



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Machbarkeitsstudie zur Reduktion von Feinstaub oder seiner Vorläufergase mittels spezieller Strassenbeläge

Étude de faisabilité pour la réduction de la poussière fine ou de ses gaz précurseurs au moyen de revêtements routiers spéciaux

Feasibility study on the reduction of particulate matter or its precursor gases by means of special road surfaces

Berner Fachhochschule - Architektur, Holz und Bau (BFH-AHB)
Dr. Armin Rist
Prof. Dipl.-Ing. Martin Stolz
Dipl.-Ing. Philipp Heintzmann
B. Eng. Frederik Tigges
M. Sc. Carmen Gander

Forschungsprojekt VSS 2012/402 auf Antrag des Schweizerischen Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Dezember 2015

1543

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen unterstützten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.

Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que les auteurs ayant obtenu l'appui de l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 « Clôture du projet », qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

La responsabilità per il contenuto di questo rapporto spetta unicamente agli autori sostenuti dall'Ufficio federale delle strade. Tale indicazione non si applica al modulo 3 "conclusione del progetto", che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e di cui risponde solo quest'ultima.

Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) supported by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.

Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Machbarkeitsstudie zur Reduktion von Feinstaub oder seiner Vorläufergase mittels spezieller Strassenbeläge

Étude de faisabilité pour la réduction de la poussière fine ou de ses gaz précurseurs au moyen de revêtements routiers spéciaux

Feasibility study on the reduction of particulate matter or its precursor gases by means of special road surfaces

Berner Fachhochschule - Architektur, Holz und Bau (BFH-AHB)
Dr. Armin Rist
Prof. Dipl.-Ing. Martin Stolz
Dipl.-Ing. Philipp Heintzmann
B. Eng. Frederik Tigges
M. Sc. Carmen Gander

Forschungsprojekt VSS 2012/402 auf Antrag des Schweizerischen Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Prof. Dipl.-Ing. Martin Stolz, Berner Fachhochschule - Architektur, Holz und Bau (BFH-AHB), Institut für Siedlungsentwicklung und Infrastruktur

Mitglieder

Dr. Armin Rist
Dipl.-Ing. Philipp Heintzmann
B. Eng. Frederik Tigges
M. Sc. Carmen Gander

Federführende Fachkommission

Fachkommission 3: Baustoffe

Begleitkommission

Präsidentin

Dipl.-Ing. Sandra Dünner, Walo Bertschinger Central AG

Mitglieder

Dipl. Baumeister Rudolf Schluep, Strasseninspektorat Solothurn
Dipl.-Ing. Bernard Schmid, Laboroute SA
Dipl.-Ing. Luzia Seiler, Bundesamt für Strassen ASTRA
Dr. Lily Poulikakos, EMPA
Dr. Christoph Hueglin, EMPA
Dr. André Prévôt, Paul Scherrer Institut PSI
Dr. Gaston Theis-Goldener, Bundesamt für Umwelt BAFU

Antragsteller

Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von <http://www.mobilityplatform.ch> heruntergeladen werden.

Inhaltsverzeichnis

Impressum	4
Zusammenfassung	7
Résumé	9
Summary	11
1 Ausgangslage.....	13
2 Zielsetzungen	17
3 Vorgehen.....	19
4 Stand der Forschung und Technik.....	21
4.1 Gliederung der betrachteten Technologien.....	21
4.2 Lärm-reduzierende Strassenbeläge.....	22
4.2.1 Feinstaub-mindernde Wirkung lärm-reduzierender Strassenbeläge	22
4.2.2 Zusammenfassung Kapitel 4.2.....	23
4.3 Photokatalytische Oberflächen	24
4.3.1 Photokatalytische Beschichtungen	25
4.3.2 Inkorporation photokatalytischer Pigmente in Baustoffe.....	30
4.3.3 Einmischung einer photokatalytischen Suspension in offenporige Asphalt-Beläge	33
4.3.4 Ansätze zur Standardisierung photokatalytischer Technologien im Strassenraum.....	34
4.3.5 Zusammenfassung Kapitel 4.3.....	37
4.4 Grenzen und Lücken der aktuellen Forschung und Technik	38
5 Analyse und Bewertung der Wirksamkeit	41
5.1 Methode der Wirksamkeitsanalyse und -bewertung	41
5.1.1 Selektion zu berücksichtigender Technologien für Wirksamkeit.....	41
5.1.2 Kriterium für Wirksamkeit bezüglich Feinstaub-Minderung	42
5.1.3 Einflussfaktoren der Wirksamkeit.....	43
5.1.4 Normalisierung der Wirksamkeit	46
5.1.5 Bewertung der Wirksamkeit	47
5.2 Resultate der Wirksamkeitsanalyse und -bewertung.....	48
5.2.1 Quantitative Bewertung nach Klassen	48
5.2.2 Qualitative Bewertung anhand von Einflussfaktoren	50
5.2.3 Selektion wirksamer Technologien	50
6 Analyse und Bewertung der technischen Machbarkeit	51
6.1 Methode der Machbarkeitsanalyse und -bewertung	51
6.1.1 Selektion relevanter Technologien für Machbarkeit.....	51
6.1.2 Kriterien für Machbarkeit.....	51
6.1.3 Referenz für Machbarkeit.....	52
6.1.4 Qualitative Analyse als Grundlage für Bewertung	53
6.1.5 Semi-quantitative Bewertung nach Einzelkriterien mit Punkten	53
6.1.6 Ermittlung Machbarkeit gesamt und für übergeordnete Kriterien	53
6.2 Resultate der Machbarkeitsanalyse und -bewertung.....	54
6.2.1 Übersicht der Resultate.....	54
6.2.2 Machbarkeit bezüglich Verfahrensschritten	54
6.2.3 Machbarkeit bezüglich Fahrbahnbeeinflussung.....	59
6.2.4 Machbarkeit bezüglich Umweltverträglichkeit	61
6.2.5 Machbarkeit gesamt.....	63

7	Analyse und Bewertung des Kosten / Nutzen-Verhältnisses.....	65
7.1	Methode der Kosten/Nutzen-Analyse und -Bewertung	65
7.1.1	Anpassung selektierter Technologien.....	65
7.1.2	Kriterien für Kosten und Nutzen.....	65
7.1.3	Referenz für Kosten und Nutzen	66
7.1.4	Informationen zu Kosten und Nutzungsdauer	66
7.1.5	Bestimmung und Bewertung des Kosten/Nutzen-Verhältnisses	66
7.2	Resultate der Kosten/Nutzen-Analyse und -Bewertung	67
7.3	Vergleich mit alternativen Massnahmen zur Feinstaub-/ NO _x -Reduktion	68
8	Experten-Einschätzungen.....	71
8.1	Offenporige Asphalt-Beläge.....	71
8.2	Photokatalytische Beläge.....	71
9	Schlussfolgerungen	75
	Anhänge.....	77
	Glossar.....	81
	Literaturverzeichnis.....	83
	Projektabschluss	87
	Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen	91

Zusammenfassung

In der Schweiz konnte die Feinstaub-Belastung gemäss Angaben des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) während der letzten zehn Jahre deutlich verringert werden. Dennoch werden die Grenzwerte in Städten teilweise noch immer überschritten, sodass weitere Anstrengungen nötig sind. In dieser Studie wurde daher analysiert, inwiefern sich spezielle Strassenbeläge eignen, Feinstaub oder dessen Vorläufgase im bodennahen Strassenraum zu vermindern.

Untersucht wurden insgesamt neun verschiedene Belagstechnologien: dünne bituminöse und offenporige Asphalt-Deckschichten, die zusammen die lärm-reduzierenden Beläge bilden, sowie sieben unterschiedliche photokatalytische Beläge mit Titandioxid-Partikeln. Lärm-reduzierende Beläge vermindern Feinstaub direkt, photokatalytische indirekt, indem sie Feinstaub-Vorläufgase reduzieren, hier Stickstoffmonoxid. Um die untersuchten Beläge bezüglich ihrer Wirksamkeit, die Feinstaub- oder Stickoxid-Konzentration zu senken, vergleichen zu können, wurden die Angaben aus der Literatur zunächst auf einheitliche Referenzwerte für die zahlreichen Einflussfaktoren umgerechnet, das heisst normalisiert.

Unter den lärm-reduzierenden Belägen erwiesen sich dünne bituminöse Deckschichten als unwirksam oder gar kontraproduktiv und wurden daher nicht weiter betrachtet. Offenporige Beläge zeigten hingegen die höchste Wirksamkeit mit einer Reduktion der Feinstaub-Konzentration um etwa 9 %. Die verschiedenen photokatalytischen Beläge vermögen die Stickstoffmonoxid-Konzentrationen in Strassennähe um durchschnittlich 1 % zu verringern, minimal um 0.4 %, maximal um 2.5 %. Als Kosten für eine einprozentige Konzentrationsminderung des jeweiligen Luftschadstoffs pro Quadratmeter und Jahr ergaben sich im Fall offenporiger Beläge 8 Rappen und durchschnittlich zehn Mal so viel im Fall photokatalytischer Beläge.

Offenporige Asphalt-Beläge erwiesen sich jedoch in der Schweiz für den Einsatz innerorts als zu wenig gebrauchstauglich, insbesondere aufgrund der hohen Empfindlichkeit beim Einbau und gegenüber den starken Beanspruchungen des Stadtverkehrs, sowie des deutlich erhöhten Streusalzbedarfs. So können sie zwar ausserorts zur Feinstaub-Minderung eingesetzt, innerorts aber nicht empfohlen werden. Für photokatalytische Beläge konnte bis heute nicht zweifelsfrei nachgewiesen werden, dass die verwendeten Titandioxid-Nanopartikel und die photochemischen Reaktionsprodukte langfristig unschädlich für die Umwelt sind, was seitens des BAFU ein Ausschlusskriterium für den Einsatz eines Strassenbelags darstellt. Zudem sind die Wirksamkeiten der Feinstaub-Vorläufgas-Minderung zu gering, als dass sich der Mehraufwand lohnen würde. Sie werden daher nicht zur Anwendung empfohlen.

Künftig sollte untersucht werden, inwiefern sich semi-dichte Asphalt-Beläge zur Minderung von Feinstaub innerorts eignen, da sie robuster als offenporige sind. Ebenfalls sinnvoll wäre die Weiterentwicklung offenporiger Beläge mit geringerer Empfindlichkeit. Schliesslich sollte die Unbedenklichkeit photokatalytischer Beläge für die Umwelt nachgewiesen und ihre Wirksamkeit der Feinstaub-Vorläufgas-Reduktion gesteigert werden. Ein vielversprechender Ansatz ist dabei die Vergrösserung der aktiven Oberfläche.

Résumé

Selon les données de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV), durant les dix dernières années, le taux de poussières fines a pu être réduit de manière significative en Suisse. Cependant, les valeurs limites sont encore parfois dépassées dans les villes, si bien qu'il est nécessaire de poursuivre les efforts. Dans cette étude, des analyses ont été faites pour déterminer dans quelle mesure des revêtements de chaussée spéciaux sont susceptibles de réduire les poussières fines ou leurs gaz précurseurs dans l'environnement immédiat de l'espace routier.

En tout, neuf technologies de revêtement routier différentes ont été testées: d'une part des revêtements réduisant le bruit (des couches de protection bitumeuses fines ainsi que des couches poreuses) ; d'autre part sept revêtements photocatalytiques différents, constitués de particules en dioxyde de titane. Les revêtements peu bruyants réduisent directement les poussières fines, les photocatalytiques indirectement, en réduisant les gaz précurseurs, ici le monoxyde d'azote. Afin de pouvoir comparer les revêtements testés sur le plan de leur efficacité à baisser la concentration de particules fines ou d'oxyde d'azote, il a fallu convertir les données issues de la littérature en valeurs de référence uniformes (c'est-à-dire les normaliser) pour les nombreux facteurs d'influence.

Parmi les couches réduisant le bruit, les revêtements bitumeux fins se sont avérés inefficaces, voire contre-productifs et n'ont donc pas fait l'objet de plus amples investigations. Les revêtements poreux ont en revanche montré l'efficacité la plus grande, avec une réduction de la concentration de poussières fines d'environ 9 %. Les différents revêtements photocatalytiques sont à même de réduire les concentrations de monoxyde d'azote de 1 % en moyenne à proximité des routes (au minimum de 0,4 %, et au maximum de 2,5 %). Les coûts de production pour une réduction de la concentration de 1 % de chaque polluant atmosphérique par mètre carré et par année sont de 8 centimes pour les revêtements poreux et en moyenne 10 fois plus élevés pour les revêtements photocatalytiques.

On sait cependant qu'en Suisse les revêtements d'asphalte poreux sont peu indiqués dans les agglomérations. En effet, ils présentent une trop grande sensibilité lors de leur pose et réagissent mal aux fortes sollicitations du trafic urbain ainsi qu'à l'usage du sel de déneigement, en nette augmentation. Ces revêtements se prêtent à un usage en dehors des agglomérations pour réduire les poussières fines, mais ils ne peuvent pas être recommandés pour les zones urbaines. Quant aux revêtements photocatalytiques, il n'a jusqu'à présent pas été prouvé avec certitude que les nanoparticules de dioxyde de titane et les produits de réaction photochimiques utilisés sont inoffensifs à long terme pour l'environnement, ce que l'OFEV considère comme un critère d'exclusion pour ce type de revêtement. De surcroît, les effets obtenus par la réduction des gaz précurseurs sont trop faibles pour que les dépenses supplémentaires en valent la peine. Leur utilisation n'est donc pas recommandée.

À l'avenir, il serait utile d'analyser dans quelle mesure des revêtements d'asphalte semi-denses pourraient convenir pour réduire les poussières fines dans les agglomérations, étant donné qu'ils sont plus résistants que les revêtements poreux. Il serait également intéressant de développer des revêtements poreux moins sensibles. Enfin, il faudrait pouvoir démontrer l'inoffensivité des revêtements photocatalytiques pour l'environnement et augmenter leur efficacité à réduire les gaz précurseurs. Dans ce domaine, une approche prometteuse est l'agrandissement de la surface active.

Summary

According to the Federal Office for the Environment (FOEN) the pollution due to particulate matter could be considerably reduced within the last ten years in Switzerland. However, the threshold values in cities are partly still exceeded so that further efforts are necessary. Thus, in this study it is analyzed in what way special road pavements are suitable to reduce particulate matter or its precursor gases for areas near the road.

Altogether nine different pavement technologies were investigated: thin bituminous and porous asphalt layers, which form together the noise-reducing pavements, as well as seven different photocatalytic pavements containing titanium dioxide particles. Noise-reducing pavements degrade particulate matter directly, photocatalytical ones indirectly by lessening its precursor gases, in this case nitrogen monoxide. In order to allow for comparing the investigated pavements regarding their efficiency in lowering the concentrations of particulate matter or nitrogen monoxide, first literature data were adjusted to homogenous reference values for the various influencing factors, that is data were normalized.

Among the noise-reducing pavements, thin bituminous layers turned out to be not efficient or even counterproductive and were thus not further considered. In contrast, porous layers showed the highest efficiency with a reduction of the particulate matter concentration by about 9 %. The different photocatalytic pavements proved to be capable of reducing nitrogen monoxide concentrations near the road by 1 % on average, 0.4 % minimally and 2.5 % maximally. The costs for a one percent reduction of the respective air pollutant's concentration per square meter and year were calculated to be 8 Swiss centimes for porous asphalt and ten times more on average for photocatalytical pavements.

However, porous asphalt surfaces turned out to be not serviceable enough for inner-city applications in Switzerland, especially because of their high sensitivity during installation and to the strong stresses of urban traffic, as well as of the clearly increased consumption of de-icing salt. They can thus be used indeed to reduce particulate matter in non-urban areas, but are not recommendable for urban areas. For photocatalytic pavements it could not be proven unequivocally to date that the used titanium dioxide nanoparticles and the photochemical reaction products are harmless for the environment which is an exclusion criterion of the FOEN for the application of a road pavement. Furthermore, the efficiencies in reducing particulate matter precursor gases are too low to be worthwhile in respect of the additional expenditures. They are thus not recommended for application.

In future, semi-dense asphalt layers should be investigated regarding their suitability for the reduction of particulate matter in urban areas as they are more robust than porous layers. In addition, the advancement of porous asphalt layers making them less sensitive would be reasonable. Finally, the harmlessness of photocatalytic pavements for the environment should be proven and their efficiency in reducing particulate matter precursor gases be augmented. A promising approach therefor is to increase the active surface.

1 Ausgangslage

Feinstaub ist ein Sammelbegriff für Luftschadstoffe aus Russ, Rauch und Staub, deren Partikel einen Durchmesser von weniger als 10 µm haben und in der Luft fein verteilt sind. Er gehört somit zu den Aerosolen und wird aufgrund der Partikelgrösse häufig mit PM10 abgekürzt, wobei PM für die englische Bezeichnung „particulate matter“ steht. Trotz dieser Gemeinsamkeit kann PM10 aus diversen chemischen Verbindungen bestehen und unterschiedliche Strukturen und Formen, sowie verschiedene physikalische und chemische Eigenschaften aufweisen. (Möller, 2009 [10]; Hüglin, Gianini & Gehrig, 2012 [11]).

Die gesellschaftliche Bedeutung von PM10 liegt in seiner gesundheitsschädlichen Wirkung. PM10-Partikel können aufgrund ihrer Grösse von natürlichen menschlichen Barriere-Funktionen nicht vor dem Eindringen in die Atemwege aufgehalten werden, sodass sie bis in die feinsten Verästelungen der Lunge gelangen und sich dort ablagern können (BUWAL, 2005 [12]). Dies kann zu chronischem Husten, Bronchitis, Asthma, Lungeninfektionen oder Lungenkrebs, sowie Herz-Kreislauf-Beschwerden führen. Besonders stark leiden Kinder unter dem Einfluss von PM10 (Ostluft, 2007 [13]). Aus lufthygienischer Sicht ist PM10 heute derjenige Luftschadstoff mit den gravierendsten gesundheitlichen Auswirkungen, so die Eidgenössische Kommission für Lufthygiene (EKL, 2007 [14]). Gemäss einer vom Bundesamt für Raumentwicklung (ARE) in Auftrag gegebenen Studie sterben in der Schweiz jährlich etwa 2'800 Menschen frühzeitig aufgrund der Luftbelastung mit Feinstaub, was etwa 29'000 Lebensjahren entspricht (Ecoplan/Infras, 2014 [15]).

Um die Bevölkerung vor diesen negativen Auswirkungen von PM10 effektiv schützen zu können, muss zunächst dessen Herkunft betrachtet werden. Dabei werden natürliche und anthropogene Quellen unterschieden (BAFU, 2015 [16]). Natürliche Quellen umfassen Meere, Bodenerosion, Vulkane, Waldbrand, Blitze, sowie Pollen, Sporen und Mikroorganismen. Zu den anthropogenen Quellen gehören (1) Abgase jeglicher Verbrennungsvorgänge, zum Beispiel durch Fahrzeuge, Heizungen und Abfallverbrennungen, (2) Abrieb von Reifen und anderer Fahrzeugbauteile, sowie von Strassenbelägen und Schienen, (3) einige industrielle Prozesse wie Metall-, Stahl- und Zementherstellung, aber auch Lösungsmiteinsatz und petrochemische Verfahren, sowie (4) Aufwirbelungen durch Verkehr, Baustellen und landwirtschaftliche Nutztierhaltung und Feldbearbeitung. Bei natürlichen und anthropogenen Quellen wird zudem zwischen primärem und sekundärem Feinstaub unterschieden (BAFU, 2015 [16]). Von primärem Feinstaub wird gesprochen, wenn Partikel direkt in die Atmosphäre gelangen, zum Beispiel durch Vulkanausbrüche, unvollständige Verbrennung in Heizungen oder Reifenabrieb. Sekundärer Feinstaub bildet sich aus PM10-Vorläufgasen, etwa Ammoniak, Schwefeloxide, Stickstoffoxide oder flüchtige organische Verbindungen, welche erst in der Luft durch chemische Reaktionen in Feststoffpartikel umgewandelt werden.

Im Jahr 2000 wurden nach Schätzungen der EKL (2007) [14] in der Schweiz circa 22'000 t primäres anthropogenes PM10 emittiert. Die Hauptverursachergruppen hiervon waren Land- und Forstwirtschaft, Verkehr, Industrie und Gewerbe, sowie Haushalte. Dabei verursachten die ersten drei Gruppen zu je gleichen Anteilen circa 90 % der Emissionen, der Rest entfällt auf die Haushalte (Abb. 1; EKL, 2007 [14]). Die Emissionen des Strassenverkehrs lassen sich weiter unterteilen in diejenigen aus unvollständigen Verbrennungsprozessen (exhaust) sowie aus Abrieb und Wiederaufwirbelung (non exhaust; Gehrig, Zeyer, Bukowiecki, Lienemann, Poulikakos, et al., 2010 [17]). Sollten sich die Prognosen für 2020 bewahrheiten, nähmen bis dann die Emissionen primären anthropogenen Feinstaubes gegenüber 2000 um circa ein Fünftel ab, während die Anteile der Verursachergruppen etwa gleich bliebe.

Gemäss Schätzungen der EKL (2007) [14] wurden im Jahr 2000 in der Schweiz circa 317 Mio. t PM10-Vorläufgase emittiert, welche zu sekundärem anthropogenem PM10 führen. Bis 2020 wird eine Abnahme auf circa zwei Drittel erwartet, während die Anteile der einzelnen Gase sich nur leicht, das heisst bis zu 6 % verändern (Abb. 2). Jedem dieser Gase lässt sich eine Hauptverursachergruppe zuweisen: flüchtige organische Verbindungen.

dungen (ohne Methan) stammten im Jahr 2000 zu 59 % aus Industrie und Gewerbe, Stickstoffoxide zu 57 % aus dem Verkehr, Ammoniak fast gänzlich (96 %) aus der Land- und Forstwirtschaft, und Schwefeloxide zu 67 % aus Industrie und Gewerbe.

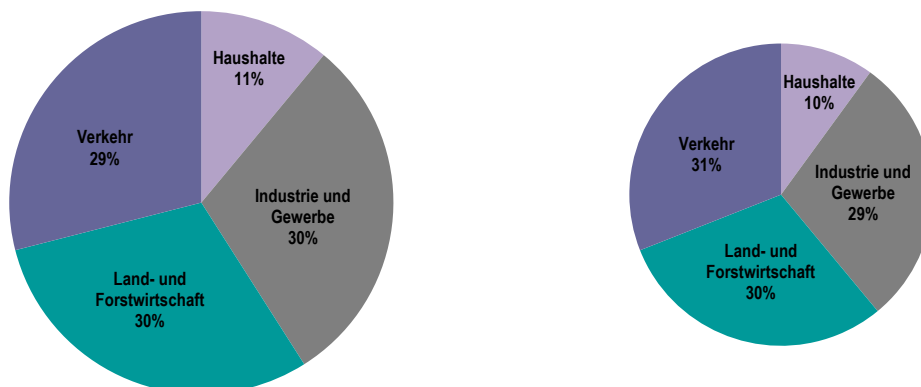


Abb. 1 Anteile primärer anthropogener PM10-Emissionen nach Verursachergruppen für die Jahre 2000 (links) durch Schätzungen und 2020 (rechts) durch Prognosen in der Schweiz. Die absoluten Werte betrugen im Jahr 2000 etwa 22'000 t, bis zum Jahr 2020 ist mit einer Verringerung auf etwa 18'000 t zu rechnen. Datenquelle: EKL (2007) [14].

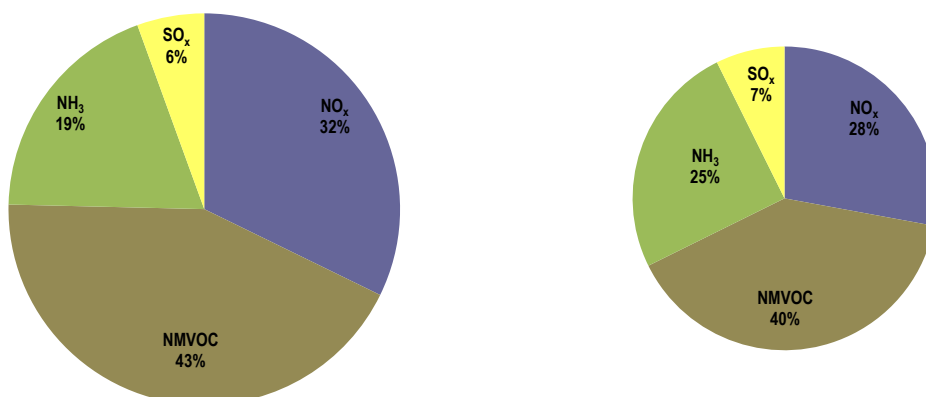


Abb. 2 Anteilsmässige Verteilung der Emissionen der verschiedenen PM10-Vorläufergase in der Schweiz in den Jahren 2000 (links, abgeschätzt) und 2020 (rechts, prognostiziert). NH₃ = Ammoniak, NMVOC = flüchtige organische Verbindungen ohne Methan, NO_x = Stickstoffoxide, SO_x = Schwefeloxide. Die absoluten Werte betrugen im Jahr 2000 etwa 317 Mio. t, bis zum Jahr 2020 ist mit einer Verringerung auf etwa 200 Mio. t zu rechnen. Datenquelle: EKL (2007) [14].

Zum Schutz der Bevölkerung hat der Bundesrat in der Luftreinhalte-Verordnung LRV (1985, Stand 2010) [1] verschiedene Grenzwerte für gesundheitsschädigende Substanzen festgelegt, welche nicht überschritten werden sollen. Für PM10 gilt nach der LRV seit dem 1. März 1998 im Jahresmittel ein Grenzwert von 20 µg/m³ [1]. Zusätzlich darf der Tagesmittelwert von 50 µg/m³ höchstens einmal pro Jahr überschritten werden (BUWAL, 2005 [12]).

Räumlich ist die Belastung durch PM10 besonders stark in Ballungszentren und entlang grosser Verkehrsachsen (Abb. 3). In Kombination mit der oben gezeigten Verteilung nach Verursachergruppen kann geschlossen werden, dass die Emissionen aus Land- und Forstwirtschaft aufgrund der Verteilung auf eine grössere Fläche zu geringeren Konzen-

trationen führen, während die siedlungs-, wirtschafts- und verkehrsbezogenen Emissionen aufgrund der kleineren Fläche zu höheren Konzentrationen führen. Abb. 3 zeigt zudem die massive Verringerung der Feinstaubbelastung innerhalb von 10 Jahren. Über den Jahresgrenzwerten liegen die Konzentrationen jedoch noch in den Ballungszentren Zürich, Genf, Luzern, Basel und Lausanne, vor allem aber in und um Bellinzona, Locarno/Ascona, Lugano und Mendrisio/Balerna/Chiasso. Im Valle Leventina (TI) sowie im Valle Mesolcina (GR) werden die Grenzwerte sogar ausserhalb der grösseren Städte überstiegen.

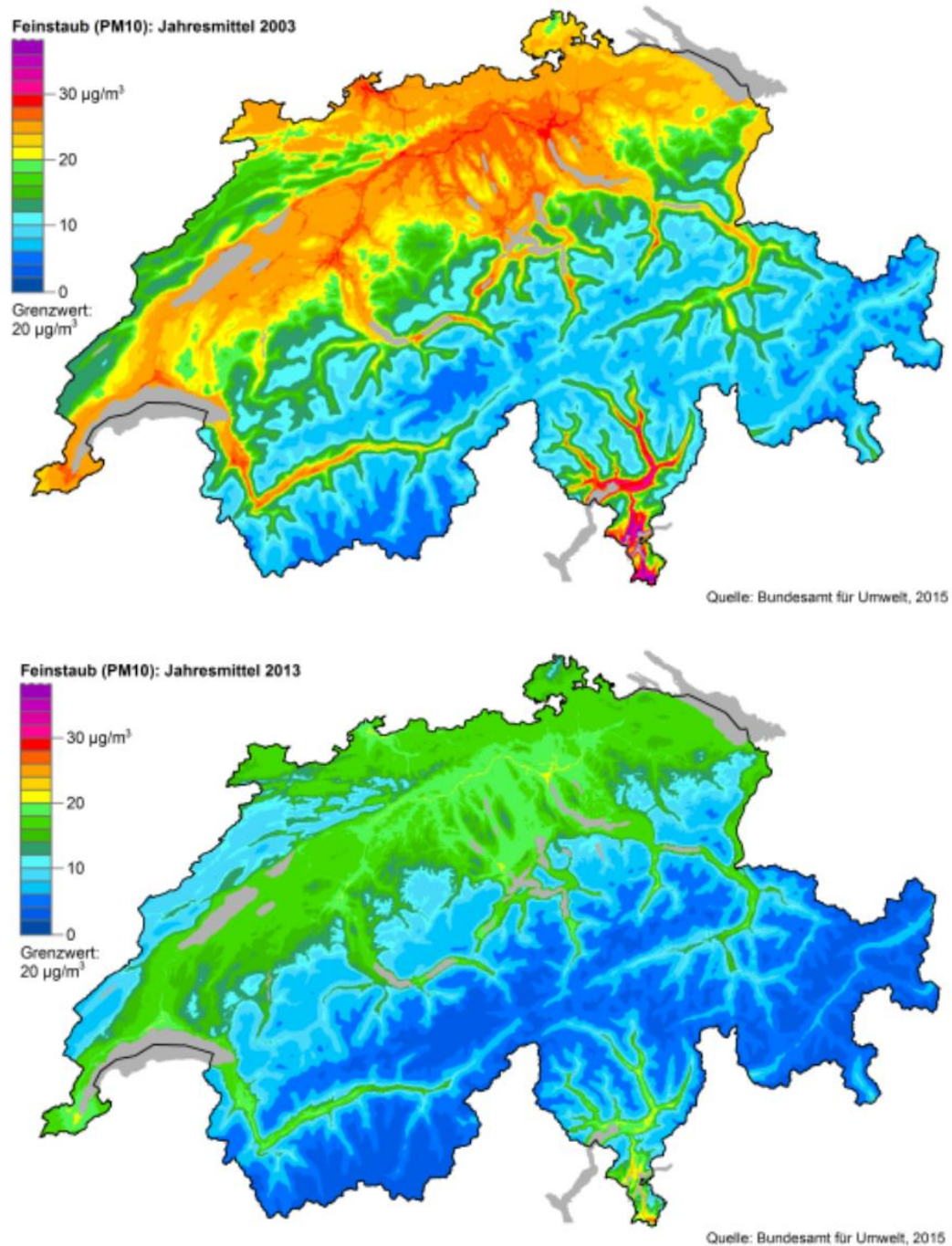


Abb. 3 Räumliche Verteilung der PM10-Konzentrationen in der Schweiz für die Jahre 2003 (oben) und 2013 (unten). Quelle: BAFU (2015) [18].

Um die PM10-Grenzwerte einzuhalten und die Konzentrationen entsprechend zu senken - vor allem in den stark belasteten Ballungsräumen, wo zudem die Bevölkerung stetig wächst - werden rasch effiziente Technologien verlangt. In der Schweiz wird hierfür bislang u. a. die Massnahme obligatorischer Partikelfilter für Kraftfahrzeuge ergriffen. Seit einigen Jahren wird aus dem Ausland von einem neuen vielversprechenden Lösungsansatz berichtet - von Bauwerksoberflächen (u. a. Strassenbelägen), welche PM10 selbst, das heisst direkt, binden oder dessen Vorläuforgase in unschädliche Stoffe umwandeln, und damit PM10 indirekt verringern. Da der Feinstaub dabei an einer der wichtigsten Quellen reduziert wird, ist das Interesse an diesen neuartigen Oberflächen auch in der Schweiz vorhanden, insbesondere an Strassenbelägen dieser Technologien. Fachleute warnen jedoch vor übertriebenen Erwartungen, denn bisher wird über das Thema aufgrund der hohen gesellschaftlichen Relevanz oft eher emotional als sachlich berichtet und diskutiert. Da bis jetzt in der Schweiz mit derartigen Technologien kaum Erfahrungen vorliegen, ist unklar, inwieweit sie sich grossflächig auf Strassenbelägen unter den Bedingungen in der Schweiz anwenden liessen und welche Wirkungen damit erzielt werden könnten.

2 Zielsetzungen

Das primäre Projektziel besteht darin, vorhandene Technologien zur Reduktion von Feinstaub oder seiner Vorläuforgase mittels spezieller Strassenbeläge zusammenzustellen, zu strukturieren und sie anhand ihrer Wirksamkeiten zu vergleichen. Zudem soll nach einheitlichen Kriterien bewertet werden, inwiefern die verschiedenen Technologien und deren allfällige Varianten in der Schweiz hinsichtlich der Verfahrensschritte, der Fahrbahnbeeinflussung und der Umweltverträglichkeit machbar sind. Schliesslich gilt es, das Kosten-Nutzen-Verhältnis für die einzelnen Technologien beziehungsweise allfälliger Varianten zu ermitteln und zu vergleichen. Aus den gewonnenen Resultaten der Machbarkeitsstudie sind Schlussfolgerungen und Empfehlungen für die Anwendbarkeit feinstaub-reduzierender Strassenbeläge zu formulieren. Aufgrund des aktuellen Stands der Forschung und Technik (Kapitel 4) kann nicht das Ziel verfolgt werden, alle analysierten Technologien hinsichtlich Wirksamkeit, Machbarkeit und Kosten-Nutzen-Verhältnis quantitativ anhand einer Verhältnisskala untereinander zu vergleichen und zu bewerten. Vielmehr sollen qualitative und ordinal-skalierte quantitative Aussagen zu den einzelnen Technologien beziehungsweise Varianten gemacht werden, die sich auf Literatur und Expertenwissen abstützen.

3 Vorgehen

Um die in Kapitel 2 aufgestellten Zielsetzungen zu erreichen, wurde zunächst der aktuelle **Stand der Forschung und Technik** anhand von Fachliteratur zusammengestellt (Kapitel 4) und die verschiedenen Technologien und deren Varianten gegliedert. Abschliessend wurden die Grenzen und Lücken des aktuellen Forschungs- und Entwicklungsstands aufgezeigt (Kapitel 4.4).

Als nächster Arbeitsschritt wurde für selektierte Technologien die **Wirksamkeit** zur Minderung von Feinstaub oder seiner Vorläufgase (hier nur Stickstoffmonoxid NO) analysiert und bewertet (Kapitel 5). Hierfür wurde zunächst die Methode dargelegt, wie die Wirksamkeitsanalyse und -bewertung erfolgte (Kapitel 5.1), danach die Resultate (Kapitel 5.2). In der Methode wurde aufgezeigt, welche Technologien und Varianten ausgewählt wurden, anhand welches Kriteriums die Wirksamkeit ausgedrückt wurde, wie die Wirksamkeit von den verschiedenen Einflussfaktoren abhängt, wie die Wirksamkeit für die einzelnen Technologien/Varianten für definierte Referenzwerte normalisiert wurde, und wie schliesslich die Bewertung erfolgte. In den Resultaten zur Wirksamkeit wurde zunächst deren quantitative Bewertung nach Klassen präsentiert, dann eine qualitative Bewertung anhand von Einflussfaktoren, und zuletzt wurden aufgrund dieser Bewertung wirksame Technologien/Varianten selektiert.

In Kapitel 6 wurde die technische **Machbarkeit** der Technologien/Varianten analysiert und bewertet, wobei wieder zuerst die Methode (Kapitel 6.1) und dann die Resultate (Kapitel 6.2) hierfür dargelegt wurden. Die Methode legte als erstes die Selektion der berücksichtigten Technologien/Varianten sowie die Kriterien für die Analyse und Bewertung fest, wobei die insg. 17 Einzelkriterien in drei übergeordnete Kriterien gegliedert wurden. Danach definierte die Methode Referenz-Beläge, worauf die einzelnen Technologien/Varianten jeweils spezifisch zu beziehen waren. Zudem wurde aufgezeigt, wie die qualitative Wirksamkeitsanalyse erfolgte und die darauf aufbauende semi-quantitative Bewertung nach Einzelkriterien mit Punkten. Schliesslich beschreibt die Methode, wie aus den Bewertungen nach Einzelkriterien eine Gesamtwertung der technischen Machbarkeit ermittelt wurde. Die Resultate für die Machbarkeit wurden zunächst als Übersicht in einer grossen Tabelle vorgestellt, danach spezifisch für die übergeordneten Kriterien, das heisst für die Verfahrensschritte, die Fahrbahnbeeinflussung und die Umweltverträglichkeit, und zusammenfassend für die Machbarkeit gesamt.

Die Analyse und Bewertung des **Kosten/Nutzen-Verhältnisses** war Thema des Kapitels 7. In der Methode hierfür (Kapitel 7.1) wurde die Selektion von Technologien/Varianten angepasst, wurden Kriterien für Kosten und Nutzen aufgestellt, und die Referenz-Beläge an die Kosten/Nutzen-Analyse und -bewertung adaptiert. Beschrieben wurde zudem, woher die Informationen zu Kosten und Nutzungsdauer bezogen werden konnten, und wie schlussendlich das Kosten/Nutzen-Verhältnis bestimmt und bewertet wurde. Die Resultate zur Kosten/Nutzen-Analyse und -bewertung wurden anhand einer grossen Tabelle zusammengefasst dargestellt und textlich interpretiert (Kapitel 7.2). In einem dritten und letzten Teil von Kapitel 7 wurden alternative Massnahmen der Feinstaub-/NO_x-Reduktion aufgezeigt und hinsichtlich ihres Kosten/Nutzen-Verhältnisses mit den in dieser Studie betrachteten speziellen Strassenbelägen verglichen (Kapitel 7.3).

Kapitel 8 zeigt auf, wie namhafte Experten den Nutzen Feinstaub-/Stickoxid-reduzierender Strassenbeläge einschätzen. Diese **Experten-Einschätzungen** runden das Bild dieser Machbarkeitsstudie ab, die ansonsten weitgehend auf Literatur basiert.

Die Studie schliesst mit **Schlussfolgerungen** (Kapitel 9), die aus den Analysen und Bewertungen gezogen werden konnten. Dabei wurde auch eine Empfehlung gegeben, welche Technologien/Varianten sich für welche Bedingungen eignen. Ein Ausblick zeigt abschliessend auf, welche weiteren Forschungsaktivitäten zu diesem Thema sinnvoll wären.

4 Stand der Forschung und Technik

In diesem Kapitel wird der aktuelle Stand der Forschung und Technik zur Reduzierung des Feinstaubes (PM10 = *particulate matter* mit Äquivalenzdurchmessern $< 10 \mu\text{m}$) im Strassenraum mittels Technologien aufgezeigt, welche bereits emittierten Feinstaub oder dessen Vorläufgase der bodennahen Atmosphäre teilweise entziehen. Ausgeschlossen von diesem Literaturüberblick sind demzufolge Massnahmen zur Verringerung des Ausstosses von Feinstaub oder dessen Vorläufgasen. Hierzu gehören etwa emissionsärmere Verbrennungsmotoren der Standards Euro 5 oder 6, vermehrter Einsatz elektrisch betriebener Strassenfahrzeuge, umweltorientiertes Verkehrsmanagement (UVM, inkl. Verkehrsverflüssigung, Geschwindigkeitsbeschränkungen, u. a.), Verkehrsplanung, teilweise Verlagerung des Strassenverkehrs auf die Schiene, Förderung des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV), und weitere.

Dabei wird der Fokus auf spezielle, feinstaub-mindernde Strassenbeläge gelegt. Zudem werden weitere alternative Technologien im Strassenraum, jedoch nicht auf der Fahrbahn selbst, behandelt, welche die Feinstaubkonzentrationen senken. Diese Darstellung des Stands der Forschung und Technik erfolgt zunächst bewusst ohne Bewertung der technischen Machbarkeit der einzelnen Technologien (Kapitel 5) sowie ihrer Kosten und ihres Nutzens (Kapitel 7).

4.1 Gliederung der betrachteten Technologien

Feinstaub-mindernde Technologien im Strassenraum lassen sich in erster Linie nach dem Kriterium ihrer Wirkungsweise und in zweiter Linie nach ihrem Material gliedern (Abb. 4).

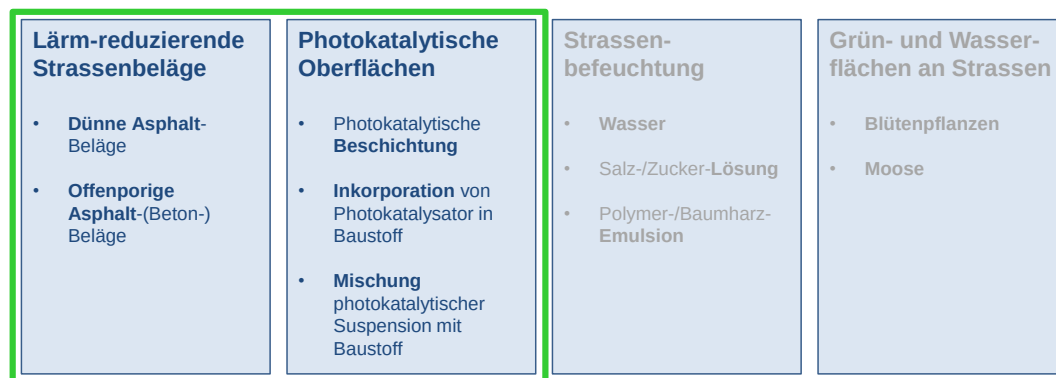


Abb. 4 Gliederung der betrachteten Technologien zur Feinstaub-Minderung im Strassenraum nach Wirkungsweise und Material. Die beiden linken Technologie-Gruppen sind Bestandteil dieser Studie, die beiden rechten sind nur vollständigkeitshalber aufgeführt.

Je nach Wirkungsweise können einzelne Technologien an verschiedenen Positionen im Strassenraum angewandt werden: auf der Fahrbahn selbst, zwischen zwei Fahrbahnen oder seitlich davon, entweder horizontal oder vertikal. Den beiden ersten Hauptgruppen ist im Folgenden je ein Unterkapitel gewidmet. Die beiden letzten sind hier aus Gründen der Vollständigkeit aufgeführt, werden aber nicht weiter behandelt, da die Studie auf spezielle Strassenbeläge zur Feinstaub-Minderung ausgerichtet ist. Dennoch werden für die Technologien der beiden ersten Hauptgruppen auch Applikationen aufgezeigt, die über den eigentlichen Fokus auf Strassenbeläge hinausgehen, um eine umfangreiche Informationsgrundlage für die spätere Bewertung dieser Technologien sicherzustellen.

4.2 Lärm-reduzierende Strassenbeläge

Bei dünnen bituminösen Deckschichten (Veisten & Akhtar, 2011 [19]) sowie Belägen aus offenporigem Asphalt (PA) mit oder ohne Beton (Gehrig et al., 2010 [17]; Ropertz, Surrtsch, Dutzi, Wächter, Beckenbauer et al., 2010 [20]; Veisten & Akhtar, 2011 [19]; Ropertz, 2011 [21]) wird aufgrund ihrer modifizierten Struktur (Abb. 5) neben ihrer lärm-mindernden Wirkung auch eine Minderung der PM10-Belastung vermutet. In verschiedenen Studien wurde eine PM10-reduzierende Wirkung dieser Beläge gegenüber solchen aus Splitt Mastix Asphalt (SMA) untersucht. Untersuchungen zur Feinstaub-Minderung durch Beläge aus semi-dichtem Asphalt (SDA) lagen während der Erarbeitung dieser Studie keine vor, was darauf zurückgeführt wird, dass diese Belagsart relativ neu ist. Daher werden SDA-Beläge trotz ihrer denkbaren Feinstaub-Minderung von der weiteren Betrachtung ausgenommen.



Abb. 5 Struktur der mineralischen Zusammensetzung eines herkömmlichen Belags aus Asphalt-Beton (Asphalt-Concrete, AC, oben) und eines aus offenporigem Asphalt (Porous Asphalt, PA, unten) mit einem Grösstkorn von jeweils 11 mm (Gehrig et al., 2010 [17]).

4.2.1 Feinstaub-mindernde Wirkung lärm-reduzierender Strassenbeläge

Beeinflussung Resuspension durch offeneporige Asphalt-Beläge. Ropertz et al. (2010) [20] führten über 15 Monate an der Autobahn A 9 bei Bayreuth (Deutschland) kontinuierliche Messungen der PM10-Konzentrationen zeitgleich an einem SMA- sowie einem PA-Belag jeweils für beide Fahrtrichtungen durch unter ansonsten gleichen Randbedingungen (Durchschnittlicher Tagesverkehr, Meteorologie, u. a.). Die Messhöhe über Fahrbahnniveau betrug in Fahrtrichtung N-S 2 m und in Fahrtrichtung S-N 3 m. Dieser Unterschied war nötig, um eine einheitliche Entfernung zum Strassenrand von 5 m zu ermöglichen. An Tagen ohne Niederschlag fanden sie keinen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Belagsarten hinsichtlich der PM10-Konzentration. An Tagen mit Niederschlägen lagen hingegen die PM10-Konzentrationen am PA-Belag um circa 20 % ($5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) unter denjenigen am SMA-Belag. Keine signifikanten Wechselwirkungen bezüglich der PM10-Konzentrationen konnten zwischen der Belagsart (SMA oder PA) und

der Windrichtung sowie -geschwindigkeit nachgewiesen werden. Die SMA- und PA-Beläge unterschieden sich auch nicht hinsichtlich der chemischen PM10-Zusammensetzung. Den deutlichen Einfluss des Niederschlags auf die PM10-mindernde Wirkung des PA-Belags gegenüber der SMA-Referenz erklären Ropertz et al. (2010) [20] damit, dass PM10-Partikel nach ihrer Sedimentation und Deponierung auf der Belagsoberfläche durch Niederschlag zu einem bedeutenden Anteil in die Poren des PA-Belags verlagert werden. Die so fixierten Partikel können auch nach Abtrocknung des Belags nicht mehr in die bodennahe Atmosphäre resuspendieren, so die Autoren. Da Resuspension mit circa 30 % (für ländliche Strassen) einen grossen Teil der PM10-Emissionen ausmache, sehen Ropertz et al. (2010) [20] in der Verwendung von PA-Belägen eine sinnvolle Möglichkeit, neben dem Lärm des Strassenverkehrs zusätzlich die PM10-Emissionen zu reduzieren. Diese Studie wurde von Ropertz (2011) [21] am damaligen Kolloquium „Luftqualität an Strassen“ in der Bundesanstalt für Strassenwesen (BASt) in Bergisch-Gladbach (Deutschland) präsentiert.

Einfluss Fahrbahn-Verschmutzung und -Beschädigung auf Abrasion und Resuspension. Gehrig et al. (2010) [17] stellten in ihrer Studie mit einem mobilen Lastsimulator fest, dass der Resuspensionsanteil der PM10-Emissionen stark von Verschmutzung und Zustand der Strasse abhängt. So wurden für intakte Beläge Emissionsfaktoren von 11 mg/km und Rad eines Schwerlastkraftwagens gemessen, für leicht beschädigte Beläge das 6-Fache. Noch stärker war der Einfluss des Zustands von Belägen auf deren Abrasion, welche gegenüber der Resuspension allerdings um über eine Grössenordnung geringer ausfiel (Emissionsfaktoren von 0.7 mg/km und Rad eines Schwerlastkraftwagens für intakte Beläge und 8 mg/km und Rad für leicht beschädigte). Auch in dieser Studie ergab sich, dass offenporige Beläge deponierten Feinstaub stärker zurückhalten können als konventionelle Beläge: die Autoren fanden einen PM10-Emissionsfaktor (Abrasion und Resuspension) von circa 6.5 mg/km und Rad eines leichten Kraftfahrzeugs auf einem neuen Asphalt-Beton-Belag, während derjenige auf einem neuen PA-Belag mit circa 0.5 mg/km um über eine Grössenordnung geringer war.

Varianten dünner und offenporiger Asphalt-Beläge im Vergleich. In einer Kosten-Nutzen-Analyse zu lärm-mindernden Strassenbelägen, in welcher die PM10-mindernde Wirkung berücksichtigt wurde, verglichen Veisten & Akhtar (2011) [19] drei Typen dünner Asphalt-Decken (TSF) und vier Typen offenporiger Asphalt-Beton-Decken (PAC) mit einem konventionellen SMA-Belag, der durch ein Grösstkorn von 11 mm charakterisiert ist (SMA11). TSF-Beläge werden in Skandinavien eingesetzt und sind am ehesten mit den in der Schweiz bekannten ACVTL-Belägen (Asphalt Concrete Very Thin Layer) vergleichbar (Schmid, mündlich, 2015 [22]). Die TSF-Typen mit einem Grösstkorn von 8 mm umfassen eine einfache Variante (TSF8), eine, welche Gummi enthält (TSF8r), sowie eine Bestvariante gemäss Europäischen Erfahrungen (TSF8x). Die PAC-Beläge umfassen eine 1-Schicht-Variante mit einem Grösstkorn von 11 mm (SPAC11) und drei 2-Schicht-Varianten (DPAC). Dabei beträgt das Grösstkorn für die erste Variante in der unteren Schicht 16 mm und in der oberen 8 mm (DPAC8/16) und für die zweite 11 mm und 16 mm (DPAC11/16). Eine DPAC-Bestvariante weist dieselben Werte wie DPAC11/16 für das Grösstkorn auf, jedoch ist die Korn- und Porengrössenzusammensetzung anders. Sie wird als DPAC11/16x bezeichnet. Anhand des Nordischen Kugelmühlentests zur Bestimmung des Widerstands eines Strassenbelags gegenüber Abrasion durch Spike-Reifen gemäss der Norm EN 1097-9:1998 [4] wurde für alle Belagstypen der Abrasionsanteil der PM10-Emissionen abgeschätzt. Dabei ergaben sich für TSF8, TSF8x, SPAC11 und DPAC11/16 keine signifikant höheren Werte gegenüber der SMA11-Referenz, während die Werte des TSF8r-Belags um 20 % erhöht waren, diejenigen des DPAC8/16-Belags um 15 % erniedrigt und diejenigen des DPAC11/16x-Belags gar um 25 %. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass dieser Test speziell darauf ausgelegt ist, die Abnutzung des Strassenbelags durch die Benutzung von Spike-Reifen zu simulieren, welche in Skandinavischen Ländern während der Frostperiode üblich sind.

4.2.2 Zusammenfassung Kapitel 4.2

Deckschichten aus offenporigem Asphalt (PA) mit dem primären Zweck der Lärm-Reduktion führen gegenüber Belägen aus Splitt-Mastix-Asphalt (SMA) nachweislich auch

zu geringeren Feinstaubbelastungen an Strassen. Dabei wird sowohl die Abrasion als auch die Resuspension von Feinstaub verringert. Für beide Prozesse können Verschmutzungen und Beschädigungen der Fahrbahn zu einer Erhöhung der Feinstaubbelastung um etwa eine Grössenordnung bewirken und sind daher entscheidende Einflussfaktoren. Die Wirksamkeit von PA-Belägen hinsichtlich der Verringerung der Resuspension hängt stark vom Niederschlag ab, da dieser die PM10-Partikel in die Poren des PA-Belags verlagert, wo sie auch nach Abtrocknung der Fahrbahn fixiert bleiben. Schliesslich kann eine Abrasionsreduktion durch PA-Beläge nur bei ausreichendem Durchmesser des Grösstkorns gewährleistet werden. TSF-Beläge zeigten keine signifikante Minderung der Feinstaub-Konzentrationen, im Fall einer Variante sogar eine Erhöhung.

4.3 Photokatalytische Oberflächen

Prinzip der Photokatalyse. Die luftreinigende Wirkung der Photokatalyse wurde erstmals von den Japanischen Forschern Ibusuki & Takeuchi (1994) [23] im Labor entdeckt und beschrieben. In ihrer Untersuchung stellten sie fest, dass die Luftschadstoffe Stickoxide (NO_x), das heisst Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO_2), und unter Einwirkung von ultravioletter (UV) Licht durch Titandioxid (TiO_2) als Katalysator zu Salpetersäure HNO_3 reagierten, woraus sich weiter Nitrat (NO_3^-) bilden kann (Abb. 6, links). Diese Entdeckung führte in der Folge zum eigenen, dynamischen Forschungszweig der angewandten Photokatalyse und es entstanden zahlreiche Studien zum besseren Verständnis der Reaktionen und Prozesse sowie zu deren Anwendung für die Luftreinigung. Oft waren an diesen Studien auch Industrieunternehmen beteiligt. Obwohl dabei der Fokus nach wie vor auf Stickoxiden liegt, wurden auch weitere Luftschadstoffe wie Kohlenmonoxid (CO) und Schwefeldioxid (SO_2) betrachtet (Crispino, Lambrugo & Bacchi, 2009 [24]; Crispino, 2014 [25]), sowie im Rahmen des grossangelegten EU-Life+ Projekts PhotoPAQ (zum Beispiel Gallus, Ciuraru, Mothes, Akylas, Barmpas, et al., 2015 [26]) auch Ozon (O_3), VOCs (engl. *volatile organic compounds*, dt. flüchtige organische Verbindungen) und Formaldehyd (HCHO).

Bezug zu Feinstaub. In den meisten Studien wird zudem der Effekt zur Minderung von Feinstaub (PM10) untersucht. Denn einige der oben angesprochenen Luftschadstoffe, vor allem Stick- und Schwefeloxide sowie VOCs, reagieren in der Atmosphäre weiter zu sekundärem Feinstaub und fungieren somit als PM10-Vorläufgase (EKL, 2013 [27]). Da sekundärer Feinstaub etwa die Hälfte der gesamten PM10-Belastung darstellt (Hügli et al., 2012 [11]), würde eine wirksame Minderung der Vorläufgase durch Photokatalyse einen bedeutenden Beitrag zur Senkung der PM10-Belastung leisten. Als Photokatalysator etablierte sich TiO_2 in der Kristallstruktur Anatase als Pulver aus Nanopartikeln $< 100 \text{ nm}$, woraus sich eine grosse spezifische Oberfläche ergibt (Crispino et al., 2009 [24]; Crispino, 2014 [25]) und damit die gewünschte hohe Reaktivität. In reiner Form fungiert Anatase als Photokatalysator bei UV-Licht mit Wellenlängen $< 388 \text{ nm}$ (Crispino et al., 2009 [24]; Crispino, 2014 [25]). Durch Dotierung des Kristalls mit Kohlenstoff kann das wirksame Strahlungsspektrum jedoch bis 535 nm erweitert werden (Crispino et al., 2009 [24]; Crispino, 2014 [25]). Die Photokatalyse läuft in mehreren Teilreaktionen ab. Da TiO_2 diese lediglich katalysiert, wird diese Substanz nicht verbraucht (Wang, Hüben, Oeser & Steinauer, 2014 [28]). Falls die Photokatalyse von NO_x vollständig abläuft, entsteht als Endprodukt zwar NO_3^- , das als Salz wasserlöslich ist, von der photokatalytischen Oberfläche etwa durch Regenwasser abgewaschen wird (Abb. 6, rechts) und in den dabei entstehenden Konzentrationen für Pflanzen, Boden und Grundwasser unbedenklich ist (Laufs, Burgeth, Duttlinger, Kurtenbach, Maban, et al., 2010 [29]; Crispino et al., 2009 [24]; Crispino, 2014 [25]). Denn Sauer, Metzger & Baum (2015) [30] konnten messtechnisch nachweisen, dass die unter Feldbedingungen durch Photokatalyse anfallenden Nitratmengen um circa zwei Grössenordnungen geringer sind als die in Deutschland maximal zulässige Menge von 23 g/m^2 aus landwirtschaftlicher Düngung. Gallus, Akylas, Barmpas, Beeldens, Boonen, et al. (2015) [31] weisen jedoch darauf hin, dass dabei auch salpetrige Säure (HONO , auch HNO_2) entstehen kann, welche sogar noch schädlicher ist als Stickoxide. Dieser Umstand wird in der Bewertung der technischen Machbarkeit bezüglich Umweltverträglichkeit (Kapitel 6) genauer beleuchtet.

Anwendung zur Feinstaub-Reduktion. Seitens der Forschung und Industrie entstand im Laufe der letzten 20 Jahre ein grosses Interesse, das Potenzial der Photokatalyse zur Luftreinigung im Strassenraum technisch zu nutzen und zu prüfen. Die Technologien, die zu diesem Zweck und zur grossflächigen Anwendung bis heute entwickelt wurden, basieren alle auf der Nutzung von TiO_2 als Photokatalysator und lassen sich in drei Gruppen unterteilen: (1) Photokatalytische Beschichtungen von Oberflächen, (2) Inkorporation von TiO_2 -Partikeln in Baustoffe, und (3) Einmischung einer photokatalytischen Suspension in einen offenporigen Belag. Im Folgenden wird für jede Gruppe die Funktionsweise beschrieben, auf welcher die Technologien einer Gruppe gemeinsam beruhen, sowie die verschiedenen Varianten der Gruppen. Anschliessend werden Ansätze zur Standardisierung photokatalytischer Produkte und Anwendungen im Strassenraum sowie von Testmethoden ihrer Effizienz aufgezeigt.

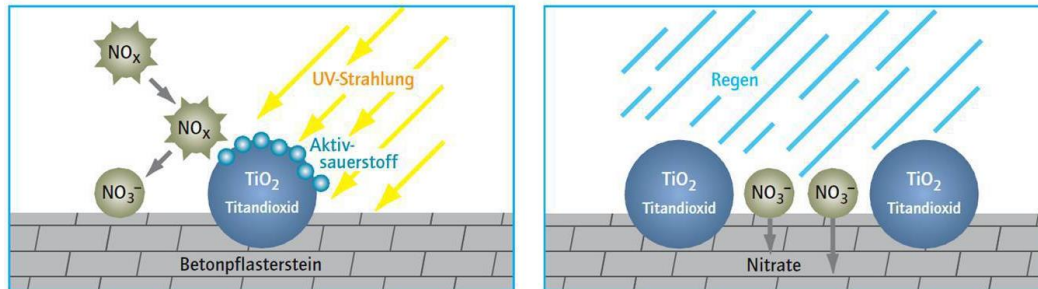


Abb. 6 Funktionsweise des Entzugs von schädlichem Stickoxid (NO_x) aus der Atmosphärenluft an Oberflächen mit photokatalytisch aktiven Substanzen wie TiO_2 . Links: Umwandlung von NO_x in Nitrat (NO_3^-) an TiO_2 -Partikeln unter Einwirkung von UV-Strahlung. Rechts: Lösung der NO_3^- -Ionen im Regenwasser und Versickerung in den Untergrund (Graphik: Wang & Meyer, 2012 [32]).

4.3.1 Photokatalytische Beschichtungen

Überblick. Beschichtungen, welche photokatalytisch aktives TiO_2 enthalten, existieren in folgenden Formen:

- Fassadenfarben beziehungsweise Anstrichen (Laufs et al., 2010 [29]; FAP, 2014 [33]; Federer, 2014 [34])
- Sprays (Carneiro, Azevedo, Teixeira, Fernandes, Freitas, et al., 2013 [35], Brovelli & Crispino, 2013 [36]; Sauer et al., 2015 [30])
- Verputzen (FAP, 2014 [33])
- Mörteln (Gallus, Ciuraru, et al., 2015 [26]; Gallus, Akylas, et al., 2015 [31])

Damit können folgende Arten von Oberflächen beschichtet werden:

- Dachziegel (Federer, 2014 [34])
- Gebäudefassaden (Laufs et al., 2010 [29]; FAP, 2014 [33]; Gallus, Ciuraru, et al., 2015 [26]; Staub, 2015 [37])
- Strassenbeläge (Brovelli & Crispino, 2013 [36]; Carneiro et al., 2013 [35]; Gallus, Ciuraru, et al., 2015 [26])
- Tunnelinnenwände (Gallus, Akylas, et al., 2015 [31])
- Lärmschutzwände (Sauer et al., 2015 [30])

Photokatalytische Dachziegel. Studenten der University of California, Riverside, entwickelten eine TiO_2 -Beschichtung auf Dachziegeln, welche die Stickoxid-Konzentration der Luft über den beschichteten Ziegeln in einer atmosphärischen Kammer um 88 bis 97 % zu reduzieren vermochte (Federer, 2014 [34]). Nicht angegeben wurden allerdings das Luftvolumen und die photoaktive Oberfläche, sodass unter realen Bedingungen vermutlich ein wesentlich geringerer Anteil an Stickoxiden in den bodennahen Luftschichten umgewandelt würde.

Photokatalytische Fassadenfarben und -anstriche. Laufs et al. (2010) [29] untersuchten in einem luftdurchströmten Photoreaktor, wie NO_x unter simulierten atmosphärischen Bedingungen und dem Einfluss zweier kommerzieller TiO_2 -haltiger Fassadenfarben (Sto-Photosan NOX Dispersionsfarbe blau und weiss) im Vergleich zu ansonsten ähnlichen nicht photoaktiven Farben reagiert. Eine schnell ablaufende Umwandlung von NO_x in NO_3^- konnten sie nur bei den photoaktiven Farben feststellen, und zwar stöchiometrisch fast vollständig. In der Dunkelheit bildete sich sowohl auf den photoaktiven wie auf den Referenzfarbflächen HONO. Unter Lichteinfluss wurde diese schädliche Substanz auf den photoaktiven Farbflächen wieder zügig abgebaut, auf den Referenzfarbflächen jedoch nicht. Allerdings stellten Auvinen & Wirtanen (2008) [38] fest, dass manche photokatalytische Farboberflächen zwar reaktive VOCs (1-Hexano, Nonanal) abzubauen vermögen, gleichzeitig jedoch Formaldehyd, Acetaldehyd und Aceton bilden. Im EU-Projekt PICADA (Photocatalytic Innovative Coatings Applications for Depollution Assessment) wurde ein in-situ-Versuch in einer künstlichen Strassenschlucht mit photokatalytisch aktiven Fassadenanstrichen im Massstab 1:5 durchgeführt, um den NO_x -Abbau zu bestimmen (PICADA, 2006 [39]). Dabei ergaben sich sehr hohe Reduktionsraten der NO_x -Konzentration von 40 % bis 80 %. Gallus, Ciuraru, et al. (2015) [26] sehen einen Grund für diese hohen Werte darin, dass die Wirksamkeit nur auf die Zeit mit Tageslicht bezogen wurde. Der tägliche Mittelwert sei nur etwa halb so gross [26]. Sie merken zudem an, dass die NO_x -Konzentrationen im PICADA-Experiment nur wenige Zentimeter von der photokatalytischen Oberfläche entfernt gemessen wurden, während für die Probenahme in Städten ein Abstand von 3 m empfohlen sei. Schliesslich sei das gewählte Verhältnis der photoaktiven Oberfläche zum Volumen des Strassenraums von 0.82 m^{-1} für urbane Bedingungen unrealistisch hoch. Denn in einer städtischen Atmosphäre wird die Photokatalyse gemäss Laufs et al. (2010) [29] vom Lufttransport (Konvektion und Diffusion) limitiert, der wiederum von der Geometrie des Strassenraums abhängt. Mit einem 3-D-Modell, welches die Mikrometeorologie und die Geometrie des Strassenraums berücksichtigt, simulierten sie den NO_x -Abbau in einer Strassenschlucht. Bei einem realistischen Verhältnis der photoaktiven Oberfläche zum Volumen des Strassenraums von 0.1 m^{-1} ergab sich eine Reduktion der NO_x -Konzentration um lediglich 5 %.

Photokatalytisch beschichtete Fassadenelemente aus Kunststoff. Mit TiO_2 -beschichteten Kunststoff-Elementen (Firma Elegant Embellishments, Prosolve 370e) wurde die Fassade des „Hospital General Manuel Gea González“ in Mexico City ausgeführt, welches vom Architekten Daniel Schwaag geplant wurde (Staub, 2015 [37]). Obwohl nur zwei unterschiedliche Formen dieser Elemente gefertigt werden, sind sehr viele Anordnungen möglich, sodass komplexe, netzartige Fassaden gebildet werden können (Abb. 7). Die damit erreichte reaktive Oberfläche ist gegenüber einer planaren Fassade um 200 % grösser, was die Photokatalyse begünstigt. Weitere Vorteile dieser Struktur der vorgehängten Fassade liegen darin, dass verschmutzte Luft aus allen Richtungen in Kontakt mit der photokatalytischen Oberfläche kommt und aufgrund der Unregelmässigkeit verwirbelt wird, was die Kontaktzeiten zusätzlich erhöht. Um den Kunststoff als organisches Material vor photokatalytischem Abbau zu schützen, sind die TiO_2 -Pigmente in eine Silikonmatrix eingebettet, mit welcher der Kunststoff beschichtet ist. Tests ergaben eine NO_x -Abbaurrate von $0.26 \text{ g}/(\text{d} \cdot \text{m}^2)$. Bei derartigen Gebäuden, für welche die architektonische Ästhetik eine grosse Rolle spielt, ist neben dem Abbau von Luftschadstoffen durch photokatalytische Oberflächen auch deren selbstreinigende Wirkung relevant.



Abb. 7 Photokatalytisch aktive Fassade des „Hospital General Manuel Gea González“ in Mexico City, zusammengesetzt aus TiO_2 -beschichteten Kunststoffelemente in nur zwei unterschiedlichen Formen (kleines Bild; Staub, 2015 [37]).

Photokatalytisch beschichtete Asphalt-Beläge. Carneiro et al. (2013) [35] erstellten einen Probekörper eines photokatalytisch aktiven Asphalt-Belags, indem sie auf dessen Oberfläche mit Hilfe von Druckluft eine TiO_2 -haltige wässrige Lösung sprühten mit Beschichtungsdichten von 5 mg/cm^2 und 12.5 mg/cm^2 . Gegenüber der Inkorporation von TiO_2 -Nanopartikeln in einen Asphalt-Belag, die ebenfalls in dieser Studie untersucht wurde und in Kapitel 4.3.2 behandelt wird, betrachten die Autoren das Aufsprühen von TiO_2 auf die Asphaltoberfläche als Technik mit einem geringeren Risiko, dass die Struktur des bituminösen und daher organischen Belags durch den Photokatalysator angegriffen wird. Um die physische Integrität des Asphalts zu bewahren, musste jedoch auch beim Aufsprühen beachtet werden, dass die Lösung keinen pH-Wert im sauren Bereich aufweist. Andererseits sollte eine zu starke kolloidale Dispersion, die durch pH-Werte im alkalischen Bereich gefördert wird, vermieden werden. Ein pH-Wert von 8 stellte sich daher als optimal heraus. Die photokatalytische Effizienz wurde mittels des erfassten zeitlichen Verlaufs der Strahlungsabsorption in einer wässrigen Lösung mit Methylenblau (MB) quantifiziert. Unter Laborbedingungen wurde mit der Technik des Aufsprühens bei einer Beschichtungsdichte von 12.5 mg/m^2 eine Effizienz des Abbaus der MB-Konzentration von circa 60 % erzielt, bei 5 mg/m^2 circa 52 %, und mit der Technik der Inkorporation maximal 45 %. Zudem untersuchten Carneiro et al. (2013) [35] auch die Veränderung der Rauigkeit durch die Applikation des Photokatalysators. Diese Informationen können für die Bewertung der technischen Machbarkeit bezüglich der Fahrbahnbeeinträchtigung (Kapitel 6) verwendet werden.

Auch Brovelli & Crispino (2013) [36] stellten in ihrer Studie eine photokatalytisch aktive Asphaltdecke her, indem sie deren Oberfläche mit einer TiO_2 -haltigen Lösung besprühten. Jedoch verwendeten sie keine wässrige Lösung, sondern eine anorganische Matrix, die nicht weiter spezifiziert ist. Diese verhindert gemäss den Autoren die initiale Beschleunigung der Oxidation des Bitumens, was die gesamte Asphaltdecke zersetzen würde. Zudem garantiert die anorganische Matrix die Adhäsion des Photokatalysators an der Oberfläche, so die Forscher. Die Technik lässt sich auf bestehenden und neu erstellten Asphaltdecken anwenden. In der Studie vermochte die photokatalytische Asphaltdecke in sauberem Zustand die NO_x -Konzentrationen langfristig um circa 30 % zu senken. Durch die Anwendung von Streusalz nahm die Reduktionswirkung auf circa 18 % ab, durch eine enteisende Solelösung gar auf circa 5 %, durch Sand 0/3 mm hingegen lediglich auf 26 %. Die Abnutzung der TiO_2 -Beschichtung simulierten Brovelli & Crispino (2013) [36] physisch mit Überfahrungen durch einen Autoreifen. Die Wirkung der TiO_2 -Beschichtung, NO_x -Konzentrationen zu mindern, betrug beim frisch beschichteten und sauberen Belag, das heisst ohne Sand, Streusalz oder Solelösung, circa 37 %. Diese photokatalytische Effizienz nahm bis 2'500 Überfahrungen auf circa 30 % ab und blieb dann bis Versuchsende bei 10'000 Überfahrungen etwa konstant. Die Abnahme der pho-

photokatalytischen Effizienz mit der Anzahl Überfahrungen verläuft für die durch Sand, Streusalz und Solelösung verunreinigten Beläge parallel zum sauberen, jedoch auf anderen Niveaus. Zusätzlich wurde der Einfluss der photokatalytischen Beschichtung auf die Rutschfestigkeit untersucht, was für eine spätere Bewertung der Fahrbahnbeeinträchtigung relevant ist.

Tunnel und Strassenschlucht mit photokatalytischen Oberflächen. Im Rahmen des Europäischen Life+ Projekts PhotoPAQ wurde die photokatalytische Abbauwirkung der Luftschadstoffe NO_x , O_3 , VOCs, HCHO und PM_{10} in einem Strassentunnel in Brüssel, Belgien (Gallus, Akylas, et al., 2015 [31]; Gallus, Ciuraru, et al., 2015 [26]), sowie einer künstlich angelegten Strassenschlucht in Bergamo, Italien, untersucht (Gallus, Ciuraru, et al., 2015 [26]). In je einem Abschnitt des Tunnels und der Strassenschlucht wurden Decke und Wände beziehungsweise Hausfassaden und Fahrbahn mit kommerziellen photokatalytisch aktiven, zementbasierten Mörteln beschichtet (Italcementi, TX-Active Skim Coat und TX-Active Skim Coat Boosted). Im Tunnel-Experiment (Abb. 8) wurden drei unterschiedliche Ansätze verwendet, um die Schadstoffreduktion zu quantifizieren: Messungen (1) *vor und nach* der photokatalytischen Beschichtung, (2) *gegen und in* Windrichtung, sowie (3) *mit und ohne* UV-Beleuchtung. Die UVA-Strahlung lag zwischen 0.6 und 1.6 W/m^2 , die typische Windgeschwindigkeit tagsüber bei circa 3 m/s und die relative Luftfeuchtigkeit zwischen 70 und 90% .

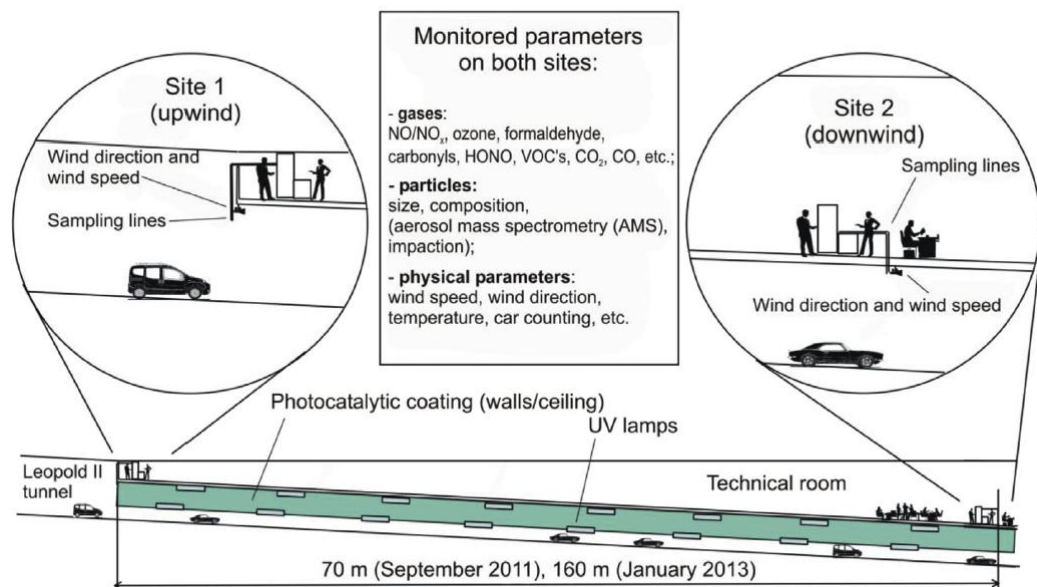


Abb. 8 Versuchsanordnung der Europäischen Life+ Studie PhotoPAQ zur Reduktion von Luftschadstoffen mittels photokatalytisch aktiver Beschichtung von Decke und Wänden eines Abschnitts im Leopold II Tunnel in Brüssel, Belgien (Gallus, Akylas, et al., 2015 [31]).

Im Gegensatz zu ersten Abschätzungen der Wirksamkeit einer photokatalytisch aktiven Mörtelbeschichtung anhand von Laborexperimenten konnte mit der Tunnel-Studie kein Minderungseffekt der NO_x -Konzentrationen nachgewiesen werden. Denn die maximal mögliche Reduktion der NO_x -Konzentration von 2% liegt im Bereich der experimentellen Unsicherheiten. Gallus, Akylas, et al., 2015 [31] erklärten dieses ernüchternde Resultat mit einer Passivierung der photokatalytischen Oberflächenreaktivität aufgrund der stark verunreinigten Luft im Tunnel. Im Labor wurden anschliessend die Bedingungen im Tunnel physisch simuliert und die Reaktionskinetik ermittelt. Eine numerische Simulation mit diesen Werten ergab eine Reduktion der NO_x -Konzentration von nur 0.4% , was die Resultate der Feldexperimente bestätigt. Neben der stark verschmutzten Tunnelluft erachten Gallus, Akylas, et al., 2015 [31] auch die zu geringe UVA-Strahlung und die hohe relative Luftfeuchtigkeit (RH) und Windgeschwindigkeit (WS) als Ursachen für das Ausbleiben der erwarteten NO_x -Reduktion. Unter idealen Bedingungen, das heisst bei $\text{UVA} = 10 \text{ W/m}^2$, $\text{RH} = 50 \%$ und $\text{WS} = 1 \text{ m/s}$, sowie ohne eine Passivierung der Reaktivität der

photokatalytischen Oberflächen erachten die Gallus, Akyas, et al., 2015 [31] eine Reduktion der NO_x -Konzentration von 20 % als möglich.

Auch beim Strassenschlucht-Experiment ergaben sich als obere Grenze für die mögliche Minderung der NO_x -Konzentration 2 % (Gallus, Ciuraru, et al., 2015 [26]). Die Ursache für dieses Ergebnis sieht das Forscherteam jedoch nicht in der Oberflächenpassivierung wie im Tunnel, sondern im limitierten Transport der Schadstoffe zu den photoaktiven Oberflächen. Der grosse Unterschied zwischen diesem Resultat und den aus einigen früheren Studien festgestellten hohen NO_x -Minderungseffekten ist laut Gallus, Ciuraru, et al. (2015) [26] auf die unrealistischen Versuchsbedingungen im Labor zurückzuführen. Würden die Geometrie des Strassenraums, die Exponierung der photoaktiven Oberflächen gegenüber den Schadstoffen und die Expositionszeiträume in Laborversuchen adäquat berücksichtigt, ergäben sich ähnliche Resultate wie im Feld.

Photokatalytische Lärmschutzwände. Vorläufige Ergebnisse des noch laufenden Pilotprojekts der Deutschen Bundesanstalt für Strassenwesen (BASt) zur Wirksamkeit photokatalytisch aktiver Lärmschutzwände entlang der Bundesautobahn A1 wurden am Kolloquium Luftqualität an Strassen am 5. März 2015 vorgestellt (Sauer et al., 2015 [30]). Auf einem 1 km langen Abschnitt der A1 zwischen Osnabrück-Nord und Osnabrück-Hafen wurden Lärmschutzwände beidseitig und auf beiden Fahrbahnseiten mit einer TiO_2 -haltigen Suspension (Remmers Baustofftechnik GmbH, Historic Lasur HC NO_x) beschichtet (Abb. 9). Die photokatalytisch aktive Oberfläche beträgt circa 30'000 m^2 . Ein ebenfalls 1 km langer Abschnitt mit Lärmschutzwänden, jedoch ohne photoaktiver Beschichtung, aber ansonsten nahezu gleichen Bedingungen und Eigenschaften dient als Referenz. Gemessen wurden meteorologische Daten, Verkehrsdaten, sowie die Konzentrationen der Luftschadstoffe NO_x , O_3 und PM_{10} . Ein Minderungseffekt der NO_x -Konzentrationen aufgrund der photoaktiven Lärmschutzwände konnte nicht festgestellt werden. Da die TiO_2 -Pigmente der Suspension in einem organischen Bindemittel eingebettet sind, entfaltet der Photokatalysator seine volle Wirksamkeit erst, nachdem er selbst oberflächennahe Bindemittel abgebaut hat, was nach Herstellerangaben circa 3 Monate dauert. Anhand von Prüfkörpern wurde jedoch gezeigt, dass diese Aktivierungszeit unter den gegebenen Voraussetzungen circa 1 Jahr dauert. Interessant an der Studie ist zudem, dass auch untersucht wurde, ob sich durch die Beschichtung der Lärmschutzwände die Schallabsorption ändert, was wertvolle Informationen sind für die Analyse der technischen Machbarkeit bezüglich der Umweltverträglichkeit (Kapitel 6).



Abb. 9 Beschichtung einer Lärmschutzwand entlang der Autobahn A1 bei Osnabrück (Deutschland) mit einer photokatalytischen Suspension im Rahmen eines Pilotprojekts (BASt, 2012 [40]).

4.3.2 Inkorporation photokatalytischer Pigmente in Baustoffe

Überblick. Eine weitere Möglichkeit, photokatalytische Oberflächen im Strassenraum zu erzeugen, besteht in der Inkorporation oder In-Masse-Verarbeitung (Lammering, Schlötzer & Riffel, 2015 [41]) von TiO_2 -Pigmenten in Baustoffe bei deren Herstellung. Dabei kommen aktuell folgende Baustoffe zum Einsatz:

- Zement-basierte Baustoffe (Hüsken, Hunger & Brouwers, 2009 [42]; Wang et al., 2014 [28]; Lammering et al., 2015 [41]; Staub, 2015 [37])
- Bitumen-basierte Baustoffe (Mohammad & Hassan, 2010 [43]; Mohammad, Hassan & Cooper, 2012 [44]; Carneiro et al., 2013 [35]).

Während bituminöse Baustoffe mit inkorporierten TiO_2 -Pigmenten ausschliesslich für Asphalt-Beläge verwendet werden, finden photokatalytische Zement-Baustoffe Anwendung in:

- Gebäudefassaden (Staub, 2015 [37])
- Betonfahrbahnen (Lammering et al., 2015 [41]; Staub, 2015 [37])
- Beton-Verbundsteinen (Hüsken et al., 2009 [42]; Ballari, Hunger, Hüsken & Brouwers, 2010 [45]; Ballari, Yu & Brouwers, 2011 [46]; Lammering et al., 2015 [41]; Staub, 2015 [37]; Crispino, 2014 [25])
- Abstreumaterialien auf Asphalt-Belägen (Wang et al., 2014 [28]).

Photokatalytische Beton-Verbundsteine und -Beläge. Hüsken et al. (2009) [42] zeigten in einer vergleichenden Studie zu Beton-Verbundsteinen auf dem Europäischen Markt, in welche TiO_2 -Pigmente inkorporiert sind, dass sich deren Wirksamkeit bezüglich des NO-Abbaus zum Teil deutlich unterschied. Unter idealen Laborbedingungen gemäss der Norm ISO 22197-1:2007 [5] (Schadstoffkonzentration $\text{NO} = 1.0 \text{ ppmv}$; Flussrate $= 3.0 \text{ l/min}$; UV-A-Strahlung $= 10.0 \text{ W/m}^2$; relative Luftfeuchtigkeit $= 50 \%$), die im Photoreaktor kontrolliert werden konnten, reichte das Spektrum der Verringerung der NO-Konzentration von 0 % bis circa 40 %. An einem Beton-Verbundstein-Typ untersuchten Hüsken et al. (2009) [42] den Einfluss verschiedener Faktoren auf die NO-Abbaueffizienz. Dabei stellten sie fest, dass:

1. eine Erhöhung der Strahlungsintensität im Bereich des wirksamen Wellenlängenbereichs die Abbau-Leistung erhöht;
2. eine Erhöhung der relativen Luftfeuchtigkeit die Abbau-Leistung senkt;
3. erhöhte Schadstoffkonzentrationen zu höheren Umwandlungsraten bis zu einem bestimmten Schwellenwert führen, während die Gesamtabbauraten, das heisst die abgebaute NO-Masse pro Zeit- und Flächeneinheit, abnimmt;
4. hohe Flussraten die Kontaktzeit der Schadstoffmoleküle an den photoaktiven Oberflächen und damit die Abbauraten verringern;
5. höhere TiO_2 -Mengen den NO-Abbau fördern;
6. die Feinheit der TiO_2 -Partikeln einen stärkeren Effekt hat als die TiO_2 -Menge;
7. sich mit zunehmender Rauigkeit die reaktive Oberfläche vergrössert;
8. die Verwendung von Suspensionen zu einer gleichmässigeren Verteilung der TiO_2 -Pigmente führt.

Dieselben Forscher der Studie von Hüsken et al. (2009) [42] erweiterte um Ballari entwickelten anhand von Messungen des NO-Abbaus durch TiO_2 -dotierte Beton-Verbundsteine mit derselben Versuchseinrichtung wie zuvor ein kinetisches Modell zur Simulation der photokatalytischen Reaktion von NO_x (Ballari et al., 2010 [45]). Hierfür untersuchten sie verschiedene Parameter, welche die photokatalytische Aktivität beeinflussen können, wie etwa die Zufluss- NO -Konzentration, die Höhe des Photoreaktors als auch den Durchfluss. Vier beziehungsweise fünf Jahre nach diesen beiden Studien zeigte allerdings Ifang, Gallus, Liedtke, Kurtenbach, Wiesen, et al. (2014) [47], dass von der NO-Abbau-Effizienz eines photokatalytischen Materials nicht auf diejenige anderer

Schadstoffe geschlossen werden kann. Insofern beschränken sich die Aussagen von Hüsken et al. (2009) [42] und das kinetische Modell von Ballari et al. (2010) [45] auf die NO-Abbau-Effizienz und lassen sich nicht auf diejenigen anderer Luftschadstoffe übertragen.

Lammering et al. (2015) [41] untersuchen im noch laufenden Pilotprojekt Zentraler Omnibus-Bahnhof Detmold die Wirksamkeit photokatalytisch aktiver Beton-Beläge im Vergleich zu Referenzflächen aus Beton ohne TiO_2 -Dotierung unter realen Bedingungen. Die Verkehrsflächen, auf denen die Omnibusse fahren, bestehen aus 24 cm dicken Ort betonplatten in der Druckfestigkeitsklasse C30/37 und einer unterlagerten 10 cm dicken Asphalttragschicht. Die Fussgängerbereiche wurden aus Beton-Verbundsteinen hergestellt. Im photoaktiven Teil der Verkehrsflächen wurde für den Beton der Spezialzement TioCem CEM II/A-S 42,5 R (tx) der HeidelbergCement AG verwendet, in demjenigen der Fussgängerbereiche der Beton-Verbundstein AirClean-VS-5 der Karl Vogt Betonwerk Porta Westfalica GmbH & Co. KG. Bei diesem Beton-Verbundstein ist aus Kostengründen lediglich der Vorsatzbeton mit TiO_2 dotiert (Abb. 10). Messungen nach der Norm UNI 11247:2007 an Prüfkörpern der für die Verkehrsflächen verwendeten Ort betonplatten mit TioCem im Reaktor des HeidelbergCement Technology Centers ergaben eine Reduktion der NO_x -Konzentration von 35.6 %. Photokatalytische Zement-Baustoffe mit diesem Wert weisen gemäss den TXActive-Qualitätsanforderungen der Industrie den Aktivitätsindex „sehr hoch“ auf.

Die Prüfung der Wirksamkeit des NO_x -Abbaus erfolgt anhand der NO_3^- -Konzentration im aufgefangenen Oberflächenwasser, das auf der zu untersuchenden Fläche anfällt. Diese Methode stellt eine einfache, aber effiziente Alternative zur direkten Messung der NO_x -Konzentrationen in der Luft dar, wofür aufwendige Messtechnik erforderlich ist. Erste Resultate zeigen, dass in den Wasserproben der photokatalytisch aktiven Flächen die NO_3^- -Konzentrationen höher sind als in denjenigen der Referenzflächen. Demzufolge konnte ein Entzug von NO_x aus der Luft durch die TiO_2 -dotierten Beton-Beläge bereits qualitativ nachgewiesen werden. Weitere Auswertungen werden im Laufe des Jahres 2015 erwartet.



Abb. 10 Photokatalytischer Beton-Verbundstein. Links: Photographie. Rechts: Schematische Darstellung. (Abbildung verändert nach Crispino, 2014 [25]).

Photokatalytische Gebäudewände. Staub (2015) [37] berichtet von der „Chiesa di Dio Padre Misericordioso“ in Rom, dem ersten Betonbau, bei dem TiO_2 -haltiger Zement (Italcement, TX Active) verwendet wurde. Neben diesem vom Architekten Richard Meier geplanten und 2003 fertiggestellten Sakralbau, gehören auch das Hauptquartier der Air France in Paris-Roissy sowie die Polizeiwache in Bordeaux zu den bekannten Gebäuden mit photokatalytischen Betonfassaden. Da TiO_2 als Rohstoff sehr teuer, aber nur an der Oberfläche wirksam ist, erachtet der Geschäftsführer von Betonsuisse Jörg Berli, der von Staub (2015) [37] interviewt wurde, die Technologie der Inkorporation dieses Pigments in Massenzement als wenig wirtschaftlich und damit unattraktiv für den Schweizer Markt. Interessanter könnten hingegen Technologien sein, bei welchen ein günstiges Verhältnis von reaktiver Oberfläche zum Volumen und damit zum Verbrauch von TiO_2 steht. Hierzu zählt er zementgebundene Beschichtungen oder Putze, sowie Textilbeton im Laminierverfahren, welche momentan am Institut für Bauforschung (ibac) der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule in Aachen erforscht werden, so Berli. Aufgrund der in der Literatur sehr unterschiedlichen Bewertung der Abbau-Effizienz von Luftschadstoffen durch photokatalytische Oberflächen, ist Berli nicht von deren Wirksamkeit überzeugt.

Photokatalytisches Abstreumaterial für Asphalt-Beläge. Ausgehend von der Tatsache, dass die meisten Strassenbeläge in Deutschland (und ebenso in der Schweiz, Dünner, mündlich, 2015 [48]) aus Asphalt bestehen, entwickelten Wang et al. (2014) [28] ein Verfahren, welches die Ausstattung dieser Beläge mit einer materialsparenden, aber gleichzeitig griffigen und abrasionsresistenten TiO_2 -Schicht ermöglicht. Dabei wird Mörtel mit partikulär inkorporiertem TiO_2 zertrümmert, auf 2/4 mm ausgesiebt und zusammen mit schlag- und verschleissresistenten Körnern (zum Beispiel Diabas) der Kornklasse 4/5 mm zu je 50 % zu einem Abstreumaterial vermischt. Dieses wird mittels eines Bindemittels (Epoxidharz) auf der Asphaltdeckschicht fixiert, sodass die TiO_2 -haltigen Körner nicht direkt mit dem Asphalt in Kontakt kommen und dadurch dessen physische Integrität gewährleistet werden kann (Abb. 11). Bei einem initialen NO-Gehalt der Luft von 1 ppm, einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50 bis 60 %, einem Volumenstrom von 1 l/min sowie einer Strahlungsintensität im photokatalytisch relevanten Wellenlängenbereich zwischen 300 und 400 nm von 46 W/m^2 ergab sich nach 1 h Bestrahlung für die drei Bestvarianten eine Minderung der NO-Konzentration von circa 70 %. Zusätzlich wurde der so erstellte Strassenbelag hinsichtlich Rauheit und Verschleisswiderstand getestet und optimiert, sodass der Richtwert der Schlagzertrümmerungsprüfung nach DIN EN 1097-2 [2] sowie der Polierwert nach DIN EN 1097-8 [3] eingehalten werden konnten. Weiteren Forschungsbedarf sehen Wang et al. (2014) [28] in der Erhöhung der Druckfestigkeit der Mörtelkörner bei gleichzeitiger Wahrung des Verschleisswiderstands und der Verarbeitbarkeit. Zudem müsste die Dauerhaftigkeit des neuen Belags getestet sowie eine Kosten-Nutzen-Analyse durchgeführt werden.

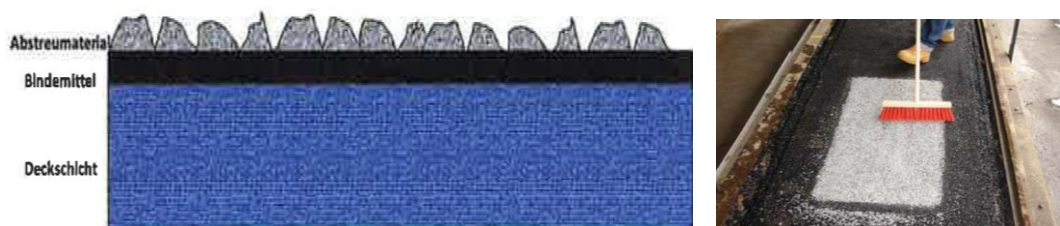


Abb. 11 Photokatalytisch aktiver, TiO_2 -sparender, griffiger und abrasionsresistenter Asphalt-Belag. Links: Prinzipskizze. Rechts: Abbürsten überschüssigen TiO_2 -haltigen Abstreumaterials nach Aushärtung des Bindemittels über der Asphaltdecke (Wang et al., 2014 [28]).

Inkorporation photokatalytischer Pigmente in Asphalt-Decken. Mohammad et al. (2012) [44] untersuchten, ob und inwiefern die Inkorporation von TiO_2 -Partikeln in konventionelle Beläge aus Hot Mix Asphalt (HMA, Mischung und Verdichtung bei 163°C) und Warm Mix Asphalt (WMA, Mischung und Verdichtung bei 143°C) deren mechanische Eigenschaften beeinflusst werden. Denn eine initiale Beschleunigung der Oxidation des Bitumens als organisches Material durch die photokatalytische Wirkung, kann möglicherweise die gesamte Asphaltdecke abbauen (Brovelli & Crispino, 2013 [36]). Dabei wurden zwei unterschiedliche Gemische bituminöser Bindemittel verwendet: (1) PG (Performance Grade) 64-22, unmodifiziert; (2) PG 70-22, SBS-modifiziert (SBS = Styrene-Butadiene-Styrene, ein gummiartiger Modifizierer). Für diese beiden Gemische sowie für die beiden Verfahren HMA und WMA wurde jeweils eine Probe zu 7 % mit einem kommerziellen, ultrafeinen TiO_2 -Pulver einer aktiven Oberfläche von $90 \text{ m}^2/\text{g}$ versetzt, während je eine andere unbehandelt blieb und als Referenz dient. Insgesamt wurden somit acht verschiedene Belagsarten getestet, welche dazu als dünne Oberflächendecken von 19 mm Dicke ausgeführt wurden. Als Zielvariablen wurde (1) die Spurrinnenbildung mittels des Hamburg Wheel Tracking Tests untersucht, (2) die Schädigung durch Feuchtigkeit anhand des modifizierten Lottman-Tests, (3) die Bruchresistenz mittels des Halbkreis-Biegetests (Semi-circular bending test; Abb. 12), sowie (4) die Resistenz gegenüber Niedrigtemperaturbruch anhand des Thermal Stress Restraining Specimen Tests.

Carneiro et al. (2013) [35] untersuchten neben photokatalytisch beschichteten Asphalt-Belägen auch solche, in welchen TiO_2 -Partikel in Warm Mixing Asphalt inkorporiert wur-

den mit Gehalten von 3 und 6 %. Dieses Verfahren der Inkorporation ist folglich nur bei neu erstellten Asphaltdecken anwendbar und nicht für bestehende. Die Messung der photokatalytischen Aktivität, das heisst der Verringerung der NO_x -Konzentration, erfolgte anhand der Strahlungsabsorption in einer wässrigen Lösung mit Methylenblau (MB) in Abhängigkeit von der Zeit. Sie betrug nach 500 min Bestrahlung für die Beläge mit einem Gehalt von 3 % TiO_2 circa 40 %. Die Verdoppelung des TiO_2 -Gehalts ergab jedoch nur eine NO_x -Konzentrationsminderung um circa 44 %. Gegenüber den TiO_2 -beschichteten Asphalt-Belägen wiesen diejenigen mit inkorporiertem TiO_2 eine um circa ein Viertel geringere photokatalytische Aktivität auf. Weitere Nachteile des Inkorporationsverfahrens bei Asphalt sehen Carneiro et al. (2013) [35] in der Gefahr, dass die bituminöse Struktur durch TiO_2 angegriffen werden könnte, und im ineffizienten Einsatz von TiO_2 , da nur derjenige Teil wirksam ist, welcher an der Asphaltoberfläche der Strahlung ausgesetzt ist.



Abb. 12 Halbkreis-Biegetest (Semi-Circular Bending Test; Mohammad et al., 2012 [44]).

Diese Untersuchung zeigt, dass die getesteten mechanischen Eigenschaften nicht signifikant durch die Inkorporation von TiO_2 -Partikeln in den Asphalt beeinflusst wurden. Die schadstoffmindernde Wirkung der Beläge wurde in dieser Studie nicht untersucht.

4.3.3 Einmischung einer photokatalytischen Suspension in offenporige Asphalt-Beläge

Funktionsweise. In einem letzten Verfahren zur Erzeugung photokatalytisch aktiver Oberflächen im Strassenraum wird eine TiO_2 -haltige Zement-Suspension in den Porenraum eines bereits bestehenden offenporigen Asphalt-(Beton)-Belags eingemischt (Crispino et al., 2009 [24]; Hüsken et al., 2009 [42]; Crispino, 2014 [25]; Abb. 13). Ohne Beimischung photokatalytisch aktiver Substanzen in die Zement-Suspension beziehungsweise den Mörtel ist dieses Verfahren bekannt zur Herstellung sogenannter Vermörtelungsbeläge, die insbesondere für Standflächen eingesetzt werden (Dünner, mündlich, 2015 [48]). Damit der Mörtel bis zum Abbinden die Poren der Tragschicht gleichmässig und vollständig ausfüllen kann, muss er eine hohe Fließfähigkeit aufweisen (Crispino, 2014 [25]).



Abb. 13 Photokatalytischer Strassenbelag aus TiO_2 -haltigem Zement-Mörtel (hellgrau) und offenporigem Asphalt (dunkelgrau/schwarz). Links: Aufbringung des flüssigen Mörtels auf die Asphaltdecke. Rechts: Schnittansicht des fertigen Asphalt-Mörtel-Belags. (Crispino, 2014 [25]).

Eigenschaften der Technologie. Crispino et al. (2009) [24] analysierten kombinierte Beläge aus offenporigem Asphalt-Beton und TiO_2 -haltigem Zement-Mörtel hinsichtlich ihrer Materialeigenschaften, welche relevant für die Belastung des Verkehrs sind, sowie ihrer photokatalytischen Wirksamkeit im Labor. Dabei verwendeten sie zwei verschiedene Arten von TiO_2 im Mörtel: (1) Anatase mit photokatalytischer Aktivität bei Wellenlängen $< 388 \text{ nm}$, und (2) Kohlenstoff (C)-dotierten Anatase, dessen nutzbares Wellenlängenspektrum bis 535 nm reicht und damit einen Teil des sichtbaren Lichts einschliesst. Für beide Arten wurden Mörtel mit 5 % sowie 7.5 % TiO_2 -Gehalt getestet. Die durchschnittliche Reduktion der NO_x -Konzentration betrug beim Belag mit 5 % Anatase-Anteil im Mörtel 17 %. Beim leicht höheren TiO_2 -Gehalt konnten 28 % erzielt werden. Die C-Dotierung des Anatase brachte eine deutliche Steigerung der NO_x -Konzentrationsminderung auf 32 % bei 5 % TiO_2 im Mörtel und gar auf 39 % bei 7.5 % TiO_2 . Die durchgeführten Viskositätstests zeigten, dass TiO_2 die Zeit reduzierte, in welcher der Mörtel sich verarbeiten liess. Diese Zeit war jedoch ausreichend für das vollständige Ausfüllen des Porenraums der 5 cm mächtigen Asphalt-Beton-Decke durch den Mörtel. TiO_2 verzögerte auch den Anstieg der Druckfestigkeit beim Aushärten des Mörtels. Aber alle vier untersuchten Mörteltypen erreichten nach 28 Tagen eine Druckfestigkeit über 70 MPa, was für einen städtischen Strassenbelag ebenfalls ausreicht. Auch die indirekte Zugfestigkeit des Mörtels wurde durch TiO_2 gegenüber dem Referenzmörtel merklich erniedrig. Nach 28 Tagen war sie jedoch bei allen vier TiO_2 -haltigen Mörteln $> 1 \text{ MPa}$, was die Anforderungen an einen städtischen Belag erfüllt. Die getesteten photokatalytischen Strassenbeläge sind daher alle geeignet für den Stadtverkehr.

Hüsken et al. (2009) [42] untersuchten in ihrer Studie neben photokatalytischen Beton-Verbundsteinen auch einen TiO_2 -haltigen Mörtel zur Verfüllung des Porenraums von offenporigem Asphalt. Dieser wies gegenüber den Beton-Verbundsteinen bei gleichem TiO_2 -Gehalt eine höhere NO_x -Reduktion auf. Sie betonen jedoch, dass die aktive Oberfläche des TiO_2 -Mörtels bei der späteren Anwendung auf offenporigen Asphaltdecken um den Anteil der Asphalt-Matrix reduziert wird und damit auch die NO_x -Abbauleistung.

4.3.4 Ansätze zur Standardisierung photokatalytischer Technologien im Strassenraum

Standardisierungs-Bedarf und -Ansätze. Wie oben aufgezeigt, wurde seit der Entdeckung des Anwendungspotenzials der Photokatalyse eine Vielzahl unterschiedlicher Techniken und Produkte entwickelt, sowie Methoden zur Bestimmung der photokatalytischen Aktivität. Aufgrund dieser zum Teil sehr unterschiedlichen Methoden und Randbedingungen sind die Resultate vieler Studien nur bedingt vergleichbar. Dies ist laut Jörg Berli, Geschäftsführer von Betonsuisse, mit ein Grund, weshalb bis jetzt die Skepsis gegenüber der angewandten Photokatalyse in der Schweiz gross ist und noch keine Projekte mit dieser Technologie durchgeführt wurden (Staub, 2015 [37]). Um diesem Mangel entgegenzuwirken und eine einfachere Vergleichbarkeit zu erreichen, ist einer Standardisierung der Testmethoden und evtl. eine Klassifizierung von Techniken und Produkten

nötig. Ansätze hierzu bestehen u. a. von Suárez, Portela, Hernández-Alonso & Sanchez (2014) [49], von Ifang et al. (2014) [47], sowie von Scheja, Liewald, Ackerhans, Schmidt & Menzel (2015) [50].

Fliessbett-Photo-Reaktor mit Aufnahme-Koeffizienten. Ifang et al. (2014) [47] analysierten, diskutierten und verglichen verschiedene Methoden zur Quantifizierung der luftreinigenden Aktivität photokatalytischer Oberflächen. Bei Bett-Photo-Reaktoren (zum Beispiel gemäss ISO-Norm) können Transport-Barrieren zur Unterschätzung der Abbauprodukte führen, sofern schnelle, heterogene Reaktionen untersucht werden. Im Gegensatz dazu können in Rührkessel-Photo-Reaktoren (zum Beispiel gemäss UNI-Norm) komplexe sekundäre chemische Reaktionen auftreten, sodass der photokatalytische NO_x -Abbau möglicherweise überschätzt wird, sofern sich auch NO_2 in der Luft befindet. Zudem haben die Testbedingungen wie die Intensität der photokatalytisch relevanten Strahlung, der Luftfluss, die relative Luftfeuchtigkeit sowie die Ausgangskonzentrationen an Luftschadstoffen erheblichen Einfluss auf die Messergebnisse. Daher ist ein Vergleich von Abbauaktivitäten, die unter verschiedenen Bedingungen ermittelt wurden, schwierig und ermöglicht keine Übertragung der Resultate auf reale Bedingungen in der Atmosphäre. Zudem zeigten die Autoren, dass anhand der ausschliesslichen Verwendung von NO als Luftschadstoff keine Aussagen über die Wirksamkeit der Luftreinigung durch eine photokatalytische Oberfläche insgesamt möglich sind, da sich weitere relevante Luftschadstoffe völlig anders wie NO verhalten können. Um diese Probleme zu überwinden, schlugen Ifang et al. (2014) [47] eine neue Methode vor. Diese basiert auf einem Fliessbett-Photo-Reaktor und überwindet die Limitierung von Diffusion durch einfache Turbulenzbarrieren (Abb. 14). Um die Reaktionskinetik zu quantifizieren, wurde das Konzept von Aufnahme-Koeffizienten eingeführt, welches unabhängig von der Versuchseinrichtung und der verwendeten Konzentrationen ist. Daher können die Ergebnisse auf beliebige atmosphärische Bedingungen extrapoliert werden. Zudem ist nach Ifang et al. (2014) [47] eine Quantifizierung wichtiger schädlicher Reaktionsprodukte nötig.

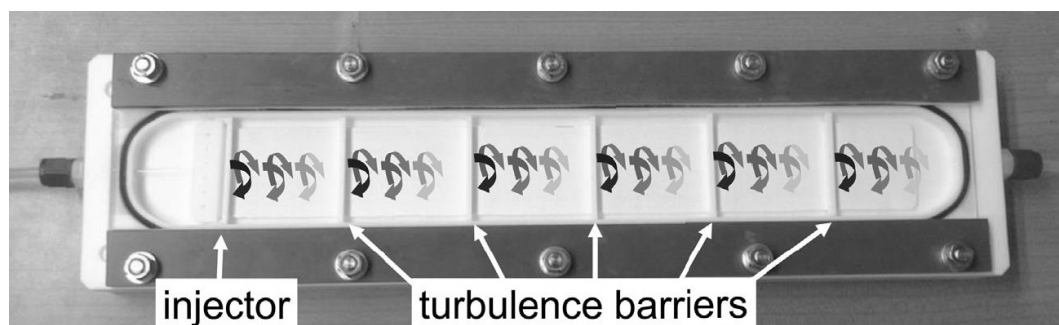


Abb. 14 Neuer Fliessbett-Photo-Reaktor mit Turbulenzbarrieren zur Aufhebung der Diffusionslimitierung (Ifang et al., 2014 [47]).

Atmosphärenluft-gespeistes 3-Kammer-System. Etwa zeitgleich entwickelten Suárez et al. (2014) [49] einen anderen Ansatz für die Übertragbarkeit von Laborresultaten zur Aktivität photokatalytischer Materialien auf reale atmosphärische Bedingungen. Ihre Versuchsanordnung SYPHOMA (System for evaluation of the PHotoactivity of Materials) ist so konzipiert, dass der Abbau von Luftschadstoffen durch Prüfmaterialien kontinuierlich gemessen werden kann. Da Aussenluft verwendet wird, entsprechen die Schadstoffkonzentrationen (NO_x , VOCs, SO_x , NH_3 u. a.), die Temperatur und die relative Feuchtigkeit der Luft den Werten der realen Atmosphäre des Untersuchungsstandorts entsprechen. Das System besteht aus drei Kammern (Abb. 15). Zwei davon sind transparent für UV-Strahlung, wobei eine den Probekörper mit photoaktiver Oberfläche beinhaltet, die andere die Referenzprobe. In der dritten Kammer, welche draussen platziert ist, wird die Aussenluft analysiert. Sensoren erfassen in jeder Kammer quasi-kontinuierlich die Temperatur, die relative Luftfeuchtigkeit, sowie die UVA-Strahlung. Die NO_x -Konzentrationen werden mittels eines Chemilumineszenz- NO_x -Analysators gemessen. Die Vertrauenswürdigkeit des Systems konnte anhand eines Vergleichs mit den NO_x -Konzentrationen der nächstgelegenen Wetterstation nachgewiesen werden. Mit

dem System können auch verschiedene Materialien gleichzeitig getestet und verglichen werden.

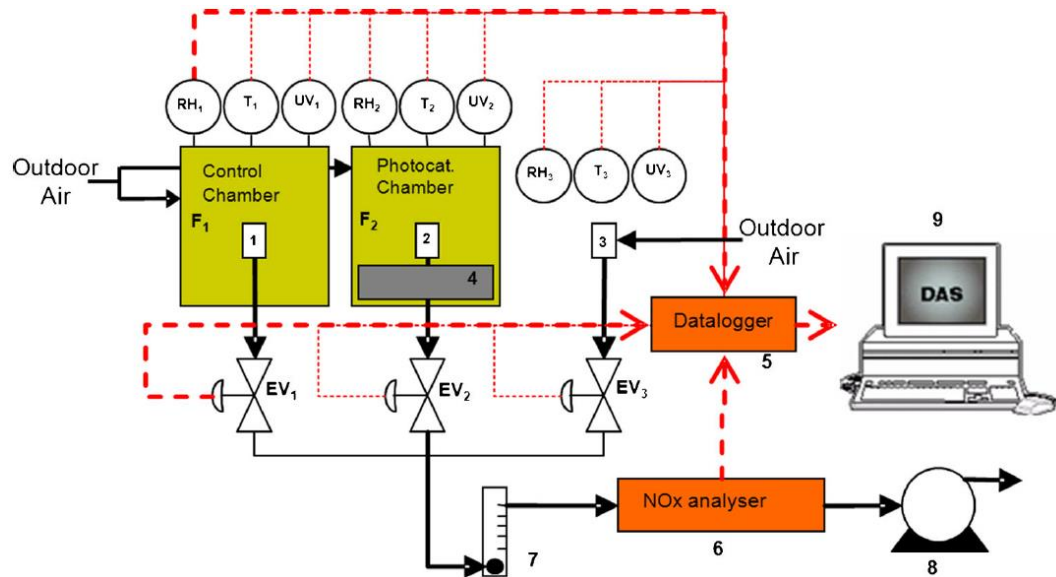


Abb. 15 Schema des mit Aussenluft gespeisten Systems SYPHOMA zur Prüfung der Aktivität photokatalytischer Materialien (Suárez et al. 2014 [49]). 1 Kanal Kontrollkammer, 2 Kanal photokatalytische Kammer, 3 Kanal Aussenluftmessung, 4 photokatalytisches Material, 5 Datenlogger, 6 NO_x-Analysator, 7 Rotameter (Durchflussmessung nach dem Schwebekörperprinzip), 8 Pumpe, 9 Datenerfassungssystem, RH_x Sensor für relative Luftfeuchtigkeit, T_x Sensor für Lufttemperatur, UV_x Strahlungssensor, F_x Ventilator, EV_x Elektroventil, x = 1–3.

Standardisierung durch den Fachverband angewandte Photokatalyse. 2011 wurde der Fachverband angewandte Photokatalyse (FAP) gegründet und gehört zum deutschen Verband der Mineralfarbenindustrie e. V. (Scheja et al., 2015 [50]). Er soll zur differenzierten Diskussion der angewandten Photokatalyse zwischen den Unternehmen der Pigment-, Coatings- und Baustoffindustrie sowie mit der Wissenschaft beitragen, Forschung und Entwicklung sowie Anwendungen in diesem Bereich fördern, sowie in der Öffentlichkeit über diese Technologie informieren und sie verbreiten. Dem FAP gehören 20 Unternehmen an, welche ein breites Spektrum von Produkten, Anwendungen und Dienstleistungen abdecken (Abb. 16). Das Gremium „Technik und Umwelt“ innerhalb des FAP hat sich zum Ziel gesetzt, Produkt-, Mess- und Qualitätsstandards für die Bewertung der photokatalytischen Aktivität zu entwickeln und strebt eine freiwillige Selbstverpflichtung der Hersteller an bis zur langfristigen Einführung von Normen.

Fachverband angewandte Photokatalyse																						BASF SE	Chemische Fabrik Budenheim KG	Dachziegelwerke NELSKAMP GmbH	Dyckerhoff AG	Erlus AG	Evonik Industries AG	F.C. Nüdling Betonlemente GmbH + Co. KG	Ferro GmbH	GXC Coatings GmbH	Harold Scholz & Co. GmbH	HeidelbergCement AG	KEIMFARBEN GmbH	KRONOS TITAN GmbH	Monier Braas GmbH	NADICO Technologie GmbH	REMEI Blomberg GmbH & Co. KG	Huntsman Brockhues GmbH & Co. KG	SACHTLEBEN Chemie GmbH Huntsman	Pigments	Saint-Gobain Weber GmbH	Sto SE & Co. KGaA
Produkte & Anwendungen																																										
Photokatalysatoren																																										
• TiO ₂ UV						✓			✓	✓			✓		✓	✓	✓	✓																								
• TiO ₂ VIS									✓	✓			✓		✓	✓	✓	✓																								
• Sonstige Photokatalysatoren								✓							✓	✓		✓																								
Photoaktive Coatings																																										
• Fassadenfarbe												✓					✓				✓																					
• Innenraumfarbe												✓									✓																					
• Putze (Innen/Außen)																																										
• Sonst. Beschichtungen									✓							✓	✓				✓																					
Photoaktive Baustoffe																																										
• Dachziegel / -steine				✓		✓								✓																												
• Pflastersteine / -platten							✓																																			
• Zement / Beton					✓						✓																															
Funktion & Wirkung																																										
Luftreinigung				✓	✓	✓	✓			✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓																					
Anti-Verschmutzung				✓		✓	✓			✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓																					
Anti-Fogging							✓			✓					✓				✓																							
Anti-Bakteriell						✓				✓		✓	✓			✓	✓	✓																								
Dienstleistungen																																										
Analytik / Messtechnik															✓	✓		✓																								
Produktoptimierung / F&E		✓	✓			✓			✓						✓	✓	✓	✓		✓																						
Beschichtung von Oberflächen								✓							✓	✓																										

Abb. 16 Mitgliedsfirmen des Fachverbands angewandte Photokatalyse (FAP) und deren Produkte, Anwendungen und Dienstleistungen (FAP, 2014 [33]).

4.3.5 Zusammenfassung Kapitel 4.3

Photokatalysatoren vermögen unter Einfluss ultravioletter (UV) Strahlung nachweislich die Konzentrationen relevanter PM₁₀-Vorläufgase zu verringern, ohne dass der Katalysator selbst verbraucht würde. Die Photokatalyse wird daher u.a. zur Luftreinhaltung angewandt, wobei sich als Photokatalysator Titandioxid (TiO₂) in der Kristallstruktur Anatase etablierte. Durch die Photokatalyse werden Stickoxide (NO_x) über mehrere Teilreaktionen in Nitrat (NO₃⁻) umgewandelt, was als Salz im Regenwasser gelöst wird und mit diesem im Untergrund versickert. Die dadurch auftretenden Konzentrationen werden als unbedenklich erachtet. Bei einigen TiO₂-haltigen Produkten traten jedoch umweltschädliche Stoffe auf, insbesondere salpetrige Säure (HONO beziehungsweise HNO₂) und flüchtige organische Verbindungen (VOCs).

Wesentliche Faktoren, welche die Photokatalyse und damit die PM₁₀-Verringerung beeinflussen, sind vor allem die Intensität der UV-Strahlung, die relative Luftfeuchtigkeit, sowie die Durchflussrate der Luft. Je stärker die Strahlungsintensität, desto höher ist der Abbau von PM₁₀-Vorläufgasen. Bei Anatase ist jedoch nur Strahlung mit Wellenlängen < 388 nm relevant. Durch Dotierung von TiO₂ mit Kohlenstoff (C) kann dieser Wert auf 535 nm gesteigert werden. Hohe Luftfeuchtigkeiten behindern die Photokatalyse von PM₁₀-Vorläufgasen, ebenso hohe Flussraten der Luft. Denn letztere erlauben nur geringe Kontaktzeiten von PM₁₀-Vorläufgasen mit der photokatalytischen Oberfläche und verringern daher die gewünschte Wirkung. Zur Anwendung der Photokatalyse auf Strassenbelägen sind daher geringe Windgeschwindigkeiten förderlich. Neben der Expositionszeit ist die räumliche Exposition entscheidend, d.h. in welchem Ausmass die schadstoffhaltige Luft räumlich in Kontakt mit der photokatalytischen Oberfläche treten kann. Die Abbaurate von PM₁₀-Vorläufgasen hängt zudem von deren Konzentrationen in der Luft ab. Stark verunreinigte Luft kann zu einer Passivierung der photokatalytischen Oberflächen führen. Demgegenüber nimmt die photokatalytische Abbaurate, das heisst die abgebaute NO-Masse pro Zeit- und Flächeneinheit, mit steigender TiO₂-Konzentration in den als Baustoffe verarbeiteten Trägersubstanzen zu. Wichtiger als die Konzentration ist jedoch die Feinheit der TiO₂-Partikel, da diese die für die Abbaurate relevante photokatalytische Oberfläche noch stärker beeinflusst. Die Bedeutung der reaktiven Oberfläche ist auch Grund dafür, dass raue Fahrbahnen den Abbau von PM₁₀-Vorläufgasen begünstigen. Unter realen Bedingungen auf Strassen wird der NO_x-

Abbau durch den Einsatz von Streusalz oder gar Solelösung als Auftaumittel stark verringert, kaum hingegen durch die Verteilung von Sand auf der Fahrbahn zur Erhöhung der Griffigkeit im Winter.

Im Strassenraum und insbesondere auf Strassenbelägen können photokatalytisch aktive Substanzen entweder als Beschichtungen appliziert werden, in Baustoffe als Pigmente inkorporiert, oder als Suspension in offenporige Beläge eingemischt werden. Da TiO_2 -Pigmente photokatalytisch nur dann wirksam sind, wenn sie mit der zu reinigenden Atmosphärenluft in Kontakt stehen und UV-Strahlung erhalten, ist die Technik der Inkorporation nicht so effizient wie dünne Beschichtungen, die etwa durch Sprühen aufgebracht werden. Um dieses Problem bei der Inkorporation zu umgehen, wird etwa in Beton-Verbundsteinen nur eine dünne Schicht an der Oberfläche mit TiO_2 -Pigmenten versetzt, oder TiO_2 -haltiger Beton zerbrochen und als Abstreumaterial für Asphalt-Beläge in eine Epoxidharzmatrix eingebunden. Bei der Einmischung einer TiO_2 -haltigen Suspension in offenporige Beläge besteht dasselbe Problem wie bei der Inkorporation. Momentan liegen aber keine Lösungsansätze dafür vor. Die Wirksamkeit von TiO_2 -beschichteten Fahrbahnen ist zwar direkt nach der Applikation höher als bei den beiden anderen Technologien, jedoch nimmt sie mit der Zeit aufgrund der Abrasion auf circa ein Fünftel ab bis etwa 2'500 Überfahrungen, danach bleiben die Abbauraten etwa konstant.

Während die Technik der Inkorporation photokatalytischer Pigmente nur bei der Herstellung neuer Beläge angewandt werden kann, ist eine photokatalytische Beschichtung oder die Einarbeitung aktiver Suspensionen auch bei bestehenden Fahrbahnen möglich. Im Gegensatz zu zement-basierten Baustoffen kann bei bitumen-basierten, wie Asphalt, dessen physische Integrität durch den Kontakt mit TiO_2 -haltigen Substanzen gefährdet werden, da organisches Material photokatalytisch abgebaut und damit zerstört werden kann. Bei der Technik der Inkorporation ist dieses Risiko grösser als bei der Beschichtung. Dennoch muss auch bei der Aufbringung TiO_2 -haltiger wässriger Lösungen auf Asphaltdecken der pH-Wert so eingestellt werden, dass weder der Asphalt angegriffen wird noch die kolloidale Dispersion zu stark ist.

Die Fahrbahneigenschaften werden durch die Inkorporation von TiO_2 -Pigmenten in Strassenbeläge nicht beeinträchtigt. Möglich ist eine Verringerung der Fahrbahnrauigkeit und damit der Griffigkeit hingegen bei den Techniken des Einmischens photokatalytischer Suspensionen in offenporige Beläge oder Beschichtungen. Wird gebrochenes, TiO_2 -haltiges Abstreumaterial mittels Epoxidharz auf Asphaltdecken fixiert, entsteht eine griffige, abrasionsresistente Fahrbahn.

Methoden und Randbedingungen zur Messung des Abbaus von PM_{10} -Vorläufergasen sind in den einzelnen Studien sehr unterschiedlich und Vergleiche zwischen verschiedenen Technologien und Produkten daher kaum möglich. Deshalb wurden Ansätze zur Standardisierung von Testmethoden unter kontrollierten Laborbedingungen entwickelt. Um die Wirksamkeit photokatalytischer Technologien und Produkte auch auf reale Bedingungen übertragen zu können, wird in einem neuen Ansatz Aussenluft zum Testen verwendet. Der Fachverband angewandte Photokatalyse (FAP) ist bestrebt, bis zur Einführung von Normen Produkt-, Mess- und Qualitätsstandards aufzustellen.

4.4 Grenzen und Lücken der aktuellen Forschung und Technik

Zum aktuellen Stand der Forschung und Technik auf dem Gebiet feinstaub-mindernder Strassenbeläge konnten zwar über 30 Publikationen aufgefunden werden, davon zahlreiche peer-reviewte. Dennoch sind insbesondere vergleichende quantitative Aussagen zu den verschiedenen Technologien nur begrenzt möglich und die Daten lückenhaft, was im Folgenden detaillierter aufgezeigt wird.

Einflussfaktoren. In den einzelnen Studien zu feinstaub-mindernden Strassenbelägen wurden wesentliche Einflussfaktoren wie Strahlung, Luftfeuchtigkeit und Luftstrom teils unterschiedlich festgelegt, teils gar nicht erfasst oder waren nicht erfassbar (vor allem im Freien). Da Interpolationen und vor allem Extrapolationen aufgrund der komplexen Zusammenhänge und Interaktionen zwischen den Einflussfaktoren nicht ratsam (Ilfang et al.,

2014 [47]) und Modellierungen im Rahmen dieser Machbarkeitsstudie unverhältnismässig wären, können die vorgestellten Technologien bezüglich ihrer Wirksamkeit oft nur qualitativ oder ordinal, nicht aber absolut quantitativ verglichen werden.

Systemgrenzen. Eine weitere Unschärfe beim Vergleich der vorgestellten Technologien besteht in den unterschiedlichen Systemgrenzen. Während diese im Labor klar definiert und kontrolliert werden können, ist dies im Freien nicht möglich. Die Ergebnisse von Laboruntersuchungen sind daher zwar exakt und transparent, auf reale Bedingungen jedoch kaum übertragbar, wie Gallus, Akylas, et al., 2015 [31] sowie Gallus, Ciuraru, et al. (2015) [26] zeigten. Werden Feinstaub-Konzentrationen beziehungsweise diejenigen der Vorläuforgase (im Falle photokatalytischer Technologien) in der Luft der bodennahen Atmosphäre gemessen, können sie weder auf ein Volumen noch auf eine Fläche bezogen werden. Bei der Messung der NO_3^- -Konzentration im Oberflächenwasser zum Nachweis des photokatalytischen Abbaus von NO_x ist immerhin ein Flächenbezug möglich.

Wirksamkeit. Die Wirksamkeit feinstaub-mindernder Strassenbeläge wird je nach Fokus einer Studie verschieden ausgedrückt, teils durch die Flussdichte des Abbaus von Feinstaub-Vorläuforgasen [$\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$] (teilweise im Labor), teils durch die Effizienz als Konzentrationsreduktion zur Ausgangskonzentration [%] (meist in Freilanduntersuchungen, oft im Labor). Um die Wirksamkeit als Flussdichte auszudrücken, müssen die Systemgrenzen klar definiert sein, was jedoch meist nicht der Fall ist für Untersuchungen, in welchen eine Effizienz im oben genannten Sinne ermittelt wird. Daher ist eine Umrechnung der beiden Ausdrücke für die Wirksamkeit nicht möglich. Für Vergleiche der verschiedenen Technologien bezüglich ihrer Wirksamkeit kommt erschwerend hinzu, dass im Fall lärm-reduzierender Strassenbeläge der bodenoberflächennahen Atmosphäre Feinstaub selbst entzogen wird, im Fall von photokatalytisch-aktiven Belägen hingegen indirekt über Vorläuforgase. Da nicht genau bekannt ist, welche Menge an Vorläuforgasen in Feinstaub umgewandelt wird, lässt sich die letztendliche Feinstaub-Minderung durch photokatalytische Technologien nicht eindeutig bestimmen. Zudem kann bei letzteren von der Wirksamkeit des Abbaus eines Vorläuforgases, etwa NO , nicht auf diejenige eines anderen, etwa NO_x , geschlossen werden (Ifang et al., 2014 [47]).

Standardisierung. Um verschiedene Technologien und Produkte zur Feinstaub-Minderung vergleichen und Laborresultate (unterstützt durch numerische Modellierung) auf beliebige reale Bedingungen übertragen zu können, sind standardisierte Test- und Prüfverfahren notwendig. Ansätze hierzu bestehen bereits, insbesondere für die angewandte Photokatalyse (Kapitel 4.3.4). Bestimmte Verfahren für die Praxis konnten sich jedoch noch nicht etablieren, ebenso wenig liegen in diesem Bereich Wegleitungen oder gar Normen vor. Daher ist die Wirksamkeit verschiedener Technologien und Produkte hinsichtlich ihrer Feinstaub-Minderung nach wie vor kaum vergleichbar. Bezüglich der Fahrbahneigenschaften und Umweltverträglichkeit von Belägen bestehen zwar standardisierte Verfahren, Prüfergebnisse zu feinstaub-mindernden Belägen anhand dieser Verfahren jedoch nur in Ausnahmefällen. Diese Situation lässt keine verhältnis-skalierte quantitative Bewertung feinstaub-mindernder Strassenbeläge untereinander und gegenüber herkömmlichen zu. Wie in dieser Studie zumindest eine grobe, weil mit Unsicherheiten behaftete, ordinal-skalierte Quantifizierung erreicht werden konnte, wird in Kapitel 5 aufgezeigt.

Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Aus den hier aufgezeigten Grenzen und Lücken des aktuellen Stands der Forschung und Technik zur Feinstaub-Minderung durch spezielle Strassenbeläge kann zwar grosser Forschungs- und Entwicklungsbedarf abgeleitet werden. Angesichts der begrenzten öffentlichen Mittel stellt sich jedoch die Frage, wie gross das Potenzial spezieller Strassenbeläge zur Feinstaub-Minderung im Vergleich zu alternativen Massnahmen im Strassenraum ist wie etwa Russfilter für Dieselfahrzeuge, verbesserte Motorentchnik, Förderung des öffentlichen Personennahverkehrs, Verkehrsführung, Verkehrsverflüssigung durch angepasstes Verkehrsmanagement oder günstigere bauliche Geometrie des Strassenraums (siehe hierzu auch Kapitel 7.3).

5 Analyse und Bewertung der Wirksamkeit

5.1 Methode der Wirksamkeitsanalyse und -bewertung

5.1.1 Selektion zu berücksichtigender Technologien für Wirksamkeit

Während im Stand der Forschung und Technik für den gesamten Strassenraum Technologien zur Minderung von Feinstaub oder seiner Vorläufgase aufgezeigt worden waren, wurde die Wirksamkeit (in der Literatur auch als Effizienz, Abbaurate o. ä. bezeichnet) nur für Strassenbeläge analysiert und bewertet. Da die meisten Strassenbelagsdecken in der Schweiz aus Asphalt bestehen, lag der Fokus der Wirksamkeitsanalyse und -bewertung auf dieser Belagsart mit drei Vierteln aller hier analysierten Technologien. Technologien, die auf einer anderen Belagsart beruhen, jedoch für die Feinstaub-Minderung bedeutend sind, wurden ebenfalls berücksichtigt. Unabhängig von der Belagsart wurden nur solche Technologien in die Betrachtung einbezogen, für welche zum Zeitpunkt dieser Machbarkeitsstudie in der Literatur Resultate zur Wirksamkeit vorlagen. Die Wirksamkeit wurde aus insg. 20 Datensätzen verschiedener Studien für acht unterschiedliche Technologien beziehungsweise Varianten analysiert und bewertet (Tab. 1).

Tab. 1 Übersicht über Technologien und deren Varianten, für welche anhand von Daten verschiedener Studien die Wirksamkeit der Minderung von Feinstaub beziehungsweise seiner Vorläufgase analysiert und bewertet wurde. A = Asphalt, Bs = Beschichtung, BsA = Beschichtung auf Asphalt, B = Beton, BsB = Beschichtung auf Beton, Em = Einmischung, IkV = Inkorporation in Beton-Verbundsteine, Ik = Inkorporation, IkA = Inkorporation in Asphalt, IkMA = Inkorporation in Mörtelkörnern als Abstreumaterial auf Asphalt, LRB = Lärm-reduzierende Beläge, V = Beton-Verbundsteine, PA = Offenporiger Asphalt, PKB = Photokatalytische Beläge, TSF = Dünne bituminöse Deckschicht

Gruppe Technologie	Technologie	Variante	Belagsart	Studie	Ansatz	Fälle	Norm
LRB	TSF	-	A	[19]	Labor	3	EN 1097-9:1998 [4]
LRB	PA	-	A	[19]	Labor	4	EN 1097-9:1998 [4]
LRB	PA	-	A	[17]	Feld	1	-
LRB	PA	-	A	[20]	Feld	1	DIN EN 12341:1999-03 [6]
PKB	Bs	BsA	A	[51]	Labor	2	UNI 11247:2007 [7]
PKB	Bs	BsA	A	[52]	Labor	1	ASTMD 5116:1990 [8]
PKB	Bs	BsA	A	[52]	Feld	1	-
PKB	Bs	BsA	A	[36]	Labor	1	UNI 11247:2010 [9]
PKB	Bs	BsA	A	[35]	Labor	1	-
PKB	Bs	BsA	A	[25]	Labor	6	UNI 11247:2010 [9]
PKB	Bs	BsB	B	[53]	Labor	1	ASTMD 5116:1990 [8]
PKB	Bs	BsB	B	[53]	Feld	1	-
PKB	Ik	IkV	P	[42]	Labor	2	ISO 22197-1:2007 [5]
PKB	Ik	IkV	P	[42]	Feld	1	-
PKB	Ik	IkV	P	[45]	Labor	1	ISO 22197-1:2007 [5]
PKB	Ik	IkV	P	[46]	Labor	3	-
PKB	Ik	IkA	A	[35]	Labor	1	-
PKB	Ik	IkMA	A	[32]	Labor	1	ISO 22197-1:2007 [5]
PKB	Em	-	A	[42]	Labor	2	ISO 22197-1:2007 [5]
PKB	Em	-	A	[24]	Labor	1	-

5.1.2 Kriterium für Wirksamkeit bezüglich Feinstaub-Minderung

Um alle Technologien feinstaub-mindernder Strassenbeläge hinsichtlich ihrer Wirksamkeit vergleichen zu können, wurde zunächst nach einem einheitlichen Kriterium beziehungsweise Mass hierfür gesucht. Dabei sollte die Vergleichbarkeit einerseits von Technologien zur direkten vs. indirekten Feinstaubbindung (über Vorläufergase) gewährleistet sein, andererseits derjenigen zur Minderung von Vorläufergasen untereinander.

Vergleichbarkeit direkter und indirekter Feinstaub-Minderung. Da einige Technologien Feinstaub direkt mindern, andere hingegen die Vorläufergase, wurde für einen Vergleich zu ermitteln versucht, welche Menge Feinstaub aus einer definierten Menge an Vorläufergasen entsteht. Da in der Schweiz sekundärer Feinstaub etwa die Hälfte des gesamten Feinstaubes ausmacht (Hüglin et al., 2012 [11]), wurde angenommen, dass die von der EKL (2007) [14] für die Jahre 2000 und 2020 abgeschätzte beziehungsweise prognostizierte Masse emittierten primären anthropogenen Feinstaubes derjenigen sekundären anthropogenen Feinstaubes entspricht. Diese Masse wurde dann für dieselben Jahre auf die abgeschätzten beziehungsweise prognostizierten Emissionen von Feinstaub-Vorläufergasen (EKL, 2007 [14]) bezogen, aus welchen sekundärer Feinstaub entsteht, und somit ein Umwandlungsfaktor berechnet. Dieser Ansatz ist jedoch gemäss Theis & Hüglin (persönliche Kommunikation, 2015 [54]) nicht gültig, da die hier verwendeten Daten, die auf dem Schadstoffinventar EMIS des BAFU basieren, ausschliesslich Emissionen beinhalten, welche auf beziehungsweise über Schweizer Territorium entstanden sind beziehungsweise entstehen werden. Für eine realitätsnahe Abschätzung der auf und über Schweizer Territorium tatsächlich vorhandenen (nicht nur hier entstandenen) Mengen an sekundärem Feinstaub und seiner Vorläufergase wäre die Berücksichtigung ihrer grenzüberschreitenden Flüsse unabdingbar. Entsprechende Daten lagen dem Projektteam zum Zeitpunkt dieser Machbarkeitsstudie jedoch nicht vor und eine Simulation mittels numerischer Modellierung auf europäischer Skala würde den Rahmen des Projekts sprengen. Daher wurde die Wirksamkeit von Technologien, welche Feinstaub direkt, und solchen, welche ihn indirekt über Vorläufergase mindern, jeweils getrennt betrachtet.

Vergleichbarkeit Minderung verschiedener Vorläufergase. Um verschiedene Technologien zur Minderung von Feinstaub-Vorläufergasen vergleichen zu können, schlägt Ifang et al. (2014) [47] vor, deren Wirksamkeit bezüglich mindestens je einer Verbindung der Klassen NO_x (bevorzugt NO_2 anstatt NO) und VOCs (bevorzugt Toluol = Methylbenzol) zu prüfen. Denn die Minderungswirkung einer Technologie kann für Verbindungen aus diesen beiden Klassen sehr unterschiedlich sein. In den meisten bis heute vorliegenden Studien zu dieser Thematik wurde jedoch fast ausschliesslich die Wirksamkeit bezüglich der Minderung von NO untersucht, zum Teil zusätzlich diejenige von NO_2 , und nur vereinzelt diejenige von VOCs. Offenbar wird NO überwiegend als guter Indikator für die Minderungswirkung von Vorläufergasen erachtet. Die Wirksamkeit der verschiedenen Technologien, welche bei den Vorläufergasen ansetzen, wurde in dieser Machbarkeitsstudie daher nur hinsichtlich der Minderung von NO verglichen.

Auswahl eines einheitlichen Kriteriums. In allen hier ausgewerteten experimentellen Studien – sowohl im Labor als auch im Feld - wurde als Zwischenschritt zur Ermittlung der Wirksamkeit die Konzentration von Feinstaub, seiner Vorläufergase oder von Reaktionsprodukten für den zu testenden Belag jeweils mit und ohne feinstaub-mindernder Technologie gemessen. In Laborstudien, wie etwa derjenigen von Hüsken et al. (2009) [42], kann dank eines definierten Volumens, sowie kontrollierter Bedingungen für Strahlung, Luftfeuchtigkeit und Luftstrom eine Flussdichte des Abbaus von Feinstaub oder seiner Vorläufergase als Masse pro beeinflusstem Luftvolumen über einer reaktiven Oberfläche sowie pro Zeit [$\text{mg}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$] bestimmt werden. Im Freien hingegen ist das beeinflusste Luftvolumen kaum abgrenzbar. Speziell für den photokatalytischen NO_x -Abbau lösten Lammering et al. (2015) [41] dieses Problem, indem sie die NO_3^- -Konzentration im abfliessenden Oberflächenwasser eines aktiven und eines konventionellen Belags definierter Fläche massen. Damit lässt sich stöchiometrisch die umgesetzte Menge an NO_x bestimmen.

Um bei der Bestimmung der Wirksamkeit photokatalytischer Oberflächen im Labor unabhängig von der Geometrie des Photoreaktors zu werden, verwendeten Ifang et al. (2014)

[47] einen dimensionslosen Aufnahmekoeffizienten. Dieser gilt für Reaktionen mit einer Kinetik erster Ordnung, was für die relevanten Konzentrationen in der Atmosphäre zutrifft. Er ist definiert als Verhältnis der Anzahl Kollisionen von Gasteilchen des Edukts, die zu einer Reaktion führen, zur gesamten Anzahl von Kollisionen mit der reaktiven Oberfläche. Die Werte liegen typischerweise zwischen 10^{-5} und 10^{-4} . Das Konzept des Aufnahmekoeffizienten ist jedoch in Felduntersuchungen nicht anwendbar.

Ein weiteres dimensionsloses Mass für die Wirksamkeit der Minderung von Feinstaub oder seiner Vorläufgase ist das Verhältnis zwischen der Konzentrationsverringerung eines Schadstoffs [ppmv, $\mu\text{g}/\text{m}^3$ oder mol/m^3] durch die zu testende, spezielle Oberfläche und der Konzentration der entsprechenden Kontroll-Oberfläche ohne Behandlung, meist angegeben in %. Dabei können statt Konzentrationen auch die in der Literatur häufig angegebenen Emissionsfaktoren (zum Beispiel Gehrig et al., 2010 [17]) eingesetzt werden. Angesichts des überwiegenden Anteils an Feld-, aber auch Laborstudien, welche die Minderungswirkung von Feinstaub beziehungsweise seiner Vorläufgase mit diesem prozentualen Mass ausdrücken, scheint sich dieses etabliert zu haben (zum Beispiel Hüsken et al., 2009 [42]; Veisten & Akhtar, 2011 [19]; Carneiro et al., 2013 [35]). Aus diesem Grund, und da es einerseits sowohl für Feld- als auch Laboruntersuchungen, und andererseits gleichermassen für Technologien der direkten wie indirekten Feinstaub-Minderung geeignet ist, wurde es auch in der vorliegenden Machbarkeitsstudie als Kriterium für die Wirksamkeit verwandt. Bei diesen Prozentangaben für die Wirksamkeit ist zu beachten, dass die NO-/Feinstaub-Minderung räumlich eng beschränkt ist - im Labor auf das Volumen der Reaktorzelle, im Feld auf die Messstelle in Strassennähe. Sie erlauben keineswegs Aussagen für grössere Schichten der Atmosphäre wie etwa die gesamte Troposphäre (bis ca. 10 km Höhe).

5.1.3 Einflussfaktoren der Wirksamkeit

Die Wirksamkeit der Minderung von Feinstaub beziehungsweise seiner Vorläufgase hängt nicht nur von der Technologie beziehungsweise der Variante selbst ab, sondern von weiteren, davon unabhängigen Einflussfaktoren. Diese können unterteilt werden in atmosphärische Bedingungen, Belagsparameter und Messverfahren. Die in den einzelnen Studien angegebenen Werte für die Wirksamkeit beruhen meist auf uneinheitlichen Bedingungen, sodass die verschiedenen Technologien nicht direkt verglichen werden können. Um diesen Vergleich zu ermöglichen, mussten zunächst die Einflüsse der massgeblichen Faktoren aus Daten der Literatur extrahiert und als Gleichungen formuliert werden. Für den Einfluss der Strahlung und der relativen Luftfeuchte konnten der Literatur direkt Gleichungen entnommen werden. Hingegen lagen zum Einfluss des Alters auf die Wirksamkeit von offenporigen Belägen und photokatalytischen mit inkorporiertem Titandioxid keine Daten vor, aus denen eine Gleichung hätte abgeleitet werden können. Daher und aufgrund logischer Schlussfolgerungen (siehe unten) wurde eine konstante Wirksamkeit angenommen. Für die Wirksamkeit in Abhängigkeit der übrigen Einflussfaktoren konnte anhand publizierter Daten je eine Gleichung ermittelt werden. Anhand dieser Gleichungen liessen sich dann die für die einzelnen Technologien angegebenen Wirksamkeiten normalisieren (Kapitel 5.1.4). In Tab. 2 ist zusammengestellt, wie die einzelnen Faktoren, die in dieser Studie berücksichtigt werden konnten, die Wirksamkeit beeinflussen.

Während die Wirksamkeit photokatalytischer Beläge von einer Vielzahl von Einflussfaktoren abhängt, wird diejenige lärm-reduzierender Beläge nur von vier beeinflusst (Tab. 2). Wie die Gleichungen zeigen, sind die meisten der Zusammenhänge nicht-linear.

Tab. 2 Einfluss relevanter Faktoren auf die Wirksamkeit der Minderung von Feinstaub beziehungsweise seiner Vorläuforgase. Die Gleichungen für den Einfluss der Strahlung und der relativen Luftfeuchte konnten direkt der Literatur entnommen werden. Zum Einfluss des Alters lagen für PA- und Ik-Beläge keine Daten aus der Literatur vor. Daher und aufgrund logischer Schlussfolgerungen (siehe Text) wird eine konstante Wirksamkeit angenommen. Alle anderen Gleichungen wurden durch Regressionen mit Daten aus der Literatur abgeleitet. BsA= Beschichtung von Asphalt, E = Wirksamkeit, EmMA = Einmischung von Mörtelsuspension in offenporigen Asphalt, +Δf = Zunahme Einflussfaktor, IkA = Inkorporation in Asphalt, IkMA = Inkorporation in Mörtelkörner als Abstreumaterial auf Asphalt, IkV = Inkorporation in Beton-Verbundsteine, LRB = Lärm-reduzierende Beläge, PA = offenporiger Asphalt, PKB = Photokatalytische Beläge, R²= Bestimmtheitsmass, Index_m = Mittelwert über Nutzungsdauer, Index_{neu} = Wert direkt nach Belagseinbau, Index_{ref} = Referenzwert, Index_{sp} = spezifischer Wert, ÜR = Anzahl Überrollungen, ^{*)} nur für Felddaten relevant, ^{**) Anatas-Kristallgitter von Titandioxid mit Kohlenstoff (C) dotiert.}

Einflussfaktor f	Symbol	Einheit	Gruppe Technologie	Technologie/ Variante	Gleichung	ΔE für +Δf	R ²	Studie
<i>Atmosphärische Bedingungen</i>								
Strahlung	R	[W/m ²]	PKB	-	$E=8.583 \cdot R^{0.431}$	▲	0.998	[42]
Rel. Luftfeuchte	RH	[%]	PKB	-	$E=-0.251 \cdot RH+33.7$	▼	0.990	[42]
Niederschlag ^{*)}	P	[mm/a]	LRB	PA	$E_{ref}=P_{ref}/P_{sp} \cdot E_{sp}$	▲	-	[20]
Luftstrom	Q	[l/min]	PKB	-	$E=86.618 \cdot e^{-0.276 \cdot Q}$	▼	0.998	[42]
Windgeschwindigkeit ^{*)}	v	[m/s]	PKB	-	$E=28.23 \cdot e^{-0.752 \cdot v}$	▼	0.975	[55]
Ausgangskonzentration NO	c	[ppbv]	PKB	-	$E=-9 \cdot 10^{-8} \cdot c^3+2 \cdot 10^{-4} \cdot c^2-0.1823 \cdot c+84.468$	▼	1.000	[42]
<i>Belagsparameter</i>								
Alter	A	[a]	LRB	PA	$E_m=E_{neu}=\text{konstant}$	▶	-	-
		[ÜR]	PKB	Bs, Em	$E_m=0.835 \cdot E_{neu}$	▼ (▲)	-	[36]
			PKB	Ik	$E_m=E_{neu}=\text{konstant}$	▶	-	-
Flächendichte TiO ₂ AD		[g/m ²]	PKB	BsA	$E=34.438 \cdot AD^{0.115}$	▲	1.000	[35]
				IkV	$E=0.0556 \cdot AD+1.5513$	▲	0.995	[42]
				IkA	$E=19.888 \cdot AD^{0.1043}$	▲	1.000	[35]
				IkMA	$E=1.1175 \cdot AD^{0.477}$	▲	0.953	[28]
				EmMA	$E=0.9823 \cdot AD^{0.7585}$	▲	1.000	[42]
				EmMA	$E=0.0147 \cdot AD$	▲	0.968	[24]
C-Dotierung ^{**))}	C	[-]	PKB	-	$E_c=1.58 \cdot E_0$	▲	-	[24]
Einsatz Salz	Sz	[-]	PKB	-	$E_{Sz}=0.6 \cdot E_0$	▼	-	[36]
Einsatz Sole	So	[-]	PKB	-	$E_{So}=0.22 \cdot E_0$	▼	-	[36]
Einsatz Sand	Sd	[-]	PKB	-	$E_{Sd}=0.84 \cdot E_0$	▶	-	[36]
<i>Messverfahren</i>								
Distanz Belag-Messpunkt ^{*)}	d	[m]	PKB, LRB	-	$E=10.063 \cdot d^{-1.42}$	▼	0.994	[55]
Labor vs. Feld	L/F	[-]	LRB	PA	$E_F=0.43 \cdot E_L$	▼	-	[19] [17] [20]
			PKB	Bs	$E_F=0.027 \cdot E_L$	▼	-	[52]
			PKB	Ik, Em	$E_F=0.07 \cdot E_L$	▼	-	[42]
Tag vs. Tag+Nacht ^{*)}	T/TN	[-]	PKB	-	$E_{TN}=0.5 \cdot E_T$	▼	-	[26]

Atmosphärische Parameter. Einen starken Einfluss haben atmosphärische Parameter. Je grösser die Intensität der UV-Strahlung, desto grösser der Umsatz photokatalytischer Reaktionen (Hüsken et al., 2009 [42]). Demgegenüber tritt Wasserdampf mit den abzubauenen NO_x -Molekülen in Konkurrenz und reduziert dadurch die Wirksamkeit [42]. Wirksamkeitsmindernd ist auch eine Erhöhung des Luftstroms beziehungsweise der Windgeschwindigkeit, denn dadurch wird die Kontaktdauer und -wahrscheinlichkeit zwischen NO_x -Molekülen und dem photokatalytisch aktiven Belag verringert [42]. Zudem sinkt die Kontaktwahrscheinlichkeit und damit die Wirksamkeit, je höher die NO_x -Konzentration, das heisst je stärker die Luft verunreinigt ist [42]. Da das Prinzip der Feinstaub-Minderung durch lärm-reduzierende Beläge auf der Auswaschung mit dem Regen beruht (Ropertz et al., 2010 [20]), steigt die Wirksamkeit dieser Technologie mit zunehmendem Jahresniederschlag.

Belagsparameter. Nach aktuellem Wissensstand ist nicht bekannt, ob die Wirksamkeit offenerporiger Asphalte hinsichtlich der Feinstaub-Minderung vom Alter abhängig ist. Eine Abhängigkeit analog zur Verringerung der Lärm-Minderungswirkung mit der Zeit anzunehmen, wäre aufgrund des unterschiedlichen Wirkungsprinzips der Feinstaub- und Lärm-Minderung nicht sinnvoll. Denn während zur Lärm-Minderung die verdrängte Luft schnell in die Porenkanäle des offenerporigen Asphalts ausweichen können muss und eine Verschmutzung daher die Wirksamkeit verringert, funktioniert die Feinstaub-Auswaschung auch bei langsamerer Infiltration des mit Feinstaubpartikeln befrachteten Regenwassers. Mangels Untersuchungen und aufgrund der angeführten Argumentation wird die Wirksamkeit der Feinstaub-Minderung offenerporiger Asphalte in dieser Studie als konstant angenommen. Unter den photokatalytischen Strassenbelägen ist die Abhängigkeit der Wirksamkeit vom Alter für die einzelnen Technologien unterschiedlich. Die photokatalytische Beschichtung von Fahrbahnbelägen wird während der ersten 2'500 Überrollungen bis auf die tiefer liegenden Mulden abgefahren, die von den Rädern nicht erfasst werden (Brovelli & Crispino, 2013 [36]). Deshalb, so die Autoren, nimmt die Wirksamkeit bis zu diesem Stadium deutlich (circa 10 %) ab und bleibt danach etwa konstant. Nach 10'000 Überrollungen ergibt sich so ein Mittelwert von etwa 84 % des Ausgangswerts der Wirksamkeit. Eine allfällige Verzögerung der einsetzenden Wirkung durch einen Bindemittelfilm ist dabei aufgrund fehlender Angaben nicht berücksichtigt. Bei Vermörtelungsbelägen mit eingemischtem TiO_2 -haltigem Mörtel kann eine ähnliche mittlere Wirksamkeit angenommen werden, da auch hier nach Oberflächenabrasion durch Befahrung nur in Mulden zwischen den Körnern des Asphalts photokatalytisch aktive Flächen mit Mörtel verbleiben. Für Beläge mit inkorporierten TiO_2 -Nanopartikeln kann von einer gleichbleibenden Wirksamkeit ausgegangen werden, da bei fortschreitender Abnutzung des Belags immer wieder neue TiO_2 -Nanopartikel freigelegt werden und an die Oberfläche treten.

Bei photokatalytischen Belägen lässt sich die Wirksamkeit des NO_x - beziehungsweise NO_x -Abbaus durch die Erhöhung der Flächendichte an TiO_2 steigern (Tab. 2). Der Zusammenhang variiert zwischen den technologischen Varianten und Studien etwas, ist aber tendenziell gleich (Crispino et al., 2009 [24]; Wang et al., 2014 [28]; Carneiro et al., 2013 [35]; Hüsken et al., 2009 [42]). Zudem wird die Wirksamkeit gemäss der letztgenannten Autoren [42] auch von der Feinheit des TiO_2 -Pulvers beziehungsweise der TiO_2 -Partikelgrösse beeinflusst, was jedoch in dieser Studie mangels Angaben in der Literatur nicht berücksichtigt werden konnte. Er wird in der Literatur durch lineare oder Wurzelfunktionen beschrieben. Wird das zu Nanopartikeln verarbeitete TiO_2 in der Kristallform Anatase mit Kohlenstoff (C) dotiert, lässt sich die Obergrenze des nutzbaren Wellenlängenspektrums von 388 nm auf 535 nm verschieben (Crispino et al., 2009 [24]). Gemäss den Autoren erhöht sich dadurch die Wirksamkeit um über die Hälfte. Brovelli & Crispino (2013) [36] zeigten, dass die Wirksamkeit des photokatalytischen NO_x -Abbaus durch Auftaumittel im Winterdienst stark reduziert wird, 40 % durch Streusalz und fast 80 % durch Solelösung. Beim Einsatz von Sand zur Erhöhung der Griffbarkeit des Belags wird die Wirksamkeit hingegen kaum beeinträchtigt (Tab. 2).

Messverfahren. Schliesslich hängt die Wirksamkeit auch davon ab, wo und wie sie gemessen wird. So nimmt die Wirksamkeit mit zunehmendem Abstand von der aktiven Belagsoberfläche überproportional stark ab, wie Tischer & Herrchen (2010) [55] für photokatalytische Fahrbahnen zeigten (Tab. 2). Ein entsprechender Zusammenhang für lärm-reduzierende Beläge konnte in der Literatur nicht gefunden werden. Da jedoch für diese

Abhängigkeit nicht die Reduktionsmechanismen von Feinstaub oder NO_x , sondern vielmehr Prozesse der bodennahen Atmosphäre als massgebend erachtet werden, wurde die angegebene Gleichung von [55] auch für lärm-reduzierende Beläge angenommen. Für dieselben Technologien beziehungsweise deren Varianten werden im Labor üblicherweise deutlich höhere Wirksamkeiten gemessen als bei Untersuchungen draussen im Feld. Dieser Unterschied lässt sich mit den idealisierten und kontrollierten Versuchsbedingungen im Labor erklären. Dennoch sind letztlich Messungen im Freien von grösserer Aussagekraft für reale Verhältnisse. Bei offenporigem Asphalt sinkt die Wirksamkeit im Feld auf weniger als die Hälfte derjenigen im Labor, wie aus Daten von Veisten & Akhtar (2011) [19], Gehrig et al. (2010) [17] und Ropertz et al. (2010) [20] abgeleitet werden konnte (Tab. 2). Noch markanter ist die entsprechende Abnahme bei photokatalytischen Belägen: aus Daten von Hüsken et al. (2009) [42] und Chen & Liu (2010) [52] ergeben sich für Feldmessungen 7 % beziehungsweise 3 % derjenigen Werte im Labor (Tab. 2). Sofern in Feldstudien zu photokatalytischen Belägen lediglich bei Tageslicht gemessen wird, muss gemäss Gallus, Ciuraru et al. (2015) [26] die so bestimmte Wirksamkeit halbiert werden. Denn die Nacht, während der durch die Photokatalyse kein NO_x abgebaut wird, beträgt im jährlichen Mittel 12 von 24 h pro Tag.

5.1.4 Normalisierung der Wirksamkeit

Um die Wirksamkeitsangaben aus der Literatur vergleichen zu können, wurden sie anhand der in Tab. 2 angegebenen Gleichungen auf einheitliche Referenzbedingungen umgerechnet, das heisst normalisiert. Lärm-reduzierende und photokatalytische Beläge wurden dabei aus den oben genannten Gründen separat behandelt, ebenfalls wurde zwischen Labor- und Felddaten unterschieden. Dieser Normalisierung wurden die Referenzwerte in Tab. 3 zugrunde gelegt. Sie liegen jeweils etwa im mittleren Bereich der in der Literatur abgedeckten Wertespektren für Einflussfaktoren beziehungsweise entsprechen den am häufigsten verwendeten Werten. Der Niederschlag pro Jahr orientiert sich am Wert für Bern, die Distanz zwischen Belag und Messpunkt für Felddaten an der Empfehlung von Gallus, Ciuraru et al. (2015) [26] und liegt innerhalb des vom BUWAL (2004) [56] empfohlenen Wertebereichs zwischen 1.5 m und 5 m über Grund (von einer Horizontal-distanz ist hier nicht die Rede).

Die in der Literatur angegebenen, für eine Technologie beziehungsweise Variante und für eine Studie beziehungsweise ein Produkt spezifischen Wirksamkeiten E_{sp} wurden sukzessive für alle Einflussfaktoren f_i mit $i = 1, 2, 3, \dots$ gemäss Tab. 3 normalisiert. Hierzu wurde zunächst die Wirksamkeit $E_{refB}(f_i)$ für den Referenzwert und $E_{spB}(f_i)$ für den spezifischen Wert jedes Einflussfaktors nach den Gleichungen in Tab. 2 berechnet (Index $_B$). Beginnend mit dem in einer Studie als Wirksamkeit angegebenen spezifischen Ausgangswert E_{sp0} berechnet sich die für f_1 normalisierte Wirksamkeit $E_{spN}(f_1)$ als

$$E_{spN}(f_1) = E_{sp0} \cdot \frac{E_{spB}(f_1)}{E_{refB}(f_1)} \quad (1)$$

Die Normalisierung für f_2 erfolgt analog zu Gleichung (1), wobei anstatt des Ausgangswerts E_{sp0} die für f_1 normalisierte Wirksamkeit $E_{spN}(f_1)$ eingesetzt wird:

$$E_{spN}(f_2) = E_{spN}(f_1) \cdot \frac{E_{spB}(f_2)}{E_{refB}(f_2)} \quad (2)$$

Somit lässt sich die sukzessive Normalisierung der Wirksamkeit für die Einflussfaktoren wie folgt formulieren:

$$E_{spN}(f_i) = E_{spN}(f_{i-1}) \cdot \frac{E_{spB}(f_i)}{E_{refB}(f_i)} \quad (3)$$

Lag für eine Einzeluntersuchung j keine Angabe zum Einflussfaktor f_i vor, so wurde die für f_i zu normalisierende Wirksamkeit $E_{spNj}(f_1)$ anhand des Mittelwerts (Index $_m$) der Quotienten $E_{spN}(f_{i-1})/E_{spN}(f_i)$ aus Datensätzen, für welche Angaben zu f_i vorliegen, wie folgt abgeschätzt:

$$E_{spNj}(f_i) = E_{spNj}(f_{i-1}) \cdot \left[\frac{E_{spN}(f_{i-1})}{E_{refN}(f_i)} \right]_m \quad (4)$$

Je nach Streuung der Einzelquotienten $E_{spN}(f_{i-1})/E_{spN}(f_i)$ wurde dabei über eine ganze Technologie gemittelt oder nur über eine Variante. Auf diese Weise konnte für jede Einzeluntersuchung eine nach allen Einflussfaktoren normalisierte Wirksamkeit ermittelt werden, je eine für Labor- und Feldbedingungen.

Tab. 3 Referenzwerte der Einflussfaktoren zur Normalisierung (das heisst Umrechnung auf Referenzwerte) der Wirksamkeitsangaben verschiedener Technologien, Varianten und Studien. E_m = mittlere Wirksamkeit, LRB = Gruppe lärm-reduzierender Belags-Technologien, PKB = Gruppe photokatalytischer Belags-Technologien, ÜR = Anzahl Überrollungen, *) Anatas-Kristallgitter von Titandioxid mit Kohlenstoff (C) dotiert, **) Empfehlung nach Gallus, Ciuraru et al., 2015 [26] und in Einklang mit BUWAL (2004) [56].

Einflussfaktor f _i (i=1, 2, 3, ...)		Symbol	Einheit	Anwendung für Daten von		Gruppe Technologie	
				Labor	Feld	LRB	PKB
Atmosphärische Bedingungen							
1	Strahlung	R	[W/m ²]	x	-	-	10
2	Rel. Luftfeuchte	RH	[%]	x	-	-	50
3	Niederschlag	P	[mm/a]	-	x	1000	-
4	Luftstrom	Q	[l/min]	x	-	-	
5	Windgeschwindigkeit	v	[m/s]	-	x	-	1
6	Ausgangskonzentration NO	c	[ppbv]	x	-	-	1000
Belagsparameter							
7	Alter	A	[ÜR]	x	-	E _m über 10'000 ÜR	
			[a]	-	x	E _m über Lebenszeit	
8	Flächendichte TiO ₂	AD	[g/m ²]	x	-	-	100
9	C-Dotierung ^{*)}	C	[-]	x	-	-	ohne
10	Einsatz Salz	Sz	[-]	x	x	ohne	ohne
11	Einsatz Sole	So	[-]	x	x	ohne	ohne
12	Einsatz Sand	Sd	[-]	x	x	ohne	ohne
Messverfahren							
13	Distanz Belag-Messpunkt	d	[m]	-	x	3 ^{**)}	3 ^{**)}
14	Labor vs. Feld	L/F	[-]	x	x	L und F	L und F
15	Tag vs. Tag+Nacht	T/TN	[-]	-	x	-	TN

5.1.5 Bewertung der Wirksamkeit

Unschärfen. Bei der Bewertung der verschiedenen Technologien und Varianten hinsichtlich ihrer Wirksamkeit, Feinstaub direkt oder indirekt über dessen Vorläufgase zu mindern, musste den zwangsläufigen Unschärfen der vorliegenden Studie in angemessener Weise Rechnung getragen werden, um Fehlschlüssen vorzubeugen. Diese Unschärfen sind auf verschiedene Ursachen zurückzuführen. Die Forschung über Strassenbeläge zur direkten oder indirekten Feinstaub-Minderung ist noch recht jung und die Erkenntnisse

dazu noch eher spärlich und vage. So darf etwa die Aussagekraft der oben aufgezeigten Zusammenhänge zwischen Einflussfaktoren und Wirksamkeit nicht überschätzt werden. Denn einerseits sind die Messgenauigkeiten in den meisten Studien nicht angegeben, andererseits ergeben sich Unschärfen aufgrund des Vergleichs von Wirksamkeiten zwischen den Studien, welchen jeweils unterschiedliche Bedingungen zugrunde liegen, insbesondere im Feld. Zudem konnten die meisten der in Tab. 2 aufgeführten Gleichungen nicht direkt der Literatur entnommen werden, sondern nur aus den publizierten Daten anhand einfacher Kurvenfittings abgeleitet werden. Da zahlreiche Angaben zu Einflussfaktoren fehlten, konnte die Normalisierung in diesen Fällen nur abgeschätzt werden, wie oben dargelegt, was weitere Unsicherheitsquellen birgt. Schliesslich gilt es zu beachten, dass Interaktionen zwischen verschiedenen Einflussfaktoren nicht berücksichtigt werden konnten, da in der Literatur hierzu nur sehr rudimentäre Angaben auffindbar waren. Immerhin ist eine Akkumulierung der Ungenauigkeiten in eine Richtung sehr unwahrscheinlich, da sich die vielen Ungenauigkeiten teilweise kompensieren.

Implikationen für die Bewertung. Aufgrund dieser Unschärfen ist auch die Bewertung der Wirksamkeit unscharf und musste daher grob genug vorgenommen werden, um keine Scheingenauigkeit zu suggerieren. Hierfür wurden die Wirksamkeitswerte der einzelnen Untersuchungen zunächst pro Technologievariante durch Mittelwertbildung aggregiert, jeweils getrennt für Labor- und Felddaten. Dabei wurden vereinzelt Ausreisser ausgeschlossen, welche in den Resultaten ausgewiesen werden. Um bewusst von den numerischen Werten für die Wirksamkeiten zu abstrahieren, wurden in einem weiteren Schritt ordinal-skalierte, kategoriale Klassen gebildet, welche die Bewertung der Wirksamkeit ausdrücken (Tab. 4). Die Klasseneinteilung erfolgte quasilogarithmisch, um Differenzen aufgrund von Unschärfen weniger Gewicht zu geben. Die Wertebereiche der Wirksamkeitsklassen wurden für Feld- gegenüber Labormessungen jeweils um eine Grössenordnung geringer festgelegt. Damit sollte dem Umstand Rechnung getragen werden, dass die Bedingungen im Labor gegenüber dem Feld kontrolliert und idealisiert sind.

Tab. 4 Klassen der normalisierten Wirksamkeit E_N spezieller Strassenbeläge bezüglich der Minderung (negatives Vorzeichen) der Konzentration von Feinstaub oder Stickstoffmonoxid NO.

Bereich E_N Labor [%]	Bereich E_N Feld [%]	Symbol	Bedeutung
$-100 < E_N \leq -50$	$-10 < E_N \leq -5$	L 	Grosse Wirksamkeit
$-50 < E_N \leq -10$	$-5 < E_N \leq -1$	M 	Mittlere Wirksamkeit
$-10 < E_N \leq -5$	$-1 < E_N \leq -0.5$	S 	Kleine Wirksamkeit
$-5 < E_N \leq 0$	$-0.5 < E_N \leq 0$	XS 	Sehr kleine Wirksamkeit
$E_N > 0$	$E_N > 0$	RV 	Umgekehrte Wirkung

5.2 Resultate der Wirksamkeitsanalyse und -bewertung

5.2.1 Quantitative Bewertung nach Klassen

Die normalisierten Wirksamkeiten liegen für Technologien der direkten Reduktion der Feinstaub-Konzentration im Labor etwa zwischen -20 % und +7 % (Feinstaubzunahme) und im Feld etwa zwischen -9 % und +3 % (Tab. 5). Für Technologien der indirekten Feinstaubkonzentrationen-Reduktion via Vorläufgase durch Photokatalyse reicht das Spektrum im Labor von -40 % bis -5 %, im Feld von -2.5 % bis -0.4 %.

Vergleich Labor vs. Feld und direkte vs. indirekte Feinstaub-Minderung. Die Verringerung der betragsmässigen Wirksamkeit vom Labor gegenüber dem Feld ist bei den photokatalytischen Belägen (PKBs) wesentlich stärker (um circa 95 %) als bei den lärm-reduzierenden Belägen (LRBs) mit circa 54 %. Der hier angestellte Vergleich dieser beiden Technologie-Gruppen nach dem Verhältnis von Feld- zu Laborwirksamkeit ist im Gegensatz zu einem direkten Vergleich nach ihren absoluten Wirksamkeiten zulässig. Letz-

terer Vergleich ist jedoch zumindest insofern möglich, als dass bei nominell gleichen Wirksamkeiten von LRBs und PKBs, die effektive Feinstaub-Minderung für PKBs geringer sein muss. Denn durch diese Technologien würde selbst bei 100 %-iger Wirksamkeit nur ein Teil des Feinstaubs verringert, nämlich des sekundären aus Vorläufgasen (beziehungsweise sogar nur derjenigen aus NO). Da offener Asphalt (PA) für die letztlich relevanten Feldbedingungen aufgrund einer deutlich höheren nominellen Wirksamkeit mindestens eine Wirksamkeitsklasse höher liegt als alle PKBs, ist PA auch absolut gesehen die wirksamste Technologie zur Feinstaub-Minderung unter den hier untersuchten. Zu bemerken ist allerdings, dass zwei PA-Beläge, namentlich die von Veisten & Akhtar (2011) [19] untersuchten Varianten SPAC11 und DPAC11/16 (siehe Kapitel 4.2.1) überhaupt keine Minderungswirkung hinsichtlich der Feinstaubkonzentration zeigten im Gegensatz zu den Varianten DPAC8/11 und DPAC11/16x mit 15 % und 25 % im Labor. Die beiden PA-Varianten ohne Wirkung wurden daher von der Mittelwertbildung für PA-Beläge ausgeschlossen. Offenbar wirken sich bereits kleine Abweichungen von den genormten Randbedingungen beim Einbau dieser Beläge negativ auf deren Funktionalität aus, was auch Kocherhans, Hirt & Blaise (2006) [57] hinsichtlich der lärm-reduzierenden Wirkung betonen. Zudem gilt es zu bedenken, dass die hier ausgewiesenen hohen Wirksamkeiten nur auf drei Publikationen abgestützt werden konnten, da zum Zeitpunkt der vorliegenden Machbarkeitsstudie keine zusätzliche Literatur hierzu vorlag. Innerhalb der LRBs zeigten gegenüber den PA-Belägen die dünnen bituminösen Decken (TSF) nicht nur keine Minderungswirkung, sondern erwiesen sich sogar als kontraproduktiv. Denn sie führten zu einer Erhöhung der gemessenen Feinstaubkonzentrationen.

Tab. 5 Normalisierte Wirksamkeit spezieller Strassenbeläge hinsichtlich deren Minderung (negatives Vorzeichen) von Feinstaub (lärm-reduzierende Beläge) oder Stickstoffmonoxid NO (photokatalytische Beläge) für Untersuchungen im Labor (E_{NL}) und Feld (E_{NF}) und deren Bewertung durch Einteilung in Klassen (Definitionen siehe Tab. 4). Diese Angaben sind räumlich eng begrenzt - im Labor auf die Reaktorzone, im Feld auf die Messstelle.

Normalisierte Wirksamkeit E_N		Gruppe Technologie	Lärmreduzierende Strassenbeläge		Photokatalytische Strassenbeläge					
			Dünne bitumin. Deckschicht	Offenporiger Asphalt	Beschichtung mit TiO_2 -Spray		Inkorporation von TiO_2 -Partikeln		Einnischung TiO_2 -Mörtel	
		Variante								
		Belagsart	Asphalt	Asphalt	Asphalt	Beton	Beton-Verbundsteine	Warm Mixing Asphalt	Mörtel-Abstreumaterial	Asphalt
		Code	TSF	PA	BsA	BsB	IkV	IkA	IkMA	EmMA
Labor	E_{NL} [%]		6.7	-20.0	-17.7	-40.0	-9.5	-31.1	-6.0	-4.7
	Standardabweichung		9.4	10.2	8.2	-	4.2	-	-	3.4
	Klasse		RV	M	M	M	S	M	S	XS
Feld	E_{NF} [%]		2.9	-9.3	-0.5	-1.1	-0.8	-2.5	-0.5	-0.4
	Standardabweichung		4.0	4.7	0.2	-	0.3	-	-	0.3
	Klasse		RV	L	XS	M	S	M	XS	XS

Photokatalytische Beläge unter realistischen Bedingungen. Die Feld-Wirksamkeiten der NO-Konzentrationsminderung für die PKBs sind mit durchschnittlich -1 % marginal. Dass diese Werte unter Feldbedingungen durchaus realistisch sind, zeigt der Vergleich mit den Forschungsergebnissen von Gallus, Ciuraru et al. (2015) [26] und Gallus, Akylas et al. (2015) [31]. Sie stellten in einem Tunnel und einer Strassenschlucht mit jeweils photokatalytischen Oberflächen eine Reduktion der NO_x -Konzentration von höchstens 2 % fest, was der Messgenauigkeit entspricht. Dass in anderen Studien meist von viel höheren Wirksamkeiten berichtet wurde, führen Gallus, Ciuraru et al. (2015) [26] darauf zurück, dass für die Einflussfaktoren keine Werte gewählt wurden, welche den städtischen Bedingungen entsprechen. Aus dieser Aussage und den ähnlichen Wirksamkeitswerten für PKBs wie in dieser Machbarkeitsstudie kann geschlossen werden, dass die angenommenen Referenzwerte urbane Verhältnisse realistisch abbilden. Am besten unter den PKBs schneiden die Technologie-Varianten einer Asphaltdecke mit inkorporierten TiO_2 -

Nanopartikeln (IkA) und eines mit TiO₂-Spray beschichteten Beton-Belags (BsB) ab (Tab. 5). Allerdings stützen sich die Wirksamkeitswerte für diese beiden Varianten jeweils nur auf eine Studie, daher gibt es keine Standardabweichungen.

5.2.2 Qualitative Bewertung anhand von Einflussfaktoren

Neben der obigen Bewertung der Technologien nach Klassen hinsichtlich ihrer Wirksamkeit, NO beziehungsweise Feinstaub zu reduzieren, ist auch eine qualitative Bewertung möglich, welche auf den technischen Wirkungsprinzipien sowie den Abhängigkeiten der Wirksamkeit von den atmosphärischen Bedingungen beruht (siehe Kapitel 5.1.3 und Tab. 2). Demnach eignen sich offenporige Asphaltdecken gut für regenreiche Regionen. Besonders günstig sind sie, wenn zu Zeiten grösster Feinstaubbelastung, etwa im Winter bei Inversionswetterlagen, ausreichend Regen fällt, wie zum Beispiel in Bellinzona. Wenn Spitzenwerte der Feinstaubbelastung an einem regenfreien Tag auftreten, könnten PA-Beläge bewässert werden. Photokatalytische Beläge (PKBs) empfehlen sich hingegen für sonnige Regionen oder Städte wie etwa Basel. Die Strahlungsintensität sollte insbesondere im Winter ausreichend gross sein, da aufgrund der dann häufigeren Inversionswetterlagen oft die höchsten Konzentrationen von Feinstaub und seiner Vorläuforgase auftreten. Zudem ist ein trockenes Klima günstig für die Wirksamkeit von PKBs, da bei geringer relativer Luftfeuchtigkeit die Konkurrenz zwischen Wasserdampf und den abzubauenen NO_x-Molekülen an der Katalysatoroberfläche weniger ausgeprägt ist. Dennoch sind ab und zu auftretende Regenereignisse wichtig, um das an der TiO₂-Oberfläche gebildete Nitrat abzuwaschen und dadurch Platz für andockende NO_x-Moleküle zu schaffen. Ansonsten kommt es nach Menzel (mündlich, 2015 [58]) zu einer Übersättigung der TiO₂-Oberfläche. Ungünstig sind jedoch zu hohe NO- und NO_x-Ausgangskonzentrationen wie etwa in Strassenschluchten oder Tunnels (abgesehen von der dort geringen Strahlung), das heisst genau in Situationen, für welche eine Verringerung der Luftbelastung besonders nötig wäre.

5.2.3 Selektion wirksamer Technologien

Von der weiteren Betrachtung werden Technologien beziehungsweise Varianten ausgeschlossen, welche kontraproduktiv sind, das heisst zu einer Zunahme von Feinstaub oder dessen Vorläuforgas NO führen, sowie solche, für welche keine Minderungswirkung nachgewiesen werden konnte. Dies betrifft alle dünnen bituminösen Decken (TSF) sowie die offenporigen Asphalt-Varianten SPAC11 und DPAC11/16 (siehe Kapitel 4.2.1). Die ansonsten sehr wirksamen offenporigen Asphaltdecken, aber auch die photokatalytischen Beläge mit einer deutlich geringeren Wirksamkeit gehen ein in die Machbarkeitsanalyse und -bewertung (Kapitel 6) sowie in die Kosten/Nutzen-Analyse/Bewertung (Kapitel 7).

6 Analyse und Bewertung der technischen Machbarkeit

6.1 Methode der Machbarkeitsanalyse und -bewertung

6.1.1 Selektion relevanter Technologien für Machbarkeit

Die technische Machbarkeit wurde nur für Technologien beziehungsweise deren Varianten analysiert und bewertet, welche sich in Kapitel 5 als wirksam herausstellten. Die unwirksamen und daher auszugrenzenden Technologien/Varianten, sind in Kapitel 5.2.3 ausgewiesen. Hingegen musste bei der Technologie der photokatalytischen Beschichtung von Asphalt-Belägen (BsA, Tab. 5) aufgrund Unterschieden in der technischen Machbarkeit zwischen einer kalten und heissen Methode differenziert werden, was bezüglich der Wirksamkeit aufgrund gleicher Werte nicht nötig war. Bei der kalten Methode (BsAk) wird das TiO₂-haltige Spray auf eine bestehende, vorgängig zu reinigende, kalte Fahrbahn aufgesprüht, bei der heissen Methode (BsAh) auf die neu erstellte, noch heisse Fahrbahn nach dem Walzen (Crispino, Brovelli, Guerrini & Venturini, 2011 [59]).

6.1.2 Kriterien für Machbarkeit

Für die Analyse und Bewertung der Wirksamkeit wurde nur ein Kriterium gesucht, da es speziell um die Minderung von Feinstaub beziehungsweise dessen Vorläuforgasen ging. Hinsichtlich der technischen Machbarkeit hingegen musste naturgemäss eine Vielzahl an Kriterien festgelegt werden, die auch für andere Strassenbeläge relevant sind, um eine breit abgestützte Evaluation zu gewährleisten. Als übergeordnete Kriterien, bezüglich derer die technische Machbarkeit zu analysieren und zu bewerten war, wurden folgende bestimmt:

- Verfahrensschritte
- Fahrbahnbeeinflussung
- Umweltverträglichkeit

Diese übergeordneten Kriterien wurden jeweils in Einzelkriterien differenziert und konkretisiert. Dabei wurde versucht, inhaltliche Überschneidungen zu vermeiden, um grösstmögliche Transparenz der Bewertung zu gewährleisten und nicht Vor- oder Nachteile unter anderer Bezeichnung doppelt aufzuführen. Dennoch kann eine Eigenschaft, etwa die Verwendung eines photokatalytischen Sprays zur Beschichtung einer Fahrbahn, hinsichtlich verschiedener Kriterien bewertet werden, zum Beispiel hinsichtlich des Einflusses auf die Griffigkeit der Fahrbahn, andererseits hinsichtlich der Gefahr einer Grundwasserverschmutzung.

Die folgend aufgeführten Einzelkriterien für die **Verfahrensschritte** orientierten sich an deren chronologischem Ablauf:

- Applikation auf bestehende Fahrbahn - Möglich oder nicht?
- Aufbereitung/Mischgut - Welche Anforderungen und wie aufwändig?
- Einbau - Wie lässt sich dabei Material verarbeiten, wie aufwändig, wie sensibel gegenüber Fehlern/Mängeln?
- Nutzungsunterbruch - Wie lange?
- Aktivierung - Kann evtl. verzögert einsetzende Wirkung aktiviert werden und wie?
- Unterhalt - Welche Arbeiten können anfallen, wie aufwändig sind sie?
- Recycling – Welche Massnahmen sind nötig?

Das übergeordnete Kriterium **Fahrbahnbeeinflussung** umfasst folgende Einzelkriterien:

- Griffigkeit - Wie gross am Anfang und wie veränderlich mit Abnutzung?
- Drainage - Wie funktionsfähig?
- Spurrillenbildung - Wie anfällig dafür?
- Rissbildung/Ausbrüche - Wie wahrscheinlich, unter welchen Bedingungen?
- Tragfähigkeit - Wie widerstandsfähig gegenüber Druck, Zug, Schlägen?

Die **Umweltverträglichkeit** der Technologien/Varianten wurde anhand folgender Einzelkriterien überprüft:

- Lärm - Wie stark?
- Lokalklima/Wasserhaushalt - Wie werden städtische Aufheizung und Versickerung beeinflusst?
- Energie-/Materialaufwand - Wie hoch am Anfang und bezogen auf Zeitspanne?
- Umweltmedien Luft/Wasser/Boden - Welche Schadstoffe belasten sie wie stark?
- Flora/Fauna - Welche Wirkung hat Technologie darauf?

Dabei ist ausdrücklich zu betonen, dass die Minderungswirkung von Feinstaub beziehungsweise seiner Vorläufgase bewusst nicht als Einzelkriterium der Umweltverträglichkeit berücksichtigt wurde. Denn diese Wirkung ist das Hauptthema der gesamten Studie und wurde bereits viel detaillierter als die übrigen Einzelkriterien analysiert und bewertet.

6.1.3 Referenz für Machbarkeit

Die verschiedenen Technologien/Varianten von Strassenbelägen zur Minderung von Feinstaub beziehungsweise seiner Vorläufgase wurden weder absolut nach den oben aufgeführten Einzelkriterien analysiert und bewertet, noch im Vergleich untereinander, sondern jeweils relativ zu einem Referenz-Strassenbelag (Tab. 6). Dieser Vorgehensweise liegt die Überlegung zugrunde, dass zunächst gemäss gegebener Anforderungen, vor allem des Strassenverkehrs, eine geeignete Belagsart ausgewählt wird. In einem weiteren Schritt kann dann erwogen werden, eine mit dieser Belagsart kompatible Feinstaub-/NO-mindernde Technologie zu applizieren. Denn die Feinstaub-Minderung ist bei der Auswahl eines Strassenbelags immer nur eines von vielen Kriterien.

Tab. 6 Referenz-Beläge, im Vergleich zu denen die einzelnen Feinstaub-/NO-mindernden Technologien beziehungsweise Varianten analysiert und bewertet wurden.

Gruppe Technologie	Lärmred. Strassenbeläge	Photokatalytische Strassenbeläge						
Technologie	Offenporiger Asphalt	Beschichtung mit TiO ₂ -Spray			Inkorporation von TiO ₂ -Partikeln		Einmischung TiO ₂ -Mörtel	
Variante		Kalte Methode	Heisse Methode			Warm Mixing Asphalt	Mörtel-Abstreumaterial	
Belagsart	Asphalt	Asphalt	Asphalt	Beton	Beton-Verbundsteine	Asphalt	Asphalt	Asphalt
Referenz-belag	Konventioneller Asphalt	Asphalt ohne TiO ₂ -Schicht	Asphalt ohne TiO ₂ -Schicht	Beton ohne TiO ₂ -Schicht	TiO ₂ -freie Beton-Verbundsteine	TiO ₂ -freier Asphalt	Asphalt ohne TiO ₂ -Abstreumaterial	Vermörtelungsbelag
Code	PA	BsAk	BsAh	BsB	IkV	IkA	IkMA	EmMA

Die Machbarkeit bezüglich der beiden Einzelkriterien „Applikation auf bestehende Fahrbahn“ und „Aktivierung“ (siehe Kapitel 6.1.2) lässt sich allerdings nicht auf einen jeweiligen Referenz-Belag beziehen. Für diese Einzelkriterien wurde die Machbarkeit der einzelnen Technologien/Varianten stattdessen im Vergleich untereinander bewertet.

6.1.4 Qualitative Analyse als Grundlage für Bewertung

Um die Machbarkeit der verschiedenen Technologien beziehungsweise Varianten bezüglich der Einzelkriterien relativ zu den jeweiligen Referenz-Belägen bewerten zu können, mussten sie zunächst bezüglich derselben Kriterien anhand von inhaltlichen Informationen sowie eigenen Überlegungen und Schlussfolgerungen analysiert werden. Die hierfür verwendeten Informationen waren grösstenteils qualitativ, oft jedoch gestützt auf quantitative Untersuchungen und Werte, und basierten überwiegend auf Fachliteratur, teilweise auch auf Einschätzungen von Experten aus Wissenschaft und Wirtschaft.

6.1.5 Semi-quantitative Bewertung nach Einzelkriterien mit Punkten

Zur Bewertung wurde jeweils anhand der Analyse (Kapitel 6.1.4) die Frage beantwortet, ob sich durch die Anwendung einer Technologie/Variante auf den Referenz-Belag die Machbarkeit bezüglich des betrachteten Einzelkriteriums verbessert oder verschlechtert. Hierfür wurden Punkte gemäss der Skala in Tab. 7 vergeben und die Bewertung jeweils argumentativ begründet. Da der Nullpunkt nicht willkürlich, sondern sachlich begründbar ist, kann diese Skala oberhalb der Ordinalskala angesiedelt werden, auch wenn das Kriterium für eine Intervallskala (gleiche Werte-Intervalle entsprechen inhaltlich gleich grossen Unterschieden) nicht ganz erfüllt sind. Ähnlich wie bei Schulnoten können daher Mittelwerte gebildet werden, wenn im Bewusstsein behalten wird, dass keine volle Intervallskala vorliegt, und die so berechneten Resultate entsprechend vorsichtig interpretiert werden.

Tab. 7 Punkte-Skala zur Machbarkeitsbewertung der Technologien/Varianten bezüglich eines Einzelkriteriums im Vergleich zum jeweiligen Referenz-Belag (Tab. 6) mit Punkten.

Punkte zur Bewertung	-2	-1	0	1	2
Bedeutung	deutlich schlechter als Referenz	etwas schlechter als Referenz	etwa gleich wie Referenz	etwas besser als Referenz	deutlich besser als Referenz

Falls für eine Technologie/Variante die „Applikation auf bestehende Fahrbahn“ möglich ist, wurden bezüglich dieses Einzelkriteriums zwei Pluspunkte (2) vergeben, falls es nicht möglich ist, zwei Minuspunkte (-2), und falls unter Einschränkungen möglich, kein Punkt (0). Bei der „Aktivierung“ als zweitem Einzelkriterium, bezüglich dessen kein Bezug auf einen Referenz-Belag möglich ist, wurde analog verfahren: falls eine Aktivierung zur Entfaltung der Minderungswirkung von Feinstaub beziehungsweise NO für eine Technologie/Variante nicht nötig ist, wurden zwei Pluspunkte (2) vergeben, falls sie nicht möglich ist, zwei Minuspunkte (-2), und falls mit Zusatzaufwand möglich, kein Punkt (0).

6.1.6 Ermittlung Machbarkeit gesamt und für übergeordnete Kriterien

Um eine Aussage zur Machbarkeit gesamt, das heisst über alle Einzelkriterien zu erhalten, wurde für die einzelnen Technologien/Varianten jeweils der Mittelwert aus allen vergebenen Punkten ermittelt. Dieses Vorgehen bedeutet, dass alle 17 Einzelkriterien gleich gewichtet wurden, nämlich jeweils mit 1/17. Je nach Situation und Anforderungen, für die eine Feinstaub-/NO-mindernde Strasse geplant wird, kann eine unterschiedliche Gewichtung der Einzelkriterien sinnvoll und begründbar sein. In der Berechnungstabelle für die Machbarkeit, die im Rahmen dieser Studie erstellt wurde und als Anhang im Internet kostenlos zur Verfügung steht unter <http://www.mobilityplatform.ch>, lässt sich die Gewichtung für die Einzelkriterien einfach ändern. Dabei muss darauf geachtet werden, dass die Summe aller Gewichte immer genau 1 ergibt. Für eine Technologie/Variante wird die Punktzahl jedes Einzelkriteriums mit dessen Gewicht multipliziert und die so entstehenden Produkte über alle Einzelkriterien aufaddiert. Da keine vollwertige Intervallskala vorliegt, wird der so ermittelte Wert für die Gesamt-Machbarkeit nur als gerundete ganze Zahl angegeben, die gemäss der Skala in Tab. 7 eine klare Bedeutung hat.

Analog zur Ermittlung der Gesamt-Machbarkeit lässt sich auch diejenige für die übergeordneten Kriterien „Verfahrensschritte“, „Fahrbahnbeeinflussung“ und „Umweltverträglichkeit“ ermitteln.

lichkeit“ bestimmen. Die Summe der Produkte aus den Punkten und Gewichten der Einzelkriterien muss jedoch zusätzlich durch das Gesamtgewicht dieses übergeordneten Kriteriums dividiert werden. Dieses Gesamtgewicht ist die Summe der Gewichte der Einzelkriterien, die in diesem übergeordneten Kriterium zusammengefasst sind. Der so ermittelte Wert für die Machbarkeit bezüglich dieses übergeordneten Kriteriums ist wieder auf eine ganze Zahl zu runden, sodass ihr gemäss der Skala in Tab. 7 eine klare Bedeutung zugeordnet werden kann.

6.2 Resultate der Machbarkeitsanalyse und -bewertung

6.2.1 Übersicht der Resultate

Die Resultate der Machbarkeitsanalyse und -bewertung sind in Tab. 8 als Übersicht zusammengestellt. In den folgenden Unterkapiteln, je eines für die übergeordneten Kriterien (Verfahrensschritte, Fahrbahnbeeinflussung und Umweltverträglichkeit), sowie für die technische Machbarkeit gesamt, werden die Bewertungen im Detail begründet. Dabei wird jeweils Bezug auf Tab. 8 genommen, welcher auch die Codes als Abkürzung für die verschiedenen Technologien und Varianten zu entnehmen sind.

6.2.2 Machbarkeit bezüglich Verfahrensschritten

Applikation auf bestehende Fahrbahn. Drei der auf die Machbarkeit untersuchten Technologien/Varianten (BsAk, BsB und IkMA) lassen sich auf eine bestehende Fahrbahn applizieren, vier davon (PA, BsAh, IkV und IkA) nur auf eine neu erstellte (Tab. 8). Die Technologie EmMA kann nur auf bestehende offenporige Asphalt-Beläge angewandt werden.

Aufbereitung/Mischgut. Wie bei konventionellen Asphalt-Belägen als Referenz sind auch bei PA-Belägen bereits bei der Aufbereitung des Mischguts die vorgeschriebenen Qualitätsansprüche einzuhalten, um die volle Funktionalität gewährleisten zu können. So muss die Mischguttemperatur 140 - 170 °C betragen (Böhm, Breitbach, Root & Wallraabenstein, 2013 [60]), es sollte nur felsgebrochener Hartsplitt mit einem PSV-Wert ≥ 54 zum Einsatz kommen, und nur beste Bindemittel (zum Beispiel mit Elastomer, Typ E) verwendet werden, um Kornausbrüche zu verhindern [57]. Für Beläge mit photokatalytischer Beschichtung (BsAk, BsAh und BsB) muss eine TiO_2 - und Bindemittel-haltige Lösung oder Emulsion zum Spritzen hergestellt werden (Crispino et al., 2011 [59]). Dazu bietet sich ein Hochgeschwindigkeitsmischer an (Chen & Chu, 2011 [53]). Wird diese Technologie auf Asphalt (Varianten BsAk und BsAh) angewendet, muss ein pH-Wert von 8 eingehalten werden, da im sauren Milieu die Gefahr besteht, dass durch die Photokatalyse die bituminösen Bestandteile des Asphalts und damit die ganze Belagsdecke zerstört wird (Carneiro et al., 2013 [35]). Bei der Applikation auf eine bestehende Asphaltdecke (BsAk) muss diese zuvor zusätzlich gereinigt werden (Crispino et al., 2011 [59]). Bei IkV-Belägen ist kein zusätzlicher Aufbereitungsaufwand gegenüber TiO_2 -freien Beton-Verbundsteinen nötig. Zur Materialaufbereitung für IkA-Beläge müssen dem Asphalt-Mischgut TiO_2 -Nanopartikel als Zuschlagsstoff möglichst homogen beigemischt werden [35]. Die Aufbereitung des photokatalytischen Abstreumaterials für die IkMA-Technologie-Variante ist aufwändig. Zunächst muss TiO_2 -haltiger Mörtel mit 38 % der Sand-Fraktion 0.2 - 0.4 mm und 62 % der Fraktion 0.8 - 1.18 mm hergestellt werden (Wang et al., 2014 [28]). Der Mörtel wird dann in Körner der Klasse 2/4 mm gebrochen und mit schlag- und verschleissresistenten Diabaskörnern der Klasse 4/5 mm im Verhältnis 1/1 gemischt [28]. Für die EmMA-Technologie muss lediglich dem Mörtel TiO_2 beigemischt werden.

Tab. 8 Übersicht Machbarkeitsbewertung aller selektierten Technologien/Varianten im Vergleich zum jeweiligen Referenz-Belag. Skala Bewertungspunkte siehe Tab. 7. ^{*)} Bewertung nicht relativ zu Referenz-Belag, sondern zu anderen Technologien/Varianten.

Bewertungskriterien		Gruppe Technologie	Lärmred. Strassenbeläge	Photokatalytische Strassenbeläge																
Kriteriengruppe	Gewichtung	Technologie	Offenporiger Asphalt	Beschichtung mit TiO ₂ -Spray					Inkorporation von TiO ₂ -Partikeln				Einmischung TiO ₂ -Mörtel							
		Variante		Kalte Methode		Heisse Methode				Warm Mixing Asphalt	Mörtel-Abstreumaterial									
				Asphalt	Asphalt	Asphalt							Beton	Beton-Verbundsteine	Asphalt	Asphalt	Asphalt			
				Referenz-belag	Konventioneller Asphalt	Asphalt ohne TiO ₂ -Schicht							Asphalt ohne TiO ₂ -Schicht	Beton ohne TiO ₂ -Schicht	TiO ₂ -freie Beton-Verbundsteine	TiO ₂ -freier Asphalt	Asphalt ohne TiO ₂ -Abstreumaterial	Vermörtelungsbelag		
				Code	PA	BsAk							BsAh	BsB	IkV	IkA	IkMA	EmMA		
Verfahrensschritte	7/17		etwa gleich	0	etwas schlechter	-1	etwas schlechter	-1	etwas schlechter	-1	etwas schlechter	-1	etwas schlechter	-1						
Applikation auf bestehende Fahrbahn ^{*)}	1/17		nicht möglich	-2	möglich	2	nicht möglich	-2	möglich	2	nicht möglich	-2	möglich	2	nur auf PA	0				
Aufbereitung/ Mischgut	1/17		unv. erändert	0	Mischung Spray pH8; Reinigung	-2	Mischung Spray pH8	-1	Mischung Spray (pH egal)	-1	Lieferung fertige Pflastersteine	0	Beimischung TiO ₂ in Asphalt	-1	Herstellen spez. Abstreumaterial	-2	Mischung spez. Mörtel	-1		
Einbau	1/17		empfindlicher	-1	heikel (Asphalt-degradation mgl.)	-2	heikel (Asphalt-degradation mgl.)	-2	einfach; kleiner Mehraufwand	-1	kein Mehraufwand	0	einfach; Asphalt-degrad. mgl.	-2	aufw. ändig. v. a. Trennschicht	-2	kürzer verarbeitbar; Tex tur nötig	-2		
Nutzungsunterbruch	1/17		unv. erändert	0	einige Stunden zusätzlich	-1	keine Verzögerung	0	einige Std. mehr (bei altem Belag)	-1	keine Verzögerung	0	keine Verzögerung	0	einige Std. mehr (bei altem Belag)	-1	3-19 Tage mehr bis Belag fest	-2		
Aktivierung ^{*)}	1/17		nicht nötig	2	verzögert, Sandstrahlen unmgl.	-2	verzögert, Sandstrahlen unmgl.	-2	verzögert, Sandstrahlen unmgl.	-2	durch Sandstrahlen	0	durch Sandstrahlen	0	nicht nötig	2	durch Sandstrahlen	0		
Unterhalt	1/17		aufwändig (Drainage, Salzen)	-2	kein Mehraufwand	0	kein Mehraufwand	0	kein Mehraufwand	0	kein Mehraufwand	0	kein Mehraufwand	0	kein Mehraufwand	0	ev. Trennschicht-Risse flicken	-1	kein Mehraufwand	0
Recycling	1/17		kein Mehraufw., Erfahrung	0	kein Mehraufw., keine Erfahrung	-1	kein Mehraufw., keine Erfahrung	-1	kein Mehraufw., keine Erfahrung	-1	kein Mehraufw., keine Erfahrung	-1	kein Mehraufw., keine Erfahrung	-1	Zusatzaufwand wegen Epoxid	-2	kein Mehraufw., keine Erfahrung	-1		
Fahrbahn-beeinflussung	5/17		etwa gleich	0	etwas schlechter	-1	etwa gleich	0	etwa gleich	0	etwa gleich	0	etwa gleich	0	etwa gleich	0	etwa gleich	0		
Griffigkeit	1/17		trocken –, nass +; anfangs geringer	0	anfangs stark reduziert	-2	anfangs mässig reduziert	-1	anfangs stark reduziert	-2	unverändert	0	unverändert	0	erhöht	1	unverändert	0		
Drainage	1/17		deutlich erhöht	2	geringer (Spray versiegelt)	-1	geringer (Spray versiegelt)	-1	unv. erändert	0	unv. erändert	0	unv. erändert	0	geringer (Epoxid versiegelt, rauer)	-1	unverändert	0		
Spurrillenbildung	1/17		geringer (verformungsärmer)	2	unv. erändert	0	unv. erändert	0	unv. erändert	0	unv. erändert	0	unv. erändert	0	etw. geringer (heller > kälter)	1	etw. verstärkt (red. Festigkeit)	-1		
Rissbildung/ Ausbrüche	1/17		anfälliger (offenporiger Belag)	-2	unv. erändert	0	unv. erändert	0	unv. erändert	0	unv. erändert	0	unv. erändert	0	anfälliger (Temp.-spannungen)	-1	unv. erändert	0		
Tragfähigkeit	1/17		verringert (weniger Feinkorn)	-1	unv. erändert	0	unv. erändert	0	unv. erändert	0	unv. erändert	0	unv. erändert	0	verringert (Mörtelkörner)	-1	verringert, verzögerteres Aushärten	-1		
Umweltverträglichkeit	5/17		etwa gleich	0	etwas schlechter	-1	etwas schlechter	-1	etwas schlechter	-1	etwas schlechter	-1	etwas schlechter	-1	etwas schlechter	-1	etwas schlechter	-1		
Lärm	1/17		deutliche Reduktion	2	unv. erändert	0	unv. erändert	0	unv. erändert	0	unv. erändert	0	unv. erändert	0	unv. erändert	0	unv. erändert	0		
Lokalklima/ Wasserhaushalt	1/17		Abflusssdämpfung > gleichmässiger	2	Abflusskonzentr. (Versiegelung)	-1	Abflusskonzentr. (Versiegelung)	-1	unv. erändert	0	geringere Aufheizung (heller)	1	geringere Aufheizung (heller)	1	geringere Aufheizung (heller)	1	geringere Aufheizung (heller)	1		
Energie-/ Materialaufwand	1/17		erhöht (PA hält kürzer, +Δ Salz)	-2	TiO ₂ -Nanopartikel	-1	TiO ₂ -Nanopartikel	-1	TiO ₂ -Nanopartikel	-1	TiO ₂ -Nanopartikel	-1	TiO ₂ -Nanopartikel	-1	TiO ₂ -Nanopartikel; mehr Treibstoff	-2	TiO ₂ -Nanopartikel	-1		
Umweltmedien Luft/Wasser/Boden	1/17		Filtert Strassenwasser; +Δ Salz	0	NO ₃ ev. weitere Schadstoffe	-2	NO ₃ ev. weitere Schadstoffe	-2	NO ₃ ev. weitere Schadstoffe	-2	NO ₃ ev. weitere Schadstoffe	-2	NO ₃ ev. weitere Schadstoffe	-2	NO ₃ ev. weitere Schadstoffe	-2	NO ₃ ev. weitere Schadstoffe	-2		
Flora & Fauna	1/17		Salz negativ	-1	ökotox. Wirkung (Herst. draussen)	-2	ökotox. Wirkung (Herst. draussen)	-2	ökotox. Wirkung (Herst. draussen)	-2	ökotox. Wirkung (Herst. drinnen)	-1	ökotox. Wirkung (Herst. draussen)	-2	ökotox. Wirkung (Herst. drinnen)	-2	ökotox. Wirkung (Herst. draussen)	-2		
Machbarkeit gesamt	1		etwa gleich	0	etwas schlechter	-1	etwas schlechter	-1	etwas schlechter	-1	etwa gleich	0	etwas schlechter	-1	etwas schlechter	-1	etwas schlechter	-1		

Einbau. PA-Beläge sind beim Einbau gegenüber konventionellen Asphaltdecken als Referenz empfindlicher, das heisst, Abweichungen von den genormten Anforderungen wirken sich stärker auf die Funktionalität der Beläge aus (Angst, Beltzung, Bosshardt, Grolimund & Pestalozzi, 2008 [61]). Eine Silierung des Mischguts sollte vermieden werden, da das Bindemittel ablaufen würde (Böhm et al., 2013 [60]). Das Mischgut sollte am besten in thermoisolierten Fahrzeugen auf die Baustelle transportiert werden und die Zeit zwischen Herstellung und Einbau max. 60 min. betragen (Böhm et al., 2013 [60]). Neben diesen Aspekten der Verarbeitbarkeit muss beim Einbau von PA-Belägen insbesondere darauf geachtet werden, dass eine ausreichend gute Entwässerung unter der Deckschicht gewährleistet ist, wofür k_F -Werte $\geq 5.4 \cdot 10^{-5}$ m/s einzuhalten sind (Schulte, 2004 [62]). Dafür sind Körnungen 0/32 mm oder 0/45 mm geeignet (Böhm et al., 2013 [60]). Bei ungenügendem k_F -Wert des Untergrunds sind künstliche Entwässerungssysteme nötig (Böhm et al., 2013 [60]), bei Brücken spezielle Entwässerungslösungen [57]. Jede Fahrbahn muss auf voller Breite in einem Arbeitsgang erstellt werden, damit keine Längsfugen entstehen, die die Drainage behindern würden [57]. Um Kornausbrüche zu verhindern, muss der Belag mit statischen Glattmantelwalzen > 10 t verdichtet werden [57]. Ausserdem müssen die Einbaubedingungen genau stimmen. So muss die Lufttemperatur $\geq +15$ °C liegen, die Untergrundtemperatur $\geq +10$ °C, und die Mischguttemperatur vor dem Walzen ≥ 140 °C [57]. Bei Regen oder starkem Wind darf wegen zu schneller Abkühlung kein Einbau erfolgen [57]. Nach Böhm et al. (2013) [60] darf keine Hochverdichtung an der Fertigerbohle stattfinden, müssen Randzonen für eine bessere Verbindung der Nähte schonend vorgewärmt werden, und darf die Deckschicht wegen Verstopfungsgefahr der Poren nicht abgestumpft werden. Da das Strassenwasser über den Belag direkt versickert, muss der Grundwasserflurabstand ≥ 2 m betragen (Böhm et al., 2013 [60]).

Die photokatalytische Beschichtung von Fahrbahnen (BsAk, BsAh und BsB) gestaltet sich hingegen einfach. Es muss lediglich die TiO_2 -haltige Lösung oder Emulsion aufgesprüht werden (Venturini & Bacchi, 2009 [51]). Bei der BsAk-Variante erfolgt dieser Schritt nach einer vorgängigen Reinigung, bei der BsAh-Variante nach dem Walzen solange der Asphalt eine Temperatur von > 100 °C hat. Nach dem Besprühen muss die Oberfläche im Falle beider Asphalt-Varianten nochmals gewalzt werden, was bei Beton (BsB) entfällt. Dennoch wurden die Varianten BsAk und BsAh bezüglich des Einbaus mit zwei Minuspunkten gegenüber dem Referenz-Belag bewertet, da beim Einbau die Gefahr der Asphaltdegradation besteht, sofern der pH-Wert nicht genau stimmt (Carneiro et al., 2013 [35]). Dieselbe Gefahr besteht auch bei IkA-Belägen [35], deren Einbau aber keinen Zusatzaufwand gegenüber dem Referenz-Belag mit sich bringt. Klöppner (mündlich, 2015) [63] argumentiert hingegen, dass keine Asphaltdegradation stattfinden könne, da die TiO_2 -Oberflächen in direktem Kontakt mit dem Asphalt kein Licht erhielten, was jedoch Voraussetzung für die Photokatalyse sei. Jedoch wurde zumindest bei in Asphalt inkorporierten Nanopartikeln eine deutliche Beeinträchtigung der physischen Integrität des Asphalts festgestellt [35] und kann daher nicht ausgeschlossen werden. Bei der IkMA-Variante wurde das Problem der möglichen Asphaltdegradation durch eine Trennschicht aus Epoxidharz zwischen der Asphaltoberfläche und dem TiO_2 -haltigen Abstreumaterial gelöst (Wang et al., 2014 [28]). Hingegen ist diese Variante beim Einbau sehr aufwändig, denn es sind nach [28] etliche Schritte notwendig: Auftragen des Bindemittels Epoxidharz, Abstreuen mit Granulat, Aushärtung des Bindemittels, Abtragung überschüssiges Granulat. Zudem besteht noch keine Erfahrung der grossflächigen, gleichmässigen und automatisierten Verteilung von Epoxidharz als Bindemittel auf dem Belag, was sich evtl. als schwierig herausstellen könnte. Aufgrund dieser Unsicherheit und des hohen Aufwands wird die IkMA-Variante bezüglich des Einbaus ebenfalls mit zwei Minuspunkten bewertet. IkV-Beläge sind im Einbau unempfindlich und erfordern keinen Mehraufwand gegenüber dem Referenz-Belag mit herkömmlichen Beton-Verbundsteinen. EmMA-Beläge werden wie Vermörtelungsbeläge eingebaut (Dünner, mündlich, 2015 [48]). Dabei nimmt die Zeit, während der der Mörtel in die PA-Schicht eingearbeitet werden kann, von 48 min. (Referenz-Belag) durch TiO_2 bei einem Anteil von 5 % auf 25 min. (circa 50 %) ab, bei einem TiO_2 -Anteil von 7.5 % auf 20 min. (circa 40 %; Crispino et al., 2009 [24]). Da die komplette Einarbeitung von Mörtel in eine 5 cm dicke PA-Schicht nur 15 min. dauert, ist der TiO_2 -Mörtel lange genug verarbeitbar [24]. Laut Menzel (mündlich, 2015) [58] der Firma Evonik besteht auch hier die Gefahr der Asphaltdegradation.

Nutzungsunterbruch. Die Bauzeit ist bei PA-Belägen etwa gleich wie bei konventionellen Asphaltdecken (Dünner, mündlich, 2015 [48]). Nach photokatalytischer Beschichtung bestehender Asphalt- oder Beton-Beläge (BsAk und BsB) kann die Fahrbahn bereits wenige Stunden später wieder genutzt werden (Crispino et al., 2011 [59]). Die Herstellung eines Belags nach der heissen Methode (BsAh) benötigt zwar insgesamt mehr Zeit als beim BsAk-Belag, jedoch fällt gegenüber der Erstellung einer Fahrbahn mit herkömmlichem Asphalt als Referenz keine zusätzliche Zeit an. Bei IkV- und IkA-Belägen ist gegenüber ihren jeweiligen Referenz-Belägen durch die Erstellung mit keinen zusätzlichen Nutzungsunterbrüchen zu rechnen. Für die Ertsellung eines IkMA-Belags veranschlagen Wang et al. (2014) [28] lediglich einige Stunden zusätzlich. Deutlich verlängert wird der Nutzungsunterbruch hingegen beim Einbau von EmMA-Belägen. Bei einem TiO_2 -Anteil von 5 % sind gemäss Crispino et al. (2009) [24] circa 3 Tage zusätzlich nötig, bei 7.5 % TiO_2 gar 19 Tage. Grund dafür ist die Verzögerung der Aushärtung und damit der Belastbarkeit durch TiO_2 im Mörtel [24].

Aktivierung. Bei neu erstellten PA-Belägen ist keine Aktivierung zur Entfaltung der feinstaub-mindernden Wirkung nötig, da diese über die Auswaschung in das durchgehende Porensystem erfolgt, welches von Anfang an besteht. Bei photokatalytischen Beschichtungen (BsAk, BsAh und BsB) wird die Wirkung je nach Bindemittel hingegen verzögert (Monate bis ein Jahr) bis dessen Film an der Oberfläche im Falle eines organischen Bindemittels photokatalytisch abgebaut (Sauer et al., 2015 [30]) oder abgefahren ist. Sandstrahlen würde die Beschichtung zerstören. Bei IkV-, IkA- und EmMA-Belägen kann ein Film aus Zementleim beziehungsweise Bitumen, der anfänglich die TiO_2 -Partikel bedeckt, durch Sandstrahlen der Oberfläche entfernt werden. Alternativ kann gewartet werden, bis der Film abgefahren worden ist. Bei IkMA-Belägen ist eine Aktivierung nicht nötig, da die TiO_2 -haltigen Mörtelkörner aufgrund des Brechvorgangs von Anfang an photokatalytisch aktiv sind.

Unterhalt. PA-Beläge müssen bei starker Verschmutzung gereinigt werden, da sonst gemäss Schulte (2004) [62] die Poren verstopft bleiben und die Lärm-Minderung, Drainage und somit auch die Feinstaub-Minderung nicht mehr funktionieren. Bei Fahrbahnen mit hohen Geschwindigkeiten wie etwa Autobahnen konnten Kocherhans et al. (2006) [57] einen ausreichenden Selbstreinigungseffekt feststellen, sodass PA über seine gesamte Nutzungsdauer von circa 12 - 15 Jahren wirksam bleibt. Die höchsten Feinstaub-Konzentrationen treten jedoch innerorts auf, das heisst der Selbstreinigungseffekt reicht hier nicht aus. Kocherhans et al. (2006) [57] weisen darauf hin, dass wegen der kälteren Fahrbahn und der grösseren Poren häufigeres und intensiveres Salzen notwendig ist, was den Unterhaltsaufwand deutlich erhöht. Falls aufgrund unzureichender Wasserdurchlässigkeit des Untergrundes unterirdische Entwässerungssysteme nötig sein sollten, ist mit einem regelmässigen, erheblichen Aufwand für deren Reinigung und Instandhaltung zu rechnen, so Schulte (2004) [62]. Auch Angst, Beltzung, Bosshardt, Grolimund & Pestalozzi (2008) [61] erachten den Unterhalt gegenüber konventionellen Belägen als aufwändiger. Bei IkMA-Belägen könnten laut Wang et al. (2014) [28] aufgrund der unterschiedlichen Wärmeausdehnung von Epoxidharz und Asphalt bei starken Temperaturschwankungen Risse im Belag auftreten, die repariert werden müssten. Daher wird diese Variante bezüglich des Unterhalts mit einem Minuspunkt bewertet. Die übrigen Technologien/Varianten sind im Unterhalt nicht aufwändiger als ihr jeweiliger Referenz-Belag.

Recycling. PA-Beläge müssen nicht aufwändiger recycelt werden wie konventionelle Asphalt-Beläge. Auch photokatalytische Beläge bedürfen im Vergleich zu ihren jeweiligen Referenz-Belägen keines Zusatzaufwands beim Recycling, da TiO_2 bereits in Produkte Einzug gehalten hat, mit denen der Mensch täglich direkten Kontakt hat, wie etwa Zahnpasta (Menzel, mündlich, 2015 [58]). Im Gegensatz zu PA-Belägen besteht jedoch noch keine Erfahrung im Recycling von TiO_2 -haltigen Belägen, und allgemein nur wenig mit den langfristigen Auswirkungen von TiO_2 auf die Umwelt. Letztere sollten aber aufgrund dieser Unsicherheiten sowie erster Erkenntnisse dazu nicht unterschätzt werden (Hund-Rinke & Simon, 2006 [64]). Zusätzlich zu diesem allgemeinen Nachteil photokatalytischer Beläge bezüglich des Recyclings ist bei IkMA-Belägen gegenüber dem Referenz-Belag mit einem weiteren Mehraufwand zu rechnen wegen der Verwendung von Epoxidharz und dessen Verklebung mit dem Asphalt und Abstreumaterial.

Verfahrensschritte gesamt. Insgesamt schneiden PA- und Ikv-Beläge nach diesem übergeordneten Kriterium am besten ab. Denn sie sind hinsichtlich der Verfahrensschritte etwa gleich zu bewerten wie ihre jeweiligen Referenz-Beläge. Die übrigen Technologien/Varianten sind bezüglich der Verfahrensschritte insgesamt etwas schlechter zu bewerten im Vergleich zu ihren jeweiligen Referenz-Belägen. Dieses Ergebnis kommt dadurch zustande, dass die Anzahl derjenigen Einzelkriterien überwiegt, bezüglich derer diese Beläge relativ zur jeweiligen Referenz schlechter bewertet werden. Dennoch unterscheiden sich die Bewertungen bezüglich der Einzelkriterien zum Teil deutlich. Wenn im konkreten Fall die Bedeutung einzelner Kriterien höher eingeschätzt wird als diejenige anderer, sollten daher die Gewichtungen entsprechend angepasst werden.

6.2.3 Machbarkeit bezüglich Fahrbahnbeeinflussung

Griffigkeit. Bei **PA-Belägen** in trockene Zustand verringert sich die Griffigkeit gegenüber konventionellen Asphaltflächen wegen des reduzierten Mastixanteils (Drüschner, Els, Habermann, Nolle, Rauschenbach, et al., 2006 [65]), das heisst wegen der fehlenden Mikrotextur des Belags (Dünner, mündlich, 2015 [48]). Bei nasser Fahrbahn erhöht sich hingegen die Griffigkeit aufgrund der guten Drainagewirkung von PA-Belägen (Kocherhans et al., 2006 [57]). Bis der anfängliche Bindemittelfilm neuer PA-Beläge nach einigen Monaten abgefahren ist, ist die Griffigkeit dieser Beläge verringert, ein Abstumpfen als Gegenmassnahme jedoch nicht möglich, da sonst die Poren verstopfen würden (Drüschner et al., 2006 [65]). Daher sind gemäss dieser Autoren andere Vorsichtsmassnahmen wie etwa Geschwindigkeitsreduktionen bei neuen PA-Belägen anzuraten. Sie weisen ausserdem auf die erhöhte Polierbeanspruchung der Einzelkörner wegen des hohen Grösstkornanteils hin. Daher empfehlen sie Edelsplitle mit einem PSV-Wert ≥ 55 statt circa 53 für konventionelle Asphaltdecken. Da im Winter PA-Beläge kälter als konventionelle Asphalt-Beläge sind, bleibt der Schnee gemäss Kocherhans et al. (2006) [57] länger liegen, was die Griffigkeit reduziert. Dennoch findet auf PA-Belägen laut Schulte (2004) [62] gegenüber konventionellen Asphalt-Belägen eine verzögerte Eisbildung statt, vermutlich wegen der besseren Drainage. Nach langen, trockenen Kälteperioden setzt allerdings die Eisbildung bei PA-Belägen schneller ein, sodass nach Schulte (2004) [62] Präventivstreuungen vorzusehen sind. PA-Beläge sind folglich bei einigen Witterungsbedingungen griffiger als konventionelle Asphalt-Beläge, bei anderen hingegen weniger griffig. Insgesamt werden sie bezüglich dieses Einzelkriteriums daher als etwa gleich bewertet wie ihr Referenz-Belag.

Photokatalytisch beschichtete Beläge weisen nach Aufbringung des Sprays zunächst eine deutlich reduzierte Griffigkeit auf bis die Beschichtung auf den erhöhten Stellen des Belags abgefahren oder photokatalytisch abgebaut ist und die Reifen direkten Kornkontakt haben (Brovelli & Crispino, 2013 [36]). Bei BsAk-Belägen sinkt der SRT-Wert bis circa 1'000 Überrollungen von 64 für den Referenz-Belag auf 49, das heisst um 23 %. In diesem Stadium ist die Beschichtung glattpoliert, Körner sind jedoch noch nicht freigelegt. Danach steigt der SRT-Wert bis 2'500 Überrollungen wieder auf etwa 55 an und nimmt danach bis 10'000 Überrollungen auf 52 ab, was nur 3 % weniger sind als beim Referenz-Belag. Gemäss Venturini & Bacchi (2009) [51] ist die Abnahme der Griffigkeit bei der heissen Methode (BsAh) um circa 40 % schwächer ausgeprägt als bei der kalten Methode (BsAk). Bei photokatalytisch beschichteten Beton-Belägen (BsB) kann aufgrund der Analogie von einer ähnlichen Entwicklung der Griffigkeit wie bei BsAk-Belägen ausgegangen werden. Um die langfristige Griffigkeit von Beton-Belägen zu gewährleisten, kann nach Eifert (2007) [66] eine Oberflächentextur eingebracht werden, entweder (1) durch trockenes oder nasses Ausbürsten zur Herstellung einer Waschbetonoberfläche, (2) durch einen Besenstrich oder (3) ein nachgezogenes Jutetuch im eingebauten, feuchten Zustand.

Aufgrund der Technik der **Inkorporation** von TiO_2 -Nanopartikeln ist bei Ikv- und IKA-Belägen nicht von einer Reduktion der Griffigkeit gegenüber den jeweiligen Referenz-Belägen auszugehen. Allerdings lagen dazu zum Zeitpunkt dieser Studie keine Untersuchungen vor. Bei IkMA-Belägen wird die Griffigkeit gegenüber herkömmlichen Asphalt-Belägen aufgrund des Abstreumaterials mit Diabas-Körnern (neben Mörtelkörnern) erhöht. Wang et al. (2014) [28] und Wang, Hüben, Leng, Oeser & Steinauer (2015) [67]

massen bei diesem Belag einen günstigen PSV-Wert von 61 und einen SRT-Wert von 73 nach der Polierbeanspruchung im Aachener Rafeling Test (ARTe). Zur Griffigkeit eines **Einmischungs**-Belags (EmMA) liegen zwar keine Messungen aus der Literatur vor, aufgrund der Analogie zu den IkV- und IkA-Belägen hinsichtlich dieses Kriteriums kann aber geschlossen werden, dass die Griffigkeit gegenüber derjenigen herkömmlicher Vermörtelungsbeläge unverändert bleibt.

Drainage. Durch die grössere Porosität von PA-Belägen ist auch deren Drainage gegenüber konventionellen Asphaltdecken deutlich höher (Gehrig et al., 2010 [17]; Drüschner et al., 2006 [65]). Laut Kocherhans et al. (2006) [57] bilden sich aufgrund der besseren Drainage bei PA-Belägen keine Sprühhahnen, was zu einer klareren Sicht und damit - neben der oben thematisierten besseren Griffigkeit bei nasser Fahrbahn - zu mehr Sicherheit führt. Da photokatalytische Beschichtungen von Asphalt-Belägen (BsAk, BsAh) zu einer Versiegelung der Fahrbahn führen, ist durch die Beschichtung von einer zusätzlichen Verringerung der ohnehin geringen Drainagewirkung konventioneller Asphalt-Beläge auszugehen. Bei Beton ist die Drainage ohnehin so gering, dass eine zusätzliche Versiegelung bei BsB-Belägen keine Rolle spielen dürfte. Die hohe Drainageleistung von Beton-Verbundstein-Belägen infolge der Fugen bleibt auch bei photokatalytisch aktiven IkV-Belägen uneingeschränkt erhalten. Als Referenz-Belag werden dabei jedoch herkömmliche Beton-Verbundsteine betrachtet und nicht spezielle, offenporige Sorten mit einer zusätzlichen Drainagewirkung. Auch bei den Technologien/Varianten IkA und EmMA kann davon ausgegangen werden, dass die Drainage gegenüber den jeweiligen Referenz-Belägen unverändert bleibt, wenn auch jeweils auf einem anderen Niveau. IkMA-Fahrbahnen trocknen langsamer ab, da ein Teil des Wassers aufgrund der grösseren Belagsrauigkeit nicht abfliessen kann (Dünner, mündlich, 2015 [48]). Zudem verringert die Versiegelung des Belags mit einer Trennschicht aus Epoxidharz die Drainagewirkung. Allerdings weisen Wang et al. (2015) [67] darauf hin, dass nach der Polierbeanspruchung dieses Belags - in dieser Studie im Labor - kein Drainageproblem besteht. Beim EmMA-Belag schliesslich bleibt die Drainage im Vergleich zu einem konventionellen Vermörtelungsbelag unverändert tief.

Spurrillenbildung. PA-Beläge sind aufgrund ihrer geringeren Verformungsneigung weniger anfällig auf Spurrillenbildung als Asphalt-Beläge mit einem höheren Feinkornanteil (Schulte, 2004 [62]). Bei Belägen mit photokatalytischer Beschichtung (BsAk, BsAh und BsB) sowie Beton-Verbundsteinen und Asphalt mit inkorporiertem TiO_2 (IkV und IkA) ist die Spurrillenbildung gegenüber den jeweiligen Referenz-Belägen unverändert. Im Falle des IkMA-Belags ist sogar von einer tendenziell geringeren Spurrillenbildung auszugehen, da die abgestreute Oberfläche mit grauen Betonkörnern (neben dunkleren Diabas-körnern) insgesamt heller als die schwarze Asphaltoberfläche ist, was zu einer geringeren Erhitzung und damit zu geringeren Verformungen führt. Wegen der geringeren Druck- und Spaltzugfestigkeit von EmMA-Belägen (Crispino et al., 2009 [24], siehe Tragfähigkeit) wird die Spurrillenbildung möglicherweise gegenüber Vermörtelungsbelägen mit konventionellem Mörtel etwas verstärkt.

Rissbildung/Ausbrüche. PA-Beläge sind gemäss Kocherhans et al. (2006) [57] deutlich anfälliger für Beschädigungen/Ausbrüche wegen ihrer offenporigen Struktur, zum Beispiel beim Befahren mit Schneeketten. Eine erheblich höhere Empfindlichkeit gegenüber mechanischer Beanspruchung stellten auch Angst, Beltzung, Bosshardt, Grolimund & Pestalozzi (2008) [61] fest. Diese Beläge sind daher neben anderen Gründen innerorts von zu geringer Gebrauchstauglichkeit, welche ein Ausschlusskriterium für deren Einsatz darstellt. Wang et al. (2014) [28] nehmen an, dass IkMA-Beläge bei starken Temperaturschwankungen aufgrund der unterschiedlichen Wärmeausdehnung von Epoxidharz und Asphalt zur Rissbildung neigen könnten. Forschungsergebnisse hierzu lagen zum Zeitpunkt dieser Studie jedoch noch keine vor. Die sechs übrigen Technologien/Varianten sind hinsichtlich des Einzelkriteriums Rissbildung/Ausbrüche indifferent zu ihren jeweiligen Referenz-Belägen.

Tragfähigkeit. PA-Beläge sind aufgrund des reduzierten Feinkornanteils weniger tragfähig als konventionelle Asphalt-Beläge (Böhm et al., 2013 [60]). Auch bei IkMA-Belägen ist die Tragfähigkeit gegenüber herkömmlichen Asphalt-Belägen verringert. Zwar ist das Kriterium einer Schlagzertrümmerungszahl von 18 erfüllt, aber die Druckfestigkeit der TiO_2 -

haltigen Mörtelkörner liegt mit 110'000 kPa unterhalb des gesamten Bereichs natürlicher Mineralkörner (120'000 - 220'000 kPa), die für sonstige Asphalt-Beläge als Abstreumaterial zum Einsatz kommen (Wang et al., 2014 [28]). Bei EmMA-Belägen mit 5 % TiO_2 -Gehalt wird die für einen urbanen Strassenbelag nötige Druckfestigkeit von 70 Mpa nach circa 4 Tagen erreicht, mit 7.5 % TiO_2 -Gehalt gar erst nach circa 20 Tagen im Vergleich zu nur 24 h für einen TiO_2 -freien Vermörtelungsbelag (Crispino et al., 2009 [24]). Hingegen liegt die Druckfestigkeit nach 700 h bei EmMA-Belägen mit 82 kPa (bei 5 % TiO_2 -Gehalt) beziehungsweise 73 kPa (bei 7.5 % TiO_2 -Gehalt) nur mässig unter derjenigen des Referenz-Belags mit 90 kPa. Die für städtische Bedingungen nötige Spaltzugfestigkeit von 1 MPa wird beim Referenz-Belag bereits nach 18 h weit übertroffen (1.3 MPa), bei EmMA-Belägen erst nach 24 h mit 1.2 MPa beziehungsweise 1.05 MPa bei 5 % beziehungsweise 7.5 % TiO_2 -Gehalt (Crispino et al., 2009 [24]). Da der Nachteil der zeitlichen Verzögerung der Aushärtung von EmMA-Belägen bereits unter dem Einzelkriterium des Nutzungsunterbruchs gewertet worden war (siehe oben), wurde hier nur die geringere Druck- und Spaltzugfestigkeit nach Aushärtung bewertet - mit einem Minuspunkt.

Fahrbahnbeeinflussung gesamt. In der Gesamtwertung bezüglich der Fahrbahnbeeinflussung ist die BsAk-Variante als einziger Belag gegenüber dem Referenz-Belag etwas schlechter, alle anderen zeigen keine Tendenz. Dabei kommt diese Bewertung bei den verschiedenen Technologien/Varianten wiederum sehr unterschiedlich zustande. So wurden die IkV- und IkA-Beläge bezüglich aller Einzelkriterien als unverändert gegenüber den Referenz-Belägen bewertet, während die IkMA-Beläge hinsichtlich keines Einzelkriteriums mit unverändert bewertet wurde, und das Spektrum der Einzelbewertungen der PA-Beläge von „deutlich schlechter“ bis „deutlich besser“ als die Referenz reicht. Das heisst, wenn die Gewichtung der Einzelkriterien auf die Erfordernisse einer konkreten Situation angepasst wird, ergibt sich für die heterogen bewerteten Technologien/Varianten eine möglicherweise deutlich andere Gesamtwertung bezüglich der Fahrbahnbeeinflussung, für homogen bewertete dieselbe.

6.2.4 Machbarkeit bezüglich Umweltverträglichkeit

Lärm. Die lärm-reduzierende Wirkung von PA-Belägen wurde in verschiedenen Studien nachgewiesen, etwa von Schulte (2004) [62], Kocherhans et al. (2006) [57] und Angst, Beltzung, Bosshardt, Grolimund & Bühlmann (2010) [68]. Dieser zum Teil als Flüsterasphalt bezeichnete Belag vermag in neuem Zustand, das heisst direkt nach dem Einbau, den Lärm im Vergleich zu konventionellen Asphaltdecken um bis zu 8 dB(A) zu reduzieren (Schulte, 2004 [62]). Im Fall von Autobahnen bleibt die lärm-mindernde Wirkung über die gesamte Nutzungsdauer des Belags fast uneingeschränkt bestehen, was auf dem Selbstreinigungseffekt durch das Befahren mit hohen Geschwindigkeiten beruht (Kocherhans et al., 2006 [57]). Unterhalb einer Fahrgeschwindigkeit von 80 km/h tritt jedoch keine Selbstreinigung ein, sodass die lärm-mindernde Wirkung dieser Beläge auf Strassen innerorts über die Nutzungsdauer deutlich nachlässt (Angst et al., 2010 [68]). Gegenüber konventionellen Asphalt-Belägen führen offeneporige jedoch insgesamt zu einer deutlichen Lärm-Reduktion. Photokatalytische Beläge weisen gegenüber ihren jeweiligen Referenz-Belägen keine Veränderung hinsichtlich des Lärms auf.

Lokalklima/Wasserhaushalt. PA-Beläge wirken sich aufgrund der flächigen Versickerung von Regenwasser vor Ort gegenüber konventionellen Asphalt-Belägen als weitgehend versiegelten Flächen positiv auf den Landschaftswasserhaushalt aus. Denn dadurch werden einerseits die Abflussspitzen gedämpft, was zur Hochwasserentschärfung beiträgt, andererseits wird das Lokalklima ausgeglichener. Zudem wird die Grundwasserneubildung gefördert. Photokatalytisch beschichtete Asphalt-Beläge (BsAk und BsAh) führen hingegen aufgrund der zusätzlichen Versiegelung der Belagsoberfläche zu einer Abflusskonzentration, wenn auch nur zu einer mässigen, da konventionelle Asphaltdecken ohnehin wenig durchlässig sind. Beton-Beläge weisen noch geringere Drainagewirkungen auf, sodass die zusätzliche Versiegelung bei BsB-Belägen keine Rolle spielt. Für EmMA-Beläge beschreiben Crispino et al. (2011) [59] den Albedo-Effekt: durch die weissen TiO_2 -Partikel im Mörtel wird die Fahrbahn heller, sodass die Albedo steigt und weniger einfallende kurzwellige Strahlung absorbiert und mehr reflektiert wird. Dies führt dazu, dass sich der Belag weniger erhitzt, was zur Verringerung der städtischen

Aufheizung gegenüber dem Umland und somit zu einem ausgeglicheneren Stadtklima beiträgt. Analog kommt der Albedo-Effekt auch bei den Belägen IkV, IkA und IkMA zum Tragen.

Energie-/Materialaufwand. PA-Beläge haben nur etwa die halbe Nutzungsdauer wie konventionelle Asphalt-Beläge, sodass pro Zeiteinheit der Material- und Energieverbrauch entsprechend höher ist (Kocherhans et al., 2006 [57]). Laut den Autoren kann jedoch ein Grossteil des Materials der alten Fahrbahn recycelt und gleich wieder für den neuen Belag verwendet werden. Aufgrund der vorgeschriebenen Qualitätsanforderungen an die PA-Deckschicht kann hierfür aber kein Recycling-Material verwendet werden. Da PA-Beläge im Winter stärker auskühlen und da das Streusalz in die Poren fällt, wird deutlich mehr Streusalz benötigt (Kocherhans et al., 2006 [57]). Mit diesem erhöhten Materialverbrauch geht für die Ausbringung auch ein höherer Energieverbrauch einher. Bei allen photokatalytischen Belägen kommt gegenüber dem für die Referenz-Beläge benötigten Material zusätzlich das Pulver aus TiO_2 -Nanopartikeln hinzu sowie die Energie für dessen Herstellung. Im Fall von IkMA-Belägen wird zusätzlich Epoxid-Harz in grossen Mengen benötigt. Da die Fahrbahn aufgrund des Abstreumaterials im Vergleich zum Referenz-Belag rauer ist, muss mit einem höheren Treibstoffverbrauch der Fahrzeuge gerechnet werden.

Umweltmedien Luft/Wasser/Boden. Einerseits filtern PA-Beläge Schadstoffe aus dem Strassenabwasser (Litzka, Pracherstorfer, Vycudil & Augustin, 1999 [69]), andererseits werden Wasser und Boden stärker mit Salz belastet. Insgesamt werden sie daher gegenüber den konventionellen Asphaltdecken bezüglich dieses Einzelkriteriums als indifferent bewertet. Auf photokatalytischen Belägen entstehen als NO_x -Abbauprodukte Salpetersäure (HNO_3) und Nitrat (NO_3^-), was zu einer Versauerung und Eutrophierung des Regenwassers führt (Laufs et al., 2010). Allerdings sind die photokatalytisch entstehenden Nitratmengen im Vergleich zu den landwirtschaftlich emittierten marginal (Sauer et al., 2015) [30]). Zusätzlich können durch die Photokatalyse jedoch auch die Schadstoffe Ozon (O_3), Formaldehyd (HCHO) und zum Teil auch flüchtige organische Verbindungen (VOCs) gebildet werden (Gallus, Ciuraru, et al., 2015 [26]; Gallus, Akylas, et al., 2015 [31]), welche Luft, Wasser und Boden belasten. Obwohl TiO_2 -Nanopartikel sogar in Zahnpasta verwendet werden (Menzel, mündlich, 2015 [58]), sollten deren Umwelteinflüsse nicht unterschätzt werden (Hund-Rinke & Simon, 2006 [64]), zumal über deren Langzeitwirkung noch kaum Wissen vorhanden ist. Die TiO_2 -Nanopartikel werden nicht nur in photokatalytischen Belägen verbaut, sondern gelangen auch beim Herstellungsprozess in die Atmosphäre (Dylla & Hassan, 2012 [70]). Über die gesundheitlichen Auswirkungen des Einatmens der mit TiO_2 -Nanopartikeln angereicherten Luft für die Bauarbeiter beim Einbau lagen zum Zeitpunkt dieser Studie noch keine Untersuchungen vor. Die mögliche Beeinträchtigung der Umweltmedien Luft, Wasser und Boden stellt gemäss Seiler (mündlich, 2015 [71]) bei der Prüfung durch das Bundesamt für Umwelt (BAFU) ein Ausschlusskriterium für den Einsatz eines neuen Belags dar. Das heisst, damit photokatalytische Beläge in der Schweiz überhaupt zugelassen werden können, muss zuerst zweifelsfrei nachgewiesen werden, dass sie keine neuen Schadstoffe in die Umwelt freisetzen, selbst wenn sie Stickoxide und damit sekundären Feinstaub sehr wirksam reduzieren könnten.

Flora/Fauna. Der erhöhte Salzverbrauch im Winterdienst bei PA-Belägen im Vergleich zu konventionellem Asphalt kann Pflanzen und Tieren schaden (zum Beispiel Nekrosen). Von den in photokatalytischen Belägen verarbeiteten TiO_2 -Nanopartikeln geht eine ökotoxische Wirkung aus (Hund-Rinke & Simon, 2006 [64]). Diese wurde in Versuchen mit Bakterien, Algen und Wasserflöhen nachgewiesen werden (Hund-Rinke & Simon, 2006 [64], Frach et.al. 2007 [72] und Rose, 2012 [73]). Bei den photokatalytischen Beton-Verbundsteinen (IkV) wurde deshalb nur ein Minuspunkt (statt zwei wie bei den anderen photokatalytischen Technologien/Varianten) vergeben, da die Verarbeitung der TiO_2 -Nanopartikel nicht draussen sondern in Räumen unter kontrollierten Bedingungen stattfindet.

Umweltverträglichkeit gesamt. Hinsichtlich dieses übergeordneten Kriteriums heben sich die lärm-reduzierenden Beläge, die gegenüber dem Referenz-Belag indifferent sind, von allen photokatalytischen Belägen (PKBs) ab, die alle weniger umweltverträglich rela-

tiv zu ihren jeweiligen Referenz-Belägen sind. Innerhalb der photokatalytischen Technologien/Varianten bestehen in der Bewertung nach den Einzelkriterien kaum Unterschiede ausser für das Lokalklima und den Wasserhaushalt. Auffällig ist, dass die PKBs besonders negativ hinsichtlich der chemischen (Umweltmedien Luft/Wasser/Boden) und biologischen Einzelkriterien (Flora/Fauna) bewertet wurden, weniger negativ, indifferent oder gar positiv bezüglich der physikalischen Einzelkriterien. Gründe hierfür sind die chemische Substanz TiO_2 in Form von Nanopartikeln, deren langfristige Auswirkung auf die Umwelt noch nicht bekannt ist und daher unkalkulierbare Risiken birgt, andererseits die potentielle Belastung von Luft, Wasser und Boden, sowie Flora und Fauna durch allfällige toxische Reaktionsprodukte der Photokatalyse.

6.2.5 Machbarkeit gesamt

In der Gesamtwertung der technischen Machbarkeit schneiden die offenporigen Asphalt-Beläge (PA) sowie die photokatalytischen Beton-Verbundsteine (IkV) am besten ab. Ihre technische Machbarkeit bleibt gegenüber den jeweiligen Referenz-Belägen, konventionellem Asphalt beziehungsweise Belägen aus TiO_2 -freien Beton-Verbundsteinen, insgesamt etwa unverändert. Denn diese beiden Beläge weisen hinsichtlich der Verfahrensschritte die besten Bewertungen auf, sind hinsichtlich der Fahrbahnbeeinflussung nicht schlechter bewertet als die übrigen Beläge relativ zur jeweiligen Referenz, und schneiden auch bei der Umweltverträglichkeit besser (PA-Beläge) oder gleich (IkV-Beläge) ab. Trotz ihrer guten Bewertung können PA-Beläge nicht für den Einsatz innerorts empfohlen werden (Angst et al., 2008 [61]). Denn wie oben gezeigt, sind PA-Beläge recht empfindlich gegenüber Abweichungen von den Anforderungen beim Einbau, aufwändig im Unterhalt, und nicht konzipiert für die hohen Beanspruchungen des innerstädtischen Bereichs. Demzufolge ist ihre Gebrauchstauglichkeit innerorts nicht gegeben. Für photokatalytische Beläge lagen derartige Empfehlungen zum Zeitpunkt dieser Studie nicht vor. Dennoch können auch sie unabhängig von ihrer geringen Wirksamkeit der NO-Minderung nicht für die Anwendung empfohlen werden, solange nicht ausgeschlossen werden kann, dass von ihnen keine zusätzlichen Umweltbelastungen ausgehen.

7 Analyse und Bewertung des Kosten / Nutzen-Verhältnisses

7.1 Methode der Kosten/Nutzen-Analyse und -Bewertung

Gemäss den Zielsetzungen wurde in dieser Studie als Nutzen ausschliesslich die Wirksamkeit der Minderung von Feinstaub oder seiner Vorläufergase betrachtet. Andere zusätzliche Nutzen aus den einzelnen Belägen, die in der Machbarkeitsanalyse und -bewertung angeführt wurden, wie etwa die Lärm-Reduktion, flossen somit nicht in die hier durchgeführte Kosten/Nutzen-Analyse und -Bewertung ein. Sie sind jedoch für die Auswahl eines Strassenbelags in der Stadt- und Verkehrsplanung zusätzlich zu berücksichtigen.

7.1.1 Anpassung selektierter Technologien

Um das Kosten/Nutzen-Verhältnis zu ermitteln, sind für dieselben Technologien beziehungsweise Varianten sowohl Daten für die Kosten als auch für den Nutzen, wie oben definiert, nötig. Die Wirksamkeit liegt für die in Kapitel 5.2.3 als wirksam selektierten Technologien/Varianten vor. Von diesen konnten für die offenporigen Asphaltdecken (PA) und die Beton-Verbundstein-Beläge mit inkorporiertem TiO_2 (IkV) die Kosten ermittelt werden. Der Anbieter eines Vermörtelungsbelags mit TiO_2 -haltigem Mörtel (EmMA) erklärte, dass die Kosten nur im konkreten Einzelfall angegeben werden könnten, sodass diese Technologie von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen werden musste. Für die photokatalytisch beschichteten Beläge (BsA und BsB) waren ebenfalls keine Angaben zu den Kosten erhältlich, für die Technologie der Inkorporation von TiO_2 (Ik) zwar nicht in Asphalt als Belag (IkA), stattdessen aber in Beton (IkB). Da zu IkB-Belägen jedoch keine Daten zur Wirksamkeit vorlagen, wurde diejenige für IkV-Beläge übernommen, da diese beiden Varianten bezüglich der Wirkungsweise identisch sind (Inkorporation von TiO_2 -Nanopartikeln in eine dünne Schicht Vorsatzbeton über Hinterbeton). Für die Variante Mörtel-Abstreumaterial mit inkorporiertem TiO_2 auf Asphalt (IkMA) existieren ebenfalls noch keine Kostenangaben, da der Belag noch nicht im Feld getestet wurde. Stattdessen waren jedoch Kostenangaben für ein sehr ähnliches, ganz neues Verfahren (IkMAx) erhältlich. Da hierzu noch keine Publikationen vorliegen, wurde es erst bei der Kostenanfrage entdeckt, als die entsprechende Firma dieses erwähnte. Bei IkMAx wird das TiO_2 -haltige Abstreumaterial aus gebrochenem Mörtel direkt auf die Asphaltdecke aufgebracht ohne Trennschicht aus Epoxidharz wie bei IkMA-Belägen. So ist bei IkMAx-Belägen zwar die Gefahr der photokatalytischen Asphaltdegradation erhöht, was die Machbarkeit verringert, die Wirksamkeit sollte jedoch dieselbe sein wie für IkMA-Beläge und wurde daher auf IkMAx-Beläge übertragen.

7.1.2 Kriterien für Kosten und Nutzen

Die Kosten wurden auf die Flächeneinheit Quadratmeter [m^2] bezogen. Folgende Kostenarten wurden unterschieden und berücksichtigt:

- Materialkosten [CHF/m^2]
- Einbaukosten [CHF/m^2]
- Konstruktionskosten [CHF/m^2]
- Unterhaltskosten jährlich [$\text{CHF}/\text{m}^2 \cdot \text{a}$]
- Recyclingkosten [CHF/m^2]

Um die flächenbezogenen Kosten als Summe dieser Kostenarten für die einzelnen Technologien/Varianten pro Zeiteinheit Jahr [a] berechnen zu können, wurde zusätzlich jeweils deren Nutzungsdauer ermittelt. Der Nutzen wurde in dieser Studie definiert als

- Wirksamkeit der Minderung von Feinstaub-Konzentration unter Feldbedingungen [%] - für lärm-reduzierende Beläge
- Wirksamkeit der Minderung der Konzentration des Feinstaub-Vorläufgases NO unter Feldbedingungen [%] - für photokatalytische Beläge

7.1.3 Referenz für Kosten und Nutzen

Wie die Wirksamkeit und die Machbarkeit der verschiedenen Technologien/Varianten wurden auch die Kosten jeweils relativ zu einem Referenz-Belag als Mehrkosten ermittelt. Dabei wurde für die IkB-Technologie-Variante (siehe Kapitel 7.1.1) als Referenz-Belag eine TiO₂-freie Betonplatte bestimmt, für die IkMAx-Variante derselbe wie für die IkMA-Variante. Für die übrigen in Kapitel 7.1.1 selektierten Technologien/Varianten gelten die bereits bisher verwendeten Referenz-Beläge (Tab. 6). Anhand der Nutzungsdauern von Referenz- und Feinstaub-/NO-reduzierendem Belag konnte bestimmt werden, wie oft der Feinstaub-/NO-reduzierende während der Nutzungsdauer des Referenz-Belags erstellt werden muss, was in den Mehrkosten berücksichtigt wurde.

7.1.4 Informationen zu Kosten und Nutzungsdauer

Die Angaben zu Kosten und Nutzungsdauer offener Asphalt-Beläge (PA) konnten der Literatur entnommen werden (Kocherhans et al., 2006 [57]). Die Angaben für die photokatalytischen Beläge wurden bei Firmen erfragt, welche diese Beläge herstellen oder das Material dafür liefern. Da die in Kapitel 5 ermittelten Wirksamkeiten mit nicht quantifizierbaren Unsicherheiten behaftet sind (siehe Kapitel 5.1.5) und in das Kosten/Nutzen-Verhältnis einfließen, werden diese Firmen jedoch nicht namentlich genannt sondern anonym als Firma X und Y angegeben.

7.1.5 Bestimmung und Bewertung des Kosten/Nutzen-Verhältnisses

Das Kosten/Nutzen-Verhältnis wurde für jede der selektierten Technologien/Varianten (siehe Kapitel 7.1.1) als jährliche Mehrkosten gegenüber dem Referenz-Belag in CHF/(m²·a) pro Minderung von Feinstaub (für lärm-reduzierende Beläge) beziehungsweise Stickstoffmonoxid NO (für photokatalytische Beläge) in % deren Konzentrationen bestimmt. Daraus ergibt sich folgende Einheit:

$$\frac{\text{CHF} / \%}{\text{m}^2 \cdot \text{a}}$$

Sie gibt an, wie viel Franken zur Minderung der Feinstaub-/NO-Konzentration um ein Prozent pro Quadratmeter und Jahr für eine bestimmte Technologie/Variante ausgegeben werden müssen. Damit das Kosten-Nutzen-Verhältnis kein negatives Vorzeichen hat, was sich rechnerisch aus der negativen Zahl für die Feinstaub-/NO-Minderung ergibt, wurde mit „-1“ multipliziert. Bewertet wurde das Kosten-Nutzen-Verhältnis anhand der in Tab. 9 angegebenen Klassifikation mit Grenzen in logarithmischen Abständen, um Unterschiede im kleinen Wertebereich besser aufzulösen. Im Gegensatz zur Wirksamkeit und Machbarkeit sind hier kleine Werte günstig, grosse ungünstig.

Tab. 9 Klassen des Kosten/Nutzen-Verhältnisses spezieller Strassenbeläge zur prozentualen Konzentrationsminderung von Feinstaub (lärm-reduzierende Beläge) oder Stickstoffmonoxid NO (photokatalytische Beläge).

Bereich Kosten/Nutzen-Verhältnis K/N [CHF/(%·m ² ·a)]	Symbol	Bedeutung
K/N ≤ 0.1	S 	Günstiges Verhältnis
0.1 < K/N ≤ 1.0	M 	Mässiges Verhältnis
K/N > 1.0	L 	Ungünstiges Verhältnis

7.2 Resultate der Kosten/Nutzen-Analyse und -Bewertung

Folgend sind die Resultate zur Kosten/Nutzen-Analyse und -Bewertung zusammengestellt. Die jährlichen Mehrkosten pro Quadratmeter sind für die Beläge aus photokatalytischen Beton-Verbund-Steinen (IkV) und TiO₂-haltigem Abstreumaterial auf Asphalt (IkMA) am geringsten, für die Beton-Platte mit TiO₂-haltigem Vorsatzbeton (IkB) am höchsten (CHF 1.00). Diejenigen für eine offeneporige Asphaltdecke (PA) liegen dazwischen.

Tab. 10 Übersicht der Bewertung des Kosten/Nutzen-Verhältnisses spezieller Strassenbeläge zur Minderung von Feinstaub (lärm-reduzierende Beläge) oder Stickstoffmonoxid NO (photokatalytische Beläge) im Vergleich zu den jeweiligen Referenz-Belägen. Als Nutzen wird ausschliesslich die Wirksamkeit der Feinstaub-/NO-Reduktion betrachtet. Klassen siehe Tab. 9. PM10 = Feinstaub, NO = Stickstoffmonoxid, *) aus Gründen der Geheimhaltung dürfen die Firmen nicht namentlich genannt werden.

Kriterien Kostenbewertung	Gruppe Technologie	Lärmred. Strassenbeläge	Photokatalytische Beläge		
	Technologie	Offenporiger Asphalt	Inkorporation von TiO ₂ -Partikeln		
	Variante		Zement-Pflaster	aktiver Vorsatzbeton auf Betonplatte	Mörtel-Abstreumaterial
	Belagsart	Asphalt	Beton-Verbundsteine	Beton	Asphalt
	Referenzbelag	Konventioneller Asphalt	TiO ₂ -freie Beton-Verbundsteine	TiO ₂ -freie Betonplatte	TiO ₂ -freies Abstreumaterial
	Code	PA	IkV	IkB	IkMAx
Mehrkosten zu Referenzbelag					
Materialkosten [CHF/m ²]		0.0	7.0	20.0	7.0
Einbaukosten [CHF/m ²]		0.0	0.0		0.0
Konstruktionskosten [CHF/m ²]		0.5	0.0	0.0	0.0
Unterhaltskosten jährlich [CHF/(m ² ·a)]		0.4	0.0	0.0	0.0
Recyclingkosten [CHF/m ²]		0.0	0.0	0.0	0.0
Nutzungsdauer					
Feinstaub-/NO-reduzierender Belag [a]		12.0	20.0	20.0	20.0
Referenzbelag [a]		20.0	20.0	20.0	20.0
Quelle		Kocherhans et al. (2006) [56]	Firma X (mdl., 2015) ^{*)}	Firma Y (mdl., 2015) ^{*)}	Firma X (mdl., 2015) ^{*)}
Mehrkosten pro Zeit					
Mehrkosten Material über 20 Jahre [CHF/m ²]		0.0	7.0	20.0	7.0
Mehrkosten Einbau über 20 Jahre [CHF/m ²]		0.0	0.0		0.0
Mehrkosten Konstruktion über 20 Jahre [CHF/m ²]		0.8	0.0	0.0	0.0
Mehrkosten Unterhalt über 20 Jahre [CHF/m ²]		8.0	0.0	0.0	0.0
Mehrkosten Recycling über 20 Jahre [CHF/m ²]		0.0	0.0	0.0	0.0
Mehrkosten über 20 Jahre für zusätzliche Erstellung durch reduzierte Nutzungsdauer [CHF/m ²]		6.7	0.0	0.0	0.0
Mehrkosten über 20 Jahre [CHF/m ²]		15.5	7.0	20.0	7.0
Mehrkosten jährlich [CHF/(m ² ·a)]		0.78	0.35	1.00	0.35
Nutzen (Wirksamkeit)					
PM10-Minderung [%]		-9.3			
NO-Minderung [%]			-0.8	-0.8	-0.5
Kosten/Nutzen-Verhältnis					
Kosten für PM10-Minderung [CHF/(%·m ² ·a)]		0.08			
Kosten für NO-Minderung [CHF/(%·m ² ·a)]			0.45	1.28	0.71
Klasse Kosten/Nutzen-Verhältnis		S	M	L	M

Für das Kosten/Nutzen-Verhältnis (K/N) ist ein direkter Vergleich zwischen PA- und den photokatalytischen Belägen (PKBs) nicht zulässig (siehe Kapitel 5.2.1). Da jedoch K/N für PA-Beläge nominell deutlich kleiner ist als für PKBs, muss K/N für PA-Beläge auch be-

zöglich der absoluten Feinstaub-Minderung am kleinsten, das heisst am günstigsten sein. Denn bei nominell gleichem K/N mindern PKBs durch die NO-Reduktion (und allenfalls anderer Vorläuforgase) immer nur den Anteil sekundären Feinstaubs, während sich die Reduktion bei PA-Belägen auf primären und sekundären Feinstaub bezieht. Unter den PKBs schneiden die IkV- und IkMAx-Beläge bezüglich K/A deutlich günstiger ab als die IkB-Beläge. Grund hierfür sind offenbar die Mehrkosten (geg. Referenz) für IkB-Beläge beim Einbau, die bei IkV- und IkMA-Belägen wegfallen. Da jedoch die ausgeführten PKBs noch sehr rar sind und eher Pilotcharakter haben, ist damit zu rechnen, dass sich die Preise der verschiedenen Hersteller in den nächsten Jahren noch einpendeln werden. Eine zunehmende Automatisierung für den operationellen Baustellenbetrieb (im Gegensatz zum bisher eher experimentellen) wird vermutlich zu einer Kosten- und damit Preissenkung führen und schliesslich zu günstigeren K/N-Verhältnissen.

7.3 Vergleich mit alternativen Massnahmen zur Feinstaub-/NO_x-Reduktion

Zur Minderung von Feinstaub und seiner Vorläuforgase stehen neben den in dieser Studie untersuchten speziellen Strassenbelägen eine Vielzahl alternativer Massnahmen zur Verfügung. Einige dieser Alternativen werden im Folgenden mit den speziellen Strassenbelägen hinsichtlich ihrer Kosten und ihres Nutzens anhand ausgewählter Beispiele verglichen. Dabei besteht kein Anspruch auf Vollständigkeit. Als Quelle für die alternativen Massnahmen wurde die von der Deutschen Bundesanstalt für Strassenwesen (BASt) herausgegebene Datenbank zur Bewertung von Massnahmen zur Reinhaltung der Luft und deren schadstoffmindernde Wirkung MARLIS Version 3.1 (Schneider, Niederau, Turhan & Pelzer, 2013 [74]) herangezogen. MARLIS umfasst insgesamt 4163 Einzelbeispiele (20 in der Schweiz) zu diesen Massnahmen, die sie in folgende 13 Kategorien einteilt:

- Fahrzeugtechnik, Fuhrpark
- Infrastruktur-, Baumassnahme
- Instandhaltung
- Verkehrslenkende Massnahme, Verkehrsmanagement
- Öffentlicher Personennahverkehr
- Rad-, Fussgängerkehr
- Verkehrsbeschränkungen
- Verflüssigung
- ruhender Verkehr
- Wirtschaftsverkehr
- Kontrollen
- Sonstige (strassen-)verkehrliche Massnahmen
- Öffentlichkeitsarbeit

Aus diesen 13 Kategorien wurde jeweils mindestens ein Beispiel ausgewählt, teilweise mehrere, und in Tab. 11 mit kurzer Beschreibung sowie Angaben zu Reduktionswirkung und Kosten zusammengestellt. Zunächst ist interessant, dass auch Massnahmen-Beispiele mit scheinbar vernachlässigbar geringer Reduktion aufgeführt werden wie für Nr. 1 bis 4, 11, 12 und 14. Diese Reduktionen liegen in einer ähnlichen Grössenordnung wie die normalisierte Wirksamkeit Feinstaub-/NO-mindernder Strassenbeläge der Klassen XS und S. Diese alternativen Massnahmen gehören sogar der Kostenklasse 3 für hohe Kosten an. Da solche Massnahmen mit scheinbar marginaler Wirkung dennoch geplant und ausgeführt werden, ist anzunehmen, dass sie sich offenbar für die Städte mit grosser Feinstaubbelastung trotzdem rentieren. Vermutlich wird dabei die Strategie verfolgt, die Feinstaubbelastung mit einer Kombination verschiedener Massnahmen zu senken, wobei viele kleine Wirkungen sich zu einer grossen aufaddieren. Diese Strategie wurde am Kolloquium Luftqualität an Strassen im März 2015 in Bergisch Gladbach (D)

von einigen Referent/innen und Teilnehmer/innen vertreten. Zudem zeigten Wurzler, Hebbinghaus, Schlich, Steckelbach, Schmidt, et al. (2015) [75], dass das urbane NO₂-Problem nur durch eine Kombination aus lokalen, regionalen und europaweiten Massnahmen gelöst werden kann.

Tab. 11 Alternative Massnahmen zur Minderung von Feinstaub und NO_x gegenüber speziellen Strassenbelägen. Kostenklassen von 1 (gering) bis 4 (sehr hoch). NO_x = Stickoxide, PM10 = Feinstaub. Quelle: Datenbank zur Bewertung von Massnahmen zur Reinhaltung der Luft und deren schadstoffmindernde Wirkung MARLIS Version 3.1 (Schneider, Niederau, Turhan & Pelzer, 2013 [74]).

Nr.	Kategorie	Ort	Reduktion Luftschadstoffe [%]				Kosten- klasse	Zusatzkosten [CHF] für CH [€] für EU
	Massnahme		Emissionen		Immissionen			
			NO _x	PM10	NO _x	PM10		
Fahrzeugtechnik, Fuhrpark								
1	Emissionsminderung bei Linienbussen des ÖPNV durch Partikelfilter bzw. CRT-Systeme	Basel	-0.5	-0.4	-	-	3	4000 pro Bus und Jahr
2	Emissionsminderung bei Nutzfahrzeugen durch Partikelfilter bzw. CRT-Systeme, SCR-Technik, Erdgas-/Biogas-Fahrzeuge	Basel	-1.0	-0.8	-	-	3	4000 pro Fahrzeug und Jahr
3	Emissionsminderung bei Personenwagen	Basel	-0.5	-0.8	-	-	2-4	-
4	Emissionsbegrenzung bei Motorrädern	Basel	-0.1	-	-	-	2-4	-
Infrastruktur-, Baumassnahme								
5	Strassenraumgestaltung und -organisation in Städten und Innerortsbereichen (u. a. autofreie Bereiche ausweiten und verbinden)	Basel	-1.8	-4.3	-	-	3	100'000 bis mehrere Mio.
6	Ersatz eines Pflasterbelags durch Asphalt	Brandenburg a. Havel (D)	-	-	-25.5	-13.6	3-4	-
7	Asphaltieren der gepflasterten Strassenoberfläche in der Bergstrasse	Erfurt (D)	-	-	0.0	-16.2	3	ca.125/m²; Sanierung Bergstrasse ca. 800'000
8	Ummarkierung der Fahrbahn in der Wilhelmstrasse	Tübingen (D)	-1.0	-11.0	-1.0	-5.0	2-3	-
9	Strassensperrung	Frankfurt a. Oder (D)	-	-	-11.9	-5.0	1	-
Instandhaltung								
10	Minderung von PM10-Emissionen aus Abrieb und Aufwirbelung im Verkehr (u. a. Strassenreinigungsfahrzeuge mit PM10-Filtern; Filter-/Saugsysteme)	Basel	-	-17.4	-	-	2	-
Verkehrslenkende Massnahmen, Verkehrsmanagement								
11	Integriertes Mobilitätsmarketing (u. a. Jobtickets; Kombi-Angebote Anreise+Eintritt/ÜN, ...; bessere Kombination ÖV/PW)	Basel	-0.5	-1.3	-	-	3	einige 100'000
Wirtschaftsverkehr								
12	Transport von Massengütern mit der Bahn (Steuerung durch emissionsabhängige Motorfahrzeugsteuer)	Basel	-1.2	-0.4	-	-	3	einmalig 200'000 bis 300'000 (inkl. Marketing)
13	Optimierung der Transportketten im Güterverkehr (z. B. Verbesserung des Transportmanagements ganzer Logistikketten)	Basel	-2.7	-1.7	-	-	3	-
Sonstige (strassen-)verkehrliche Massnahmen								
14	Koordination Raumplanung und Luftreinhaltung bei publikumsintensiven Einrichtungen (u. a. gute Anbindung an öffentlichen Verkehr, Nähe zu Bevölkerungszentren)	Basel	-0.5	-1.3	-	-	2	100'000 für Grundlagenarbeiten
15	Flankierende Massnahmen zu Strassenbauprojekten (z. B. Fuss- und Veloverkehr, Umgestaltung Strassenraum)	Basel	-20.0	-20.0	-	-	4	9 Mio. bei Umfahrung Sissach
Öffentlicher Personennahverkehr								
16	Jobticket-Kampagne Stadt Aachen (Das neue MitarbeiterTicket)	Aachen (D)	-4.5	-7.6	-2.2	-2.8	2	9000 (Konzept), 200'000 pro Jahr
17	Attraktivierung ÖPNV (Ausbau ÖPNV-Infrastruktur, Erneuerung Fahrzeugpark, Beschleunigungsmassnahmen, Optimierung Fahrpläne, verständliche Fahrpreissysteme, elektronische Informationssysteme)	Mannheim (D)	-	-	-2.0	-2.0	3-4	-
Verkehrsbeschränkungen								
18	Ganzjähriges Lkw-Durchfahrtsverbot (ab 3,5 t, Lieferverschleiss frei) im Stadtgebiet	Stuttgart (D)	-18.3	-13.8	-4.7	-8.3	2	110'000
Verflüssigung								
19	Müllabfuhr und Strassenreinigung an Hauptverkehrsstrassen nur ausserhalb der Hauptverkehrszeiten	Stuttgart (D)	-	-	-1.0	-1.0	1-2	-
Ruhender Verkehr								
20	Anhebung der Parkgebühren in der Innenstadt Stuttgart	Stuttgart (D)	-	-	-1.0	-1.0	2	einmalig 25'000
Kontrollen								
21	Verkehrsverbot für Fahrzeuge SG1 und SG2 in der Brackeler Strasse	Dortmund (D)	-14.4	-5.8	-3.8	0.0	1-3	-

Erstaunlich sind die ansehnlichen Wirkungen sehr einfacher Massnahmen wie etwa der Ummarkierung einer Fahrbahn an einem Beispiel aus Tübingen (Nr. 8). Ein ähnliches Beispiel ist die Anhebung der Parkgebühren in der Innenstadt Stuttgart, das immerhin zu einer Minderung der Immissionen sowohl von PM10 als auch NO_x um 1 % führt.

Die grössten Reduktionen, sowohl von NO_x als auch PM10, in dieser Zusammenstellung werden durch den Ersatz eines Verbundstein-Belags durch Asphalt in Brandenburg an der Havel (Nr. 6), Flankierende Massnahmen zu Strassenbauprojekten in Basel, zum Beispiel Fuss- und Veloverkehr, Umgestaltung Strassenraum (Nr. 15), und ein ganzjähriges Lkw-Durchfahrtsverbot (ab 3.5 t, Lieferverkehr frei) im Stadtgebiet von Stuttgart (Nr. 18) erreicht. Das letzte Beispiel weist fast die gleiche Wirksamkeit der Reduktion von Feinstaub-Immissionen im Feld auf wie die in dieser Studie untersuchten offenporigen Asphalt-Beläge (Vergleich Tab. 5). Noch höhere Reduktionen der NO₂-Konzentration von über 40 % konnten Baum, Sauer & Metzger (2015) [76] durch Lärmschutzwände allein, das heisst ohne photokatalytische Wirkung nachweisen, da diese als Barrieren für Luftströmungen wirken.

Da MARLIS die angegebenen Kosten nicht auf eine Fläche und Zeit bezieht, lässt sich jedoch mit den Massnahmen dieser Datenbank kein Vergleich bezüglich des quantifizierten Kosten-Nutzen-Verhältnisses anstellen. Zudem werden zu den zahlreichen Einflussfaktoren keine oder nur vereinzelt Angaben gemacht, was die Vergleichbarkeit der Daten untereinander und mit denjenigen dieser Studie stark einschränkt und die Aussagekraft deutlich reduziert. Weitere Unschärfen dieser Daten sind aufgrund ihres heterogenen Ursprungs und vor allem der teils sehr unterschiedlichen Massstabsebenen und damit Systemgrenzen anzunehmen. Denn während einige der aufgeführten Massnahmen lediglich einen Strassenabschnitt betreffen, beziehen sich andere auf eine ganze Stadt oder gar Region. Allerdings kann bei konkretem Interesse an einer Massnahme dank des angegebenen Kontakts direkt nach Angaben gefragt werden. Der grosse Wert dieser Datenbank liegt vor allem in der umfangreichen Sammlung verschiedenster Massnahmen zur Feinstaub- und NO_x-Reduktion, den Auswahlkriterien (eine zusätzliche Suchfunktion nach Begriffen wäre jedoch sehr hilfreich), der einfachen Bedienbarkeit und nicht zuletzt der kostenlosen Bereitstellung auf Anfrage bei der Deutschen Bundesanstalt für Verkehrswesen.

Zuletzt ist anzumerken, dass diese Datenbank trotz Aktualität des Jahres 2013 kein einziges realisiertes Beispiel mit angegebener Wirkung für lärm-reduzierende oder photokatalytische Beläge enthält. Offenbar sind diese Massnahmen noch recht wenig verbreitet.

8 Experten-Einschätzungen

Die im Folgenden genannten Expertinnen und Experten wurden wie Autoren zitierter Literatur im Text mit einer Nummer in eckigen Klammern codiert und im Literaturverzeichnis mit Angaben zur Person und Institution oder Firma aufgeführt. Somit können die Expertinnen und Experten bei Bedarf konsultiert werden.

8.1 Offenporige Asphalt-Beläge

Die Meinungen der Experten zu offenporigen Asphalt-Belägen entsprechen weitgehend den Aussagen der Literatur, wie Gespräche mit Bommert (mündlich, 2015) [77] von der BAST, Greber (mündlich, 2015) [78] der Belagswerk Hasle AG BLH, Hammer (mündlich, 2015) [79] der Grolimund + Partner AG, Niedermeier (mündlich, 2015) [80] vom ADAC, sowie Schmid (mündlich, 2015) [22] zeigten. Die entscheidende Aussage von Angst et al. (2008) [61], dass offenporige Asphalt-Beläge aufgrund der Empfindlichkeit beim Einbau und gegenüber der starken Beanspruchung innerorts, sowie des aufwändigen Unterhalts für den Einsatz in Städten untauglich sind, konnte von Schmid (mündlich, 2015) [22] von Laboroute SA bestätigt werden. Zu ergänzen ist die Aussage von Bommert (mündlich, 2015) [77], dass offenporige Asphalt-Beläge auch für Bereiche ausserorts mit hohen Lenkkraften wie Kreiseln oder Bushaltestellen nicht geeignet sind. Laut Bommert (mündlich, 2015) [77] beträgt die Nutzungsdauer dieser Beläge nur 8 bis 10 Jahre anstatt der in der Literatur angegebenen 10 bis 15 Jahre (Kocherhans et al., 2006 [57]).

8.2 Photokatalytische Beläge

Um Experten-Einschätzungen zu photokatalytischen Belägen einzuholen, konnte insbesondere das Kolloquium *Luftreinhaltung durch Photokatalyse* am 23. September 2015 an der Bundesanstalt für Strassenwesen (BAST) in Bergisch Gladbach (Deutschland) genutzt werden. Dabei zeigte sich, dass dieser Forschungszweig recht jung und sehr aktiv ist, denn zahlreiche Pilotstudien sind momentan noch im Gange und Unternehmen drängen mit immer neuen Entwicklungen auf den Markt. Neben Aussagen, die einzelnen Personen zugeordnet werden können, werden auch Eindrücke von der Tagung wiedergegeben.

Messtechnik. Neumann (mündlich, 2015) vom Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik präsentierte an der Tagung ein handliches, neu patentiertes Gerät, mit dem die Wirksamkeit photokatalytischer Oberflächen bezüglich des Abbaus von NO_x (und anderer Luftschadstoffe), vor Ort innerhalb weniger Minuten reproduzierbar gemessen werden kann. Die Messmethode beruht auf der Lumineszenz-Degradation dünner organischer Farb-Filme, die zur Messung auf die photokatalytisch aktive Oberfläche aufgebracht werden (Böttger, Graumann, Boughaled, Neumann, Kowalsky et al., 2013 [81]). Diese Entwicklung könnte einen wesentlichen Schritt zur standardisierten Prüfung photokatalytischer Produkte inklusive Strassenbelägen darstellen, deren Notwendigkeit bereits im Kapitel 4.4 aufgezeigt wurde.

Wirksamkeit. Krempels (mündlich, 2015) [82] vom Fachverband angewandte Photokatalyse (FAP) erklärte, dass die photokatalytische Wirksamkeit der NO_x-Konzentrationsminderung mit dem Betrachtungsmassstab abnehme: sie liege bei reinem TiO₂ zwischen 60 % und 80 %, für einzelne Belagselemente, etwa Beton-Verbundsteine, zwischen 40 % und 60 %, bei Versuchen im Technikumsmassstab, etwa einer künstlich angelegten Strassenschlucht, zwischen 15 % und 30 %, und schliesslich im Feld zwischen 2 % und 20 %. Kleffmann (mündlich, 2015) [83] der Bergischen Universität Wuppertal schätzt sogar, dass die Wirksamkeit der NO_x-Konzentrationsminderung unter realistischen urbanen Bedingungen höchstens einige Prozent beträgt. Denn häufig werde in Studien ein zu günstiges Verhältnis der photokatalytischen Oberfläche zum betrachteten Volumen verunreinigter Luft angenommen. Zudem würden oft nur Tagesmesswerte berücksichtigt, die Messhöhe von 3 m deutlich unterschritten und unter unrealistisch geringen Schadstoffkonzentrationen gemessen. Schliesslich werde in vielen Studien, scheinbar stellvertre-

tend für NO_x , ausschliesslich der Abbau von NO gemessen, nicht jedoch von NO_2 . Grund dafür sei die wesentlich einfachere Messung der NO-Konzentrationen und die deutlich höheren Wirksamkeiten, die erzielt werden könnten. Vom NO-Abbau dürfe jedoch nicht auf denjenigen von NO_2 geschlossen werden, da sich der Reaktionsmechanismus am Photokatalysator deutlich unterscheide. Relevant für Umwelt und Gesundheit sei jedoch NO_2 , und Probleme mit der Einhaltung von NO_x -Grenzwerten bestünden lediglich mit diesem Schadstoff. Daher müsse die Wirksamkeit photokatalytischer Oberflächen unbedingt anhand der Minderung von NO_2 beurteilt werden, so Kleffmann [83]. Um tatsächlich die Wirksamkeit der NO_2 -Minderung unter realistischen Bedingungen zu erhöhen, liegt der Gedanke nahe, die TiO_2 -Konzentration deutlich zu erhöhen, denn dadurch steigt gemäss Literatur die Wirksamkeit (Crispino et al., 2009 [24]; Wang et al., 2014 [28]; Carneiro et al., 2013 [35]; Hüsken et al., 2009 [42]). Bahnmann (mündlich, 2015) [84] der Leibniz Universität Hannover sowie der St. Petersburg State University warnt jedoch vor zu grossen Erwartungen, da die Wirksamkeit bei sehr hohen TiO_2 -Konzentrationen wieder abnehme. Eine Schlüsselfunktion zur Erreichung höherer Wirksamkeiten komme hingegen der Erhöhung der photokatalytisch aktiven Oberfläche zu, so Menzel (mündlich, 2015) [58] vom FAP, dessen Auffassung auch dem allgemeinen Tenor der Veranstaltung entsprach. Eine mögliche technische Umsetzung dieser Idee sieht Flassak (mündlich, 2015) [85] vom Ingenieurbüro Lohmeyer in Tunnelkassetten, welche photokatalytisch aktives Material mit einer hohen spezifischen Oberfläche enthalten. Diese Lösung entstand im Rahmen des von der BAST geförderten, noch laufenden Projekts FE 09.0184/2011/ARB „Hauptstudie zur Wirksamkeit von Tunnelwänden als Träger photokatalytischer Oberflächen“.

Machbarkeit. Reuter (mündlich, 2015) [86] vom Amt für Umweltschutz der Landeshauptstadt Stuttgart stellte an der Tagung fest, dass zwar seit einigen Jahren die Photokatalyse sehr intensiv erforscht werde, verlässliche Grundlagen jedoch noch nicht bestünden, die eine Anwendung im grossen Massstab in Städten zulassen und den erheblichen finanziellen Aufwand rechtfertigten. Er forderte daher einen Leitfaden für die praktische Umsetzung photokatalytischer Oberflächen. Dass dieser Schritt von der Forschung und Entwicklung hin zur praktischen Anwendung entscheidend sei, um tatsächlich Nutzen aus dieser Technologie für die urbane Luftreinhaltung ziehen zu können, wurde an der Tagung mehrfach betont, auch von Baum (mündlich, 2015) der BAST. Sie resumierte, die photokatalytische Wirkung sei zwar generell nachgewiesen und anerkannt, die Technologie für die grossflächige Anwendung jedoch noch nicht reif. Scheja (mündlich, 2015) vom FAP vertrat die Auffassung, dass die angewandte Photokatalyse zwar nicht das städtische NO_2 -Problem lösen können, jedoch als eine von vielen Massnahmen einen kleinen Beitrag zur Zielerreichung leisten könne, was der Strategie von Wurzer et al. (2015) [75] entspricht (siehe Kapitel 7.3). Aufgrund der grossen Heterogenität photokatalytischer Technologien, Varianten und Produkte riet Kleffmann (mündlich, 2015) [83], das für ein bestimmtes Projekt vorgesehene Produkt unter realen Bedingungen zunächst im Feld kleinflächig zu testen und eine Kosten-Nutzen-Analyse durchzuführen. So könnten unliebsamen Überraschungen bei grossflächigen Anwendungen vorgebäugt werden und die Entscheidung durch Behörden für photokatalytische Massnahmen zur Luftreinhaltung transparent gemacht werden, so Kleffmann. Damit liessen sich photokatalytische Oberflächen mit vertretbarer Absicherung auch bereits vor einer etablierten Standardisierung durch einen Leitfaden oder Normen angewandt werden. Bei diesen Vorversuchen sollte laut Kleffmann auch geprüft werden, ob und in welchen Konzentrationen die toxische salpetrige Säure (HONO oder HNO_2) entsteht, die bei einigen Produkten aufgetreten sei.

Fazit. Aus den aufgezeigten Experten-Einschätzungen zu photokatalytischen Oberflächen wurde folgendes Fazit gezogen:

- Die Wirkung photokatalytischer Beläge ist nachgewiesen, die Wirksamkeit jedoch noch sehr gering und die Technologien noch nicht reif für die praktische Anwendung; eine Standardisierung und ein Leitfaden für die Praxis sind langfristig anzustreben
- Anwendungen können dennoch bereits heute mit vertretbarem Risiko gewagt werden, wenn vorgängig kleinflächige Tests mit dem spezifischen Produkt unter konkreten Bedingungen durchgeführt werden

- Der additiven Strategie folgend, dass viele kleine Wirkungen eine grosse ergeben, sollten Technologien der angewandten Photokatalyse weiter erforscht und entwickelt werden, wobei eine grössere aktive Oberfläche am aussichtsreichsten erscheint

9 Schlussfolgerungen

Die vorliegende Studie zur Machbarkeit der Minderung von Feinstaub oder dessen Vorläuforgasen durch spezielle Strassenbeläge lässt diese **Schlussfolgerungen** zu:

- Nach Wirkungsweise 2 **Technologie-Gruppen: lärm-reduzierende** und **photokatalytische Beläge**; erstere umfassen dünne und offenporige Asphalte, letztere TiO₂-Beschichtungen, -Inkorporation in Deckschicht, Einmischung TiO₂-Mörtel in Asphalt
- **Mangels Standards/Normen** kaum Vergleichbarkeit dieser Beläge
- **Vergleichbarkeit** der Wirksamkeiten erst **durch Normalisierung** auf Referenzwerte
- **Offenporige Asphalt-Beläge** am **wirksamsten** mit **9.3 %** Reduktion der Feinstaub-Konzentration in Strassennähe, beruht aber nur auf drei vorhandenen Publikationen
- Wirksamkeit der Reduktion der NO-Konzentration in Strassennähe für **photokatalytische Beläge** von **0.4 %** bis **2.5 %**
- **1 % Reduktion** der **Feinstaub-/NO-Konzentration** am **billigsten** für **offenporigen Asphalt**, bei photokatalytischen Belägen durchschnittlich 10 Mal höher
- **Offenporige Asphalt-Beläge** gegenüber Beschädigungen **empfindlicher** als konventionelle Asphalte und als photokatalytische Beläge
- **Griffigkeit offenporiger Beläge** bei **nasser Fahrbahn** wegen guter Drainage **erhöht**, bei Belägen mit **photokatalytischer Beschichtung** hingegen **verringert**
- **Unterhalt offenporiger Asphalt-Beläge** sehr **aufwändig**, besonders wegen deutlich **erhöhtem Streusalzverbrauch**, was auch **Umwelt belastet**
- **Fehlende Erfahrung** bezüglich **Recycling** und langfristiger **Umwelt-Auswirkungen photokatalytischer Beläge** birgt nicht absehbare Risiken und Kosten im Gegensatz zu offenporigem Asphalt

Daraus resultieren folgende **Empfehlungen** für den Einsatz dieser Strassenbeläge:

- **Offenporige Asphalt-Beläge** zur Feinstaub-Minderung zusätzlich zu anderen Massnahmen **direkt anwendbar**; scheinen auch **wirksam** zu sein, was durch **zusätzliche Studien** bestätigt werden müsste; allerdings stellten sich diese Beläge in Schweiz **für städtischen Bereich**, wo Feinstaub-Minderung am nötigsten, als **nicht gebrauchstauglich** heraus, da **für diese Beanspruchungen nicht konzipiert**
→ **zur Feinstaub-Reduktion ausserorts zu empfehlen, innerorts nicht**
- **Photokatalytische Beläge** verringern zwar Stickoxide und damit sekundären Feinstaub nachweislich, doch **für Einsatz in städtischen Luftreinhaltepraxis** im aktuellen Entwicklungsstadium **noch nicht wirksam genug**; zudem noch **nicht ausgeschlossen**, dass diese Beläge langfristig Umwelt mit allfälligen **anderen Schadstoffen** (ausser Feinstaub und Vorläuforgasen) belasten
→ **zur Feinstaub-Vorläuforgas-Minderung momentan nicht zu empfehlen**

Ein abschliessender **Ausblick** soll aufzeigen, welche Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten zur Reduktion von Feinstaub oder seiner Vorläuforgase weiterführen könnten:

- Für **offenporige Asphalt-Beläge** wäre Weiterentwicklung mit **geringerer Anfälligkeit auf Beschädigung** und längerer Nutzungsdauer sinnvoll
- **Semi-dichte Beläge** hinsichtlich Potenzial der Feinstaub-Reduktion **untersuchen**
- **Photokatalytische Beläge weiterentwickeln** hin zu höherer Wirksamkeit; vielversprechend ist dabei **Vergrösserung der aktiven Oberfläche**
- Für Vergleich- und Machbarkeit **Standardisierung** von **Technologien** und **Messmethoden** nötig; bis dahin Produkt in kleinflächigen **Vorversuchen** für konkreten Einsatzzweck im Feld testen und eine **Kosten-Nutzen-Analyse** durchführen
- **Einflüsse photokatalytischer Beläge** auf **Umwelt** intensiver und detaillierter **untersuchen**

Anhänge

I	Datei zur Ermittlung der Machbarkeit	79
---	--	----

I Datei zur Ermittlung der Machbarkeit

Eine editierbare Tabelle zur Ermittlung der Machbarkeit (Kapitel 6.1.6) steht als Anhang dieser Studie in elektronischer Form im Internet zur Verfügung und kann kostenlos heruntergeladen werden unter <http://www.mobilityplatform.ch>. Bei Eingabe einer spezifischen Gewichtung (Spalte C) für die verschiedenen Einzelkriterien (Spalte B) wird die Machbarkeit gesamt (Zeile 31), sowie für die übergeordneten Kriterien *Verfahrensschritte* (Zeile 8), *Fahrbahnbeeinflussung* (Zeile 17) und *Umweltverträglichkeit* (Zeile 24) automatisch ermittelt. Dabei ist darauf zu achten, dass die automatisch berechnete Summe der Gewichtungen aller Einzelkriterien in Zelle C31 genau 1 ergibt. Bei Fragen geben die Autoren dieser Studie gerne Auskunft.

Glossar

Begriff	Bedeutung
AC	Asphalt Concrete (dt. Asphalt-Beton) Konventionelle Asphaltsorte für Deckschichten
ACVTL	Asphalt Concrete Very Thin Layer (dt. sehr dünne Asphalt-Beton-Decke)
ADAC	Allgemeiner Deutscher Automobil-Club
ARE	Bundesamt für Raumentwicklung
ARTe	Aachener Rafeling Test (Labor-Test zur Simulation der Polierbeanspruchung von Strassenbelägen)
ASTM	American Society for Testing and Materials
ASTRA	Bundesamt für Strassen (Schweiz)
BAFU	Bundesamt für Umwelt
BASt	Bundesanstalt für Strassenwesen (Deutschland)
BFH-AHB	Berner Fachhochschule Architektur, Holz und Bau
BsAh	Beschichtung von Asphaltdecke mit TiO ₂ -Spray - heisse Methode
BsAk	Beschichtung von Asphaltdecke mit TiO ₂ -Spray - kalte Methode
BsB	Beschichtung von Betonfahrbahn mit TiO ₂ -Spray
BUWAL	Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (heute BAFU)
CEN	European Committee for Standardization
CO	Kohlenmonoxid
DIN	Deutsches Institut für Normung
DPAC	Double layer PAC (dt. doppelschichtiger PAC)
EF	Emissionsfaktor
EKL	Eidgenössische Kommission für Lufthygiene
EmMA	Einmischung von TiO ₂ -haltigem Mörtel in offenporigen Asphalt
EN	Europäische Norm
EU	Europäische Union
Euro 4, 5, 6	Standards der Europäischen Union zur Einstufung der Emissionen von Kraftfahrzeugen
FAP	Fachverband Angewandte Photokatalyse
HCHO	Formaldehyd
HMA	Hot Mix Asphalt (dt. Heiss(-misch-)asphalt); Mischung und Verdichtung bei 163 °C
HNO ₃	Salpetersäure
HNO ₂	Salpetrige Säure (auch HONO)
HONO	Salpetrige Säure (auch HNO ₂)
IkA	Asphalt-Belag mit inkorporierten TiO ₂ -Nanopartikeln
IkB	Betonplatte mit inkorporierten TiO ₂ -Nanopartikeln
IkMA	Gebrochene Mörtelkörner mit inkorporiertem TiO ₂ als Abstreumaterial auf Asphalt-Belag mit Epoxidharz-Trennschicht
IkMAx	Variante von IkMA ohne Epoxidharz-Trennschicht
IkV	Beton-Verbundsteine mit inkorporierten TiO ₂ -Nanopartikeln
ISO	International Organization for Standardization

LRV	Luftreinhalte-Verordnung
MB	Methylenblau (Farbstoff zur Bestimmung der photokatalytischen Aktivität)
NO	Stickstoffmonoxid
NO ₂	Stickstoffdioxid
NO ₃ ⁻	Nitrat
NO _x	Stickoxide
O ₃	Ozon
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
PA	Porous Asphalt (dt. offenerporiger Asphalt) Der hohe Anteil grober Korngrössenfraktionen dieses Asphalts führt zu einem zusammenhängendem Porensystem, was die Drainage begünstigt
PAC	Porous Asphalt Concrete (dt. offenerporiger Asphalt-Beton)
PG	Performance Grade (dt. Leistungssorte)
PhotoPAC	Photocatalytic remediation Processes on Air Quality (Projekt des EU-Programms LIFE+)
PM10	Particulate matter (dt. Feinstaub) mit Partikelgrössen < 10 µm
PSV	Polished Stone Value (dt. Polierwert; Widerstandsfähigkeit einer Gesteinskörnung gegenüber der polierenden Wirkung der Verkehrsbelastung)
RH	Relative Humidity (dt. Relative Luftfeuchtigkeit)
SBS	Styrene-Butadiene-Styrene, ein gummiartiger Modifizierer von Asphalt
SCRIM	Sidewayforce Coefficient Routine Investigation Machine (Verfahren zur Bestimmung der Griffigkeit von Fahrbahnen)
SDA	Semi-dichter Asphalt Asphalt mit einer Dichte zwischen derjenigen von AC und PA; relativ neu, daher noch nicht nach SN normiert
SMA	Splitt Mastix Asphalt Herkömmliche, heute in der Schweiz kaum noch eingesetzte Asphaltart mit einem hohen Bitumen- und Splittanteil zur Anwendung für Deckschichten
SN	Schweizer Norm
SPAC	Single layer PAC (dt. einschichtiger PAC)
SO ₂	Schwefeldioxid
SO _x	Schwefeloxide
SRT	Skid Resistance Tester (Pendel zur Messung der Griffigkeit von Strassenbelägen)
SYPHOMA	System for evaluation of the PHotoactivity of Materials (dt. System zur Bewertung der Photoaktivität von Materialien)
TiO ₂	Titandioxid
TSF	Thin bituminous surfacing (dt. dünne bituminöse Deckschicht)
UNI	Italian Organization for Standardization
UV	Ultraviolette/s Strahlung/Licht mit einem Wellenlängenspektrum von 10 – 380 nm
UVA	UV-Teilspektrum mit Wellenlängen von 315 - 380 nm
UVM	Umweltorientiertes Verkehrsmanagement
VOCs	Volatile Organic Compounds (dt. flüchtige organische Verbindungen)
VSS	Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute
WMA	Warm Mix Asphalt (dt. Warm- oder Niedrigtemperaturasphalt); Mischung und Verdichtung bei 143 °C
WS	Wind Speed (dt. Windgeschwindigkeit)

Literaturverzeichnis

Verordnungen

- [1] Schweizerische Eidgenossenschaft (1985), „**Luftreinhalte-Verordnung (LRV) vom 16. Dezember 1985 (Stand am 15. Juli 2010)**“, SR 814.318.142.1, www.admin.ch.

Normen

- [2] Deutsches Institut für Normung e. V. DIN (2010), „**Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 2: Verfahren zur Bestimmung des Widerstandes gegen Zertrümmerung**“, DIN EN 1097-2:2010-07, Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [3] Deutsches Institut für Normung e. V. DIN (2009), „**Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 8: Bestimmung des Polierwertes**“, DIN EN 1097-8:2009-10, Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [4] European Commission for Standardization CEN (1998), „**Tests for mechanical and physical properties of aggregates. Determination of the resistance to wear by abrasion from studded tyres. Nordic test**“, EN 1097-9:1998, Brussels: CEN.
- [5] International Organization for Standardization ISO (2007), „**Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) - Test method for air-purification performance of semiconducting photocatalytic materials - Part 1: Removal of nitric oxide**“, ISO 22197-1:2007, Geneva: ISO.
- [6] Deutsches Institut für Normung e. V. DIN (1999), „**Luftbeschaffenheit - Ermittlung der PM 10-Fraktion von Schwebstaub - Referenzmethode und Feldprüfverfahren zum Nachweis der Gleichwertigkeit von Messverfahren und Referenzmessmethode**“, DIN EN 12341:1999-03, Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [7] Italian Organization for Standardization UNI (2007), „**Determination of the catalytic degradation of nitrogen oxides in air by photocatalytic inorganic materials**“, UNI 11247:2007, Milan: UNI.
- [8] American Society for Testing and Materials ASTM International (1990), „**Standard Guide for Determination of VOC Emissions in Environmental Chambers from Materials and Products**“, ASTM D 5116:1990, West Conshohocken, PA, USA: ASTM.
- [9] Italian Organization for Standardization UNI (2010), „**Determination of the degradation of nitrogen oxides in the air by inorganic photocatalytic materials: continuous flow method**“, UNI 1247:2010, Milan: UNI.

Dokumentation

- [10] D. Möller (2009), „**Feinstaubbelastung: Ursachen und Gesundheitsgefährdung**“, *Forum der Forschung*, vol. 22, S. 117-126.
- [11] C. Hüglin, M. Gianini, und R. Gehrig (2012), „**Chemische Zusammensetzung und Quellen von Feinstaub**“, <http://www.bafu.admin.ch/luft/00575/00578/index.html?lang=de>.
- [12] Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL (2005), „**Feinstaub eindämmen - für bessere Luft in der Stadt**“, Bern: BUWAL, 5 S.
- [13] Ostluft (2007), „**Faktenblatt Feinstaub PM 10 - Aktueller Wissensstand, Belastung und Massnahmen in der Ostschweiz**“, Zürich: Frasuk - Franziska Siegrist, Umwelt & Kommunikation, 5 S.
- [14] Eidgenössische Kommission für Lufthygiene EKL (2007), „**Feinstaub in der Schweiz**“, Bern: EKL, 141 S.
- [15] Ecoplan und Infras (2014), „**Externe Effekte des Verkehrs 2010 - Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten**“, Bern: Bundesamt für Raumentwicklung ARE, 607 S.
- [16] Bundesamt für Umwelt BAFU (2015), „**Feinstaub - Fragen und Antworten zu Eigenschaften, Emissionen, Immissionen, Auswirkungen und Massnahmen**“, Bern: Bundesamt für Umwelt BAFU, 34 S.
- [17] R. Gehrig, K. Zeyer, N. Bukowiecki, P. Lienemann, L. D. Poulikakos, M. Furger, et al. (2010), „**Mobile load simulators - A tool to distinguish between the emissions due to abrasion and resuspension of PM10 from road surfaces**“, *Atmospheric Environment*, vol. 44, pp. 4937-4943.
- [18] Bundesamt für Umwelt BAFU (2015), „**Karte Feinstaub (PM10): Jahresmittel**“, <http://www.bafu.admin.ch/luft/luftbelastung/schadstoffkarten/feinstaub/index.html?lang=de>.
- [19] K. Veisten and J. Akhtar (2011), „**Cost-benefit analysis of low-noise pavements: dust into the calculations**“, *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 12, pp. 75-86.
- [20] A. Ropertz, N. Suritsch, R. Dutzi, G. Wächter, T. Beckenbauer, M. Männel, et al. (2010), „**Einfluss von offenporigem Asphalt auf die Feinstaubbelastung an Strassen**“, *Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik*, Heft 1039, Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft, 56 S.
- [21] A. Ropertz (2011), „**Einfluss von offenporigem Asphalt auf die Feinstaubbelastung an Strassen**“, präsentiert am *Kolloquium Luftqualität an Strassen 2011*, Bergisch Gladbach, Deutschland.

- [22] B. Schmid (2015), **"Mündliche Kommunikation"**, Laboroute SA, Domdidier.
- [23] T. Ibusuki and K. Takeuchi (1994), **"Removal of low concentration nitrogen-oxides through photoassisted heterogeneous catalysis"**, *Journal of Molecular Catalysis*, vol. 88, pp. 93-102.
- [24] M. Crispino, S. Lambrugo, and M. Bacchi (2009), **"Photocatalytic road pavements: An analysis of structural and functional performances"**, *Efficient Transportation and Pavement Systems: Characterization, Mechanisms, Simulation, and Modeling*, In: Proceedings of the 4th International Gulf Conference on Roads, 2008, Doha, Qatar, pp. 827-835.
- [25] M. Crispino (2014), **"Photocatalytic pavements: a review (applications and completed projects)"**, presented at the *Life+ PhotoPAQ Conference*, Lyon, France.
- [26] M. Gallus, R. Ciuraru, F. Mothes, V. Akylas, F. Bampas, A. Beeldens, et al. (2015), **"Photocatalytic abatement results from a model street canyon"**, *Environmental Science and Pollution Research*, Published online: 16 July 2015.
- [27] Eidgenössische Kommission für Lufthygiene EKL (2013), **"Feinstaub in der Schweiz 2013"**, http://www.ekl.admin.ch/fileadmin/ekl-dateien/themen/Feinstaub_in_der_Schweiz_2013.pdf.
- [28] D. Wang, M. Hüben, M. Oeser, and B. Steinauer (2014), **"Umweltfreundlicher Strassenbelag mit photokatalytischem Stickstoffdioxidabbau"**, *Bautechnik*, vol. 91, S. 720-727.
- [29] S. Laufs, G. Burgeth, W. Duttlinger, R. Kurtenbach, M. Maban, C. Thomas, et al. (2010), **"Conversion of nitrogen oxides on commercial photocatalytic dispersion paints"**, *Atmospheric Environment*, vol. 44, pp. 2341-2349.
- [30] J. Sauer, S. Metzger, and A. Baum (2015), **"Photokatalytisch aktive Lärmschutzwand-Oberflächen zur Minderung der Stickoxidbelastung"**, präsentiert am *Kolloquium Luftqualität an Strassen 2015*, Bergisch Gladbach, Deutschland.
- [31] M. Gallus, V. Akylas, F. Bampas, A. Beeldens, E. Boonen, A. Boreave, et al. (2015), **"Photocatalytic depollution in the Leopold II tunnel in Brussels: NO_x abatement results"**, *Building and Environment*, vol. 84, pp. 125-133.
- [32] D. Wang und A. Meyer (2012), **"Umweltfreundlicher Straßenbelag mit Abgasnachbehandlung durch photokatalytischen Stickstoffdioxidabbau unter Nutzung der Nanotechnologie"**, http://www.isac.rwth-aachen.de/aw/cms/website/themen/forschung/laufende_forschungsvorhaben.
- [33] Fachverband angewandte Photokatalyse FAP (2014), **"Produktspektrum des Fachverbandes Angewandte Photokatalyse"**, <http://vdmi.de/deutsch/produkte/angewandte-photokatalyse>.
- [34] A. Federer (2014), **"Beschichtung gegen Umweltverschmutzung?"**, *Intelligent Bauen*, vol. 6, S. 36.
- [35] J. O. Carneiro, S. Azevedo, V. Teixeira, F. Fernandes, E. Freitas, H. Silva, et al. (2013), **"Development of photocatalytic asphalt mixtures by the deposition and volumetric incorporation of TiO₂ nanoparticles"**, *Construction and Building Materials*, vol. 38, pp. 594-601.
- [36] C. Brovelli and M. Crispino (2013), **"Photocatalytic Suspension for Road Pavements: Investigation on Wearing and Contaminant Effects"**, *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 25, pp. 548-554.
- [37] M. Staub (2015), **"Der weisse Riese lernt das Laufen"**, *Baublatt*, vol. 7, S. 14-18.
- [38] J. Auvinen and L. Wirtanen (2008), **"The influence of photocatalytic interior paints on indoor air quality"**, *Atmospheric Environment*, vol. 42, pp. 4101-4112.
- [39] PICADA (2006), **"Photocatalytic Innovative Coverings Applications for Depollution Assessment"**, EU-project, <http://www.picada-project.com/domino/SitePicada/Picada.nsf?OpenDataBase>.
- [40] Bundesanstalt für Strassenwesen BASt (2012), **"Photokatalytische Oberflächen gegen Luftschadstoffbelastung"**, vol. 2, Bergisch Gladbach: BASt, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit, S. 1.
- [41] T. Lammering, C. Schlötzer und S. Riffel (2015), **"Pilotprojekt ZOB-Detmold mit photokatalytisch aktiver Betonoberfläche"**, präsentiert am *Kolloquium Luftqualität an Strassen 2015*, Bergisch Gladbach, Deutschland.
- [42] G. Hüsken, M. Hunger and H. J. H. Brouwers (2009), **"Experimental study of photocatalytic concrete products for air purification"**, *Building and Environment*, vol. 44, pp. 2463-2474.
- [43] L. Mohammad and M. Hassan (2010), **"Characterization of Ultrafine Titania Modified Asphalt Binders"**, presented at the *International Workshop on Energy and Environment in the Development of Sustainable Asphalt Pavements*, Xian, China.
- [44] L. Mohammad, M. Hassan and S. Cooper, III (2012), **"Mechanical Characteristics of Asphaltic Mixtures Containing Titanium-Dioxide Photocatalyst"**, *Journal of Testing and Evaluation*, vol. 40, pp. 998-1005.
- [45] M. M. Ballari, M. Hunger, G. Hüsken, and H. J. H. Brouwers (2010), **"NO_x photocatalytic degradation employing concrete pavement containing titanium dioxide"**, *Applied Catalysis B-Environmental*, vol. 95, pp. 245-254.
- [46] M. M. Ballari, Q. L. Yu, and H. J. H. Brouwers (2011), **"Experimental study of the NO and NO₂ degradation by photocatalytically active concrete"**, *Catalysis Today*, vol. 161, pp. 175-180.

-
- [47] S. Ifang, M. Gallus, S. Liedtke, R. Kurtenbach, P. Wiesen, and J. Kleffmann (2014), **“Standardization methods for testing photo-catalytic air remediation materials: Problems and solution”**, *Atmospheric Environment*, vol. 91, pp. 154-161.
-
- [48] S. Dünner (2015), **“Mündliche Kommunikation”**, Walo Bertschinger Central AG, Zentrale Labordienste, Schlieren.
-
- [49] S. Suarez, R. Portela, M. D. Hernandez-Alonso, and B. Sanchez (2014), **“Development of a versatile experimental setup for the evaluation of the photocatalytic properties of construction materials under realistic outdoor conditions”**, *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 21, pp. 11208-11217.
-
- [50] A. Scheja, H. Liewald, C. Ackerhans, T. Schmidt, and F. Menzel (2015), **“Fachverband angewandte Photokatalyse: Projekte - Aktivitäten - Visionen”**, präsentiert am *Kolloquium Luftqualität an Strassen 2015*, Bergisch Gladbach, Deutschland.
-
- [51] L. Venturini and M. Bacchi (2009), **“Research, Design and Development of a Photocatalytic Asphalt Pavement”**, presented at the 2nd International Conference *Environmentally Friendly Roads ENVIROAD*, Warsaw, Poland.
-
- [52] M. Chen and Y. H. Liu (2010), **“NO_x removal from vehicle emissions by functionality surface of asphalt road”**, *Journal of Hazardous Materials*, vol. 174, pp. 375-379.
-
- [53] M. Chen and J. W. Chu (2011), **“NO_x photocatalytic degradation on active concrete road surface - from experiment to real-scale application”**, *Journal of Cleaner Production*, vol. 19, pp. 1266-1272.
-
- [54] G. Theis und C. Hüglin (2015), **“Persönliche Kommunikation”**, Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern, und Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology EMPA, Dübendorf.
-
- [55] W. Tischer und M. Herrchen (2009), **“Verbesserung der Luftqualität durch photokatalytisches Pflaster”**, Fulda: F.C. Nüdling Betonelemente GmbH + Co. KG, und Schmallenberg: Fraunhofer Institut für Molekularbiologie und angewandte Oekologie, gefördert durch die *Deutsche Bundesstiftung Umwelt DBU*, Förderkennzeichen AZ 25306-31, 80 S.
-
- [56] Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL (2004), **“Immissionsmessung von Luftfremdstoffen - Messempfehlungen”**, *Bericht-Nr. VU-5003-D*, Bern: BUWAL, 49 S.
-
- [57] R. Kocherhans, T. Hirt, und G. Blaise (2006), **“Lärmsanierung mit Drainasphalt im Urner Reusstal”**, *Strasse und Verkehr*, S. 29-34.
-
- [58] F. Menzel (2015), **“Mündliche Kommunikation”**, Fachverband angewandte Photokatalyse, Frankfurt am Main.
-
- [59] M. Crispino, C. Brovelli, G. L. Guerrini, and L. Venturini. (2011), **“Innovation materials for road construction: Photocatalytic road pavements”**, presented at the 24th *World Road Congress*, Mexico City, Mexico.
-
- [60] S. Böhm, P. Btreitbach, V. Root, und T. Wallrabenstein (2013), **“Offene Asphalte Teil I: Wasserdurchlässiger Asphalt”**, *Asphalt*, Bonn: Deutscher Asphaltverband e.V., 29 S.
-
- [61] C. Angst, F. Beltzung, D. Bosshardt, H. J. Grolimund, und H. Pestalozzi (2008), **“Lärmarme Beläge innerorts. Schlussbericht 2007 – Kurzfassung”**, Bern: Bundesamt für Umwelt BAFU und Bundesamt für Strassen ASTRA, 23 S.
-
- [62] W. Schulte (2004), **“Offenporiger Asphalt - Lärmschutzwirkung, -bedingungen und -dauer”**, *Asphalt*, vol. 2, S. 1-6.
-
- [63] B. Kloeppner (2015), **“Mündliche Kommunikation”**, F.C. Nüdling Betonelemente GmbH + Co. KG, Fulda.
-
- [64] K. Hund-Rinke and M. Simon (2006), **“Ecotoxic effect of photocatalytic active nanoparticles TiO₂ on algae and daphnids”**, *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 13, pp. 225-232.
-
- [65] L. Drüschner, H. Els, U. Habermann, B. Nolle, V. Rauschenbach, S. Sadzulewsky, et al. (2006), **“Asphaltdeckschichten mit anforderungsgerechter Griffigkeit - Massnahmen zur Planung und Ausführung”**, Bonn: Deutscher Asphaltverband, 28 S.
-
- [66] H. Eifert (2007), **“Der Bau von Betonfahrbahndecken auf Strassen”**, *Zement-Merkblatt Strassenbau S2*, Düsseldorf: Verein Deutscher Zementwerke e.V., 8 S.
-
- [67] D. Wang, M. Hüben, Z. Leng, M. Oeser, and B. Steinauer (2015), **“Herstellung und Laboruntersuchung von TiO₂-haltigem Abstreumaterial zum Stickstoffdioxidabbau”**, *Bauingenieur*, vol. 90, S. 140-146.
-
- [68] C. Angst, F. Beltzung, D. Bosshardt, H. J. Grolimund, und E. Bühlmann (2010), **“Lärmarme Strassenbeläge innerorts - Jahresbericht 2009”**, Bern: Bundesamt für Strassen ASTRA und Bundesamt für Umwelt BAFU, 54 S.
-
- [69] J. Litzka, W. Pracherstorfer, A. Vycudil, und H. Augustin (1999), **“Beurteilung der Drainasphaltreinigung aus ökologischer und ökonomischer Sicht”**, Heft 489. Wien: Bundesministerium für wirtschaftliche Angelegenheiten, 101 S.
-

-
- [70] H. Dylla and M. M. Hassan (2012), "**Characterization of nanoparticles released during construction of photocatalytic pavements using engineered nanoparticles**", *Journal of Nanoparticle Research*, vol. 14, pp. 825-839.
-
- [71] L. Seiler (2015), „**Mündliche Kommunikation**“, Bundesamt für Strassen ASTRA, Bern.
-
- [72] P. Frach, D. Gloss, M. Vergohl, K. Hund-Rinke, and I. Trick (2007), "**Physico-chemical and microbiological effect sputtered photocatalytic titanium oxide layers**", *Vakuum in Forschung und Praxis*, vol. 19, pp. 20-27.
-
- [73] K. Rose (2012), „**Luftreinhaltung und Schadstoffabbau**“, *Fraunhofer-Institut für Silicathforschung ISC - Jahresbericht 2011/12*, S. 74-77.
-
- [74] C. Schneider, A. Niederau, S. Turhahn, und M. Pelzer (2013), „**MARLIS - Massnahmen zur Reinhaltung der Luft in Bezug auf Immissionen an Strassen**“, Datenbank auf CD, Bergisch Gladbach: Bundesanstalt für Strassenwesen BAST.
-
- [75] S. Wurzler, H. Hebbinghaus, H. G. Schlich, I. Steckelbach, L. Schmidt, T. Schöllnhammer, et al. (2015), „**Minderung des urbanen NO₂-Problems: Lösungsansätze und ihre Wirkungen**“, präsentiert am *Kolloquium Luftreinhaltung durch Photokatalyse*, Bergisch Gladbach, Deutschland.
-
- [76] A. Baum, J. Sauer, and S. Metzger (2015), „**Anwendungsmöglichkeiten und erste Ergebnisse aus Pilotstudien zur Photokatalyse an Strassenbauwerken**“, präsentiert am *Kolloquium Luftreinhaltung durch Photokatalyse*, Bergisch Gladbach, Deutschland.
-
- [77] F. Bommert (2015), „**Telefonische Auskunft**“, Bundesanstalt für Strassenwesen BAST, Bergisch Gladbach, Deutschland.
-
- [78] R. Greber (2015), „**Telefonische Auskunft**“, Belagswerk Hasle AG BLH, Hasle b. Burgdorf.
-
- [79] E. Hammer (2015), „**Telefonische Auskunft**“, Grolimund + Partner AG, Bern.
-
- [80] M. Niedermeier (2015), „**Mündliche Kommunikation**“, ADAC e.V., München.
-
- [81] M. Böttger, T. Graumann, R. Boughaled, F. Neumann, W. Kowalsky, and H. H. Johannes (2013), "**Development of a new qualification method for photocatalytically active surfaces based on a solid state luminescent dye**", *Journal of Photochemistry and Photobiology, A-Chemistry*, vol. 253, pp. 7-15.
-
- [82] H. C. Krempels (2015), „**Mündliche Kommunikation**“, Fachverband angewandte Photokatalyse (FAP), Frankfurt am Main.
-
- [83] J. Kleffmann (2015), „**Mündliche Kommunikation**“, Bergische Universität Wuppertal.
-
- [84] D. Bahnemann (2015), „**Mündliche Kommunikation**“, Leibniz Universität Hannover.
-
- [85] T. Flassak (2015), „**Mündliche Kommunikation**“, Lohmeyer Ingenieurbüro GmbH & Co. KG, Karlsruhe.
-
- [86] U. Reuter (2015), „**Mündliche Kommunikation**“, Landeshauptstadt Stuttgart, Amt für Umweltschutz - Stadtklimatologie.
-

Projektabschluss



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Version vom 09.10.2013

Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 12./22.10.2015

Grunddaten

Projekt-Nr.: VSS 2012/402

Projekttitel: Machbarkeitsstudie zur Reduktion von Feinstaub oder seiner Vorläufergase mittels spezieller Strassenbeläge

Enddatum: 30.11.2015

Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

In der Schweiz konnte die Feinstaub-Belastung gemäss Angaben des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) während der letzten zehn Jahre deutlich verringert werden. Dennoch werden die Grenzwerte in Städten teilweise noch immer überschritten, sodass weitere Anstrengungen nötig sind. In dieser Studie wurde daher analysiert, inwiefern sich spezielle Strassenbeläge eignen, Feinstaub oder dessen Vorläufergase im bodennahen Strassenraum zu vermindern.

Untersucht wurden insgesamt neun verschiedene Belagstechnologien: dünne bituminöse und offenporige Asphalt-Deckschichten, die zusammen die lärm-reduzierenden Beläge bilden, sowie sieben unterschiedliche photokatalytische Beläge mit Titandioxid-Partikeln. Lärm-reduzierende Beläge vermindern Feinstaub direkt, photokatalytische indirekt, indem sie Feinstaub-Vorläufergase reduzieren, hier Stickstoffmonoxid. Um die untersuchten Beläge bezüglich ihrer Wirksamkeit, die Feinstaub- oder Stickoxid-Konzentration zu senken, vergleichen zu können, wurden die Angaben aus der Literatur zunächst auf einheitliche Referenzwerte für die zahlreichen Einflussfaktoren umgerechnet, das heisst normalisiert.

Unter den lärm-reduzierenden Belägen erwiesen sich dünne bituminöse Deckschichten als unwirksam oder gar kontraproduktiv und wurden daher nicht weiter betrachtet. Offenporige Beläge zeigten hingegen die höchste Wirksamkeit mit einer Reduktion der Feinstaub-Konzentration um etwa 9 %. Die verschiedenen photokatalytischen Beläge vermögen die Stickstoffmonoxid-Konzentrationen in Strassennähe um durchschnittlich 1 % zu verringern, minimal um 0.4 %, maximal um 2.5 %. Als Kosten für eine einprozentige Konzentrationsminderung des jeweiligen Luftschadstoffs pro Quadratmeter und Jahr ergaben sich im Fall offenporiger Beläge 10 Rappen und durchschnittlich neun Mal so viel im Fall photokatalytischer Beläge.

Offenporige Asphalt-Beläge erwiesen sich jedoch in der Schweiz für den Einsatz innerorts als zu wenig gebrauchstauglich, insbesondere aufgrund der hohen Empfindlichkeit beim Einbau und gegenüber den starken Beanspruchungen des Stadtverkehrs, sowie des deutlich erhöhten Streusalzbedarfs. So können sie zwar ausserorts zur Feinstaub-Minderung eingesetzt, innerorts aber nicht empfohlen werden. Für photokatalytische Beläge konnte bis heute nicht zweifelsfrei nachgewiesen werden, dass die verwendeten Titandioxid-Nanopartikel und die photochemischen Reaktionsprodukte langfristig unschädlich für die Umwelt sind, was seitens des BAFU ein Ausschlusskriterium für den Einsatz eines Strassenbelags darstellt. Zudem sind die Wirksamkeiten der Feinstaub-Vorläufergas-Minderung zu gering, als dass sich der Mehraufwand lohnen würde. Sie werden daher nicht zur Anwendung empfohlen.

Künftig sollte untersucht werden, inwiefern sich semi-dichte Asphalt-Beläge zur Minderung von Feinstaub innerorts eignen, da sie robuster als offenporige sind. Ebenfalls sinnvoll wäre die Weiterentwicklung offenporiger Beläge mit geringerer Empfindlichkeit. Schliesslich sollte die Unbedenklichkeit photokatalytischer Beläge für die Umwelt nachgewiesen und ihre Wirksamkeit der Feinstaub-Vorläufergas-Reduktion gesteigert werden. Ein vielversprechender Ansatz ist dabei die Vergrösserung der aktiven Oberfläche.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

Zielerreichung:

Die Projektziele konnten weitgehend erfüllt werden:

Vorhandene Technologien zur Reduktion von Feinstaub oder seiner Vorläufergase mittels spezieller Strassenbeläge sind nach dem aktuellen Stand der Forschung und Technik zusammengestellt und strukturiert. Die in der Literatur angegebenen Wirksamkeiten der Konzentrationsverringerung von Feinstaub oder seiner Vorläufergase konnten für die einzelnen Technologien anhand von Gleichungen, die auf Literatordaten basieren, auf einheitliche Referenzwerte umgerechnet werden. Mit dieser Normalisierung wurde es erst möglich, die verschiedenen Technologien hinsichtlich ihrer Wirksamkeit zu vergleichen.

Zudem konnte die Machbarkeit der betrachteten Belagstechnologien jeweils gegenüber einem definierten Referenzbelag anhand einheitlicher Kriterien zu Verfahrensschritten, Fahrbahnbeflussung und Umweltverträglichkeit bewertet werden. Für die Hälfte der untersuchten Technologien konnten flächen- und zeitbezogene Kosten und die Nutzungsdauer von Anbietern erfragt und somit das Kosten-Nutzen-Verhältnis ermittelt werden. Als Nutzen floss dabei ausschliesslich die Wirksamkeit der Reduktion von Feinstaub oder seiner Vorläufergase ein. Aus den gewonnenen Resultaten sowie eingeholten Experten-Einschätzungen konnten Schlussfolgerungen gezogen und Empfehlungen für die Anwendbarkeit von Strassenbelägen zur Feinstaub- beziehungsweise Vorläufergas-Reduktion in der Schweiz gegeben werden.

Folgerungen und Empfehlungen:

Dünne bituminöse Deckschichten (TSF-Beläge, ähnlich den Schweizer ACVTL-Belägen) bewirken nicht nur keine Feinstaub-Reduktion, sondern erhöhen sogar dessen Konzentrationen tendenziell. Daher ist von deren Einsatz zur Feinstaub-Minderung in jedem Fall abzuraten.

Offenporige Asphalt-Beläge sind zur Feinstaub-Minderung zusätzlich zu anderen Massnahmen direkt anwendbar und scheinen auch wirksam zu sein, was durch zusätzliche Studien bestätigt werden müsste. Allerdings stellten sich diese Beläge in der Schweiz für den städtischen Bereich, wo die Feinstaub-Minderung am nötigsten wäre, als nicht gebrauchstauglich heraus, da sie für diese Beanspruchungen nicht konzipiert sind. Offenporige Asphalt-Beläge sind daher zur Feinstaub-Reduktion ausserorts zu empfehlen, innerorts jedoch nicht.

Photokatalytische Beläge verringern zwar Stickoxide und damit sekundären Feinstaub nachweislich, sind jedoch für den Einsatz in der städtischen Luftreinhaltepraxis im aktuellen Entwicklungsstadium nicht wirksam genug. Zudem kann zum heutigen Zeitpunkt nicht ausgeschlossen, dass diese Beläge langfristig die Umwelt mit allfälligen anderen Schadstoffen (ausser Feinstaub und dessen Vorläufergasen) belasten. Auch photokatalytische Beläge können daher zur Feinstaub-Vorläufergas-Minderung momentan nicht empfohlen werden.

Publikationen:

Ausser dem ASTRA-Schlussbericht ist einerseits eine Publikation in einer peer-reviewten, internationalen Zeitschrift geplant, zum Beispiel in "Atmospheric Environment", "Environmental Science and Pollution Research", "Building and Environment" oder "Journal of Cleaner Production". Denn ein systematischer Vergleich verschiedener Technologien beziehungsweise Varianten zur Reduktion von Feinstaub oder seiner Vorläufergase wie in dieser Studie, wurde bisher noch nicht durchgeführt.

Andererseits sollen die Resultate dieser Studie auch in "Strasse und Verkehr" publiziert werden, der Schweizer Fachzeitschrift des Verkehrsinfrastrukturbaus. Damit soll ein breites Fachpublikum in der Schweiz erreicht werden.

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Stolz

Vorname: Martin

Amt, Firma, Institut: Berner Fachhochschule Architektur, Holz und Bau

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Formular Nr. 3: Projektabschluss

Beurteilung der Begleitkommission:

Beurteilung:

Die Studie stellt die Technologien spezieller Strassenbeläge zur Reduktion von Feinstaub oder dessen Vorläufergasen nach dem aktuellen Stand der Forschung und Technik umfassend und gut strukturiert zusammen. Die heterogenen Angaben in der Literatur zur Wirksamkeit der neun analysierten Technologien hinsichtlich der Feinstaub- beziehungsweise Vorläufergas-Reduktion konnten anhand von Gleichungen auf Referenzbedingungen normalisiert und damit verglichen werden. Die Machbarkeit wirksamer Technologien wurde hinsichtlich deren Verfahrensschritten, Fahrbahneinflussung und Umweltverträglichkeit detailliert analysiert und transparent bewertet. Je nach Gewichtung der einzelnen Kriterien kann diese Bewertung zudem einer konkreten Situation angepasst werden.

Durch das berechnete Kosten-Nutzen-Verhältnis wird ersichtlich, was eine einprozentige Reduktion der Feinstaub-/Vorläufergas-Konzentration durch eine Technologie pro Quadratmeter und Jahr zusätzlich gegenüber dem Referenzbelag kostet. Schlussendlich konnte keiner der untersuchten Beläge für die Feinstaub-/Vorläufergas-Reduktion empfohlen werden: dünne bituminöse Decken (ACVTL) erhöhen die Feinstaub-Konzentration sogar, offenporige Asphalte (PA), ebenfalls zur Gruppe der lärm-mindernden Beläge gehörend, sind zu empfindlich für die hohen Verkehrsbelastungen innerorts, und photokatalytische Beläge (PKB) weisen zu geringe Wirksamkeiten auf und bergen unabsehbare Umweltrisiken. Die Forschungsfragen, welche Anlass zu diesem Projekt gaben, konnten damit geklärt werden.

Umsetzung:

Für die Praxis bedeuten die Resultate dieser Studie, dass zur Feinstaub- beziehungsweise Vorläufergas-Reduktion zumindest in den nächsten Jahren nicht in spezielle Belagstechnologien zu diesem Zweck investiert werden sollte, sondern in alternative Massnahmen mit hoher Wirksamkeit.

weitergehender Forschungsbedarf:

Offenporige Asphalt-Beläge sollten weiterentwickelt werden hin zu geringerer Anfälligkeit auf Beschädigung und längerer Nutzungsdauer, photokatalytische Beläge zu höherer Wirksamkeit (eventuell über eine vergrösserte aktive Oberfläche). Zudem bedarf es der Untersuchung, inwiefern sich semi-dichte Beläge zur Feinstaub-Reduktion eignen. Für eine einfachere Vergleich- und Machbarkeit der Technologien sollte auf standardisierte Messmethoden hingewirkt werden. Schliesslich gilt es, die Einflüsse photokatalytischer Beläge auf die Umwelt intensiver zu untersuchen und transparent aufzuzeigen.

Einfluss auf Normenwerk:

Diese Studie hat keinen Einfluss auf das Normenwerk.

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Dünner

Vorname: Sandra

Amt, Firma, Institut: Walo Bertschinger Central AG

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:


VSS FK3:  M. Hegener

Forschung im Strassenwesen des UVEK: Formular 3

Seite 3 / 3

Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

Stand: 01.10.2015

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1522	VSS 2011/106	Normierte gesamtverkehrliche Erschliessungsqualitäten - Grundlagenbericht	2015
1520	ASTRA 2008/013_OBF	Nächtliche Immissionsprognosen von Strassenlärm (Hochleistungsstrassen)	2015
1519	VSS 2009/201	Lärmimmissionen bei Knoten und Kreiseln	2015
1518	SVI 2011/024	Langsamverkehrsfreundliche Lichtsignalanlagen	2015
1517	VSS 2011/103	Bemessungsverkehrsstärken: Ein neuer Ansatz	2015
1516	VSS 2011/711	Forschungspaket Nutzensteigerung für die Anwender des SIS: EP1: Zeitaspekte und Historisierung	2015
1514	VSS 2006/513_OBF	Forschungspaket Brückenabdichtungen: EP3 - Langzeitverhalten des Verbundes	2015
1513	VSS 2005/403	Fliesskoeffizienten von feinen Gesteinskörnungen aus der Schweiz	2015
1512	SVI 2004/069	Veloverkehr in den Agglomerationen - Einflussfaktoren, Massnahmen und Potenziale	2015
1511	VSS 2012/601	Die Physik zwischen Salz, Schnee und Reifen	2015
1510	VSS 2005/453	Forschungspaket Recycling von Ausbauasphalt in Heissmischgut: EP2: Mehrfachrecycling von Strassenbelägen	2015
1509	ASTRA 2010/022	Markt- und Nutzermonitoring Elektromobilität (MANUEL)	2015
1508	VSS 2011/716	Forschungspaket Nutzensteigerung für die Anwender des SIS: EP6: Schnittstellen aus den Auswertungssystemen SIS (SIS-DWH)	2015
1507	FGU 2007/004	TBM Tunneling in Faulted and Folded Rocks	2015
1506	VSS 2006/512_OBF	Forschungspaket Brückenabdichtungen: EP2 - Flüssigkunststoff-Abdichtungen, Erfassen der Verbundproblematik	2015
1505	VSS 2006/509	Abdichtungssysteme und bitumenhaltige Schichten auf Betonbrücken - Initialprojekt	2014
1504	VSS 2005/504	Druckschwellversuch zur Beurteilung des Verformungsverhaltens von Belägen	2014
1503	VSS 2006/515_OBF	Research Package on Bridge Deck Waterproofing Systems: EP5-Mechanisms of Blister Formation	2014

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1502	VSS 2010/502	Road – landside interaction : Applications	2014
1501	VSS 2011/705	Grundlagen zur Anwendung von Lebenszykluskosten im Erhaltungsmanagement von Strassenverkehrsanlagen	2014
1500	ASTRA 2010/007	SURPRICE (Sustainable mobility through road user charging) - Swiss contribution: Equity effects of congestion charges and intra-individual variation in preferences	2015
1499	ASTRA 2011/010	Stauprognoseverfahren und -systeme	2014
1498	VSS 2011/914	Coordinated Ramp Metering Control with Variable Speed Limits for Swiss Freeways	2014
1497	VSS 2009/705	Verfahren zur Bildung von homogenen Abschnitten der Strassenverkehrsanlage für das Erhaltungsmanagement Fahrbahnen	2014
1496	VSS 2010/601	Einfluss von Lärmschutzwänden auf das Raumnutzungsverhalten von Reptilien	2014
1495	VSS 2009/703	Zusammenhang Textur und Griffigkeit von Fahrbahnen und Einflüsse auf die Lärmemission	2014
1494	VSS 2010/704	Erhaltungsmanagement der Strassen - Erarbeiten der Grundlagen und Schadenkataloge zur systematischen Zustandserhebung und -bewertung von zusätzlichen Objekten der Strassen	2014
1493	VSS 2006/001	Neue Methoden zur Beurteilung der Tieftemperatureigenschaften von bitumenhaltigen Bindemitteln	2014
1492	SVI 2004/029	Kombiniertes Verkehrsmittel- und Routenwahlmodell	2014
1491	VSS 2007/704	Gesamtbewertung von Kunstbauten	2014
1490	FGU 2004/002	Langzeit-Beständigkeit von Tunnel-Abdichtungssystemen aus Kunststoffen (Best TASK)	2014
1489	VSS 2006/516_OBF	Forschungspaket Brückenabdichtungen: EP6 - Anschlüsse von Brückenabdichtungen	2014
1488	SVI 2007/020	Methodik zur Nutzenermittlung von Verkehrsdosierungen	2014
1487	SVI 2008/001	Erfahrungsbericht Forschungsbündel	2014
1486	SVI 2004/005	Partizipation in Verkehrsprojekten	2014
1485	VSS 2007/401	Anforderungen an Anschlussfugensysteme in Asphaltdecken - Teil 1: Praxiserfahrung	2014
1484	FGU 2010/003	Misestimating time of collision in the tunnel entrance due to a disturbed adaptation	2014
1483	VSS 2005/452	Forschungspaket Recycling von Ausbauasphalt in Heissmischgut:	2014

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
		EP1: Optimaler Anteil an Ausbauasphalt	
1482	ASTRA 2010/018	SURPRICE: Sustainable mobility through road user charges Swiss contribution: Comprehensive road user charging (RUC)	2015
1481	VSS 2001/702	Application des méthodes de représentation aux données routières	2014
1480	ASTRA 2008/004	Prozess- und wirkungsorientiertes Management im betrieblichen Strassenunterhalt Modell eines siedlungsübergreifenden Unterhalts	2014
1479	ASTRA 2005/004	Entscheidungsgrundlagen & Empfehlungen für ein nachhaltiges Baustoffmanagement	2014
1478	VSS 2005/455	Research Package on Recycling of Reclaimed Asphalt in Hot Mixes - EP4: Evaluation of Durability	2014
1477	VSS 2008/503	Feldversuch mit verschiedenen Pflasterungen und Plattendecken	2014
1476	VSS 2011/202	Projet initial pour la conception multi-usagers des carrefours	2014
1475	VSS 1999/125	Ringversuch "Eindringtiefe eines ebenen Stempels, statische Prüfung an Gussasphalt"	2014
1474	VSS 2009/704	Wechselwirkung zwischen Aufgrabungen, Zustand und Alterungsverhalten im kommunalen Strassennetz-Entwicklung eines nachhaltigen Aufgrabungsmanagement	2014
1473	VSS 2011/401	Forschungspaket "POLIGRIP - Einfluss der Polierbarkeit von Gesteinskörnungen auf die Griffigkeit von Deckschichten - Initialprojekt"	2014
1472	SVI 2010/003	Einfluss der Verlässlichkeit der Verkehrssysteme auf das Verkehrsverhalten	2014
1471	ASTRA 2008/011	Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr Forschungspaket UVEK/ASTRA - Synthese	2014
1470	VSS 2011/907	Initialprojekt für ein Forschungspaket "Kooperative Systeme für Fahrzeug und Strasse"	2014
1469	VSS 2008/902	Untersuchungen zum Einsatz von Bewegungssensoren für fahrzeitbezogene Verkehrstelematik-Anwendungen	2014
1468	VSS 2010/503	Utilisation des géostructures énergétiques pour la régulation thermique et l'optimisation énergétique des infrastructures routières et ouvrages d'art	2014
1467	ASTRA 2010/021	Sekundärer Feinstaub vom Verkehr	2014
1466	VSS 2010/701	Grundlagen zur Revision der Normen über die visuelle Erhebung des Oberflächenzustands	2014
1465	ASTRA 2000/417	Erfahrungen mit der Sanierung und Erhaltung von Betonoberflä-	2014

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
		chen	
1462	ASTRA 2011/004	Ermittlung der Versagensgrenze eines T2 Norm-Belages mit der mobiles Grossversuchsanlage MLS10	2014
1460	SVI 2007/017	Nutzen der Verkehrsinformation für die Verkehrssicherheit	2014
1459	VSS 2002/501	Leichtes Fallgewichtsgesetz für die Verdichtungskontrolle von Fundationsschichten	2014
1458	VSS 2010/703	Umsetzung Erhaltungsmanagement für Strassen in Gemeinden - Arbeitshilfen als Anhang zur Norm 640 980	2014
1457	SVI 2012/006	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 5: Medizinische Folgen des Strassenunfallgeschehens	2014
1456	SVI 2012/005	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 4: Einflüsse des Wetters auf das Strassenunfallgeschehen	2014
1455	SVI 2012/004	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 3: Einflüsse von Fahrzeugeigenschaften auf das Strassenunfallgeschehen	2014
1454	SVI 2012/003	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 2: Einflüsse von Situation und Infrastruktur auf das Strassenunfallgeschehen: Phase 1	2014
1453	SVI 2012/002	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 1: Einflüsse von Mensch und Gesellschaft auf das Strassenunfallgeschehen: Phase 1	2014
1452	SVI 2012/001	Forschungspaket VeSPA: Synthesebericht Phase 1	2014
1451	FGU 2010/006	Gasanalytik zur frühzeitigen Branddetektion in Tunneln	2013
1450	VSS 2002/401	Kaltrecycling von Ausbauasphalt mit bituminösen Bindemitteln	2014
1449	ASTRA 2010/024	E-Scooter - Sozial- und naturwissenschaftliche Beiträge zur Förderung leichter Elektrofahrzeuge in der Schweiz	2013
1448	SVI 2009/008	Anforderungen der Güterlogistik an die Netzinfrastruktur und die langfristige Netzentwicklung in der Schweiz. Forschungspaket UVEK/ASTRA "Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz", Teilprojekt C	2014
1447	SVI 2009/005	Informationstechnologien in der zukünftigen Gütertransportwirtschaft Forschungspaket UVEK/ASTRA "Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz", Teilprojekt E	2013
1446	VSS 2005/454	Forschungspaket Recycling von Ausbauasphalt in Heissmischgut: EP3: Stofffluss- und Nachhaltigkeitsbeurteilung	2013
1445	VSS 2009/301	Öffnung der Busstreifen für weitere Verkehrsteilnehmende	2013

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1444	VSS 2007/306	Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit von Anlagen des leichten Zweirad- und des Fussgängerverkehrs	2013
1443	VSS 2007/305	Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit des strassengebundenen ÖV	2013
1442	SVI 2010/004	Messen des Nutzens von Massnahmen mit Auswirkungen auf den Langsamverkehr - Vorstudie	2013
1441_2	SVI 2009/010	Zielsystem im Güterverkehr. Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz - Teilprojekt G	2013
1441_1	SVI 2009/010	Effizienzsteigerungspotenziale in der Transportwirtschaft durch integrierte Bewirtschaftungsinstrumente aus Sicht der Infrastrukturbetreiber Synthese der Teilprojekte B3, C, D, E und F des Forschungspakets Güterverkehr anhand eines Zielsystems für den Güterverkehr	2013
1440	SVI 2009/006	Benchmarking-Ansätze im Verkehrswesen	2013
1439	SVI 2009/002	Konzept zur effizienten Erfassung und Analyse der Güterverkehrsdaten Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz von Verkehrsmitteln im Güterverkehr der Schweiz TP A	2013
1438_2	SVI 2009/011	Ortsbezogene Massnahmen zur Reduktion der Auswirkungen des Güterverkehrs - Teil 2. Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP H	2013
1438_1	SVI 2009/011	Ortsbezogene Massnahmen zur Reduktion der Auswirkungen des Güterverkehrs - Teil 1. Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP H	2013
1437	VSS 2008/203	Trottoirüberfahrten und punktuelle Querungen ohne Vortritt für den Langsamverkehr	2013
1436	VSS 2010/401	Auswirkungen verschiedener Recyclinganteile in ungebundenen Gemischen	2013
1435	FGU 2008/007_OBF	Schadstoff- und Rauchkurzschlüsse bei Strassentunneln	2013
1434	VSS 2006/503	Performance Oriented Requirements for Bituminous Mixtures	2013
1433	ASTRA 2010/001	Güterverkehr mit Lieferwagen: Entwicklungen und Massnahmen Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP B3	2013
1432	ASTRA 2007/011	Praxis-Kalibrierung der neuen mobilen Grossversuchsanlage MLS10 für beschleunigte Verkehrslastsimulation auf Strassenbelägen in der Schweiz	2013

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1431	ASTRA 2011/015	TeVeNOx - Testing of SCR-Systems on HD-Vehicles	2013
1430	ASTRA 2009/004	Impact des conditions météorologiques extrêmes sur la chaussée	2013
1429	SVI 2009/009	Einschätzungen der Infrastrukturnutzer zur Weiterentwicklung des Regulativs Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP F	2013
1428	SVI 2010/005	Branchenspezifische Logistikkonzepte und Güterverkehrsaufkommen sowie deren Trends Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP B2	2013
1427	SVI 2006/002	Begegnungszonen - eine Werkschau mit Empfehlungen für die Realisierung	2013
1426	ASTRA 2010/025_OBF	Luftströmungsmessung in Strassentunneln	2013
1425	VSS 2005/401	Résistance à l'altération des granulats et des roches	2013
1424	ASTRA 2006/007	Optimierung der Baustellenplanung an Autobahnen	2013
1423	ASTRA 2010/012	Forschungspaket: Lärmarme Beläge innerorts EP3: Betrieb und Unterhalt lärmarmen Beläge	2013
1422	ASTRA 2011/006_OBF	Fracture processes and in-situ fracture observations in Gipskeuper	2013
1421	VSS 2009/901	Experimenteller Nachweis des vorgeschlagenen Raum- und Topologiemodells für die VM-Anwendungen in der Schweiz (MDATrafo)	2013
1420	SVI 2008/003	Projektierungsfreiräume bei Strassen und Plätzen	2013
1419	VSS 2001/452	Stabilität der Polymere beim Heisseinbau von PmB-haltigen Strassenbelägen	2013
1418	VSS 2008/402	Anforderungen an hydraulische Eigenschaften von Geokunststoffen	2012
1417	FGU 2009/002	Heat Exchanger Anchors for Thermo-active Tunnels	2013
1416	FGU 2010/001	Sulfatwiderstand von Beton: verbessertes Verfahren basierend auf der Prüfung nach SIA 262/1, Anhang D	2013
1415	VSS 2010/A01	Wissenslücken im Infrastrukturmanagementprozess "Strasse" im Siedlungsgebiet	2013
1414	VSS 2010/201	Passive Sicherheit von Tragkonstruktionen der Strassenausstattung	2013
1413	SVI 2009/003	Güterverkehrsintensive Branchen und Güterverkehrsströme in der Schweiz Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz Teilprojekt	2013

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
		B1	
1412	ASTRA 2010/020	Werkzeug zur aktuellen Gangliniennorm	2013
1411	VSS 2009/902	Verkehrstelematik für die Unterstützung des Verkehrsmanagements in ausserordentlichen Lagen	2013
1410	VSS 2010/202_OBF	Reduktion von Unfallfolgen bei Bränden in Strassentunneln durch Abschnittsbildung	2013
1409	ASTRA 2010/017_OBF	Regelung der Luftströmung in Strassentunneln im Brandfall	2013
1408	VSS 2000/434	Vieillissement thermique des enrobés bitumineux en laboratoire	2012
1407	ASTRA 2006/014	Fusion des indicateurs de sécurité routière : FUSAIN	2012
1406	ASTRA 2004/015	Amélioration du modèle de comportement individuel du Conducteur pour évaluer la sécurité d'un flux de trafic par simulation	2012
1405	ASTRA 2010/009	Potential von Photovoltaik an Schallschutzmassnahmen entlang der Nationalstrassen	2012
1404	VSS 2009/707	Validierung der Kosten-Nutzen-Bewertung von Fahrbahn-Erhaltungsmassnahmen	2012
1403	SVI 2007/018	Vernetzung von HLS- und HVS-Steuerungen	2012
1402	VSS 2008/403	Witterungsbeständigkeit und Durchdruckverhalten von Geokunststoffen	2012
1401	SVI 2006/003	Akzeptanz von Verkehrsmanagementmassnahmen-Vorstudie	2012
1400	VSS 2009/601	Begrünte Stützgitterböschungssysteme	2012
1399	VSS 2011/901	Erhöhung der Verkehrssicherheit durch Incentivierung	2012
1398	ASTRA 2010/019	Environmental Footprint of Heavy Vehicles Phase III: Comparison of Footprint and Heavy Vehicle Fee (LSVA) Criteria	2012
1397	FGU 2008/003_OBF	Brandschutz im Tunnel: Schutzziele und Brandbemessung Phase 1: Stand der Technik	2012
1396	VSS 1999/128	Einfluss des Umhüllungsgrades der Mineralstoffe auf die mechanischen Eigenschaften von Mischgut	2012
1395	FGU 2009/003	KarstALEA: Wegleitung zur Prognose von karstspezifischen Gefahren im Untertagbau	2012
1394	VSS 2010/102	Grundlagen Betriebskonzepte	2012
1393	VSS 2010/702	Aktualisierung SN 640 907, Kostengrundlage im Erhaltungsmanagement	2012

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1392	ASTRA 2008/008_009	FEHRL Institutes WIM Initiative (Fiwi)	2012
1391	ASTRA 2011/003	Leitbild ITS-CH Landverkehr 2025/30	2012
1390	FGU 2008/004_OBF	Einfluss der Grundwasserströmung auf das Quellverhalten des Gipskeupers im Belchentunnel	2012
1389	FGU 2003/002	Long Term Behaviour of the Swiss National Road Tunnels	2012
1388	SVI 2007/022	Möglichkeiten und Grenzen von elektronischen Busspuren	2012
1387	VSS 2010/205_OBF	Ablage der Prozessdaten bei Tunnel-Prozessleitsystemen	2012
1386	VSS 2006/204	Schallreflexionen an Kunstbauten im Strassenbereich	2012
1385	VSS 2004/703	Bases pour la révision des normes sur la mesure et l'évaluation de la planéité des chaussées	2012
1384	VSS 1999/249	Konzeptuelle Schnittstellen zwischen der Basisdatenbank und EMF-, EMK- und EMT-DB	2012
1383	FGU 2008/005	Einfluss der Grundwasserströmung auf das Quellverhalten des Gipskeupers im Chienbergtunnel	2012
1382	VSS 2001/504	Optimierung der statischen Eindringtiefe zur Beurteilung von harten Gussasphaltsorten	2012
1381	SVI 2004/055	Nutzen von Reisezeiteinsparungen im Personenverkehr	2012
1380	ASTRA 2007/009	Wirkungsweise und Potential von kombinierter Mobilität	2012
1379	VSS 2010/206_OBF	Harmonisierung der Abläufe und Benutzeroberflächen bei Tunnel-Prozessleitsystemen	2012
1378	SVI 2004/053	Mehr Sicherheit dank Kernfahrbahnen?	2012
1377	VSS 2009/302	Verkehrssicherheitsbeurteilung bestehender Verkehrsanlagen (Road Safety Inspection)	2012
1376	ASTRA 2011/008_004	Erfahrungen im Schweizer Betonbrückenbau	2012
1375	VSS 2008/304	Dynamische Signalisierungen auf Hauptverkehrsstrassen	2012
1374	FGU 2004/003	Entwicklung eines zerstörungsfreien Prüfverfahrens für Schweissnähte von KDB	2012
1373	VSS 2008/204	Vereinheitlichung der Tunnelbeleuchtung	2012
1372	SVI 2011/001	Verkehrssicherheitsgewinne aus Erkenntnissen aus Datapooling und strukturierten Datenanalysen	2012

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1371	ASTRA 2008/017	Potenzial von Fahrgemeinschaften	2011
1370	VSS 2008/404	Dauerhaftigkeit von Betonfahrbahnen aus Betongranulat	2011
1369	VSS 2003/204	Rétention et traitement des eaux de chaussée	2012
1368	FGU 2008/002	Soll sich der Mensch dem Tunnel anpassen oder der Tunnel dem Menschen?	2011
1367	VSS 2005/801	Grundlagen betreffend Projektierung, Bau und Nachhaltigkeit von Anschlussgleisen	2011
1366	VSS 2005/702	Überprüfung des Bewertungshintergrundes zur Beurteilung der Strassengriffigkeit	2010
1365	SVI 2004/014	Neue Erkenntnisse zum Mobilitätsverhalten dank Data Mining?	2011
1364	SVI 2009/004	Regulierung des Güterverkehrs Auswirkungen auf die Transportwirtschaft Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP D	2012
1363	VSS 2007/905	Verkehrsprognosen mit Online -Daten	2011
1362	SVI 2004/012	Aktivitätenorientierte Analyse des Neuverkehrs	2012
1361	SVI 2004/043	Innovative Ansätze der Parkraumbewirtschaftung	2012
1360	VSS 2010/203	Akustische Führung im Strassentunnel	2012
1359	SVI 2004/003	Wissens- und Technologientransfer im Verkehrsbereich	2012
1358	SVI 2004/079	Verkehrsanbindung von Freizeitanlagen	2012
1357	SVI 2007/007	Unaufmerksamkeit und Ablenkung: Was macht der Mensch am Steuer?	2012
1356	SVI 2007/014	Kooperation an Bahnhöfen und Haltestellen	2011
1355	FGU 2007/002	Prüfung des Sulfatwiderstandes von Beton nach SIA 262/1, Anhang D: Anwendbarkeit und Relevanz für die Praxis	2011
1354	VSS 2003/203	Anordnung, Gestaltung und Ausführung von Treppen, Rampen und Treppenwegen	2011
1353	VSS 2000/368	Grundlagen für den Fussverkehr	2011
1352	VSS 2008/302	Fussgängerstreifen (Grundlagen)	2011
1351	ASTRA 2009/001	Development of a best practice methodology for risk assessment in road tunnels	2011
1350	VSS 2007/904	IT-Security im Bereich Verkehrstelematik	2011

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1349	VSS 2003/205	In-Situ-Abflussversuche zur Untersuchung der Entwässerung von Autobahnen	2011
1348	VSS 2008/801	Sicherheit bei Parallelführung und Zusammentreffen von Strassen mit der Schiene	2011
1347	VSS 2000/455	Leistungsfähigkeit von Parkieranlagen	2010
1346	ASTRA 2007/004	Quantifizierung von Leckagen in Abluftkanälen bei Strassentunneln mit konzentrierter Rauchabsaugung	2010
1345	SVI 2004/039	Einsatzbereiche verschiedener Verkehrsmittel in Agglomerationen	2011
1344	VSS 2009/709	Initialprojekt für das Forschungspaket "Nutzensteigerung für die Anwender des SIS"	2011
1343	VSS 2009/903	Basistechnologien für die intermodale Nutzungserfassung im Personenverkehr	2011
1342	FGU 2005/003	Untersuchungen zur Frostkörperbildung und Frosthebung beim Gefrierverfahren	2010
1341	FGU 2007/005	Design aids for the planning of TBM drives in squeezing ground	2011
1340	SVI 2004/051	Aggressionen im Verkehr	2011
1339	SVI 2005/001	Widerstandsfunktionen für Innerorts-Strassenabschnitte ausserhalb des Einflussbereiches von Knoten	2010
1338	VSS 2006/902	Wirkungsmodelle für fahrzeugseitige Einrichtungen zur Steigerung der Verkehrssicherheit	2009
1337	ASTRA 2006/015	Development of urban network travel time estimation methodology	2011
1336	ASTRA 2007/006	SPIN-ALP: Scanning the Potential of Intermodal Transport on Alpine Corridors	2010
1335	VSS 2007/502	Stripping bei lärmindernden Deckschichten unter Überrollbeanspruchung im Labormassstab	2011
1334	ASTRA 2009/009	Was treibt uns an? Antriebe und Treibstoffe für die Mobilität von Morgen	2011
1333	SVI 2007/001	Standards für die Mobilitätsversorgung im peripheren Raum	2011
1332	VSS 2006/905	Standardisierte Verkehrsdaten für das verkehrsträgerübergreifende Verkehrsmanagement	2011
1331	VSS 2005/501	Rückrechnung im Strassenbau	2011
1330	FGU 2008/006	Energiegewinnung aus städtischen Tunneln: Systemevaluation	2010
1329	SVI 2004/073	Alternativen zu Fussgängerstreifen in Tempo-30-Zonen	2010

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1328	VSS 2005/302	Grundlagen zur Quantifizierung der Auswirkungen von Sicherheitsdefiziten	2011
1327	VSS 2006/601	Vorhersage von Frost und Nebel für Strassen	2010
1326	VSS 2006/207	Erfolgskontrolle Fahrzeugrückhaltesysteme	2011
1325	SVI 2000/557	Indices caractéristiques d'une cité-vélo. Méthode d'évaluation des politiques cyclables en 8 indices pour les petites et moyennes communes.	2010
1324	VSS 2004/702	Eigenheiten und Konsequenzen für die Erhaltung der Strassenverkehrsanlagen im überbauten Gebiet	2009
1323	VSS 2008/205	Ereignisdetektion im Strassentunnel	2011
1322	SVI 2005/007	Zeitwerte im Personenverkehr: Wahrnehmungs- und Distanzabhängigkeit	2008
1321	VSS 2008/501	Validation de l'oedomètre CRS sur des échantillons intacts	2010
1320	VSS 2007/303	Funktionale Anforderungen an Verkehrserfassungssysteme im Zusammenhang mit Lichtsignalanlagen	2010
1319	VSS 2000/467	Auswirkungen von Verkehrsberuhigungsmassnahmen auf die Lärmimmissionen	2010
1318	FGU 2006/001	Langzeitquellversuche an anhydritführenden Gesteinen	2010
1317	VSS 2000/469	Geometrisches Normalprofil für alle Fahrzeugtypen	2010
1316	VSS 2001/701	Objektorientierte Modellierung von Strasseninformationen	2010
1315	VSS 2006/904	Abstimmung zwischen individueller Verkehrsinformation und Verkehrsmanagement	2010
1314	VSS 2005/203	Datenbank für Verkehrsaufkommensraten	2008
1313	VSS 2001/201	Kosten-/Nutzenbetrachtung von Strassenentwässerungssystemen, Ökobilanzierung	2010
1312	SVI 2004/006	Der Verkehr aus Sicht der Kinder: Schulwege von Primarschulkindern in der Schweiz	2010
1311	VSS 2000/543	VIABILITE DES PROJETS ET DES INSTALLATIONS ANNEXES	2010
1310	ASTRA 2007/002	Beeinflussung der Luftströmung in Strassentunneln im Brandfall	2010
1309	VSS 2008/303	Verkehrsregelungssysteme - Modernisierung von Lichtsignalanlagen	2010
1308	VSS 2008/201	Hindernisfreier Verkehrsraum - Anforderungen aus Sicht von Menschen mit Behinderung	2010

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1307	ASTRA 2006/002	Entwicklung optimaler Mischgüter und Auswahl geeigneter Bindemittel; D-A-CH - Initialprojekt	2008
1306	ASTRA 2008/002	Strassenglätte-Prognosesystem (SGPS)	2010
1305	VSS 2000/457	Verkehrserzeugung durch Parkieranlagen	2009
1304	VSS 2004/716	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen	2008
1303	ASTRA 2009/010	Geschwindigkeiten in Steigungen und Gefällen; Überprüfung	2010
1302	VSS 1999/131	Zusammenhang zwischen Bindemittleigenschaften und Schadensbildern des Belages?	2010
1301	SVI 2007/006	Optimierung der Strassenverkehrsunfallstatistik durch Berücksichtigung von Daten aus dem Gesundheitswesen	2009
1300	VSS 2003/903	SATELROU Perspectives et applications des méthodes de navigation pour la télématique des transports routiers et pour le système d'information de la route	2010
1299	VSS 2008/502	Projet initial - Enrobés bitumineux à faibles impacts énergétiques et écologiques	2009
1298	ASTRA 2007/012	Griffigkeit auf winterlichen Fahrbahnen	2010
1297	VSS 2007/702	Einsatz von Asphaltbewehrungen (Asphalteinlagen) im Erhaltungsmanagement	2009
1296	ASTRA 2007/008	Swiss contribution to the Heavy-Duty Particle Measurement Programme (HD-PMP)	2010
1295	VSS 2005/305	Entwurfsgrundlagen für Lichtsignalanlagen und Leitfaden	2010
1294	VSS 2007/405	Wiederhol- und Vergleichspräzision der Druckfestigkeit von Gesteinskörnungen am Haufwerk	2010
1293	VSS 2005/402	Détermination de la présence et de l'efficacité de dope dans les bétons bitumineux	2010
1292	ASTRA 2006/004	Entwicklung eines Pflanzenöl-Blockheizkraftwerkes mit eigener Ölmühle	2010
1291	ASTRA 2009/005	Fahrmuster auf überlasteten Autobahnen Simultanes Berechnungsmodell für das Fahrverhalten auf Autobahnen als Grundlage für die Berechnung von Schadstoffemissionen und Fahrzeitgewinnen	2010
1290	VSS 1999/209	Conception et aménagement de passages inférieurs et supérieurs pour piétons et deux-roues légers	2008
1289	VSS 2005/505	Affinität von Gesteinskörnungen und Bitumen, nationale Umsetzung	2010

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
		der EN	
1288	ASTRA 2006/020	Footprint II - Long Term Pavement Performance and Environmental Monitoring on A1	2010
1287	VSS 2008/301	Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit von komplexen ungesteuerten Knoten: Analytisches Schätzverfahren	2009
1286	VSS 2000/338	Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit auf Strassen ohne Richtungstrennung	2010
1285	VSS 2002/202	In-situ Messung der akustischen Leistungsfähigkeit von Schallschirmen	2009
1284	VSS 2004/203	Evacuation des eaux de chaussée par les bas-cotés	2010
1283	VSS 2000/339	Grundlagen für eine differenzierte Bemessung von Verkehrsanlagen	2008
1282	VSS 2004/715	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen: Zusatzkosten infolge Vor- und Aufschub von Erhaltungsmassnahmen	2010
1281	SVI 2004/002	Systematische Wirkungsanalysen von kleinen und mittleren Verkehrsvorhaben	2009
1280	ASTRA 2004/016	Auswirkungen von fahrzeuginternen Informationssystemen auf das Fahrverhalten und die Verkehrssicherheit Verkehrpsychologischer Teilbericht	2010
1279	VSS 2005/301	Leistungsfähigkeit zweistreifiger Kreisel	2009
1278	ASTRA 2004/016	Auswirkungen von fahrzeuginternen Informationssystemen auf das Fahrverhalten und die Verkehrssicherheit - Verkehrstechnischer Teilbericht	2009
1277	SVI 2007/005	Multimodale Verkehrsqualitätsstufen für den Strassenverkehr - Vorstudie	2010
1276	VSS 2006/201	Überprüfung der schweizerischen Ganglinien	2008
1275	ASTRA 2006/016	Dynamic Urban Origin - Destination Matrix - Estimation Methodology	2009
1274	SVI 2004/088	Einsatz von Simulationswerkzeugen in der Güterverkehrs- und Transportplanung	2009

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1273	ASTRA 2008/006	UNTERHALT 2000 - Massnahme M17, FORSCHUNG: Dauerhafte Materialien und Verfahren SYNTHESE - BERICHT zum Gesamtprojekt "Dauerhafte Beläge" mit den Einzelnen Forschungsprojekten: - ASTRA 200/419: Verhaltensbilanz der Beläge auf Nationalstrassen - ASTRA 2000/420: Dauerhafte Komponenten auf der Basis erfolgreicher Strecken - ASTRA 2000/421: Durabilité des enrobés - ASTRA 2000/422: Dauerhafte Beläge, Rundlaufversuch - ASTRA 2000/423: Griffigkeit der Beläge auf Autobahnen, Vergleich zwischen den Messergebnissen von SRM und SCRIM - ASTRA 2008/005: Vergleichsstrecken mit unterschiedlichen oberen Tragschichten auf einer Nationalstrasse	2008
1272	VSS 2007/304	Verkehrsregelungssysteme - behinderte und ältere Menschen an Lichtsignalanlagen	2010
1271	VSS 2004/201	Unterhalt von Lärmschirmen	2009
1270	VSS 2005/502	Interaktion Strasse Hangstabilität: Monitoring und Rückwärtsrechnung	2009
1269	VSS 2005/201	Evaluation von Fahrzeugrückhaltesystemen im Mittelstreifen von Autobahnen	2009
1268	ASTRA 2005/007	PM10-Emissionsfaktoren von Abriebspartikeln des Strassenverkehrs (APART)	2009
1267	VSS 2007/902	MDA in SVT Einsatz modellbasierter Datentransfern timer (INTERLIS) in der Strassenverkehrstelematik	2009
1266	VSS 2000/343	Unfall- und Unfallkostenraten im Strassenverkehr	2009
1265	VSS 2005/701	Zusammenhang zwischen dielektrischen Eigenschaften und Zustandsmerkmalen von bitumenhaltigen Fahrbahnbelägen (Pilotuntersuchung)	2009
1264	SVI 2004/004	Verkehrspolitische Entscheidungsfindung in der Verkehrsplanung	2009
1263	VSS 2001/503	Phénomène du dégel des sols gélifs dans les infrastructures des voies de communication et les pergélisols alpins	2006
1262	VSS 2003/503	Lärmverhalten von Deckschichten im Vergleich zu Gussasphalt mit strukturierter Oberfläche	2009
1261	ASTRA 2004/018	Pilotstudie zur Evaluation einer mobilen Grossversuchsanlage für beschleunigte Verkehrslastsimulation auf Strassenbelägen	2009
1260	FGU 2005/001	Testeinsatz der Methodik "Indirekte Vorauserkundung von wasserführenden Zonen mittels Temperaturdaten anhand der Messdaten des Lötschberg-Basistunnels	2009
1259	VSS 2004/710	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen -	2008

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
		Synthesebericht	
1258	VSS 2005/802	Kaphaltestellen Anforderungen und Auswirkungen	2009
1257	SVI 2004/057	Wie Strassenraumbilder den Verkehr beeinflussen Der Durchfahrtswiderstand als Arbeitsinstrument bei der städtebaulichen Gestaltung von Strassenräumen	2009
1256	VSS 2006/903	Qualitätsanforderungen an die digitale Videobild-Bearbeitung zur Verkehrsüberwachung	2009
1255	VSS 2006/901	Neue Methoden zur Erkennung und Durchsetzung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit	2009
1254	VSS 2006/502	Drains verticaux préfabriqués thermiques pour la consolidation in-situ des sols	2009
1253	VSS 2001/203	Rétention des polluants des eaux de chaussées selon le système "infiltrations sur les talus". Vérification in situ et optimisation	2009
1252	SVI 2003/001	Nettoverkehr von verkehrsintensiven Einrichtungen (VE)	2009
1251	ASTRA 2002/405	Incidence des granulats arrondis ou partiellement arrondis sur les propriétés d'adhérence des bétons bitumineux	2008
1250	VSS 2005/202	Strassenabwasser Filterschacht	2007
1249	FGU 2003/004	Einflussfaktoren auf den Brandwiderstand von Betonkonstruktionen	2009
1248	VSS 2000/433	Dynamische Eindringtiefe zur Beurteilung von Gussasphalt	2008
1247	VSS 2000/348	Anforderungen an die strassenseitige Ausrüstung bei der Umwidmung von Standstreifen	2009
1246	VSS 2004/713	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen: Bedeutung Oberflächenzustand und Tragfähigkeit sowie gegenseitige Beziehung für Gebrauchs- und Substanzwert	2009
1245	VSS 2004/701	Verfahren zur Bestimmung des Erhaltungsbedarfs in kommunalen Strassennetzen	2009
1244	VSS 2004/714	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen - Gesamtnutzen und Nutzen-Kosten-Verhältnis von standardisierten Erhaltungsmassnahmen	2008
1243	VSS 2000/463	Kosten des betrieblichen Unterhalts von Strassenanlagen	2008
1242	VSS 2005/451	Recycling von Ausbauasphalt in Heissmischgut	2007
1241	ASTRA 2001/052	Erhöhung der Aussagekraft des LCPC Spurbildungstests	2009
1240	ASTRA 2002/010	L'acceptabilité du péage de congestion : Résultats et analyse de l'enquête en Suisse	2009

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1239	VSS 2000/450	Bemessungsgrundlagen für das Bewehren mit Geokunststoffen	2009
1238	VSS 2005/303	Verkehrssicherheit an Tagesbaustellen und bei Anschlüssen im Baustellenbereich von Hochleistungsstrassen	2008
1237	VSS 2007/903	Grundlagen für eCall in der Schweiz	2009
1236	ASTRA 2008/008_07	Analytische Gegenüberstellung der Strategie- und Tätigkeitsschwerpunkte ASTRA-AIPCR	2008
1235	VSS 2004/711	Forschungspaket Massnahmenplanung im EM von Fahrbahnen - Standardisierte Erhaltungsmassnahmen	2008
1234	VSS 2006/504	Expérimentation in situ du nouveau drainomètre européen	2008
1233	ASTRA 2000/420	Unterhalt 2000 Forschungsprojekt FP2 Dauerhafte Komponenten bitumenhaltiger Belagsschichten	2009
667	AGB 2008/004	Résistance au déversement des poutres métalliques de pont	2015
666	AGB 2012/015	Structural Identification for Condition Assessment of Swiss Bridges	2015
665	AGB 2011/001	Wirksamkeit und Prüfung der Nachbehandlungsmethoden von Beton	2014
664	AGB 2009/005	Charges de trafic actualisées pour les dalles de roulement en béton des ponts existants	2014
663	AGB 2003/014	Seismic Safety of Existing Bridges	2014
662	AGB 2008/001	Seismic Safety of Existing Bridges - Cyclic Inelastic Behaviour of Bridge Piers	2014
661	AGB 2010/002	Fatigue limit state of shear studs in steel-concrete composite road bridges	2014
660	AGB 2008/002	Indirekt gelagerte Betonbrücken - Sachstandsbericht	2014
659	AGB 2009/014	Suizidprävention bei Brücken: Follow-Up	2014
658	AGB 2006/015_OBF	Querkraftwiderstand vorgespannter Brücken mit ungenügender Querkraftbewehrung	2014
657	AGB 2003/012	Brücken in Holz: Möglichkeiten und Grenzen	2013
656	AGB 2009/015	Experimental verification of integral bridge abutments	2013
655	AGB 2007/004	Fatigue Life Assessment of Roadway Bridges Based on Actual Traffic Loads	2013
654	AGB 2005-008	Thermophysical and Thermomechanical Behavior of Cold-Curing Structural Adhesives in Bridge Construction	2013

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
653	AGB 2007/002	Poinçonnement des pontsdalles précontraints	2013
652	AGB 2009/006	Detektion von Betonstahlbrüchen mit der magnetischen Streufeldmethode	2013
651	AGB 2006/006_OBF	Instandsetzung und Monitoring von AAR-geschädigten Stützmauern und Brücken	2013
650	AGB 2005/010	Korrosionsbeständigkeit von nichtrostenden Betonstählen	2012
649	AGB 2008/012	Anforderungen an den Karbonatisierungswiderstand von Betonen	2012
648	AGB 2005/023 + AGB 2006/003	Validierung der AAR-Prüfungen für Neubau und Instandsetzung	2011
647	AGB 2004/010	Quality Control and Monitoring of electrically isolated post-tensioning tendons in bridges	2011
646	AGB 2005/018	Interactin sol-structure : ponts à culées intégrales	2010
645	AGB 2005/021	Grundlagen für die Verwendung von Recyclingbeton aus Betongranulat	2010
644	AGB 2005/004	Hochleistungsfähiger Faserfeinkornbeton zur Effizienzsteigerung bei der Erhaltung von Kunstbauten aus Stahlbeton	2010
643	AGB 2005/014	Akustische Überwachung einer stark geschädigten Spannbetonbrücke und Zustandserfassung beim Abbruch	2010
642	AGB 2002/006	Verbund von Spanngliedern	2009
641	AGB 2007/007	Empfehlungen zur Qualitätskontrolle von Beton mit Luftpermeabilitätsmessungen	2009
640	AGB 2003/011	Nouvelle méthode de vérification des ponts mixtes à âme pleine	2010
639	AGB 2008/003	RiskNow-Falling Rocks Excel-basiertes Werkzeug zur Risikoermittlung bei Steinschlagschutzgalerien	2010
638	AGB2003/003	Ursachen der Rissbildung in Stahlbetonbauwerken aus Hochleistungsbeton und neue Wege zu deren Vermeidung	2008
637	AGB 2005/009	Détermination de la présence de chlorures à l'aide du Géoradar	2009
636	AGB 2002/028	Dimensionnement et vérification des dalles de roulement de ponts routiers	2009
635	AGB 2004/002	Applicabilité de l'enrobé drainant sur les ouvrages d'art du réseau des routes nationales	2008
634	AGB 2002/007	Untersuchungen zur Potenzialfeldmessung an Stahlbetonbauten	2008
633	AGB 2002/014	Oberflächenschutzsysteme für Betontragwerke	2008

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
632	AGB 2008/201	Sicherheit des Verkehrssystem Strasse und dessen Kunstbauten Testregion - Methoden zur Risikobeurteilung Schlussbericht	2010
631	AGB 2000/555	Applications structurales du Béton Fibré à Ultra-hautes Performances aux ponts	2008
630	AGB 2002/016	Korrosionsinhibitoren für die Instandsetzung chloridverseuchter Stahlbetonbauten	2010
629	AGB 2003/001 + AGB 2005/019	Integrale Brücken - Sachstandsbericht	2008
628	AGB 2005/026	Massnahmen gegen chlorid-induzierte Korrosion und zur Erhöhung der Dauerhaftigkeit	2008
627	AGB 2002/002	Eigenschaften von normalbreiten und überbreiten Fahrbahnübergängen aus Polymerbitumen nach starker Verkehrsbelastung	2008
626	AGB 2005/110	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Baustellensicherheit bei Kunstbauten	2009
625	AGB 2005/109	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Effektivität und Effizienz von Massnahmen bei Kunstbauten	2009
624	AGB 2005/108	Sicherheit des Verkehrssystems / Strasse und dessen Kunstbauten / Risikobeurteilung für Kunstbauten	2010
623	AGB 2005/107	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Tragsicherheit der bestehenden Kunstbauten	2009
622	AGB 2005/106	Rechtliche Aspekte eines risiko- und effizienzbasierten Sicherheitskonzepts	2009
621	AGB 2005/105	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten Szenarien der Gefahrenentwicklung	2009
620	AGB 2005/104	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Effektivität und Effizienz von Massnahmen	2009
619	AGB 2005/103	Sicherheit des Verkehrssystems / Strasse und dessen Kunstbauten / Ermittlung des Netzrisikos	2010
618	AGB 2005/102	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Methodik zur vergleichenden Risikobeurteilung	2009
617	AGB 2005/100	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten Synthesebericht	2010
616	AGB 2002/020	Beurteilung von Risiken und Kriterien zur Festlegung akzeptierter Risiken in Folge aussergewöhnlicher Einwirkungen bei Kunstbauten	2009