

PIV-Untersuchung des Nachlaufs einer beschichteten Vliesanordnung zum photokatalytischen Stickoxidabbau in Abluftkanälen von Straßentunneln

PIV measurements in the wake of a coated nonwoven fabric for photocatalytic nitrogen oxide reduction in exhaust ducts of road tunnels

W. Jessen, E. Mäteling, L. Mayolle, J. Kleffmann, N. Lichtenberg, W. Schröder

Lehrstuhl für Strömungslehre und Aerodynamisches Institut, RWTH Aachen University
Wüllnerstr. 5a, D-52062 Aachen, <http://www.aia.rwth-aachen.de>

2C-PIV, Umwelttechnik, Stickoxidabbau, Nachlaufuntersuchung

2C-PIV, environmental engineering, nitrogen oxide reduction, wake investigation

Zusammenfassung

Um die Schadstoffbelastung in Straßentunneln, an Tunnelportalen oder Lüftungsauslässen zu reduzieren, wird seit einiger Zeit der Einsatz photokatalytischer Oberflächen in Straßentunneln erforscht. Bisherige Untersuchungen konzentrierten sich meistens auf die Photokatalyse an den Tunnelwänden. In der vorliegenden Untersuchung liegt der Fokus auf dem photokatalytischen Stickoxidabbau (NO_x) in den Kanälen des Abluftsystems der Straßentunnel. Hier werden statt photokatalytischer Flächen mit photokatalytischer Farbe beschichtete Vliesanordnungen durchströmt, die entsprechend mit künstlichem UV-Licht bestrahlt werden.

Das sich im Nachlauf durchströmter, zickzackförmiger Vliesanordnungen einstellende Strömungsfeld wird im Windkanal experimentell mittels der 2C PIV-Messtechnik untersucht. Die Untersuchungen haben das Ziel, das Strömungsfeld im Nachlauf hinsichtlich einer möglichst effektiven Aneinanderreihung von Vliesanordnungen zu analysieren und die korrespondierende, numerische Simulation zu validieren. Es zeigt sich, dass sich ein streifenförmiges Strömungsfeld mit Bereichen hoher und niedriger Strömungsgeschwindigkeit im Nachlauf der Vliese ausbildet. Der Vergleich mit der numerischen Simulation ergibt eine gute Übereinstimmung hinsichtlich der sich einstellenden Strömungsstrukturen. Jedoch sind in der Simulation die maximalen Geschwindigkeiten um bis zu 25% höher als in den PIV-Messungen, was vermutlich auf die in der Simulation getroffenen Annahmen hinsichtlich der Repräsentation des Vlieses zurückzuführen sind.

Einleitung

Der Einsatz photokatalytischer Oberflächen wird schon seit einigen Jahren diskutiert und zum Teil bereits getestet, um die Schadstoffbelastung in Tunneln, aber auch an den Tunnelportalen oder Lüftungsauslässen zu reduzieren. Durch eine mögliche Reduktion der Schadstoffbelastung in der Tunnelluft würden zum einen die Fahrzeuginsassen bei einer Stausituation vor einer möglichen Gesundheitsbelastung geschützt. Hier ergeben sich gerade bei Fahrzeugen ohne Aktivkohlefilter in Innenräumen oft deutlich höhere Schadstoffbelastungen als z.B. an den Messstationen am Straßenrand. Zum anderen könnte bei einer photokatalytischen Schadstoffreduktion der Einsatz der Tunnellüftungen reduziert und damit Energie eingespart werden, wenn die verwendeten Lüfter einen höheren Energieverbrauch haben als die für die

Photokatalyse notwendigen UV-Beleuchtungsmittel. Weiterhin ist die Reduktion von Schadstoffen an den Tunnelportalen und Lüftungsauslässen von hohem Interesse, da hier auf Grund der hohen Schadstoffakkumulation in den Tunneln Grenzwertüberschreitungen auftreten können, die z.B. die Genehmigungsplanung von Neubautunneln erschweren und verzögern.

Bisherige Untersuchungen konzentrierten sich meist auf die photokatalytische Beschichtung der Tunnelwände. Eine der ersten Anwendungen wird in Guerrini 2012 beschrieben, bei der die Wände des „Umberto I“-Tunnels in Rom mit photokatalytisch aktivem Zementmörtel beschichtet und mit einer hohen UV-Strahlungsstärke von $\sim 10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ bestrahlt wurden. Der bidirektionale Tunnel hat eine Länge von 300 m und es liegen im Mittel geringe Windgeschwindigkeiten (0,6 m/s) und damit relativ lange Verweilzeiten vor. Dementsprechend wurde in der Studie eine signifikante Stickoxidreduktion (NO_x) von 20 % beobachtet.

Eine ähnliche Anwendung der Photokatalyse wurde von Riderelli et al. 2015 für einen Autobahntunnel in Ancona (Italien) veröffentlicht. Auch hier wurden die Wände des Tunnels mit photokatalytischem Mörtel beschichtet und mit UV-Lampen bestrahlt und die Änderungen vor und nach der Anwendung ermittelt. Der Tunnel war allerdings unidirektional mit deutlich höheren Strömungsgeschwindigkeiten von 3-5 m/s. Die Arbeit gibt leider keine Auskunft über den konkreten NO_x-Abbau und verweist daher auf zukünftige Studien.

Im gleichen Jahr (Gallus et al. 2015) wurde im Rahmen des europäischen LIFE+ PhotoPAQ-Projektes in zwei Kampagnen die Photokatalyse im Leopold II Tunnel in Brüssel (Belgien) untersucht. Bei den beiden Kampagnen wurden jeweils 80 bzw. 160 m lange Tunnelabschnitte eines unidirektionalen, zweispurigen Stadttunnels mit photokatalytischem Mörtel beschichtet, welcher im Labor gute Aktivitäten zeigte. Es konnte jedoch in keiner der Untersuchungen eine signifikante NO_x-Reduktion beobachtet werden und als Obergrenze des Abbaus nur ein Wert von $\leq 2 \%$ ermittelt werden. Die deutlich geringere NO_x-Reduktion in Brüssel im Vergleich zu der Studie von Guerrini 2012 liegt an der deutlich kürzeren Länge des beschichteten Tunnelabschnitts sowie der bis zu fünfmal höheren Windgeschwindigkeit im Leopold II Tunnel. Auch war die UVA-Strahlungsstärke in Rom sechsmal höher als in Brüssel.

In einigen Studien wird im Titel bzw. im Abstract die Verwendung der Photokatalyse in Tunneln zwar genannt (Wang und Xu 2018, Xia et al. 2019, Pan et al. 2019), diese aber in den Studien dann gar nicht behandelt, sondern nur die photokatalytische Umsetzung von NO_x im Labor untersucht.

Insgesamt stellt sich die Anwendung der Photokatalyse in Tunneln wegen der schnellen Deaktivierung der Oberflächen, der in Tunneln begrenzt möglichen UV-Bestrahlungsstärken, der hohen Stromkosten der UV-Beleuchtungsmittel und des fehlenden Abspülens der Oberflächen durch Regenwasser als aufwendig und schwer realisierbar dar. Daher liegt in dieser Untersuchung der Fokus auf dem photokatalytischen NO_x-Abbau in den Kanälen des Abluftsystems, wie es bei vielen Straßentunneln anzutreffen ist. Die Abluftkanäle befinden sich meist oberhalb des Verkehrsraums. Auch ist eine Anwendung in der Strömungsführung zu den Ventilatoren des Abluftkamins denkbar.

Anstelle angeströmter, photokatalytischer Flächen werden in dieser Anwendung durchströmte Vliesanordnungen untersucht, die mit einer photokatalytisch reaktiven Farbe überzogen sind. Bei dem Vliesmaterial handelt es sich um sogenannte Geomatten, die für den Langzeiterosionsschutz an gefährdeten Hängen verwendet werden. Die Geomatten werden mit einer photokatalytisch reaktiven Farbe überzogen. Die chemischen Reaktionen zur Umwandlung des NO_x erfolgen durch die Bestrahlung des Vlieses mit UV-Lampen, die ebenfalls in den Kanälen positioniert werden. Bei ausreichender Beleuchtung findet die chemische Reaktion im durchströmten Volumen des Vlieses statt, was zu einem NO_x-Abbau führt. Auch Lösungen zum Reinigen der Vliese werden im Rahmen des Gesamtprojekts behandelt.

Die PIV-Messungen werden in der geschlossenen Messstrecke eines Niedriggeschwindigkeitswindkanals im Nachlauf verschiedener Vliesanordnungen durchgeführt. Ziel der Studie ist es, die korrespondierende, numerische Simulation zu validieren und das Strömungsfeld im Nachlauf hinsichtlich einer Aneinanderreihung von Vliesanordnungen zu analysieren.

Im Folgenden werden die untersuchten Vlieskonfigurationen sowie der Messaufbau im Windkanal beschrieben. Anschließend erfolgt die Darstellung und Analyse der Ergebnisse sowie der Vergleich mit der numerischen Simulation.

Vlieskonfigurationen

Bei dem verwendeten Vliesmaterial handelt es sich um sogenannte Geomatten, die für den Langzeiterosionsschutz an gefährdeten Hängen verwendet werden. Die in Abb.1 (links) dargestellten Geomatten haben eine Dicke von ca. 20 mm und werden mit einer photokatalytisch reaktiven Farbe überzogen.



Abb. 1: Mit reaktiver Farbe beschichtetes Vlies (links) und Prinzip der zickzack-Anordnung (rechts).

Um in einem rechteckigen Abluftkanalquerschnitt unter der Berücksichtigung einer optimalen UV-Ausleuchtung eine möglichst große Vliesfläche zu durchströmen, wird eine zickzack-förmige Anordnung gewählt. Bei dieser Anordnung wird das Vlies zwischen Umlenkstäben eingespannt und die röhrenförmigen UV-Lampen können entsprechend der Darstellung in Abb. 1 (rechts) in die Anordnung eingebracht werden.

Der für die Nachlaufuntersuchungen eingesetzte Windkanal ist ein Niedergeschwindigkeits-Kanal Göttinger Bauart mit einer geschlossenen Messtrecke. Die Messtrecke hat einen Querschnitt von $0,8 \times 0,8 \text{ m}^2$ und eine Länge von 2 m. In Abb. 2 sind die zwei zickzack-förmigen Vlieskonfigurationen skizziert, deren Nachlaufströmung analysiert wird.

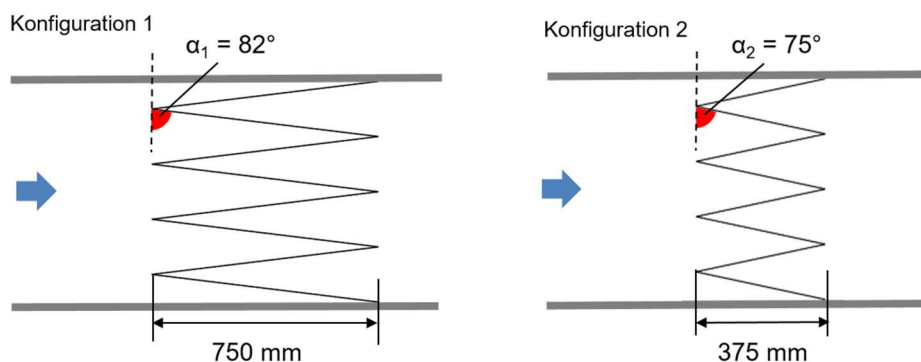


Abb. 2: Im Windkanal untersuchte Vlieskonfigurationen.

Versuchsaufbau

Abb. 3 zeigt die Konfiguration 1 in der Messtrecke des Windkanals. Die Gesamtlänge des durchströmten Vlieses beträgt 6 m für Konfiguration 1 bzw. 3 m für Konfiguration 2. Der Nachlauf der Vliesanordnungen wird mittels der 2C-PIV-Messtechnik in der Symmetrieebene parallel zum Windkanalboden untersucht. Die PIV-Messungen werden mit einem Doppelpuls laser *EVERGREEN EVG00200* bei $\lambda = 527 \text{ nm}$ und einer *pco.edge 5.5M CLHS* Kamera mit *Nikon AF Nikkor* Objektiven mit Festbrennweiten von jeweils 50 mm und 85 mm durchgeführt. Die Auflösung liegt bei $7,6 \text{ px/mm}$ für eine Festbrennweite von 50 mm und bei $9,6 \text{ px/mm}$ für eine Festbrennweite von 85 mm bei $2555 \times 2158 \text{ px}^2$. Es werden DEHS-Partikel mit Durchmessern zwischen 2 – 5 μm verwendet, die über einen Seedinggenerator der Windkanalströmung

zugefügt werden. Um den Druckverlust durch die Vliesanordnungen zu ermitteln, werden Druckbohrungen vor und hinter der Anordnung platziert und der Druckverlust mittels Differenzdruckmessungen (*testo 435-4*) aufgezeichnet.



Abb. 3: Im Windkanal eingebaute Vlieskonfiguration 1.

Abb. 4 zeigt eine Prinzipskizze des Messaufbaus. Der Laser und die Kamera sind außerhalb der Messstrecke positioniert. Der Laserstrahl für die Messbereiche 1 und 2 wird über einen Lichtarm durch eine kleine Öffnung im Kanalboden in die Messstrecke geleitet. Dort wird er an die Lichtschnittoptik gekoppelt, welche den Strahl zu einem Lichtschnitt parallel zum Kanalboden entgegen der Strömungsrichtung aufspannt. Die Entfernung zum Messbereich ist so gewählt, dass die der Strömung ausgesetzten, kleinen Messaufbauten (Lichtschnittoptik, Lichtarm, Haltestativ) keinen Einfluss auf die Strömung in den Messebenen haben.

In den Messungen für die beiden Vlieskonfigurationen 1 und 2 wurden drei Bereiche untersucht, die in Abb. 4 skizziert sind. Die Bereiche erfassen die Strömung in den Zwischenräumen der Vliesanordnung (Messbereich 1), die Nachlaufströmung hinter den Umlenkstäben (Messbereich 2) und die Strömung stromab der Vliesanordnung (Messbereich 3). Sie befinden sich in der Symmetrieebene (40 cm über dem Kanalboden) des Windkanals. Die Begrenzungen der Bereiche ergeben sich aus der Lichtintensität des Laserschnitts sowie der optischen Zugänglichkeit der Zwischenräume der Vliesanordnung.

Die untersuchten Anströmgeschwindigkeiten lagen bei $u_\infty = \{1,5; 2; 2,5; 3; 5; 7\} \text{ m/s}$. Somit ergeben sich bezogen auf den hydraulischen Durchmesser der Windkanalmessstrecke Reynoldszahlen zwischen $80.000 \leq Re \leq 360.000$.

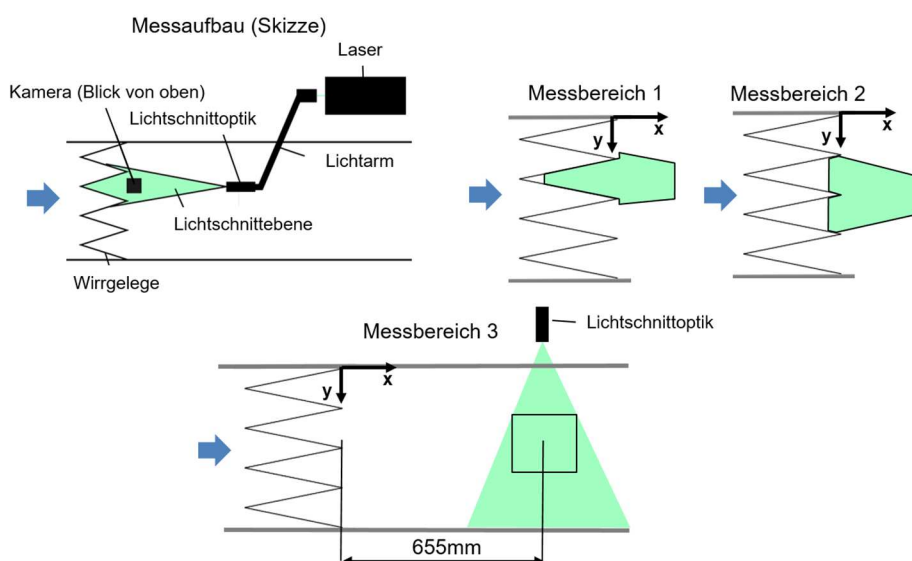


Abb. 4: Messaufbau und Messbereiche im Windkanal.

Ergebnisse

Die Ergebnisse aus den PIV-Messungen werden im Folgenden als zeitlich gemittelte Geschwindigkeitsverteilungen in Hauptströmungsrichtung (x -Richtung) dargestellt. Aus Platzgründen werden an dieser Stelle nicht die Ergebnisse aller Anströmgeschwindigkeiten diskutiert. Vorangegangene, numerische Untersuchungen, in denen auch die NO_x -Abbaurrate bestimmt wurde, kamen zu dem Ergebnis, dass unter der Voraussetzung einer vollständigen UV-Ausleuchtung geringe Anströmgeschwindigkeiten $< 3 \text{ m/s}$ und somit längere Verweilzeiten erforderlich sind, um eine optimale photokatalytische Reaktion zu erreichen. Daher liegt der Fokus im Folgenden auf einer Anströmgeschwindigkeit von $u_\infty = 2,5 \text{ m/s}$.

Abb. 5 (links) zeigt die über 600 Bilder aus beiden Messbereichen zusammengefügte gemittelte Geschwindigkeitsverteilung im unmittelbaren Nachlauf der Vlieskonfiguration 1. Die Geschwindigkeitsverteilung zeigt Bereiche maximaler Geschwindigkeiten, die ihren Ursprung in den stromabgewandten Zwischenräumen haben, sowie Bereiche sehr niedriger Geschwindigkeiten unmittelbar hinter den Umlenkstäben. Die maximalen Geschwindigkeiten erreichen Werte von bis zu $3,5 \text{ m/s}$, während die niedrigsten Werte bei etwa 1 m/s liegen. Somit bildet sich leeseitig der Vliesanordnung ein streifenförmiges, inhomogenes Strömungsfeld aus, in dem keine Durchmischung normal zur Hauptströmung stattfindet.

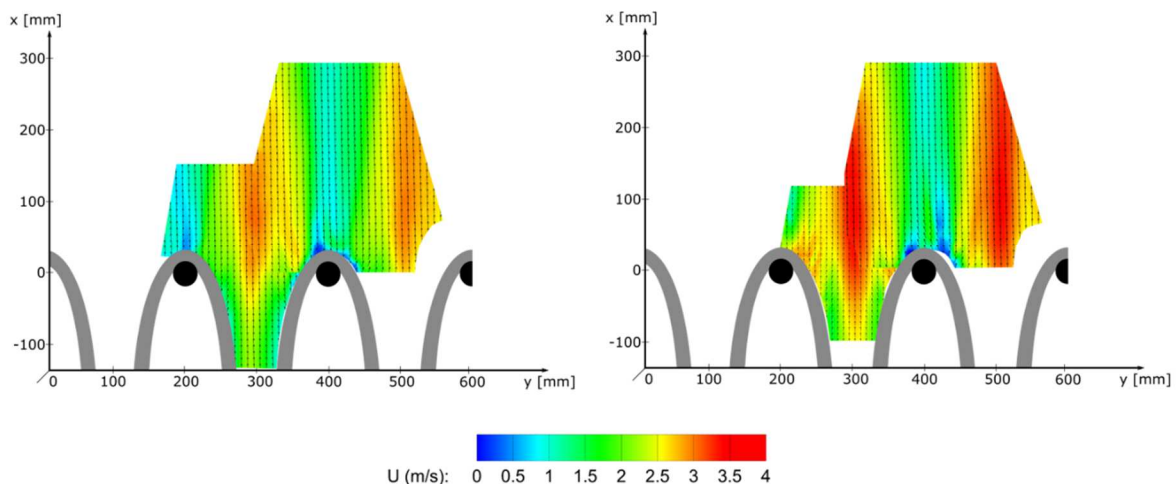


Abb. 5: Zeitlich gemittelte Geschwindigkeitsverteilung im Nachlauf der Vlieskonfiguration 1 (links) und Vlieskonfiguration 2 (rechts) bei der Anströmgeschwindigkeit $u_\infty = 2,5 \text{ m/s}$.

Auch für die Vlieskonfiguration 2 (Abb. 5 rechts) stellt sich ein ähnliches Strömungsfeld ein, das geprägt ist von einer streifenförmigen Geschwindigkeitsverteilung im Nachlauf der Vliesanordnung. Die Maximal- und Minimalgeschwindigkeiten entsprechen in etwa denen der Konfiguration 1 mit einer Tendenz zu leicht höheren Maximalwerten für die Konfiguration 2.

In Abb. 6 ist die gemittelte Geschwindigkeitsverteilung im Messbereich 3 stromab der Vlieskonfiguration 2 dargestellt. Die streifenförmige Geschwindigkeitsverteilung ist noch stark ausgeprägt. Die maximalen Geschwindigkeitswerte haben nur leicht abgenommen, während die niedrigen Geschwindigkeiten leicht zugenommen haben. Eine klare Durchmischung der Strömung deutet sich noch nicht an. Aufgrund der baulichen Gegebenheiten der Windkanalmessstrecke sind PIV-Messungen weiter stromab jedoch nicht möglich. Entsprechende Messungen für die Konfiguration 1 im Messbereich 3 wurden nicht mehr durchgeführt, da die Konfiguration 2 wegen der besseren Zugänglichkeit zur Positionierung der UV-Lampen favorisiert wird.

Aus den Druckdifferenzmessungen ließen sich unter Annahme einer Luftdichte $\rho = 1,204 \text{ kg/m}^3$ die gemittelten Druckverlustbeiwerte $\zeta_1 = 2,81$ (Konfiguration 1) bzw. $\zeta_2 = 2,54$ (Konfiguration 2) bestimmen. Die Druckverlustbeiwerte sind bezüglich der Auslegung der erforderlichen Gebläseleistung in zukünftigen Versuchen unter realen Bedingungen sowie bei der Auslegung einer realen Anwendung im Tunnelbetrieb relevant.

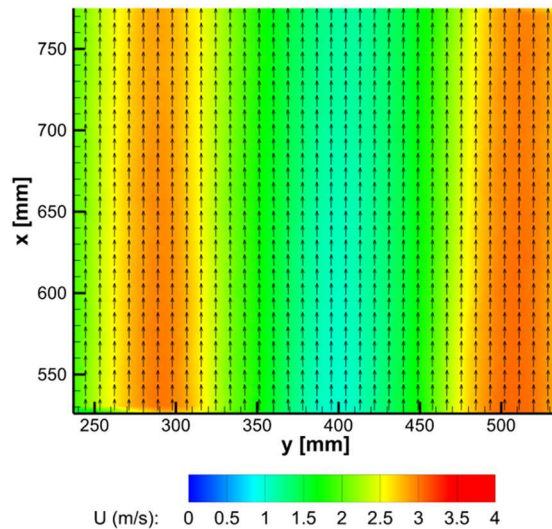


Abb. 6: Gemittelte Geschwindigkeitsverteilung im Nachlauf der Vlieskonfiguration 2 im Messbereich 3.

Numerische Simulation und Vergleich mit Experiment

Analog zu den experimentellen Untersuchungen wurden uRANS-Simulationen an den gleichen Vlieskonfigurationen durchgeführt. Das Vlies wurde als poröses Medium implementiert, wobei die Porosität anhand von experimentellen Druckverlustmessungen über eine beschichtete Vliesprobe bestimmt und in der Simulation als Randbedingung vorgegeben wurde.

Da zu erwarten war, dass es sich bei den betrachteten Strömungen um instationäre Probleme handelt, wurden die Erhaltungsgleichungen mit einer impliziten Methode mit einer Genauigkeit zweiter Ordnung in der Zeit gelöst. Der Zeitschritt betrug $0,02\text{ s}$. Zur Schließung der RANS-Gleichungen wurde das *SST $k - \omega$* Turbulenzmodell verwendet. Das Integrationsgebiet bestand aus einem $10 \times 0,8\text{ m}^2$ großen „Windkanal“ und wurde mit einem Gitter diskretisiert, das in wandfernen Gebieten aus Polygonen und in Bereichen nahe der Wand und des Vlieses aus Prismen besteht. Das Gebiet des Geleges enthält ca. 59.000 Zellen und das Gebiet des Strömungskanales ca. 2,5 Mio. Zellen. Ein Ausschnitt des Gitters ist in Abb. 7 dargestellt.

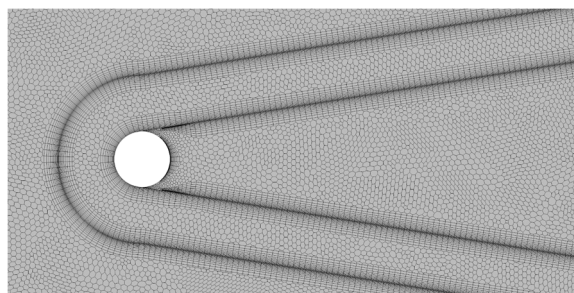


Abb.7: Ausschnitt des verwendeten Gitters.

Die Simulationen wurden in Anlehnung an die Experimente für Anströmgeschwindigkeiten von $u_\infty = \{1,5; 2; 2,5; 3; 5; 7\}\text{ m/s}$ durchgeführt. Jedoch liegt auch hier der Fokus bei den niedrigen Anströmgeschwindigkeiten aufgrund der effizienteren NOx-Abbaurrate. In Abb. 8 (links) ist eine instantane Verteilung der Geschwindigkeitskomponente in Hauptströmungsrichtung bei $u_\infty = 2,5\text{ m/s}$ aus der Simulation der Vlieskonfiguration 2 abgebildet. Deutlich zu erkennen sind die Nachläufe hinter der Vliesanordnung, die über eine relativ lange Wegstrecke erhalten bleiben und daher zu einer stark inhomogenen Verteilung im Strömungskanal führen. Zum Vergleich sind beispielhafte, zeitaufgelöste Geschwindigkeitsverteilungen der Messbereiche 1 - 3 aus

den PIV-Messungen in Abb. 8 (rechts) dargestellt. Im unmittelbaren Nachlauf der Vliesanordnung (Messbereich 1 und 2) herrscht eine gute Übereinstimmung der streifenförmigen Strömungsstrukturen. Jedoch sind die Maximalgeschwindigkeiten in der numerischen Simulation um etwa 25% höher als die aus den PIV-Messungen. Im weiter stromab betrachteten Bereich (Messbereich 3) scheint sich in der numerischen Simulation das streifenförmige Strömungsfeld aufzulösen und es werden erste Durchmischungsvorgänge erkennbar. Hingegen bleibt in den experimentellen Ergebnissen die streifenförmige Geschwindigkeitsverteilung erhalten.

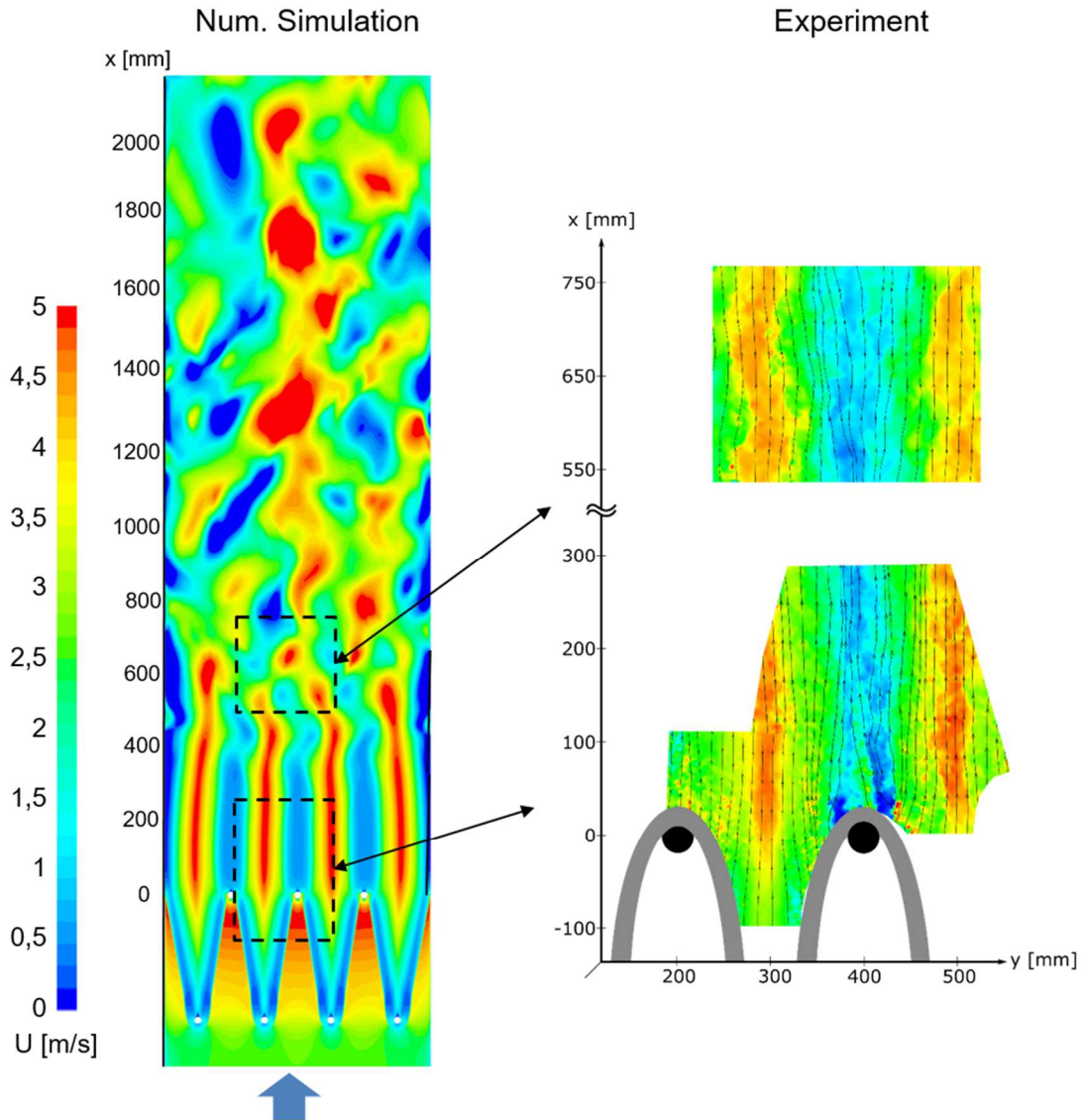


Abb. 8: Instantane Geschwindigkeitsverteilungen aus der numerischen Simulation (links) und den PIV-Messungen (rechts) für die Anströmgeschwindigkeit $u_\infty = 2,5 \text{ m/s}$

Die Unterschiede zwischen den experimentellen und numerischen Ergebnissen können auf die Modellierung des Vlieses zurückgeführt werden. Die Modellierung beruht auf der Annahme, dass es sich bei dem Gelege um ein poröses Medium handelt, bei dessen Durchströmung ein zusätzlicher Widerstand entsteht. Der dimensionslose Beiwert dieses Widerstandes wurde experimentell bestimmt. Die Verdrängung des Geleges wurde jedoch nicht berücksichtigt, was die veränderte Geschwindigkeitsverteilung im Nachlauf und die überschätzten Geschwindigkeitswerte erklären kann. Zukünftige Simulationen mit einer verbesserten Repräsentation des Vlieses werden zur Validierung dieser Hypothese beitragen.

Zusammenfassung

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens zum photokatalytischen Stickoxidabbau (NO_x) in den Kanälen des Abluftsystems von Straßentunneln wurden mit photokatalytischer Farbe beschichtete, zickzackförmige Vliesanordnungen im Windkanal mittels der PIV-Messtechnik untersucht. Im Fokus stand das sich einstellende Strömungsfeld im Nachlauf verschiedener Vliesanordnungen. Die Messungen zeigten, dass der Nachlauf der Vliese durch ein streifenförmiges Strömungsfeld bestehend aus Bereichen hoher und niedriger Geschwindigkeiten charakterisiert wird. Die streifenförmigen Geschwindigkeitsverteilungen bleiben über die gesamte Windkanalmesstrecke stabil, sodass die Durchmischung der Strömung im Experiment nicht mehr abgebildet werden konnte.

Der Vergleich mit der numerischen Simulation unter den gleichen Randbedingungen ergibt eine gute Übereinstimmung hinsichtlich der sich einstellenden Strömungsstrukturen. Zu Abweichungen kommt es jedoch bei den maximalen Geschwindigkeitswerten, die in der Numerik um bis zu 25% höher sind. Diese Abweichungen sind auf die in der Simulation getroffenen Annahmen hinsichtlich der Darstellung des Vlieses zurückzuführen. Inwiefern das Strömungsfeld einen Einfluss auf den NO_x-Abbau bei einer Aneinanderreihung der Vliese hat, wird Gegenstand weiterer Untersuchungen in diesem Forschungsvorhaben sein.

Dankesworte

Dieser Beitrag entstand im Rahmen des von Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) geförderten Forschungsvorhaben 88.0170/2018-Verbundprojekt: "TunNO_x - Reduktion der Stickstoffbelastung von Straßentunneln mit der Hilfe photokatalytischer Reaktoren -Teilvorhaben RWTH Aachen: Experimentelle und numerische Untersuchungen zur Entwicklung des Reaktors". Die an diesem Forschungsvorhaben beteiligten Partner sind die Bergische Universität Wuppertal (BUW), das Aerodynamische Institut (AIA) und das Institut für Straßenwesen (ISAC) der RWTH Aachen sowie die ISAC GmbH.

Literatur

Guerrini, G.L., 2012: Photocatalytic Performance in a City Tunnel in Rome: NO_x Monitoring Results. *Construction and Building Materials*, Vol. 27, pp. 165-175

Gallus, M., Akylas, V., Barmpas, F., Beeldens, A., Boonen, E., Boréave, A., Cazaunau, M., Chen, H., Daële, V., Dous-sin, J. F., Dupart, Y., Gaimoz, C., George, C., Grosselin, B., Herrmann, H., Ifang, S., Kurtenbach, R., Maille, M., Mellouki, A., Miet, K., Mothes, 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*, Vol. 84, pp. 125–133, doi:10.1016/j.buildenv.2014. 10.032

Riderelli, L., Bocci, E., Bocci, M., Fava, G., 2015: Airborne Pollutant inside a Highway Tunnel Coated with a Photocatalytic Mortar, *Energy and Environmental Engineering*, Vol. 3(2), pp. 23-31

Wang, T., Xu, T., 2018: Photocatalytic Activity of N-Doped TiO₂ to Vehicle Exhaust in Road Tunnel, *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 46(3), pp. 1076-1089, doi:10.1520/JTE20170014

Xia, H., Liu, G., Zhang, R., Song, L., Chen, H., 2019: The Photocatalytic Degradation of Vehicle Exhausts by Fe/N/Co-TiO₂ Waterborne Coating under Visible Light, *Materials*, Vol. 12, 3378, doi:10.3390/ma12203378

Pan, H., Chen, X.-S., Wang, L., Mei, Y., Xu, D.-M., 2019: Photocatalytic Performance and Economy of de-NO_x in Urban Tunnel Exhaust by TiO₂, *China Environmental Science*, Vol. 39(1), pp. 118-125