042
Farbe F - H - Langzeit	7,22	0,083
Probe E5 - Langzeit	15,3	0,176
Farbe F - 4 Wochen - H - ISO	20,10	0,230
Farbe F - 4 Wochen - ISO	2,57	0,295
Farbe F - 72 h - ISO	27,30	0,313
Farbe F - 24 h - ISO	13,20	0,151
Probe E3 - 24 h - ISO	26,00	0,306
Probe E4 - 24 h - ISO	14,40	0,166
Probe E5 - 4 Wochen - ISO	43,00	0,493
Probe E5 - 24 h - ISO	26,70	0,306
Probe E5 - 72 h - ISO	48,20	0,553
Probe E5 - 0 h - ISO	2,41	0,028

Tab. 17: Depositionsgeschwindigkeiten für NO

Gehalt Zusatzstoff E [M.-%]	Wasser-Bindemittel-Verhältnis (W/Z)	Druckfestigkeit nach 28 Tage [MPa]
0	0,35	100,3
50	0,39	44,9
50	0,45	33,6
62,5	0,45	21,6
75	0,42	12,5
95	0,42	Sehr weich

Tab. 18: Druckfestigkeiten verschiedener Zusatzstoff E-CEM I-Gemische nach 28 Tagen Aushärtung

Proben der Tabelle 11 dar. Zusätzlich wurden Langzeitmessungen an einzelnen Proben durchgeführt. Dabei wurden die Proben nach 72 h Vorbewitterung unter UV-A-Strahlung im NO_x -Reaktor untersucht. Die Messzeit betrug in diesem Fall 72 h, die Vor- und Nachlaufzeit ohne UV-A-Bestrahlung betrug jeweils 1 h (vgl. exemplarisch Bild 23).

Die Depositionsgeschwindigkeiten der betrachteten Probe sind in Tabelle 17 dargestellt.

Bei den untersuchten Proben zeigte sich mit zunehmender Vorbestrahlungszeit bis zu 72 h eine tendenzielle Zunahme der Depositionsgeschwindigkeiten, wobei sich für längere Bestrahlungszeiten von 4 Wochen wiederum eine Abnahme einstellte. Weiterhin konnte für das untersuchte Gewebe insgesamt eine lediglich geringere Depositionsgeschwindigkeit erreicht werden. Die mit dem Zusatzstoff E hergestellten Proben wiesen grundsätzlich den tendenziell höchsten photokatalytischen Abbau auf, wobei jedoch kein eindeutiger Zusammenhang zwischen dem Gehalt an dem Zusatzstoff E und der Abbaurrate zu finden war. Die Proben mit dem Zusatzstoff E hatten zudem den Vorteil, dass sich der Katalysator durch die rein anorganische Zusammensetzung nicht freibrennen musste, d. h. dass keine Aktivierungsphase durch eine Vorbelichtung notwendig war. Die dargestellten Arbeiten zeigten, dass es mithilfe des Einsatzes von Mischungen aus dem Zusatzstoff E und Zement möglich war, die von den Firmen gelieferten, nur wenig wirksamen photokatalytischen Farben im Projekt zu ersetzen. Dazu waren jedoch zusätzliche Optimierungsarbeiten notwendig. Für den weiteren Projektverlauf wurden daher Optimierungsarbeiten mit den rein anorganischen und ohne eine Aktivierungsphase wirksamen zementären Systemen auf verschiedenen Trägermaterialien durchgeführt.

Nachteilig zeigte sich bei dem photokatalytisch effektiv wirkenden Gemisch aus dem Zusatzstoff E und Zement jedoch, dass dies keinen besonderen mechanischen Belastungen ausgesetzt werden darf. Das zeigen die in Tabelle 18 aufgeführten Druckfestigkeiten, wobei sich mit steigendem Zusatzstoffgehalt eine abnehmende Festigkeit einstellte.

3.3.10 Filtermaterial

Neben den bisherigen Produkten wurde weiterhin ein kommerziell erhältliches Material auf seine Einsatzfähigkeit getestet. Dabei handelt es sich um die zwei verschiedene Filtermaterialien FM1 und FM2, die in Bild 24 dargestellt sind.

Das Material ist auf Durchströmung ausgelegt und wurde deshalb im CST-Reaktor vermessen. Der Messaufbau im CST-Reaktor ist in Bild 25 zu sehen. Das Schadgas wird oben links zugeführt und von einem Lüfter angesaugt. Der Lüfter drückt das Gas im Reaktor mehrfach durch die Probe, bis es schließlich links unterhalb des Lüfters aus dem Reaktor austritt. Die Umluftgeschwindigkeit im Reaktor

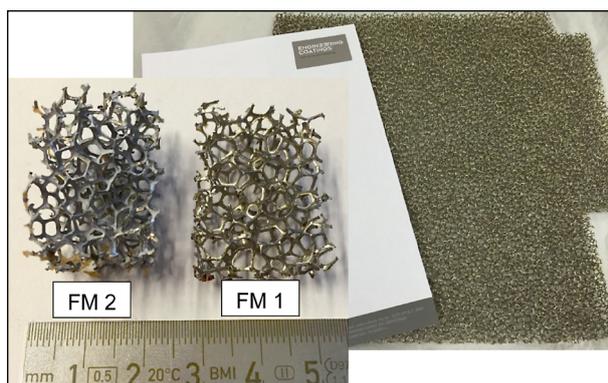


Bild 24: Übersicht- und Detailaufnahme der Filtermaterialien FM1 und FM2

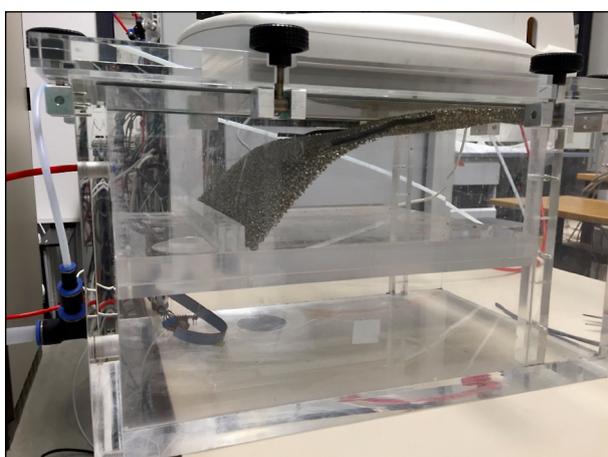


Bild 25: CST-Reaktor mit Filtermaterial als Probe

ist dabei um ein Vielfaches höher als der zu- und abgeführte Gasstrom. Daraus ergibt sich eine gleichmäßige Schadstoffverteilung im Reaktor. Die Abbauraten wurden nach den Gesetzen einer Rührkesselapparatur berechnet.

Die Testmessungen im CST-Reaktor ergaben für das Material FM2 gute NO- und NO₂-Abbauereffizienzen. Das Material FM1 zeigte hingegen eine eher durchschnittliche Effizienz. Die Abbauraten sind in Bild 26 und Bild 27 dargestellt.

Die im CST-Reaktor getesteten Filtermaterialien zeigten einen durchschnittlichen bis guten Abbau von Stickoxiden. Die ermittelten Depositionsgeschwindigkeiten sind in Tabelle 19 angegeben. Als aktive Oberfläche wurde vom Hersteller eine siebenfach größere Oberfläche als die geometrische Grundfläche des Materials angegeben. Dies wurde bei der Berechnung der Depositionsgeschwindigkeiten als gegeben angenommen und rechnerisch berücksichtigt. Da mit dem Hersteller keine Einigung auf einen Kooperationsvertrag erzielt werden konnte, stand das Material jedoch nicht für eine weitere Verwendung in diesem Projekt zur Verfügung.

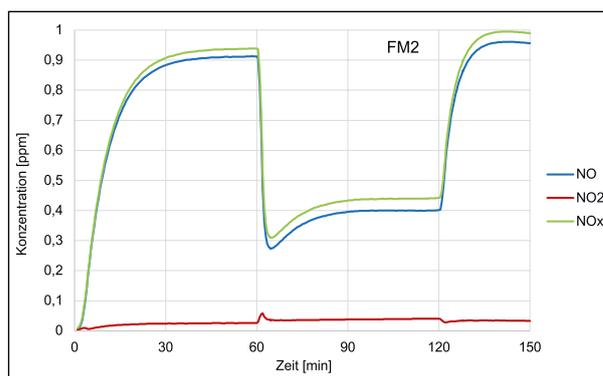


Bild 26: Messverlauf des photokatalytischen NO_x-Abbaus des Filtermaterials FM2 im CST-Reaktor (Volumenstrom 3 l/min, Reaktorvolumen 25 l)

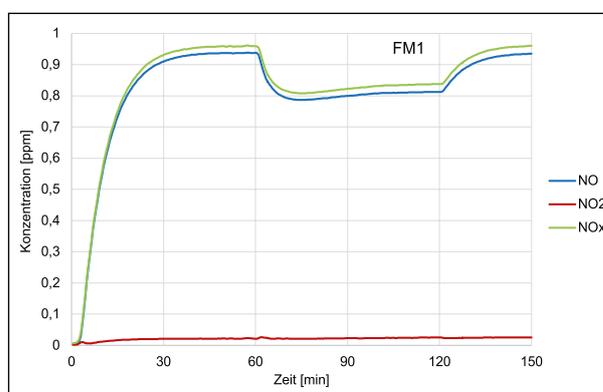


Bild 27: Messverlauf des photokatalytischen NO_x-Abbaus des Filtermaterials FM1 im CST-Reaktor (Volumenstrom 3 l/min, Reaktorvolumen 25 l)

	FM1	CC03FM2
Abgeschätzte NO-Depositionsgeschwindigkeit [cm/s]	0,01	0,02

Tab. 19: Depositionsgeschwindigkeiten der Filtermaterialien

3.3.11 Schaummaten mit photokatalytischer Beschichtung

Um eigenständig ein Material mit höherer photokatalytischer Aktivität herzustellen, wurden verschiedene offenporige Schäume erworben (vgl. Bild 28). Mit diesen wurden wiederum Beschichtungsversuche durchgeführt, wobei die bereits zuvor im Rahmen des Projekts untersuchten, photokatalytisch aktiven Stoffe herangezogen wurden. Das Ziel war es, den Schaum komplett zu umhüllen. Auf diese Weise sollte die maximale Oberfläche für Reaktionen bei geringstmöglichem Materialeinsatz zur Verfügung gestellt werden, während die Poren des Schaums so weit wie möglich offengehalten wurden. Die eingesetzte Farbe und der Mörtel wurden jeweils auf eine Schaumplatte aufgetragen und eingewalzt. Überschüssiges Material wurde durch Wringen und Aufschlagen aus dem Schaum entfernt.



Bild 28: Größenverhältnisse der Poren verschiedener Schäume

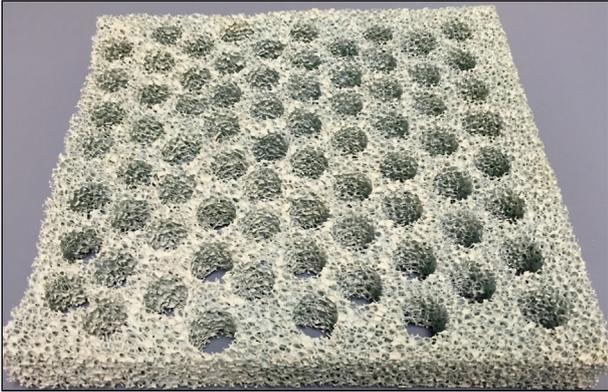


Bild 29: 675 cm² Schaumprobe, 75 Löcher, 10 ppi, 3 cm dick, beschichtet mit einem Zusatzstoff E/Zement-Gemisch



Bild 30: 675 cm² Schaumprobe, 90 Löcher, 5 ppi, 3 cm dick, beschichtet mit der Farbe C

Um die verschiedenen Kombinationen aus Matten und Photokatalysatoren miteinander vergleichen zu können, wurde aus den im CST-Reaktor gewonnenen Messkurven wiederum die Depositionsgeschwindigkeit ermittelt. Da eine Berechnung oder Messung der inneren Oberfläche des Materials nicht möglich war, wurde bei einer einheitlichen Materialdicke von 3 cm als Faktor für den feineren Schaum mit 10 ppi (pores per inch) eine zehnfach größere photokatalytisch aktive Oberfläche und für den gröberen Schaum mit 5 ppi eine siebenfach größere Oberfläche im Vergleich zur äußeren geometrischen Fläche angenommen.

Erste Testmessungen wurden wegen der erwarteten hohen Strömungswiderstände mit gelochten

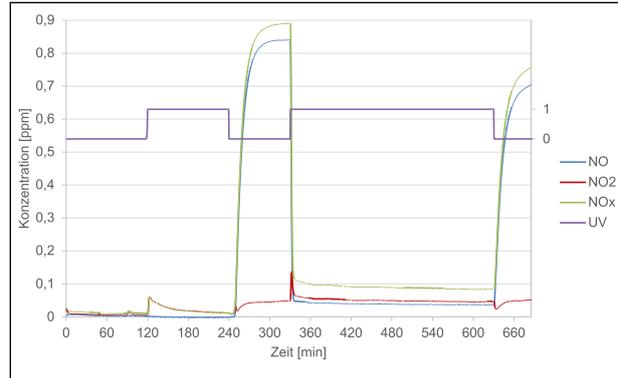


Bild 31: Messkurven des NO_x-Abbaus im CST-Reaktor mit Farbe C beschichtetem, gelochtem Schaum (Volumenstrom 5 l/min, Reaktorvolumen 25 l)

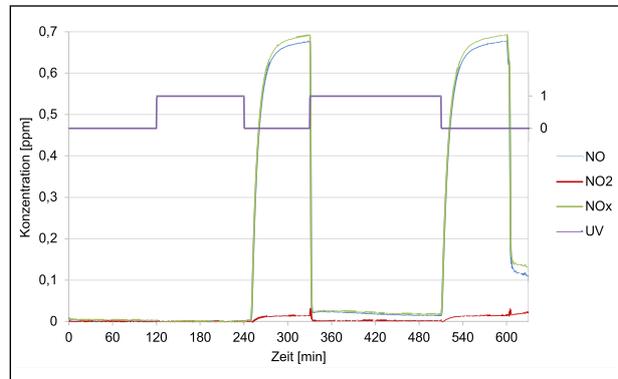


Bild 32: Messkurven des NO_x-Abbaus im CST-Reaktor mit Zusatzstoff E/Zement-beschichtetem, gelochtem Schaum (Volumenstrom 5 l/min, Reaktorvolumen 25 l)

Matten durchgeführt, die Porenweite von 10 ppi aufwiesen. Zwei mit einer Mischung mit dem Zusatzstoff E und der Farbe C beschichtete Matten mit einer Kantenlänge von 25 cm sind in Bild 29 und Bild 30 zu sehen.

Orientierende Messungen zum Abbau von Stickoxiden im Reaktor sind in Bild 31 und Bild 32 gezeigt. Nach einer Vorbelichtungszeit von 120 Minuten konnte ein erheblicher photokatalytischer Abbau beider Produkte festgestellt werden, wobei sich dieser für die mit dem Zusatzstoff E hergestellte Probe noch größer als für den mit dem Farbe C beschichteten Schaum zeigte.

Da sich die Lochung des Schaumes als sehr aufwendiger Arbeitsschritt herausstellte und die aktive Oberfläche möglichst maximiert werden sollte, wurden am Prototypreaktor Matten mit 5 ppi und ohne Lochung eingebaut. Für die Simulationsrechnungen im Tunnel wurden die in Tabelle 20 aufgeführten Depositionsgeschwindigkeiten der Matten mit 5 ppi und Zusatzstoff E/Zement-Mischung verwendet (vgl. Bild 33). Da diese niedriger waren als die Depositionsgeschwindigkeit der gelochten 10 ppi-



Bild 33: 675 cm² Schaumprobe, ungelocht, 5 ppi, 3 cm dick, beschichtet mit 75 M.-% Zusatzstoff E/25 M.-% Zement-Mischung

Probeneigenschaften	Depositionsgeschwindigkeit [cm/s]
10 ppi, Farbe C,f 75 Löcher, 439 cm ²	0,28
10 ppi, Zusatzstoff E/Zement, gelocht, 439 cm ²	0,68
5 ppi, Farbe C, 90 Löcher, 392 cm ²	0,05
5 ppi, Farbe C, ungelocht, 675 cm ²	0,10
5 ppi, Zusatzstoff E/Zement, ungelocht, 675 cm ²	0,48

Tab. 20: Depositionsgeschwindigkeiten der im CST-Reaktor getesteten Schaumproben

Matte, war eine Unterschätzung der realen Depositionsgeschwindigkeit wahrscheinlich, was für die reale Anwendung eine Leistungsreserve bedeutete.

Da die mit der Zusatzstoffmischung beschichtete, ungelochte 5 ppi-Schaummatte in den Versuchen im CST-Reaktor im Vergleich zu einer mit der Farbe C beschichteten Matte eine deutlich höhere Depositionsgeschwindigkeit aufwies, wurde für die anschließend durchgeführten Testmessungen am Prototypreaktor der Fokus auf die Zusatzstoff E/Zement-Beschichtung gelegt. Als Trägermaterial dienten unterschiedlichen Materialien, deren Aufbau und Effektivität im Kapitel 3.5 beschrieben sind.

3.4 Bau und Konzeptionierung der Tunnelkassetten

Für die Erarbeitung der Tunnelkassetten waren verschiedene Randbedingungen vorgegeben. So sollten neben der Möglichkeit einer photokatalytischen Reaktion zur Reduktion der sich im Tunnel befindlichen verkehrsbedingten Stickoxide gleichzeitig auch die menschliche Gesundheit und die verbauten Materialien im Tunnel geschützt werden. Die

Konzeption zur Entwicklung einer optimalen Tunnelkassette wurde durch Simulationsrechnungen unterstützt.

3.4.1 Spezifikationen für Gehäuse, Technik und Ventilatoren

Grundsätzlich sollten die Tunnelkassetten entsprechend den Ausführungen in Kapitel 3.1 ein geschlossenes System bilden, in das zunächst mithilfe von Ventilatoren schadgasbelastete Luft angesaugt wird. Die Stickoxide in der Luft sollten anschließend durch eine einsetzende Reaktion mit einem photokatalytisch aktiven Material unter Anregung von UV-A-Strahlung reduziert werden, während die gereinigte Luft daraufhin wieder in die Umgebung zurückgeführt werden sollte. In den Tunnelkassetten war somit eine ausreichende Stromversorgung für Ventilatoren und Leuchtmittel sowie eine Reinigung der photokatalytischen Oberflächen vorzusehen. Darüber hinaus waren folgende technische Bedingungen zu erfüllen:

- Es mussten neben den photokatalytisch aktiven Tunnelkassetten auch Reinigungs- und Stromversorgungseinheiten entwickelt werden, welche die Tunnelkassetten steuern und überwachen, mit Strom und Spülwasser versorgen und das Schmutzwasser wiederaufbereiten.

Die Kassetten waren über ein Schienensystem an den Tunnelwänden zu fixieren und mit einer Fallsicherung abzusichern. Diese Arbeiten mussten in enger Abstimmung mit dem Auftraggeber und dem Tunnelbetreiber erfolgen.

In Bezug auf das Gehäuse waren die folgenden Anforderungen einzuhalten:

- Das Material sollte gegen Korrosion geschützt sein.
- Die Schutzart IP54 sollte angestrebt werden.
- Die Tiefe des Gehäuses durfte maximal 30 cm betragen.
- Die Gehäuseaußenseite sollte zur Reflexionsreduktion eine matte Sonderlackierung aufweisen.
- Die Gehäuserückseite und -tür sollten mit innenliegendem TiO₂-Trägermaterial ausgestattet sein.
- Ein schwenkbarer Einsatz mit spritzwassergeschützten UV-A-Leuchtmitteln sollte installiert werden.

- Es sollte eine seitliche Verbindung für die Pneumatik zur Abwasserabfuhr und die Reinigungswasserzufuhr geben.
- Der frontseitige Auslass sollte mit einem Schutzgitter versehen sein.
- Es sollte einen zentralen Anschluss für die Steuerungskabel und die Stromversorgung geben.
- Das Gehäuse sollte abgedichtet werden, damit keinerlei Abwasser unkontrolliert aus dem Gehäuse austreten kann.
- Die innenliegenden Oberflächen der Kassetten (photokatalytisch aktive Oberfläche und Spritzwasserschutz der Leuchtmittel) sollten in regelmäßigen Abständen durch Sprühwasser von Ruß und Reaktionsprodukten gereinigt werden. Das verschmutzte Reinigungswasser sollte innerhalb des Systems aufzufangen und wieder aufzubereiten sein. Die anfallende Salpetersäure sollte im System zu neutralisieren sein.
- Die Tunnelkassetten sollten entlang einer Tunnelwand so installiert werden, dass die Kassettenunterkante in einer Höhe von etwa 2,10 m liegt (Höhe des Tunnels: etwa 4,5 m).
- Eine Tunnelkassette sollte in der Lage sein, ein Volumenstrom von etwa 2.500 m³ pro Stunde durchzusetzen.

Bezüglich der Ventilatoren wurden folgende Spezifikationen festgehalten:

- Nach außen sollte ein Schutzgitter angebracht werden.
- Material sollte reflexionsreduzierend und gegen Korrosion geschützt sein.
- Die Schutzart IP44 und die Isolationsklasse „B“ sollte eingehalten sein.

- Die Technik sollte für den Dauerbetrieb geeignet sein.
- Es sollte eine Konformität zur EN 61800-5-1 bestehen.

Basierend auf diesen Vorgaben wurde für erste Versuche ein Prototyp gebaut, mit dem Untersuchungen und Messungen im Technikumsmaßstab durchgeführt werden konnten.

3.4.2 Aufbau und Modifikationen des Prototyps für Laboruntersuchungen

Ziel war es, einen Prüfstand zu entwickeln und aufzubauen, der photokatalytisch aktive Materialien hinsichtlich ihrer Einsatztauglichkeit zum Abbau von in Verkehrstunneln auftretenden Straßenverkehrsabgasen zu bewerten half.

Für eine leichtere Handhabung und um den Laborbedingungen gerecht zu werden, wurde ein Prototyp im Maßstab 1:3 der zunächst geplanten Kassetten gefertigt. Das Außengehäuse mit den Maßen 30 x 33 x 160 cm³ bestand aus einem Stahlrahmen, der mit Aluminiumplatten umfasst war. An beiden Stirnseiten war eine pyramidale Verjüngung auf den Durchmesser des Rohrsystems des Testaufbaus angesetzt. Beides ist in Bild 34 zu sehen.

Über Rohrstücken von 10 cm Durchmesser wurde der Testreaktor an den übrigen Aufbau angeschlossen. Unterschiedliche Prototypaufbauten konnten so mit geringem Aufwand ausgetauscht werden.

Weiterhin wurden zwei Ventilatoren am Eingang und Ausgang des Reaktors angebracht, um den Durchfluss in einem breiten Spektrum variieren zu können und etwaigen Durchflussproblemen aufgrund von zu hohen Strömungswiderständen entgegenzuwirken.

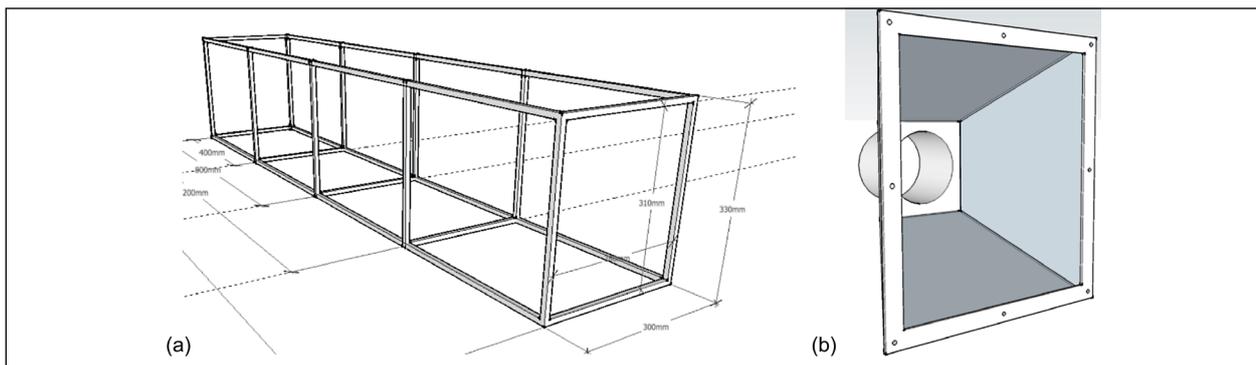


Bild 34: Aufbau des Prototyps: (a) Trägerrahmen und (b) Adapter auf Rohrsystem

Die Aluminiumplatten wurden abnehmbar konstruiert, was allerdings eine aufwändige nachträgliche Abdichtung aller reversibel verbundenen Elemente erforderte. Mit der sorgfältigen Aufbringung von Dichtungsmasse zwischen den verschraubten Segmenten und der Verklebung aller Fugen von außen konnten Leckagen geschlossen werden. Die Kontrolle der Dichtigkeit des Reaktors wurde durch Verschließen des Reaktoreingangs und Messung des Volumenstroms am Reaktorausgang durchgeführt.

Über eine externe Anschlussbox wurden die Lüfter mit Strom versorgt. Die Lampeneinheit war davon getrennt zuschaltbar.

Durch die Montage einer Webcam im Inneren der Einheit war es zudem möglich, den Betrieb des Prototyps sowie die Funktion der Beleuchtungseinheit zu überwachen.

Die technischen Details wurden mit dem Auftraggeber und dem Projektteam abgestimmt. Der erste Reaktorprototyp wurde nach vorheriger Absprache der Dimensionen durch den Unterauftragnehmer WB Engineering angefertigt, während die TUB verschiedene Anpassungsarbeiten durchführte. Bild 35 bis Bild 37 zeigen den schematischen und tatsächlichen Aufbau des Teststandes im Überblick.

Die Schadgaskonzentration und der Volumenstrom im Reaktor waren mit diesem Aufbau noch nicht zufriedenstellend regelbar. Um die Tunnelbedingungen nachstellen zu können, wurden weitere Umbauten vorgenommen. Zunächst wurden die in Bild 38 gezeigten Druckluftdüsen in das Rohr vor dem Reaktoreingang eingebaut. Hierdurch konnte die Strömung im Rohr von vorher maximal 6 m/s auf über 14 m/s erhöht werden. Bei einem Rohrdurchmesser von 10 cm bedeutete dies einen maximalen Volumenstrom von 400 m³/h. Mit dieser Maßnahme alleine konnte allerdings die Schadgaskonzentration nicht mehr eingestellt werden. Bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten wurde zudem vergleichsweise viel Abgas aus dem Bypass in den Reaktor gesaugt.

Um den Saugeffekt der Düsen zu entkoppeln, wurden um die Düsen 28 Löcher von je 1,5 cm Durchmesser gebohrt, die einzeln geöffnet werden konnten. Wurden die Löcher geöffnet, strömte verstärkt Außenluft anstatt Bypassluft in den Reaktor und die Schadgaskonzentration nahm so bei aktivierten Druckluftdüsen proportional zur Anzahl der geöffneten Löcher ab. Die gewünschte Schadgaskonzentration

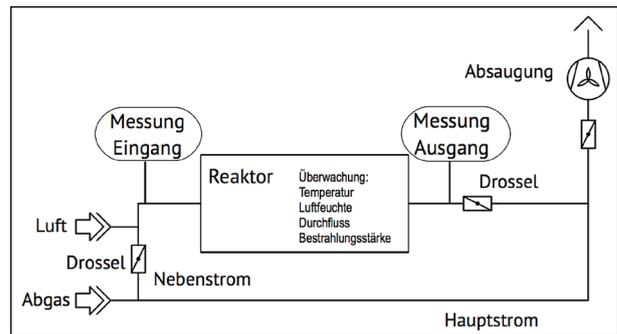


Bild 35: Prinzip des Testaufbaus mit Bezeichnung der einzelnen Komponenten



Bild 36: Testaufbau im Überblick mit Bezeichnungen der einzelnen Komponenten



Bild 37: Innenaufbau des Reaktors

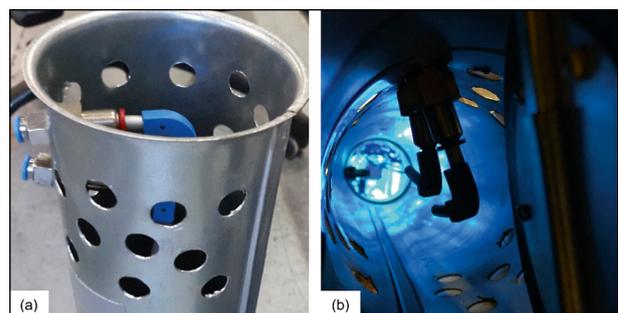


Bild 38: Teststanderweiterung um Druckluftdüsen und Belüftungslöcher: (a) Außenansicht und (b) Innenansicht

und der Volumenstrom konnten mit diesen zwei Veränderungen unabhängig voneinander eingestellt werden.

Mithilfe dieses Teststands und der dafür entwickelten Software waren Abbaumessungen über beliebige Zeiträume möglich. Als Schadgasquelle diente in diesem Aufbau ein Notstromgenerator. Alternativ konnten die Schadgase auch aus Druckflaschen

zugegeben oder durch weitere Schadgaserzeuger wie eine elektrische Entladung gewonnen werden. Grundsätzlich wäre in Weiterentwicklungen des Teststandes zudem eine automatische Verdünnung und Steuerung des Gasstroms durch Druckluft sowie die Schaltung der Beleuchtung, das Steuern der Lüfter und die Verdünnung des Schadgasstroms über die Software möglich.

In diesem Prototyp wurden mit dem Einsatz nach Bild 37 verschiedene Materialien getestet. Als photokatalytische Materialien kamen unterschiedliche Stoffe zum Einsatz, die mit einem Gemisch aus dem Zusatzstoff E und Zement oder der photokatalytischen Farbe C beschichtet wurden. Die Gitterstruktur des groben Netzes mit der Beschichtung aus dem Zusatzstoff E/ Zement-Gemisch hatte den Vorteil einer großen reaktiven Oberfläche bei gleichzeitiger Verwirbelung des Gasstroms. Die in Bild 39 gezeigte Probe ist eine Kohlenstofffaserplatte, beschichtet mit einer 2 bis 3 mm dicken Schicht aus Zementleim. Die Rezeptur des Leimes bestand aus 75 M.-% des Zusatzstoffes E und 25 M.-% CEM I, das Wasser/Bindemittel-Verhältnis betrug 0,42. Bei diesen Versuchen konnte nur bei extrem niedrigen Volumenströmen ein Effekt nachgewiesen werden. Die Idee wurde aufgrund der geringen Stabilität und insgesamt sehr kleinen Oberfläche verworfen.

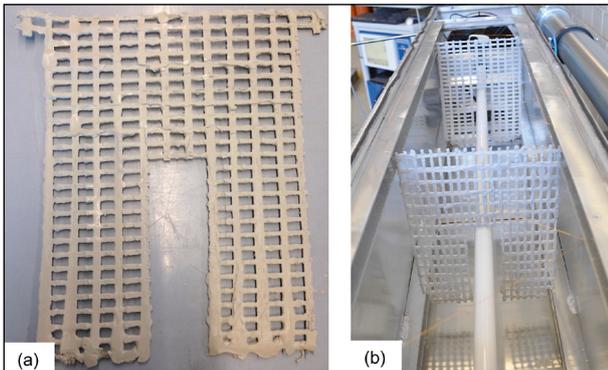


Bild 39: Trägermaterial als Kohlenstofffasergitter mit Zusatzstoff E/Zement-Beschichtung: (a) Beschichtetes Gitter mit Breite von 24 cm, Länge von 30 cm und Maschenweite von 1 x 2 cm² und (b) eingebautes Gitter im ersten Prototyp

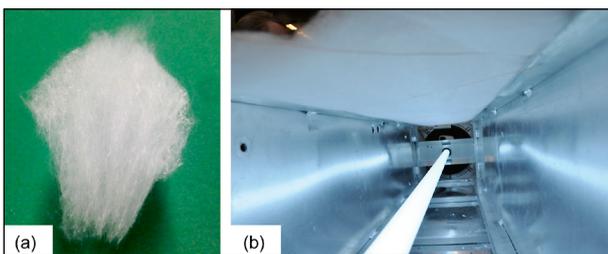


Bild 40: Trägermaterial aus Glaswolle: (a) Probe der Quarzwolle D und (b) eingebaute Quarzwolle und Leuchtstoffröhre im ersten Prototyp

Weiterhin wurden ebenfalls Matten der photokatalytisch beschichteten Glaswolle D in den ersten Prototypen eingebaut und vermessen. Bei dieser Glaswolle handelte es sich um 2 cm dicke Matten aus mehreren dünnen Schichten aus Fasern. Bild 40 zeigt eine Nahaufnahme der Glaswolle D sowie die eingebaute Glaswolle in dem Prototypreaktor. Mit diesem Aufbau konnte jedoch keine zufriedenstellende Reduktion der Stickoxide erreicht werden.

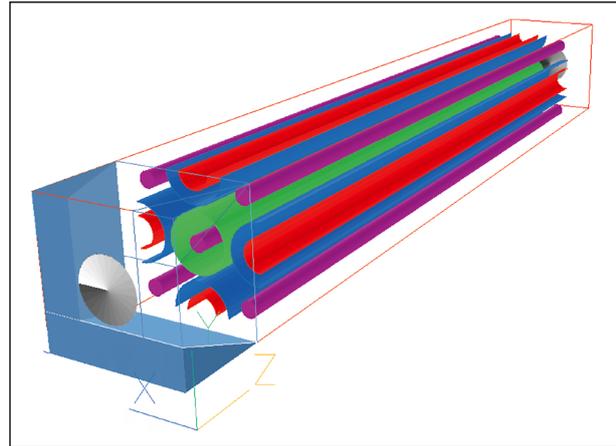


Bild 41: Schematischer Aufbau des zweiten Prototyps mit den Strahlungsquellen (lila) und verschiedenen Zusatzstoff E/Zement-Matten (grün, rot und blau)

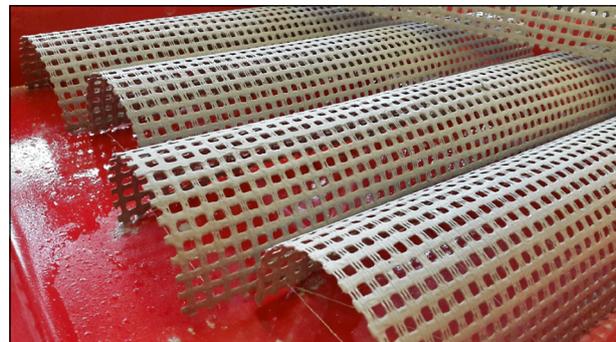


Bild 42: Trägermaterial des Prototyps 2: Glasfaserarmierung beschichtet mit Zusatzstoff E/Zement und zu Halbröhren geformt

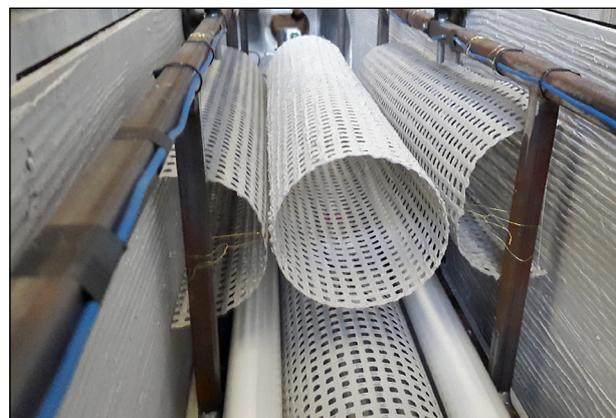


Bild 43: Innenaufbau des Prototypreaktors 2 mit beschichtetem, röhrenförmiger Glasfaserarmierung und Faserzementplatten am Rand (nicht alle Röhren und UV-Lampen eingebaut)

Aufgrund der zunächst nicht zufriedenstellenden Ergebnisse wurden zur Verbesserung des photokatalytischen Abbaus einige Modifikationen am Testaufbau vorgenommen. Dabei sollten eine höhere Strahlungsleistung sowie der Einbau und die Fixierung einer größeren photokatalytisch aktiven Oberfläche ermöglicht werden. In diesem Zusammenhang wurde zunächst eine Neuanfertigung des Einsatzes für den Lampen- und Photokatalysatorträger nebst Vorschaltgeräte vorgenommen. Weiterhin wurden die Beleuchtungsstrecke und die Katalysatorstrecke verlängert. Vor dem Umbau wies der Reaktor eine Beleuchtungsquelle mit einer Gesamtleistung von 20 W und ca. 100 cm nutzbarer Reaktorlänge auf. Die überarbeitete Variante, Prototyp 2, verfügte hingegen über fünf Beleuchtungsquellen mit je 80 W Leistung und einer nutzbaren Reaktorlänge von etwa 150 cm. Spektrometermessungen ergaben an der Innenwand des Prototypreaktors eine Strahlungsintensität von über 40 W/m² UV-A-Anteil. Die Lüfter wurden entfernt, da diese lediglich einen geringen Effekt auf die Strömungsgeschwindigkeiten hatten. Die Ansaugung lief somit vollständig über die Hausanlage. Darüber hinaus wurden später die Ansteuerung der Beleuchtung aus dem Messprogramm sowie leistungsfähige Radiallüfter in Zusatzboxen zur Selbstansaugung der Außenluft realisiert.

Der schematische Aufbau des zweiten Prototyps ist in Bild 41 zu sehen.

Um für die Weiterentwicklung des Testreaktors entsprechende geometrische Objekte erzeugen zu können, wurde die Zusatzstoff E/Zement-Mischung auf Armierungsmatten aufgetragen, die direkt nach der Applikation in eine Zylinder- oder Halbzylinderform gebogen und fixiert wurden (vgl. Bild 42). Diese wurden zusammen mit beschichteten Faserzementplatten in den zweiten Prototypreaktor eingebaut, wobei die Faserzementplatten als Wandverkleidung diente (vgl. Bild 43).

Dieser zweite Prototyp erreichte bei einem Volumenstrom von 170 m³/h die in Bild 44 gezeigten Abbauraten, die sich für NO auf 17 % und für NO₂ auf 25 % belaufen.

Die Veränderung des Innendesigns sollte zur Maximierung der Photokatalysatoroberfläche bei gleichzeitig geringem Strömungswiderstand dienen. Vor dem Umbau wies der Aufbau eine aktive Katalysatorfläche von maximal 1,5 m² auf und bestand aus einem einfachen Ring mit einem einzigen Beleuchtungselement. Nach dem Umbau verfügte der Auf-

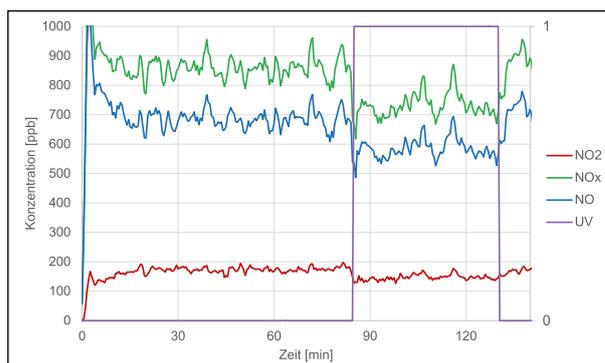


Bild 44: Messkurven aus Teststandmessung von Prototyp 2 mit Zusatzstoff E/Zement-Rohraufbau und Volumenstrom von 170 m³/h

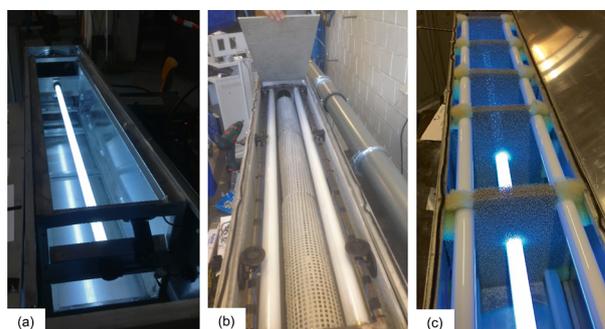


Bild 45: Überblick zu den Prototypreaktoren: (a) Prototyp 1, (b) Prototyp 2 mit Röhrenaufbau und (c) Prototyp 3 mit Schaummattenaufbau

bau über eine Katalysatorfläche von ca. 6 m² (Außenflächen, Ring in der Mitte, halbe Ringe an den Außenflächen, vgl. Bild 45). Die Abmessungen der Wände betragen jeweils 150 x 30 cm² (1,8 m²). Weiterhin wies das Rohr um das mittlere Beleuchtungselement einen Durchmesser von 11 cm und somit eine Fläche von 1 m² und die vier halben Rohre mit je 11 cm Durchmesser eine Fläche von 2,1 m² auf. Die in Bild 41 rot dargestellten halben Rohre wiesen zudem einen Durchmesser von 6 cm und somit eine Fläche von 1,1 m² auf.

Die zu diesem Modell durchgeführten Simulationen zeigten eine deutliche Übereinstimmung zwischen Modell und realer Messung, was in Kapitel 3.5.8 beschrieben ist. Anhand der Simulationen wurde jedoch auch deutlich, dass die Geometrie zwar wenig Strömungswiderstand erzeugte, allerdings bei hohen Durchflüssen ein Großteil des Schadgasstroms unverändert wieder aus dem Reaktor austrat. Für die Steigerung der Abbauleistung war nach den Simulationen eine weitere Erhöhung der photokatalytischen Oberfläche pro Reaktorvolumen erforderlich. Dieses Ergebnis hat zu einer weiteren Modifizierung des Reaktors und der Erarbeitung des Prototyps 3 geführt, bei der die in Kapitel 3.3.11 beschriebenen Schaumstoffe eingesetzt wurden. Bild 45 zeigt den Prototyp

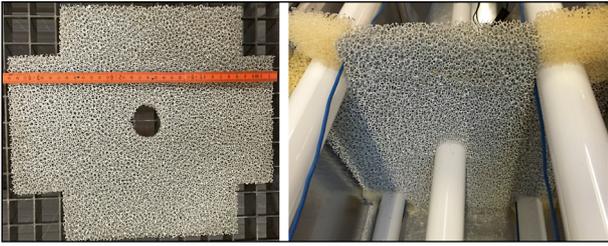


Bild 46: Trägermaterial des Prototyps 3: (a) Schaummatte mit dem Zusatzstoff E und Zement beschichtet vor dem Einbau und (b) nach dem Einbau in den Teststand

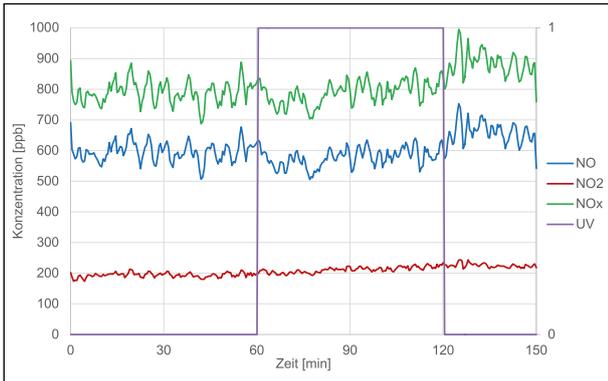


Bild 47: Messverlauf der Teststandmessung des Prototyps 3 mit zwei Schaummatte 5 ppi mit Beschichtung aus Farbe C (Volumenstrom 120 m³/h)

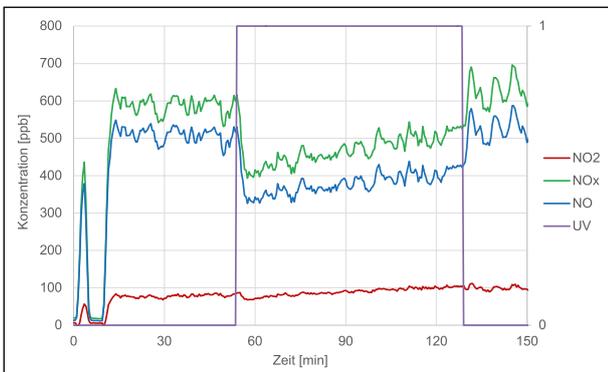


Bild 48: Messverlauf der Teststandmessung des Prototyps 3 mit zwei Schaummatte 5 ppi mit Zusatzstoff E/Zement-Beschichtung (Volumenstrom 120 m³/h)

3 im Vergleich zu den vorherigen Prototypen 1 und 2.

In mehreren aufeinander folgenden Messungen wurden im Prototyp 3 erst zwei mit der Farbe C beschichtete und danach zwei, vier und sechs mit einem Gemisch aus dem Zusatzstoff E und Zement beschichtete Schaumplatten quer zur Strömungsrichtung, also durchströmend, eingebaut. Bild 46 zeigt die Form und den eingebauten Zustand der Matten beispielhaft für eine Zusatzstoff E/Zement beschichtete Probe.

Für den Einbau wurden die Schaummatte speziell zugeschnitten und quer zur Strömungsrichtung ein-

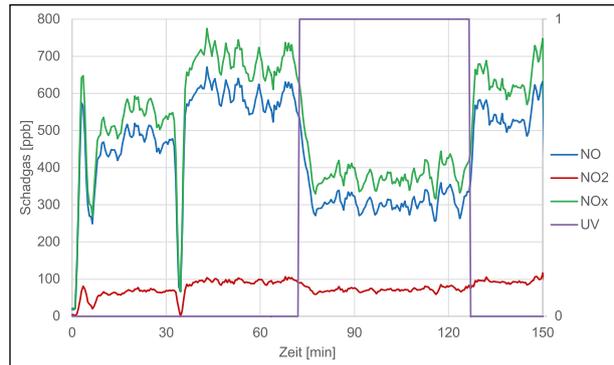


Bild 49: Messverlauf der Teststandmessung des Prototyps 3 mit vier Schaummatte 5 ppi mit Zusatzstoff E/Zement-Beschichtung (Volumenstrom 120 m³/h)

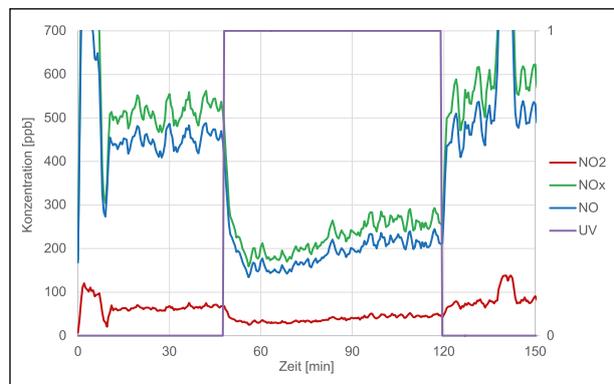


Bild 50: Messverlauf der Teststandmessung des Prototyps 3 mit sechs Schaummatte 5 ppi mit Zusatzstoff E/Zement-Beschichtung (Volumenstrom 120 m³/h)

gebaut, während die Lampen direkt aufgelegt bzw. durch die Matten gesteckt wurden. Der Einbau erfolgte formschlüssig zu den Außenwänden, um den gesamten Volumenstrom durch die Schaummatte zu leiten. Freie Stellen wurden, wie in Bild 46 (b) zu erkennen, mit unbeschichteten, flexiblen Schaumstücken verschlossen.

Für den Prototyp 3 wurde ebenfalls die Effizienz des Schadstoffabbaus ermittelt. Bild 47 bis Bild 50 zeigen die gemessenen Abbauraten für einen Volumenstrom von 120 m³/h.

In Tabelle 21 sind die gemessenen Abbauraten den Abbauraten gegenübergestellt, die nach Kapitel 3.5 bzw. 3.5.8 mithilfe von Simulationen gewonnen wurden. Zu Beginn lag die Abbauraten geringfügig höher als im Modell vorhergesagt. Dies lag wahrscheinlich an der im CST-Reaktor zu gering eingeschätzten Depositionsrate des Materials. Mit zunehmender Mattenzahl war anzunehmen, dass die Bestrahlungsstärke pro Katalysatoroberfläche aufgrund einer ungünstigen Strahleranordnung sank und somit die gemessene zunehmend unter die erwartete Abbauleistung fiel.

	NO-Abbau [%]	
	Modellberechnung:	Messung am Teststand:
2 Matten	30	32
4 Matten	52	49
6 Matten	66	58

Tab. 21: Gegenüberstellung des gemessenen und modellierten Schadstoffabbaus durch Zusatzstoff E/Zement-Schaummatten im Teststand

Grundsätzlich zeigte das Schaummaterial den Vorteil, dass pro eingebauter Oberfläche die vielfache Reaktionsoberfläche im Inneren des Schaumes zur Verfügung stand. Zusätzlich wurde die Diffusionsstrecke bis zur Katalysatoroberfläche auf ein bis zwei Millimeter gesenkt, da der gesamte Luftstrom die Schäume passieren musste. Um jedoch auch im Inneren der Schaummatten ausreichend Strahlung für die Photokatalyse zur Verfügung stellen zu können und dem im Vergleich zu den vorherigen Aufbauten hohen Strömungswiderständen Rechnung zu tragen, war im Gegensatz zu dem bisherigen länglichen Design der Tunnelkassetten ein flacher, aber breiterer Aufbau nötig. Zudem sollten die Lampen parallel zu den Schaummatten angeordnet werden, um die Bestrahlungsstärke zu erhöhen.

3.4.3 Umsetzung der Labormessergebnisse auf das Design und den Bau der Tunnelkassetten

Gemäß den Vorgaben aus den Labormessungen in Kombination mit den Ergebnissen der Modellierung wurde das Design der Tunnelkassetten für die Realisierung der Phase 2 neu konzipiert, wobei weiterhin die Vorgaben der Ausschreibung sowie die einzuhaltenden Abstände im Tunnel berücksichtigt blieben. Auf dieser Basis wurde eine Tunnelkassette konstruiert, deren Abmessungen mit einer Breite von 3.060 mm, einer Höhe von 1.740 mm und einer Tiefe von 400 mm innerhalb der vorgegebenen Grenzen lag.

Die Kassetten könnten alternierend bzw. sich jeweils diagonal gegenüberliegend an den Tunnelwänden in einer Höhe von 2,10 m positioniert werden. Da der Tunnel Rudower Höhe über eine Standspur verfügt, war zudem weder von Platz- noch von Sicherheitsproblemen auszugehen. Die Konzeption der Tunnelkassetten erfolgte maßgebend auf der Grundlage der Labormessergebnisse und Simulationen, wobei der grundsätzliche Aufbau in Bild 51 bis Bild 53 gezeigt ist.

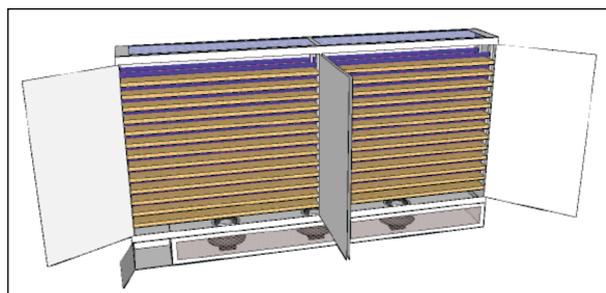


Bild 51: Darstellung der Tunnelkassette in ISO-Ansicht mit geöffneten Türen und geöffneter Zugangsklappe zur Steuerung

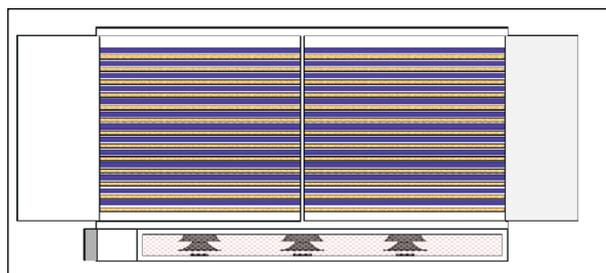


Bild 52: Darstellung der Tunnelkassette in Frontansicht mit geöffneten Türen und geöffneter Zugangsklappe zur Steuerung

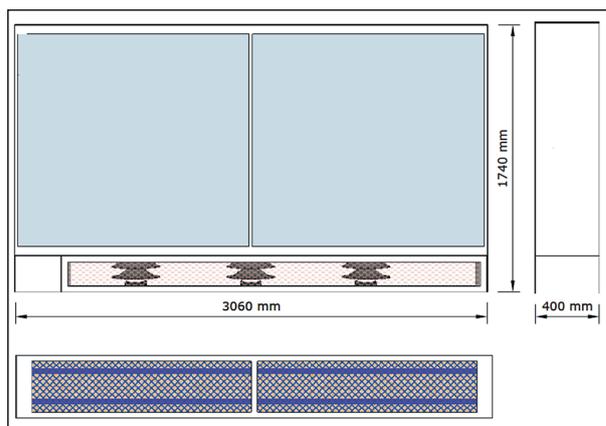


Bild 53: Darstellung der Tunnelkassette in Aufriss und Draufsicht mit geschlossenen Türen

Bezüglich des technischen Aufbaus der Kassetten verfügen diese über zwei Doppeltüren, durch die notwendige Wartungsarbeiten an den Trägermaterialien und Beleuchtungskörpern ausgeführt werden können. Das Gehäuse wurde zudem nicht komplett aus V2A-Stahlblechen gebaut, obwohl dies die kostengünstigste Variante gewesen wäre. Durch ein vollflächiges V2A-Gehäuse wäre allerdings das Gesamtgewicht des Systems unnötig hoch gewesen, was wiederum den Aufbau der Anlage erschwerte und die Tunnelwand zu sehr beeinflusst hätte. Aus diesem Grund wurde ein Design erarbeitet, das eine Mischung aus V2A-Stahlblech und Aluminium darstellte. Das gesamte System war somit bei wesentlich geringerem Gewicht ebenfalls korro-

sionsgeschützt und bot in Summe mehr Vorteile. Das Gesamtgewicht einer Tunnelkassette betrug ungefähr 190 bis 240 kg, was einem Gewicht pro Meter zwischen 64 und 80 kg entsprach. Die Fertigteile, aus denen die Tunnelwand bestand, wiesen ein Gewicht von ca. 2 bis 2,6 t auf. Pro Meter ergab das eine Belastung von ca. 1 bis 1,3 t. Nahm man



Bild 54: Darstellung einer Laufschiene zur Montage der Tunnelkassetten

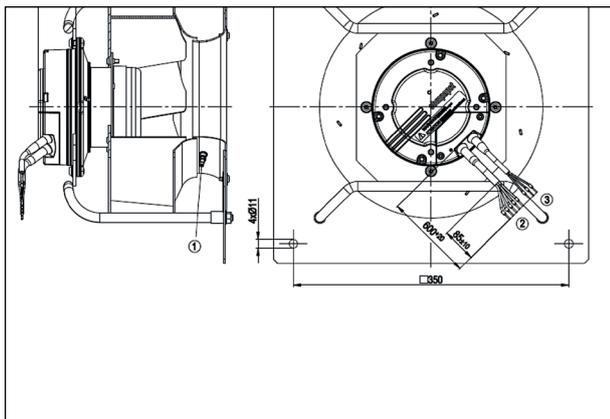


Bild 55: Darstellung der Radiallüfter mit Abmessungen [Quelle: EBM Papst]

an, dass statisch, wie üblich, eine Toleranz der Aufhängung als Sicherheitsreserve von mind. 10 bis 20 % vorgesehen wurde, so konnte das Gewicht der Tunnelkassetten pro Meter etwa 100 bis 130 kg betragen. Das zusätzliche Gewicht der Tunnelkassetten stellte somit keine größere Problematik für die Tragfähigkeit der Tunnelwand dar.

Die Montage der Tunnelkassetten sollte mittels eines effizienten und sehr einfachen Systems über Laufschiene nach Bild 54 erfolgen, die mit M10-Bolzen in der Tunnelwand fixiert werden sollten. Dies sollte eine sichere Montage der Anlage bei guter Gewichtsverteilung an der Tunnelwand und einen raschen Aufbau des gesamten Systems ermöglichen. Die Tunnelkassetten sollten somit auf die Laufschiene aufgeschoben, fixiert und mittels Fallsicherung über die Tunneldecke abgesichert werden.

Nach dem erarbeiteten Design befanden sich im Inneren einer Tunnelkassette 26 Schaumplatten, die jeweils eine Größe von 1.500 x 400 x 30 mm³ aufweisen. Um den im Betrieb auftretenden Sogwirkungen entgegenzuwirken, sollten die Platten auf einem Metallgitter aufgelegt und in die Kassette auf dafür vorgesehene L-Profile eingeschoben werden. Dies ermöglichte einen zügigen Austausch der Schaumplatten ohne langwierige Eingriffe in das System.

Zwischen den Schaumplatten waren nach diesem Modell jeweils zwei 1.500 mm lange Leuchtstoffröhren pro Seite zur Erzeugung der nötigen UV-A-Beleuchtungsleistung erforderlich. Diese sollten in Abstimmung mit dem Hersteller so gebaut werden,

Nenndaten					
Typ	K3G250-AT39-72	Art der Datenfestlegung	Max. Belastung		
Motor	M3G084-DF	Drehzahl [min ⁻¹]	3000		
Phase	1~	Leistungsaufnahme [W]	448		
Nennspannung [VAC]	230	Stromaufnahme [A]	2,8		
Nennspannungsbereich [VAC]	200 ... 270	Min. Umgebungstemperatur [°C]	-25		
Frequenz [Hz]	50/70	Max. Umgebungstemperatur [°C]	40		
Daten gemäß ErP-Richtlinie					
Installationskategorie	A	Ist	Vorgabe 2013	Vorgabe 2015	
Effizienzkategorie	Statisch	Gesamtwirkungsgrad η_{es} [%]	63,1	43,9	47,9
Drehzahlregelung	Ja	Effizienzklasse N	77,2	58	62
Spezifisches Verhältnis	1,01	Leistungsaufnahme P_{eq} [kW]	0,45		
(= $1 + p_{fs}/10^5$ Pa)		Volumenstrom q_v [m ³ /h]	1550		
		Druckerhöhung p_{fs} [Pa]	601		
		Drehzahl n [min ⁻¹]	2940		

Tab. 22: Kenndaten der Radiallüfter [Quelle: EBM Papst]

dass eine Bestrahlungsleistung von 20 W/m^2 erreicht wurde. Die Gesamtleistungsaufnahme des Systems wurde dabei so gering wie möglich gehalten.

Die Leuchtstoffröhren sollten in einzelne Gruppen zusammengefasst und überwacht werden, um Ausfälle detektieren zu können. Eine ferngesteuerte Ein- und Ausschaltung der einzelnen Beleuchtungsgruppen sollte ermöglichen, die Leistung der Tunnelkassette stufenweise zu reduzieren und sie den Bedingungen im Tunnel anzupassen.

In der Tunnelkassette waren zudem drei Radialventilatoren vorgesehen (Bild 55 und Tabelle 22), um den benötigten Durchfluss durch die Kassetten zu erzeugen. Die Radialventilatoren entsprachen mit ihren technischen Spezifikationen den Vorgaben der Ausschreibung. Die Steuerung der Ventilatoren sollte, wie die Beleuchtungsgruppen ebenfalls, über das SPS-System (Speicherprogrammierbare Steuerung) erfolgen, dass vom Server aus bedient wurde.

Die Radialventilatoren wurden am Fuß der Tunnelkassetten vorgesehen, wodurch die Tunnelluft von oben durch die Kassette vertikal angesaugt und unten an den Ventilatoren horizontal ausgeblasen wird. Durch Stellbleche am Auslass sollte es möglich sein, den Ausblaswinkel zu variieren. Die Gesamtförderleistung der geplanten Ventilatoren lag für eine Tunnelkassette bei $4.500 \text{ m}^3/\text{h}$.

Weiterhin wurde an der linken unteren Ecke der Tunnelkassette eine kleine Wartungsklappe integriert, die den Zugang zu den elektronischen Steuerungseinheiten ermöglichte. Die Steuerung der Tunnelkassette sowie die Kommunikation untereinander waren mittels einer SPS-Steuerung vorgesehen. Die einzelnen Tunnelkassetten sollten durch das Übertragungssystem MODBUS zu einzelnen Gruppen zusammengefasst werden und bidirektional mit einem Mikrocontroller System kommunizieren. Das Mikrocontroller System ist in der Lage eine Onlineverbindung zum Server zu erstellen, auf dem alle Informationen zusammenlaufen und von dem die zentrale Steuerung der Tunnelkassetten unter Einbeziehung der erhaltenen Echtzeitdaten der Umweltmessstationen und der Verkehrszählung erfolgen sollte. Grundsätzlich war es bei diesem System möglich, unterschiedliche Szenarien der Aktivierung der Anlage fest einzuprogrammieren, um die Gesamtleistung zu optimieren. Durch einen pro-

grammierten Tages- oder Wochenrhythmus könnte das System optimal arbeiten, da die Messdaten nur dazu dienen, das vorkonfigurierte System weiter zu idealisieren und so auf kurzzeitige Impulse und Ereignisse schneller reagieren zu können.

Während der ersten Phase des Projekts ist in weiteren Überlegungen die Empfehlung entstanden, die Steuerung der Anlage mit der Tunnelleitzentrale zu kombinieren. Gerade für Störungen seitens des Tunnels oder für Ereignisse, die eine sofortige Abschaltung der Anlage erfordern, sollte die Kommunikation zur Tunnelleitzentrale hergestellt werden. Zur Verwirklichung dieser Kommunikation waren grundsätzlich zwei unterschiedliche Wege denkbar. Eine Variante war die Montage einer Steuerungskonsole in der Tunnelleitzentrale, die eine manuelle Überwachung und Abschaltung der gesamten Anlage ermöglichte. Als zweite Variante konnte eine Schnittstelle zwischen dem Serversystem der Tunnelleitzentrale und dem Projektserver erstellt werden. Hier könnten vordefinierte Ereignisse in der Tunnelleitzentrale automatisch eine Abschaltung des Systems bewirken.

Die Wartung der Tunnelkassetten und der einzelnen Komponenten sollte vor Ort über die beschriebenen Fronttüren und die Wartungsluke der elektronischen Steuerung erfolgen. Die Reinigung der gesamten Tunnelkassette sollte während der regelmäßigen Wartungsarbeiten sowie im Zuge des Tausches der Schaummatten erfolgen. Dafür sollten die Ansaugöffnungen der Ventilatoren verschlossen werden können. Das System könnte dann von oben mittels Hochdruckreiniger abgesprüht und das Wasser am Boden der Tunnelkassette abgesaugt werden. Das Waschwasser könnte somit auch im Labor auf Verunreinigungen getestet werden.

3.5 Simulation der dreidimensionalen Strömung, der Ausbreitung von Stickoxiden und des photokatalytischen Abbaus in den Tunnelkassetten

Zur Optimierung und Bewertung der konzipierten Tunnelkassette wurde im Rahmen des Projekts weiterhin die dreidimensionale Strömung, die Ausbreitung von Stickoxiden und der photokatalytische Abbau in der Kassette mithilfe der CFD²-Software PHOENICS simuliert. Hierzu wurde in einem ersten

² CFD: Computational Fluid Dynamics

Schritt zunächst ein numerisches Modell der Tunnelkassette erstellt. Darauf aufbauend konnten anschließend die dreidimensionale Strömung und die Ausbreitung von Stickoxiden in der Tunnelkassette simuliert werden. Zur Bewertung des photokatalytischen Abbaus wurden die in den Laboruntersuchungen bestimmten Depositionsgeschwindigkeiten herangezogen.

3.5.1 Theorie zu nicht-diffusionslimitierter Abbaurate bzw. theoretischem Wirkungsgrad einer Tunnelkassette

Die nicht-diffusionslimitierte Abbaurate der Tunnelkassette, d. h. das Verhältnis der Stickoxidaustrittskonzentration zur -eintrittskonzentration für den Fall, dass die Diffusion den Abbauprozess nicht limitiert, kann analytisch abgeschätzt werden. Für die analytische Lösung wird somit angenommen, dass strömungsseitige turbulente und laminare Transportwiderstände vernachlässigt werden können und dass die Konzentrationsabnahme in der Tunnelkassette entlang einer Stromlinie proportional zur Konzentration ist. Unter diesen Randbedingungen ergibt sich eine exponentielle Anhängigkeit zwischen Austritts- und Eintrittskonzentration:

$$\frac{c_{aus}}{c_{ein}} = e^{-k_{TK} \cdot t_{Reaktion}} \quad \text{Gl. 8}$$

mit:

$$k_{TK} = v_d \cdot \frac{S_{TK}}{V_{TK}}$$

$$t_{Reaktion} = \frac{V_{TK}}{\dot{V}}$$

- S_{TK} Photokatalytische Oberfläche [m²]
 V_{TK} Innenvolumen der Tunnelkassette [m³]
 \dot{V} Volumenstrom durch die Tunnelkassette [m³/s]
 v_d Photokatalytische Depositionsgeschwindigkeit [m/s]

Die nicht-diffusionslimitierte Abbaurate R_{TK} , d. h. die auf die Eintrittskonzentration bezogene Konzentrationsdifferenz, lautet somit:

$$R_{TK} = \frac{c_{ein} - c_{aus}}{c_{ein}} = 1 - \frac{c_{aus}}{c_{ein}} \quad \text{Gl. 9}$$

$$R_{TK,max} = 1 - e^{-v_d \cdot \frac{S_{TK}}{V_{TK}}} \quad \text{Gl. 10}$$

Zu beachten ist, dass nicht die Abbaurate R_{TK} bewertungsrelevant ist, sondern der Schadstoffabbau-massenstrom $R_{TK} \cdot \dot{V}_{TK} \cdot c_{ein}$ die Leistungsfähigkeit der Tunnelkassette charakterisiert, d. h. das Produkt aus Abbaurate, Volumenstrom durch die Tunnelkassette und Eintrittskonzentration. Da der Schadstoffabbau-massenstrom noch dimensionsbehaftet ist, ist es von Vorteil, diesen auf den maximal möglichen Schadstoffabbau-massenstrom zu beziehen und diese Größe als theoretischen Wirkungsgrad einer Tunnelkassette zu bezeichnen:

$$\eta = \frac{R_{TK} \cdot \dot{V}_{TK} \cdot c_{ein}}{S_{TK} \cdot v_d \cdot c_{ein}} \quad \text{Gl. 11}$$

Die reale Abbaurate einer Tunnelkassette ist aufgrund der strömungsseitigen turbulenten und laminaren Transportwiderstände geringer als die oben angegebene nicht-diffusionslimitierte Abbaurate $R_{TK,max}$. Die reale Abbaurate einer Tunnelkassette kann im Allgemeinen jedoch nicht analytisch berechnet werden, sondern wird mithilfe der CFD-Software PHOENICS simuliert.

3.5.2 Basislayout der Tunnelkassette

Da die Simulationsberechnungen bereits begleitend zu den Laboruntersuchungen und somit zum Teil bereits vor dem Design der Tunnelkassetten nach Kapitel 3.4.3 durchgeführt wurden, lag für diese ein alternatives Basislayout der Kassette vor. Als Basislayout diente dabei eine Tunnelkassette mit den Innenmaßen 1,2 x 1,0 x 0,3 m³, wie in Bild 56 gezeigt.

In dieser Tunnelkassette wurden sowohl an der Oberseite als auch an der Unterseite drei Ventilatoren angenommen. Der maximale Volumenstrom pro Ventilator wurde mit 2.500 m³/h festgelegt. Da kommerziell erhältliche Lüfter einen geringeren Luftdurchsatz von 1.600 m³/h haben, wurde für das Basislayout der Tunnelkassette mit diesem Volumenstrom von 1.600 m³/h pro Lüfter, d. h. insgesamt mit 3 x 1.600 m³/h = 4.800 m³/h = 1,333 m³/s, gerechnet. Bei einem Durchmesser des Lufteinlasses von 24 cm, d. h. einer Lufteinlassfläche von 0,045 m² pro Lüfter, betrug die Einströmgeschwindigkeit in diese Tunnelkassette ca. 10 m/s.

In der Tunnelkassette wurden Bleche berücksichtigt, um zum einen die photokatalytische Oberfläche zu vergrößern und zum anderen den Luftstrom zu verwirbeln. Mit der Verwirbelung wurde erreicht, dass der luftseitige Transportwiderstand reduziert

und somit der photokatalytische Abbau verbessert wurde. Das Basislayout der Tunnelkassette hatte fünf Bleche, die jeweils eine Größe von $1 \times 0,3 \text{ m}^2$ aufwiesen und gegenüber der Horizontalen um 30° geneigt waren.

Auf den Tunnelkassetteneinnenseiten, -rück und -vorderwand sowie die Ober- und Unterseite der Bleche wurde eine photokatalytische Beschichtung angesetzt. Es ergab sich somit eine photokatalytisch aktive Fläche von $(1,2 \cdot 2 \cdot (1 + 0,3) + 5 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 0,3) \text{ m}^2 = 6,12 \text{ m}^2$, von denen $3,12 \text{ m}^2$ den Innenseiten der Kassette und 3 m^2 den fünf Leitblechen zuzuordnen waren. Das Verhältnis von photokatalytisch aktiver Fläche zu Innenvolumen der Tunnelkassette betrug $6,12 \text{ m}^2 / 0,36 \text{ m}^3 = 17 \text{ m}^{-1}$.

Für die photokatalytische Depositionsgeschwindigkeit wurde zunächst ein Wert von $1,4 \text{ cm/s}$ angesetzt. Diese Depositionsgeschwindigkeit kann nach Herstellerangaben für die Fassadenfarbe C angenommen werden. Höhere photokatalytische Depositionsgeschwindigkeiten von anderen photokatalytisch aktiven Materialien waren zum Zeitpunkt der Modellrechnungen nicht bekannt. Die photokatalytische Depositionsgeschwindigkeit von dem in diesem Projekt verwendeten photokatalytisch aktiven Zement ist geringer. Somit stellen die im Folgenden angegebenen Abbauraten jeweils Maximalwerte für den erreichbaren photokatalytischen Abbau der angenommenen Tunnelkassette dar. Genaue Zahlenwerte wurden im Rahmen dieses Projektes messtechnisch bestimmt. Diese Zahlenwerte und nicht

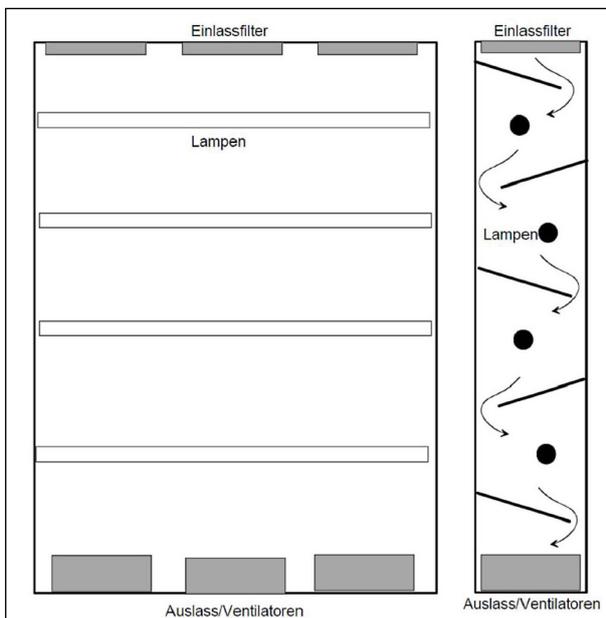


Bild 56: Basislayout der Tunnelkassette [Bildquelle: Jörg KLEFFMANN, Universität Wuppertal]

die der Fassadenfarbe C wurden dann auch bei der Bestimmung der notwendigen Anzahl von Tunnelkassetten verwendet.

3.5.3 Abschätzung der nicht-diffusionslimitierten Abbaurate bzw. des theoretischen Wirkungsgrades für das Basislayout der Tunnelkassette

Für das Basislayout der Tunnelkassette ergab sich mit $S_{TK} = 6,12 \text{ m}^2$, $V_{TK} = 0,36 \text{ m}^3$, $\dot{V}_{TK} = 3 \cdot 1.600 \text{ m}^3/\text{h} = 1,33 \text{ m}^3/\text{s}$ eine Reaktionszeit von $t_{\text{Reaktion}} = 0,27 \text{ s}$ und eine Reaktionskonstante von $k_{TK} = 0,238 \text{ s}^{-1}$. Tabelle 23 gibt hierfür sowie für zwei weitere Werte für den Volumenstrom pro Lüfter ($400 \text{ m}^3/\text{h}$ bzw. $800 \text{ m}^3/\text{h}$) die nicht-diffusionslimitierte Abbaurate und den Wirkungsgrad an.

Aus Tabelle 23 ist zu erkennen, dass der Wirkungsgrad der Tunnelkassette bei $400 \text{ m}^3/\text{h}$ nur geringfügig geringer (ca. 9 Prozentpunkte) ist als bei $1.600 \text{ m}^3/\text{h}$. Dieser Nachteil wird jedoch überkompensiert durch Vorteile der benötigten Ventilatorantriebsleistung. Der abnehmende Wirkungsgrad der Tunnelkassette bei abnehmendem Volumenstrom ist damit begründet, dass die Konzentrationen in der Tun-

Volumenstrom V_{TK}	3 x 400 m^3/h	3 x 800 m^3/h	3 x 1.600 m^3/h
Nicht-diffusionslimitierte Abbaurate (bei einer photokatalytischen Depositionsgeschwindigkeit von $1,4 \text{ cm/s}$)	23 %	12 %	6 %
Theoretischer Wirkungsgrad (bei einer photokatalytischen Depositionsgeschwindigkeit von $1,4 \text{ cm/s}$)	88 %	94 %	97 %

Tab. 23: Nicht-diffusionslimitierte Abbaurate bzw. theoretischer Wirkungsgrad für das Basislayout der Tunnelkassette

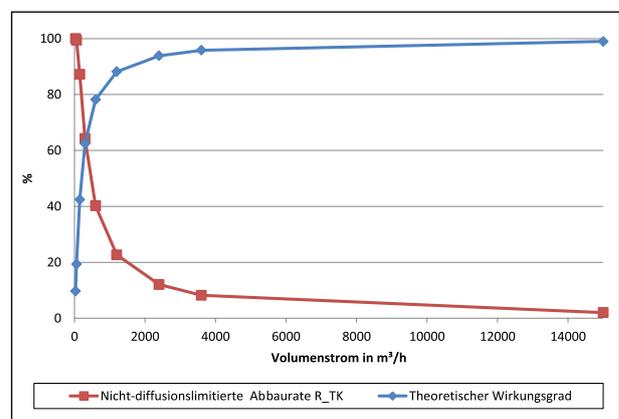


Bild 57: Nicht-diffusionslimitierte Abbaurate bzw. theoretischer Wirkungsgrad für das Basislayout der Tunnelkassette in Abhängigkeit des Volumenstroms durch die Tunnelkassette

nelkassette niedriger werden, der photokatalytische Abbau aber direkt gekoppelt ist an das Niveau der Schadstoffkonzentration.

Die Abhängigkeit der nicht-diffusionslimitierten Abbauraten bzw. des theoretischen Wirkungsgrades für das Basislayout der Tunnelkassette vom Volumenstrom zeigt Bild 57. Zu erkennen ist der gegenläufige Trend von nicht-diffusionslimitierter Abbauraten und theoretischem Wirkungsgrad.

Aus dem Bild wird deutlich, dass, wie bereits oben erwähnt, nicht die Abbauraten bewertungsrelevant ist, da sich stets ein Wert von 100 % bei verschwindendem Volumenstrom einstellt. Ebenso wird deutlich, dass es nicht zielführend ist, den Volumenstrom durch die Tunnelkassette immer weiter zu erhöhen, um einen besseren photokatalytischen Abbau zu erreichen, da der theoretische Wirkungsgrad asymptotisch gegen 100 % tendiert.

Es wurde daher abgeleitet, dass der Volumenstrom in einer Tunnelkassette einen theoretischen Wirkungsgrad von ca. 90 % aufweisen sollte. Für das Basislayout der Tunnelkassette wäre das ein Volumenstrom pro Ventilator im Bereich von 400 m³/h bis 800 m³/h.

3.5.4 Simulation der Strömung und des Schadstoffabbaus für das Basislayout der Tunnelkassette mit der CFD-Software PHOENICS

Simulationsraum für die CFD-Software PHOENICS war der Innenraum der Tunnelkassette. Die numerische Lösung der Erhaltungsgleichungen für Impuls und Masse sowie für einen Schadstoff erfolgte in einem kartesischen Koordinatensystem, wobei ein Rechengitter mit 44 x 60 x 240 Gitterpunkten in die x-, y- und z-Richtung gewählt wurde. Das Rechengitter hatte somit in y- und z-Richtung eine Auflösung von 5 mm. Damit konnten auch kleine Wirbelstrukturen an den Blechkanten hinreichend genau aufgelöst werden.

Bild 58 zeigt den Simulationsraum einschließlich des genannten Koordinatensystems.

In diesem Simulationsraum wurden drei Simulationen durchgeführt, in denen der Volumenstrom des Lüfters zwischen 1.600 m³/h, 800 m³/h und 400 m³/h variierte. Für diese drei Volumenströme zeigen Bild 59, Bild 61 und Bild 63 die Geschwindigkeitsverteilung in der Tunnelkassette für einen y,z-Schnitt

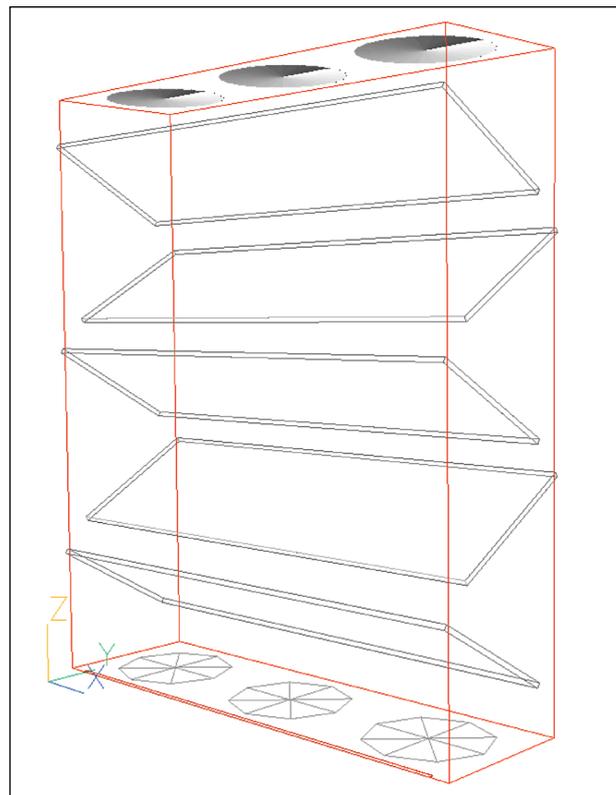


Bild 58: Modell der Tunnelkassette für die CFD-Software PHOENICS

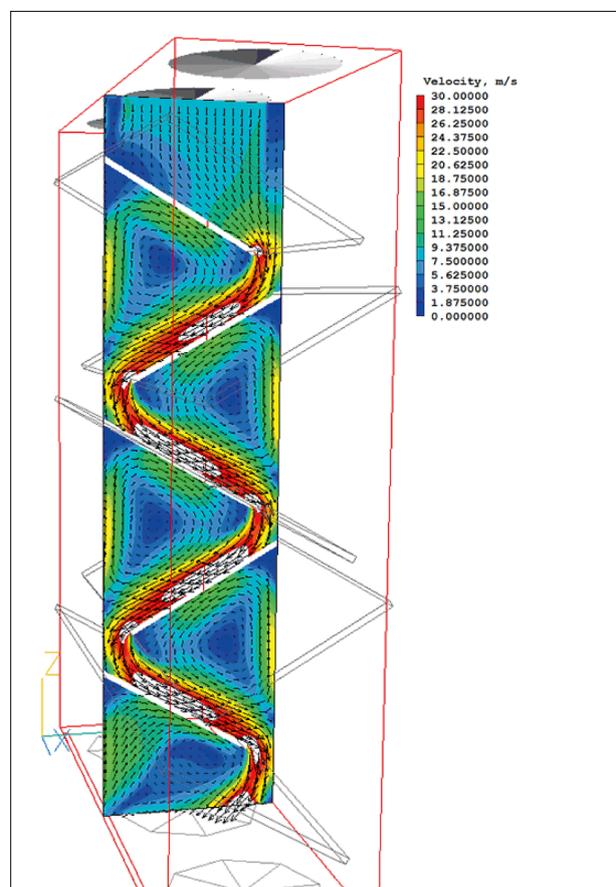


Bild 59: Geschwindigkeitsverteilung in der Tunnelkassette in der Mittelebene bei einem Volumenstrom pro Lüfter von 1.600 m³/h und drei Lüftern

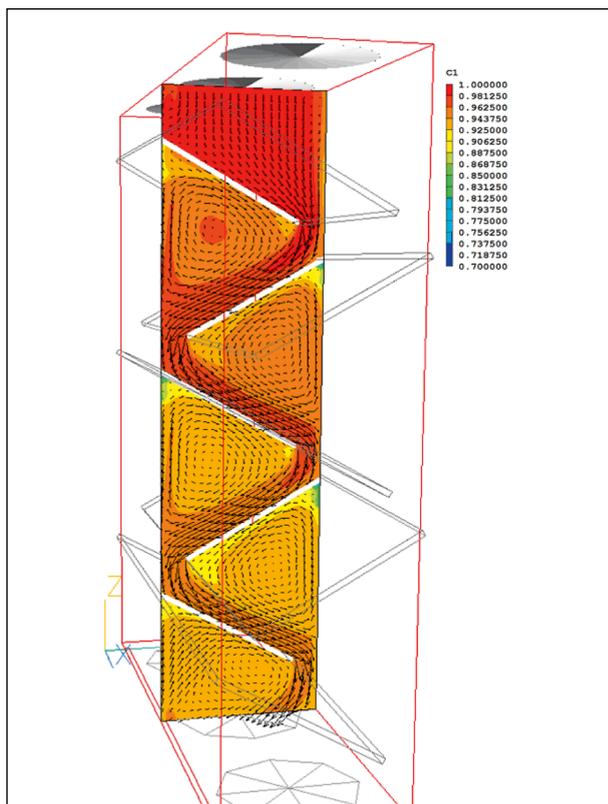


Bild 60: Auf die Eintrittskonzentration normierte Konzentrationsverteilung in der Tunnelkassette in der Mittelebene bei einem Volumenstrom pro Lüfter von 1.600 m³/h und drei Lüftern

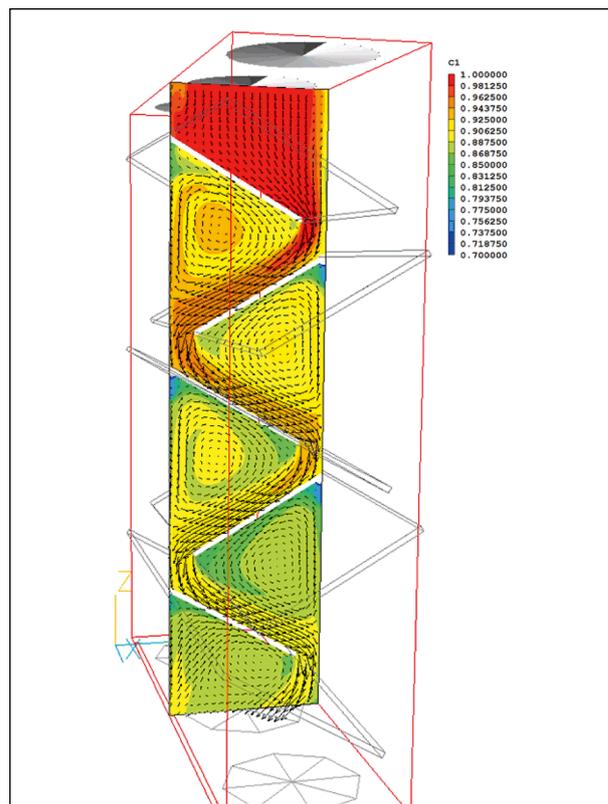


Bild 62: Auf die Eintrittskonzentration normierte Konzentrationsverteilung in der Tunnelkassette in der Mittelebene bei einem Volumenstrom pro Lüfter von 800 m³/h und drei Lüftern

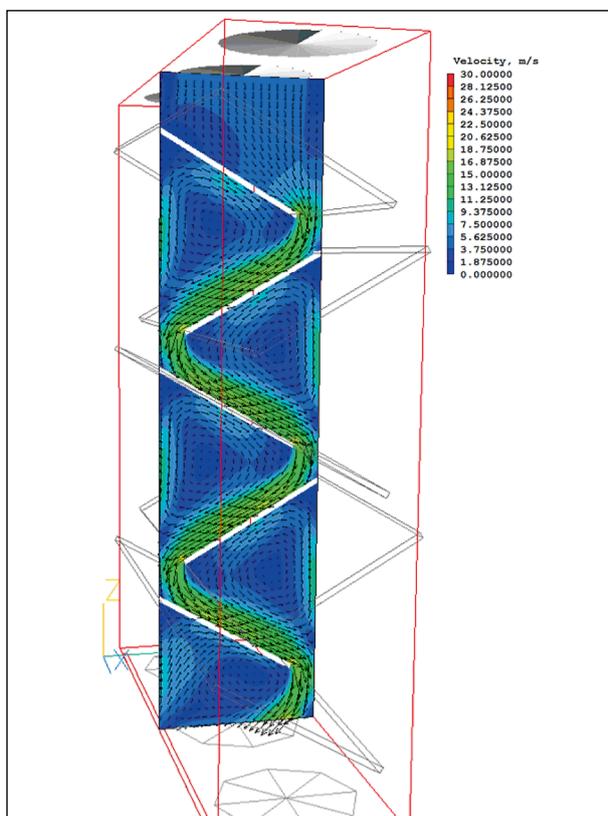


Bild 61: Geschwindigkeitsverteilung in der Tunnelkassette in der Mittelebene bei einem Volumenstrom pro Lüfter von 800 m³/h und drei Lüftern

in der Mittelebene, d. h. für $x = 0,5$ m. Bei einem Volumenstrom pro Lüfter von 1.600 m³/h betrug die Einströmgeschwindigkeit in die Tunnelkassette ca. 10 m/s, bei 800 m³/h bzw. 400 m³/h sind es 5 m/s bzw. 2,5 m/s.

Weiterhin ist aus den Bildern der Geschwindigkeitsverteilung zu erkennen, dass die Leitbleche die durchströmbare Fläche signifikant einschnürten. Die durchströmbare Spaltbreite betrug $0,3 \text{ m} \cdot (1 - \cos(30^\circ)) = \text{ca. } 4 \text{ cm}$. Bei einem Volumenstrom pro Lüfter von 1.600 m³/h ergaben sich im Spalt Geschwindigkeiten in der Größenordnung von 30 m/s und einem entsprechenden dynamischen Druck, der nach der Strömungsumlenkung nicht zurückgewonnen werden konnte und somit vollständig als Druckverlust einging.

Analog zeigen Bild 60, Bild 62 und Bild 64 für den jeweils gleichen y,z-Schnitt in der Mittelebene die auf die Eintrittskonzentration normierte Konzentrationsverteilung in der Tunnelkassette. Es ergaben sich numerisch bestimmte, reale Abbauraten von $R_{TK,real} = 4,2 \%$ für einen Volumenstrom von 1.600 m³/h, 9,5 % für 800 m³/h und 18,7 % für 400 m³/h. Erwartungsgemäß waren diese Abbauraten

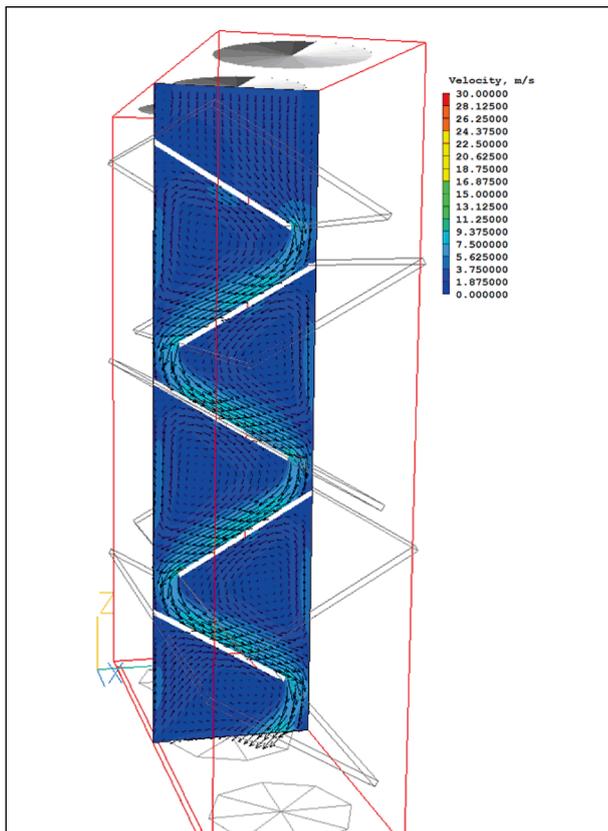


Bild 63: Geschwindigkeitsverteilung in der Tunnelkassette in der Mittelebene bei einem Volumenstrom pro Lüfter von 400 m³/h und drei Lüftern

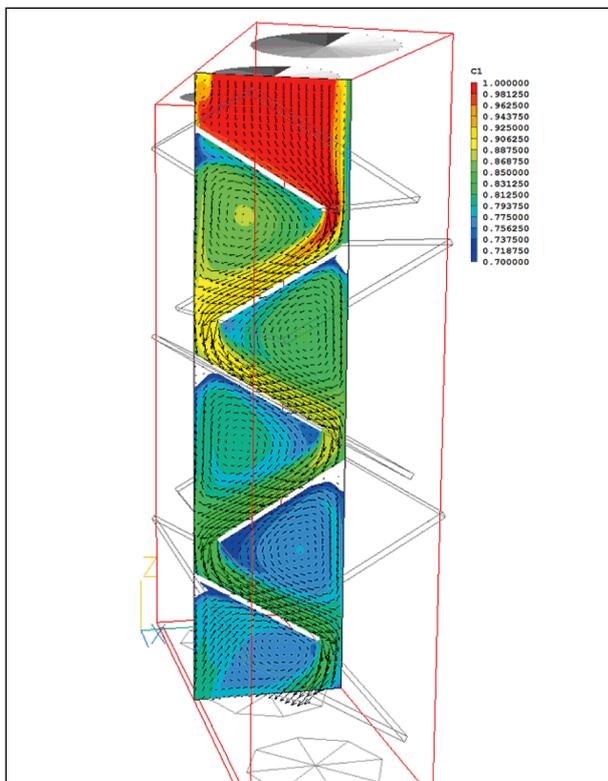


Bild 64: Auf die Eintrittskonzentration normierte Konzentrationsverteilung in der Tunnelkassette in der Mittelebene bei einem Volumenstrom pro Lüfter von 400 m³/h und drei Lüftern

Volumenstrom V_{TK}	3 x 400 m ³ /h	3 x 800 m ³ /h	3 x 1.600 m ³ /h
Reale Abbaurrate bezogen auf nicht-diffusionslimitierte Abbaurrate	82 %	79 %	68 %

Tab. 24: Verhältnis von realer Abbaurrate zur nicht-diffusionslimitierten Abbaurrate für das Basislayout der Tunnelkassette

geringer als die mit dem theoretischen Ansatz gewonnenen nicht-diffusionslimitierten Abbauraten. Grund hierfür ist, dass bei der numerischen Simulation turbulente und laminare Strömungswiderstände in die Rechnung einbezogen werden. Außerdem ist aus den Bildern der Konzentrationsverteilung zu erkennen, dass an der Blechunterseite die Konzentration jeweils geringer war als an der entsprechenden Oberseite. Dies geht einher mit geringeren Abbauraten im Vergleich zu den mit dem theoretischen Ansatz gewonnenen Abbauraten.

Das Verhältnis von realer zu theoretischer Abbaurrate für die drei betrachteten Volumenströme zeigt Tabelle 24.

Der berechnete Druckverlust in der Tunnelkassette betrug 2.352 Pa, 587 Pa bzw. 146 Pa für die Volumenströme von 1.600 m³/h, 800 m³/h bzw. 400 m³/h pro Lüfter. Es stellte sich erwartungsgemäß ein Druckverlust ein, der sich quadratisch mit der Geschwindigkeit bzw. dem Lüftervolumenstrom änderte. Bei der erforderlichen Ventilatorenantriebsleistung war zu beachten, dass diese mit der dritten Potenz der Geschwindigkeit (Lüftervolumenstrom) verknüpft ist. Das bedeutete, dass ein 4-fach geringerer Volumenstrom, d. h. 400 m³/h anstatt 1.600 m³/h pro Lüfter, zu einem 16-fach geringeren Druckverlust und einer 64-fach geringeren Leistung führte.

3.5.5 Tunnelkassettenvariante mit fünf hinterströmten Leitblechen und zusätzlichen Spoilern

Das Basislayout der Tunnelkassette wies die Eigenschaft auf, dass an der Blechunterseite die Konzentration jeweils geringer war als an der entsprechenden Oberseite. Dies ging einher mit geringeren Abbauraten im Vergleich zu den mit dem theoretischen Ansatz gewonnenen Abbauraten.

Die Konstruktion des Basislayouts konnte verbessert werden, indem die Leitbleche nicht an das Gehäuse anstießen, sondern einen gewissen Abstand hatten und so einen Luftstrom passieren ließen. Mit

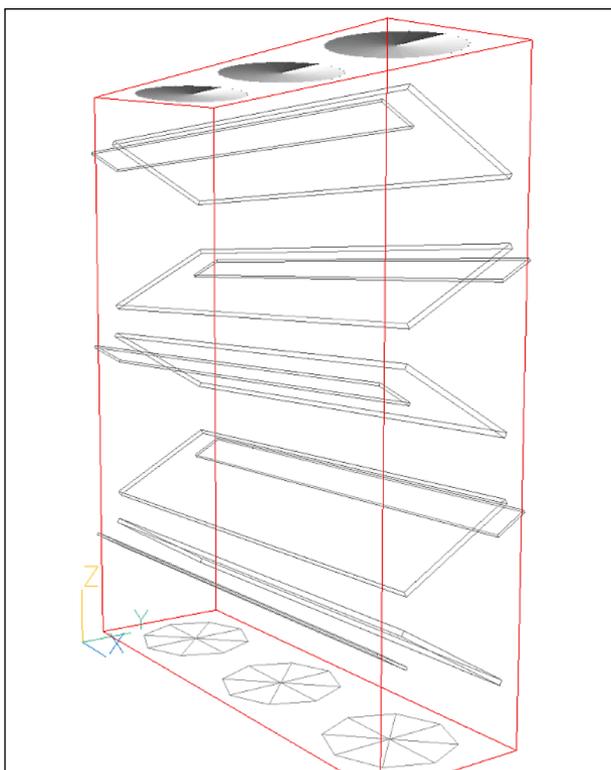


Bild 65: Tunnelkassettenvariante mit fünf um 30° geneigten Leitblechen (0,25 x 1 m²) mit Abstand zur Kassettenwand und fünf Spoilern

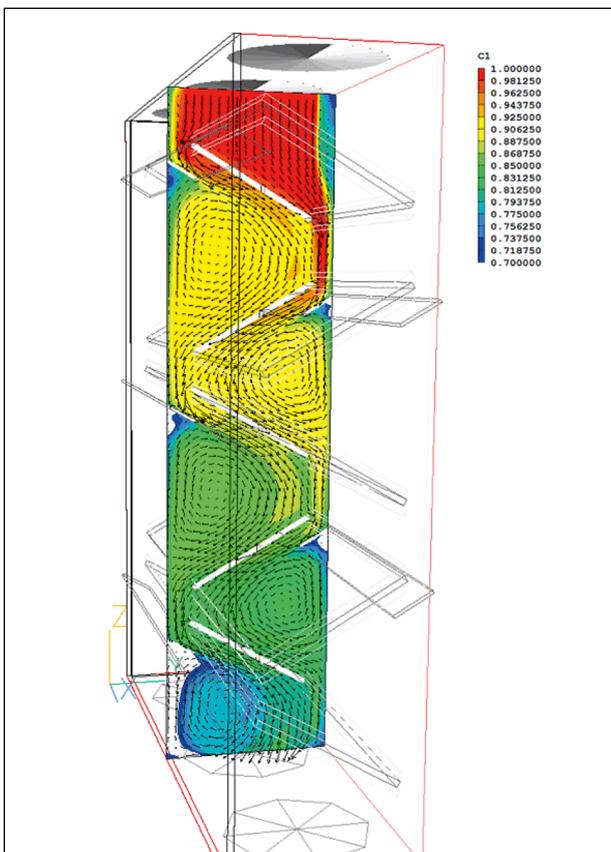


Bild 66: Auf die Eintrittskonzentration normierte Konzentrationsverteilung in der Tunnelkassettenvariante mit Spoilern in der Mittelebene bei einem Volumenstrom pro Lüfter von 400 m³/h und drei Lüftern

zusätzlich angebrachten Spoilern konnte dieser Luftstrom umgelenkt werden, sodass dieser entlang der Leitblechunterseite strömte. Das Layout dieser Tunnelkassettenvariante ist in Bild 65 gezeigt.

Diese Tunnelkassettenvariante wies ebenso fünf Bleche und zusätzlich fünf Spoiler auf, für die eine vollständige photokatalytische Beschichtung angenommen wurde. Jedes Blech hatte eine Größe von 1 x 0,25 m² und jeder Spoiler eine Größe von 1 x 0,05 m², während diese wie auch beim Basislayout gegenüber der Horizontalen um 30 ° geneigt waren. Das Verhältnis von photokatalytisch aktiver Fläche zu Innenvolumen der Tunnelkassette und die nicht-diffusionslimitierte Abbauraten wiesen dieselben Werte auf wie die des Basislayouts.

Bild 66 zeigt für einen y,z-Schnitt in der Mittelebene, d. h. für x = 0,5 m, die auf die Eintrittskonzentration normierte Konzentrationsverteilung in der Tunnelkassette für einen Volumenstrom von 400 m³/h pro Lüfter. Für diesen Fall ergab sich eine reale Abbauraten von $R_{TK,real} = 19,1\%$. Die reale Abbauraten bezogen auf die nicht-diffusionslimitierte Abbauraten betrug somit 84 % (im Vergleich zu 82 % beim Basislayout der Tunnelkassette). Gegenüber dem Basislayout der Tunnelkassette war die Abbauraten somit geringfügig höher, der Druckverlust mit 72 Pa jedoch deutlich geringer. Diese Tunnelkassettenvariante war somit dem Basislayout vorzuziehen. Bei dieser Bewertung blieben jedoch die Veränderungen der Produktionskosten zwischen dieser Tunnelkassettenvariante und dem Basislayout der Tunnelkassette unberücksichtigt.

3.5.6 Tunnelkassettenvariante mit 11 horizontalen Leitblechen

Eine weitere Tunnelkassettenvariante zeigt Bild 67. Bei dieser Tunnelkassettenvariante wurde versucht, durch eine Erhöhung der Anzahl der Leitbleche die photokatalytische Oberfläche und damit die Abbauraten zu erhöhen. Diese Tunnelkassettenvariante enthielt elf horizontal angebrachte Leitbleche mit einer Größe von je 1 x 0,20 m², sodass sich eine photokatalytische Oberfläche von 7,52 m² ergab. Die CFD-Simulation wurde für einen Volumenstrom von 3 x 400 m³/h durchgeführt.

Bild 68 zeigt für diese Variante der Tunnelkassette im y,z-Schnitt in der Mittelebene (x = 0,5 m) die auf die Eintrittskonzentration normierte Konzentrationsverteilung in der Kassette.

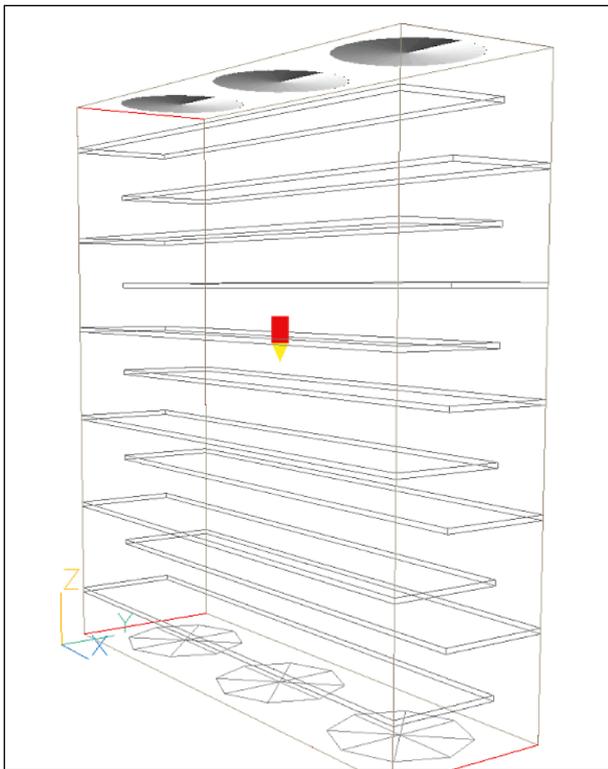


Bild 67: Variante der Tunnelkassette mit elf horizontalen Leitblechen ($1 \times 0,2 \text{ m}^2$) mit photokatalytisch aktiver Fläche von $(2 \cdot 1,2 \cdot 1 + 2 \cdot 0,3 \cdot 1,2 + 11 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 0,2) \text{ m}^2 = 7,52 \text{ m}^2$

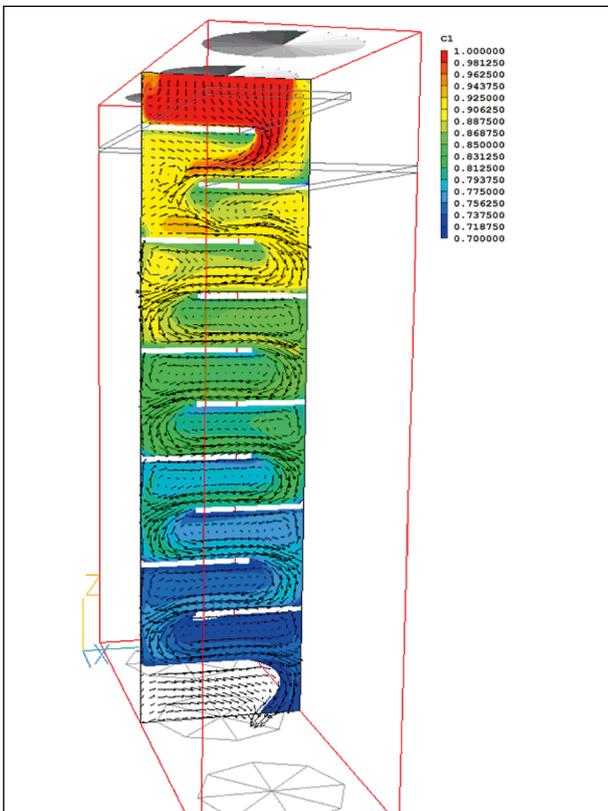


Bild 68: Auf die Eintrittskonzentration normierte Konzentrationsverteilung in der Tunnelkassettenvariante mit elf horizontalen Leitblechen in der Mittelebene bei einem Volumenstrom pro Lüfter von $400 \text{ m}^3/\text{h}$ und drei Lüftern

	Basislayout	Tunnelkassettenvariante mit elf Leitblechen
Verhältnis von photokatalytischer Oberfläche zu Tunnelkassettenvolumen	17 m^{-1}	21 m^{-1}
Nicht-diffusionslimitierte Abbaurrate (bei einer photokatalytischen Depositionsgeschwindigkeit von $1,4 \text{ cm/s}$)	23 %	27 %
Theoretischer Wirkungsgrad (bei einer photokatalytischen Depositionsgeschwindigkeit von $1,4 \text{ cm/s}$)	88%	86%
Reale Abbaurrate bezogen auf nicht-diffusionslimitierte Abbaurrate	82%	98%
Druckverlust	126 Pa	512 Pa

Tab. 25: Charakteristische Größen für die Tunnelkassettenvariante mit elf Leitblechen für einen Volumenstrom von $3 \times 400 \text{ m}^3/\text{h}$

Tabelle 25 gibt für diese Tunnelkassettenvariante mit elf Leitblechen die folgenden charakteristischen Größen an:

- Verhältnis von photokatalytischer Oberfläche zu Tunnelkassettenvolumen,
- nicht-diffusionslimitierte Abbaurrate,
- theoretischer Wirkungsgrad,
- Verhältnis von realer Abbaurrate zur nicht-diffusionslimitierten Abbaurrate und den
- Druckverlust.

Zum Vergleich sind in dieser Tabelle auch die entsprechenden Werte für das Basislayout der Tunnelkassette angegeben. Es fiel auf, dass bei dieser Tunnelkassettenvariante die reale Abbaurrate bezogen auf die nicht-diffusionslimitierte Abbaurrate nahe 100 % war. Somit wurde der photokatalytische Abbauprozess bei dieser Tunnelkassettenvariante nicht durch den stromseitigen turbulenten und laminaren Transportwiderstand begrenzt. Der Preis für diese gute Durchmischung und Verwirbelung der Luft in der Tunnelkassette war jedoch der hohe Druckverlust im Vergleich zum Basislayout der Tunnelkassette.

3.5.7 Tunnelkassette mit photokatalytischen Oberflächen in Wabenstruktur

Ein weiterer Ansatz die photokatalytische Oberfläche in der Tunnelkassette zu erhöhen, bestand darin, in der Tunnelkassette nicht nur Leitbleche zu verbauen, deren Oberfläche sich aus dem Produkt von Länge und Breite der Bleche ergab. Ist die

Oberfläche aus geometrischen Strukturen aufgebaut, so ist die photokatalytische Oberfläche bezogen auf die Grundfläche größer. Als geometrische Struktur bot sich eine Wabenstruktur an, wie sie beispielsweise in Form von Paddock-Platten als Bodenbelag in der Pferdehaltung verwendet werden (vgl. Bild 69).



Bild 69: Paddock-Platten als Trägermaterial für photokatalytisches Material [Quelle: <http://www.recyclingprodukte.de/paddockplatten.html>]

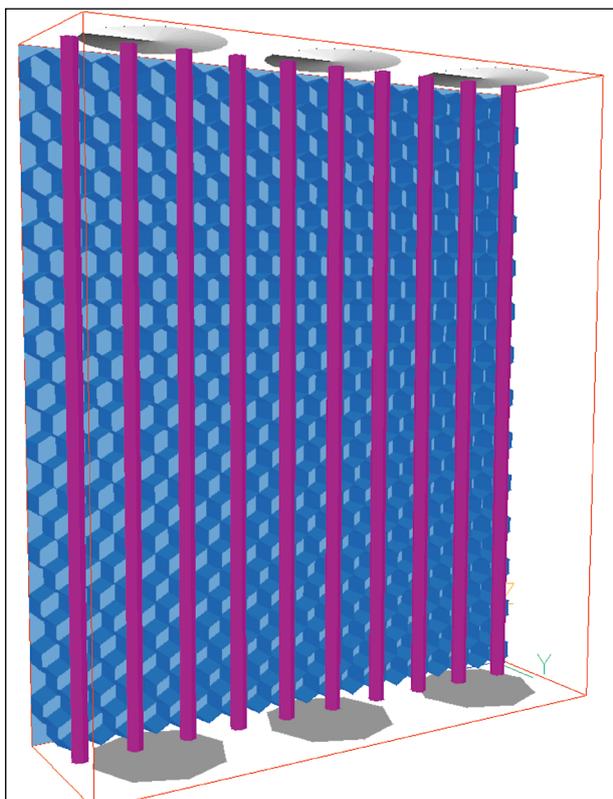


Bild 70: Variante der Tunnelkassette mit photokatalytischen Oberflächen in Wabenstruktur mit nur einer der vier Strukturplatten (Strukturplatten: blau; UV-Lampen: violett)

Für die Tunnelkassettensvariante mit photokatalytischen Oberflächen in Wabenstruktur wurden vier vertikal angebrachte Strukturplatten angesetzt (vgl. Bild 70). Jede dieser Strukturplatten hatte eine Größe von $1 \times 1,20 \text{ m}^2$ und eine Höhe von 6 cm. Die Oberfläche einer Strukturplatte (ohne Rückseite) betrug $6,72 \text{ m}^2$ und war somit um den Faktor 5,6 größer als die geometrische Grundfläche von $1 \times 1,2 \text{ m}^2 = 1,2 \text{ m}^2$. Die mittleren zwei Strukturplatten standen Rücken an Rücken in der Kassette, sodass sich luftseitig zwei durchströmbare, gerade Strömungskanäle mit einer freien Querschnittsfläche von $1 \times 0,06 \text{ m}^2$ ergaben. In diesen geraden Strömungskanälen wurden die UV-Lampen vorgesehen.

Die CFD-Simulation wurde für einen Volumenstrom von $3 \times 400 \text{ m}^3/\text{h}$ durchgeführt. Bild 70 zeigt die Variante der Tunnelkassette mit photokatalytischen Oberflächen in Wabenstruktur. Aus Gründen der Übersichtlichkeit ist auf dem Bild nur eine von vier Strukturplatten mit Wabenstruktur dargestellt. Zudem war es aus Symmetriegründen ausreichend, nur ein Viertel der Tunnelkassette zu modellieren.

Bild 71 zeigt für einen y,z-Schnitt die auf die Eintrittskonzentration normierte Konzentrationsverteilung in der Tunnelkassette. Im Gegensatz zu den bisher gezeigten Bildern verläuft die Strömungsrichtung auf diesem Bild von links nach rechts. Tabelle 26 gibt für diese Tunnelkassettensvariante mit Wabenstruktur analog zu Tabelle 25 entsprechende charakteristische Größen an.

Aus Bild 71 ist zu erkennen, dass bei dieser Konzeption der Tunnelkassette die Wabentaschen nicht ausreichend mit schadstoffbeladener Luft versorgt wurden. Es bildeten sich zwar Wirbel aus, die in die Wabentaschen eingriffen, die Wirbelintensität war jedoch zu gering. Dies hatte zur Folge, dass der

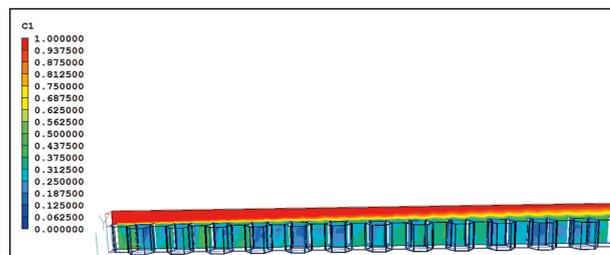


Bild 71: Auf die Eintrittskonzentration normierte Konzentrationsverteilung in der Tunnelkassettensvariante mit photokatalytischen Oberflächen in Wabenstruktur bei einem Volumenstrom pro Lüfter von $400 \text{ m}^3/\text{h}$ und drei Lüftern (dargestellt ist nur ein Viertel der Tunnelkassette; Strömungsrichtung von links nach rechts)

	Basislayout	Tunnelkassettenvariante mit photokatalytischer Oberfläche in Wabenstruktur
Verhältnis von photokatalytischer Oberfläche zu Tunnelkassettenvolumen	17 m ⁻¹	62 m ⁻¹
Nicht-diffusionslimitierte Abbaurrate (bei einer photokatalytischen Depositionsgeschwindigkeit von 1,4 cm/s)	23 %	68 %
Theoretischer Wirkungsgrad (bei einer photokatalytischen Depositionsgeschwindigkeit von 1,4 cm/s)	88 %	60 %
Reale Abbaurrate bezogen auf nicht-diffusionslimitierte Abbaurrate	82 %	34 %
Druckverlust	126 Pa	46 Pa

Tab. 26: Charakteristische Größen für die Tunnelkassettenvariante mit photokatalytischen Oberflächen in Wabenstruktur für einen Volumenstrom von 3 x 400 m³/h

Prozess stark diffusionskontrolliert war. Die reale Abbaurrate bezogen auf nicht-diffusionslimitierte Abbaurrate betrug dementsprechend nur 34 % (vgl. Tabelle 26).

Das Verhältnis von photokatalytischer Oberfläche zu Kassettenvolumen war bei dieser Variante mit 62 m⁻¹ deutlich größer als das der bisherigen Varianten. Der Vorteil der großen Oberfläche konnte bei dieser Konstruktion jedoch nicht ausgenutzt werden. Im Vergleich zum Basislayout der Tunnelkassette war jedoch der Druckverlust gering, was darauf zurückzuführen war, dass nur gerade Strömungskanäle durchströmt werden müssten.

3.5.8 Tunnelkassette mit photokatalytisch beschichteten röhrenförmigen Netzen

Weiterhin wurde eine Tunnelkassettenvariante mit photokatalytisch beschichteten röhrenförmigen Netzen betrachtet, die bereits im Prototypreaktor 2 untersucht wurden (vgl. Kapitel 3.4.2). Da jedoch die Leistungsfähigkeit dieser Netze im Vergleich zu den Schaummatten geringer war, wurde im Rahmen dieser Simulationen nicht tiefergehend auf die Variante der röhrenförmigen Netze eingegangen. Dennoch sollen die Ergebnisse der durchgeführten Si-

	Variante mit photokatalytischer Oberfläche auf röhrenförmigen Netzen
Verhältnis von photokatalytischer Oberfläche zu Tunnelkassettenvolumen	44 m ⁻¹
Nicht-diffusionslimitierte Abbaurrate (bei einer photokatalytischen Depositionsgeschwindigkeit von 1,4 cm/s)	99 %
Theoretischer Wirkungsgrad (bei einer photokatalytischen Depositionsgeschwindigkeit von 1,4 cm/s)	10 %
Reale Abbaurrate bezogen auf nicht-diffusionslimitierte Abbaurrate	97 %

Tab. 27: Charakteristische Größen für die Tunnelkassettenvariante mit photokatalytischen Oberflächen auf röhrenförmigen Netzen für einen Volumenstrom von 30 m³/h

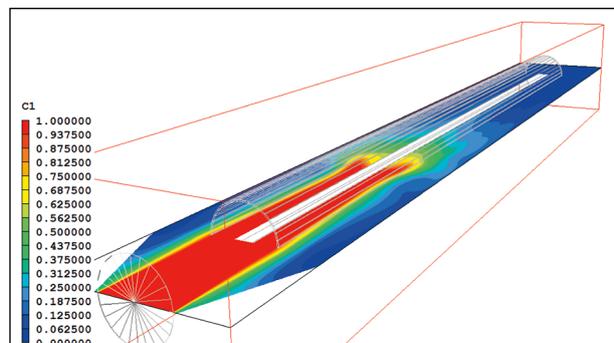


Bild 72: Auf die Eintrittskonzentration normierte Konzentrationsverteilung in der Tunnelkassettenvariante mit photokatalytisch beschichteten röhrenförmigen Netzen bei einem Volumenstrom pro Lüfter von 30 m³/h (Strömungsrichtung von links vorne nach rechts hinten)

mulationen der Vollständigkeit kurz vorgestellt werden.

Diese Ergebnisse sind nicht direkt vergleichbar mit den Ergebnissen für die anderen Tunnelkassettenvarianten, da die Berechnungen und Simulationen für diese Tunnelkassettenvariante mit photokatalytisch beschichteten röhrenförmigen Netzen mit einem Volumenstrom von 30 m³/h durchgeführt wurden. Dieser Volumenstrom war der zu Beginn eingestellte Volumenstrom im Prototypreaktor. Analog zum Aufbau des Prototypreaktors wurden für die Tunnelkassette Innenmaße von 0,3 x 0,3 x 1,5 m³ angesetzt (vgl. Bild 41 und Bild 43). Bei dieser Variante betrug das Innenvolumen somit 0,135 m³ und die photokatalytische Oberfläche 6 m².

Für diese Reaktorvariante gibt Tabelle 27 die entsprechenden charakteristischen Größen an. Wegen des für diese Tunnelkassettenvariante verwendeten Volumenstroms von 30 m³/h sind die Ergebnisse je-

doch nur bedingt mit denen der anderen Tunnelkassettenvarianten vergleichbar.

Aus der nicht-diffusionslimitierten Abbaurate von 99 % und dem theoretischen Wirkungsgrad von nur 10 % konnte geschlossen werden, dass der Volumenstrom für diese Konstruktion zu niedrig war.

Bei dieser Tunnelkassettenvariante war zudem auffällig, dass die auf die nicht-diffusionslimitierte Abbaurate bezogene reale Abbaurate mit 97 % sehr nahe an 100 % war. Dies bedeutete, dass im Gegensatz zu der Tunnelkassettenvariante mit photokatalytischen Oberflächen in Wabenstruktur ausreichend turbulenter Transport vorhanden und die Leistungsfähigkeit dieser Tunnelkassettenvariante nicht durch die Diffusion limitiert war.

Bild 72 zeigt für einen y,z-Schnitt die auf die Eintrittskonzentration normierte Konzentrationsverteilung in der Tunnelkassette, wobei die Strömungsrichtung von links vorne nach rechts hinten verläuft.

In diesem Bild ist zu erkennen, dass bei einem Volumenstrom von 30 m³/h ab der Hälfte des Reaktors und in Wandnähe die Konzentrationen sehr gering waren. Ab der zweiten Hälfte des Reaktors und in Wandnähe wurden dem photokatalytischen Material keine Stickoxide für den photokatalytischen Abbau mehr angeboten. Diese Bereiche waren somit unterversorgt. Die Leistungsfähigkeit und somit der theoretische Wirkungsgrad könnte mit zunehmenden Volumenstrom höher sein. Da diese Reaktorvariante jedoch grundsätzlich der Variante mit den beschichteten Schaumplatten unterlegen war, wurde an dieser Stelle auf weitere Simulationen mit höheren Volumenströmen verzichtet.

3.5.9 Tunnelkassette mit beschichteten Schaumplatten

Mithilfe des Prototyps 3 konnte bereits gezeigt werden, dass eine Tunnelkassette mit beschichteten Schaumplatten ein vielversprechender Ansatz für einen wirkungsvollen photokatalytischen Ansatz war (vgl. Kapitel 3.3.11 und 3.4.2). Die Schaumplatten boten eine sehr große aktive Oberfläche, wobei sich für eine Schaumplatte mit 10 ppi und einer Dicke von 30 mm ein Verhältnis von Oberfläche zu geometrischer Fläche von 7 ergibt.

Zur Bewertung einer Tunnelkassette mit diesen Schaumplatten wurde wiederum eine CFD-Simulation durchgeführt. Für die Abmessungen dieser

Tunnelkassette wurde wiederum das Basislayout herangezogen, wobei ein Volumenstrom von 3 x 400 m³/h angesetzt wurde. Bild 73 zeigt den allgemeinen Aufbau dieser Variante, die zehn beschichtete Schaumplatten enthielt. Zwischen zwei Schaumplatten wurden jeweils drei UV-Lampen angeordnet.

Bild 74 zeigt für einen y,z-Schnitt die auf die Eintrittskonzentration normierte Konzentrationsverteilung in dieser Tunnelkassette.

Das Filterschaummaterial hatte aus strömungstechnischer Sicht den Vorteil, dass dies als Strömungsgleichrichter bzw. Strömungshomogenisierer wirkt. Lokale Über- bzw. Untergeschwindigkeiten werden abgebaut und die Strömung somit homogenisiert. Damit war gewährleistet, dass das photokatalytische Material gleichmäßig mit schadstoffbeladener Luft durchströmt wurde und sich keine Windschattenbereiche ausbildeten, die die photokatalytisch aktive Fläche quasi reduzierten, da kein Nachschub mit schadstoffbeladener Luft erfolgte.

Der für diese Schaumplatte aus dem Herstellerdatenblatt abgeleitete Druckverlustkoeffizient betrug 8,7. Bei der Erarbeitung geeigneter photokatalytischer Materialien wurden die Schaumplatten zur Reduzierung der Strömungswiderstände gelocht, was in Kapitel 3.3.11 beschrieben ist. Nach den durchgeführten Simulationen waren solche Lochungen jedoch nicht zu empfehlen. Die Strömung erfolgte dann zwar nach dem Prinzip des kleinsten Zwanges vermehrt durch die Löcher, in anderen Bereichen bildeten sich aber Windschattenbereiche aus.

Zur weiteren Bewertung dieser Tunnelkassettenvariante sind in Tabelle 28 wiederum verschiedene charakteristische Größen zusammengefasst.

Bei einem Volumenstrom von 3 x 400 m³/h betrug die nicht-diffusionslimitierte Abbaurate 77 % und der theoretische Wirkungsgrad 52 %. Hieraus konnte abgeleitet werden, dass man diese Tunnelkassettenvariante mit einem höheren Volumenstrom betreiben sollte. Wie bereits oben vorgeschlagen, sollte der Volumenstrom in einer Tunnelkassette so ausgewählt werden, dass sich ein theoretischer Wirkungsgrad von ca. 90 % einstellt.

Aus Tabelle 28 ist zudem zu entnehmen, dass bei dieser Tunnelkassettenvariante der Druckverlust sehr gering und das Verhältnis von photokatalytischer Oberfläche zu Tunnelkassettenvolumen sehr

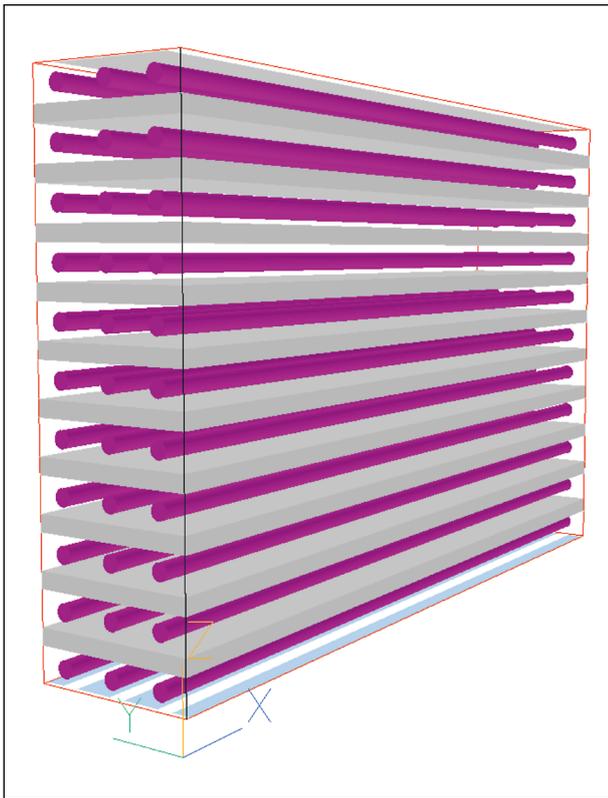


Bild 73: Variante der Tunnelkassette mit zehn beschichteten Schaummaten (Schaummaten: grau; UV-Lampen: violett)

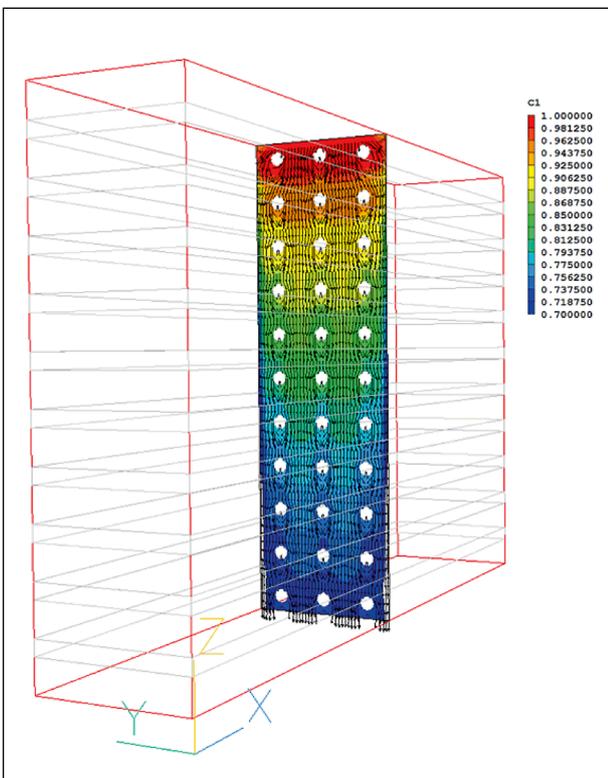


Bild 74: Auf die Eintrittskonzentration normierte Konzentrationsverteilung in der Tunnelkassettenvariante mit zehn beschichteten Filterschaummaten in der Mittelebene bei einem Volumenstrom pro Lüfter von 400 m³/h und drei Lüftern

	Basislayout	Variante mit photokatalytischer Oberfläche auf Filterschaummaten
Verhältnis von photokatalytischer Oberfläche zu Tunnelkassettenvolumen	17 m ⁻¹	78 m ⁻¹
Nicht-diffusionslimitierte Abbaurrate (bei einer photokatalytischen Depositionsgeschwindigkeit von 1,4 cm/s)	23 %	77 %
Theoretischer Wirkungsgrad (bei einer photokatalytischen Depositionsgeschwindigkeit von 1,4 cm/s)	88 %	52 %
Reale Abbaurrate bezogen auf nicht-diffusionslimitierte Abbaurrate	82 %	98 %
Druckverlust	126 Pa	33 Pa

Tab. 28: Charakteristische Größen für die Tunnelkassettenvariante mit photokatalytischen Oberflächen auf Schaummaten für einen Volumenstrom von 3 x 400 m³/h

hoch war. Weiterhin zeigte sich, dass sich bei dieser Tunnelkassettenvariante eine reale Abbaurrate bezogen auf die nicht-diffusionslimitierte Abbaurrate nahe 100 % einstellte. Somit wurde der photokatalytische Abbauprozess in dieser Tunnelkassettenvariante nicht durch den strömungsseitigen turbulenten und laminaren Transportwiderstand begrenzt.

Vergleicht man alle in diesem Projekt untersuchten Tunnelkassettenvarianten, so ist dieser Tunnelkassettenvariante mit den Schaummaten der Vorzug zu geben.

3.6 Simulation der dreidimensionalen Strömung und der Ausbreitung von Stickoxiden im Tunnel mit photokatalytischen Tunnelkassetten

3.6.1 Theoretische Abschätzung der notwendigen Anzahl von Tunnelkassetten

Die notwendige Anzahl der Tunnelkassetten, die erforderlich war, um eine vorgegebene prozentuale Reduktion der Stickoxidkonzentration zu bewirken, konnte analytisch abgeschätzt werden. Für diese analytische Lösung wurde angenommen, dass im Tunnel Konzentrationsgradienten quer zur Tunnelachse vernachlässigbar klein sind. Mit dieser An-

nahme war die mittlere Konzentration c in einem Tunnelquerschnitt nur eine Funktion von der Position des Tunnelquerschnitts, die durch die Koordinate x beschrieben wurde.

Weiter wurde angenommen, dass sowohl die fahrzeugbedingte Emission im Tunnel als auch der Lüftungsvolumenstrom konstant war und somit die mittlere Konzentration im Bereich des Tunnels ohne Tunnelkassetten linear mit der Koordinate x zunahm. Im Bereich des Tunnels mit Tunnelkassetten ergab sich zum einen eine Zunahme der Konzentration bedingt durch die fahrzeugbedingten Emissionen, während zum anderen aber eine Abnahme durch den Konzentrationsabbau in den Tunnelkassetten erfolgte.

Im Bereich der Tunnelkassetten konnte die Änderung der mittleren Konzentration im Tunnel durch folgende inhomogene Differentialgleichung erster Ordnung beschrieben werden:

$$\dot{V}_T \cdot \frac{dc}{dx} = q_E - q_{TK} \quad \text{Gl. 12}$$

mit:

- \dot{V}_T Tunnellüftungsvolumenstrom [m^3/s]
- q_E Fahrzeugbedingte Emission im Tunnel [$\mu\text{g}/(\text{m s})$]
- q_{TK} Photokatalytischer Stickoxidabbau durch die Tunnelkassetten [$\mu\text{g}/(\text{m s})$]

Der photokatalytische Stickoxidabbau durch die Tunnelkassetten q_{TK} ließ sich bestimmen aus dem photokatalytischen Stickoxidabbau bedingt durch eine Tunnelkassette und der Anzahl der Tunnelkassetten bezogen auf den Streckenbereich im Tunnel, in dem die Tunnelkassetten aufgestellt werden sollten:

$$q_{TK} = R_{TK} \cdot \dot{V}_{TK} \cdot c(x) \cdot \frac{N_{TK}}{L_{TK}} = k_T \cdot c(x) \quad \text{Gl. 13}$$

mit:

- $k_T = R_{TK} \cdot \dot{V}_{TK} \cdot \frac{N_{TK}}{L_{TK}}$
- \dot{V}_{TK} Volumenstrom durch eine Tunnelkassette [m^3/s]
- R_{TK} Stickoxidabbaurate in einer Tunnelkassette [-]

N_{TK} Anzahl der Tunnelkassetten [-]

L_{TK} Streckenbereich im Tunnel mit Tunnelkassetten [m]

Die Lösung der inhomogenen Differentialgleichung erster Ordnung lautete:

$$c(x) = \left(c(x=0) - \frac{q_E}{k_T} \right) \cdot e^{-\frac{k_T}{\dot{V}_T} x} + \frac{q_E}{k_T} \quad \text{Gl. 14}$$

bzw.

$$c(x) = c(x=0) \cdot e^{-\frac{k_T}{\dot{V}_T} x} + \left(1 - e^{-\frac{k_T}{\dot{V}_T} x} \right) \cdot \frac{q_E}{k_T}$$

In der Gleichung lag der Nullpunkt der x -Koordinate, d. h. $x = 0$, nicht am Tunneleingang, sondern am Beginn des Streckenbereiches im Tunnel mit den Tunnelkassetten. Der Streckenbereich im Tunnel mit den Tunnelkassetten wurde so gelegt, dass das Ende des Streckenbereiches mit den Tunnelkassetten mit dem Ende des Tunnels zusammenfiel, d. h. das Ende des Tunnels befand sich bei $x = L_{TK}$. Die fahrzeugbedingte Emission im Tunnel und die Konzentration im Tunnel an der Stelle $x = L_{TK}$ konnten als Funktion der Stickoxidkonzentration am Tunneleingang c_{ein} und der Stickoxidkonzentration an der Ausfahrt des Tunnels bei nicht in Betrieb befindlichen Tunnelkassetten $c_{\text{aus,ohne TK}}$ ausgedrückt werden:

$$q_E = \frac{\dot{V}_T}{L_T} (c_{\text{aus,ohne TK}} - c_{\text{ein}}) \quad \text{Gl. 15}$$

und

$$c(x=0) = \frac{L_T - L_{TK}}{L_T} \cdot c_{\text{aus,ohne TK}} + \frac{L_{TK}}{L_T} \cdot c_{\text{ein}}$$

Eingesetzt in obige Gleichung für den Konzentrationsverlauf ergab sich:

$$c(x) = \left(\frac{L_T - L_{TK}}{L_T} \cdot c_{\text{aus,ohne TK}} + \frac{L_{TK}}{L_T} \cdot c_{\text{ein}} \right) \cdot e^{-\frac{k_T}{\dot{V}_T} x} + \left(1 - e^{-\frac{k_T}{\dot{V}_T} x} \right) \cdot \frac{\dot{V}_T}{k_T L_T} \cdot (c_{\text{aus,ohne TK}} - c_{\text{ein}}) \quad \text{Gl. 16}$$

Für die Bestimmung der Anzahl der Tunnelkassetten war das Verhältnis der Konzentration am Tunnelausgang bei in Betrieb befindlichen Tunnelkassetten $c_{\text{aus,mit TK}}$ zu der Konzentration bei nicht in Betrieb befindlichen Tunnelkassetten $c_{\text{aus,ohne TK}}$ relevant. Die prozentuale Minderung der Konzentration am Tunnelausgang bedingt durch die Tunnelkassetten betrug somit mit diesen beiden Variablen:

$$R_T = \frac{c_{\text{aus,ohne TK}} - c_{\text{aus,mit TK}}}{c_{\text{aus,ohne TK}}} = 1 - \frac{c_{\text{aus,mit TK}}}{c_{\text{aus,ohne TK}}} \quad \text{Gl. 17}$$

Anschließend wurde die Gleichung für den Konzentrationsverlauf in die Beziehung für R_T eingesetzt und an der Stelle $x = L_{TK}$, d. h. dem Tunnelausgang, ausgewertet, ergab sich:

$$R_T = 1 - \frac{1}{c_{\text{aus,ohne TK}}} \left(\frac{L_T - L_{TK}}{L_T} \cdot c_{\text{aus,ohne TK}} + \frac{L_{TK}}{L_T} \cdot c_{\text{ein}} \right) \cdot e^{-\frac{k_T}{V_T} x} + \left(1 - e^{-\frac{k_T}{V_T} x} \right) \cdot \frac{\dot{V}_T}{k_T L_T} \cdot (c_{\text{aus,ohne TK}} - c_{\text{ein}}) \quad \text{Gl. 18}$$

bzw.

$$R_T = 1 - \left(\frac{L_T - L_{TK}}{L_T} + \frac{L_{TK}}{L_T} \cdot \frac{c_{\text{ein}}}{c_{\text{aus,ohne TK}}} \right) \cdot e^{-\frac{k_T}{V_T} x} + \left(1 - e^{-\frac{k_T}{V_T} x} \right) \cdot \frac{\dot{V}_T}{k_T L_T} \cdot \left(1 - \frac{c_{\text{ein}}}{c_{\text{aus,ohne TK}}} \right)$$

Es sei angemerkt, dass für die Herleitung dieser Gleichung nur angenommen wurde, dass im Tunnel Konzentrationsgradienten quer zur Tunnelachse vernachlässigbar klein waren. Trifft diese Annahme zu, so ist die Gleichung exakt und musste mit einer CFD-Simulation nicht nachgewiesen werden. Mithilfe der CFD-Simulationen war lediglich zu zeigen, dass diese Annahme vernachlässigbar kleiner Konzentrationsgradienten quer zur Tunnelachse gerechtfertigt war.

In der Gleichung war der Quotient $c_{\text{ein}}/c_{\text{aus,ohne TK}}$ klein gegenüber 1 und konnte daher vernachlässigt werden. Somit ergab sich die endgültige Beziehung zur Bestimmung der prozentualen Minderung der Konzentration am Tunnelaustritt durch die Tunnelkassetten zu:

$$R_T = 1 - \frac{L_T - L_{TK}}{L_T} \cdot e^{-\frac{k_T}{V_T} x} - \left(1 - e^{-\frac{k_T}{V_T} x} \right) \cdot \frac{\dot{V}_T}{k_T L_T} \quad \text{Gl. 19}$$

3.6.2 Abschätzung der Tunnelluftgeschwindigkeit

Eine wesentliche Größe zur Abschätzung der erforderlichen Kassettenanzahl zur Reduzierung einer definierten Stickoxidkonzentration war die Längsströmungsgeschwindigkeit bzw. Luftgeschwindigkeit im Tunnel. Wird ein Tunnel im sogenannten Richtungsverkehr betrieben, d. h. alle Fahrzeuge in einer Tunnelröhre fahren in eine Richtung, so wird durch die Kolbenwirkung der Fahrzeuge eine Luftströmung erzeugt. Der Zusammenhang zwischen Tunnelluftgeschwindigkeit, Verkehrsdichte und Fahrzeuggeschwindigkeit ist von vielen Autoren beschrieben worden (z. B. [20–23]). Die Luftgeschwin-

digkeit, die sich bei Richtungsverkehr in einer Tunnelröhre infolge der Kolbenwirkung einer Fahrzeugkolonne einstellt (Selbstlüftungseffekt), lässt sich mit einer Berechnungsformel für die fahrzeug-induzierte Längsströmung in einer Tunnelröhre mit konstantem Querschnitt bestimmen [20,22].

Nach HERZKE (1972) [20] und aktuelleren Fahrzeugkennwerten nach ASTRA (2008) [24] stellte sich auch für den Tunnel Rudower Höhe bei den zu erwartenden Fahrzeuggeschwindigkeiten von 80 km/h und einem Verkehrsaufkommen von 100.000 Fahrzeugen pro Tag, d. h. pro Tunnelröhre ca. 50.000 Fahrzeugen pro Tag, eine Längsströmungsgeschwindigkeit von 5,6 m/s ein. Die Abhängigkeit der Längsströmungsgeschwindigkeit von der Fahrgeschwindigkeit zeigt Bild 75.

Für eine Fahrzeuggeschwindigkeit von 80 km/h zeigt Bild 76 die nach HERZKE (1972) für den Tunnel Rudower Höhe berechnete Längsströmungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom durchschnittlichen täglichen Verkehr (DTV). Bei einem DTV von 50.000 Fahrzeugen pro Tag (d. h. 25.000 Fahrzeu-

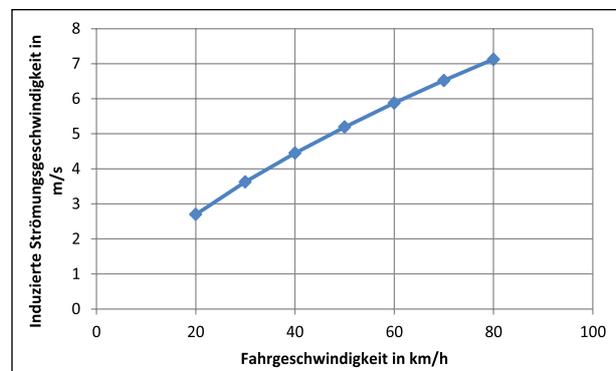


Bild 75: Induzierte Längsströmungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit für den Tunnel Rudower Höhe in Berlin

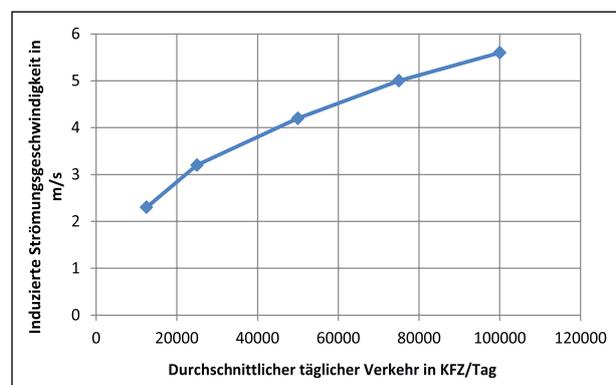


Bild 76: Induzierte Längsströmungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom durchschnittlichen täglichen Verkehrs (DTV) bei einer Fahrgeschwindigkeit von 80 km/h für den Tunnel Rudower Höhe in Berlin

ge pro Tag und Tunnelröhre) betrug die Längsströmungsgeschwindigkeit 4,2 m/s.

Die notwendige Anzahl der Tunnelkassetten für eine angesetzte prozentuale Minderung der Tunnelaustrittskonzentration war in erster Näherung proportional zu der Längsströmungsgeschwindigkeit im Tunnel. Daher war für eine genaue Bestimmung der Anzahl der Tunnelkassetten der exakte Wert der Längsströmungsgeschwindigkeit im Tunnel erforderlich. Es wurde daher empfohlen, den theoretisch nach HERZKE (1972) bestimmten Wert für die Tunnelluftgeschwindigkeit messtechnisch zu verifizieren.

3.6.3 CFD-Simulation der Konzentrationsverteilung im Tunnel

Die CFD-Simulation der Konzentrationsverteilung im Tunnel diente dem Nachweis, dass die Konzentrationsgradienten quer zur Tunnelachse klein sind. Messtechnisch ist das bereits z. B. nach GALLUS et al. (2015) [25] belegt.

Mit der CFD-Software PHOENICS wurden für den Tunnel Rudower Höhe instationäre Simulationen durchgeführt. Diese Simulationsart bildete den Prozess im Tunnel genau nach. In der Simulation bewegten sich die Fahrzeuge im Tunnel mit einer vorgegebenen Geschwindigkeit. Die hiermit induzierten Wirbelstrukturen vor und nach dem Fahrzeug wurden aufgelöst und die Auspuffemissionen jedes Fahrzeuges einzeln betrachtet.

Da die Simulationen sehr rechenzeitintensiv sind, wurde nur eine Sequenz von 30 s simuliert. Der Zeitschritt betrug 0,05 s. D. h. für die Simulation der 30 s-Sequenz wurden 600 Zeitschritte benötigt. Das Rechengitter bestand aus 1800 x 60 x 24 Gitterpunkten.

Zu Beginn der Simulation befanden sich vier Lkw und vier Pkw auf dem rechten Fahrstreifen sowie jeweils acht Pkw auf dem mittleren und auf dem linken Streifen. Für die Simulation waren somit 24 Fahrzeuge im Tunnel. Grundsätzlich konnten nur Fahrzeuge betrachtet werden, die sich zu Beginn der Simulation im Rechengebiet, d. h. im Tunnel, befanden. Dies bedeutete, dass bei der Simulation keine weiteren Fahrzeuge durch den Tunnel fuhren. Nachdem die 24 Fahrzeuge den Tunnel verlassen hatten, befanden sich demnach keine weiteren Fahrzeuge und auch keine weiteren Emissionsquellen mehr im Tunnel.

Für die Fahrzeuge auf dem rechten Streifen wurde eine Geschwindigkeit von 80 km/h, für die auf dem mittleren 85 km/h und für die auf dem linken Streifen 90 km/h angesetzt. Zu Beginn der Simulation war die Konzentration der Stickoxide im Tunnel null. Das Modell des Tunnels Rudower Höhe mit den 24 Fahrzeugen zeigt Bild 77.

Als Beispiele für die zeitabhängige Verteilung der Geschwindigkeit im Tunnel zeigen Bild 78 und Bild 79 die entsprechende Verteilung nach 27 und nach 29 s in einer horizontalen Schnittebene und sechs vertikalen Schnittebenen mit einem Abstand von 50 m. Die erste vertikale Schnittebene befindet sich 50 m vom Ende des Tunnels entfernt. Zum Zeitpunkt nach 29 Sekunden befanden sich auf dem mittleren und auf dem linken Streifen jeweils ein Pkw (vgl. Bild 79). Deutlich zu erkennen ist, dass jedes Fahrzeug hinter sich eine Luftschleppe herzieht, die zuerst gerade ist, jedoch später instabil wird und in Einzelwirbel zerfällt. Dieser Sachverhalt ist in Bild 78 deutlich zu erkennen. Zu diesem Zeitpunkt befanden sich keine Fahrzeuge in den letzten 50 Metern des Tunnels. In diesem Bereich war die von den Fahrzeugen induzierte Luftschleppe bereits stark wellenartig deformiert und in periodische Strömungsmuster zerfallen, die den gesamten Tunnelquerschnitt ausfüllten.

Die in Bild 78 und Bild 79 zu erkennenden Wirbelstrukturen bewirkten einen intensiven Schadstofftransport vom Ort der Schadstoffquelle (Auspuff) quer zur Tunnelachse. Dies wird in der 80 und Bild 81 verdeutlicht. Der Bereich der von den Fahrzeugen induzierten Luftschleppe, der stark wellenartig deformiert und in periodische Strömungsmuster zerfallen war, bewirkte eine ebenso wellenartig deformierte Schadstofffahne, die periodisch bis zu den Tunnelwänden reichte. Einen ebenso intensiven Vermischungsmechanismus stellten die fahrenden

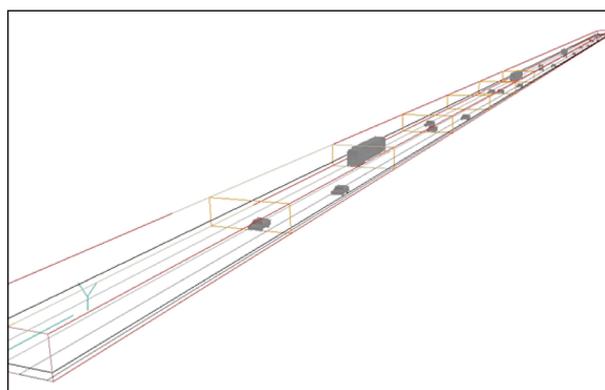


Bild 77: Modell für die CFD-Software PHOENICS des Tunnels Rudower Höhe mit 24 Fahrzeugen im Tunnel

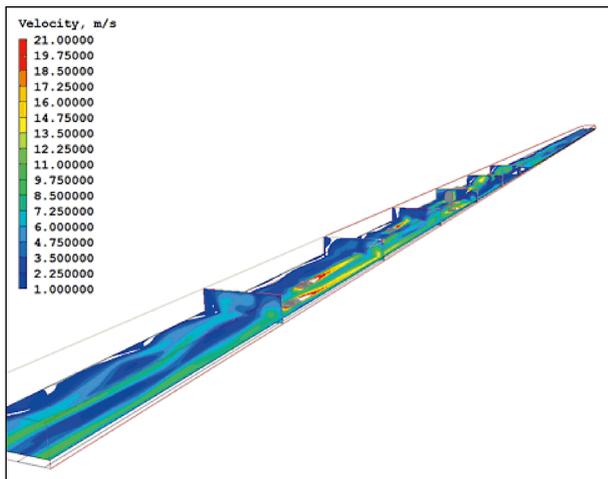


Bild 78: Verteilung der Geschwindigkeit nach 27 s in einer horizontalen Schnittebene und sechs vertikalen Schnittebenen im Tunnel Rudower Höhe

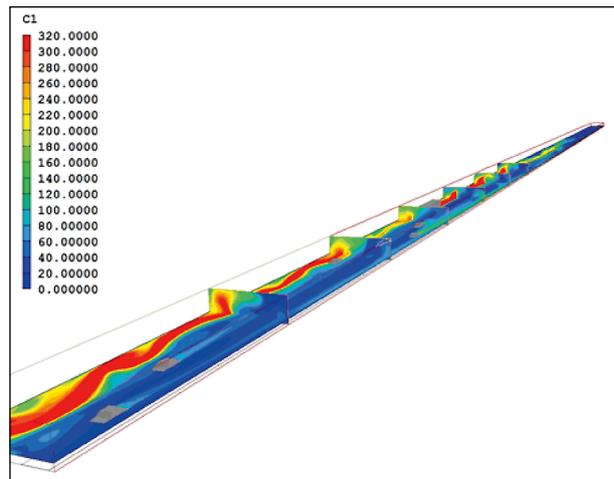


Bild 81: Konzentrationsverteilung nach 29 s in einer horizontalen Schnittebene und sechs vertikalen Schnittebenen im Tunnel Rudower Höhe

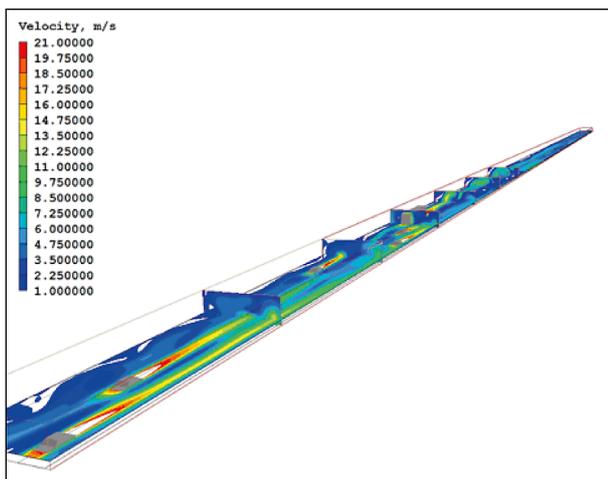


Bild 79: Verteilung der Geschwindigkeit nach 29 s in einer horizontalen Schnittebene und sechs vertikalen Schnittebenen im Tunnel Rudower Höhe

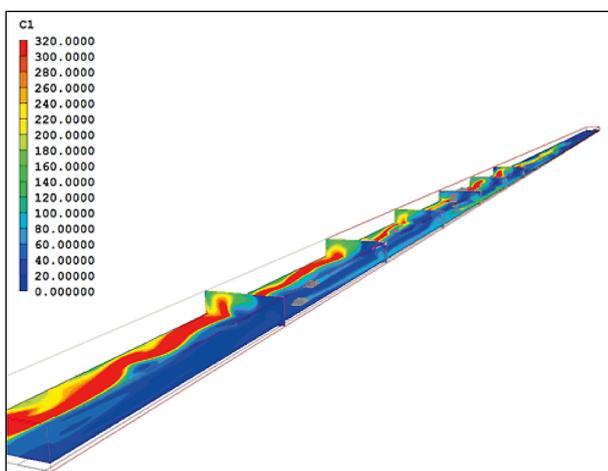


Bild 80: Konzentrationsverteilung nach 27 s in einer horizontalen Schnittebene und sechs vertikalen Schnittebenen im Tunnel Rudower Höhe

Fahrzeuge selbst dar. Dieser Mechanismus wird auch als fahrzeuginduzierte Turbulenz bezeichnet. Hierbei ist nicht nur die vermischende Wirkung des eigenen Fahrzeuges auf die eigene Auspuffemission gemeint, sondern vielmehr die Wirkung der Fahrzeuge, die durch die Schadstofffahne des vorausfahrenden Fahrzeuges fahren und diese Fahne durch die Verdrängungswirkung der Luftmassen vor dem Fahrzeug und Turbulenz nach dem Fahrzeug aufweiten und verwirbeln. Dadurch kommt es zu einer stetigen Vermischung der Schadgase, sodass sich kein deutlicher Konzentrationsgradient quer zur Tunnelachse einstellt.

Zur Bewertung des Einflusses einer in der Praxis zu erwartenden höheren Anzahl an Fahrzeugen auf die Wirbelstrukturen wären zusätzliche Simulationen erforderlich. Grundsätzlich ist durch die Zunahme an Fahrzeugen mit gleicher Geschwindigkeit eine Verstärkung der Verwirbelung zu erwarten. Bei einer erhöhten Anzahl an Fahrzeugen wird sich deren Geschwindigkeit jedoch vermutlich merklich reduzieren. Die Gewichtung dieser beiden Einflussfaktoren sollte anhand weiterer Simulationen überprüft werden.

3.6.4 Prozentuale Minderung der Konzentration am Tunnelaustritt durch 100 Demonstrator-Tunnelkassetten

Es wurde entschieden, dass als Demonstrator-Tunnelkassette eine Tunnelkassette mit beschichteten Schaumplatten am besten geeignet war. Als Beschichtungsmaterial hatte sich ein photokatalytisches Gemisch aus dem Zusatzstoff E und Zement

als am effektivsten gezeigt. Messungen der photokatalytischen Depositionsgeschwindigkeit ergaben für das Zusatzstoff E/Zement-Gemisch einen Wert von 0,48 cm/s (vgl. Kapitel 3.3.11).

Die Innenmaße der Demonstrator-Tunnelkassette betragen $1,5 \times 3 \times 0,4 \text{ m}^3$ (Höhe x Breite x Tiefe). Es wurden je Tunnelkassette 13 Filterschaummatten und drei Lüfter mit einem Lüftervolumenstrom von je $1.500 \text{ m}^3/\text{h}$ verbaut. Die photokatalytische Oberfläche betrug somit je Tunnelkassette 119 m^2 . Aus diesen Angaben ergab sich eine theoretische Schadstoffabbaurate für eine Tunnelkassette von $R_{TK} = 36,7 \%$. Aufgrund der CFD-Simulationen war zu erwarten, dass die reale Abbaurate dieses Tunnelkassettentyps nur unwesentlich geringer ist.

Bei Verbau von 100 Tunnelkassetten dieses Typs in den Tunnel Rudower Höhe war damit zu rechnen, dass die Stickoxidkonzentration am Ausgang des Tunnels bei einer Tunnelluftgeschwindigkeit von $3,7 \text{ m/s}$ um 15% und bei einer Tunnelluftgeschwindigkeit von $5,6 \text{ m/s}$ um 10% abnimmt.

Es wurde hierbei angenommen, dass jeweils 50 Tunnelkassetten an der linken und rechten Tunnelwand angebracht werden sollten. Die Tunnelkassetten sollten ohne Abstand voneinander, d. h. dicht gestellt werden. Die beiden Tunnelkassettenreihen sollten möglichst in der Nähe zum Tunnelausgang platziert werden.

Zur weiteren Optimierung wäre denkbar, die Ausblasrichtung der Tunnelkassetten so einzustellen, dass sich durch den Betrieb der Tunnelkassetten eine Tunnelluftgeschwindigkeit von $3,7 \text{ m/s}$ einstellt. In diesem Zusammenhang bliebe jedoch zu prüfen, ob alle geltenden Schadstoffgrenzwerte eingehalten werden.

3.6.5 CFD-Simulation der Wirkung des Luftvolumenstroms durch die Tunnelkassetten auf die Strömung im Tunnel

Für eine umfassende Funktionsfähigkeit der Tunnelkassetten musste weiterhin gezeigt werden, dass die Tunnelkassetten nicht nur die Tunnelluft in Wandnähe abreinigen, sondern dass der Schadstofftransport vom Fahrzeugauspuff zu den Tunnelkassetten durch den Luftvolumenstrom der Tunnelkassetten unterstützt wird. Um die Wirkung des Luftvolumenstroms durch die Tunnelkassetten auf die Strömung im Tunnel aufzuzeigen, wurde für den

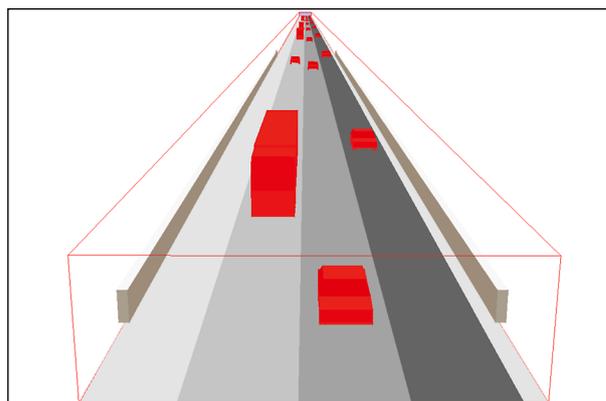


Bild 82: Modell für die CFD-Software PHOENICS des Tunnels Rudower Höhe mit 24 Fahrzeugen im Tunnel und jeweils 50 dicht gestellten Tunnelkassetten an der linken und rechten Tunnelwand

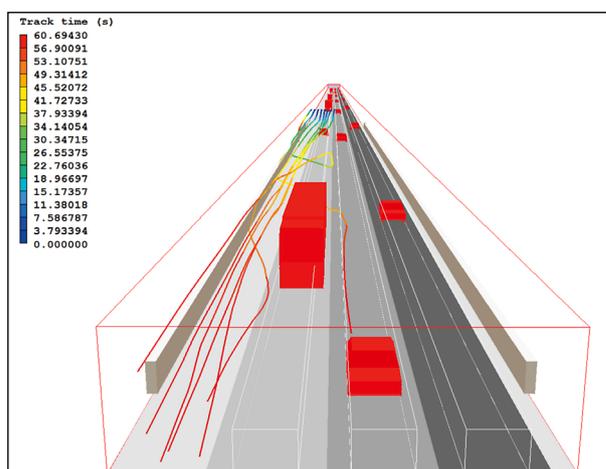


Bild 83: Strömungstrajektorien im Tunnel Rudower Höhe mit jeweils 50 dicht gestellten Tunnelkassetten an der linken und rechten Tunnelwand (Startort der Trajektorien in der linken Tunnelhälfte)

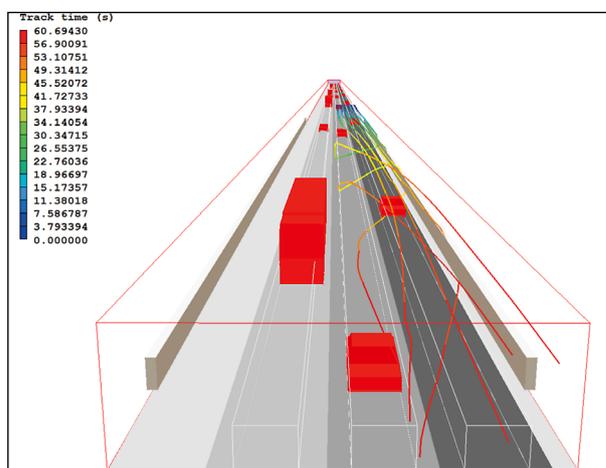


Bild 84: Strömungstrajektorien im Tunnel Rudower Höhe mit jeweils 50 dicht gestellten Tunnelkassetten an der linken und rechten Tunnelwand (Startort der Trajektorien in der rechten Tunnelhälfte)

Auslegungsfall mit 100 Demonstrator-Tunnelkassetten eine CFD-Simulation durchgeführt.

Der Luftdurchsatz durch 50 Tunnelkassetten betrug $62,5 \text{ m}^3$. Das Modell für die CFD-Software PHOENICS des Tunnels Rudower Höhe mit 24 Fahrzeugen im Tunnel und jeweils 50 dicht gestellten Tunnelkassetten an der linken und rechten Tunnelwand ist in Bild 82 gezeigt.

Das Zusammenwirken der Luftströmung durch den Tunnel und der Strömung durch die beiden Tunnelkassettenreihen ließ sich am besten durch sogenannte Trajektorien visualisieren. Bild 83 und Bild 84 zeigen Strömungstrajektorien im Tunnel Rudower Höhe mit jeweils 50 dicht gestellten Tunnelkassetten an der linken und rechten Tunnelwand. In Bild 83 ist der Startort der Trajektorien in der linken Tunnelhälfte und in Bild 84 in der rechten Tunnelhälfte. Aus den Trajektorienverläufen ist zu erkennen, dass sich ein sogenannter Doppelwirbel ausbildete. Der Drehsinn der beiden Einzelwirbel war umgekehrt. Jeder Einzelwirbel transportierte schadstoffbeladene Luft von der Mitte des Tunnels zu den Tunnelkassetten. Dieser Mechanismus verstärkte den zuvor diskutierten Transportmechanismus von Luftschadstoffen in Richtung Tunnelwand durch die fahrzeuginduzierte Turbulenz.

3.7 Standortvorbereitung

Zur Bewertung der vorliegenden Bedingungen im Tunnel Rudower Höhe erfolgte eine umfassende Messkampagne, die den Bau und die örtliche Installation der Messtechnik im Tunnel sowie den Betrieb und die Wartung der Messtechnik einschloss. Mithilfe dieser Messtechnik wurden Echtzeitdaten an drei Punkten innerhalb der Tunnelröhre gewonnen, die in Form von Nullmessungen als Eingangsparameter für das berechnete Modell des Tunnels dienten. Eine der Kernaufgaben umfasste aus Sicht der Messtechnik die Organisation des technischen Aufbaus unter Einbindung aller beteiligten Behörden, Projektpartner und zuarbeitenden Firmen sowie die Koordination und die Durchführung der Arbeiten vor Ort insbesondere unter Beachtung entsprechender verkehrlicher Regelungen im Zuge der Teil- und Vollsperrungen bei der Durchführung der Installationsarbeiten.

In der ersten Phase des Projekts wurden die Parameter NO , NO_2 , NO_x , CO , CO_2 , PM_{10} und $\text{PM}_{2,5}$ sowie die meteorologischen Bedingungen und die

Verkehrsdaten an allen drei Standorten aufgenommen. In Phase 2 sollte das Messkonzept um weitere vier Standorte erweitert werden.

3.7.1 Eingesetzte Messtechnik

Messung von Stickoxiden (NO , NO_2 und NO_x)

Die für den Einsatz an Verkehrswegen geeigneten Messgeräte zur Messung von Stickoxiden NO , NO_2 und NO_x funktionieren nach dem Chemilumineszenz-Verfahren gemäß DIN ISO 7996:1990 (ISO 7996:1985) [12]. Verwendet wurden Instrumente der Firma API Teledyne, Modell T200. Diese Geräte waren gemäß DIN EN 14211:2005 [13] zugelassen und verfügten über interne Probenahmepumpen sowie interne Mechanismen zur zwei- bis dreitäglichen Funktionskontrolle und Nullpunktüberprüfung.

Messung von Kohlenmonoxid (CO)

Für die Messung von CO eignen sich Messgeräte, die nach dem Prinzip nichtstreuender Infrarot-Spektrometrie (Gas-Filter-Korrelation) funktionieren. Im Rahmen des Projektes wurden Instrumente von API-Teledyne (Modell T300) eingesetzt. Auch diese Geräte sind gemäß DIN EN 14626:2005 [26] zugelassen und verfügen über interne Probenahmepumpen sowie interne Mechanismen zur zwei- bis dreitäglichen Funktionskontrolle und Nullpunktüberprüfung.

Sensoren für CO_2

Im Zuge der Projektarbeiten wurde entschieden, zusätzlich zu den Messgeräten noch indikative Sensoren für CO_2 einzubauen (vgl. Bild 85). Hier wurde auf Messsensoren der Fa. Aeroqual zurückgegriffen. Es handelte sich dabei um Messsensoren der

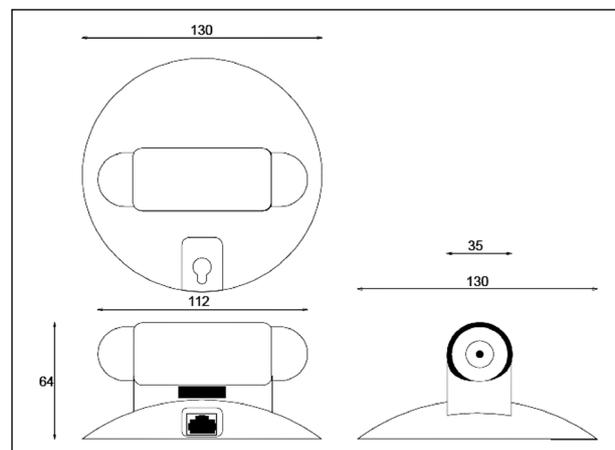


Bild 85: Konstruktionsdetails des CO_2 -Sensors [Quelle: <http://www.aeroqual.com/wp-content/uploads/2010/12/AQL-S900-905-Transmitter-Controller-Specs.pdf>]

Reihe S900 – SH CD1 Carbon Dioxide NDIR 0-2000 ppm Sensor.

Messung von Partikel (PM_x)

Für den Einsatz im Tunnel kam ein geeignetes Partikelzähler-Feinstaubmessgerät zur Bestimmung von PM_{10} , $PM_{2,5}$, PM_1 und TC zum Einsatz, deren Genauigkeit durch Nachweis der Äquivalenz für PM_{10} nach EN 12341:1999 und für $PM_{2,5}$ nach EN 14907:2005 gemäß dem „Guide to the Demonstration of Equivalence of Ambient Air Monitoring Methods“ [27-31] nachgewiesen wurde. Verwendet wurde das Grimm Spektrometer 107.

Messung meteorologischer Komponenten und der Verkehrsmenge

Weiterhin wurde eine Kompaktwetterstation (WS500, Fa. Lufft) im Tunnel zur Messung der Komponenten Windgeschwindigkeit (Prinzip: Ultraschall), Windrichtung (Prinzip: Ultraschall), Temperatur (Prinzip: NTC Negative Temperature Coefficient), relative Luftfeuchte (Prinzip: kapazitiv) und Luftdruck im Tunnel errichtet.

Weiterhin wurde ein optischer Sensor zur Bestimmung der Verkehrsmenge mit Verkehrsartbestimmung und Verkehrsgeschwindigkeit in einer zeitlichen Auflösung von mindestens 10 min zur Steuerung der Tunnelkassetten eingesetzt.

3.7.2 Messcontainer der Messstellen im Tunnel Rudower Höhe

Zur Durchführung der Messungen zur Standortvorbereitung war die Verwendung einsatzoptimierter Messcontainer erforderlich, die speziell auf die vorliegende geometrische Situation angepasst waren. Aus diesem Grund wurden im Rahmen des Projekts spezielle Messcontainer erarbeitet und im Tunnel Rudower Höhe eingerichtet, was im Anhang A.1 ausführlich beschrieben wird.

Die Einrichtung der Container erfolgte im April 2014, während im August 2014 die Installation der erforderlichen, im Folgenden genannten Messtechnik im Tunnel Rudower Höhe folgte:

- drei API Teledyne Modell T200 zur Aufnahme von NO, NO_2 und NO_x ,
- drei API Teledyne Modell T300 zur Aufnahme von CO,
- ein Kompaktwetterstation der Firma Lufft, WS 500 zur Aufnahme der Parameter Temperatur,

Feuchte, Windgeschwindigkeit, und -richtung und Druck und

- ein Grimm 107 zur Aufnahme von PM_{10} und $PM_{2,5}$.

Nach dem Einbau wurde überprüft, dass die Systeme ihren Betrieb aufgenommen hatten und über absolute Dichtigkeit gegenüber dem Eintritt von Verunreinigungen in das Messgehäuse verfügten. Ab Mitte August 2014 erfolgten die Nullmessungen zur Standortvorbereitung.

3.7.3 Zusammenfassung und Erkenntnisse der Nullmessungen der Phase 1

Die Messungen innerhalb des Tunnels verliefen sehr gut, da lediglich vereinzelt Probleme auftraten. Obwohl der Verschmutzungsgrad der Messcontainer sehr hoch war, konnte eine Kontamination des Inneren der Messstationen durch das ausgewählte Design und die eingesetzten Peltierklimaanlagen vermieden werden, da außer der Probenahme keinerlei Zulauf in das System stattfand. Auch die eingesetzte indikative Messtechnik funktionierte trotz des durchaus hohen Anspruchs fehlerfrei.

Die Ergebnisse der Nullmessungen harmonisierten in den wesentlichen Punkten mit den Messungen der Längsprofile, die mit dem mobilen Messsystem der BAST in einem Vorgängerprojekt aufgenommen wurden (vgl. Bild 86). Grundsätzlich zeigte sich dabei ein charakteristischer Wochen- und Tagesverlauf.

In den folgenden Punkten wird kurz auf die einzelnen Messparameter und Erkenntnisse aus diesen eingegangen.

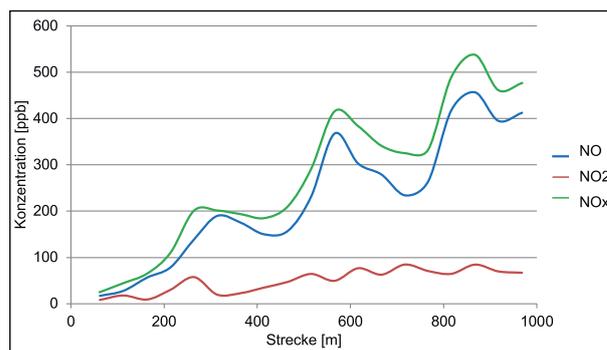


Bild 86: Messergebnisse der Längsprofilmessungen mit dem System der BAST

Stickoxid-, Kohlenmonoxid- und Kohlenstoffdioxidmessungen

Die Schadstoffmessungen spiegeln die bei den Längsprofilmessungen der BASt gefundenen Parameter und Richtwerte auch über einen längeren Zeitraum wider. Einen Überblick über die ermittelten Messwerte der einzelnen Messstationen ist in Tabelle 29 dargestellt. Anhand dieser Messwerte ist eine deutliche Zunahme der Schadstoffbelastung über die Länge des Tunnels und somit vom Tunnelingang zum Tunnelausgang zu beobachten, was aufgrund der räumlichen Situation des Tunnels plausibel ist. Darüber hinaus waren am Wochenende deutlich geringere Mittelwerte für die einzelnen Schadstoffkonzentrationen festzustellen, was durch das geringere Verkehrsaufkommen am Wochenende zurückzuführen ist.

	NO [ppb]	NO ₂ [ppb]	NO _x [ppb]	CO ₂ [ppm]
Tunnelanfang A113TRHS1				
Werktags max.	173,78	59,39	199,04	411,00
Werktags mittel	36,14	20,19	56,47	329,12
Wochenende max.	72,75	35,78	98,96	376,58
Wochenende mittel	23,07	16,29	39,34	332,35
Tunnelmitte A113TRHS2				
Werktags max.	352,77	71,17	413,81	543,92
Werktags mittel	235,03	40,83	276,02	468,19
Wochenende max.	256,35	57,85	286,83	512,61
Wochenende mittel	176,36	34,82	211,31	457,62
Tunnelausgang A113TRHS3				
Werktags max.	493,19	99,50	578,53	760,44
Werktags mittel	328,22	57,05	385,48	653,98
Wochenende max.	358,40	80,88	286,83	401,00
Wochenende mittel	246,56	48,69	211,31	295,42

Tab. 29: Ergebnisüberblick der Schadstoffmessungen an den drei Messstationen

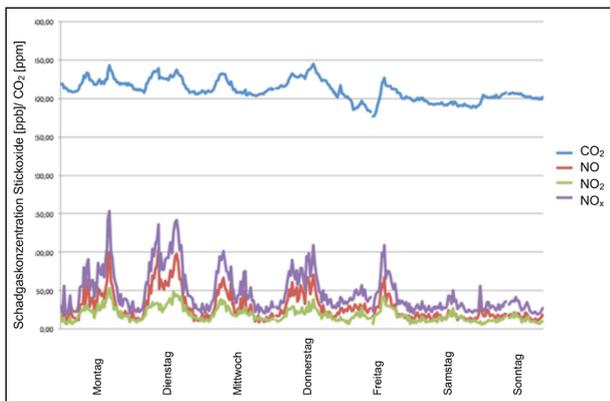


Bild 87: Tunnelanfang A113TRHS1 - Wochenverlauf: Schadgaskonzentrationen ([ppb] für Stickoxide bzw. [ppm] für CO₂) in der 51. KW von Montag bis Sonntag

Für einen weiteren Überblick sind in Bild 87 bis Bild 89 zusätzlich die Wochenverläufe für die 51. Kalenderwoche der einzelnen Parameter und Stationen dargestellt. In diesen Bildern zeigt sich zunächst, dass die Konzentrationen der Schadgase vergleichbare Verläufe in Bezug auf die Positionen von Hoch- und Tiefpunkten aufweisen. So ergeben sich für alle Verläufe deutliche Abhängigkeiten von den Tages-

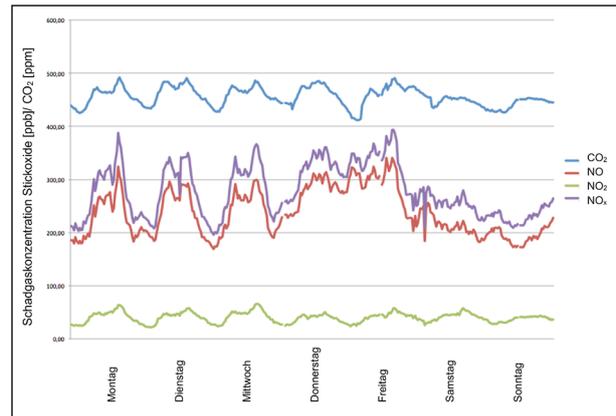


Bild 88: Tunnelmitte A113TRHS2 - Wochenverlauf: Schadgaskonzentrationen ([ppb] für Stickoxide bzw. [ppm] für CO₂) in der 51. KW von Montag bis Sonntag

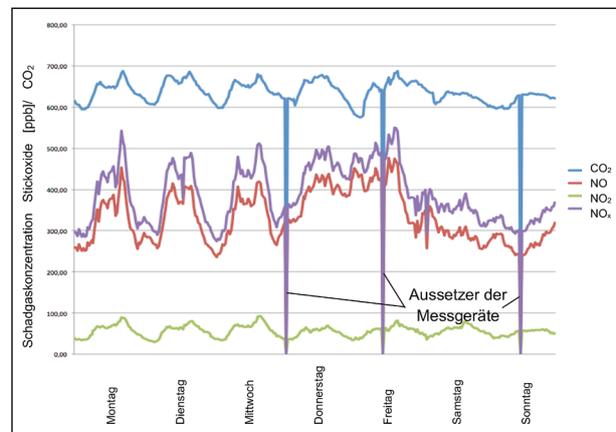


Bild 89: Tunnelausgang A113TRHS3 - Wochenverlauf: Schadgaskonzentrationen ([ppb] für Stickoxide bzw. [ppm] für CO₂) in der 51. KW von Montag bis Sonntag

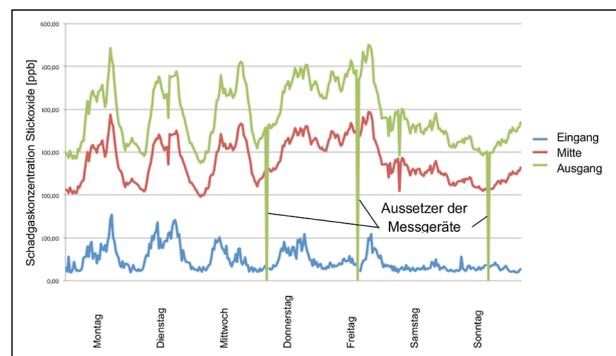


Bild 90: A113TRHS1, 2 und 3 - NO_x-Verläufe: Schadgaskonzentrationen [ppb] in der 51. KW von Montag bis Sonntag

zeiten sowie den Wochentagen. Die in den Verläufen auftretenden Tiefpunkte entsprechen den Nachtzeiten, während tagsüber, insbesondere morgens und nachmittags, sehr hohe Konzentrationen auftreten. An den letzten beiden Tagen dieser Darstellung sind hingegen lediglich geringe Konzentrationen gemessen wurden, was auf die überwiegend arbeitsfreien Tage zurückzuführen ist.

In Bild 90 sind die Verläufe der NO_x -Konzentration aller drei Messstationen für die betrachtete Messwoche gegenübergestellt. Darin wird deutlich, dass die Konzentration der Stickoxide vom Tunneleingang über die -mitte zum -ausgang hin deutlich zunimmt.

Strömungsmessung

Bei der Betrachtung der Messwerte der Strömungsmessung an der Station A113TRHS2 (Tunnelmitte) fielen in der Sekundenaufösung sehr hohe Spitzenwerte auf. Diese dürften durch die Beeinflussung der Messung von vorbeifahrenden Fahrzeugen sowie durch Verwirbelungen aufgrund des geringen Abstandes zur Tunnelwand verursacht worden sein. Diese Spitzen beeinflussten die Langzeitmittelwerte und führten so zu einem Messfehler, der bestimmt werden musste, um die tatsächliche Geschwindigkeit innerhalb des Tunnels bestimmen zu können.

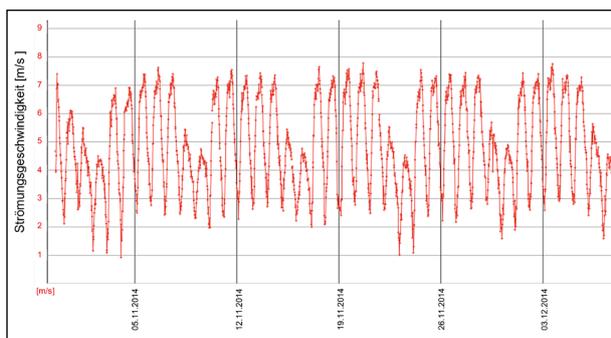


Bild 91: Monatsverlauf der Strömungsmessungen - Darstellung mit Minutenmittelwerten

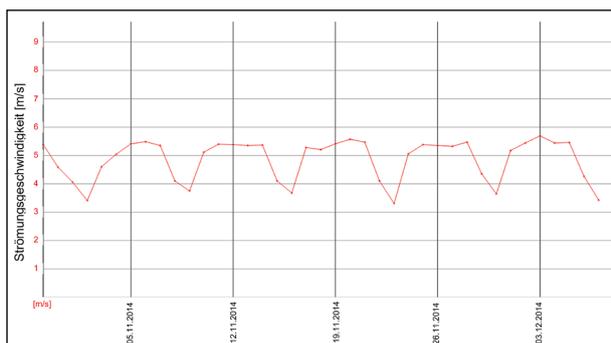


Bild 92: Monatsverlauf der Strömungsmessungen - Darstellung mit Tageswerten

Obwohl der berechnete maximale Tagesmittelwert der Strömung von 5,6 m/s mit dem durch die Fa. Lohmeyer bestimmten theoretischen Wert übereinstimmte, erschien dieser Wert aufgrund der Position des Messgeräts doch zu hoch. Das Messgerät befand sich unmittelbar zwischen der Tunnelwand und den vorbeifahrenden Fahrzeugen und somit unmittelbar im Bereich der durch die Fahrzeuge verdrängten Luft. Aus diesem Grund wurden die Strömungsgeschwindigkeiten überschätzt, wobei der vorliegende Fehler auf einen Wert von ca. 1 m/s bei den Kurzzeitwerten vermutet wurde (vgl. Bild 91). Es galt nun, den Fehler in den Strömungsdaten anhand von Drittdaten genauer zu spezifizieren. Über den gesamten Zeitraum der Messungen ergaben sich folgende Werte für die Strömungsmessung anhand der Tagesmittelwerte, dargestellt in Bild 92:

- Mittelwert der Strömung 4,3 m/s,
- Maximalwert der Strömung 5,6 m/s,
- Minimalwert der Strömung 2,5 m/s.

Um diese Messwerte auf ihre Richtigkeit zu überprüfen, wurden sie den von der Tunnelleitstelle erfassten Strömungswerten gegenübergestellt. Diese sind in Bild 93 und Bild 94 dargestellt.

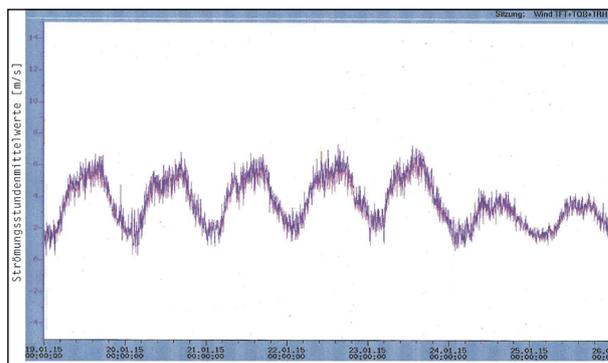


Bild 93: Wochenverlauf der Strömungsmessungen der Tunnelleitstelle

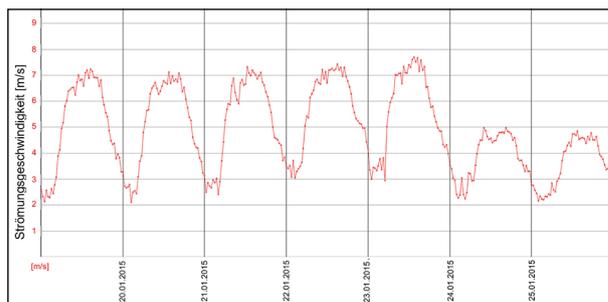


Bild 94: Darstellung der Stundenmittelwerte der Strömungsmessungen der projektinternen Tunnelmessstelle im selben Zeitraum wie in Bild 93

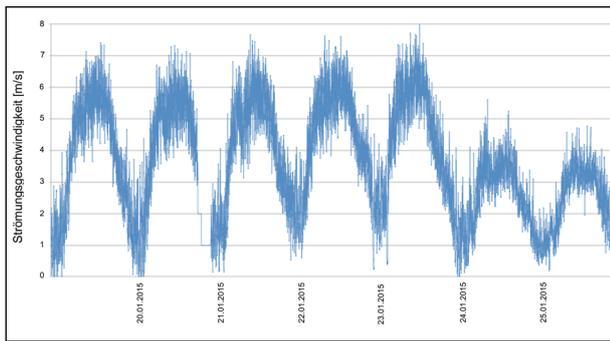


Bild 95: Tagesverlauf der Strömungsmessungen nach Korrektur-Darstellung mit Minutenmittelwerten

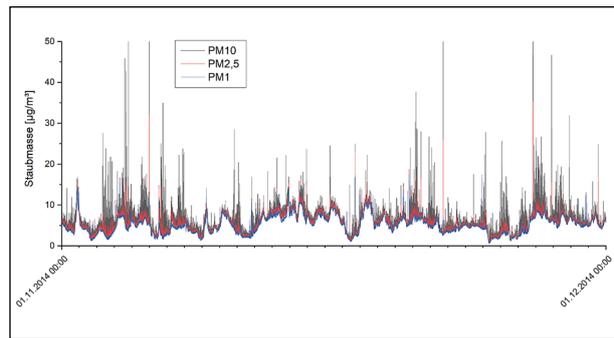


Bild 96: Darstellung PM₁₀-, PM_{2,5}- und PM₁-Messung im Tunnel

Vergleicht man Bild 93 und Bild 94 miteinander, ist deutlich zu erkennen, dass die Strömungsmessungen der Tunnelleitstelle, unter Einbeziehung der dargestellten, kurzfristigen Spitzen, einen Minimalwert von 0,5 m/s und einen Maximalwert von 6,5 m/s aufwiesen. Bei den projektinternen Echtzeitmessungen lagen der Minimalwert bei 2 m/s und der Maximalwert bei 7,6 m/s unter Einbeziehung der Messspitzen.

Korrigiert man die Kurzzeitwerte der Echtzeitmessung durch ein horizontales Verschieben und legt die Diagramme digital übereinander, erhält man eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den unterschiedlich gewonnenen Messdaten (vgl. Bild 95).

Für die Stundenmittelwerte ergaben sich somit ein Maximalwert von 5,6 m/s und ein Minimalwert von 0,9 m/s. Basierend auf den Korrekturen ließen sich folgende Werte für die Strömungsgeschwindigkeit als Tagesmittelwerte festlegen³:

- Mittelwert der Strömung 3,1 m/s,
- Maximalwert der Strömung 4,3 m/s,
- Minimalwert der Strömung 1,4 m/s.

PM-Messung

Bei den ersten Auswertungen der Messergebnisse der PM-Messungen, die mit einem optischen Messverfahren erfasst wurden, zeigte sich, dass diese vermutlich unterschätzt wurden (vgl. Bild 96). Eine derart geringe Staubbelastung ist bei der Betrachtung der Emissionsfaktoren und Messerfahrungen sehr unwahrscheinlich und ist daher vermutlich auf einen Messfehler zurückzuführen (nach [32]).

Nach einer Überprüfung des Systems konnten messtechnische Fehlerquellen und Störungen aus-

geschlossen werden. Allerdings wurde festgestellt, dass das Innere des Messsystems bereits nach sehr kurzer Messzeit stark verschmutzt war. Die aufgetretene Verschmutzung wird als Ursache für die geringen gemessenen Staubmassen vermutet, da diese den Transport der Feinstaubpartikel zum Sensor behinderte.

Für tiefergehende Untersuchungen der Staubbelastung sollten daher alternative Messsysteme verwendet werden. Zu diesen Alternativen zählt beispielsweise ein System mit einer isokinetischen Probenahme oder ein auf Durchströmung basierendes Messprinzip. Von Staubmessgeräten mit Filterband ist aufgrund der hohen Konzentrationen und Verschmutzungen im Tunnel abzuraten. Zwar ist hier durch wesentlich höhere Probenahmegeschwindigkeiten kaum mit Verlusten zu rechnen, allerdings dürften die Filterbänder der Systeme sehr schnell belegt sein.

Verkehrszählung

Bezüglich der Verkehrszählungskamera ergab sich die Problematik, dass sich diese aufgrund der räumlichen Gegebenheiten nicht oberhalb der Fahrstreifen montieren ließ. Durch die Position am Rand der Fahrbahn konnten jedoch keine repräsentativen Messwerte gewonnen werden, da die Fahrzeuge auf der äußeren Spur teilweise die Fahrzeuge auf der zweiten Spur verdeckten. Ein Vergleich der Messungen mit den Daten der Zählstelle bestätigte die unbefriedigenden Ergebnisse. Daher wurde versucht, eine Position im Außenbereich des Tunnels zu finden, die optimal für die optische Erfassung und leicht zugänglich war. Hierbei zeigten sich einige geeignete Positionen, die allerdings alle das Problem aufwiesen, keine Stromanbindung in nächster Nähe zu haben. Eine alternative technische Lösung konnte nicht realisiert werden.

³ Vgl. Anhang A.2 zu weiteren Ausführungen zur Auswertung der Strömungsgeschwindigkeit

3.8 Schlussfolgerungen der Phase 1

Mit der gefundenen Lösung zur Realisierung der Problemstellung wurde ein Ansatz gefunden, mit dem wissenschaftlich anhand von Labormessungen und Modellrechnungen nachgewiesen wurde, dass eine Umsetzung in der Phase 2 zu empfehlen ist.

Für die Fortführung des Projektes wurde eine Umsetzung in zwei Stufen vorgeschlagen. In der ersten Stufe sollte anhand von 70 Kassetten eruiert werden, ob sich die Ergebnisse der Labormessungen und der Modellrechnung im praktischen Einsatz ebenfalls erzielen ließen. Falls dies erfolgreich wäre, sollten in einer zweiten Stufe weitere 30 Kassetten installiert werden, um das maximal erreichbare Potenzial der gefundenen Lösung ausschöpfen zu können. Dieses stufenweise Vorgehen würde das wirtschaftliche Restrisiko des Projektes reduzieren.

4 Phase 2 – Umsetzung in die Praxis

In der Phase 2 des Projekts war die Umsetzung des erarbeiteten Konzepts der Tunnelkassetten in die Praxis vorgesehen. Dabei teilte sich die Phase 2 wiederum in die zwei Teilphasen 2a und 2b. In der Phase 2a waren der Bau und die Montage von zehn Tunnelkassetten im Tunnel Rudower Höhe geplant, die zudem einem Testbetrieb einschließlich dem Monitoring der NO_x -Messungen und deren Auswertung unterzogen werden sollten. Die Phase 2b umfasste nach der ursprünglichen Planung anschließend den Bau, die Montage und den Betrieb der weiteren Tunnelkassetten. Die Umsetzung der Phase 2b konnte im Rahmen des Projekts jedoch aufgrund von projektinternen Problemen bei der großtechnischen Herstellung der Tunnelkassetten nicht realisiert werden. Grundlegend erfolgten in der Phase 2 jedoch zunächst der Bau einer Demonstrator-Tunnelkassette sowie die Weiterentwicklung der photokatalytischen Materialien sowie der Untersuchungsmethodik dieser Materialien, was in den folgenden Kapiteln beschrieben wird. Weiterhin wurde in der Phase 2 die räumliche und zeitliche Stickoxidverteilung im und um den Tunnel Rudower Höhe tiefergehend betrachtet.

Im Anhang A.4 findet sich zudem ein Vergleich der Anwendung der erarbeiteten Tunnelkassetten mit

bisher angewandten Methoden zum Stickoxidabbau mithilfe von photokatalytisch aktiven Tunnel- und Lärmschutzwänden.

4.1 Bau einer Demonstrator-Tunnelkassette

Die Konstruktionszeichnungen der selbst konstruierten und anschließend gefertigten Demonstrator-Tunnelkassette sind in Bild 97 und Bild 98 gezeigt. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Demonstrator-Tunnelkassette von der Funktion mindestens die vertraglich vereinbarten Eigenschaften aufwies und diese zudem im Versuchsbetrieb im Technikum möglichst flexibel betrieben werden konnte.

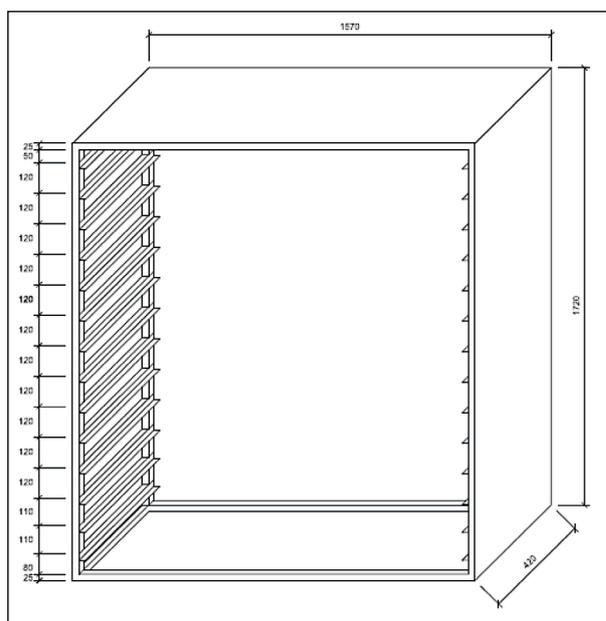


Bild 97: Konstruktionszeichnung des Rahmens der Demonstrator-Tunnelkassette

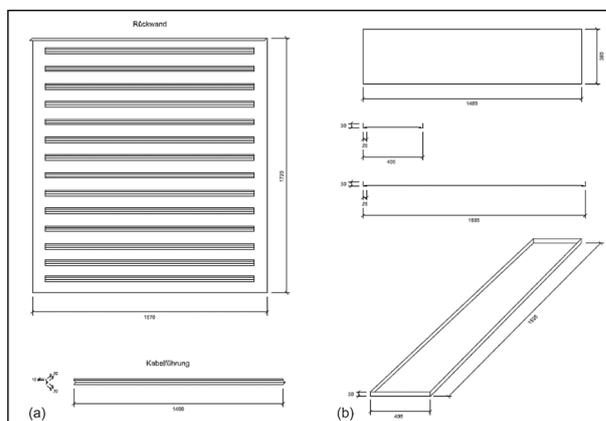


Bild 98: Konstruktionszeichnung für (a) Rückwand und Kabelführung und (b) der Schubladen für die Schaumstoffmatten der Demonstrator-Tunnelkassette



Bild 99: Demonstrator-Tunnelkassette: (a) Rahmen mit dreifacher Ausführung der Sockel für die Leuchtstoffröhren und Auflagen für die Schubladen und (b) Detailansicht der dreifachen Sockelreihen einer Zwischeneinheit mit eingesetzter Schublade

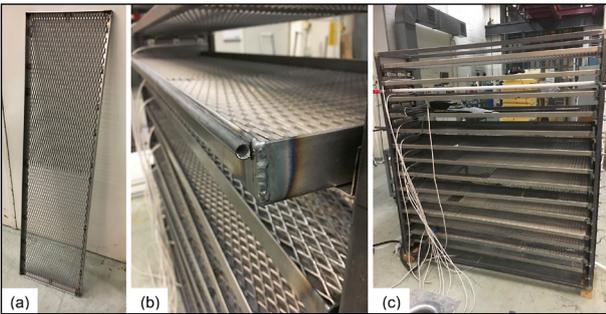


Bild 100: Demonstrator-Tunnelkassette: (a) Stabile Auflage für Schaumstoffmatten, (b) eingebaute Auflagen für Schaumstoffmatten und (c) offene Demonstrator-Tunnelkassette mit eingebauten Auflagen mit noch unverdeckter Kabelführung

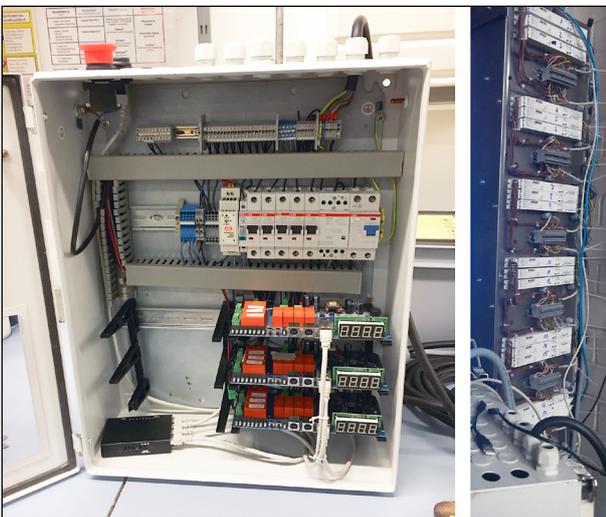


Bild 101: Schaltkasten und freigelegte Elektronik für die Ansteuerung der Leuchtstoffröhren in der Demonstrator-Tunnelkassette

Um für die Untersuchungen im Technikumsbetrieb möglichst variable Möglichkeiten zum Betrieb der Demonstrator-Tunnelkassette zu haben, wurde die Ansteuerung der Leuchtstoffröhren möglichst flexibel gehalten, sodass im Betrieb alle Leuchtstoffröhren separat angesteuert werden konnten. Gleiches galt für die beiden Lüfter, die über eine selbst gefertigte Steuerung getrennt voneinander ein- und ausgeschaltet sowie in ihrer Leistung reguliert werden

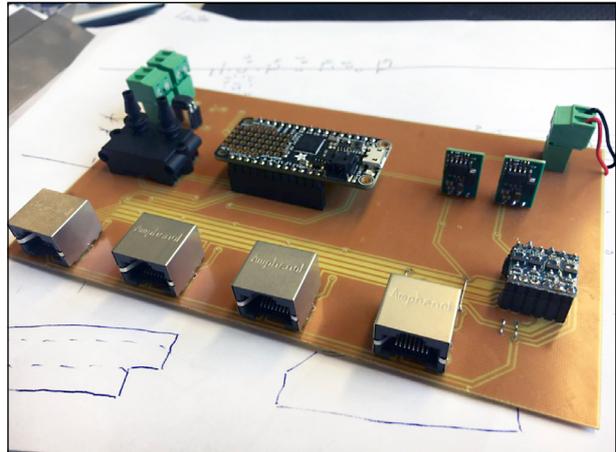


Bild 102: Speziell angefertigtes Elektronikbauteil zur Ansteuerung der Lüfter, Aufzeichnung von Temperatur, Luftfeuchte und verschiedenen Drücken

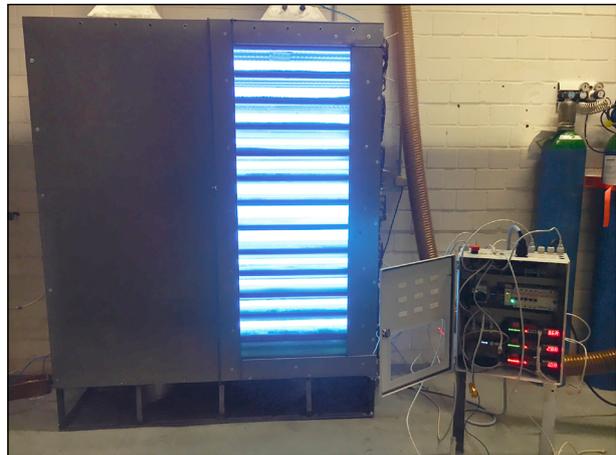


Bild 103: Demonstrator-Tunnelkassette während des Testbetriebes im Technikum bei voll eingeschalteter UV-Bestrahlung; die Leuchtstoffröhren konnten durch die Tür aus PMMA beobachtet werden

konnten. Zudem wurde für Demonstrationszwecke eine der Türen aus transparenten PMMA statt aus Metall ausgeführt, um so einen Einblick in das Innere der Tunnelkassette während des Betriebes zu gewährleisten. Darüber hinaus wurden Sensoren zur Bestimmung des Druckverlustes während des Messbetriebes eingebaut, um dadurch zusätzliche Informationen für die zukünftige Ausführung der Tunnelkassetten zu gewinnen.

Bild 99 bis Bild 102 zeigen Darstellungen von den einzelnen Baueinheiten sowie dem Aufbau der Demonstrator-Tunnelkassette.

In Bild 103 ist die fertige Demonstrator-Tunnelkassette während des Testbetriebes gezeigt, bei der die Leuchtstoffröhren durch die PMMA-Scheibe beobachtet werden konnten. Bild 104 zeigt Detailansichten der Demonstrator-Tunnelkassette. Die Demonstrator-Tunnelkassette konnte mit der für die

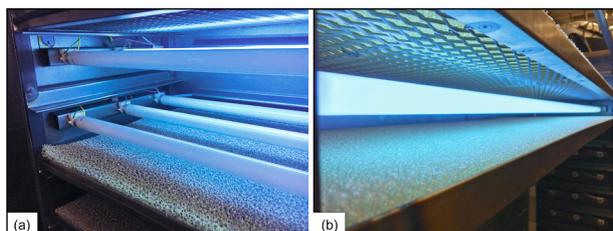


Bild 104: Detailansichten der Demonstrator-Tunnelkassette: (a) zwei Lagen mit je drei Leuchtstoffröhren (die Schublade mit der Schaumstoffmatte wurde hier entfernt) und (b) Lage mit eingeschalteten Leuchtstoffröhren, oben und unten begrenzt mit eingeschobenen Schubladen mit Schaumstoffmatten



Bild 105: Exemplarische Messung der Stickoxidkonzentration der Demonstrator-Tunnelkassette während eines Testlaufs im Technikum

Ansteuerung notwendigen Elektronik betriebsbereit aufgebaut werden und enthielt für erweiterte Tests gegenüber der geplanten Tunnelkassette zusätzliche Funktionalitäten.

Die gefertigte Demonstrator-Tunnelkassette konnte unter Laborbedingungen erfolgreich getestet werden. Die bisherigen Tests wurden unter Einbau von photokatalytisch beschichteten grobporigen Schaumstoffmatten durchgeführt. Bild 105 zeigt exemplarisch die Stickoxidkonzentrationen (NO , NO_2 und NO_x) der nach dem Chemilumineszenz-Prinzip arbeitenden Stickoxidanalysatoren direkt am Ansaugstutzen und am Auslass der Demonstrator-Tunnelkassette.

Die Demonstrator-Tunnelkassette wurde im Technikum der TU Berlin über mehrere Monate im Dauerbetrieb getestet, wobei jedoch sowohl die Lüfter als auch die Leuchtstoffröhren aus Gründen der Sicherheit und des Arbeitsschutzes sowie des Energieverbrauchs nur in einem Sparmodus betrieben wurden. Die Demonstrator-Tunnelkassette wurde während des Testbetriebes bei der jeweiligen Stickoxidhintergrundbelastung des TIB-Standortes in

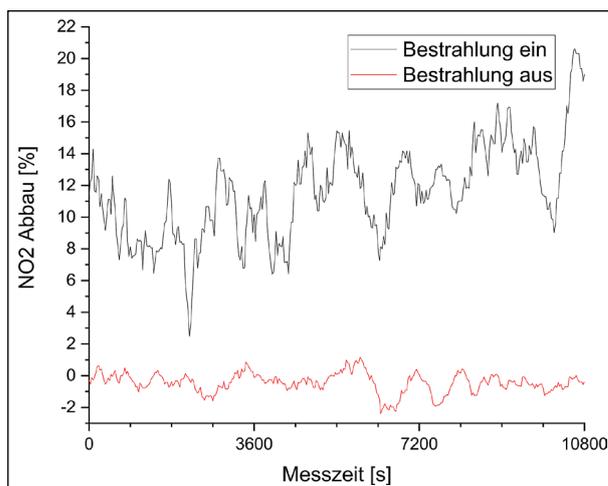


Bild 106: Vergleich der Messungen vom 21.07.2017 mit eingeschalteten UV-Lampen (Lüfter je 10 % Leistung) und der Messung vom 22.06.2017 mit eingeschalteten UV-Lampen (Lüfter je 20 % Leistung)

der Gustav-Meyer-Allee 25 in Berlin betrieben, die im Bereich von ca. 15 bis 25 ppb NO_2 lag. Bild 106 zeigt ein Beispiel für die Differenzmessung ($c_{\text{aus}} - c_{\text{ein}}$) bei ausgeschalteten UV-A-Leuchtstoffröhren. Die Messungen verdeutlichen, dass die Konzentrationsdifferenz an NO_2 zwischen Ausgang und Eingang der Demonstrator-Tunnelkassette im Mittel etwa zwischen $\pm 1\%$ schwankt, die maximalen Abweichungen liegen bei etwa $\pm 2\%$. Die ebenfalls in Bild 106 dargestellten Messungen bei eingeschalteten UV-Leuchtstoffröhren und 20 % der Lüfterleistung zeigen einen Abbau zwischen 3 und 21 % NO_2 . Diese Abbauleistung lag somit unter den Erwartungen. Mögliche Gründe für diesen eher geringen Abbau waren z. B. die recht lange Vorlagerungsdauer und der lange Betrieb der photokatalytischen Matten vor der Testmessung. Kurzzeitige Messungen ohne eine Datenaufzeichnung nach den frisch eingebauten photokatalytischen Schaumstoffmatten zeigten erheblich bessere Reinigungseffekte, was die negativen Auswirkungen der Alterung der Schaumstoffmatten verdeutlicht.

4.2 Weiterentwicklung der photokatalytischen Materialien

In der zweiten Phase erfolgte neben dem Bau der Demonstrator-Tunnelkassette eine Weiterentwicklung der photokatalytischen Materialien. Dabei sollte insbesondere die mechanische Belastbarkeit der beschichteten Schaumstoffmatten erhöht werden, um auf diese Weise die Handhabbarkeit beim Transport und dem Austausch zu verbessern. In diesem Zusammenhang wurden die Rezepturen

der photokatalytischen Beschichtung der Phase 1, die bisher aus dem Zusatzstoff E, CEM I und Wasser bestand, systematisch verändert. Dazu wurde sowohl das Wasser/Bindemittel-Verhältnis (zur Veränderung der Festigkeit) als auch der Gehalt einer Kunststoffdispersion (zur Verbesserung des Haftverbundes zwischen Kunststoff und mineralischer Beschichtung sowie zur Verminderung des Elastizitätsmoduls) verändert. Bild 107 zeigt den Aufbau des Druckversuches, mit dem die Dauerhaftigkeit des Haftverbundes bestimmt wurde. Für den Versuch wurden aus dem openporigen Kunststoff Würfel einheitlicher Größe herausgeschnitten und im Tauchverfahren mit den unterschiedlichen Beschichtungen versehen. Nach einer einheitlichen Lagerung der Probekörper unter Folien zur Vermeidung einer zu schnellen Austrocknung, wurden die Proben mithilfe einer weggesteuerten Druckprüfmaschine alle bis auf ein gleiches Maß verdichtet. Zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit des Haftverbundes wurde einerseits die Menge an abgeplatzttem Material (vgl. Bild 107) sowie andererseits visuell die anschließende Durchgängigkeit der Beschichtung auf den Kunststoffoberflächen (vgl. Bild 108) bewertet.

Die Untersuchungen zeigten, dass die Haftung der Beschichtung auf dem polymeren Schaum sowohl

durch einen erhöhten Polymeranteil als auch einen erhöhten Wasser/Zement-Wert verbessert werden konnte. Infolge erster photokatalytischer Messungen schienen jedoch beide Maßnahmen gleichzeitig zu einer Verringerung des photokatalytischen Abbaus von NO zu führen, sodass sich durch die bisherigen Maßnahmen keine Verbesserungen gegenüber der bisherigen Rezeptur ergaben.

Infolge einer längeren, feuchten Lagerung von über 3 Monaten wurde bei den mit den zementären Rezepturen beschichteten Schaumstoffmatten zudem eine sehr starke Versprödung des Kunststoffes festgestellt. In Bild 109 ist das zuvor beschriebene Abbröckeln der starren Beschichtung vom flexiblen Kunststoffschaum nach einer Druckbeaufschlagung gezeigt, wobei jedoch der flexible Schaumstoffkörper nicht geschädigt wurde, sondern flexibel in die Ausgangsform zurückkehrte. In dem dargestellten Fall waren die zementäre Beschichtung und der Kunststoff jedoch nur wenige Wochen in Kontakt.

In Bild 110 ist hingegen derselbe Versuch an einer über mehrere Monate gelagerten Probe mit ähnlicher Zusammensetzung gezeigt. Vor der mechanischen Druckbelastung zeigte sich die normale Gestalt des Probekörpers, nach der Druckbeanspruchung bröckelte jedoch nicht nur die zementäre Be-

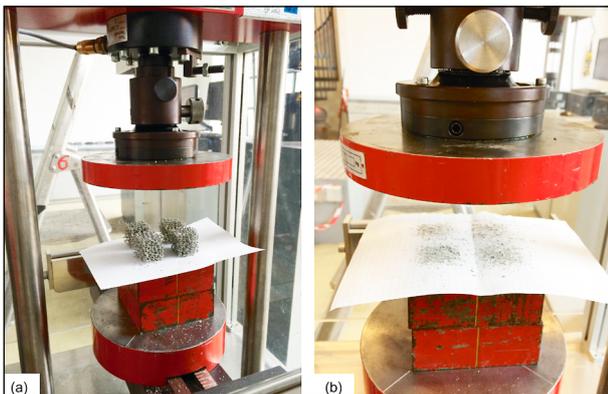


Bild 107: Druckversuch: (a) Proben gleicher Zusammensetzung vor der weggesteuerten Druckprüfung und (b) Abplatzungen durch einen Druckversuch

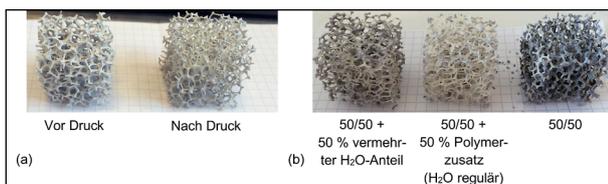


Bild 108: Probekörper mit Beschichtung aus 50 M.-% Zusatzstoff E und 50 M.-% Zement zur Druckprüfung: (a) Proben mit hohem Polymeranteil (10 M.-%) und erhöhtem Wasseranteil vor und nach der Druckprüfung und (b) Proben unterschiedlicher Zusammensetzung nach der Druckprüfung

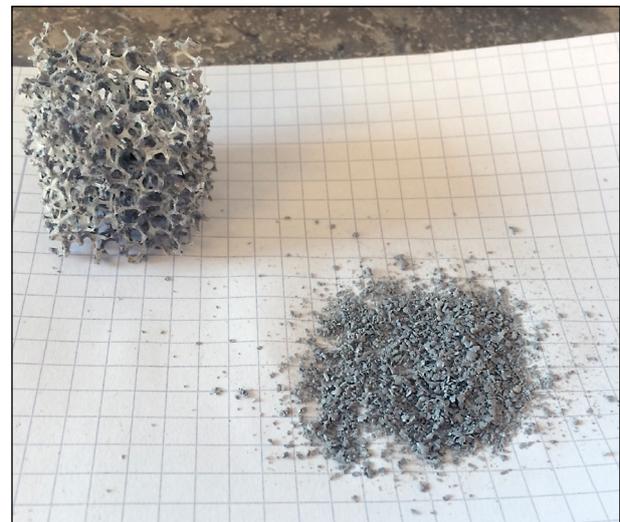


Bild 109: Probekörper nach mehrtägiger Lagerung und nach einer händischen Druckbelastung



Bild 110: Probekörper nach mehrmonatiger Lagerung: (a) vor und (b) nach einer händischen Druckbelastung

schichtung von der Kunststoffoberfläche, sondern der Kunststoff selbst war so spröde, dass auch dieser durch die Belastung zerstört wurde und nicht durch ein elastisches Verhalten in die Ausgangsposition zurückkehrte. Die Ursachen für diese Versprödung wurden bisher nicht untersucht. Einerseits könnte das Verhalten durch den hohen pH-Wert der zementären Beschichtung ausgelöst sein, der den Kunststoff dauerhaft schädigt und teilweise zersetzt. Eine zweite Möglichkeit wäre hingegen, dass schon ein langer Kontakt mit Feuchtigkeit während der Lagerung dem Kunststoff zusetzt. Da ähnliche Produkte auch im Bereich der Aquaristik eingesetzt werden, dürfte der alleinige Wasserkontakt als Schadensursache jedoch auszuschließen sein. Eine photokatalytische Zersetzung des Kunststoffes kann als maßgebende Ursache ausgeschlossen werden, da sich die Versprödung des Materials auch bei einer Dunkellagerung zeigte.

Die Untersuchungen an sehr lange gelagerten, mit zementhaltigen Rezepturen beschichteten Schaumstoffen haben somit gezeigt, dass für eine marktreife Lösung noch Anpassungen auf Seiten des Kunststoffes bzw. der Beschichtung erfolgen müssten, um eine Versprödung des Kunststoffes zu verhindern. Da die Änderung des Kunststoffes voraussichtlich nur sehr schwer zu bewerkstelligen sein dürfte, könnte entweder eine gleichermaßen sperrende als auch haftvermittelnde Zwischenschicht auf dem Schaumstoff zielführend sein. Falls der hohe pH-Wert oder die lange Beaufschlagung mit Feuchtigkeit die Ursache für die Versprödung des Kunststoffes sind, wären auch eine kürzere Feuchtlagerung und eine schnellere Karbonatisierung der Beschichtung denkbar.

In einem zusätzlichen Optimierungsschritt war zudem die weitere Anpassung der Rezeptur angedacht, um bei Bedarf die Verschmutzungsneigung der Matten zu reduzieren. In den geplanten Tunnelkassetten war jedoch eine Vorfilterlösung der Schwebstoffe vorgesehen (High Efficiency Particulate Air filter), um eine Verschmutzung der Schaumstoffmatten zu minimieren. Aus diesem Grund wurde auf diesen Untersuchungsschritt verzichtet.

Neben der Optimierung der Rezeptur wurden zudem verschiedene technische Möglichkeiten für eine gleichmäßige und sparsame Beschichtung der Matten mit der photokatalytischen Beschichtung getestet. Grundsätzlich war eine möglichst dünne Beschichtung anzustreben, um zum einen Materialkosten zu sparen und zum anderen die Luftdurch-

lässigkeit der Kunststoffmatten möglichst wenig zu behindern, da ansonsten die Gesamtreinigungsleistung der Tunnelkassetten negativ beeinflusst worden wäre. Für die Beschichtung hat sich das Tauchen als derzeit effektivste Lösung herausgestellt. Damit die Beschichtung einen nur möglichst dünnen Film auf der Oberfläche des Kunststoffes bildete, wurde überschüssiges Material durch das Auswalzen (Ausdrücken des Überschusses zwischen zwei Rollen aus Holz bzw. Kunststoff), durch Ausschleudern bzw. durch Ausschlagen (mehrmaliges Aufschlagen der zuvor mit dem Beschichtungsmaterial getränkten Kunststoffmatten) entfernt.

4.3 Weiterentwicklung der Labormessungen

Für einen verbesserten Vergleich zwischen den Labormessungen und den tatsächlichen Abbauraten in den Tunnelkassetten wurde in einem weiteren Schritt der CST-Reaktor für die Vermessung der Schaumstoffmatten optimiert, wobei insbesondere eine Durchströmungsmessung mit angepasster Beleuchtung der Matten angestrebt wurde. Dafür wurde ein völlig neuer, speziell auf die im Projekt erforderlichen Messungen der photokatalytischen Aktivität beim Durchströmen von Schaumstoffmatten angepasster Reaktor entworfen und gebaut. In Bild 111 ist die Grundeinheit des Reaktors aus PMMA gezeigt. Um eine gleichmäßige Durchströmung zu gewährleisten, wurde der Reaktor an der Einlass- und Auslassseite rechts und links mit vier Öffnungen versehen, sodass der Gasfluss über jeweils acht Leitungen erfolgte.

In den Reaktor wurde eine Aufnahme mit der zu messenden Schaummatte ($10 \times 10 \times 4 \text{ cm}^3$) gesteckt (vgl. Bild 112) und dann mit einem verschraubbaren Deckel mit Dichtung verschlossen. Dies ermöglichte zum einen einen schnellen Wechsel der Proben. Zum anderen wurde die angesaug-

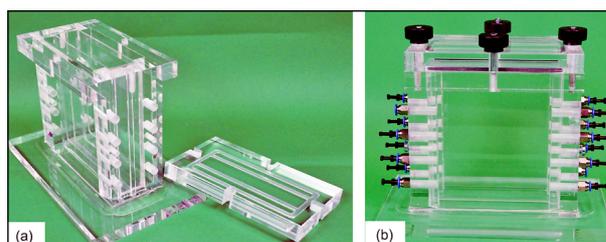


Bild 111: Grundgerüst des Reaktors für Durchströmungsmessungen: (a) Einzelteile und (b) fertiger Reaktor mit Anschlüssen, Dichtungen und aufgeschraubtem Deckel

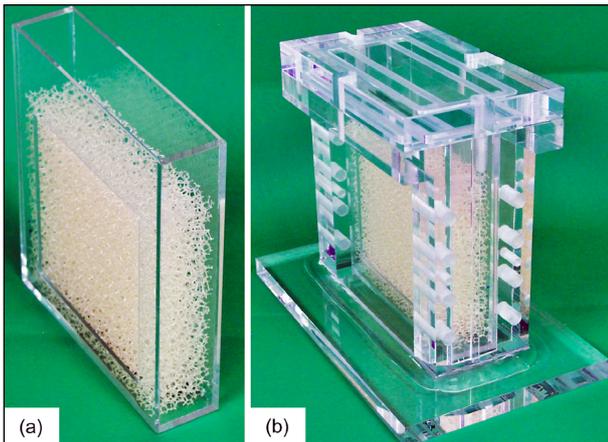


Bild 112: Probeaufnahme: (a) Aufnahme für die zu messenden Filtermatten und (b) Reaktor mit eingesetzter Filtermatte

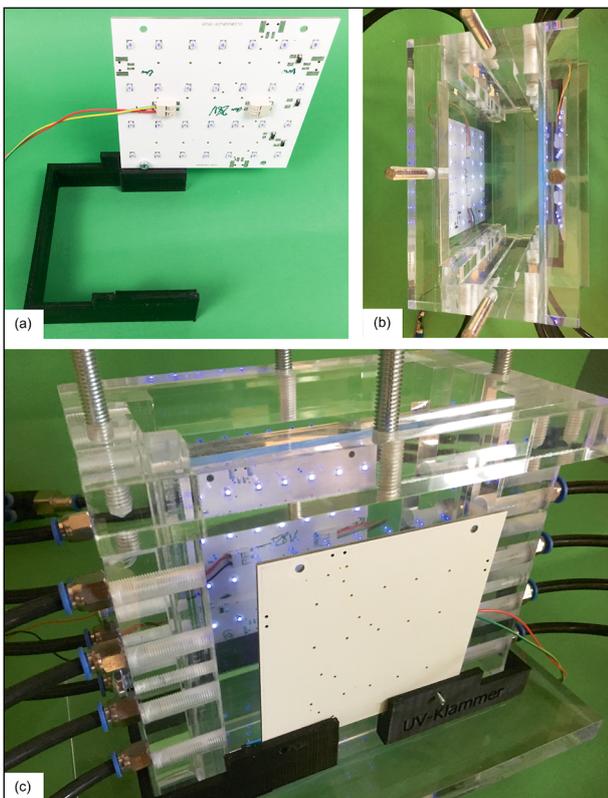


Bild 113: Elektronikbauteile des Reaktors: (a) Platine mit UVEDs auf spezieller Halterung, (b) offener und leerer Reaktor mit eingeschalteten UVEDs und (c) vollständiger Aufbau ohne Probe und Deckel

te Luft durch den Aufbau der Aufnahme mit den seitlichen Fenstern gezwungen, unter allen Umständen die Probe zu durchströmen.

Zur Bestrahlung der Filtermatte mit UV-A-Licht wurde eine spezielle Einheit für UVEDs entworfen und gebaut, die genau den offenen Querschnitt der Filtermatte auf beiden Seiten mit einer UV-Intensität zwischen 0 und 20 W/m² bestrahlte. Die Einheit wurde über eine mittels 3D-Druck hergestellte Kunststoffklammer am Reaktor fixiert. Die UVEDs

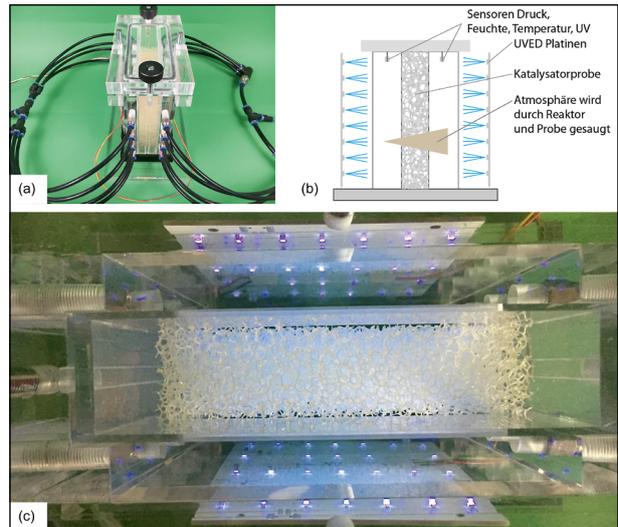


Bild 114: Reaktormessung: (a) Vollständiger Messaufbau mit Schaumstoff, (b) schematischer Querschnitt durch den Reaktor und (c) Draufsicht nach Abnahme des Deckels

arbeiten bei einer Wellenlänge von 365 nm. Zusätzlich wurden in den Reaktor auch Sensoren zur Bestimmung der Luftfeuchtigkeit und Temperatur eingebaut. Bild 113 zeigt die Platine mit den UVEDs und deren Anordnung während der Messung.

In Bild 114 ist der vollständige Aufbau für den Messbetrieb gezeigt.

Zusätzlich wurde zur Messung des photokatalytischen Abbaus in dem modifizierten, durchströmten Teststand ein Masseflussregler integriert, um mit veränderten Volumenströmen und Volumenverhältnissen messen zu können.

Zur Bewertung des konzipierten Durchströmungsreaktors erfolgte eine 32-tägige Testmessung mit einem mineralisch, photokatalytisch aktivem Material (Depositionsgeschwindigkeit von 0,25 cm/s). Während der Messung schwankten die Temperaturen zwischen 20 und 31 °C sowie die relative Luftfeuchte zwischen 25 und 40 %. Für diese Messungen wurde die Umgebungsluft einer angrenzenden Werkstatthalle mit einem Durchfluss von 17 l/min herangezogen, wobei die Atmosphäre je nach Außenkonzentration und Nutzung der Halle eine variierende Konzentration an Stickoxiden aufwies. Um eine kontinuierliche Aussage über den Schadstoffabbau im Reaktor treffen zu können, wurde vor und nach dem Reaktor je ein Horiba APNA 360 zur Vermessung der Eingangs- und Ausgangskonzentrationen von NO, NO₂ und NO_x eingesetzt. Zusätzlich wurden die Umweltbedingungen im Reaktor mit Sensoren für die Temperatur, die Feuchte, den Ab-

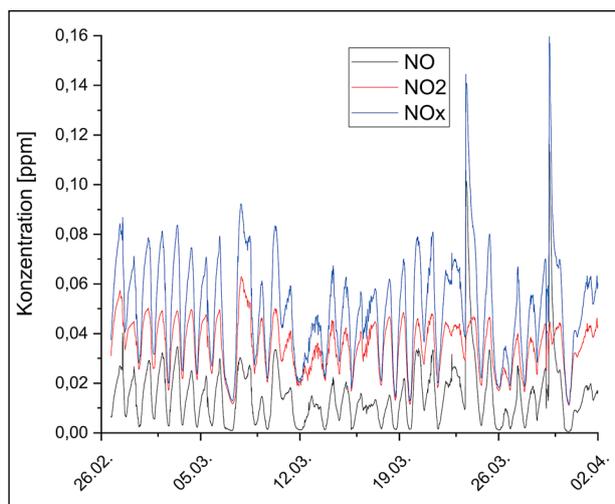


Bild 115: Verlauf der 30-min-Mittelwerte der NO-, NO₂- und NO_x-Konzentration am Eingang des Reaktors

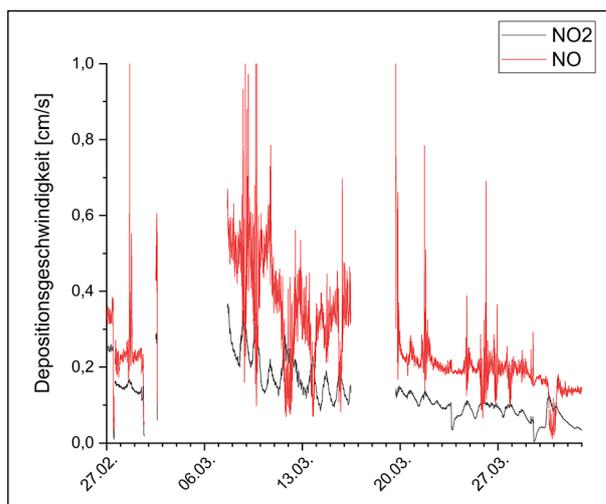


Bild 117: Zeitlicher Verlauf der Depositionsgeschwindigkeiten

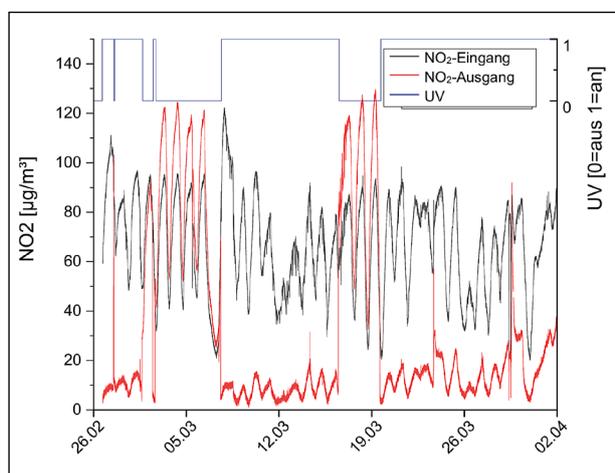


Bild 116: Gegenüberstellung der Ein- und Ausgangskonzentrationen an NO₂ am Reaktor

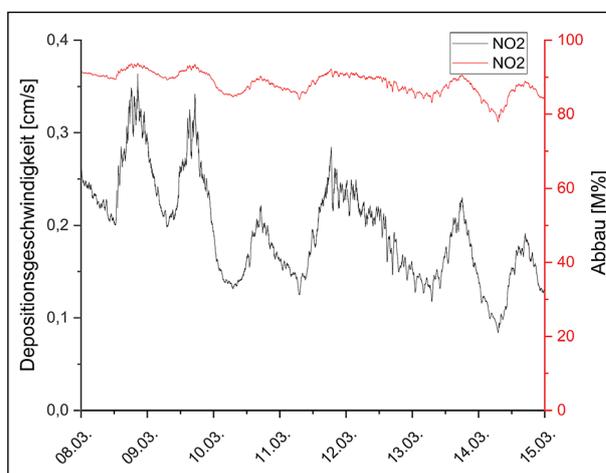


Bild 118: Gegenüberstellung der Abbauraten und der Depositionsgeschwindigkeit des NO₂

solutdruck und die relative UV-Einstrahlung aufgezeichnet. Zur Auswertung der Ergebnisse wurden die 30-min-Mittelwerte herangezogen, wobei Bild 115 zunächst die Stickoxidkonzentrationen am Eingang des Reaktors in Abhängigkeit der Zeit zeigt. In diesem Bild sind anhand der Belastungen deutlich die Tagesgänge mit hohen Konzentrationen infolge des erhöhten Verkehrs und der Nutzung der Werkshalle während des Tages und geringeren Konzentrationen während der Nacht zu sehen, was die Plausibilität der Messung unterstrich.

Der Abbau der Stickoxide ist anhand der Gegenüberstellung der Eingangs- und Ausgangskonzentrationen an NO₂ am Reaktor in Bild 116 dargestellt, wobei diese in der Einheit Mikrogramm pro Kubikmeter angegeben sind. Darüber hinaus wurde der Status der UV-A-Beleuchtung eingefügt (0: aus, 1: ein).

Nach diesen Ergebnissen zeigten sich bei eingeschalteter UV-Lampe erhebliche Reduktionen der NO₂-Konzentrationen, die zudem unterhalb des Grenzwertes von 40 µg/m³ lagen. Dem beschichteten Material kann somit anhand dieser Messungen ein erhebliches Potenzial von ca. 90 % zur Stickoxidreduzierung zugeschrieben werden.

Eine Interpretation der Ergebnisse bei ausgeschalteter UV-Lampe war hingegen nicht ohne weiteres möglich, da zu diesen Zeiten auch der Reaktordeckel geöffnet war und die Konzentrationsunterschiede somit nicht repräsentativ waren.

Für die Abschnitte mit eingeschalteter UV-Bestrahlung wurde jedoch weiterhin die Depositionsgeschwindigkeit für NO und NO₂ berechnet, wofür folgende Annahmen getroffen wurden:

- Die innere Oberfläche der Probe wurde auf 0,5m² geschätzt.

- Das freie Volumen innerhalb des Schaumes beträgt 50% des geometrischen Volumens.
- Die chemische Modellkinetik wurde in erster Näherung als einfacher Plug Flow Reaktor angenommen. Dies ist ein deutlich vereinfachtes Modell, das jedoch zu hohe errechnete Depositionsgeschwindigkeiten erreicht. Für eine tiefergehende, aber auch deutlich aufwendigere Berechnung wäre eine Kaskade von Rührkesselreaktoren denkbar.

Bild 117 zeigt die berechneten Depositionsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit der Zeit.

Nach diesem Bild ergaben sich zum Teil erhebliche Schwankungen der Depositionsgeschwindigkeit über die Zeit, die mit den ebenfalls schwankenden Eingangskonzentrationen in Zusammenhang gebracht werden konnten. Darüber hinaus konnte festgestellt werden, dass sich für die Reaktivität des Probestücks in dem betrachteten Messzeitraum eine Abnahme von ca. 40 % einstellte.

In Bild 118 ist die Depositionsgeschwindigkeit des NO_2 der dazugehörigen Abbaurrate gegenübergestellt.

Anhand dieser Bilder konnte grundsätzlich festgestellt werden, dass die Depositionsgeschwindigkeit über die Zeit deutlich stärker abnahm als die Abbaurrate des NO_2 . Während die Depositionsgeschwindigkeit in einer Woche um bis zu 40 % sank, fiel die Abbaurrate nur um etwa 10 %. Grundsätzlich wurde die Depositionsgeschwindigkeit bei diesen Messungen jedoch auch unterschätzt, was auf die begrenzten technischen Möglichkeiten der Luftansaugung des Reaktors zurückzuführen war. So konnte keine ausreichende Strömungsgeschwindigkeit aufgebracht werden, um die stickoxidbelastete Luft über die gesamte Probe zu verteilen. Die zu geringe Strömungsgeschwindigkeit sowie die hohe Abbaurrate und der dadurch entstehende starke Konzentrationsabfall des Eduktes in der Reaktoratmosphäre führten dazu, dass am hinteren Teil der Probe hin kein Edukt mehr zur Reaktion zur Verfügung stand. Die Oberfläche im hinteren Teil arbeitete somit deutlich ineffizienter als im vorderen Bereich der Probe. Dennoch konnte aus diesen Beobachtungen geschlossen werden, dass für eine hohe Abbaurrate nicht die Depositionsgeschwindigkeit, sondern vielmehr die photokatalytische Oberfläche sowie der Volumenstrom entscheidend sind.

Grundsätzlich war das einfach durchströmte Material jedoch in der Lage, ca. 90 % des eingetragenen NO_2 abzubauen. In den Messungen stellten sich keine messbaren Strömungswiderstände ein, da die Sensorempfindlichkeit von 0,5 mbar nicht erreicht wurde.

Zur weiteren Überprüfung der Messung und der Berechnungen wurde zudem das beim Stickoxidabbau gebildete Nitrat analysiert. Basierend auf den gemessenen Eingangs- und Ausgangskonzentrationen nach Bild 115 wurden für den Zeitraum vom 07.03. bis 16.03. die Konzentrationsunterschiede des NO und des NO_2 bestimmt, wobei in diesem Zeitraum 3,20 mg weniger NO und 12,36 mg weniger NO_2 aus dem Reaktor heraus- als hereinströmten. Unter der Annahme einer stöchiometrischen Umwandlung der ermittelten Massen an NO und NO_2 zu Nitrat (NO_3) ergaben sich 6,61 mg NO_3 aus NO und 16,65 mg NO_3 aus NO_2 , sodass sich eine theoretische Gesamtmenge von 23,26 mg NO_3 ergab.

Zur Bestimmung der tatsächlich gebildeten Menge an Nitrat wurde die Schaummatte in dem betroffenen Zeitraum zweimal mit 100 ml deionisiertem Wasser abgewaschen und die Nitratkonzentration per Ionenchromatographie (Gerät 761 Compact IC der Firma Metrohm) bestimmt. Die Messung ergab in Doppelbestimmung 115,12 mg/l und 114,97 mg/l, woraus sich für den Messzeitraum vom 07.03. bis 16.03. eine Menge von 0,37 mmol und somit 23,01 mg Nitrat auf der Matte ergaben. Somit ließen sich 99 % der berechneten Nitratmenge mithilfe der Ionenchromatographie wiederfinden, wodurch die Plausibilität des Messsystems und der Berechnungen bestätigt wurden.

Im Zusammenhang mit der Analyse der entstehenden Nitratmenge wurde zudem überprüft, ob das Abspülen der Probe Auswirkungen auf die abnehmende Reaktivität hatte. Dabei konnte festgestellt werden, dass durch das beschriebene Abspülen keine Erholung der Reaktivität erfolgte und diese somit nicht auf die Nitratlagerungen zurückzuführen waren.

Grundsätzlich war die Zusammensetzung der Tunnelluft in Bezug auf die Luftfeuchte, die Temperatur und das Verhältnis von NO und NO_2 vergleichbar mit der im Laborversuch verwendeten Luft. Somit ließen sich die im Laborversuch erreichten Ergebnisse auf die für den Tunnel projektierten Katalysatorflächen hochrechnen, wonach in einer Woche

1,8 kg Nitrat in den Reaktoren fixiert werden könnten. Trotz der vergleichbaren Randbedingungen blieb bei diesen Überlegungen zu beachten, dass die Schadgasbelastungen im Tunnel in Spitzenzeiten auch weit höher liegen könnten als im Laborversuch und zudem zusätzliche Schadgase vorliegen könnten, sodass der berechnete Wert lediglich eine Näherung war.

4.4 Stickoxidverteilung im und am Tunnel

Zur Bewertung der Stickoxidverteilung im und um den Tunnel Rudower Höhe wurden im April 2017 zwei Stickoxidmessgeräte am Ende des Tunnels installiert und betrieben (vgl. Kapitel 3.7, Messstation 3 aus Phase 1). Die Daten wurden zwischengespeichert und konnten über Funk ausgelesen werden. Nach einem Einbau der Kassetten in den Tunnel wäre somit über ein Schaltventil die Messung von Stickoxiden im Ansaug- und Ausblasbereich der Luftreinigungskassetten möglich. In Bild 119 ist exemplarisch der Verlauf der Konzentrationen an NO, NO₂ und NO_x über einen Zeitraum von ca. 11 Tagen aufgetragen. Im Diagramm wurde die y-Achse auf 800 ppb begrenzt, obwohl am 28.04.2017 und am 03.05.2017 kurzzeitig NO_x-Werte von über 1000 ppb aufgezeichnet wurden. Auf die Darstellung dieser Extremwerte wurde zugunsten der Anschaulichkeit verzichtet.

Im zeitlichen Verlauf war das Absinken der Emissionen zur Abend- und Nachtzeit bzw. der starke Anstieg am Morgen gut erkennbar. Spitzenwerte erreichten die Emissionen häufig zur Mittagszeit, gelegentlich jedoch bereits zur Zeit des morgendlichen Berufsverkehrs. Des Weiteren schwankte der NO-Wert deutlich stärker als der NO₂-Wert und bedingte so hauptsächlich das Schwanken des NO_x-Wertes. Folglich musste das NO₂/NO_x-Verhältnis zu Zeiten großer Belastung deutlich kleiner sein als bei geringeren Belastungen. Im Allgemeinen lagen die NO-Werte sichtbar über den NO₂-Werten, wobei sie sich um den Tageswechsel angleichen bzw. der NO-Wert den NO₂-Wert sogar unterschritt. Dieses Verhältnis war in der offenen Atmosphäre bei ständiger Durchmischung ungewöhnlich. Da keine Messwerte zu anderen Luftbestandteilen wie Ozon vorlagen, konnte hierzu nur gemutmaßt werden, dass dies darauf zurückzuführen war, dass es im Tunnel aufgrund des fehlenden Austausches mit der Umgebungsluft zu einem eingeschränkten Um-

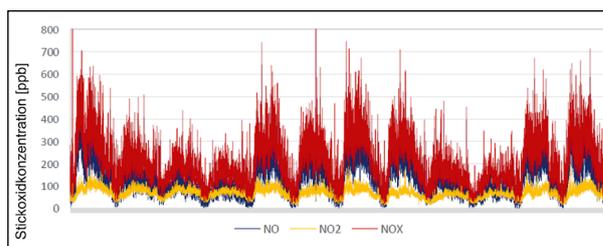


Bild 119: Exemplarischer Verlauf der Konzentrationen an NO, NO₂ und NO_x an der Messstation A113TRHS3 im Tunnel Rudower Höhe über einen Zeitraum von ca. 11 Tagen

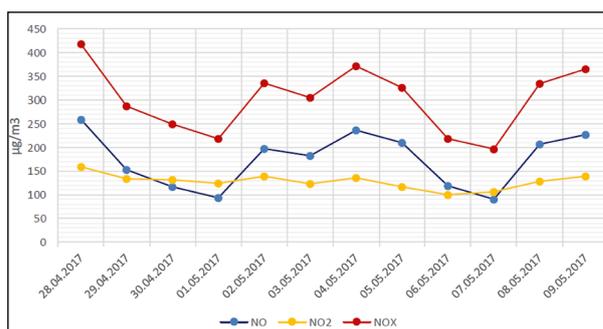


Bild 120: Exemplarischer Verlauf der Konzentrationen der Tagesmittelwerte an NO, NO₂ und NO_x an der Messstation im Tunnel Rudower Höhe über einen Zeitraum von ca. 11 Tagen (Daten umgerechnet auf µg/m³)

satz von NO zu NO₂ kam. Sobald das im Tunnel vorhandene NO das gesamte in den Tunnel eingetretene Ozon durch Oxidation zu NO₂ verbraucht hatte, stieg die NO₂-Konzentration im Vergleich zur NO-Konzentration nur noch langsam an.

In Bild 120 sind die Tagesmittelwerte an NO, NO₂ und NO_x (in µg/m³) über denselben Zeitraum aufgetragen wie in Bild 119.

Die Daten verdeutlichen den Zusammenhang zwischen der Stärke der NO_x-Belastung und dem NO₂/NO_x-Verhältnis. An den Wochenenden lagen die NO-Werte nahe den NO₂-Werten und unterschritten diese an den Sonn- und Feiertagen (30.04., 01.05. und 07.05.). Wählte man hingegen die Einheit ppb zur Darstellung aus, lagen die NO₂-Werte deutlich unter den NO-Werten und wurden nicht unterschritten. Dies ist die Folge der verschiedenen Umrechnungsfaktoren von NO (1,247 µg/m³ = 1 ppb) und NO₂ (1,912 µg/m³ = 1 ppb). Interessant war, dass die NO-Werte am 01.05. am deutlichsten unter den NO₂-Werten lagen. Dies war wahrscheinlich die Folge des geringen Verkehrsaufkommens am Feiertag. Auch die bereits genannte Gleichmäßigkeit des NO₂-Wertes wird in der Abbildung nochmals verdeutlicht.

Die Gesamtmittelwerte über den zuvor dargestellten Zeitraum betragen:

- NO: 173 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (139 ppb),
- NO₂: 130 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (68 ppb),
- NO_x: 395 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (207 ppb).

Zusätzlich zu den Messungen der Stickoxidkonzentrationen im Tunnel wurden auch Messungen mit modifizierten Palmes-Tubes (Passivsammler) zur Beurteilung von NO₂-Hotspots am südlichen Tunnelausgang Rudower Höhe durchgeführt. Mit diesen modifizierten Palmes-Tubes lassen sich über die Messdauer integrierte NO₂-Mittelwerte bestimmen, die bei geeigneter Anordnung wiederum eine Aussage über die NO₂-Verteilung in der Umgebung erlauben. Diese Passivsammler setzen sich aus einem Diffusionsrohr aus PMMA sowie einer End-, Eingangs- und Schutzkappe aus Polyethylen (PE) geringer Dichte zusammen, die entsprechend Bild 121 zusammengesteckt wurden. In der Endkappe befindet sich ein Filterpapier, das zuvor in einer Lösung aus Triethanolamin (TEA) getränkt wurde und als Sammelmedium für das NO₂ dient. Die NO₂-Moleküle gelangen über die gestanzte Eingangskappe in das Diffusionsrohr, wobei die Öffnung zur Vermeidung von Turbulenzen innerhalb des Rohrs durch ein überspanntes Teflonband geschützt wird. Die Schutzkappe dient zum Schließen des Passivsammlers für den Transport und die Lagerung. Aufgrund dieses Aufbaus stellt sich in den Sammlern ein Konzentrationsgefälle an NO₂ ein, da unmittelbar an der Eingangskappe die NO₂-Konzentration der Umgebungsluft vorliegt. An der Endkappe des Rohrs werden hingegen alle vorliegenden NO₂-Moleküle an dem Sammelmedium gebunden, sodass an dieser Stelle eine NO₂-Konzentration von Null vorliegt. Dieses Gefälle führt zu einer kontinuierlichen Diffusion der NO₂-Moleküle durch das Rohr zum Sammelmedium.

Zur Auswertung der Passivsammler werden die an dem Filterpapier gebundenen Komplexe zunächst in eine wässrige Lösung überführt, die anschließend wiederum in eine Lösung aus Sulfonilamid und NEDD (N-(1-Naphthyl)-ethylendiamindihydrochlorid) gegeben wird. Dabei stellt sich eine Farbreaktion ein, wobei die Intensität der resultierenden Farbe mithilfe eines Photometers (Wellenlängenbereich 540 ± 10 nm; Gerät der TU Berlin: Shimadzu UV-1201) erfasst werden kann. Nach einer vorherigen Kalibrierung erlaubt die Intensität eine direkte Aussage über die Konzentration der gesammelten NO₂-Ionen und diese wiederum über den NO₂-Mittelwert der Umgebung.



Bild 121: Bestandteile der Passivsammler

Im Rahmen dieses Projekts wurden im Zeitraum vom 29.04. bis 13.05.2017 sowohl Passivsammler für eine Expositionszeit von 14 Tagen sowie für 7 Tagen herangezogen, wobei die Sammler für die kürzere Expositionszeit nach 7 Tagen ausgetauscht wurden. Entsprechend der unterschiedlichen Expositionszeiten wurden auch unterschiedliche Längen der Diffusionsröhren verwendet, wobei für eine Expositionszeit von 14 Tagen eine Länge von 10 cm und für eine Expositionszeit von 7 Tagen eine Länge von 5 cm gewählt wurde. Durch die Wahl dieser Rohrlängen wurde sichergestellt, dass aufgrund der unterschiedlichen Diffusionsdauer eine Überladung des Sammelmediums vermieden wurde.

Zur Bewertung der NO₂-Konzentrationen im Umfeld des Tunnels Rudower Höhe wurden in unmittelbarer Nähe des Objekts 13 Beprobungspunkte betrachtet, von denen elf in Bild 122 dargestellt sind (Höhe über Fahrbahn: 1 bis 5 m). Diese elf Messpunkte sind radial um ein Tunnelende angeordnet. An jeder Beprobungsstelle wurden jeweils drei Sammler mit einer Expositionszeit von 14 Tagen und drei Sammler mit einer Expositionszeit von 7 Tagen berücksichtigt. Bild 123 zeigt die Anordnung der Passivsammler am Beispiel des Beprobungspunkts 3, wobei die Passivsammler durch eine zusätzliche Abdeckung vor Regen- und Windeinflüssen geschützt waren. Die Sammler des Beprobungspunkts 8 wurden jedoch trotz Abdeckung durch die Witterungseinflüsse stark beschädigt, weshalb dieser Messpunkt für die weitere Auswertung verworfen wurde.

Weiterhin wurden an dem Beprobungspunkt 1 Temperatur- und Feuchtemessungen mit Datenloggern UT330C der Firma UNI-T aufgenommen. Aufgrund ungünstiger Geländeverhältnisse ließ sich in unmittelbarer Umgebung des Tunnels jedoch keine geeignete Stelle für die Messung von Temperatur- und



Bild 122: Beprobungspunkte 1 bis 11 über Fahrbahn [Quelle: Clemens Ehm]



Bild 123: Detail eines Beprobungspunktes (Punkt 3)

Feuchtemessungen finden, da diese entweder nicht zugänglich oder der direkten Sonne ausgesetzt waren. Aus diesem Grund wurden für den Vergleich der Temperatur- und Feuchtebedingungen im Tunnel und in unmittelbarer Umgebung die Messdaten einer WESTE-Messstation (Wetterdaten und -statistiken Express) des Deutschen Wetterdienstes in 4 km Entfernung herangezogen.

Die Beprobungspunkte 12 und 13 befanden sich in ca. 300 m Entfernung vom Tunnel, um mit diesen Referenzwerte für die straßennahe Belastung ohne Zusatzbelastung durch den Tunnel zu bestimmen.

Bezüglich der Messergebnisse zeigen das Bild 124 und Bild 125 die im Tunnel und in unmittelbarer Nähe zum Tunnel vorliegenden Temperaturen und Luftfeuchten in dem betrachteten Zeitraum vom

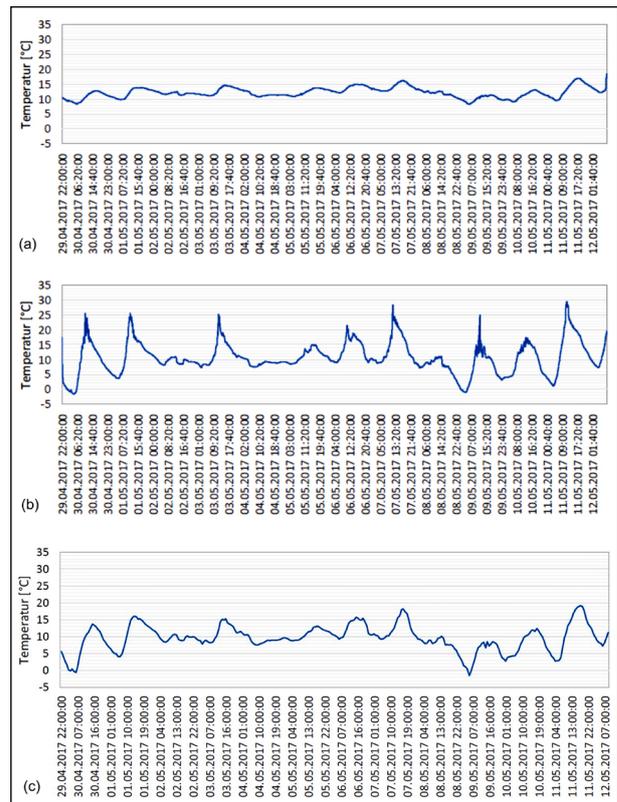


Bild 124: Temperaturverlauf: (a) im Rahmen des Projekts gemessen im Tunnel und (b) der unmittelbaren Umgebung sowie (c) der WESTE-Messstation

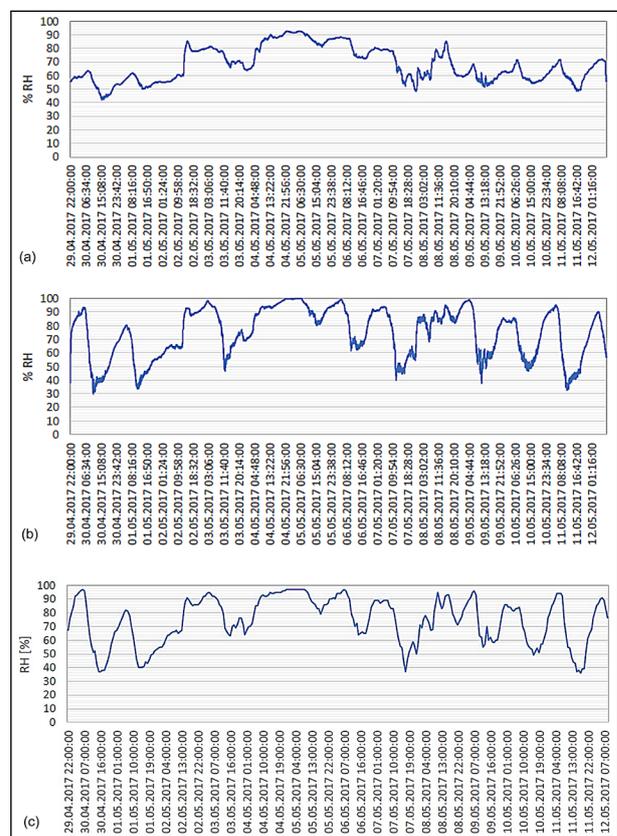
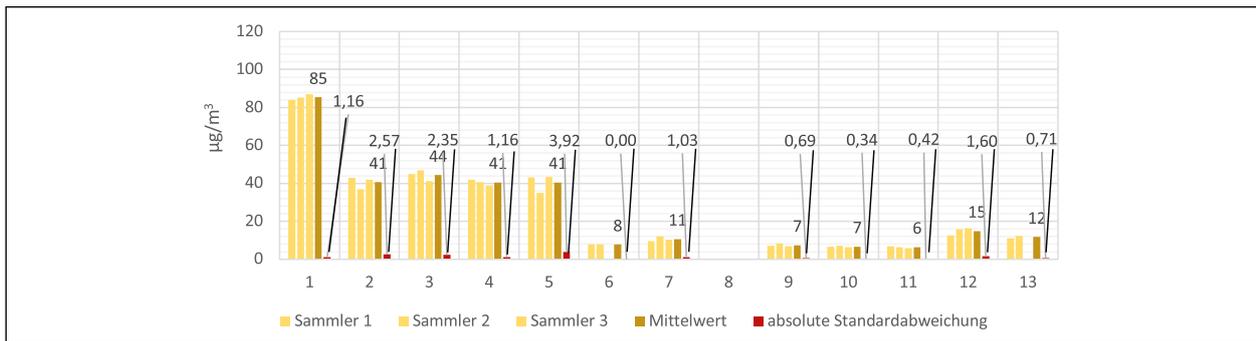
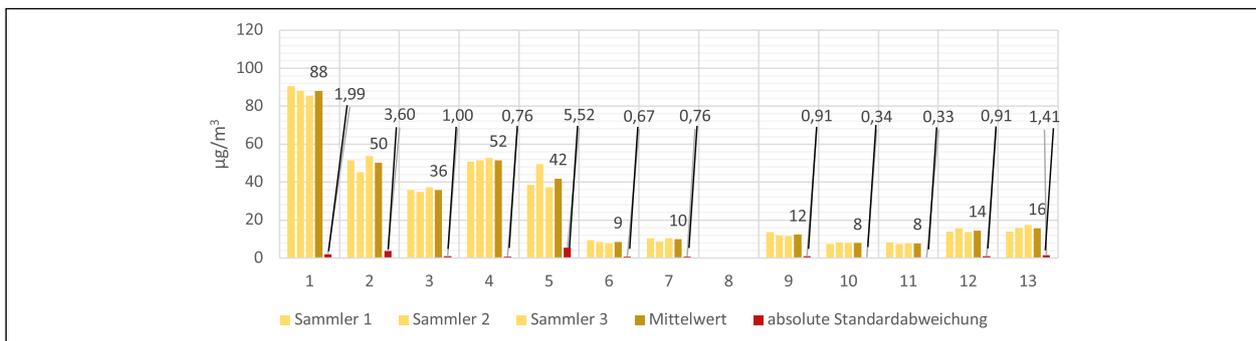
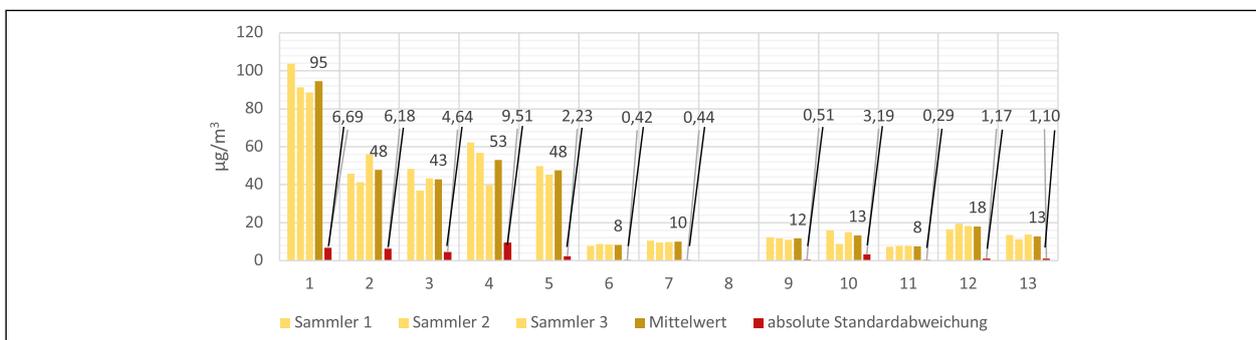


Bild 125: Relative Luftfeuchte: (a) im Rahmen des Projekts gemessen im Tunnel und (b) der unmittelbaren Umgebung sowie (c) der WESTE-Messstation

Bild 126: NO₂-Konzentrationen an den Beprobungspunkten von Passivsammlern mit 5 cm Länge (Woche 1)Bild 127: NO₂-Konzentrationen an den Beprobungspunkten von Passivsammlern mit 5 cm Länge (Woche 2)Bild 128: NO₂-Konzentrationen an den Beprobungspunkten von Passivsammlern mit 10 cm Länge

29.04. bis 13.05.2017. Anhand dieser Abbildungen wird deutlich, dass Schwankungen der Temperatur und der Luftfeuchte innerhalb des Tunnels deutlich geringer waren als außerhalb. Dies war durch die deutlich exponiertere Lage des Messpunkts außerhalb des Tunnels zu erklären, da dieser der direkten Sonnenstrahlung und Witterung ausgesetzt war und somit ein verstärktes Aufheizen sowie ein beschleunigtes Trocknen und Befeuchten auftrat. Durch die direkte Sonneneinstrahlung ließen sich auch die markanten Temperaturspitzen erklären.

Trotz der unterschiedlichen Intensitäten ließen sich dennoch vergleichbare Entwicklungen der Temperatur und der relativen Feuchtigkeit innerhalb des Tunnels sowie in der unmittelbaren Umgebung und im Vergleich zu den WESTE-Messdaten feststellen.

Die mit den Passivsammlern ermittelten NO₂-Konzentrationen sind in Bild 126 bis Bild 128 dargestellt.

Bei der Betrachtung zeigte sich zunächst, dass die Passivsammler mit 10 cm Länge im Vergleich zu den kürzeren Passivsammlern zu Mehrbefunden neigten (siehe Beprobungspunkte 1, 4, 5, 9, 10 und 12) und Werte mit größerer Varianz aufwiesen (insbesondere die Beprobungspunkte 1 bis 5). Insgesamt fiel der Fehler jedoch klein aus und die Verteilung der Messwerte stimmte im Vergleich aller Reihen sehr gut überein. Der Maximalwert im Bereich von 90 µg/m³ wurde stets am Beprobungspunkt 1 gemessen, wobei der Wert ca. ein Drittel unterhalb der aktiv gemessenen Belastung von im Mittel 128 µg/m³ für die betrachteten zwei Wochen lag.

Die innerhalb der Lärmschutzwand gelegenen Beprobungspunkte 2 bis 5 wiesen vergleichbare Werte auf und lagen mit 36 bis 53 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ zwischen dem Maximalwert und den Referenzwerten (12 bis 18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ an Beprobungspunkten 12 und 13). Noch unter den Referenzmesspunkten lagen die in der Umgebung gemessenen Belastungen an den Messpunkten 6 bis 11 von 6 bis 13 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Auffällig war außerdem, dass die Schadgasbelastung bei den kürzeren Passivsammlern (5 cm Länge) in der zweiten Woche linksseitig stärker war (Probenpunkte 2, 4, 6 und 7), während sich in der ersten Woche eine gleichmäßigere Verteilung auf beide Seiten erkennen ließ (vgl. Bild 126 und Bild 127). Auf den ersten Blick schien die Belastung in der Umgebung bei den Sammlern mit 5 cm Länge in der zweiten Woche nicht linksseitig erhöht zu sein. Beachtet man jedoch, dass Punkte vergleichbarer Positionen (6 und 11, 7 und 10 sowie 8 und 9) jeweils linksseitig überwiegen (außer 9, da Probenpunkt 8 entfällt), wirkt diese Aussage gerechtfertigt.

Bei den Passivsammlern mit einer Länge von 10 cm war die Verteilung dagegen zwar homogener, die Punkte 2 bis 5 variierten dennoch um bis zu 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Weiterhin hatten diese Sammler an den meisten Punkten (1, 2, 4, 5, 6, 9, 10, 11 und 13) geringfügig höhere NO_2 -Werte als die 5 cm langen Sammler in der ersten Woche aufgezeichnet (vgl. Bild 128).

Anhand dieser Messwerte zeigte sich eine deutliche zeitliche und räumliche Abhängigkeit der NO_2 -Verteilung im und um das Tunnelende, wobei die zeitliche Komponente durch das aktive Messgerät am Beprobungspunkt 1 und die räumliche Komponente über die Passivsammler erfasst wurde. Ein Vergleich der beiden Messmethoden am Messpunkt 1 zeigte für den betrachteten Zeitraum, dass die ermittelte NO_2 -Konzentration der Passivsammler bei ca. 74 % des Messwerts des Aktivmessgeräts lag, wobei die Ergebnisse des Aktivmessgeräts als realitätsnäher bewertet wurden. Die aufgetretene Diskrepanz kann verschiedene Ursachen haben, die nur schwer zu quantifizieren sind. Beispiele für mögliche Einflussfaktoren auf die passive Sammlung könnten die Temperatur, mögliche Verschmutzungen der Teflonmembranen der Sammler oder auch pH-Wert-bedingte Fehler bei der Analytik sein. Trotz der insgesamt geringeren Absolutwerte der gemessenen NO_2 -Konzentration erlaubten die Passivsammler dennoch eine Bewertung der relativen, räumlichen Verteilung der Stickoxidbelastung.

In diesem Zusammenhang konnten folgende Punkte festgestellt werden:

- Die höchste NO_2 -Konzentration wurde im Tunnelausgang gemessen.
- Diese Konzentration halbierte sich an den übrigen Messstationen, die sich in unmittelbarer Nähe zum Tunnelausgang befanden.
- Dennoch zeigten sich die Konzentrationen in unmittelbarer Nähe um den Tunnelausgang höher als die Referenzwerte, die in ca. 300 m Entfernung zum Tunnel gemessen wurden und die Belastung des Verkehrs ohne den Einfluss des Tunnels wiedergeben.
- In der Umgebung des Tunnels außerhalb des Straßenbereichs lagen die gemessenen NO_2 -Konzentrationen unterhalb dieser Referenzwerte.

Aus diesen Ergebnissen konnten verschiedene Erklärungsansätze für die Verteilung der Stickoxide abgeleitet werden. So deuteten die Temperaturmessungen an, dass die Temperatur am Tunnelausgang tendenziell höher ist als die Umgebungstemperatur und somit eine konvektive Bewegung der Luftmassen verursacht wurde. Demnach ließ sich folgende Vermutung aufstellen: Die schadstoffbelastete Luft verteilte sich hinter dem Tunnelausgang zunächst, da der Querschnitt außerhalb des Tunnels breiter als der Querschnitt der Röhre ist. Während die sich schnell bewegende Luft aus dem Tunnel in die über ihr stehende bzw. langsamere Luft zwischen den Lärmschutzwänden aufzusteigen begann, entstanden Verwirbelungen, die eine kurzzeitig starke Verteilung bedingten, was sowohl die Halbierung der NO_2 -Konzentration zwischen den Beprobungspunkten 1 und 2 als auch die Ähnlichkeit der Messwerte an den Punkten 2 bis 5 erklären würde. Der Auftrieb der Tunnelluft könnte je nach Temperaturdifferenz unterschiedlich stark sein und die Schadstofffahne dementsprechend in unterschiedlichen Entfernungen zum Tunnelausgang an den Positionen der Punkte 2 bis 5 eintreffen. Auch ist ein gleichmäßig aufsteigender und sich verbreiternder Luftstrom über die Punkte 2 bis 5 denkbar, in dem sich Verteilung und Umwandlung von NO zu NO_2 die Waage halten.

Weiterhin ließ sich anhand der Passivsammler mit einer Expositionszeit von jeweils 7 Tagen ein Einfluss der Windbedingungen auf die NO_2 -Verteilung feststellen. So wurde in der ersten Woche bei vorwiegend Ostwind eine gleichmäßige Verteilung

festgestellt, während sich bei variierenden Windrichtungen in der zweiten Woche linksseitig eine höhere Konzentration einstellte. Dies erschien zunächst widersprüchlich, wobei es jedoch einen Erklärungsansatz für dieses Verhalten gibt. Grundsätzlich liegt der Ausgang der Schönefeld-Röhre linksseitig im Tunnel, während der Eingang der Neukölln-Röhre rechtsseitig liegt. Die Belastung sollte demnach ohne Windeinfluss linksseitig größer sein, da die belastete Luft nur aus der Schönefeld-Röhre austritt. Genau dieses Verhalten war in der zweiten Woche zu erkennen, was gleichzeitig für ein weniger turbulentes Strömen der Tunnelluft nach dem Austritt sprach.

In der ersten Woche wäre bei Ostwind somit theoretisch zunächst eine noch stärkere linksseitige Orientierung der Schadstofffahne zu erwarten gewesen, was durch die Messergebnisse jedoch nicht bestätigt wurde. Die stattdessen festgestellte homogene NO_2 -Verteilung könnte möglicherweise durch ein Überströmen des Tunnelendbereichs verursacht werden, was schematisch in Bild 129 gezeigt ist. Unmittelbar am Tunnelende befinden sich Lärmschutzwände, bei deren Überströmung eine Walzenbildung einsetzen und somit eine Verteilung der Stickoxide bewirken könnte.

Für eine tiefere Bewertung der Windeinflüsse wäre jedoch eine hoch aufgelöste Windmessung erforderlich, die eine hohe Zahl von Messpunkten und eine deutlich längere Messdauer einschließen sollte.

In der weiteren Umgebung des Tunnelendes (Beprobungspunkte 6 bis 11) schien die starke NO_2 -Belastung aus dem Tunnel jedoch nicht wirksam zu werden. Es ist sogar möglich, dass die dort gemessene Belastung allein der Hintergrundbelastung entsprach und die Mehrbelastung aus dem Tunnel an dieser Stelle nicht ankam. So könnten sich die Stickoxide beispielsweise in dem Bereich zwischen den Lärmschutzwänden verteilen und dort langsam aufsteigen. Da dieser vergleichsweise lang ist, verringerte sich die Konzentration, bevor die Stickoxide in die weitere Umgebung traten. Reichte die Temperaturdifferenz zwischen der Luft innerhalb der Lärmschutzwände und der Umgebungsluft nicht aus, um über die Lärmschutzwände aufzusteigen, könnte diese durch den stetigen Verkehr und die fahrzeuginduzierte Luftströmung vom Tunnel in größere Entfernungen transportiert worden sein. In diesem Fall hätten sich die Stickoxide außerhalb des

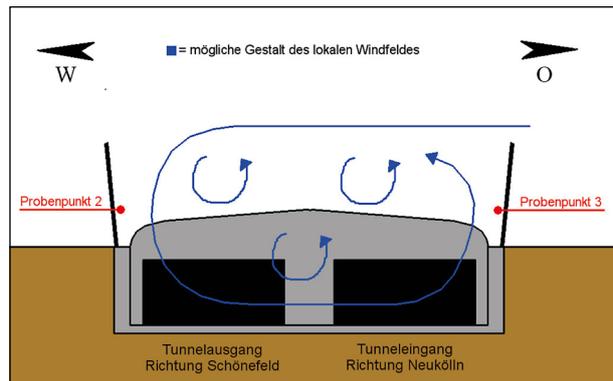


Bild 129: Querschnitt mit möglicher Strömung in der ersten Messwoche

bei der Messung berücksichtigten Bereichs verteilt und wären somit nicht erfasst worden.

Nach diesen Untersuchungen scheinen die Passivsammler eine grundsätzlich geeignete Methode zu sein, um die räumliche Verteilung der NO_x -Konzentration zu erfassen. Für eine möglichst detaillierte Erfassung sollte die passive Sammlung jedoch stets mit einem Aktivmessgerät sowie einer umfangreichen meteorologischen Datenaufzeichnung begleitet werden. Anhand der in diesem Projekt durchgeführten Messungen konnten somit verschiedene Verteilungstheorien für das Stickstoffdioxid am Tunnelende aufgestellt werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Das Projekt zielte in der ersten Phase darauf ab, ein geeignetes geschlossenes System zu entwickeln, das einen Photokatalysator und geeignete Leuchtmittel enthielt, mit denen Stickoxide aus dem Straßenverkehr im Tunnel Rudower Höhe in Berlin in einem relevanten Maße (15 %) abgebaut werden könnten. Die Entwicklungen wurden durch verschiedene Modellierungen und kontinuierliche Nullmessungen im Tunnel begleitet.

Zu Beginn des Projektes wurden zahlreiche Beschichtungsversuche durchgeführt. Hierbei wurden Glasfasermatten unterschiedlicher Steifigkeit und Materialzusammensetzungen getestet. REM-Aufnahmen zeigten eine gute Beschichtung des Untergrundes mit Titandioxid, der ermittelte NO -Abbau war ebenfalls gut. Da jedoch der Abbau von NO_x hinter den Erwartungen zurückblieb, wurden die Arbeiten dazu innerhalb der Phase 1 abgeschlossen.

Alternativ wurden in Laboruntersuchungen frei erhältliche photokatalytische Fassadenfarben verwendet sowie eine eigene photokatalytisch aktive Beschichtung entwickelt, die auf einem zementgebundenen Photokatalysator basierte. Zudem wurde eine photokatalytisch aktive Glaswolle getestet, die für den Abbau von Luftschadstoffen in Innenräumen beworben wurde.

Die unterschiedlichen Materialien wurden auf verschiedene Untergründe aufgetragen und einheitlich vorbewittert (Normklima, 20 °C und 65 % relative Luftfeuchtigkeit unter UV-A-Licht und wiederholtes Abwaschen mit Wasser). Proben unterschiedlichen Alters und damit unterschiedlicher Vorkonditionierung wurden anschließend je nach Materialbeschaffenheit in einem der verschiedenen Reaktoren auf den Abbau von NO, NO₂ und NO_x getestet. Die Messungen erfolgten in Anlehnung an ISO 22197-1 mit dem Chemilumineszenzverfahren.

Die TiO₂-haltige Glaswolle zeigte eine sehr hohe Effizienz im Abbau von NO, wobei dieses jedoch quantitativ nahezu vollständig in NO₂ umgewandelt wurde, sodass insgesamt kein NO_x-Abbau stattfand. Aufgrund dieses ungünstigen Verhaltens beim Stickoxidabbau wurde das Material bei den weiteren Arbeiten nicht mehr berücksichtigt. Weiterhin stellten sich auch die Fassadenfarben als nicht ausreichend aktiv heraus. In Bezug auf die Fassadenfarben musste erwartungsgemäß eine Vorkonditionierung erfolgen, sodass die TiO₂-Pigmente durch eine photokatalytische Zersetzung von dünnen Polymerfilmen befreit werden, damit die reine Katalysatoroberfläche für die anschließende Adsorption und den photokatalytischen Abbau von Stickoxidmolekülen zur Verfügung stehen konnte. Nach längeren Vorbewitterungen von ca. einer Woche zeigten sich jedoch ebenfalls keine zufriedenstellenden photokatalytischen Abbauraten. Am wirkungsvollsten erwiesen sich Eigenentwicklungen, die aufgrund der eigenen Rezeptur auch in ihren Anwendungs- und Wirkungseigenschaften verändert werden konnten. Diese hatten den Vorteil, dass sie auch ohne eine Vorbewitterung aktiv waren, was für die spätere Anwendung in den Tunnelkassetten eine aufwendige Vorbehandlung überflüssig machte.

Da sich im weiteren Verlauf des Projektes die in die Tunnelkassetten einzubringende photokatalytische Oberfläche als wesentliches Kriterium für den erreichbaren Wirkungsgrad erwies, wurden verschiedene Wege erprobt, die Oberfläche in den Kassetten

zu erhöhen: Raue Oberflächen, Netze und letztendlich auch beschichtete offenporige Schäume. Nach verschiedenen Modellrechnungen und auch Versuchen bis in den Technikumsmaßstab erwiesen sich die offenporigen Schäume als zukunftsfähige Lösung. Um die Daten des photokatalytischen Abbaus von Stickoxiden auch in die Modellrechnungen einfließen zu lassen, wurden aus den Messdaten in der Regel Depositionsgeschwindigkeiten berechnet.

Um die im ISO-Test hochaktiven Proben unter realistischen Bedingungen im Technikumsmaßstab vermessen zu können, wurde im ersten Projektabschnitt ein Teststand entwickelt, gebaut und eingesetzt, der Verbrennungsabgase bei einem Volumenstrom von bis zu 700 m³/h unter Bedingungen bereitstellte, die der Tunnelluft ähnlich waren. Mit dem Messstand konnten die Volumenströme und Stickoxidkonzentrationen überwacht und gesteuert werden. Herzstück des Teststandes war ein Prototypreaktor, in den Katalysatormaterialien in unterschiedlichen Formen eingebaut wurden. Der Aufbau des Reaktors wurde im Laufe des Projektes immer wieder dem aktuellen Kenntnisstand angepasst. Der Vergleich zwischen realen Messungen der verschiedenen Einbauten und den jeweiligen Simulationen des Abbaus ergaben gute Übereinstimmungen. Die im ISO-Test aktivsten Proben wurden für die Versuche im Testreaktor auf unterschiedliche Trägermaterialien aufgetragen. Kunststoffschaum stellte sich als das effizienteste Material heraus, um hohe Abbauraten im Prototypreaktor zu erreichen.

Um mehr belastbare Daten über die Bedingungen im ausgewählten Tunnel zu gewinnen, wurden an drei Stellen im Tunnel Messgeräte zur Überwachung der Stickoxide, CO, CO₂ und der meteorologischen Parameter eingebaut. Zusätzlich wurden auch die Verkehrsdaten und die Feinstaubbelastung erfasst sowie die Luftgeschwindigkeit im Tunnel gemessen (aus messtechnischen Gründen jedoch in der Nähe der Tunnelwandung).

Da vor dem Einbau der Tunnelkassetten in Phase 2 des Projektes verlässliche Daten über die prognostizierte Wirksamkeit der photokatalytischen Maßnahmen gewonnen werden sollten, war die Modellierung sowohl der Wirkung der Tunnelkassetten mit unterschiedlichen Einbauten selbst, aber auch der Auswirkung der Tunnelkassetten im Tunnel Gegenstand des Projektes. Erkenntnisse aus den Simulationen führten im Laufe verschiedener Entwick-

lungsstufen der Reaktoreinbauten zu einer erheblichen Steigerung der Abbaurrate des Testreaktors. Es zeigte sich zumeist eine gute Übereinstimmung der photokatalytischen Wirkung der Tunnelkassetten-Modelle, die im Technikum vermessen wurden, mit den Modellrechnungen.

Die Bedingungen im Tunnel wurden ohne und mit Tunnelkassetten modelliert, um auf die Effizienz der im Projekt geplanten Kassetten schließen zu können bzw. die für die vereinbarte NO-Minderung im Tunnelausgang von 15 % notwendige Anzahl von Tunnelkassetten zu ermitteln. Dabei zeigte sich, dass die notwendige Anzahl der Tunnelkassetten in erster Näherung proportional zur Längsströmungsgeschwindigkeit im Tunnel war, weshalb dazu exakte Daten erforderlich waren. Es wird daher für weitere Untersuchungen empfohlen, den theoretisch nach HERZKE (1972) bestimmten Wert für die Tunnelluftgeschwindigkeit messtechnisch zu verifizieren, da die eingebauten Strömungssensoren nur einen ersten Orientierungswert liefern konnten.

Auf Grundlage der Versuche und Modellierungen wurde eine Tunnelkassette für die photokatalytische Luftreinigung konzipiert. Die Innenmaße der Tunnelkassette betragen $1,5 \times 3 \times 0,4 \text{ m}^3$. In dieser Tunnelkassette waren drei Lüfter mit einem Lüftervolumenstrom von je $1.500 \text{ m}^3/\text{h}$ und 13 Filterschaummatten vorgesehen, wobei die photokatalytische Oberfläche 119 m^2 betrug. Aus diesen Angaben ergab sich eine theoretische Schadstoffabbaurate für eine Tunnelkassette von $R_{TK} = 36,7 \%$. Basierend auf dieser Abschätzung sollten im Tunnel Rudower Höhe 100 Tunnelkassetten je zur Hälfte rechts und links an der Tunnelwand ohne Abstand voneinander am Ende des Tunnels platziert werden. Nach den Berechnungen war damit zu rechnen, dass die Stickoxidkonzentration am Ausgang des Tunnels bei einer Tunnelluftgeschwindigkeit von $3,7 \text{ m/s}$ um 15 % und bei einer Tunnelluftgeschwindigkeit von $5,6 \text{ m/s}$ um 10 % abnimmt.

Basierend auf den Strömungsmessungen im Tunnel und der Einbeziehung der Strömungsmessungen durch den Tunnelbetreiber ergaben sich für die Luftströmung im Tunnel ein Maximalwert von $5,6 \text{ m/s}$ und ein Minimalwert von $0,9 \text{ m/s}$. Diese Werte korrelierten gut mit dem Modell. Der durchschnittliche Stundenmittelwert der Strömung betrug $3,1 \text{ m/s}$ und der Maximalwert $4,3 \text{ m/s}$.

Es wäre denkbar, die geringe Abbaurrate im Tunnel bei den Strömungsspitzenwerten durch eine gezielte Ausblasrichtung aus den Tunnelkassetten zusätzlich zu verbessern. Dadurch könnte voraussichtlich auch bei den im Tunnel zu erwartenden schlechtesten Bedingungen eine Abbaurrate von 15 % erreicht werden.

Grundsätzlich ist dabei anzumerken, dass die für die Berechnung angeführte Strömungsgeschwindigkeit von $5,6 \text{ m/s}$ ein Spitzenwert ist, der nur für kurze Zeiten auftritt. Bei der mehrheitlich deutlich geringeren Strömungsgeschwindigkeit im Laufe des Tages dürfte sich hingegen eine höhere Abbaurrate einstellen, sodass selbst ohne gezieltes Ausblasen der Tunnelkassetten mit einer mittleren Abbaurrate zu rechnen ist, die den Zielvorgaben einer Reduzierung von 15 % entspricht.

Mit der erarbeiteten Lösung wurde ein Ansatz gefunden, mit dem wissenschaftlich anhand von Labormessungen und Modellrechnungen nachgewiesen wurde, dass eine Umsetzung in der Phase 2 zu empfehlen war.

Für die Fortführung des Projektes wurde eine Umsetzung in zwei Stufen vorgeschlagen. In der ersten Stufe sollte anhand von 70 Kassetten eruiert werden, ob sich die Ergebnisse der Labormessungen und der Modellrechnung im praktischen Einsatz ebenfalls erzielen ließen. Falls dies erfolgreich wäre, sollten in einer zweiten Stufe weitere 30 Kassetten installiert werden, um das maximal erreichbare Potenzial der gefundenen Lösung ausschöpfen zu können. Dieses stufenweise Vorgehen würde das wirtschaftliche Restrisiko des Projektes reduzieren.

An dieser Stelle sei darauf verwiesen, dass aufgrund des in wenigen Jahren anstehenden Verbotes von quecksilberhaltigen Leuchtstoffröhren die Tunnelkassetten in der bisher geplanten Form nicht mehr betrieben werden können, da die entsprechenden UV-Röhren ab 2021 nicht mehr verkauft werden dürfen. Eine Umstellung auf alternative Beleuchtungseinheiten erschien aus Kostengründen für dieses Projekt jedoch nicht mehr sinnvoll, sollte aber für zukünftige Projekte beachtet werden.

Die Umsetzung des in Phase 1 erarbeiteten Konzepts in die Praxis war das Ziel der Phase 2, die sich wiederum in die Teilphase 2a mit dem Bau und dem Testbetrieb von zehn Tunnelkassetten im

Tunnel Rudower Höhe und die Teilphase 2b mit dem Bau und dem Betrieb der geplanten 100 Tunnelkassetten aufteilte. Bau, Einbau und Betrieb der Tunnelkassetten konnten aus projektinternen Gründen jedoch nicht realisiert werden. Aus diesem Grund konnte die Phase 2 des Projekts lediglich in sehr geringem Umfang umgesetzt werden. Um die Funktionsfähigkeit des in Phase 1 erarbeiteten Konzepts der Tunnelkassette nachweisen zu können, wurde eine Demonstrator-Tunnelkassette von der TU Berlin hergestellt. Durch den über mehrere Monate getesteten Betrieb konnte die grundsätzliche Funktionalität dieser Demonstrator-Tunnelkassette nachgewiesen werden. Nach einer längeren Betriebszeit von mehreren Monaten zeigte sich die Leistungsfähigkeit zum Abbau der Stickoxide noch nicht in der erwarteten Größenordnung, was an Alterungsprozessen der photokatalytisch beschichteten Schaumstoffmatten liegen könnte.

Neben dem Bau und Betrieb der Tunnelkassetten waren in der Phase 2 zudem verschiedene Weiterentwicklungen der Materialien und der Messtechnik vorgesehen. In Bezug auf die Eigenschaften der photokatalytischen Beschichtung konnte keine weitere Optimierung der Zusammensetzung gefunden werden, da eine Verbesserung der mechanischen Eigenschaften immer auch zu einer Verschlechterung der photokatalytischen Eigenschaften führte. Untersuchungen an länger gelagerten photokatalytisch beschichteten Schaumstoffmatten haben jedoch gezeigt, dass der Kunststoff der Schaumstoffmatten aus noch ungeklärten Gründen versprödet und so die Stabilität der Schaumstoffmatten deutlich verschlechtert wird. Aus diesem Grund sollte in zukünftigen Arbeiten eine Anpassung zwischen Beschichtung und Kunststoff angestrebt werden, die sich beispielsweise in einer sperrenden Zwischenschicht auf dem Schaumstoff zeigen könnte.

Zudem konnte der Beschichtungsprozess selbst effizienter gestaltet werden, sodass dieser auch in größerem Umfang durchgeführt werden kann. Als effektivste Lösung hat sich dabei das Tauchen der Schaumstoffmatten gezeigt, wobei überschüssiges Material durch Auswalzen, Ausschleudern oder Ausschlagen entfernt werden konnte.

Um Alterungseffekte der Schaumstoffmatten beim Betrieb messen zu können, wurde weiterhin ein spezieller Reaktor für Labormessungen konzipiert und gebaut. In diesem Reaktor konnten Proben

wie in einer Tunnelkassette von beiden Seiten mit UV-Licht bestrahlt werden, während sie von einem Schadgas durchströmt wurden.

Weiterhin erfolgten im Bereich des Tunnels und der näheren Umgebung umfangreiche Messungen. Mithilfe der bereits in Phase 1 installierten aktiven Stickoxidmessgeräte konnten dabei über einen längeren Zeitraum plausible Ergebnisse gewonnen werden. So zeigten sich beispielsweise an Sonn- und Feiertagen geringere NO_x -Konzentrationen, was auf die geringere Verkehrsbelastung zurückzuführen war.

Zusätzlich zur zeitlichen Abhängigkeit der Belastung wurde zudem die räumliche Verteilung der Stickoxide am südlichen Ende des Tunnels gemessen, wofür modifizierte Palmes-Tubes (Passivsammler) zum Einsatz kamen. Bei diesen Untersuchungen zeigte sich die höchste NO_2 -Belastung innen, am Ende des Tunnels. Nach dem Austritt der Luft aus dem Tunnel halbierte sich die NO_2 -Belastung und blieb über einige Entfernung vor dem Tunnel konstant. Trotz der Halbierung der NO_2 -Konzentration gegenüber dem Bereich am Ende des Tunnels lagen die Werte über den Referenzwerten, die an einem Straßenabschnitt ohne den Einfluss des Tunnels aufgenommen wurden. In der Umgebung des Tunnelendes außerhalb des Straßenverlaufs stellten sich hingegen vergleichsweise geringe NO_2 -Konzentrationen ein, die auch unterhalb der vorgegebenen Grenzwerte lagen.

Trotz der umfangreichen Messungen war eine detaillierte Aussage über die Verteilung des Stickstoffdioxids nach dem Tunnelaustritt nicht möglich, da verschiedene Einflüsse aus Thermik, Wind und Verkehr denkbar waren, deren Einfluss mit den durchgeführten orientierenden Messungen nicht voneinander unterschieden werden konnten.

Grundsätzlich konnte anhand dieses Projekts gezeigt werden, dass mithilfe eines geschlossenen Systems eine signifikante Reduzierung der Stickoxidkonzentration in einem Tunnel möglich ist.

Literatur

- [1] World Health Organization, WHO | Ambient (outdoor) air quality and health. <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/en/> (accessed 25 November 2014).
- [2] FLASSAK, TH.; BOLTE, G. (2013): Numerical simulation of the effectiveness of photocatalytic active concrete surfaces, in: 1st International Conference on the Chemistry of Construction Materials, October 7-9, 2013, Berlin.
- [3] FLASSAK, TH.; RIFFEL, S.; REUTER, U. (2013): Photokatalyse konkret – Modellierung und Messung im Modellprojekt „Hohenheimer Straße“ der Stadt Stuttgart. In: 57. Be-
tontage, 5. - 7. Februar 2013, Neu-Ulm.
- [4] BOLTE, G.; FLASSAK TH. (2012): Saubere Luft dank Photokatalyse. Immissionsschutz Ausgabe 2/2012, 54-58.
- [5] FLASSAK, TH.; SÖRGEL, C.; BURGETH, G.; DUTTLINGER, W.; MABAN M.; KLEFFMANN J. (2011): Numerische Modellierung des photokatalytischen Stickoxidabbaus durch TiO₂-dotierte Gebäudefassaden, Kolloquium Luftqualität an Straßen 2011 der Bast, 30. und 31. März 2011, Bergisch Gladbach.
- [6] UEHLENDAHL, S.; KURTENBACH, R.; FLASSAK, TH. (2013): Dortmunder Pilotprojekt „Park der Partnerstädte“ / Leonie-Reygers-Terrasse mit photokatalytisch aktiver Betonoberfläche. Kolloquium Luftqualität an Straßen 2013 der Bast, 20. und 21. März 2013, Bergisch Gladbach.
- [7] KANEKO, M.; OKURA, I.; Photocatalysis: Science and Technology, Springer, Berlin, 2002.
- [8] FUJISHIMA, A.; HASHIMOTO, K.; WATANABE, T.; TiO₂ Photocatalysis - Fundamentals and Applications, BKC Inc., Tokyo, 1999.
- [9] BAHNEMANN, W.; MUNEER, M.; HAQUE, M.M.; Titanium dioxide-mediated photocatalysed degradation of few selected organic pollutants in aqueous suspensions, Catal Today 124 (3-4) (2007) 133-148.
- [10] Europäische Kommission, Amtsblatt der Europäischen Kommission - Empfehlung der Kommission vom 18. Oktober 2011 zur Definition von Nanomaterialien (2011/696/EU).
- [11] WILHELM, P.; STEPHAN, D.; Titandioxid für selbstreinigende Beschichtungen von Baustoffen, beton (5) (2007) 202-205.
- [12] International Standard 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 oxide. 2007.
- [13] Schlussbericht Forschungsprogramm Straßenwesen, Projekt FE 09.0167/2011/IRB, „Wirksamkeit von Tunnelwänden als Träger photokatalytischer Oberflächen zur Minderung der NO_x-Belastung im Vergleich zu Lärmschutzwänden und Fahrbahnoberflächen“.
- [14] GUERRINI, G.L.; Photocatalytic performances in a city tunnel in Rome: NO_x monitoring results, Construction and Building Materials 27 (1) (2012) 165-175. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.065>.
- [15] RAVESLOOT, C.M.; MCINTYRE R.; MALTBY J.; Catalytic tunneling, Design-study Maas-tunnel renovation with catalytic paint and corresponding power LED lighting, city of Rotterdam, the Netherlands, Conference readings:Transport research arena europe, Brussels, 2010. (Ed.).
- [16] PhotoPAQ (2010-2013) Life+project, see <http://photopaq.ircelyon.univ-lyon1.fr/>.
- [17] AMRHEIN, K.; KAMARUDDIN, S.; (Eds.), Photokatalytischer Schadstoffabbau an modifizierten Baustoffoberflächen, 2012.
- [18] KANDIEL, T. A.; DILLERT, R.; FELDHOFF, A.; BAHNEMANN, D.W.; Direct Synthesis of Photocatalytically Active Rutile TiO₂ Nanorods Partly Decorated with Anatase Nanoparticles, J. Phys. Chem. C 114 (11) (2010) 4909-4915. <https://doi.org/10.1021/jp912008k>.
- [19] IFANG, S.; GALLUS, M.; LIEDTKE, S.; KURTENBACH, R.; WIESEN, P.; KLEFFMANN, J.; Standardization methods for testing photo-catalytic air remediation materials:

- Problems and solution, Atmospheric Environment 91 (2014) 154-161. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.04.001>.
- [20] HERZKE, K. (1972): Der Einfluss des Kraftfahrzeugverkehrs auf die Betriebskosten von Tunnellüftungen. Bauingenieur-Praxis 82.
- [21] FREIBAUER, B. (1978): Bemessungsgrundlagen für die Lüftung von Straßentunneln. Bundesministerium für Bauten und Technik, Straßenforschung, Heft 87.
- [22] ISRAËL, G.; SCHLUMS, CH.; TREFFEISEN, R.; PESCH, M. (1996): Rußimmissionen in Berlin. VDI-Fortschrittsbericht Nr. 152, 1996.
- [23] STUVA (1990): Überprüfung der Bemessungsgrundlagen für die Be- und Entlüftung von städtischen Straßentunneln im Hinblick auf die Verringerung der Schadstoffemissionen bei Kraftfahrzeugen. STUVA Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen e.V., Köln, Forschungsbericht FE-Nr. 77051/86 und 77054/86, Januar 1990.
- [24] ASTRA (2008): Lüftung der Straßentunnel, Systemwahl, Dimensionierung und Ausstattung, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bundesamt für Straßen ASTRA Richtlinie Ausgabe 2008 V2.01.
- [25] GALLUS, M.; AKYLAS, V.; BARMPPAS, F.; BEELDENS, A.; BOONEN, E.; BOREAVE, A.; CAZAUNAU, M.; CHEN, H.; DAELE, V.; DOUSSIN, J.F.; DUPART, Y.; GAIMOZ, C.; GEORGE, C.; GROSSELIN, B.; HERRMANN, H.; IFANG, S.; KURTENBACH, R.; MAILLE, M.; MELLOUKI, A.; MIET, K.; MOTHESS, F.; MOUSSIOPOULOS, N.; POULAIN, L.; RABE, R.; ZAPF, P.; KLEFFMANN, J. (2015): Photocatalytic de-pollution in the Leopold II tunnel in Brussels: NO_x abatement results. Building and Environment 84 (2015) p.125-133.
- [26] DIN EN 14626:2005.
- [27] DIN EN 14211:2005.
- [28] EN 12341, 1999 für PM_{2,5}.
- [29] DIN ISO 7996:1990.
- [30] „GUIDE TO THE DEMONSTRATION OF EQUIVALENCE OF AMBIENT AIR MONITORING METHODS“.
- [31] EN 14907, 2005.
- [32] Homepage des Senats Berlin, Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz: https://www.berlin.de/senuvk/umwelt/luftqualitaet/de/entwicklung/lang_pm10.shtml.

Bilder

- Bild 1: Tunnelkassette als geschlossenes System: (a) Grundprinzip und (b) mögliche technische Lösung mit Größenmaßstab
- Bild 2: Messapparatur zur Bestimmung des photokatalytischen Abbaus von NO
- Bild 3: Spektrum der UV-A-Lichtquelle A1 des Herstellers A
- Bild 4: Leistungsspektrum des Niederdruckstrahlers B1 des Herstellers B
- Bild 5: Spektren weiterer getesteter UV-A-Niederdruckstrahler
- Bild 6: TiO₂-modifizierte Farben verschiedener Hersteller
- Bild 7: Beschichtete Aluminiumplatten
- Bild 8: REM-Aufnahmen der photokatalytisch modifizierten Glaswolle D
- Bild 9: Darstellung des Stickstoffmonoxid- und Stickstoffdioxidverlaufes in Abhängigkeit der Zeit für die einzelnen Proben (Vorbehandlung: 24 h UV-Bestrahlung)
- Bild 10: Darstellung des NO_x-Abbaus in Abhängigkeit der Zeit für die einzelnen Proben (Vorbehandlung: 24 h UV-Bestrahlung)
- Bild 11: Glasfasergewebematten als Trägermaterial
- Bild 12: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen der Glasfasermatten Gewebe I (links) und Gewebe II (rechts)
- Bild 13: Messverlauf des photokatalytischen NO_x-Abbaus der Probe des Vorversuchs 1

- Bild 14: REM-Aufnahmen der beschichteten Glasfasermatte aus dem Vorversuch 1
- Bild 15: Messverlauf des photokatalytischen NO_x -Abbaus der Probe des Vorversuchs 2
- Bild 16: REM-Aufnahmen der beschichteten Glasfasermatte aus Vorversuch 2
- Bild 17: TPOT beschichtetes Glasfasergewebe I vor dem Entfernen von losem TiO_2
- Bild 18: Messverlauf der NO - und NO_2 -Konzentration der TPOT beschichteten Glasfasergewebematten nach 24 h Vorbestrahlung
- Bild 19: Beschichtete Netze mit Probe E1 (50 M.-% Zusatzstoff E, 50 M.-% CEM) und Probe E2 (75 M.-% Zusatzstoff E, 25 M.-% CEM I)
- Bild 20: Messverlauf des photokatalytischen NO_x -Abbaus der Probe E1 (50 M.-% Zusatzstoff E, 50 M.-% CEM I; Auftragung auf Netz; ohne Vorbestrahlung; verkürzte Messung)
- Bild 21: Messverlauf des photokatalytischen NO_x -Abbaus der Probe E2 (75 M.-% Zusatzstoff E, 25 M.-% CEM I; Auftragung auf Netz; 24 h Vorbestrahlung)
- Bild 22: Messverlauf des photokatalytischen NO_x -Abbaus der Probe E5 (75 M.-% Zusatzstoff E, 25 M.-% CEM I; vollflächig; 72 h Vorbestrahlung; 7 h Messdauer)
- Bild 23: Messverlauf des photokatalytischen NO_x -Abbaus der Probe E5 (75 M.-% Zusatzstoff E, 25 M.-% CEM I; vollflächig; 72 h Vorbestrahlung; 72 h Messdauer)
- Bild 24: Übersichts- und Detailaufnahme der Filtermaterialien FM1 und FM2
- Bild 25: CST-Reaktor mit Filtermaterial als Probe
- Bild 26: Messverlauf des photokatalytischen NO_x -Abbaus des Filtermaterials FM2 im CST-Reaktor (Volumenstrom 3 l/min, Reaktorvolumen 25 l)
- Bild 27: Messverlauf des photokatalytischen NO_x -Abbaus des Filtermaterials FM1 im CST-Reaktor (Volumenstrom 3 l/min, Reaktorvolumen 25 l)
- Bild 28: Größenverhältnisse der Poren verschiedener Schäume
- Bild 29: 675 cm^2 Schaumprobe, 75 Löcher, 10 ppi, 3 cm dick, beschichtet mit einem Zusatzstoff E/Zement-Gemisch
- Bild 30: 675 cm^2 Schaumprobe, 90 Löcher, 5 ppi, 3 cm dick, beschichtet mit der Farbe C
- Bild 31: Messkurven des NO_x -Abbaus im CST-Reaktor mit Farbe C beschichtetem, gelochtem Schaum (Volumenstrom 5 l/min, Reaktorvolumen 25 l)
- Bild 32: Messkurven des NO_x -Abbaus im CST-Reaktor mit Zusatzstoff E/Zementbeschichtetem, gelochtem Schaum (Volumenstrom 5 l/min, Reaktorvolumen 25 l)
- Bild 33: 675 cm^2 Schaumprobe, ungelocht, 5 ppi, 3 cm dick, beschichtet mit 75 M.-% Zusatzstoff E/25 M.-% Zementmischung
- Bild 34: Aufbau des Prototyps: (a) Trägerrahmen und (b) Adapter auf Rohrsystem
- Bild 35: Prinzip des Testaufbaus mit Bezeichnung der einzelnen Komponenten
- Bild 36: Testaufbau im Überblick mit Bezeichnungen der einzelnen Komponenten
- Bild 37: Innenaufbau des Reaktors
- Bild 38: Teststanderweiterung um Druckluftdüsen und Belüftungslöcher: (a) Außenansicht und (b) Innenansicht
- Bild 39: Trägermaterial als Kohlenstoffasergitter mit Zusatzstoff E/Zement-Beschichtung: (a) Beschichtetes Gitter mit Breite von 24 cm, Länge von 30 cm und Maschenweite von 1 x 2 cm^2 und (b) eingebautes Gitter im ersten Prototyp
- Bild 40: Trägermaterial aus Glaswolle: (a) Probe der Quarzwolle D und (b) eingebaute Quarzwolle und Leuchtstoffröhre im ersten Prototyp
- Bild 41: Schematischer Aufbau des zweiten Prototyps mit den Strahlungsquellen (lila) und verschiedenen Zusatzstoff E/Zement-Matten (grün, rot und blau)

- Bild 42: Trägermaterial des Prototyps 2: Glasfaserarmierung beschichtet mit Zusatzstoff E/Zement und zu Halbröhren geformt
- Bild 43: Innenaufbau des Prototypreaktors 2 mit beschichteter, röhrenförmiger Glasfaserarmierung und Faserzementplatten am Rand (nicht alle Röhren und UV-Lampen eingebaut)
- Bild 44: Messkurven aus Teststandmessung von Prototyp 2 mit Zusatzstoff E/Zement-Rohraufbau und Volumenstrom von 170 m³/h
- Bild 45: Überblick zu den Prototypreaktoren: (a) Prototyp 1, (b) Prototyp 2 mit Röhrenaufbau und (c) Prototyp 3 mit Schaummattenaufbau
- Bild 46: Trägermaterial des Prototyps 3: (a) Schaummatte mit dem Zusatzstoff E und Zement beschichtet vor dem Einbau und (b) nach dem Einbau in den Teststand
- Bild 47: Messverlauf der Teststandmessung des Prototyps 3 mit zwei Schaummatten 5 ppi mit Beschichtung aus Farbe C (Volumenstrom 120 m³/h)
- Bild 48: Messverlauf der Teststandmessung des Prototyps 3 mit zwei Schaummatten 5 ppi mit Zusatzstoff E/Zement-Beschichtung (Volumenstrom 120 m³/h)
- Bild 49: Messverlauf der Teststandmessung des Prototyps 3 mit vier Schaummatten 5 ppi mit Zusatzstoff E/Zement-Beschichtung (Volumenstrom 120 m³/h)
- Bild 50: Messverlauf der Teststandmessung des Prototyps 3 mit sechs Schaummatten 5 ppi mit Zusatzstoff E/Zement-Beschichtung (Volumenstrom 120 m³/h)
- Bild 51: Darstellung der Tunnelkassette in ISO-Ansicht mit geöffneten Türen und geöffneter Zugangsklappe zur Steuerung
- Bild 52: Darstellung der Tunnelkassette in Frontansicht mit geöffneten Türen und geöffneter Zugangsklappe zur Steuerung
- Bild 53: Darstellung der Tunnelkassette in Aufrissen und Draufsicht mit geschlossenen Türen
- Bild 54: Darstellung einer Laufschiene zur Montage der Tunnelkassetten
- Bild 55: Darstellung der Radiallüfter mit Abmessungen [Quelle: EBM Papst]
- Bild 56: Basislayout der Tunnelkassette [Bildquelle: Jörg KLEFFMANN, Universität Wuppertal]
- Bild 57: Nicht-diffusionslimitierte Abbaurrate bzw. theoretischer Wirkungsgrad für das Basislayout der Tunnelkassette in Abhängigkeit des Volumenstroms durch die Tunnelkassette
- Bild 58: Modell der Tunnelkassette für die CFD-Software PHOENICS
- Bild 59: Geschwindigkeitsverteilung in der Tunnelkassette in der Mittelebene bei einem Volumenstrom pro Lüfter von 1.600 m³/h und drei Lüftern
- Bild 60: Auf die Eintrittskonzentration normierte Konzentrationsverteilung in der Tunnelkassette in der Mittelebene bei einem Volumenstrom pro Lüfter von 1.600 m³/h und drei Lüftern
- Bild 61: Geschwindigkeitsverteilung in der Tunnelkassette in der Mittelebene bei einem Volumenstrom pro Lüfter von 800 m³/h und drei Lüftern
- Bild 62: Auf die Eintrittskonzentration normierte Konzentrationsverteilung in der Tunnelkassette in der Mittelebene bei einem Volumenstrom pro Lüfter von 800 m³/h und drei Lüftern
- Bild 63: Geschwindigkeitsverteilung in der Tunnelkassette in der Mittelebene bei einem Volumenstrom pro Lüfter von 400 m³/h und drei Lüftern
- Bild 64: Auf die Eintrittskonzentration normierte Konzentrationsverteilung in der Bild in der Mittelebene bei einem Volumenstrom pro Lüfter von 400 m³/h und drei Lüftern
- Bild 65: Tunnelkassettenvariante mit fünf um 30° geneigten Leitblechen (0,25 x 1 m²) mit Abstand zur Kassettewand und fünf Spoilern
- Bild 66: Auf die Eintrittskonzentration normierte Konzentrationsverteilung in der

- Tunnelkassettenvariante mit Spoilern in der Mittelebene bei einem Volumenstrom pro Lüfter von 400 m³/h und drei Lüftern
- Bild 67: Variante der Tunnelkassette mit elf horizontalen Leitblechen (1 x 0,2 m²) mit photokatalytisch aktiver Fläche von $(2 \cdot 1,2 \cdot 1 + 2 \cdot 0,3 \cdot 1,2 + 11 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 0,2)$ m² = 7,52 m²
- Bild 68: Auf die Eintrittskonzentration normierte Konzentrationsverteilung in der Tunnelkassettenvariante mit elf horizontalen Leitblechen in der Mittelebene bei einem Volumenstrom pro Lüfter von 400 m³/h und drei Lüftern
- Bild 69: Paddock-Platten als Trägermaterial für photokatalytisches Material [Quelle: <http://www.recyclingprodukte.de/paddockplatten.html>]
- Bild 70: Variante der Tunnelkassette mit photokatalytischen Oberflächen in Wabenstruktur mit nur einer der vier Strukturplatten (Strukturplatten: blau; UV-Lampen: violett)
- Bild 71: Auf die Eintrittskonzentration normierte Konzentrationsverteilung in der Tunnelkassettenvariante mit photokatalytischen Oberflächen in Wabenstruktur bei einem Volumenstrom pro Lüfter von 400 m³/h und drei Lüftern (dargestellt ist nur ein Viertel der Tunnelkassette; Strömungsrichtung von links nach rechts)
- Bild 72: Auf die Eintrittskonzentration normierte Konzentrationsverteilung in der Tunnelkassettenvariante mit photokatalytisch beschichteten röhrenförmigen Netzen bei einem Volumenstrom pro Lüfter von 30 m³/h (Strömungsrichtung von links vorne nach rechts hinten)
- Bild 73: Variante der Tunnelkassette mit zehn beschichteten Schaummatten (Schaummatten: grau; UV-Lampen: violett)
- Bild 74: Auf die Eintrittskonzentration normierte Konzentrationsverteilung in der Tunnelkassettenvariante mit zehn beschichteten Filterschaummatten in der Mittelebene bei einem
- Volumenstrom pro Lüfter von 400 m³/h und drei Lüftern
- Bild 75: Induzierte Längsströmungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit für den Tunnel Rudower Höhe in Berlin
- Bild 76: Induzierte Längsströmungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom durchschnittlichen täglichen Verkehrs (DTV) bei einer Fahrgeschwindigkeit von 80 km/h für den Tunnel Rudower Höhe in Berlin
- Bild 77: Modell für die CFD-Software PHOENICS des Tunnels Rudower Höhe mit 24 Fahrzeugen im Tunnel
- Bild 78: Verteilung der Geschwindigkeit nach 27 s in einer horizontalen Schnittebene und sechs vertikalen Schnittebenen im Tunnel Rudower Höhe
- Bild 79: Verteilung der Geschwindigkeit nach 29 s in einer horizontalen Schnittebene und sechs vertikalen Schnittebenen im Tunnel Rudower Höhe
- Bild 80: Konzentrationsverteilung nach 27 s in einer horizontalen Schnittebene und sechs vertikalen Schnittebenen im Tunnel Rudower Höhe
- Bild 81: Konzentrationsverteilung nach 29 s in einer horizontalen Schnittebene und sechs vertikalen Schnittebenen im Tunnel Rudower Höhe
- Bild 82: Modell für die CFD-Software PHOENICS des Tunnels Rudower Höhe mit 24 Fahrzeugen im Tunnel und jeweils 50 dicht gestellten Tunnelkassetten an der linken und rechten Tunnelwand
- Bild 83: Strömungstrajektorien im Tunnel Rudower Höhe mit jeweils 50 dicht gestellten Tunnelkassetten an der linken und rechten Tunnelwand (Startort der Trajektorien in der linken Tunnelhälfte)
- Bild 84: Strömungstrajektorien im Tunnel Rudower Höhe mit jeweils 50 dicht gestellten Tunnelkassetten an der linken und rechten Tunnelwand (Startort der Trajektorien in der rechten Tunnelhälfte)
- Bild 85: Konstruktionsdetails des CO₂-Sensors

- [Quelle: <http://www.aeroqual.com/wp-content/uploads/2010/12/AQL-S900-905-Transmitter-Controller-Specs.pdf>]
- Bild 86: Messergebnisse der Längsprofilmessungen mit dem System der BAST
- Bild 87: Tunnelanfang A113TRHS1 - Wochenverlauf: Schadgaskonzentrationen ([ppb] für Stickoxide bzw. [ppm] für CO₂) in der 51. KW von Montag bis Sonntag
- Bild 88: Tunnelmitte A113TRHS2 - Wochenverlauf: Schadgaskonzentrationen ([ppb] für Stickoxide bzw. [ppm] für CO₂) in der 51. KW von Montag bis Sonntag
- Bild 89: Tunnelausgang A113TRHS3 - Wochenverlauf: Schadgaskonzentrationen ([ppb] für Stickoxide bzw. [ppm] für CO₂) in der 51. KW von Montag bis Sonntag
- Bild 90: A113TRHS1, 2 und 3 - NO_x-Verläufe: Schadgaskonzentrationen [ppb] in der 51. KW von Montag bis Sonntag
- Bild 91: Monatsverlauf der Strömungsmessungen - Darstellung mit Minutenmittelwerten
- Bild 92: Monatsverlauf der Strömungsmessungen - Darstellung mit Tageswerten
- Bild 93: Wochenverlauf der Strömungsmessungen der Tunnelleitstelle
- Bild 94: Darstellung der Stundenmittelwerte der Strömungsmessungen der projekt-internen Tunnelmessstelle im selben Zeitraum wie in Bild 93
- Bild 95: Tagesverlauf der Strömungsmessungen nach Korrektur - Darstellung mit Minutenmittelwerten
- Bild 96: Darstellung PM10-, PM2,5- und PM1-Messung im Tunnel
- Bild 97: Konstruktionszeichnung des Rahmens der Demonstrator-Tunnelkassette
- Bild 98: Konstruktionszeichnung für (a) Rückwand und Kabelführung und (b) der Schubladen für die Schaumstoffmatten der Demonstrator-Tunnelkassette
- Bild 99: Demonstrator-Tunnelkassette: (a) Rahmen mit dreifacher Ausführung der Sockel für die Leuchtstoffröhren und Auflagen für die Schubladen und (b) Detailansicht der dreifachen Sockelreihen einer Zwischeneinheit mit eingesetzter Schublade
- Bild 100: Demonstrator-Tunnelkassette: (a) Stabile Auflage für Schaumstoffmatten, (b) eingebaute Auflagen für Schaumstoffmatten und (c) offene Demonstrator-Tunnelkassette mit eingebauten Auflagen mit noch unverdeckter Kabelführung
- Bild 101: Schaltkasten und freigelegte Elektronik für die Ansteuerung der Leuchtstoffröhren in der Demonstrator-Tunnelkassette
- Bild 102: Speziell angefertigtes Elektronikbauteil zur Ansteuerung der Lüfter, Aufzeichnung von Temperatur, Luftfeuchte und verschiedenen Drücken
- Bild 103: Demonstrator-Tunnelkassette während des Testbetriebs im Technikum bei voll eingeschalteter UV-Bestrahlung; die Leuchtstoffröhren konnten durch die Tür aus PMMA beobachtet werden
- Bild 104: Detailansichten der Demonstrator-Tunnelkassette: (a) zwei Lagen mit je drei Leuchtstoffröhren (die Schublade mit der Schaumstoffmatte wurde hier entfernt) und (b) Lage mit eingeschalteten Leuchtstoffröhren, oben und unten begrenzt mit eingeschobenen Schubladen mit Schaummatten
- Bild 105: Exemplarische Messung der Stickoxidkonzentration der Demonstrator-Tunnelkassette während eines Testlaufs im Technikum
- Bild 106: Vergleich der Messungen vom 21.07.2017 mit angeschalteten UV-Lampen (Lüfter je 10 % Leistung) und der Messung vom 22.06.2017 mit eingeschalteten UV-Lampen (Lüfter je 20 % Leistung)
- Bild 107: Druckversuch: (a) Proben gleicher Zusammensetzung vor der weggesteuerten Druckprüfung und (b) Abplatzungen durch einen Druckversuch
- Bild 108: Probekörper mit Beschichtung aus 50

- M.-% Zusatzstoff E und 50 M.-% Zement zur Druckprüfung: (a) Proben mit hohem Polymeranteil (10 M.-%) und erhöhtem Wasseranteil vor und nach der Druckprüfung und (b) Proben unterschiedlicher Zusammensetzung nach der Druckprüfung
- Bild 109: Probekörper nach mehrtägiger Lagerung und nach einer händischen Druckbelastung
- Bild 110: Probekörper nach mehrmonatiger Lagerung: (a) vor und (b) nach einer händischen Druckbelastung
- Bild 111: Grundgerüst des Reaktors für Durchströmungsmessungen: (a) Einzelteile und (b) fertiger Reaktor mit Anschlüssen, Dichtungen und aufgeschraubtem Deckel
- Bild 112: Probeaufnahme: (a) Aufnahme für die zu messenden Filtermatten und (b) Reaktor mit eingesetzter Filtermatte
- Bild 113: Elektronikbauteile des Reaktors: (a) Platine mit UVEDs auf spezieller Halterung, (b) offener und leerer Reaktor mit eingeschalteten UVEDs und (c) vollständiger Aufbau ohne Probe und Deckel
- Bild 114: Reaktormessung: (a) Vollständiger Messaufbau mit Schaumstoff, (b) schematischer Querschnitt durch den Reaktor und (c) Draufsicht nach Abnahme des Deckels
- Bild 115: Verlauf der 30-min-Mittelwerte der NO-, NO₂- und NO_x-Konzentration am Eingang des Reaktors
- Bild 116: Gegenüberstellung der Ein- und Ausgangskonzentrationen an NO₂ am Reaktor
- Bild 117: Zeitlicher Verlauf der Depositionsgeschwindigkeiten
- Bild 118: Gegenüberstellung der Abbaurate und der Depositionsgeschwindigkeit des NO₂
- Bild 119: Exemplarischer Verlauf der Konzentrationen an NO, NO₂ und NO_x an der Messstation A113TRHS3 im Tunnel Rudower Höhe über einen Zeitraum von ca. 11 Tagen
- Bild 120: Exemplarischer Verlauf der Konzentrationen der Tagesmittelwerte an NO, NO₂ und NO_x an der Messstation im Tunnel Rudower Höhe über einen Zeitraum von ca. 11 Tagen (Daten umgerechnet auf µg/m³)
- Bild 121: Bestandteile der Passivsammler
- Bild 122: Beprobungspunkte 1 bis 11 über Fahrbahn [Quelle: Clemens Ehm]
- Bild 123: Detail eines Beprobungspunktes (Punkt 3)
- Bild 124: Temperaturverlauf: (a) im Rahmen des Projekts gemessen im Tunnel und (b) der unmittelbaren Umgebung sowie (c) der WESTE-Messstation
- Bild 125: Relative Luftfeuchte: (a) im Rahmen des Projekts gemessen im Tunnel und (b) der unmittelbaren Umgebung sowie (c) der WESTE-Messstation
- Bild 126: NO₂-Konzentrationen an den Beprobungspunkten von Passivsammlern mit 5 cm Länge (Woche 1)
- Bild 127: NO₂-Konzentrationen an den Beprobungspunkten von Passivsammlern mit 5 cm Länge (Woche 2)
- Bild 128: NO₂-Konzentrationen an den Beprobungspunkten von Passivsammlern mit 10 cm Länge
- Bild 129: Querschnitt mit möglicher Strömung in der ersten Messwoche

Tabellen

- Tab. 1: Photokatalytische Produkte
- Tab. 2: Photoneneffizienzen der einzelnen photokatalytischen Produkte nach 24 h Vorbelichtung am Ende der Messung
- Tab. 3: Photoneneffizienzen der einzelnen photokatalytischen Produkte nach 72 h Vorbestrahlung am Ende der Messung
- Tab. 4: Photoneneffizienzen der einzelnen photokatalytischen Produkte nach 4 Wochen Vorbestrahlung
- Tab. 5: Depositionsgeschwindigkeiten für den NO-Abbau (zum Ende der Messung)

-
- Tab. 6: Photoneneffizienzen der einzelnen photokatalytischen Produkte auf Gewebe I nach 24 h Vorbelichtung am Ende der Messung
- Tab. 7: Photoneneffizienzen der einzelnen photokatalytischen Produkte auf Gewebe II nach 24 h Vorbelichtung
- Tab. 8: Photoneneffizienzen des Vorversuchs 1 am Ende der Messung
- Tab. 9: Photoneneffizienzen des Vorversuchs 2 am Ende der Messung
- Tab. 10: Photoneneffizienz des Hauptversuchs (Ende der Messung)
- Tab. 11: Übersicht der Proben der Vorversuche und des Hauptversuches
- Tab. 12: Photoneneffizienzen ohne Vorbelichtung am Ende der Messung
- Tab. 13: Photoneneffizienzen nach 24 h Vorbelichtung am Ende der Messung
- Tab. 14: Photoneneffizienzen der einzelnen photokatalytischen Produkte nach 72 h Vorbelichtung am Ende der Messung
- Tab. 15: Photoneneffizienzen nach 4 Wochen Vorbelichtung am Ende der Messung
- Tab. 16: Photoneneffizienzen aus den Langzeitmessungen (72 h Messzeit) am Ende der Messung
- Tab. 17: Depositionsgeschwindigkeiten für NO
- Tab. 18: Druckfestigkeiten verschiedener Zusatzstoff E-CEM I-Gemische nach 28 Tagen Aushärtung
- Tab. 19: Depositionsgeschwindigkeiten der Filtermaterialien
- Tab. 20: Depositionsgeschwindigkeiten der im CST-Reaktor getesteten Schaumproben
- Tab. 21: Gegenüberstellung des gemessenen und modellierten Schadstoffabbaus durch Zusatzstoff E/Zement-Schaumplatten im Teststand
- Tab. 22: Kenndaten der Radiallüfter [Quelle: EBM Papst]
- Tab. 23: Nicht-diffusionslimitierte Abbaurate bzw. theoretischer Wirkungsgrad für das Basislayout der Tunnelkassette
- Tab. 24: Verhältnis von realer Abbaurate zur nicht-diffusionslimitierten Abbaurate für das Basislayout der Tunnelkassette
- Tab. 25: Charakteristische Größen für die Tunnelkassettensvariante mit elf Leitblechen für einen Volumenstrom von 3 x 400 m³/h
- Tab. 26: Charakteristische Größen für die Tunnelkassettensvariante mit photokatalytischen Oberflächen in Wabenstruktur für einen Volumenstrom von 3 x 400 m³/h
- Tab. 27: Charakteristische Größen für die Tunnelkassettensvariante mit photokatalytischen Oberflächen auf röhrenförmigen Netzen für einen Volumenstrom von 30 m³/h
- Tab. 28: Charakteristische Größen für die Tunnelkassettensvariante mit photokatalytischen Oberflächen auf Schaumplatten für einen Volumenstrom von 3 x 400 m³/h
- Tab. 29: Ergebnisüberblick der Schadstoffmessungen an den drei Messstationen

Anhang

A.1 Standortvorbereitung

Der Messaufbau im Tunnel bedurfte einsatzoptimierter Messcontainer, die aufgrund des geringen Platzangebotes auf den vorhandenen Notgehwegen eine maximale Tiefe von lediglich 40 cm aufweisen durften. Die genaue Positionierung der Container wurde mit dem Auftraggeber abgesprochen und auf Basis der Ergebnisse von Tunnellängsprofilmessungen (FE 02.341/2012/IRB: „Messung und Erstellung von Längsprofilen von Luftschadstoffkonzentrationen in 6 verschiedenen Tunneln“) festgelegt. In Bezug auf die Messtechnik kam aufgrund von Reproduzierbarkeit, Qualitätskontrolle und Arbeitsabläufen bei Wartung und Kalibrierung trotz der geringen Breite, die im Tunnel herrscht, genormte Messtechnik in 19"-Bauweise zum Einsatz.

Für den Betrieb im Tunnel wurden die Container mit einer flächigen Ableitvorrichtung über die gesamte Höhe des Hindernisses hinweg versehen, deren genaue Ausführung mit dem Auftraggeber abgestimmt wurde.

Um die Messgeräte geschützt unterbringen zu können, wurden für die drei Standorte im Tunnel Rudo-

wer Höhe Stahlcontainer u.a. mit folgenden Spezifikationen verbaut:

- ausreichende Anzahl von geeigneten Servicetüren, um die Wartung der Geräte zu gewährleisten,
- Tauglichkeit für die Unterbringung von 19"-Gasmessgeräten sowie einem Staubmessgerät,
- ausreichende, innen liegende Isolierung,
- Außenabmessungen mit Tiefen von maximal 40 cm,
- Türarretierung mit Gasdruckdämpfer für alle Servicetüren,
- Integration eines Klimagerätes,
- Außengehäuse V2A lackiert,
- geeignete Bodenmontage durch separaten Sockel sowie geeignete Wandmontage mit Abgleitschutz über die gesamte Höhe,
- geeignete Anschlussspannung und geeignete Absicherung,
- Absicherung der gesamten Elektronik,
- projektspezifische Integration der Messtechnik in die Containerkonstruktion,

Pos	Stk.	Beschreibung
1	3	Stationärer Tunnelmesscontainer NIRO V2A RAL7035 matt; IP54 B x H x T 1650 x 1800 x 400 mm ³ gemäß Spezifikationen zur Aufnahme von 5 x 19" Gasmessgeräten sowie Partikelmessgerät, inkl. Peltierklimattechnik, Aufnahme Datenerfassungssystem, elektr. Absicherung, Dachflansch für Gasprobenahmesystem, Dachflansch für Partikelmessgerät; getrennte Stromversorgung für Messtechnik und Klimaanlage inkl. Einzelphasenabsicherung Überspannungsschutz & Übertemperaturschutz elektronische Wiedereinschaltung bei Stromausfall seitlicher Ableitschutz über die gesamte Höhe des Containers
2	3	Gasprobenahmesystem für Tunnelmesscontainer
3	3	my_e_base rack System / Datenmanagement gemäß Spezifikation
4	1	Verkehrszählung, 1 Kamera je Fahrtrichtung, Position der Kamera über der Fahrbahn - abhängig von den örtlichen Gegebenheiten
5	1	Montagesystem Verkehrszählung, dies beinhaltet Kabelzuleitungen von den Tunnelportalcontainern zu den Verkehrskameras sowie die notwendigen Wandmontagematerialien
6	1	Meteorologiesensor WS500 (Hersteller Fa. Lufft) für Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Temperatur, relative Feuchte, Druck
7	1	Feinstaubmessgerät für PM ₁₀ & PM _{2,5} - Konform zu PM ₁₀ nach EN 12341 - Konform zu PM _{2,5} nach EN 14907 - Messbereich: 0.1...6.000 µg/m ³ - Größenbereich: 0.25...> 32 µm, Probenluft: 1,2 l/min - Temperatur, Feuchte und Drucksensor, beheizte Probenahme 30 °C über Umgebungstemperatur Grimm Spektrometer 107 umgebaut auf externe Pumpe

Tab. 30: Zusammenfassung der Details der eingesetzten Technik in Phase 1

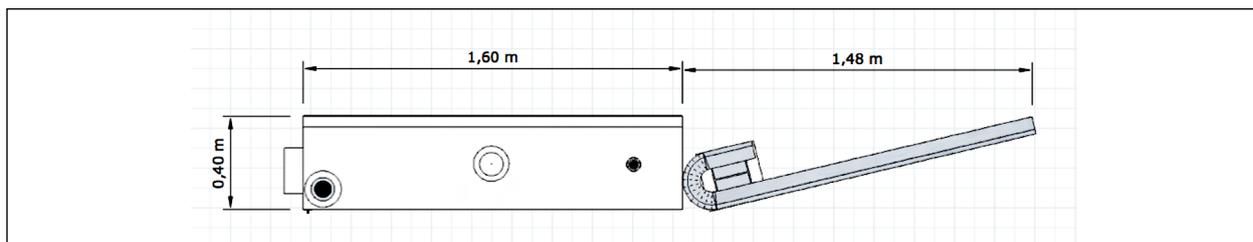


Bild 130: Messcontainer mit Anprallschutz: Draufsicht

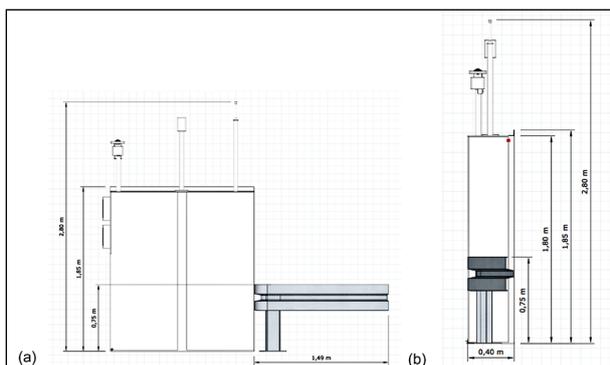


Bild 131: Messcontainer mit Anprallschutz: (a) Aufriss und (b) Kreuzriss



Bild 132: Messcontainer (a) geschlossen und (b) geöffnet

- geeignete Installation eines Probenahmesystems für alle Gasmessgeräte mit direkter Ansaugung der einzelnen Geräte und
- geeignete Installation des Probenahmekopfes für Partikelmessgeräte mit geregelter Entfeuchtung der Probe in Abhängigkeit zur relativen Feuchte der Umgebungsluft.

In Tabelle 30 ist die eingesetzte Technik nochmals zusammengefasst.

Technische Details der Messcontainer

Bild 130 bis Bild 132 verdeutlichen die Konstruktion der Messcontainer und des Anprallschutzes.

Datenkommunikationssystem „myEbase“

In allen drei Messcontainern wurde ein Datenkommunikationssystem eingesetzt, das eine komplette Steuerung der Messgeräte von allen Computerarbeitsplätzen mit Internetzugang in Echtzeit ermöglichte (vgl. Bild 133).



Bild 133: Datenkommunikationssystem „myEbase“: Frontansicht

Spezifikationen	
Abmessungen	3-4 Höheneinheiten 19" rack mount unit
Prozessor	FPGA-micro blaze Core, CPU frequency 50 MHz
Watchdog	integriert
Programmspeicher	2 Flash-EProms mit je 4 MB
Datenspeicher	1 Flash-EProm 4 MB
SD-Kartenspeicher	bis zu 4 GB
Sicherungsspeicher	* Erste Sicherungsstufe mit integriertem Speicherchip (* Zweite Sicherungsstufe mit integrierter 2 GB SD SD-Karte)
Modemübertragung	eingebauter GPRS/ UMTS Router mit VPN
Serielle Anschlüsse	4 x RS232, 1 x RS485
Ethernet	10/ 100 Mbit/s, auto cable detect
Anschlussstecker	2 x 9-pole SUB-D D-Verbinder, 4 x RJ45 RJ45-Steckplätze
Betriebstemperatur	0 °C bis 50 °C
Speichertemperatur	-10 °C bis 70 °C
Stromsteuerungsmodul	8 x AC – 10 A, 230 V Stromanschlüsse - jeder Anschluss einzeln ansteuerbar
Netzwerk	integrierter Ethernet TCP/ IP Netzwerk Switch mit Patch panel frontseitig WIFI, integriertes WIFI WIFI-System
Display / Präsentation	Web Server mit auf integriertem Computersystem mit HDMI –Bildschirmanschluss, Stationssteuerung und -überwachung
Stationsüberwachung	integrierte Stationstemperaturüberwachung und Klimaüberwachung, Türkontaktüberwachung

Tab. 31: Zusätzliche Spezifikationen zum Datenkommunikationssystem „myEBase“

Mithilfe dieses Systems konnte jedes Messgerät individuell angesteuert sowie ab- und angeschaltet werden. Eingehende Daten wurden aufgezeichnet und konnten ausgewertet sowie analysiert werden. Somit bestand ein Echtzeitzugriff auf die Messgeräte mit Funktions- und Kalibrationskontrolle. Das System verfügte grundsätzlich über eine redundante Datenspeicherung. Bei Netzausfall wurden die Daten im System gespeichert und konnten später

ausgelesen werden. Weitere technische Spezifikationen zum Datenkommunikationssystem sind in Tabelle 31 zu finden.

Details der Positionierung der Tunnelcontainer

Die Tunnelmessstationen wurden wie folgt bezeichnet: A113TRHS1, A113TRHS2 und A113TRHS3. Bild 134 bis Bild 140 stellen die Position der Messcontainer im Tunnel dar.

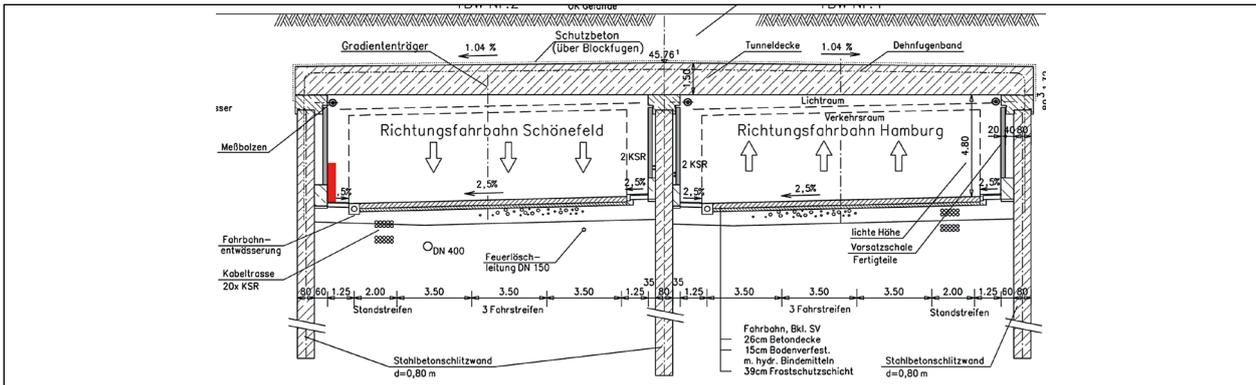


Bild 134: Messstation A113TRHS1: Querschnittsdarstellung

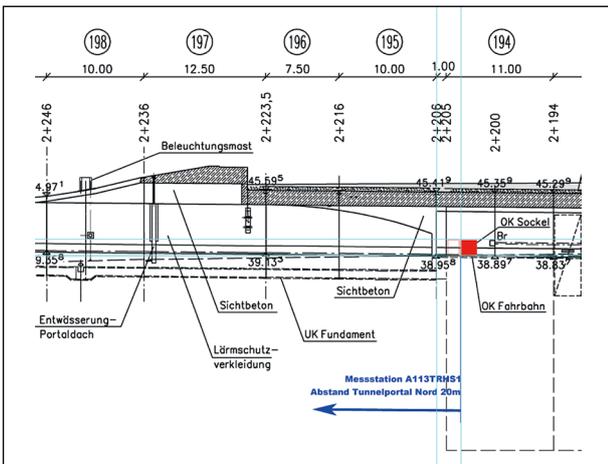


Bild 135: Messstation A113TRHS1: Detail

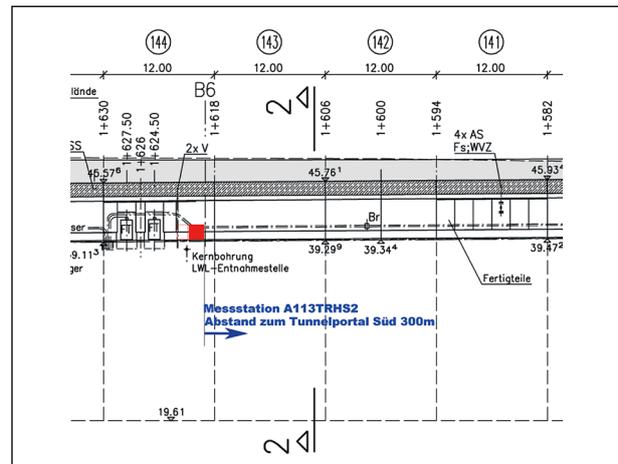


Bild 137: Messstation A113TRHS2: Details

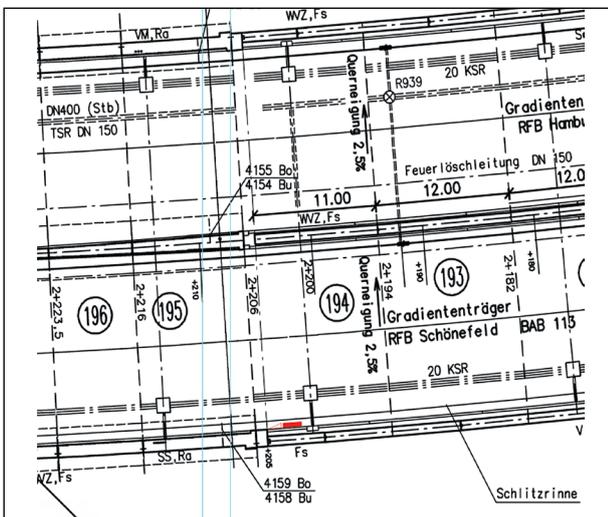


Bild 136: Messstation A113TRHS1: Überblick

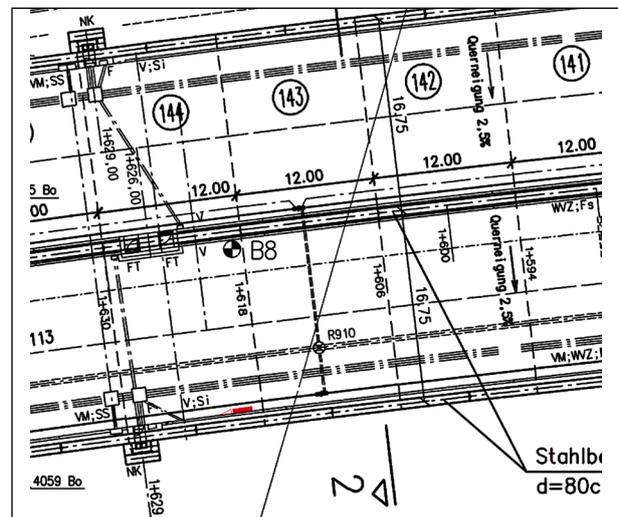


Bild 138: Messstation A113TRHS2: Überblick

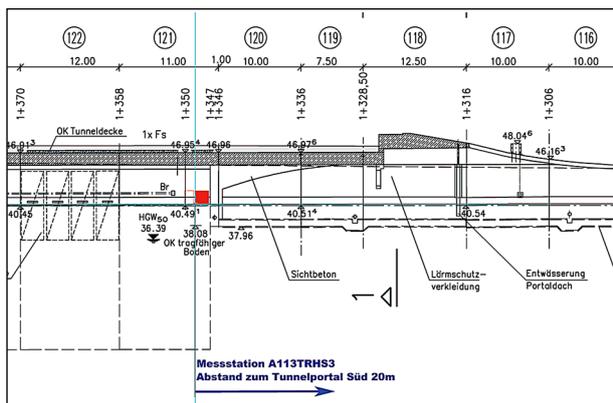


Bild 139: Messstation A113TRHS3: Details

Installation der Messtechnik

Die Installation der Messtechnik erfolgte in zwei Stufen. In Stufe 1 vom 08.04.2014 bis 09.04.2014 wurden die Messcontainer und die Datenkommunikation an den drei Standorten installiert. Stufe 2 erfolgte am 25.08.2014. An diesem Tag wurde die Messtechnik bestehend aus drei Messgeräten zur Aufnahme von Stickoxiden, drei Messgeräten zur Aufnahme von Kohlenmonoxid und einem Messgerät zur Aufnahme von Partikeln sowie Sensoren zur Aufnahme von CO₂ installiert. Weiterhin wurde eine Kompaktwetterstation im Tunnel verbaut, die die Parameter Temperatur, Feuchte, Windgeschwindigkeit und -richtung sowie Druck aufnahm. Des Weiteren wurde eine Verkehrszählung installiert.

Die Installation der Tunnelmesscontainer erfolgte vorab, da hierzu eine umfangreiche Sperrung notwendig war, während die Installation der Technik im Vergleich dazu einen eher geringen zeitlichen Aufwand darstellte.

Im Zuge der ersten vorbereitenden Phase mussten passgenaue Schutzplanken errichtet werden. In Abstimmung mit der Tunnelbehörde wurden Schutzplankensysteme im Verhältnis 1:3 vor den Messcontainern verbaut.

Stufe 1: Installationsarbeiten vom 08.04. bis 09.04.2014

Im Vorfeld der Installation der gesamten Messausrüstung im Tunnel Rudower Höhe war es erforderlich, gemeinsam mit den verantwortlichen Stellen wie dem Tunnelbetreiber, dem Auftraggeber und dem Senat von Berlin eine sowohl technisch durchführbare als auch eine allen Sicherheitsaspekten und Bestimmungen genügende Lösung zu erarbeiten. In Abstimmung wurden die Messcontainer mit einer Ableitvorrichtung vor den Messcontainern gemäß den Vorgaben ausgestattet.

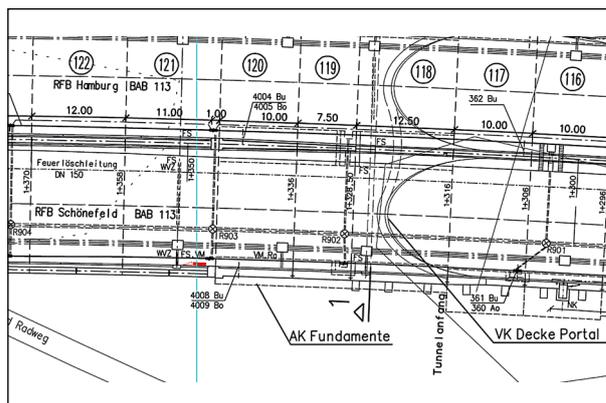


Bild 140: Messstation A113TRHS3: Überblick

Die Arbeiten innerhalb des Tunnels wurden während einer Vollsperrung in der Nacht vom 08.04. auf den 09.04.2014 in der Zeit von 21:00 bis 05:00 durchgeführt. Es wurden alle drei Tunnelcontainer mit der dazugehörigen Technik montiert und für die Aufnahme der Messtechnik vorbereitet.

Überwachung, Fernwartung und Plausibilitätskontrolle der gewonnenen Messdaten

Die im Tunnel installierten Messcontainer waren mittels VPN-Verbindung mit dem System der BAST verbunden. Bei der Auswertung der Verbindungszeiten stellte sich sehr rasch heraus, dass die Station in der Tunnelmitte nur eine sehr geringe bis nicht verfügbare Datenanbindung aufwies. Hier musste bei den Wartungsarbeiten im Juli eine andere Datenkarte eingesetzt und auf deren Tauglichkeit geprüft werden. Aufgrund der Wegstrecken zwischen den Stationen war der Einsatz einer Funkanbindung zu einer der anderen Stationen nicht möglich.

Zudem wurden die „myEbase“-Datenerfassungssysteme installiert, um einen Eindruck über die Netzverfügbarkeit innerhalb des Tunnels über einen längeren Zeitraum zu gewinnen.

Stromanschlüsse und Anbindung der Messstationen

Die Stromanschlüsse wurden aus den Notrufnischen herausgeführt und mittels Kabelschächten und Rohrleitungen aus Stahl zu den Messpunkten geleitet.

In den Notrufnischen befanden sich Verteilerkästen, in denen die Messcontainer gesondert mittels FI-Schalter durch den Auftragnehmer gesichert wurden. Die zugehörigen FI-Schalter wurden beschriftet und die Eintragungen in den örtlichen Verteiler-

plänen, die sich in den Kästen befinden, durchgeführt.



Bild 141: Exemplarisch: Die Versorgung der Messstationen mit Strom erfolgte über Notrufnischen

Details der Arbeiten sind den Bild 141 bis Bild 146 zu entnehmen.



Bild 144: Schutzvorrichtung vor dem Messcontainer

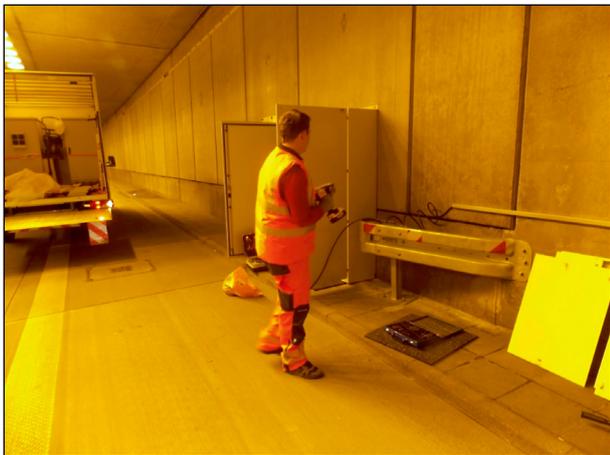


Bild 142: Installationsarbeiten an einem der drei Messcontainer mit angepasster Schutzvorrichtung im Tunnel Rudower Höhe

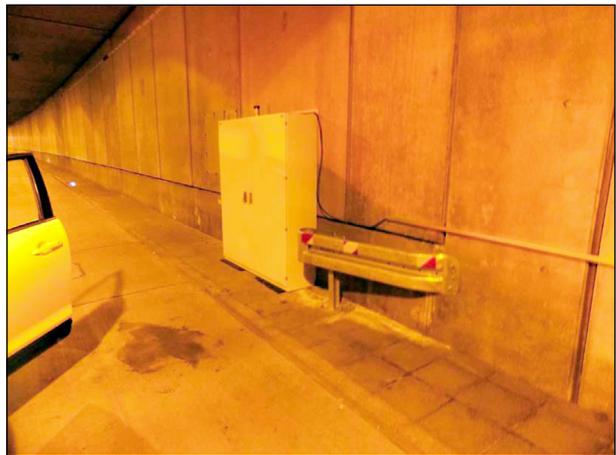


Bild 145: Schutzvorrichtung vor dem Messcontcontainer nach erfolgter Montage



Bild 143: Exemplarisch: Messcontainer nahe Tunnelportal

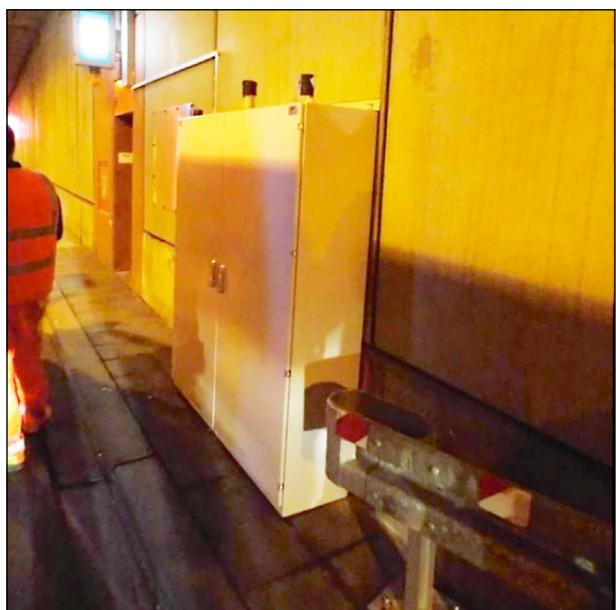


Bild 146: Erfolgte Installationsarbeiten der Messcontainer

A.2. Herangehensweise an die Problemstellung (Ergänzung zu Phase 1)

Grundsätzlich gab es innerhalb der ersten Phase des Projektes mehrere Thematiken, die geklärt werden mussten und die wesentlichen Einfluss auf den endgültigen Lösungsansatz hatten. Neben den zu wählenden photokatalytischen Trägermaterialien und deren Umsetzung in der Tunnelkassette, musste die praktische Umsetzung der im Labor gemessenen und verifizierten Werte ermöglicht werden. Des Weiteren mussten auch die genaue Position und die mögliche Gesamtwirkung der Tunnelkassetten innerhalb des Tunnels anhand des Modells bestimmt werden. Zu diesem Zweck wurde unter Anregung von Herrn. Dr. Kleffmann ein Excel-Arbeitsblatt ausgearbeitet, in dem die zur Berechnung wesentlichen Formeln hinterlegt sind und in einem Schnellverfahren eine Abschätzung des maximal im

Tunnel zu erwartenden Abbaus unter idealen Randbedingungen bestimmt werden kann.

Schritt für Schritt wurden so die gefundenen Ergebnisse der einzelnen Teilschritte immer wieder in die Excel-Datei eingefügt und das Gesamtergebnis überprüft. Während die ersten Berechnungen einen Abbau von 4 bis 5 % ergaben, gelang es durch Verbesserung der einzelnen Teilbereiche und der Kassetten selbst, vor allem aber durch die Änderung des Trägermaterials und damit insbesondere der verfügbaren photokatalytischen Oberfläche sowie der photokatalytischen Beschichtung, einige wesentliche Verbesserungen zu erzielen. Die einzelnen Schritte lassen sich im Bericht detailliert nachlesen.

Des Weiteren wurde dieses Excel-Kalkulationsblatt anhand der Informationen aus dem Modell, der Laborwerte und der Modifikationen der Kassetten angepasst, was zu folgendem endgültigen Kalkulationsblatt führte:

Model zur Bestimmung des maximalen NO_x-Abbaus mit photokatalytischen Tunnelkassetten	
Parameter	
Kassettentiefe [m]	0,4
eff. Kassettenlänge [m]	1,3
eff. Kassettenbreite [m]	3
Anzahl Matten pro Kassette	13
Verhältnis innere Oberfläche / geometrische Oberfläche der Matten	7
Volumen des Reaktors V [m ³]	1,56
reaktive Oberfläche im Reaktor S [m ²]	118,04
S/V [m ⁻¹]	75,67
Gasfluss pro Ventilator [m ³ /h]	1500
Anzahl Ventilatoren	3
Gasfluss aller Ventilatoren [m ³ /s]	1,250
Strömungsgeschwindigkeit [m/s]	1,04
Reaktionszeit im Reaktor t(reak) [s]	1,248
Depositionsgeschwindigkeit [m/s]	0,0048
k [s ⁻¹]	0,36
ct/c0	0,64
Abbau [%]	36,36
Querschnitt Tunnel [m ²]	70
Tunnel-Strömungsgeschwindigkeit [m/s]	4,6
Impulsverlust der Strömung	0,82
Reduktion der Strömung durch Gegenströmung	0,5
Volumenfluss Tunnel [m ³ /s]	229,6
Kassettenanzahl	100
Kassetten-/Tunnelfluss	0,54
Abbau im Tunnel theoretisch [%]	19,80

Model zur Bestimmung des maximalen NO _x -Abbaus mit photokatalytischen Tunnelkassetten	
Reduktionsparameter	
R _{TK} *V _p - m ³ /h	1636,19
v _d *Surface - m ³ /h	2033,66
eta	80,5 %
Druckverlustkoeffizient aus Datenblatt	8,7
Druckverlust pro Matte - Pa	5,64
Druckverlust insgesamt - Pa	73,4
Erforderliche Leistung luftseitig - Watt	91,7
Länge Tunnel - m	900
Teilstrecke mit Tunnelkassetten - m	150
k/V _p T	0,00132
c1	-0,00862
c _{aus_mTK} /c _{aus_oTK}	0,835
Abbau im Tunnel [%] gemäß Modell	16,51

Die für die Berechnung der prozentualen Minderung der Stickoxidkonzentration am Tunnelaustritt hinterlegte Formel (gelb hinterlegte Zeile), deren genaue Funktion und Detailbeschreibung sich in den jeweiligen Abschnitten des Berichts befindet, lautet:

$$R_T = 1 - \frac{L_T - L_{TK}}{L_T} \cdot e^{-\frac{k_T}{\dot{V}_T} x} - \left(1 - e^{-\frac{k_T}{\dot{V}_T} x} \right) \cdot \frac{\dot{V}_T}{k_T L_T} \quad \text{Gl. 20}$$

In dieser Gleichung tauchen alle Größen in obiger Tabelle bis auf die Variable \dot{V}_T auf. Die Variable \dot{V}_T berechnet sich aus dem photokatalytischen Abbau in einer Tunnelkassette R_{TK} , dem Volumenstrom durch eine Tunnelkassette V_{TK} , der Tunnelkassettenanzahl N_{TK} und der Länge der Teilstrecke im Tunnel mit Tunnelkassetten L_{TK} wie folgt:

$$k_T = R_{TK} \cdot \dot{V}_{TK} \cdot \frac{N_{TK}}{L_{TK}} \quad \text{Gl. 21}$$

Wie im Bericht angegeben, wurde für die ersten Versuche der Modellierung eine Strömungsgeschwindigkeit anhand der Theorie nach HERZKE (1972) mit 5,6 m/s angenommen. Für die endgültige Berechnung der zu erwartenden Effektivität wurden die gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten an der Messstation 2 ausgewertet. Bei der Sichtung der Messwerte für die Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel wurde deutlich, dass ein Messfehler vorliegen musste. Es stellte sich heraus, dass aufgrund der geringen, aber unvermeidlichen Distanz zur Tunnelwand sowie zur Fahrbahn und somit auch zu

den vorbeifahrenden Fahrzeugen und zugleich der geringen Positionshöhe der Messeinrichtung die auftretenden Verwirbelungen in diesem Tunnelbereich einen wesentlichen Einfluss auf die Messwerte hatten.

Des Weiteren war die gewählte Messeinrichtung, ein Sensor der Firma Lufft Typ WS500, nicht die optimale Wahl für die Messung der Strömung innerhalb eines Tunnels. Grund hierfür ist im Wesentlichen der Einfluss der Querströmung. Ein fixiertes Anemometer wäre als einfachste Lösung in Frage gekommen. Eine Herausforderung war es anschließend, die gefundenen Messergebnisse zu verifizieren und einen möglichen Messfehler auszuschließen, wie im Bericht angegeben.

Als Ergänzung zum Hauptbericht ist hier anzuführen, dass die von den Tunnelbetreibern fest montierte Strömungsmessung sicherlich die beste Lösung zur Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel darstellt und darüber hinaus das dort eingesetzte Verfahren standardisiert war. Es handelte sich hierbei um ein speziell für die Messung im Tunnel konzipiertes Messgerät der Fa. Sick - Flow-sic 200. Dieses war in der für solche Messungen empfohlenen Höhe von 4,2 m unter 45°, auf 15 m in der Länge verschoben, quer über die Fahrbahn, montiert. Das Messgerät bestimmte die durchschnittliche Strömung über den gesamten Querschnitt des Tunnels.

Besonders wichtig für die weiteren Überlegungen war auch, dass diese Messeinrichtung fast exakt in der gleichen Ansaughöhe wie der Einlass der Tunnelkassetten montiert war, womit diese Messwerte der Realität am ehesten entsprachen. Aufgrund dieser Tatsache wurden die Messwerte der Tunnelbetreiber als Referenz für die eigene Messung herangezogen und zur Bestimmung eines Korrekturfaktors verwendet. Mittels dieses Korrekturfaktors wurden die eigenen Messergebnisse dazu verwendet, einen möglichst genauen Näherungswert für die eigenen Messergebnisse zur Realität zu ermitteln.

Für Phase 2 des Projektes war angedacht, die bisher eingesetzten Sensoren durch Anemometer zu ersetzen und diese an jeder Messstation zu montieren. Durch einen Abgleich der Messungen einer der Messstationen mit den Daten der Tunnelzentrale wäre es so möglich gewesen, die gemessenen Werte an allen anderen Messstationen in Bezug zur Referenz permanent in Echtzeit zu erfassen.

Basierend auf diesen Vorüberlegungen wurden die im Kapitel 3.7.3 dargestellten Tagesmittelwerte der Strömungsgeschwindigkeit bestimmt:

- Mittelwert der Strömung 3,1 m/s,
- Maximalwert der Strömung 4,3 m/s,
- Minimalwert der Strömung 1,4 m/s.

Grundsätzlich blieb jedoch zu berücksichtigen, dass der Betrieb der Tunnelkassetten zu einer Reduktion der Luftgeschwindigkeit führt (vgl. Kapitel A.3). Diese Reduktion wurde ebenfalls in das zuvor aufgeführte Kalkulationsblatt eingearbeitet. Dies hatte natürlich ebenfalls Einfluss auf die angenommene Reduktion der Tunnelgeschwindigkeit durch ein Auslassen der Abluft unter 45° entgegen der Tunnelströmung. Basierend auf den durchgeführten Berechnungen konnte eine Verringerung der Luftgeschwindigkeit von 0,5 m/s angenommen werden (Quadratische Gleichung für den Impulsverlust).

A.3 Kurzbericht zur Verdeutlichung der Ergebnisse zur Strömungssituation

Um die Ergebnisse der einzelnen Erkenntnisse deutlicher darzustellen, wird in Bild 147 bis Bild 149 sowie Tabelle 32 und Tabelle 33 anhand von Beispielen der zu erwartende Abbau über den Tagesverlauf gezeigt. Als Berechnungsgrundlage wurden

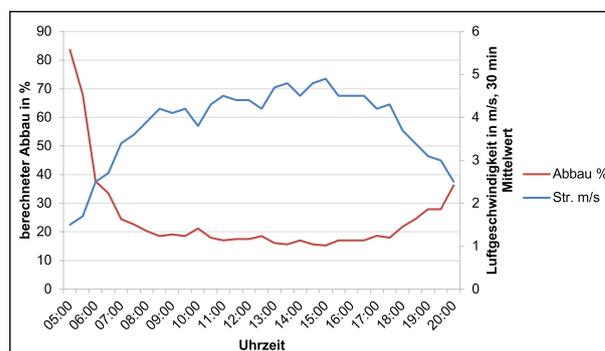


Bild 147: Darstellung des berechneten Stickoxidabbaus am Montag, den 19.01.2015 bei 100 Kassetten (Tagesmittelwert 24,6 %)

Uhrzeit	Strömungsgeschwindigkeit [m/s]	Abbau [%]
05:00	1,5	83,6
05:30	1,7	67,9
06:00	2,5	37,7
06:30	2,7	33,5
07:00	3,4	24,4
07:30	3,6	22,6
08:00	3,9	20,3
08:30	4,2	18,6
09:00	4,1	19,2
09:30	4,2	18,6
10:00	3,8	21,2
10:30	4,3	18,0
11:00	4,5	17,0
11:30	4,4	17,5
12:00	4,4	17,5
12:30	4,2	18,6
13:00	4,7	16,1
13:30	4,8	15,7
14:00	4,5	17,0
14:30	4,8	15,7
15:00	4,9	15,3
15:30	4,5	17,0
16:00	4,5	17,0
16:30	4,5	17,0
17:00	4,2	18,6
17:30	4,3	18,0
18:00	3,7	21,8
18:30	3,4	24,4
19:00	3,1	27,9
19:30	3	27,9
20:00	2,5	36,3
Abbau Tagesdurchschnitt %		24,6

Tab. 32: Berechneter Stickoxidabbau für Montag den 19.01.2015 mit 100 Kassetten

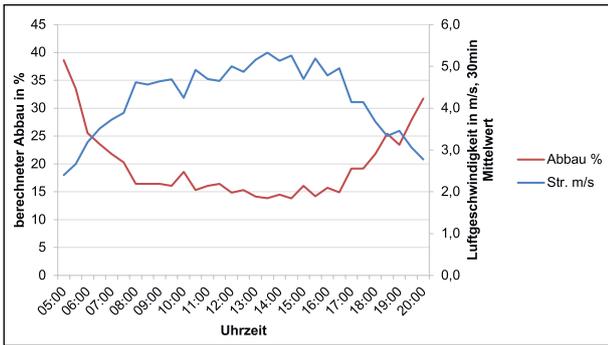


Bild 148: Darstellung des berechneten Stickoxidabbaus am Freitag, den 23.01.2015 bei 100 Kassetten (Tagesmittelwert 19,7 %)

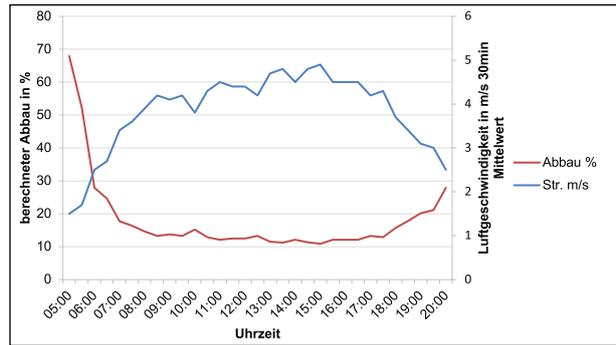


Bild 149: Darstellung des berechneten Stickoxidabbaus am Montag, den 19.01.2015 bei 70 Kassetten (Tagesmittelwert 21,9 %)

Uhrzeit	Strömungsgeschwindigkeit [m/s]	Abbau [%]
05:00	2,4	38,6
05:30	2,7	33,5
06:00	3,2	25,5
06:30	3,5	23,5
07:00	3,7	21,8
07:30	3,9	20,3
08:00	4,6	16,4
08:30	4,6	16,4
09:00	4,6	16,4
09:30	4,7	16,1
10:00	4,2	18,6
10:30	4,9	15,3
11:00	4,7	16,1
11:30	4,6	16,4
12:00	5,0	14,9
12:30	4,9	15,3
13:00	5,2	14,2
13:30	5,3	13,8
14:00	5,1	14,5
14:30	5,3	13,8
15:00	4,7	16,1
15:30	5,2	14,2
16:00	4,8	15,7
16:30	5,0	14,9
17:00	4,1	19,2
17:30	4,1	19,2
18:00	3,7	21,8
18:30	3,3	25,4
19:00	3,5	23,4
19:30	3,1	27,9
20:00	2,8	31,7
Abbau Tagesdurchschnitt % 19,7		

Tab. 33: Berechneter Stickoxidabbau für Freitag den 23.01.2015 mit 100 Kassetten

Uhrzeit	Strömungsgeschwindigkeit [m/s]	Abbau [%]
05:00	2,4	38,6
05:30	2,7	33,5
06:00	3,2	25,5
06:30	3,5	23,5
07:00	3,7	21,8
07:30	3,9	20,3
08:00	4,6	16,4
08:30	4,6	16,4
09:00	4,6	16,4
09:30	4,7	16,1
10:00	4,2	18,6
10:30	4,9	15,3
11:00	4,7	16,1
11:30	4,6	16,4
12:00	5,0	14,9
12:30	4,9	15,3
13:00	5,2	14,2
13:30	5,3	13,8
14:00	5,1	14,5
14:30	5,3	13,8
15:00	4,7	16,1
15:30	5,2	14,2
16:00	4,8	15,7
16:30	5,0	14,9
17:00	4,1	19,2
17:30	4,1	19,2
18:00	3,7	21,8
18:30	3,3	25,4
19:00	3,5	23,4
19:30	3,1	27,9
20:00	2,8	31,7
Abbau Tagesdurchschnitt % 21,9		

Tab. 34: Berechneter Stickoxidabbau für Freitag den 19.01.2015 mit 70 Kassetten

der 19.01. und der 23.01.2015 ausgewählt. Für diese Tage lagen vollständige Datensätze vor, welche den typischen Tagesgang im Tunnel repräsentierten. Des Weiteren wiesen diese Tage ein besonders hohes Verkehrsaufkommen auf. Da eine Darstellung des Abbaus während des ganzen Tages unrealistisch ist und nicht den praktischen Fakten entspricht, wurde nur der Zeitraum betrachtet, in dem ein nennenswertes Verkehrsaufkommen im Tunnel zu verzeichnen war. Hierzu wurde der Zeitraum von 05:00 Uhr bis 20:30 Uhr ausgewertet. In diesem Zeitraum wurden die Ergebnisse der Strömungswerte auf einen Halbstundenwert gemittelt, da, wie man aus den Detaildarstellungen im Bericht erkennen kann, die Strömung permanent stark schwankte und mit extremen Ausschlägen in beide Richtungen versehen war. Einen Zeitraum größer als eine halbe Stunde zu wählen, war nicht zu empfehlen, da es die praxisnahe Darstellung zu sehr verfälscht hätte.

Bezüglich der Fragestellung des zu erwartenden Abbaus bei 70 Kassetten war das zu erwartende Ergebnis während der Stoßzeiten bei ca. 10 bis 16 % einzuordnen. Die Ergebnisse sind in Bild 149 und Tabelle 34 aufgeführt.

A.4 Allgemeine Anmerkungen im Vergleich zu bisherigen Anwendungen

Im Folgenden wurde das erarbeitete Konzept der Tunnelkassetten mit bereits bestehenden Anwendungen verglichen:

Photokatalytisch aktive Tunnelwände:

- Durch die Beschichtung der Tunneloberfläche entsteht eine vergleichsweise kleine chemisch aktive Oberfläche. Auf den letzten 50 Metern des Tunnels, wo die höchsten Konzentrationen an Schadgasen zu erwarten sind, ist auch der chemisch effizienteste Ort für deren Abbau. Die Tunnelwand bietet hier im Vergleich zu den 7.000 m² photokatalytisch aktiver Oberfläche in den Tunnelkassetten nur etwa 1.000 m² Oberfläche. Dieser Umstand kann nicht dadurch aufgefangen werden, dass die Oberfläche aktiver gestaltet wird, da die mit Abstand größte Hinderung der Katalysereaktion durch den Transportprozess der Schadgasmoleküle an die Oberfläche stattfindet.

- Die Strömung der Luft durch einen Tunnel kann lokal sehr turbulent sein, hat insgesamt jedoch einen laminaren Charakter. Ein Lufterelement aus der Mittelachse des Tunnels wird gewöhnlich nicht auf die Tunnelwand treffen. Ausweislich der vorgenommenen Simulationen kann durch eine geschickte Reaktorordnung eine Walzenbewegung des Luftvolumens im Tunnel induziert werden. Somit besteht überhaupt erst die Möglichkeit das gesamte Luftvolumen des Tunnels an eine photokatalytisch aktive Oberfläche zu führen.
- Die offene Oberfläche der Tunnelwand neigt durch hohe Staubbelastungen im Tunnel zu schneller Verschmutzung. Hierdurch wird einerseits die Bestrahlung des Photokatalysators unterbunden, was zu einem Abbruch der photokatalytischen Reaktion führt. Andererseits wird auf diese Weise zusätzlich die Diffusion der Schadgasmoleküle zum Photokatalysator gehemmt. Die im Projekt entwickelten Tunnelkassetten besitzen zum einen eine vorgeschaltete Filterstufe, um der Verschmutzung entgegenzuwirken. Weiterhin sind die Windgeschwindigkeiten in den Reaktoren so hoch, dass Staubablagerungen auf den Katalysatorflächen vermindert werden. Die Filtertechnik der Reaktoren trägt zudem zu einer staubärmeren Tunnelatmosphäre bei.
- Die zur Umwelt hin offene Konstruktion bedingt eine Begrenzung der UV-A-Strahlung. Während in einem geschlossenen Reaktorsystem vergleichsweise sehr hohe UV-Intensitäten erzeugbar sind, die auch zur Reinigung der Katalysatoroberfläche dienen können, begrenzt die Strahlungsbelastung von Personen, Kraftfahrzeugen und Tunnelbauteilen die in einem offenen System verbauten Strahler deutlich.

Photokatalytisch aktive Lärmschutzwände:

- Eine Bilanzierung der Stickstofffixierung ist komplexer als in Räumen mit definierter Luftbewegung, was die Bewertung dieser Maßnahme erheblich erschwert. Eine Quellen- und Senkenmodellberechnung ist hier zur Abschätzung der Abbauraten unabdingbar.
- Eine Verdünnung der Schadgase durch konvektive Luftbewegungen senkt die Effizienz der von den Quellen (Verkehr) weiter entfernten photokatalytisch aktiven Flächen (Lärmschutzwänden) erheblich, da so vergleichsweise geringere

Konzentrationen an Stickoxiden auf die Flächen treffen.

- Zusätzlich zur Verdünnung der Schadgase in der Atmosphäre sinkt die Aktivität des photokatalytischen Systems durch die größere Diffusionsbarriere zur Oberfläche hin.
- Zudem sind die Katalysatoroberflächen der Lärmschutzwände dem Einfluss des Klimas ausgesetzt. Dieser Einfluss kann in den Tunnelkassetten ausgeschlossen werden, da der Photokatalysator in diesen geschützt bzw. Einflüsse durch technische Lösungen kompensiert werden können.

Ein erheblicher Vorteil der Lärmschutzwand ist jedoch, dass sie bei stabiler (wenn auch geringer) Performance des Photokatalysators ein wartungsfreies System zur Verfügung stellt, das dauerhaft und ohne weitere Investitions- und Energiekosten arbeitet. Hier gilt auch, wie zuvor beschrieben, mehr aktive Oberfläche ist wesentlich wichtiger als besonders hohe photokatalytische Aktivitäten.

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Verkehrstechnik“

2019

V 313: **Tausalzverdünnung und -rückhalt bei verschiedenen Entwässerungsmethoden – Modellberechnungen**
Braun, Klute, Reuter, Rubbert € 18,50

V 314: **Übergreifende verkehrstechnische Bewertung von Autobahnstrecken und -knotenpunkten**
Hartmann, Vortisch, Vieten, Chatzipanagiotidou, Haug, Spangler € 18,50

V 315: **Telematisch gesteuertes Kompaktparken für das Lkw-Parkraummanagement auf Rastanlagen an BAB – Anforderungen und Praxiserprobung**
Kappich, Westermann, Holst € 15,50

V 316: **Akustische Wirksamkeit alter Lärmschutzwände**
Lindner, Hartmann, Schulze, Hübel € 18,50

V 317: **Wahrnehmungspsychologische Aspekte (Human Factors) und deren Einfluss auf die Gestaltung von Landstraßen**
Schlag, Anke, Lippold, Wittig, Waltherr € 22,00

V 318: **Unfallkommissionsarbeit – Unterstützung durch einen webbasierten Maßnahmenkatalog zur Beseitigung von Unfallhäufungen**
Wolf, Berger, Bärwolff € 15,50

V 319: **Vermeidung von abflussschwachen Zonen in Verwindungsbereichen – Vergleich und Bewertung von baulichen Lösungen**
Lippold, Vettors, Ressel, Alber
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 320: **Einsatzbereiche und Entwurfsэлементы von Rad-schnellverbindungen**
Malik, Lange, Andriess, Gwasda, Erler, Stein, Thiemann-Linden € 18,00

V 322: **Automatisch gesteuerte Streustoffausbringung durch Nutzung neuer mobiler Sensoren**
Hausmann € 18,00

V 323: **Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2016**
Fitschen, Nordmann € 31,50
Die Ergebnisdateien können als kostenpflichtiger Download unter: www.schuenemann-verlag.de heruntergeladen werden. € 15,00

2020

V 321: **Dynamisches umweltsensitives Verkehrsmanagement**
Diegmann, Wursthorn, Breitenbach, Düring, Schönharting, Kraus, Klemm, Voigt, Kohlen, Löhner € 20,00

V 324: **Konzept zur Bewertung des Verkehrsablaufs an Knotenpunkten mit und ohne LSA**
Vortisch, Buck, Leyn, Baier, Schuckließ, Schimpf, Schmotz
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 325: **Entwurfsparameter von Hochleistungsstraßen innerhalb bebauter Gebiete**
D. Schmitt, J. Gerlach, M. Schwedler, F. Huber, H. Sander
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 326: **Straßenverkehrszählung 2015 – Methodik der manuellen Zählungen**
Schmidt, Frenken, Mahmoudi € 15,50

V 327: **Straßenverkehrszählung 2015 – Ergebnisse**
Frenken, Mahmoudi € 16,50

V 328: **Anprallprüfungen an Fahrzeug-Rückhaltesystemen und Entwicklung von Nachrüstlösungen**
Meisel, Balzer-Hebborn, Ellmers, Jungfeld, Klostermeier, Kübler, Schmitz, Schwedhelm, Yu
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 329: **Streckenbezogene Glättevorhersage**
Schedler, Gutbrod, Müller, Schröder € 24,50

V 330: **Führung des Radverkehrs an Landstraßen**
Baier, Leu, Rittershaus
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 331: **Leitfaden für die Streckenfreigabe für den Einsatz von Lang-Lkw**
Lippold, Schemmel, Förg, Süßmann € 17,00

V 332: **Räumliche Linienführung von Autobahnen**
Lippold, Zösch
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 333: **Passive Schallschutzmaßnahmen – Akustische Wirksamkeit**
Hänisch, Heidebrunn € 17,00

V 334: **Akustische Wirksamkeit von Lärmschutzwandaufsätzen**
Lindner, Kluth, Ruhnau, Schulze € 17,00

V 335: **Ermittlung aktualisierter Grundlagen für Beschleunigungsvergütungen in Bauverträgen**
Geistefeldt, Hohmann, von der Heiden, Finkbeiner € 16,00

V 336: **Vergleich der Detektoren für die Verkehrserfassung an signalisierten Knotenpunkten**
Ungureanu, Ilić, Radon, Rothe, Reichert, Schober, Stamatakis, Heinrich € 18,50

V 337: **Bridge-WIM Pilotversuch – Begleitung und Auswertung**
Kathmann, Scotti, Kucera € 18,50

2021

V 338: **Streckenbeeinflussungsanlagen – Entwurf eines regelungstechnischen Modells zur verbesserten Harmonisierung des Verkehrsablaufs**
Schwietering, Schwietering, Maier, Hakenberg, Pyta, Abel
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 339: **Aktualisierung der Datenbank MARLIS**
Schneider, Turhan, Pelzer
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 340: **Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2017**
Fitschen, Nordmann € 31,00

V 341: **Lebenszykluskostenbewertung von Schutzeinrichtungen**
Eckert, Hendrich, Horlacher, Kathmann, Scotti, von Heel
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 342: **Entwicklung eines aktuellen, echtzeit-verfügbaren Key Performance Indicator (KPI) Systems für das deutsche Autobahnnetz**
Peter, Janko, Schick, Waßmuth, Friedrich, Bawidamann € 21,00

V 343: **Kreisverkehre an Landstraßen Auswirkungen der Erkennbarkeit und der Zufahrtsgestaltung auf die Verkehrssicherheit**
Schmotz, Schröter, Schemmel, Lippold, Schulze € 21,50

V 344: **Verkehrsträgerübergreifende Lärmkumulation in komplexen Situationen**
Popp, Eggers, Heidebrunn, Cortes € 21,00

V 345: **Aufbau einer Datenbank zur Berechnung exemplarischer Lärmsituationen mit Geräuschemissionsdaten der Straße und meteorologischen Daten**
Liepert, Skowronek, Eberlei, Crljenkovic, Müller, Schady, Elsen
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 346: **Zusammenhang reduzierter Geräuschgrenzwerte mit den in-use Geräuschemissionen bei unterschiedlichen Verkehrssituationen**
Müller, Huth, Liepert € 15,00

V 347: **Chancen in der Verkehrsbeeinflussung durch Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation**
Schwietering, Löffering, Spangler, Gabloner, Busch, Roszak, Dobmeier, Neumann
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 348: **Einsatz und Verkehrssicherheit von Fußgängerüberwegen**
Bohle, Busek, Schröder € 18,50

V 349: **Straßenbepflanzung und Verkehrssicherheit – Ermittlung unfallbeeinflussender Merkmale auf Basis empirischer Modelle unter besonderer Berücksichtigung der Bepflanzung im Seitenraum an Landstraßen**
Schreck-von Below € 22,00

V 350: **Wirksamkeit von Lärmschutzwandaufsätzen**
Bartolomaeus, Strigari, Sammet
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 351: **Effektivität und Wirtschaftlichkeit der Streustofflagerung – TAUSALA II**
Holldorb, Cypra, Pape
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2022

V 352: **Abriebe von Fahrhahnoberflächen**
Düring, Schmidt, Johannsen € 19,00

V 353: **Nutzung der C2X-basierten ÖV-Priorisierung an signalisierten Knotenpunkten**
Gay, Grimm, Otto, Partzsch, Gersdorf, Gierisch, Löwe, Schütze € 16,00

V 354: **Anwendung der Methode BIM in Konformität mit den Regelwerken der FGSV und des IT-Ko**
Radenberg, Müller, König, Hagedorn, Geistefeldt, Hohmann, Heinrichs, Stiehler, Kortemeyer
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 355: **Pilotversuch des Rechtsabbiegens von Rad Fahrern bei Rot**
Niestegge, Schüller, Hantschel, Schröter, Gerike
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 356: **Entwicklung von Einsatzkriterien für Fußgänger-schutzanlagen mit unterschiedlichen Grundstellungen**
Medicus, Schmotz, Gerike, Reinartz, Baier
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 357: **Qualifizierung der in Deutschland verwendeten Fahrzeug-Rückhaltesysteme mit verbessertem Schutz für Motorradfahrer nach den aktuellen europäischen Spezifikationen**
Klöckner, Gärtner
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 358: **Nutzenpotenziale von eCall im Verkehrsmanagement**
Schaarschmidt, van Driel, Reinhaller, Nitsche, Aleksa
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 359: **Management von Neophyten – Ein Überblick über die aktuelle Situation auf Straßenbegleitflächen**
Bartels
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 360: **Wirksamkeit von Tunnelwänden als Träger photokatalytischer Oberflächen – Hauptstudie**
Stephan, Ehm, Kamaruddin
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen
Tel. +(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-48

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

www.schuenemann-verlag.de

Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.