

Stoffeinträge in den Straßenseitenraum – Reifenabrieb

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Verkehrstechnik Heft V 188

bast

Stoffeinträge in den Straßenseitenraum – Reifenabrieb

von

Birgit Kocher

unter Mitarbeit von

Susanne Brose

Johannes Feix

Claudia Görg

Angela Peters

Klaus Schenker

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Verkehrstechnik Heft V 188

bast

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

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

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

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

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt beim Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bgm.-Smidt-Str. 74-76, D-27568 Bremerhaven, Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in Kurzform im Informationsdienst **BAST-Info** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos abgegeben; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 05632 des Arbeitsprogramms der Bundesanstalt für Straßenwesen:
Stoffeinträge in den Straßenseitenraum – Reifenabrieb

Herausgeber

Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0
Telefax: (0 22 04) 43 - 674

Redaktion

Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Druck und Verlag

Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Postfach 10 11 10, D-27511 Bremerhaven
Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0
Telefax: (04 71) 9 45 44 77
Email: vertrieb@nw-verlag.de
Internet: www.nw-verlag.de

ISSN 0943-9331
ISBN 978-3-86509-976-1

Bergisch Gladbach, Januar 2010

Kurzfassung – Abstract

Stoffeinträge in den Straßenseitenraum – Reifenabrieb

Der Reifenabrieb ist eine der mengenmäßig größten Quellen für Staubemissionen des Straßenverkehrs. Das betrifft vor allem sedimentierbaren Staub, aber auch Feinstaub, diesen in sehr viel geringeren Mengen. Menge, Qualität und Herkunft der Stoffeinträge in den Straßenseitenraum sollten genauer bestimmt werden, um Ansätze für Minderungsmaßnahmen zu zeigen. Für die entstehende Menge an Reifenabrieb lagen verschiedene Schätzungen vor, über die Schadstoffgehalte gab es bisher nur wenige Informationen, insbesondere zu anderen Metallen als Zink.

Es wurden aufgrund von Markenverteilung, Größen, Einsatzbereich und Zustand 65 Pkw-Reifen der Jahre 1980 bis 2003 ausgewählt. Die Gewinnung der Reifenproben erfolgte mit einer Reifenschälmaschine. In Anlehnung an eine Methode zum Aufschluss von Bitumen wurde von der BAST eine stark oxidierende rückstandsfreie Aufschlussmethode entwickelt. Die Elemente Al, As, Cr, Cu, Fe, Mo, Na, Ni, Pb, Sb, V und Zn wurden aus der Aufschlusslösung mittels ICP-OES quantitativ bestimmt, Cd mit Graphitrohr-AAS. Die Massenanteile der Hauptkomponenten der Proben wurden mit einer thermogravimetrischen Analyse (TGA) nach DIN 51006 bestimmt.

Die Auswertung ergibt, dass wie vermutet Zink in teilweise sehr hohen Konzentrationen eingesetzt wird, aber auch, dass Cadmium und Blei im Vergleich zum verbreiteten Elementverhältnis Cd/Zn und Pb/Zn in Reifenmaterial mit geringeren Anteilen vorkommen. Dementsprechend sind die hier erstmals ermittelten emittierten Cadmiumfrachten aus Reifenabrieb geringer als zu erwarten war. Kupfer- und Bleiemissionen aus Reifenmaterial wurden nach Literatur- und Herstellerangaben als problematisch eingeschätzt. Dies kann anhand der vorliegenden Messungen und Abschätzung der emittierten Mengen nicht bestätigt werden. Ebenso wurden keine bedenklichen Emissionen der anderen untersuchten Elemente gefunden.

Der zeitliche Verlauf der Konzentrationen von Zink und Cadmium in den Reifenaufläichen bildet mit einer seit den 1980er Jahren leicht sinkenden Tendenz die Bemühungen um geringere Zinkemissionen ab. Im Zeitverlauf sinkende Rußanteile und steigende Glührückstände zeichnen den zuneh-

menden Einsatz neuer Füllermaterialien wie Silica nach.

Auf Basis der Gesamtabriebmenge von 111.420 t/a in Deutschland kann die Freisetzung von ca. 1.530 Tonnen leichtflüchtiger Substanzen und 22.000 Tonnen flüchtiger Substanzen pro Jahr abgeschätzt werden. Den größten Massenanteil machen die Gummi- und Polymeranteile mit etwa 43.000 Tonnen und Ruß mit etwa 38.000 Tonnen aus. Die emittierte Metallmenge von 1.375 t/a besteht hauptsächlich aus Zink. Die hier abgeschätzte Zinkemission von 1.205 t/a und Cadmiumemission von 180 kg/a aus sedimentierbaren Stäuben basiert auf der ermittelten Reifenabriebmasse von 111.420 t/a. Diese Masse beinhaltet Lkw- und Pkw-Abrieb, dieser beträgt jedoch nur etwa die Hälfte. Die wenigen Angaben zur Zusammensetzung des Reifenabriebs von Lkw-Reifen lassen um 60 bis 80 % höhere Konzentrationen an Blei und Zink erwarten, sodass die Abschätzung an der Untergrenze der tatsächlichen Emissionen liegt.

Die Rolle der Ruß- und Gummibestandteile der Abriebe als organischer Bestandteil der Straßenrandböden sollte näher untersucht werden. Es sollte vor dem Hintergrund der EU-Wasserrahmenrichtlinie geklärt werden, ob Bankette und straßennahe Böden sowie die im Straßenbauregelwerk vorgesehenen Entwässerungseinrichtungen auch für bisher wenig untersuchte Stoffe eine ausreichende Reinigungsfunktion haben.

Input of tyre abrasion particles into roadside soils

Worn-off tyre particles are one of the main sources of dust emissions caused by road traffic. Estimations of the annual emission in Germany average about 111 000 t/a, most of it sedimentable dust (103 000 t/a), while only a small part is estimated to be airborne dust. Most of the dust forms deposits on the road surface and near the road. Road runoff, spray water and airborne transport lead to accumulation of this dust on the grassy road bank and the soils near the road. The contaminant content of the tyre wear particles is not well known and there are few data other than those on zinc and cadmium content.

In this investigation, material was taken from the tyre tread of 65 car tyres dating from the 1980s to 2003, including a number of common brands and a broad range of applications. The samples were digested completely using a strongly oxidising digestion method for bitumen (IFTA 1998) adapted by our laboratory. The resulting solution is tested for the concentrations of Al, As, Cr, Cu, Fe, Mo, Na, Ni, Sb, Pb, V and Zn, using ICP-OES, as well as for Cd, using graphite-tube AAS. A thermogravimetric analysis (TGA, DIN 51006) was performed, giving proportions of total organic content, black carbon and ignition residues.

The results show that zinc is added to tyre treads, sometimes in high concentrations, but they also show that cadmium and lead occur in quite low concentrations compared to the Cd/Zn and Pb/Zn ratios common in natural sources. According to the literature and manufacturer information, the emission of copper and lead from tyres had been expected to be a relevant source for these metals in diffuse emissions. Based on the measurements and an estimation of the emitted mass of the two elements, this expectation could not be confirmed. A critical content or emissions of the other elements could not be found.

The chronological sequence of the zinc and cadmium concentrations in tyre treads shows slightly decreasing values since the 1980s and represents the producer's efforts to lower zinc emissions. Decreasing proportions of black carbon and increasing ignition residues reflect the increasing use of new filler materials like silica in tyres. Based on the estimated total emission mass of 111 420 t/a of tyre abrasion particles in Germany, about 1 530 tonnes of highly volatile and 22 000 tonnes of volatile substances are emitted per year. The major component of tyre emissions are rubber and polymer substances (43 000 tonnes) and black carbon (38 000 tonnes). The amount of metals emitted is about 1 375 t/a, consisting mainly of zinc.

The estimated emission masses of 1 205 t/a (Zn) and 180 kg/a (Cd) in sedimentable dust are based on the total amount of tyre abrasion in Germany. This mass includes abrasion from car and truck tyres. The abrasion from car tyres adds up to only half of this amount, i.e. about 65 000 t/a. The scarcity of information about the composition of truck tyres leads to the expectation of 60-80% higher concentrations of lead and zinc. Thus the data probably represent the lower limit of total

emissions in Germany. Recent studies show the good sorption properties of this particular fraction in road runoff. The role of the rubber and black carbon components of tyre wear as part of the organic matter of the particular fraction in road runoff and in roadside soils, as well as its efficiency for contaminant retention should be investigated in more detail. As far as the EU water framework directive is concerned, the efficiency of road banks and drainage facilities for contaminant retention should be verified.

Inhalt

1	Einführung und Stand der Forschung	7
1.1	Fragestellung	7
1.2	Reifenabnutzung und Reifen- abrieb	7
1.3	Reifenmaterial – Stoffgehalte	8
1.4	Verbleib in der Umwelt	9
2	Methoden	12
2.1	Probengewinnung	12
2.2	Aufschlussverfahren	14
2.3	Bestimmung der Zusammensetzung und des Rußgehaltes (TGA)	14
3	Ergebnisse	15
3.1	Schwermetalle und Indikator- elemente	15
3.2	Rußanteil, Polymeranteil und flüchtige Bestandteile	17
4	Diskussion	23
4.1	Allgemeines	23
4.2	Stoffkonzentrationen im Reifenabrieb	23
4.3	Stofffrachten aus Reifenabrieb	25
5	Fazit	26
5.1	Zusammenfassung	26
5.2	Ausblick	27
6	Literatur	27

1 Einführung und Stand der Forschung

1.1 Fragestellung

Durch den Straßenverkehr werden beträchtliche Stoffmengen freigesetzt, die zum größten Teil mit dem Straßenabflusswasser und als Staubbiederschlag in den Straßenseitenraum transportiert werden. Zum überwiegenden Teil stammen diese Stoffe von Reifen-, Bremsbelag-, Kupplungs- und Fahrabrieb.

Vor dem Hintergrund des Bodenschutzgesetzes und der 4. Tochterrichtlinie zur EU-Luftqualitätsrichtlinie sollen Menge, Qualität und Herkunft der Stoffeinträge in den Straßenseitenraum genauer bestimmt werden, um die Hauptquellen zu identifizieren und Ansätze für Minderungsmaßnahmen zu zeigen.

Der Feinstaubanteil (PM₁₀) am Reifenabrieb beträgt etwa 1 bis 7 % des gesamten Reifenabriebs (VDI-RL 3782-7). Insgesamt ist der Reifenabrieb eine der mengenmäßig größten Quellen für die Gesamtstaubemissionen des Straßenverkehrs. Für die jährlich freigesetzte Menge von Reifenabrieb liegen verschiedene Schätzungen vor. Über die Inhaltsstoffe gibt es jedoch keine aktuellen Informationen. So kann auch die Menge der Schwermetalle schlecht abgeschätzt werden, die durch Reifenabrieb in den Straßenseitenraum eingetragen oder als Feinstaub freigesetzt wird.

Um eine Übersicht über die mit dem Reifenabrieb freigesetzten Schadstoffmengen zu bekommen, wurde Material von Reifenaufläichen aus den Beständen der BAST analysiert. Ziel war die Ermittlung der Bandbreite der Schadstoffgehalte in den verschiedenen Reifen, da hierzu bisher kaum aktuelle Daten vorliegen. Die gefundenen Schwermetallgehalte und Elementverhältnisse werden mit Literaturdaten verglichen.

Die Ergebnisse sollen in die Überarbeitung bzw. Erstellung des Merkblattes für Luftverunreinigungen an Straßen (MLuS), die Richtlinien zur Anlage von Straßen – Teil Entwässerung (RAS-Ew), die Richtlinien für Straßen in Wasserschutzgebieten (RiStWaG) und die Richtlinien zum Umgang mit Bankettmaterial einfließen.

1.2 Reifenabnutzung und Reifenabrieb

Eine Übersicht über Faktoren, die die Abriebraten beeinflussen, und die Höhe der möglichen Beeinflussung geben GEBBE et al. (1997a). Dazu zählen Fahrzeugtyp, -gewicht und -beladung, Achsgeometrie, Verteilung von Lenkung und Antrieb auf die Reifen, Umgebungstemperatur, nasser oder trockener Fahrbelag, Fahrbelagoberfläche und Streckenführung, Reifenfülldruck, Fahrgeschwindigkeit, Beschleunigungs- und Bremsverhalten, Profiltiefe und andere. Eine der Hauptquellen für Abriebsunterschiede ist der Fahrstil. Aber selbst bei Versuchsreihen, die diesen Faktor eliminieren können, hat nach GEBBE et al. jede der Ermittlungsmethoden für Menge und ggf. auch Qualität von Reifenabrieb ihre Schwächen, sodass alle Angaben große Streubreiten aufweisen (sollten). Die Reifenabriebraten steigen mit dem zulässigen Gesamtgewicht der Fahrzeuge, ebenso mit der Motorleistung (GEBBE et al. 1997b).

In Großbritannien wurden 1998 etwa 440 Mrd. km von Kfz auf Straßen zurückgelegt, es waren 121 Millionen Reifen in Gebrauch (Environment Agency Bristol 1998). Dieselben Autoren geben einen geschätzten Materialverlust von 10 bis 20 Massen-% der Reifen während ihrer Lebensspanne und einen straßenbezogenen Emissionsfaktor von etwa 140 Gramm Reifenmaterial pro laufendem Meter Straße und Jahr an. KRÖMER et al. (1999) geben den Reifenabrieb (Staub) mit 0,17 % der Gesamtemissionen aus dem Produktlebenszyklus eines Reifens an, diese beinhalten alle Prozesse von Produktion bis zu Verwertung bzw. Entsorgung und bestehen vor allem aus ca. 97 % CO₂. Der Abrieb eines einzelnen Reifens wird von denselben Autoren mit ca. 1 kg (20 mg pro Reifen und gefahrenem km bei 50.000 km Laufleistung) angegeben. Der jährliche Gesamtabrieb von Reifen in der Bundesrepublik (alte Bundesländer) wird von GEBBE et al. (1997b) mit 34.000 bis 155.000 t/a angegeben. HILLENBRAND et al. (2005) berechnen einen jährlichen Gesamtabrieb von 111.420 Tonnen in Deutschland. Tabelle 1 gibt eine Übersicht zu den Abriebraten und -mengen.

Der Rußanteil aus Reifenabrieb (im innerstädtischen Verkehr in Berlin) wurde auf Basis von Abriebmessungen und Fahrleistungsberechnungen auf 367 t/a geschätzt. Das sind ca. 37 % der verkehrlich bedingten Rußemission (GEBBE et al. 1997a). Die Größenverteilung des Abriebs war bei

Gesamttrieb	Einheit	Randbedingungen	Quelle
0,12	kg/km Straßenlänge	DTV: 1000	Muschack 1989
52,8	mg/km Fahrleistung	Abriebrate Pkw innerstädtisch	GEBBE et al. 1997b
186,5	mg/km Fahrleistung	Abriebrate Nutzfahrzeuge innerstädtisch	GEBBE et al. 1997b
708	t/a	Pkw im Stadtgebiet Berlin	GEBBE et al. 1997b
381	t/a	Nfz im Stadtgebiet Berlin	GEBBE et al. 1997b
90 (53-200)	mg/km Fahrleistung	Abriebrate Pkw	Literaturlauswertung in HILLENBRAND et al. 2005
700 (105-1.700)	mg/km Fahrleistung	Abriebrate Lkw	Literaturlauswertung in HILLENBRAND et al. 2005
1.200 (1.000-1.500)	mg/km Fahrleistung	Abriebrate Sattelzug	Literaturlauswertung in HILLENBRAND et al. 2005
1.055-1.111	t/a	Gesamtreifenabrieb im Stadtgebiet Berlin	GEBBE et al. 1997b
34.000-155.000	t/a	Gesamtreifenabrieb in Deutschland	Literaturlauswertung in GEBBE et al. 1997b
111.420	t/a	Gesamtreifenabrieb in Deutschland	HILLENBRAND et al. 2005

Tab. 1: Reifenabrieb – Abriebraten und Gesamttriebmenngen

Prüfstandsversuchen von der Abriebrate abhängig. Je höher der Abrieb, desto größer der Anteil der sedimentierbaren Partikel und desto geringer der Anteil der Feinfraktion (CADLE/WILLIAMS, in: GEBBE et al. 1997a). Wenn diese Aussage auf Silica-Reifen übertragbar ist, die u. a. wegen ihres geringeren Abriebs eingesetzt werden, würde sich mit steigendem Anteil an Silica-Reifen der Anteil an Feinstäuben aus Reifenabrieb erhöhen.

1.3 Reifenmaterial – Stoffgehalte

Zu den Stoffgehalten von Reifenlaufflächen liegen nur wenige Angaben vor. In der Regel beziehen sich Herstellerangaben auf die Anteile der bewusst zugegebenen Bestandteile wie Kautschuk, Vulkanisationsbeschleuniger, Weichmacheröle, Wachse und Ähnliches. Beispielsweise enthält UBA (2003) eine Liste von etwa 40 Stoffen und Stoffgruppen, die Bestandteile von Gummimischungen sein können, und deren Funktionen.

Nach KRÖMER et al. (1999) setzt sich Reifenabrieb zu 42 % aus Kautschuk, zu 34 % aus Ruß und zu ca. 17 % aus Mineralölen zusammen, die weiteren 7 % sind unterschiedliche Inhaltsstoffe der Lauffläche sowie Substanzen aus chemischen Umsetzungen während der Vulkanisation. Darin enthalten sind 3,4 % Zink-Seifen, 0,46 % Zinkoxid, 0,001 % Bleioxid, 0,0002 % Cadmiumoxid, 0,01 %

PAK und 3 % sonstige Stoffe. Diese sonstigen Stoffe beinhalten Schwefel, Wachs, Phenyldiamine, Cyclohexylthiophtalimid, Sulfenamide, Anilin, Benzothiazol, Mercaptobenzothiazol und Mercaptobenzothiazolsulfid.

Die genauen Bestandteile und Mengenverhältnisse der Rezepturen werden meist nicht veröffentlicht. Eine Rezeptur für eine Laufflächenmischung moderner Pkw-Reifen findet sich in Tabelle 2.

Daraus lässt sich ein Gehalt von 1,08 % bzw. 10,8 g/kg Zink im Reifenmaterial abschätzen. Das wäre mehr als das Doppelte als die in KRÖMER et al. (1999) genannte Konzentration, entspricht aber etwa den Angaben von HILLENBRAND et al. (2005) in Tabelle 3.

Aber auch unbeabsichtigte Verunreinigungen der Grundbestandteile können eine wichtige Rolle spielen. Für das Beispiel der mittleren Cadmiumverunreinigung in Zink von etwa 0,1 % ist dies schon lange bekannt. Aus der Angabe von KRÖMER et al. (1999) lassen sich im Reifenmaterial ein Bleigehalt von 9,5 mg/kg und Cadmiumgehalt von 1,8 mg/kg berechnen. Beide Elemente treten als Nebenbestandteile in Zink auf. In den letzten Jahren fiel das überraschende Auftauchen hoher PAK-Konzentrationen in manchen Reifen auf, die sich als Verunreinigung in Weichmacherölen herausstellten. Dieses Problem der unbeabsichtigten Inhaltsstoffe wird

aber inzwischen bei den Herstellern beachtet (GIESE 2007).

Tabelle 3 enthält eine Literaturzusammenstellung von Abriebraten und Stoffgehalten in Reifenmaterial sowie für Blei und Zink die Gesamtemission aus Reifenabrieb in Deutschland. Sie wurde basierend auf der mittleren Gesamtmenge für Reifenabrieb von 111.420 t/a aus Tabelle 1 berechnet.

Zusammengefasst errechnen HILLENBRAND et al. (2005) anhand der neuesten verfügbaren Quellen die Freisetzung von 1.620 Tonnen Zink und 2,69 Tonnen Blei aus Reifenabrieb in Deutschland. Zu den anderen Metallen machen sie keine Angabe.

Zutaten	Menge
Styrol-Butadien-Kautschuk (SBR)	96 kg
Butadien-Kautschuk (BR)	30 kg
Füller (Silica)	80 kg
Öl	10 kg
Bis(triethoxysilylpropyl)tetrasulfan (TESPT)	6,4 kg
Schwefel, Beschleuniger	5 kg
Additive	2,5 kg
Zinkoxid	3 kg
Stearinsäure	2 kg

Tab. 2: Laufflächenmischungsrezeptur moderner Pkw-Reifen (Degussa 2007)

1.4 Verbleib in der Umwelt

HILLENBRAND et al. (2005) erwarten, dass die Bleiemissionen aus Bremsbelägen und in geringeren Mengen aus Reifenabrieb, Auswuchtgewichten und sonstigen fahrzeugspezifischen Quellen durch die EU-Altfahrzeugverordnung sinken werden. Die Emissionen von Kupfer, die nach HILLENBRAND et al. überwiegend aus Bremsbelägen stammen, und die von Zink, das vorwiegend dem Reifenabrieb entstammt, werden nach Schätzungen der Autoren aber ansteigen. Das Verhältnis der aus dem Straßenverkehr freigesetzten Mengen innerorts und außerorts wird auf etwa 1 zu 3 geschätzt. Als Hauptsenke aller drei Elemente werden außerorts die Böden neben den Straßen gesehen. Den Autoren lagen allerdings keine Daten zum Anteil der Straßen mit Hochborden und zu Einleitungen in Gewässer vor.

Anhand der Angaben in der VDI-RL 3782-7 lässt sich abschätzen, dass etwa 93 bis 99 % des Reifenabriebs nicht als Feinstaub, sondern in größeren Fraktionen als sedimentierbare Stäube entstehen. Der Transport dieser Stäube erfolgt durch Luft und Straßenabfluss sowie Spritzwasser in die benachbarten Böden. Nach KRÖMER et al. (1999) findet ein langsamer biologischer Abbau der Abriebsmasse mit einer Rate von etwa 0,7 %/Tag statt. Die nicht-

Medium	Blei	Chrom	Kupfer	Nickel	Zink	Einheit	Quelle
Metall aus Reifenabrieb, Anliegerweg	24	4	5	4	14	g/(km*a)	1)
Metall aus Reifenabrieb, Anliegerstraße	84	14	19	13	47	g/(km*a)	1)
Metall aus Reifenabrieb, Sammelstraße	157	26	36	25	88	g/(km*a)	1)
Metall aus Reifenabrieb, Hauptsammelstraße	241	40	55	38	135	g/(km*a)	1)
Metall aus Reifenabrieb, Hauptverkehrsstraße	506	84	115	80	284	g/(km*a)	1)
Metall aus Reifenabrieb, 4-spurige Stadtstraße	1.108	185	225	176	621	g/(km*a)	1)
Metall aus Reifenabrieb, Schnellverkehrsstraße	1.145	241	329	230	810	g/(km*a)	1)
Metall in Reifenmaterial, Pkw-Reifen	17,4 (1,3-34,8)	k. A.	10,8 (3,0-34,3)	k. A.	10.313 (7.300-25.000)	mg/kg	2)
Metall in Reifenmaterial, Lkw-Reifen	29,6	k. A.	k. A.	k. A.	17.800 (14.600-28.000)	mg/kg	2)
Metallemission aus Reifenabrieb in Deutschland	2,69	k. A.	k. A.	k. A.	1.620	t/a	3)

Quellen: 1) MUSCHACK 1989; 2) Literaturauswertung in HILLENBRAND et al. 2005; 3) Berechnung HILLENBRAND et al. 2005

Tab. 3: Metallabriebraten aus Reifen, Metallgehalte in Reifenmaterial, Gesamtabrieb Deutschland

flüchtigen anorganischen Bestandteile verbleiben dabei im Boden.

Nach KRÖMER et al. (1999) werden an 228.000 km Außerortsstraßen in Deutschland jährlich 46.000 Tonnen Reifenabrieb von Pkw freigesetzt und gelangen dort in den Boden. Daraus errechnen die AutorInnen ein Gleichgewicht von Eintrag und Abbau des Abriebs im Boden mit einem „Vorrat“ von 16 g Abrieb pro m³ Boden. Allerdings werden die einbezogene Ausbreitungsentfernung und Eindringtiefe für die Ermittlung des Bodenvolumens nicht angegeben. Dasselbe gilt für die berechnete Zuführung von 0,16 g/m³ Zinkoxid, 0,09 mg/m³ Cadmiumoxid und 0,4 mg/m³ Blei(II)oxid.

Aus der von HILLENBRAND et al. (2005) ermittelten Gesamtabriebmenge von 111.420 t/a würde sich die Menge von 103.620 bis 110.310 Tonnen sedimentierbarem Reifenabrieb pro Jahr in Deutschland ergeben. Darin enthalten sind etwa 2,5 bis 2,66 Tonnen Blei und 1.500 bis 1.600 Tonnen Zink.

Nach WEINGARTNER et al. (1997) stammen einatembare Partikel ($d < 3 \mu\text{m}$) vorwiegend aus Auspuffemissionen und nur zu einem sehr kleinen Teil auch aus Reifen- und Fahrbahnabrieb. Dies bestätigen andere Quellen. Trotz des geringen Feinanteils am Reifenabrieb sind jedoch wegen der hohen Gesamtabriebmengen große Mengen an Reifenabrieb im Korngrößenbereich von Schwebstaub zu erwarten. Aus der Kombination der Schätzung aus HILLENBRAND et al. und VDI_RL lässt sich etwa die Masse des Reifenabriebs im Korngrößenbereich von Schwebstaub in Deutschland mit 1.114 bis 7.799 Tonnen pro Jahr berechnen. Diese würde unter der Annahme, dass die Konzentrationen der Metalle im Abrieb nicht Korngrößenabhängig sind, 30 bis 190 kg Blei und 16 bis 113 Tonnen Zink enthalten.

Untersuchungen der verkehrsbedingten Rußimmissionen zeigen, dass neben den Rußpartikeln im Kfz-Abgas auch der Reifenabrieb einen bedeutenden Anteil zur Rußemission des Kfz-Verkehrs beiträgt. Der aus den Messungen abgeleitete Beitrag des Reifenabriebs zur Ruß-Zusatzbelastung wird mit ca. 7 % beziffert. Die Auswertung weiterer Messungen an einer großen Innerortsstraße ergab dagegen einen mittleren Beitrag des Reifenabriebs von 25 % an der Ruß-Zusatzbelastung (RAUTERBERG-WULFF, in: Handbuch MLuS 02).

Mengenangaben zu anderen Inhaltsstoffen der Reifen wie Weichmacher, Stabilisatoren u. Ä. liegen

zwar vor, wurden aber in der Literatur bisher nicht in Emissionsfaktoren umgesetzt und ausgewertet. Eine Emissionsstudie der OECD (UBA 2003) bietet dazu Ansätze, die aber nicht straßenverkehrsspezifisch ausgerichtet sind, sondern die Abschätzung der insgesamt emittierten Mengen ermöglichen sollen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden keine organischen Einzelsubstanzen untersucht. Aus orientierenden Messungen an Straßenabfluss und umfangreichen Untersuchungen an städtischem Abwasser und Kläranlagen wird jedoch klar, dass die organischen Bestandteile der Reifen in die Umwelt eingetragen werden und dort auch wieder zu finden sind, wenn man die Proben auf die entsprechenden Substanzen untersucht (STACHEL/TEGGE 2007, KRUMWIEDE 2001).

Bild 1 zeigt beispielhaft Form und Größen von Reifenabriebpartikeln von einem Laborprüfstand. Der markierte Partikel hat eine Länge von 38 μm , ist also von der Größe her dem sedimentierbaren Staub zuzuordnen. Auffällig ist die sehr häufig längliche und „gerollt“ erscheinende Form sowohl bei kleinen als auch bei großen Partikeln. Sie deutet darauf hin, dass die Partikel vom Reifen mehr abgerieben als abgerissen werden. Dies kann jedoch auch ein Effekt sein, der für die Versuchsanordnung spezifisch ist.

Sedimentierbarer Staub aus Reifenabrieb wird vorwiegend in Böden eingetragen. Dort ist bisher über seinen Verbleib und die Veränderungen wenig Spezifisches bekannt. Aus der Form der Abriebpartikel (Bild 1) und dem geschätzten Feinstaubanteil an Reifenabrieb von 1 bis 7 % ergibt sich, dass 93 bis 99 % der aus Reifen freigesetzten Rußmenge in einer Matrix aus Gummimaterial eingebunden sind, bis dieses verwittert. Die Umweltauswirkungen solchen Materials lassen sich schlecht abschätzen. In GEBBE et al. (1997a) wird postuliert, dass der Ruß aus Böden und Gewässern in Pflanzen und Tiere und damit in die Nahrungskette gelangen könne. Es werden jedoch keine Literaturbelege dafür oder für dadurch hervorgerufene Wirkungen gegeben. Aufgrund seiner chemischen Beständigkeit, der großen Oberfläche und der chemischen Ähnlichkeit mit Humuspartikeln ist auch nach der Verwitterung der Gummimatrix eine starke Bindung von Ruß an Humus in Böden oder Gewässern zu vermuten. Ein weiteres Eingehen auf diese Frage ist hier nicht möglich. Ruß aus Abgasen, wahrscheinlich auch aus Reifenabrieb, ist als black carbon in Böden nachweisbar (NEHLS 2006). Dort wird er am Feinanteil des Bodens gebunden und trägt selbst

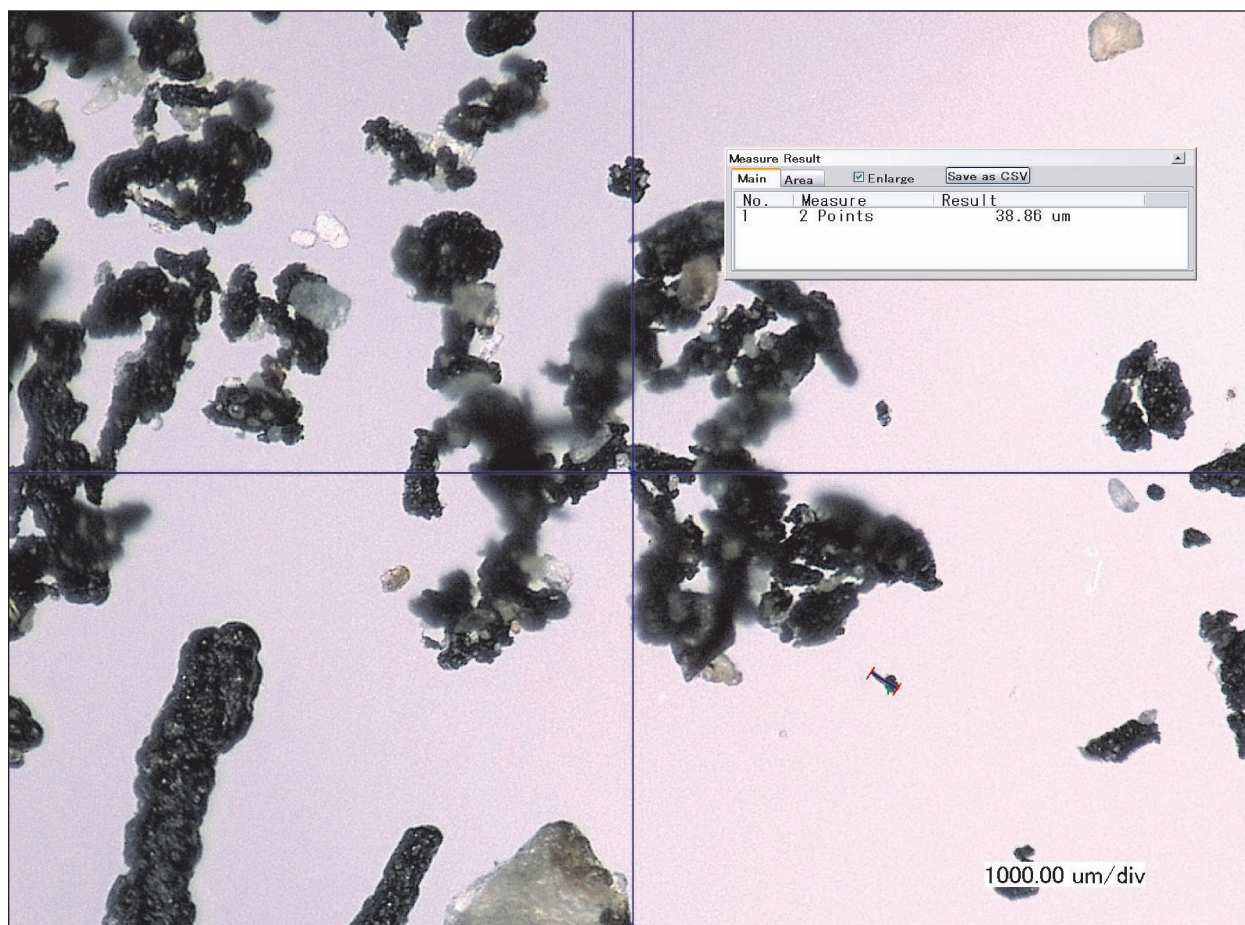


Bild 1: Reifenabriebpartikel (Foto: BAST)

zur Bildung dieses Feinanteils bei. Eine Verlagerung in die Tiefe findet nicht statt (NEHLS 2006).

Der Verbleib der Schwermetallemissionen aus Straßenverkehr ist durch umfangreiche Untersuchungen von Straßenabfluss und Böden an Straßen inzwischen gut beschrieben. Allerdings wird in fast allen dieser Literaturangaben nicht zwischen den verschiedenen Quellen differenziert. Umfangreiche emissionsorientierte Angaben hierzu hat MUSCHACK (1989) gemacht. Ebenfalls emissionsbezogene Quellenangaben für Zink, Kupfer und Blei geben HILLENBRAND et al. (2005). Dieselben Autoren vermuten, dass die Metalle zum großen Teil ortsnah in Böden und Gewässer eingetragen und zu kleinen Teilen mit dem Schwebstaub in größere Entfernung transportiert werden. Den Nachweis, dass in Banketten und Böden gute Schadstoffbindung und nur wenig Verlagerung der Schadstoffe in die Tiefe stattfinden, geben BOLLER et al. (2005), GOLWER (1991, 1999) und andere. Dadurch erfolgt eine Anreicherung der Schwermetalle in Böden und Gewässersedimenten. Genauere

Angaben zur Verteilung der eingetragenen Stoffe auf die Medien Boden und Gewässer außerorts liegen jedoch nicht vor. Innerorts ist der Verbleib der Schwermetalle von der Art der Entwässerung abhängig: Bei Mischkanalisation wird bei der Abwasserbehandlung in den Kläranlagen fast der gesamte Schwermetallbestand zurückgehalten. Bei Trennkanalisation können je nach Reinigungsverfahren und Bemessung auch erhebliche Anteile in Gewässer gelangen. Dasselbe kann an Außerortsstraßen gelten, wenn der Straßenabfluss gesammelt und ohne Reinigung in Gewässer eingeleitet wird. Dies ist aber nach RAS Ew (2005) nur an sehr schwach befahrenen Straßen gestattet. Der Normalfall ist die Ableitung des Straßenabflusses über das Bankett. Durch die Infiltration des Straßenabflusses in das Bankett und straßennahe Böden oder durch Entwässerungseinrichtungen wird außerorts der Eintrag des größten Teils der freigesetzten Metallmengen in Gewässer verhindert (BOLLER et al. 2005, KOCHER/WESSOLEK 2003, LANGE et al. 2001, DIERKES/GEIGER 1999, MIKELSEN et al. 1996, GROTEHUSMANN et al. 2006).

2 Methoden

2.1 Probengewinnung

Es stand im Reifenlager des Referates Fahrzeug/Fahrbahn der BAST eine breite Übersicht von Pkw-Reifen der Jahre 1980 bis 2003 zur Verfügung. Daraus wurden aufgrund von Markenverteilung, Größen, Einsatzbereich und Zustand 65 Reifen ausgewählt. Um ein repräsentatives Reifenkollektiv zu erhalten, wurden für die Auswertung Reifen der wichtigsten Hersteller berücksichtigt, aber auch weniger bekannte Marken aufgenommen. In den letzten Jahren haben die Anteile von Reifen für die höheren Geschwindigkeitsklassen kontinuierlich zugenommen (GEBBE et al. 1997a). Ebenso hat der Anteil von Reifen mit geringem Höhen- zu Breitenverhältnis sehr stark zugenommen. Dieser Trend konnte bei den zur Auswahl stehenden älteren Reifen nicht nachvollzogen werden. Der Anteil runderneuerter Reifen von Pkw betrug 1994 etwa 10 bis 12 % mit leicht steigender Tendenz (GEBBE et al.), 2007 beträgt der Marktanteil etwa 5 % (BRV 2007). Es konnten hier nur drei runderneuerte Reifen untersucht werden (Tabelle 9). Alle untersuchten Reifen waren benutzt und zeigten zum Teil deutliche Verschleißspuren.

Tabelle 9 enthält alle untersuchten Reifen. Reifentyp und DOT-Nummer wurden erfasst und sind dort für jeden Reifen zu finden. Die Typbezeichnung auf der Markierung der Reifenflanke setzt sich aus Angaben zu Reifenbreite, Verhältnis von Flankenhöhe zur Reifenbreite, Bauweise der Karkasse (Diagonal- oder Radialreifen), Felgendurchmesser in Zoll, Tragfähigkeitsindex, Geschwindigkeitsindex und ggf. zusätzlichen Bezeichnungen zusammen.

Die DOT-Nummer ist ein Herstellercode. Er zeigt an, dass der Reifen den Anforderungen des US-amerikanischen Department of Transportation (DOT) genügt und macht eine Angabe über den Herstellungszeitpunkt des Reifens. Die ersten beiden Ziffern stehen für die Kalenderwoche und die dritte für die letzte Ziffer des Herstellungsjahres. Ab dem Herstellungsjahr 1990 folgt auf die Ziffern ein kleines Dreieck, ab dem Jahr 2000 ist die DOT-Nummer vierstellig. Die vier letzten Ziffern nennen

das Produktionsdatum (z. B. DOT xxxx 3202 = 32. Woche 2002).

Der Geschwindigkeitsindex gibt bei Reifen die maximal erlaubte Fahrgeschwindigkeit an. Diese kann auf dem Reifen an der Seite (Flanke) als Buchstabe in der Reifenbezeichnung abgelesen werden. Die Höchstgeschwindigkeit gibt an, bis zu welcher Geschwindigkeit die Hersteller einen einwandfreien Dauerbetrieb garantieren. Unter anderem sind die in Tabelle 4 genannten Geschwindigkeitsklassen definiert.

Zu 34 der untersuchten 65 Reifen liegt eine Angabe zum Einsatzbereich vor. Dabei sind 17 als Allwetter- und M+S-Reifen deklariert, 10 als Regenreifen, 6 als Winterreifen und einer als Sommerreifen. Nicht markierte Reifen werden den Sommerreifen zugerechnet. Zum Vergleich wurde auch ein Mopedreifen aufgenommen.

Die Verteilung der untersuchten Proben über die Reifenherstellungsjahre ist relativ gleichmäßig, Reifen, die neuer als 1995 sind, sind etwas häufiger vertreten (Tabelle 9).

Bei den untersuchten Reifen kommen die Geschwindigkeitsbereiche J, Q, R, S, T, H, V und W vor. Der einzige Reifen für den Geschwindigkeitsbereich J (bis 100 km/h) ist der Mopedreifen. Die Pkw-Reifen reichen von Q (bis 160 km/h) bis W (bis 270 km/h). Die niedrigeren Geschwindigkeitsbereiche, vorwiegend Q, kommen fast ausschließlich bei den als Winterreifen deklarierten Reifen vor. Die als Allwetter- oder M+S- deklarierten Reifen sind vorwiegend für S und T (bis 180 bzw. 190 km/h) zugelassen. Die drei runderneueren Reifen sind alle M+S-Reifen, sie sind ebenfalls für S und T geeignet. Die höchsten Geschwindigkeitsbereiche finden sich bei den Regenreifen. Davon sind alle bis 190 km/h und die Hälfte für 210 km/h und mehr zugelassen. Außer einem Allwetterreifen sind alle mit V und W bezeichneten Reifen in dieser Auswahl als Regenreifen deklariert.

Von allen Reifen wurden Proben des Laufflächenmaterials abgeschält, zerkleinert und mit einem speziell entwickelten Aufschluss vollständig aufgeschlossen (siehe Kapitel 2.2). Die Reifen wurden vor der Probengewinnung grob gesäubert und in

Klasse	A1	(...)	A8	B	(...)	G	J	K	(...)	Q	R	S	T	U	H	V	VR	W	ZR	Y
km/h	5		40	50		90	100	110		160	170	180	190	200	210	240	> 210	270	> 240	300

Tab. 4: Geschwindigkeitsindex (Auszug)

einer Reifenwaschanlage mit Wasser und Kunststoffkugeln gewaschen (Bild 2). Dabei wurde die geringstmögliche Menge des vom Hersteller gelieferten Waschmittels zugegeben (72 g Tensidgemisch in 300 L Waschwasser). Die Gewinnung der Reifenproben erfolgte danach mit einer Reifenschälmaschine. Dabei wird eine Schneid-
scheibe an den schnell drehenden Reifen geführt

und Späne abgetragen (Bilder 3 und 4). Es wurde zuerst jeweils etwa 1 mm der Lauffläche abgeschält und verworfen, um eventuelle Verunreinigungen aus der Nutzung des Reifens zu entfernen. Danach wurden etwa 1 bis 2 mm Material in dünnen Spänen abgeschält, in einer Kunststoffschale aufgefangen und in 500-ml-Braunglasflaschen abgefüllt.



Bild 2: Reifenwaschanlage



Bild 3: Reifenschälvorrichtung



Bild 4: Reifenprobe – Späne von der Lauffläche

2.2 Aufschlussverfahren

Im chemischen Labor der BAST (Referat S6) wurde eine stark oxidierende Aufschlussmethode entwickelt, bei der keine Rückstände verbleiben, um alle Bestandteile der Reifenlaufflächenproben vollständig in Lösung zu bringen. So wurden die Feststoffgehalte ermittelt. Eine Bestimmung der löslichen Gehalte in Reifenproben wurde als nicht sinnvoll angesehen, da nachgewiesen wurde, dass Bankettmaterial und Straßenstaub außer Kupfer keine relevanten löslichen Schwermetallgehalte aufweisen (BOLLER et al. 2005, KOCHER 2007).

Der Aufschluss wurde in Anlehnung an eine Methode zum Aufschluss von Bitumen (IFTA 1998) durchgeführt. Alle eingesetzten Reagenzien und Gefäße sind für Spurenanalytik geeignet.

Salpetersäure (55 %), Schwefelsäure (95 bis 97 %) und Perchlorsäure (70 bis 72 %) werden im Verhältnis 1:2:2 unter ständiger Kühlung im Eisbad gemischt. 1 bis 2 g Reifenspäne werden in einen Rundkolben eingewogen und 25 ml der Säuremischung zugegeben. Der Kolben wird an einen Kühler angeschlossen und leicht erhitzt. Das Abklingen der ersten kräftigen Reaktion wird abgewartet, danach wird das Gemisch 2 Stunden unter Rückfluss gekocht. Nach Abkühlen bildet sich eine klare, farblose bis leicht gelbliche Lösung. Diese wird in einen 100-ml-Messkolben überführt und bis zur Marke aufgefüllt. Die Elemente Al, As, Cr, Cu, Fe, Mo, Na, Ni, Pb, Sb, V und Zn werden daraus mittels ICP-OES quantitativ bestimmt, Cd mit Graphitrohr-AAS.

2.3 Bestimmung der Zusammensetzung und des Rußgehaltes (TGA)

Es wurde eine Thermo-Gravimetrische-Analyse (TGA) nach DIN 51006 durchgeführt. Die TGA dient zur Untersuchung von physikalischen Vorgängen und chemischen Reaktionen, die mit Masseänderungen verbunden sind. Die Masseänderung einer Probe wird als Funktion der Temperatur bzw. der Zeit gemessen. Dazu wird die Probe in einen Ofen mit kontrolliertem Temperaturverlauf eingebracht. Während eines programmierten Aufheizvorganges wird über eine Thermowaage kontinuierlich das Probengewicht registriert. Die Probe befindet sich während der Untersuchung in einer definierten Gasatmosphäre, z. B. Stickstoff, Sauerstoff oder synthetische Luft. Die thermogravimetrischen Messdaten werden in einer Kurve dargestellt, in der die Masseänderung gegen die Temperatur aufgetragen wird. Zusätzlich wird die erste Ableitung der Messkurve gebildet und ebenfalls gegen die Temperatur aufgetragen (siehe Bild 5). Für die Auswertung der TG-Kurven wird eine Korrektur der Messdaten durchgeführt. Aus einer Messung mit gleicher Heizrate, Tiegel und Atmosphäre ohne Probensubstanz oder mit einer Inertsubstanz wird die Gewichtsänderung während des Aufheizvorganges ermittelt. Diese wird dann von den TG-Messkurven mit den Proben abgezogen. Da die Bestandteile der Proben jeweils in unterschiedlichen Temperaturbereichen verdampfen oder sich thermisch zersetzen, bilden sich für die jeweiligen Komponenten charakteristische Stufen in der Messkurve (Bild 5). Für die einzelnen Stufen lassen sich der zugehörige Temperaturbereich und die relative Masseänderung in diesem Temperaturbereich bestimmen.

Aufgrund vorangegangener Untersuchungen wurden die folgenden Einstellungen gewählt:

- Probenmenge: (20 ±3) mg,
- Temperaturbereich: Raumtemperatur bis 900 °C,
- Gasatmosphäre: Bis 550 °C Stickstoff, danach synthetische Luft, um die vollständige Verbrennung der 4. Stufe zu erreichen,
- Heizrate: 10 K/min, Gasflussrate 0,1 L/min.

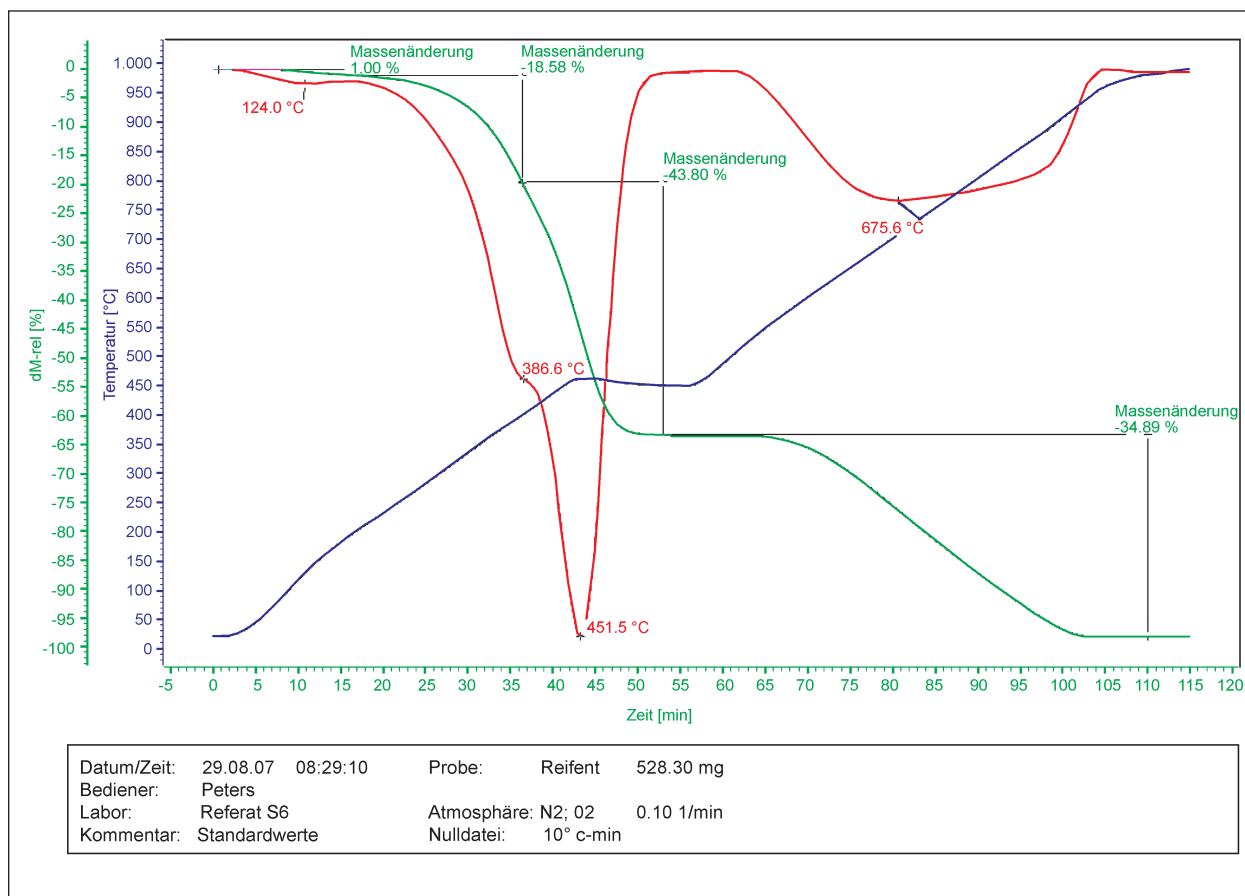


Bild 5: Beispiel für eine thermogravimetrische Messkurve

	(Haupt-)Komponente	Temperaturbereich
Stufe 1	Leicht flüchtige Bestandteile, z. B. Weichmacher	< 200 °C
Stufe 2	Flüchtige Bestandteile, z. B. Weichmacher	200 bis 370 °C
Stufe 3	Anteile des Vulkanisations-systems (Polymere)	370 bis 550 °C
Stufe 4	Ruß	550 bis 900 °C
Rest	Glührückstand, z. B. Silica, Oxide	> 900 °C

Tab. 5: Temperaturbereiche und zugeordnete Komponenten in Reifenmaterial

Den einzelnen Stufen können charakteristischen Hauptkomponenten zugeordnet werden (Tabelle 5). Eine exakte Zuordnung der Einzelbestandteile der Proben ist jedoch anhand einer TGA nicht möglich.

Der am Ende des Heizvorganges verbleibende Gewichtsanteil ist der Glührückstand. Er besteht

aus nichtflüchtigen und nichtbrennbaren mineralischen Substanzen und wird durch Addition der in Stufe 1 bis 4 ermittelten Komponenten und Ergänzung auf 100 Massen-% ermittelt. Der Gesamtmasseverlust ist identisch mit dem Glührückstand.

3 Ergebnisse

3.1 Schwermetalle und Indikator-elemente

An den Proben der Reifenlaufflächen wurden außer den umweltrelevanten Schwermetallen Cadmium, Chrom, Kupfer, Nickel, Blei und Zink auch Aluminium, Eisen und Natrium als mögliche Indikatoren straßenverkehrsbedingter Stoffeinträge bestimmt. Die Konzentrationen von Antimon, Arsen, Molybdän und Vanadium wurden ebenfalls ermittelt, da es Hinweise auf zunehmende Emissionen dieser Elemente aus dem Straßenverkehr gibt und überprüft werden sollte, ob Reifenmaterial als Quelle dafür in Frage kommt.

Bild 6 zeigt eine Übersicht über das Spektrum der Konzentrationen und der statistische Kenngrößen für die Schwermetallgehalte und weitere Elemente in den beprobten Reifenlaufflächen. Die Ergebnisse der Einzelanalysen sind in Tabelle 10 zusammengestellt.

Für die Datenauswertung wurden Werte unter der Bestimmungsgrenze mit dem halben Zahlenwert der Bestimmungsgrenze (Tabelle 6) einbezogen.

Die Elemente Antimon, Arsen, Molybdän und Vanadium überschreiten bei kaum einer Messung die Bestimmungsgrenzen. Wenn von diesen Elementen erhöhte Immissionskonzentrationen festgestellt werden, kommt Reifenabrieb nach den hier vorliegenden Ergebnissen nicht als Ursache in Frage. Von Antimon (Sb) liegen jedoch einige sehr hohe Messwerte vor, alle an älteren Reifen von nur zwei Herstellern.

Bei den übrigen Elementen führen wie bei vielen Umweltmessdaten relativ wenige hohe Messwerte und deutlich mehr niedrigere Werte

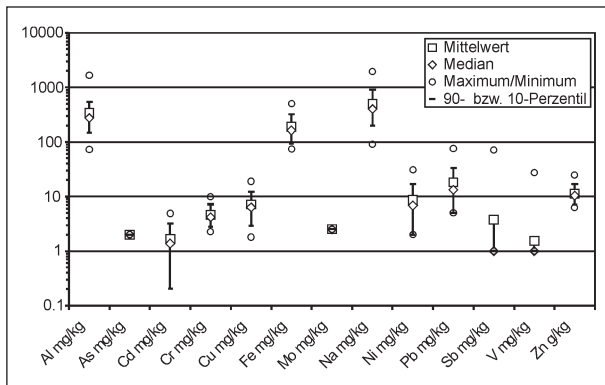


Bild 6: Verteilung der Messwerte der Elementkonzentrationen der beprobten Reifenlaufflächen

Element	Bestimmungsgrenze	Element	Bestimmungsgrenze
Al mg/kg	4.0	Na mg/kg	7.0
As mg/kg	4.0	Ni mg/kg	4.0
Cd mg/kg	2.0	Pb mg/kg	10
Cr mg/kg	2.0	Sb mg/kg	2.0
Cu mg/kg	2.0	V mg/kg	2.0
Fe mg/kg	4.0	Zn g/kg	2.0
Mo mg/kg	5.0		

Tab. 6: Bestimmungsgrenzen der untersuchten Elemente

dazu, dass die Mittelwerte leicht bis deutlich höher als die Medianwerte liegen (Bild 6). Die Messwerte überstreichen jeweils einen Konzentrationsbereich von einer bis anderthalb Größenordnungen.

Aus den Angaben von KRÖMER et al. (1999) lassen sich ein Zinkgehalt von 10,8 g/kg, ein Bleigehalt von 9,5 mg/kg und ein Cadmiumgehalt von 1,8 mg/kg im Material von Reifenlaufflächen berechnen. Die Mittelwerte der hier gemessenen Konzentrationen kommen mit 11,3 g Zink und 1,66 mg Cadmium/kg dieser Literaturangabe sehr nahe. Dagegen sind die hier gemessenen Bleigehalte mit 18,2 mg/kg doppelt so hoch wie in KRÖMER et al. angegeben und entsprechen damit eher dem von HILLENBRAND et al. (2005) für Pkw-Reifen angegebenen Mittelwert von 17,4 mg/kg.

Tabelle 7 gibt eine Übersicht der Mittelwerte und in der letzten Spalte des Verhältnisses der mittleren Konzentration in den Reifenabrieben zu den Vorsorgewerten der Bodenschutzverordnung. Mit

	Anzahl der Werte n	Mittelwert	Vorsorgewert BBodSchV Schluff (mg/kg)	Verhältnis Konzentration im Reifenabrieb zu Vorsorgewert
Herstellungsjahr	58	1993	----	
Al mg/kg	62	336	----	
As mg/kg	62	2.0	15 ^{*)}	0.13
Cd mg/kg	62	1.66	1	1.66
Cr mg/kg	62	4.60	60	0.08
Cu mg/kg	62	7.09	40	0.18
Fe mg/kg	62	189	----	
Mo mg/kg	62	2.50	----	
Na mg/kg	62	503	----	
Ni mg/kg	62	8.70	50	0.17
Pb mg/kg	62	18.2	70	0.26
Sb mg/kg	62	3.76	----	
V mg/kg	62	1.54	----	
Zn mg/kg	62	11.263	150	75.1

^{*)} Z0-Wert Eckpunktepapier TR Boden, LAGA 2004

Tab. 7: Gehalte an Schwermetallen und Indikatorelementen in den Laufflächen der beprobten Reifen

Hilfe dieses Verhältnisses kann grob abgeschätzt werden, ob Reifenabrieb für das jeweilige Element einen erheblichen Beitrag zur Stoffanreicherung im Straßenseitenraum leistet.

Nur Cadmium und Zink weisen ein Verhältnis größer 1 auf. Diese beiden Stoffe sind im Reifenabrieb also in höherer Konzentration vorhanden als in den meisten Böden und werden durch den Eintrag des Reifenabriebs in den Straßenseitenraum deutlich angereichert. Wenn die organischen Bestandteile des Reifenmaterials verwittern, bleiben nicht abbaubare Bestandteile wie Schwermetalle als Rückstand, sodass sie trotz geringer Konzentrationen im Reifenabrieb zur Metall-Anreicherung in Böden und Bankettmaterial beitragen können.

3.2 Rußanteil, Polymeranteil und flüchtige Bestandteile

Die Massenanteile der Hauptkomponenten der Reifenproben werden anhand der Thermogravimetrischen Analyse ermittelt. Als Analyseergebnis ergeben sich Gewichtsverluste in charakteristischen Temperaturbereichen. Diese entsprechen nicht Einzelsubstanzen, sondern Substanzgruppen, die sich bei Erhitzen ähnlich verhalten. Diese sind in Bild 7 grafisch dargestellt.

Der einzige Reifen, bei dem sich die Temperaturbereiche $< 200\text{ °C}$ und $200\text{ bis }370\text{ °C}$ für leichtflüchtige und flüchtige Substanzen nicht am Kurvenverlauf trennen ließen, ist der Mopedreifen. Die Temperaturbereiche $200\text{ bis }370\text{ °C}$ für flüchtige Stoffe und $370\text{ bis }550\text{ °C}$ für Anteile der Poly-

mere ließen sich bei neun Proben nicht genau trennen. In Bild 7 sind diese Proben nicht berücksichtigt. Die grafische und rechnerische Abtrennung des Rußanteils $> 550\text{ °C}$ war dagegen bei allen Proben möglich. Tabelle 8 gibt eine Übersicht der Ergebnisse der TG-Analysen.

Die Literaturangaben zum Rußgehalt in Reifenlaufflächen liegen bei 25 bis 40 %. An den untersuchten Reifen wurden 5,2 % bis 45 % gemessen, 80 % der Messwerte liegen genau im von der Literatur genannten Wertebereich. Mittelwert und Median liegen mit 34,3 % und 36,7 % relativ nah zusammen, was auf eine symmetrische Verteilung der Daten hindeutet. Literaturangaben zu den flüchtigen Anteilen und thermisch zersetzbaren Anteilen der Proben liegen nicht vor.

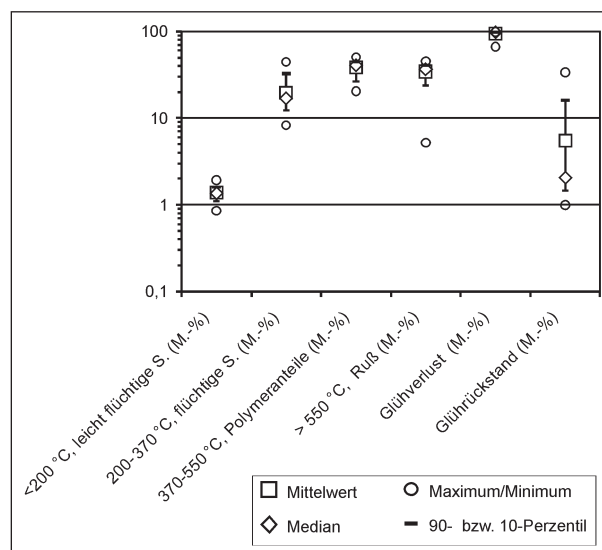


Bild 7: Verteilung der Messwerte der thermogravimetrischen Analyse der beprobten Reifenlaufflächen

	Anzahl Werte n	Min	10-Perz	Median	Mittelwert	90-Perz	Max	Stabw
Herstellungsjahr	58	1980	1987	1992	1993	2001	2003	6
$< 200\text{ °C}$, leicht flüchtige S. (M.-%)	62	0.85	1.10	1.35	1.37	1.60	1.92	0.21
$200\text{--}370\text{ °C}$, flüchtige S. (M.-%)	53	8.3	12.3	17.1	19.6	32.5	44.4	8.27
$370\text{--}550\text{ °C}$, Polymeranteile (M.-%)	54	20.5	26.6	41.0	38.5	44.5	50.4	7.53
$> 550\text{ °C}$, Ruß (M.-%)	63	5.2	23.7	36.7	34.3	40.5	45.1	8.39
Glühverlust (M.-%)	63	66.3	84.0	97.9	94.5	98.5	99.0	7.85
Glührückstand (M.-%)	63	0.99	1.47	2.06	5.49	15.96	33.7	7.85

Tab. 8: Statistische Übersicht zu Herstellungsjahr und Ergebnissen der thermogravimetrischen Analyse

lfd.-Nr. Reifen	Hersteller	Name	Einsatzbereich	Größe	DOT. Nr.	Zustand	Herstellungswoche	Herstellungsjahr
1	Michelin	Radial X	-	175/70 R13 82	KOFH A5MX 058	relativ abgefahren	5	1988
2	Metzeler	Monza	-	165/13 Radial	EBEY CEA 124	alt + stark abgefahren	12	1984
3	Continental	Super Contact	Allwetter	195/70 R14 91H	CPJ9 UM4 038	wenig abgefahren	3	1988
4	Pirelli	Radial P6	-	185/60 R14 82H	XT99 XJNW 457	wenig abgefahren	45	1987
5	Continental	Super Contact	Allwetter	185/60 VR14	CUL1 UP9 044	extrem abgefahren	4	1984
6	Michelin	MXL Radial X	-	175/70 R13 82T	FLFH A5MX 157	etwas abgefahren	15	1987
7	Uniroyal	Rallye	Regen	175/70 SR13 Radial	LLFH MER 197	neu	19	1987
8	Michelin	MXL Radial X	-	175/70 R13 82T	FTFH A5M 267	etwas abgefahren	26	1987
9	Continental	Contact	Allwetter	175 R14 88S	CPJ3 PUCD 016	neu mit Aufkleber	1	1986
10	Continental	Contact	Allwetter	175 R14 88S	CPJ3 PUCD 407	neu ohne Aufkleber	40	1987
11	Michelin	X	-	175 R14 X	FU69 1A2X 297	etwas abgefahren	29	1987
12	Michelin	MXV	-	175/65 R14 82H	FTCD E2EX 267	etwas abgefahren	26	1987
13	Michelin	XVS	-	175 HR14 Radial	FTJ3 A2FX 319	wenig abgefahren	31	1989
14	Michelin	MXV	-	175/65 R14 82H	FTCD E2EX 267	wenig abgefahren	26	1987
15	Michelin	MXL Radial X	-	145/70 R13 71S	FKEP A4MX 227	etwas abgefahren	22	1987
16	Michelin	M+S 100	M+S	175/70 R13 82Q	HCFH D8KX 246	?	24	1986
17	Continental		-	165/5 NR 15	?	sehr alt	?	?
18	Pirelli	P6 Cinturato	-	155/70 R13 75H	XCFU XJNW 388	fabrikneu	38	1988
19	Michelin	MXL Radial X	-	165/70 R13 79S	FLB A4MX 317	etwas abgefahren	31	1987
20	Condor	Haft	Winter	165/SR13	?	sehr alt	?	?
21	Kelly	Steelmark 5	-	155/70 R13	A5EY 2MK2 0701	?	7	2001
22	Goodyear	GT 20	-	155/70 R13 75T	NMEY 2BY2 199^	?	19	1999
23	Continental	Eco Kontakt EP	-	155/65 R14 75T	LLPA PVB9 2501	einseitig sehr abgef.	25	2001
24	Uniroyal	MS Plus 4	Winter	155/70 R13 75Q	LLOT APTF 486^	normal abgefahren	48	1996

Tab. 9: Untersuchte Reifen

Ifd.-Nr. Reifen	Hersteller	Name	Einsatzbereich	Größe	DOT. Nr.	Zustand	Herstellungswoche	Herstellungsjahr
25	Kelly	Steelmark 5	-	155/70 R13	A5EY 2MK2 0701	normal abgefahren	7	2001
26	Marix Ecology	Glacial	M+S	145/70 R13 71S	???? ???? 2202	rundern., etwas abgef.	22	2002
27	Uniroyal	Rallye 340/50	Regen	195/50 R15 82V	LLU4 4ET 212^	ziemlich abgefahren	21	1992
28	Continental	Sport Contact	Allwetter	195/50 R15 82V	CUU4 A1CX 134^	?	13	1994
29	Continental	Contact	Allwetter	185/65 R14 86T	1LMX AVBD 339^	ziemlich abgefahren	33	1999
30	Kelly	Steelmark 4	M + S	175/65 R14 82T	TKEX 2WK2 514^	?	51	1994
31	Semperit	Direction-Grip	M + S	205/55 R16 89H	LLT4 AXDX 416^	?	41	1996
32	Bridgestone	RCOT Winter Radial	M + S	175/70 R13	9CFH D8YT 266^	ziemlich abgefahren	26	1996
33	Goodyear	GT 2 Radial	-	195/50 R15 82T	NDMV 2FC2 0700	ziemlich abgefahren	7	2000
34	Pirelli	210 Snowsport	Winter	195/50 R16 84H	XBVJ B22S 4800	wenig abgefahren	48	2000
35	Pirelli	P6 Cinturato	-	185/65 R15 87H	XTMO XKNW 390^	wenig abgefahren	39	1990
36	Uniroyal	Rallye 680	Regen	175/70 R13T	CPFH AV2F 3603	ziemlich abgefahren	36	2003
37	Firestone	Firehawk 660	-	195/60 R14 85H	WFHC EPFT 330	wenig abgefahren	33	1980
38	Uniroyal	Rallye 340/50	Regen	195/50 R15 82V	LLU4 4ET 222^	ziemlich abgefahren	22	1992
39	Securo MS 190	M + S 780	M + S	175/70 R13 82T	???? ???? 2201	runderneuert	22	2001
40	Uniroyal	Rallye 680	Regen	155/70 R13T	AFOT AV2F 0601	?	6	2001
41	CEAT	Start	-	175/80 R14 88T	XFJ3 RXN5 148^	?	14	1998
42	Firestone	F-560	-	155/70 R13 75T	WAEY D3ET 373^	?	37	1993
43	Uniroyal	Rallye 580	Regen	165/65 R13 77T	AFPH AVE3 186^	ziemlich abgefahren	18	1996
44	Continental	Super Contact	Allwetter	175/R14 88H	CUJ3 UM1 228	ziemlich abgefahren	22	1988
45	Uniroyal	Rallye 540	Regen	205/65 R15 94W	LLPD A21B 199^	ziemlich abgefahren	19	1999
46	Dunlop	SP Sport D8	-	185/65 R14 86V	DM7J 1OW 140^	wenig abgefahren	14	1990
47	Michelin	MXL Radial X	-	175/70 R14 84T	FUHR 45MX 081^	wenig abgefahren	8	1991
48	Dunlop	SP Sport D3	-	165/60 R13 72H	DDEJ RN2 159	neu	15	1989
49	Michelin	MXV	-	205/60 R13 86H	HBVA E1EX 058	wenig abgefahren	5	1988

Tab. 9: Fortsetzung

lfd.-Nr. Reifen	Hersteller	Name	Einsatzbereich	Größe	DOT. Nr.	Zustand	Herstellungswoche	Herstellungsjahr
50	Continental	Super Contact	Allwetter	205/60 R13 85H	LP3G WEL8 130^	?	13	1990
51	Firestone	F-570	M + S	165/70 R13 79T	WFFB C8DT 243^?	?	24	1993?
52	Riken	SGR-1S	M + S	175/70 R13 82T	AVYA 2200	runderneuert	22	2000
53	Continental	Super Contact	Sommer	195/70 R14 91H	CUJ9 UM4 366	wenig abgefahren	36	1986
54	Bridgestone	RCOT SF 226	-	185/70 R14 87S	EMJ6 CEN 428	ziemlich abgefahren	42	1988
55	Firestone	FW 930	Winter	175/70 R13 82Q	3YFH E9JT 3801	einseitig sehr abgef.	38	2001
56	First Stop	Winter	Winter	145/80 R13 75Q	VPFW J7HT 3001	einseitig sehr abgef.	30	2001
57	Uniroyal	Rallye 440	Regen	185/60 R14 82H	LP61 AXEV 038^	mittelm. abgefahren	3	1998
58	Firestone	FW 900	Winter	175/70 R13 82Q	WAHF C6BT 417^?	mittelm. abgefahren	41	1997?
59	Michelin	X M+S 130	Ganzjahres	175/70 R13 82T	HMFH ACJX 236^	?	23	1996
60	Vee Rubber	Mopedreifen	-	120/70 12 56J	4X 100	?	10	1980?
62	Uniroyal	Rallye 540	Regen	205/65 R15 94W	LLPD A21B 0400	mittelm. abgefahren	4	2000
64	Uniroyal	Rallye 680	Regen	175/70 R13T	6GFH AV2F 0403	ziemlich abgefahren	4	2003
65	Dayton	D 100	-	175/70 R13 82T	VPFH H9NT 1102	sehr abgefahren	11	2002

Tab. 9: Fortsetzung

lfd.-Nr. Reifen	Al mg/kg	As mg/kg	Cd mg/kg	Cr mg/kg	Cu mg/kg	Fe mg/kg	Mo mg/kg	Na mg/kg	Ni mg/kg	Pb mg/kg	Sb mg/kg	V mg/kg	Zn mg/kg	< 200 °C, leicht flüchtige S. (M.-%)	200-370 °C, flüchtige S. (M.-%)	370-550 °C, Polymeranteile (M.-%)	> 550 °C, Ruß (M.-%)	Glühverlust (M.-%)	Glührückstand (M.-%)
1	162,7	2,0	0,1	4,6	5,0	100,7	2,5	547,5	6,8	5,0	1,0	1,0	13.019	1,25	9,59	50,35	37,11	98,3	1,7
2	271,5	2,0	1,1	3,7	4,5	147,0	2,5	861,5	12,8	11,6	1,0	1,0	13.101	1,07	8,29	44,67	43,86	97,89	2,11
3	238,0	2,0	2,8	2,8	6,5	252,5	2,5	338,0	16,1	12,6	1,0	1,0	17.985	1,39	10,46	45,26	40,06	97,17	2,83
4	226,0	2,0	3,0	5,3	5,1	121,5	2,5	734,0	9,0	48,6	1,0	1,0	11.475	1,66	12,52	43,87	40,03	98,08	1,92
5	662,5	2,0	0,8	3,8	5,6	319,0	2,5	260,5	4,7	5,0	1,0	1,0	16.723	1,47	9,12	44,52	40,52	95,63	4,37
6	195,0	2,0	1,2	3,2	2,6	173,5	2,5	272,5	4,4	5,0	1,0	1,0	8.714	1,35	58,82		38,26	98,43	1,57
7	282,0	2,0	2,2	3,8	9,6	302,0	2,5	424,5	6,7	16,4	1,0	1,0	10.431	1,54	60,93		35,90	98,37	1,63
8	388,7	2,0	1,6	5,6	17,3	378,5	2,5	333,1	11,4	15,0	1,0	1,0	8.788	1,33	16,21	40,17	40,24	97,95	2,05
9	308,5	2,0	2,2	2,6	2,9	179,4	2,5	854,8	4,9	23,2	16,4	1,0	10.310	1,41	12,25	42,73	41,68	98,07	1,93
10	329,6	2,0	3,4	4,0	8,4	329,1	2,5	767,0	5,5	19,6	8,5	1,0	9.798	1,46	12,93	38,27	45,10	97,76	2,24

Tab. 10: Gehalte an Schwermetallen und Indikatorelementen in den Laufflächen der beprobten Reifen (alle Messwerte)

lfd.-Nr. Reifen	Al mg/kg	As mg/kg	Cd mg/kg	Cr mg/kg	Cu mg/kg	Fe mg/kg	Mo mg/kg	Na mg/kg	Ni mg/kg	Pb mg/kg	Sb mg/kg	V mg/kg	Zn mg/kg	< 200 °C, leicht flüchtige S. (M.-%)	200-370 °C, flüchtige S. (M.-%)	370-550 °C, Polymeranteile (M.-%)	> 550 °C, Ruß (M.-%)	Glühverlust (M.-%)	Glührückstand (M.-%)
11	353,0	2,00	3,69	3,34	10,76	326,02	2,5	393,8	6,80	21,04	1,00	1,00	10.426	1,33	10,24	44,08	42,63	98,28	1,72
12	438,0	2,00	2,20	5,35	9,64	304,00	2,5	192,0	5,93	16,60	1,00	1,00	8.312	1,34	18,60	36,36	41,93	98,23	1,77
13	332,7	2,00	2,90	3,13	11,27	292,83	2,5	355,8	5,45	30,48	1,00	1,00	13.476	1,88	13,23	38,23	44,31	97,65	2,35
14	559,7	2,00	1,27	6,24	6,20	321,31	2,5	201,1	5,79	10,92	1,00	1,00	8.748	1,41	15,76	41,12	39,66	97,95	2,05
15	430,1	2,0	3,2	7,9	4,3	229,2	2,5	424,0	5,2	11,3	1,0	1,0	8.932	1,15	17,16	42,18	37,87	98,36	1,64
16	541,8	2,0	1,0	7,3	9,4	401,9	2,5	447,6	7,7	10,9	1,0	1,00	7.252	1,00	18,58	43,80	34,89	98,27	1,73
17	304,1	2,0	3,2	4,3	16,5	316,4	2,5	485,1	15,4	33,2	1,0	1,0	14.235	1,32	55,92		39,54	96,78	3,22
18	89,6	2,0	1,2	5,1	9,7	180,0	2,5	437,6	5,8	19,6	1,0	1,0	13.059	1,32	16,18	43,66	37,26	98,42	1,58
19	439,2	2,0	1,8	9,2	13,0	503,9	2,5	367,7	8,3	19,6	1,0	1,0	9.759	0,85	17,44	42,02	37,30	97,61	2,39
20	258,2	2,0	2,6	4,6	8,9	192,6	2,5	631,4	10,1	57,6	1,0	1,0	12.665	1,27	17,09	40,13	27,67	86,16	13,84
21	117,9	2,0	0,2	5,6	12,3	171,3	2,5	292,2	24,6	10,2	71,2	1,0	10.510	1,41	16,97	40,64	38,41	97,43	2,57
22	168,3	2,0	1,2	9,9	5,7	152,0	2,5	467,0	16,9	64,2	1,0	1,0	14.252	1,53	30,92	27,84	32,99	93,28	6,72
23	292,3	2,0	3,8	4,2	4,5	87,1	2,5	1778,0	17,8	5,0	1,0	1,0	10.283	1,82	18,66	38,09	12,45	71,02	28,98
24	164,6	2,0	3,2	3,5	7,5	121,8	2,5	405,7	7,5	5,0	1,0	1,0	11.116	1,44	31,56	27,85	34,69	95,54	4,46
25	146,4	2,0	0,1	4,2	6,6	171,7	2,5	424,5	7,1	5,0	69,2	1,0	11.028	1,35	17,38	40,83	38,90	98,46	1,54
26	271,2	2,0	1,2	5,1	16,0	310,6	2,5	383,3	5,9	15,2	5,4	1,0	14.640	1,21	32,69	26,15	37,31	97,36	2,64
27	104,9	2,0	4,1	3,7	4,6	136,8	2,5	324,6	5,2	12,2	1,0	1,0	12.213	1,33	17,27	39,07	40,51	98,18	1,82
28	793,1	2,0	1,9	5,8	4,8	179,1	2,5	204,0	6,7	29,7	1,0	1,0	11.362	1,45	18,78	38,50	39,39	98,12	1,88
29	186,7	2,0	2,2	4,2	8,2	110,2	2,5	168,6	5,3	5,0	1,0	1,0	19.040	1,40	16,38	43,09	37,16	98,03	1,97
30	231,4	2,0	3,6	3,9	9,3	154,3	2,5	206,5	13,6	5,0	6,1	1,0	16.835	1,19	44,41	20,49	31,43	97,52	2,48
31	141,4	2,0	2,6	3,8	5,4	126,7	2,5	429,8	7,4	5,0	1,0	1,0	14.185	1,41	37,78	21,82	32,46	93,47	6,53
32	337,7	2,0	1,1	8,1	6,2	192,9	2,5	301,6	18,0	5,0	1,0	1,0	15.640	1,24	30,63	30,12	35,62	97,61	2,39
33														1,87	15,15	44,35	9,03	70,4	29,6
34	185,0	2,00	1,36	3,31	7,18	93,95	2,5	456,4	13,73	75,28	1,00	1,00	8.551	0,93	20,66	38,38	8,71	68,68	31,32
35	472,3	2,00	1,04	4,55	3,91	136,60	2,5	476,6	8,05	67,79	1,00	1,00	8.919	1,28	15,71	43,67	37,28	97,94	2,06
36	183,8	2,00	0,10	2,53	2,76	81,85	2,5	838,9	2,00	5,00	1,00	1,00	7.520	1,52	13,35	43,68	24,55	83,1	16,9
37	163,3	2,00	1,53	4,49	8,93	175,40	2,5	490,7	15,53	69,91	1,00	1,00	7.055	1,33	62,55		34,11	97,99	2,01
38	72,1	2,00	4,85	3,29	3,97	74,58	2,5	253,3	30,96	16,86	1,00	1,00	7.092	1,35	16,96	40,70	39,73	98,74	1,26
39	319,6	2,00	2,40	4,37	4,15	135,30	2,5	298,4	6,97	33,20	1,00	1,00	9.857	1,30	33,18	27,67	33,81	95,96	4,04
40	152,7	2,00	0,45	4,88	3,25	117,80	2,5	392,6	6,58	5,00	1,00	1,00	7.020	1,23	20,80	38,88	37,03	97,94	2,06
41	514,1	2,00	0,48	6,08	8,39	198,10	2,5	741,1	20,15	23,26	1,00	1,00	9.921	1,47	22,65	36,46	33,07	93,65	6,35
42	332,1	2,00	1,82	2,65	2,78	143,60	2,5	430,9	2,00	13,40	1,00	1,00	6.344	1,13	63,12		34,65	98,90	1,1
43	116,8	2,00	0,58	2,80	1,80	97,06	2,5	309,2	2,00	5,00	1,00	1,00	7.824	1,10	17,58	42,65	37,19	98,52	1,48
44	1141	2,00	0,48	5,15	8,55	414,00	2,5	278,8	7,09	17,80	1,00	1,00	19.736	1,48	16,26	42,23	36,05	96,02	3,98

Tab. 10: Fortsetzung

lfd.-Nr. Reifen	Al mg/kg	As mg/kg	Cd mg/kg	Cr mg/kg	Cu mg/kg	Fe mg/kg	Mo mg/kg	Na mg/kg	Ni mg/kg	Pb mg/kg	Sb mg/kg	V mg/kg	Zn mg/kg	< 200 °C, leicht flüchtige S. (M.-%)	200-370 °C, flüchtige S. (M.-%)	370-550 °C, Polymeranteile (M.-%)	> 550 °C, Ruß (M.-%)	Glühverlust (M.-%)	Glührückstand (M.-%)
45	215,7	2,00	2,97	3,90	3,03	108,40	2,5	914,6	4,54	5,00	1,00	1,00	9.653	1,43	15,33	43,78	24,12	84,66	15,34
46	256,4	2,00	0,72	2,56	5,42	128,60	2,5	789,3	2,00	18,45	1,00	1,00	12.796	1,43	15,40	43,49	35,60	95,92	4,08
47	179,2	2,00	0,85	2,91	2,44	91,32	2,5	344,9	5,71	5,00	1,00	1,00	8.474	1,60	36,11	23,25	38,00	98,96	1,04
48	340,6	2,00	0,72	5,06	14,79	230,40	2,5	750,1	27,62	10,19	1,00	1,00	6.659	1,28	16,77	43,84	36,59	98,48	1,52
49	357,5	2,00	0,09	9,17	7,09	144,30	2,5	126,7	6,45	5,00	1,00	8,135	8.508	1,40	22,29	35,44	39,56	98,69	1,31
50	275,8	2,00	1,60	2,27	7,59	124,60	2,5	982,4	2,00	20,59	1,00	1,00	9.555	1,31	18,23	42,25	36,26	98,05	1,95
51	176,4	2,00	0,09	2,64	2,26	97,75	2,5	266,7	9,34	20,88	1,00	27,45	6.198	1,42	60,49		37,10	99,01	0,99
52	240,6	2,00	0,86	3,42	6,77	170,20	2,5	158,0	2,00	18,83	1,00	1,00	10.496	1,30	37,03	21,39	38,10	97,82	2,18
53	1663	2,00	1,41	3,94	9,37	279,60	2,5	240,0	2,00	21,42	1,00	1,00	21.314	1,43	58,68		36,68	96,79	3,21
54	362,2	2,00	0,88	2,97	7,19	203,70	2,5	426,1	16,59	19,85	1,00	1,00	13.070	1,09	64,13		32,96	98,18	1,82
55	306,6	2,00	0,20	8,44	7,67	204,50	2,5	1075,0	12,74	5,00	1,00	1,00	6.657	1,43	16,62	47,61	18,95	84,61	15,39
56	279,0	2,00	0,07	3,55	4,42	127,70	2,5	375,1	2,00	5,00	1,00	1,00	14.852	1,35	29,88	33,20	32,15	96,58	3,42
57	419,5	2,00	1,31	3,87	2,91	146,10	2,5	192,7	2,00	12,86	1,00	1,00	6.200	1,08	17,60	43,25	36,60	98,53	1,47
58	273,2	2,00	1,28	5,33	10,92	174,90	2,5	350,6	9,18	19,87	1,00	1,00	13.961	1,59	31,17	31,20	34,67	98,63	1,37
59	1122	2,00	1,54	4,96	5,45	149,30	2,5	1945,0	2,00	5,00	1,00	1,00	8.514	1,92	13,34	45,86	5,19	66,31	33,69
60	237,2	2,00	1,37	5,72	18,86	109,80	2,5	90,3	8,49	18,93	1,00	1,00	24.813	3 ⁴ 41,15		20,65	36,25	98,05	1,95
62	173,8	2,00	2,32	2,94	3,91	79,00	2,5	1017,0	2,00	5,00	1,00	1,00	10.296	1,48	15,42	43,41	23,59	83,9	16,1
64	366,1	2,00	2,19	5,22	3,06	90,29	2,5	1177,0	2,00	12,94	1,00	1,00	9.942	1,67	14,38	43,96	23,35	83,36	16,64
65	188,9	2,00	0,75	4,56	2,96	104,90	2,5	257,6	11,38	5,00	1,00	1,00	8.171	1,35	62,48		34,43	98,26	1,74

Tab. 10: Fortsetzung

Element	Anzahl Werte n	Min	10-Perz	Median	Mittelwert	90-Perz	Max	Stabw
Al mg/kg	62	72	147	275	336	539	1.663	266
As mg/kg	62	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	0.0
Cd mg/kg	62	0.07	0.20	1.36	1.66	3.22	4.85	1.16
Cr mg/kg	62	2.27	2.80	4.16	4.60	7.17	9.85	1.75
Cu mg/kg	62	1.80	2.88	6.35	7.09	12.17	18.86	3.96
Fe mg/kg	62	75	94	162	189	321	504	96
Mo mg/kg	62	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	0.00
Na mg/kg	62	90	201	400	503	909	1.945	356
Ni mg/kg	62	2.00	2.0	6.79	8.70	16.9	31.0	6.43
Pb mg/kg	62	5.00	5.0	13.2	18.2	33.2	75.3	17.2
Sb mg/kg	62	1.00	1.0	1.00	3.76	1.00	71.2	12.4
V mg/kg	62	1.00	1.0	1.00	1.54	1.00	27.5	3.46
Zn g/kg	62	6.20	7.06	10.3	11.3	16.6	24.8	3.92

Tab. 11: Statistische Übersicht der Gehalte an Schwermetallen und Indikatorelementen in den Laufflächen der beprobten Reifen

Zeitraum (Herstellungsjahre)	Anzahl n	Al mg/kg	As mg/kg	Cd mg/kg	Cr mg/kg	Cu mg/kg	Fe mg/kg	Mo mg/kg	Na mg/kg	Ni mg/kg	Pb mg/kg	Sb mg/kg	V mg/kg	Zn g/kg	< 200 °C, leicht flüchtige Substanzen (M.-%)	200-370 °C, flüchtige Substanzen (M.-%)	370-550 °C, organische Substanzen (M.-%)	> 550 °C, Ruß (M.-%)	Glühverlust (M.-%)	Glührückstand (M.-%)
1980-1984	6	316	2,0	1,77	4,44	10,52	210,0	2,5	470	11,2	32,7	1,0	1,0	14,8	1,29	11,5	37,5	37,0	95,4	4,6
1985-1989	21	437	2,0	1,77	5,04	8,50	269,9	2,5	424	8,4	17,1	2,1	1,3	11,4	1,35	15,1	42,0	38,9	98,0	2,0
1990-1994	10	289	2,0	2,06	3,43	4,71	126,7	2,5	428	8,6	21,0	1,5	3,6	10,0	1,35	22,9	36,4	37,0	98,1	1,9
1995-1999	11	332	2,0	1,69	5,12	5,95	143,4	2,5	566	8,6	14,1	1,0	1,0	11,8	1,42	24,1	35,8	31,3	92,6	7,4
2000-2004	14	230	2,0	1,15	4,44	6,11	139,0	2,5	637	8,3	14,7	11,2	1,0	10,0	1,41	21,6	37,7	27,4	88,3	11,7

Tab. 12: Zeitliche Veränderung der untersuchten Reifeninhaltsstoffe – Mittelwerte aller Proben aus dem jeweiligen Zeitraum

4 Diskussion

4.1 Allgemeines

Aus den Reifenbeständen der BASf lassen sich eine Übersicht über die Entwicklung der letzten 20 Jahre und ein Querschnitt der in den letzten Jahren häufig verkauften Reifen gewinnen. Es wurde an den vorhandenen Beständen untersucht, ob systematische Unterschiede hinsichtlich Reifenherstellern, Herstellungszeitraum und Anwendungsbereich (Sommer-, Winter-, Allwetter-, M+S-Reifen, runderneuerte Reifen) feststellbar sind. Damit sollen Aussagen zu den im Lauf der Zeit akkumulierten Schadstoffgehalten in straßennahen Böden und zu gegenwärtigen Schadstoffemissionen möglich werden.

4.2 Stoffkonzentrationen im Reifenabrieb

Schon seit längerer Zeit gibt es Bestrebungen zur Verminderung der Stoffeinträge aus Reifenabrieb in die Umwelt. Daher stellte sich die Frage, ob diese schon wirksam sind und an den hier beprobten Reifen zeitliche Tendenzen der Konzentrationen festzustellen sind. Insbesondere relevant ist dies für Zink und Cadmium, bei denen Reifenabrieb wie in Kapitel 3.1 gezeigt zur Stoffanreicherung in der Umgebung beiträgt.

In Bild 8 wird die zeitliche Entwicklung der Mittelwerte der Konzentrationen bzw. Massenanteile von Cadmium, Zink, flüchtigen Bestandteilen und Ruß in den untersuchten Proben gezeigt. Die Messwerte der Proben wurden in Abschnitten von jeweils fünf Jahren zusammengefasst und gemittelt. Tabelle 12 enthält die entsprechend gemittel-

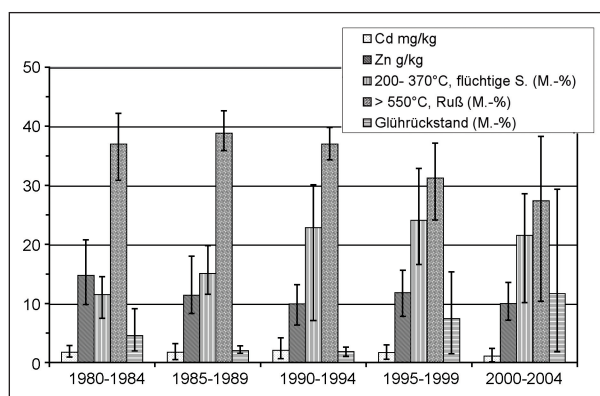


Bild 8: Zeitliche Entwicklung der Konzentrationen von Zink, Cadmium, flüchtigen Bestandteilen und Ruß in Reifenlaufflächen. Die Fehlerbalken zeigen das 10- und das 90-Perzentil der Messwerte an

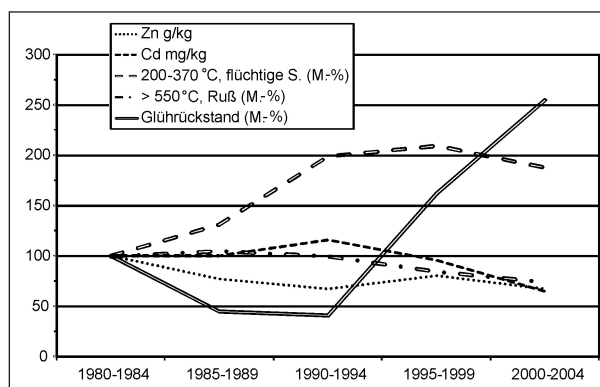


Bild 9: Zeitliche Entwicklung der Gehalte von Zink, Cadmium, flüchtigen Bestandteilen und Ruß in Reifenlaufflächen. Die Mittelwerte aus den Herstellungsjahren 1980-1984 sind gleich 100 % gesetzt

ten Werte aller untersuchten Parameter. Dort zeigen Kupfer und Eisengehalte eine abnehmende Tendenz, die aber nicht weiter bedeutsam ist, da die beiden Elemente nur in geringen Konzentrationen in den Proben auftreten. Sonst sind keine Veränderungen feststellbar. In Bild 8 und 9 ist zu

sehen, dass sowohl Zink- als auch Cadmiumkonzentrationen in den Reifenproben von den 80er Jahren bis nach 2000 eine leicht abnehmende Tendenz aufweisen. Die Zinkwerte weisen dabei eine zunehmend kleinere, die Cadmiumwerte eine größere Streubreite auf. Am Verhältnis der Mittelwerte aller Proben über die Zeit (Tabelle 13) ist zu sehen, dass die Cadmiumgehalte des in Reifenaufflächen eingesetzten Zinks weit unter dem natürlichen Cadmiumanteil in Zink-Erzen von 1 bis 6 g/kg liegen. Eine zeitliche Abhängigkeit dieses Elementverhältnisses ist nicht zu erkennen. Ähnliches gilt für das Verhältnis von Blei zu Zink in den Reifenproben, die an der unteren Grenze der Bleianteile in Zinkerzen von 1 bis 20 g/kg liegen (MERIAN et al. 2004).

Die Glührückstände nehmen seit Mitte der neunziger Jahre stark zu, ebenso ihre Streubreite, dagegen nehmen die Rußgehalte ab, und ihre Streubreite nimmt stark zu. Ursache für diese gegenläufigen Veränderungen ist wahrscheinlich der zunehmend häufigere Ersatz von Rußanteilen durch mineralische Füller wie Silica, die bei der TGA im Glührückstand verbleiben. In einer aktuellen Reifenrezeptur wie z. B. in Tabelle 2 ist Ruß als Füller nicht mehr genannt. Durch die teilweise Verwendung von Silica statt Ruß als Füllstoff wird der kumulierte Energieaufwand des gesamten Reifenlebens um ca. 9,3 % vermindert (KRÖMER et al. 1999). Darin sind Produktion, Kraftstoffverbrauch während der Nutzung und die Verwertung enthalten. Außerdem sinken die Emissionen durch den verringerten Kraftstoffverbrauch.

Besonders deutlich werden veränderte Rezepturen bei der Darstellung der zeitlichen Entwicklung der Stoffgehalte, wenn der Zeitraum 1980-1984 als Bezugswert verwendet und gleich 100 % gesetzt wird (Bild 9). Dabei fällt auch ab dem Beginn der neunziger Jahre der starke Anstieg des Einsatzes von Stoffen auf, die im Temperaturbereich 200 bis 370 °C der TGA flüchtig sind. Eine Ursache für die 1980 bis 1990 deutlich niedrigeren Werte in diesem Temperaturbereich könnte zwar die Verflüchtigung von Stoffen während der Lagerung der Reifen sein. Dieser Effekt sollte aber bei Stoffen, die erst im Bereich über 200 Grad verdampfbar oder zersetzbar sind, eher gering sein. Der Kurvenverlauf mit einer Absenkung des Anteils bei den neuesten untersuchten Reifen spricht ebenfalls gegen eine wesentliche Verfälschung durch die Lagerungszeit der Reifen.

Herstellungsjahr	Verhältnis Cadmium/Zink (g/kg)	Verhältnis Blei/Zink (g/kg)
1980-1984	0,12	2,22
1985-1989	0,16	1,50
1990-1994	0,21	2,10
1995-1999	0,14	1,19
2000-2004	0,11	1,47

Tab. 13: Verhältnis von Cadmium und Blei zu Zink in den Reifenproben

Es wurde auch geprüft, ob Unterschiede der Konzentrationen bei verschiedenen Einsatzbereichen der Reifen bestehen. Bild 10 zeigt für die Reifenproben, von denen Angaben zum Einsatzbereich vorlagen, die Verteilung der wichtigsten Inhaltsstoffe.

Wenn alle nicht deklarierten Reifen als Sommerreifen gezählt werden, ist dies mit 28 Reifen die größte Gruppe. Es wurden 17 Allwetter-/M+S-Reifen, 10 Regenreifen, 5 Winterreifen, drei runderneuerte und ein Mopedreifen untersucht.

Die Konzentrationen von Zink und Cadmium unterscheiden sich bei den Einsatzbereichen nicht deutlich. Nur der einzige deklarierte Sommerreifen und der Mopedreifen, von denen jeweils nur eine Probe vorliegt, weisen Cadmiumkonzentrationen unter dem Mittelwert der anderen Proben auf. Dagegen liegen bei diesen beiden Reifen die Zinkkonzentrationen sehr weit über den Mittelwerten, es handelt sich um die beiden höchsten Zinkgehalte aller untersuchten Proben (siehe auch Tabelle 10). Beide Reifen sind vor 1990 hergestellt worden.

Die Gruppe der runderneuerten Reifen besteht nur aus drei Proben, weist aber bei sehr geringer Streubreite sowohl niedrige Cadmium- als auch Zinkkonzentrationen auf. Die Anteile an flüchtigen Stoffen, Rußgehalte und Glührückstände der runderneuerten Reifen liegen im mittleren Bereich der anderen Einsatzbereiche. Dagegen weisen Winterreifen und Allwetter-/M+S-Reifen die höchsten Anteile an flüchtigen Stoffen auf.

In Bild 10 ist auch deutlich eine gegenläufige Tendenz von Rußgehalten und Glührückständen zu erkennen. Die Rußgehalte nehmen von Sommer-/

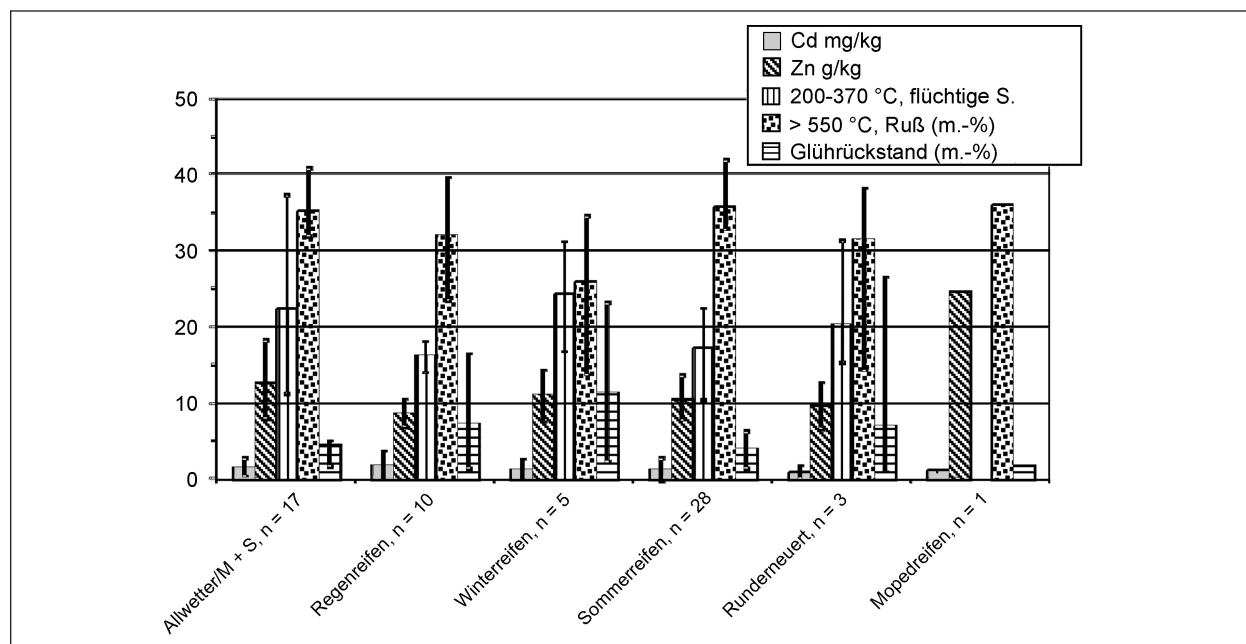


Bild 10: Konzentrationen von Zink, Cadmium, flüchtigen Bestandteilen und Ruß in Reifen verschiedener Einsatzbereiche. Die Fehlerbalken zeigen das 10- und das 90-Perzentil der Messwerte an. Von Mopedreifen liegt nur eine Probe vor, „Sommerreifen“ sind auch alle undecklierten Reifen

Mopedreifen über Allwetter-/M+S-Reifen und Regenreifen zu Winterreifen ab, die Glührückstände nehmen im Gegenzug in der gleichen Reihenfolge zu.

4.3 Stofffrachten aus Reifenabrieb

Die geschätzten Emissionen organischer Bestandteile aus Reifenabrieb sind in Bild 11 dargestellt. Es ergibt sich auf Basis der Gesamtabriebmenge von 111.420 t/a die Freisetzung von ca. 1.530 Tonnen leichtflüchtiger Substanzen (< 200 °C), 22.000 Tonnen flüchtiger Substanzen und etwa 38.000 Tonnen Ruß pro Jahr. Den größten Massenanteil machen die Gummi- und Polymeranteile des Reifenabriebs mit etwa 43.000 Tonnen aus. Die emittierte Metallmenge von 1.375 t/a besteht hauptsächlich aus Zink (Tabelle 15).

HILLENBRAND et al. (2005) haben eine umfangreiche Zusammenstellung von Literaturwerten der Gehalte von Blei, Kupfer und Zink in Bremsbelägen, Reifen und Fahrbahnabrieb erarbeitet. Die Zinkabtragsrate der Oberfläche von Straßenausstattungsgegenständen wie Schutzplanken und Verkehrsschildern wurde geschätzt. Durch Kombination dieser Gehalte mit mittleren Abriebraten haben sie fahrzeugspezifische Emissionsraten und Abriebraten für verzinkte Oberflächen berechnet und Gesamtemissionsmengen der drei Metalle ab-

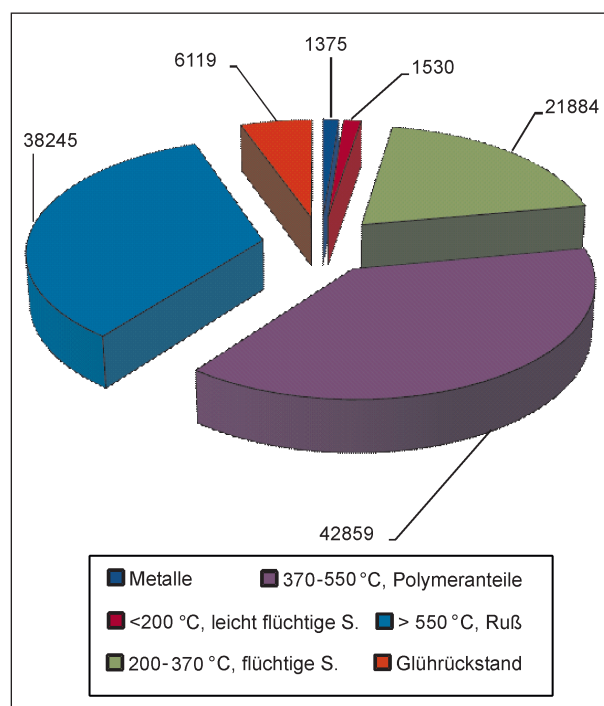


Bild 11: Abschätzung der Reifenbestandteile, die mit dem Gesamtabrieb jährlich freigesetzt werden (t/a)

geschätzt. Daraus sind in Tabelle 14 die für Straßenverkehr und Straßenausstattung spezifischen Werte zusammengestellt.

Aus den hier gemessenen Metallkonzentrationen lassen sich die mittleren aus Reifenabrieb freigesetzten Massen von 13 Elementen berechnen

	Abrieb (t/a)	Kupfer (t/a)	Blei (t/a)	Zink (t/a)
Fahrbahn	1.737.120	4,3	7,1	149
Verlust und Korrosion von Auswuchtgewichten aus Blei	n. b.	n. b.	8,77	n. b.
Bremsbeläge	12.350	928	61,5	309
Reifen	111.420	n. b.	2,69	1.620
Summe Emission Fahrzeugverkehr	n. b.	932	80,1	2.078
Davon außerorts freigesetzt	n. b.	685	58,9	1.528
Einträge aus Kfz in den Boden (direkt/diffus weitverteilt)	n. b.	356/441	37,3/29,7	1.215/455
Eintrag aus Straßenausrüstung in Böden	n. b.	n. b.	n. b.	207

Tab. 14: Gesamtabrieb und Gesamtemissionsraten von Kupfer, Blei und Zink aus dem Straßenverkehr und Straßenausrüstung (Zusammenstellung nach HILLENBRAND et al. 2005)

Parameter	Fracht aus Reifenabrieb gesamt (t/a)	Fracht in sedi- mentierbarem Staub (t/a)	Fracht in Schwebstaub (t/a)
Al	37,5	36,0	1,50
As	0,22	0,21	0,01
Cd	0,19	0,18	0,01
Cr	0,51	0,49	0,02
Cu	0,79	0,76	0,03
Fe	21,1	20,2	0,84
Mo	0,28	0,27	0,01
Na	56,0	53,8	2,24
Ni	0,97	0,93	0,04
Pb	2,03	1,94	0,08
Sb	0,42	0,40	0,02
V	0,17	0,16	0,01
Zn	1.255	1.205	50,2

Tab. 15: Abschätzung der Schwermetallemissionen aus der Gesamtabriebmenge und den Mittelwerten der Konzentrationen der untersuchten Elemente (Annahmen: Gesamtabriebmenge 111.420 t/a; 96 % sedimentierbarer Staub, 4 % Schwebstaub)

(Tabelle 15). Die Unterschiede zu den vorhandenen Literaturwerten sind bei Zink und Kupfer relativ gering, bei Blei dagegen relativ hoch. Für alle anderen Elemente lagen keine Literaturwerte vor. Die berechnete Freisetzung von Zink und Cadmium aus Reifenabrieb ist wegen der Anreicherung dieser Elemente gegenüber Bodenmaterial (Tabelle 7) hier von besonderem Interesse. Die hier abgeschätzte Zinkemission von 1.205 t/a und Cadmiumemission von 180 kg/a aus sedimentierbaren Stäuben basiert auf der ermittelten Reifenabriebmasse

von 111.420 t/a. Diese Masse beinhaltet Lkw- und Pkw-Abrieb. Der Pkw-Reifenabrieb beträgt nach KRÖMER et al. (1999) nur etwa die Hälfte, nämlich 65.000 t/a. Die wenigen Angaben zur Zusammensetzung des Reifenabriebs von Lkw-Reifen lassen um 60 bis 80 % höhere Konzentrationen an Blei und Zink erwarten, sodass die in Tabelle 15 gemachte Abschätzung an der Untergrenze der tatsächlichen Emissionen liegt.

5 Fazit

5.1 Zusammenfassung

Der Reifenabrieb ist eine der mengenmäßig größten Quellen für Staubemissionen des Straßenverkehrs. Das betrifft sowohl sedimentierbaren Staub als auch Feinstaub in sehr viel geringeren Mengen. Vor dem Hintergrund des Bodenschutz- und Wasserrechtes sollten Menge, Qualität und Herkunft der Stoffeinträge in den Straßenseitenraum genauer bestimmt werden, um Ansätze für Minderungsmaßnahmen zu zeigen. Für die entstehende Menge an Reifenabrieb lagen verschiedene Schätzungen vor, über die Schadstoffgehalte gab es bisher nur wenige Informationen, insbesondere zu anderen Metallen als Zink. Um eine Übersicht über die mit dem Reifenabrieb freigesetzten Schadstoffmengen zu bekommen, wurde Material von Reifenaufläufen aus den Beständen der BAST analysiert und mit Literaturdaten verglichen.

Die Auswertung ergibt, dass wie vermutet Zink in teilweise sehr hohen Konzentrationen eingesetzt wird, aber auch, dass Cadmium und Blei im Vergleich zum verbreiteten Elementverhältnis Cd/Zn

und Pb/Zn in Reifenmaterial mit geringeren Anteilen vorkommen. Dementsprechend sind die hier erstmals ermittelten emittierten Cadmiumfrachten aus Reifenabrieb geringer als zu erwarten war. Kupfer- und Bleiemissionen aus Reifenmaterial wurden nach Literatur- und Herstellerangaben als problematisch eingeschätzt. Dies kann anhand der vorliegenden Messungen und Abschätzung der emittierten Mengen nicht bestätigt werden. Ebenso wurden keine bedenklichen Emissionen der anderen untersuchten Elemente gefunden.

Der zeitliche Verlauf der Konzentrationen von Zink und Cadmium in den Reifenaufläichen bildet mit einer seit den 1980er Jahren leicht sinkenden Tendenz die Bemühungen um geringere Zinkemissionen ab. Im Zeitverlauf sinkende Rußanteile und steigende Glührückstände zeichnen den zunehmenden Einsatz neuer Füllermaterialien wie Silica nach.

5.2 Ausblick

Aufgrund neuer bzw. zukünftig gestellter Umweltauforderungen werden organische Schadstoffe an Bedeutung gewinnen. Sie konnten hier nicht betrachtet werden. Beispiele dafür werden in KOCHER (2007) genannt und erläutert, hier sei nur auf die Substanzgruppen verwiesen, die möglicherweise oder nachweislich aus Reifen(-abrieb) stammen:

- Vulkanisationsbeschleuniger in der Gummiindustrie wie z. B. Benzothiazole (KRUMWIEDE 2001, DSIKOWITZKY 2002),
- Weichmacher und Stabilisatoren für Kunststoffe: STACHEL et al. (2007) fanden beispielsweise in Straßenabfluss 4-tert.-Octylphenol, 4-iso-Nonylphenol, Di(2-ethylhexyl)phtalat (DEHP) und 2,2'-Bis(4-hydroxyphenyl)propan (BPA). In Reifenkautschuk werden u. a. etwa 6 Massen-% Weichmacher zugegeben (UBA 2003),
- Verunreinigungen in Weichmacherölen: PAK.

Es ist damit zu rechnen, dass diese Stoffe mit dem sedimentierbaren Anteil des Reifenabriebs in Böden, zu einem geringen Teil auch in Gewässer eingetragen werden. Einträge aus innerörtlicher Entwässerung in Kläranlagen und die Anreicherung in Klärschlamm sind für einige der Stoffe schon nachgewiesen. Es sollte vorrangig vor dem Hintergrund der EU-Wasserrahmenrichtlinie (EU 2000, 2007) geklärt werden, ob Bankette und straßenna-

he Böden sowie die im Straßenbauregelwerk vorgesehenen Entwässerungseinrichtungen für solche Stoffe eine ausreichende Reinigungsfunktion haben.

Weiterer Forschungsbedarf wird in den folgenden Bereichen gesehen:

Die hier ermittelten Elementverhältnisse und Stofffrachten sollten mit den Ergebnissen der Stoffeintragungsmessungen an Autobahnstandorten und den ermittelten Konzentrationen in Bankettmaterial verglichen werden.

Der Verbleib der beträchtlichen Mengen von Reifenabrieb und der darin enthaltenen Stofffrachten sollte besser untersucht werden. Dazu gehört die Frage des Verbleibs der Polymer- bzw. Gummiantteile aus Reifenabrieb. Zur biologischen Abbaubarkeit liegt nur eine Literaturangabe aus den achtziger Jahren vor, es ist jedoch nicht klar, ob neue Bestandteile wie Silane sich vergleichbar verhalten.

Für den Rußanteil aus Reifen ist aufgrund seiner chemischen Beständigkeit, großen Oberfläche und chemischen Ähnlichkeit mit Humuspartikeln auch nach der Verwitterung der Gummimatrix eine starke Bindung an Humus in Böden oder Gewässern zu vermuten. Es sollte geklärt werden, ob dies zutrifft oder ob Ruß aus Böden oder Gewässern von Organismen aufgenommen wird.

Literaturangaben deuten auf einen höheren Feinstaubanteil im Abrieb aus silicahaltigen Reifen gegenüber Reifen mit Ruß als Füller hin. Wenn dies zutrifft, sollten Menge und Zusammensetzung dieses Abriebs untersucht werden.

6 Literatur

- BMU (1998): Gesetz zum Schutz des Bodens vom 17. März 1998. Bundesgesetzblatt 1998, Teil I, S. 502
- BMU (1999): Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 17. Juli 1999. Bundesgesetzblatt 1999, Teil I, S. 1.554
- BMU (9/1998): Begründung zur Bodenschutzverordnung. 88 S.
- BOLLER, M., KAUFMANN, P., OCHSENBEIN, U., STEINER, M., LANGBEIN, S., SCHEIWILLER, E., BRACHER, M. (2005): Bankette bestehender Straßen. Forschungsauftrag VSS 2001/202

- auf Antrag des Schweizerischen Verbandes der Straßen- und Verkehrsfachleute (VSS), S. 51
- BRV (2007): <http://www.bundesverband-reifenhandel.de/air/aktuell/>, Bundesverband Reifenhandel und Vulkaniseur-Handwerk e. V., Bonn
- KRÖMER, S., KREIPE, E., REICHENBACH, D., STARK, R. (1999): Produkt-Ökobilanz eines Pkw-Reifens. Continental AG (Hrsg.), Schrift der Continental AG, Hannover 1999
- Degussa (2007): Laufflächenmischungsrezeptur moderner Pkw-Reifen. Grafik, in: Neue Reifen-Zeitung 9/2007, Profil-Verlag GmbH, Stade
- DIERKES, C., GEIGER, W. F. (1999): Dekontaminierende Wirkung belebter Bodenzonen bei verkehrsbedingten Beeinträchtigungen der Bodenqualität. 174 S., Forschungsbericht im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen FE 05.107/1996/GGB.
- DIN 51 006 (1990): Thermische Analyse (TA), Thermogravimetrie (TG), Grundlagen, Oktober 1990
- DSIKOWITZKY, L. (2002): Umweltgeochemische Charakterisierung der niedermolekularen organischen Fracht des Flußsystems Lippe. Dissertation an der Fakultät für Bergbau, Hüttenwesen und Geowissenschaften der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, 178 S. Aachen
- Environment Agency Bristol (1998): Tyres in the Environment: Executive Summary. The Science of the Total Environment 234 (1-3), 243-245
- EU (2000): Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik (ABl. L 327 vom 22.12.2000, S. 1)
- EU (2007): Vorschlag für eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates über Umweltqualitätsnormen im Bereich der Wasserpolitik und zur Änderung der Richtlinie 2000/60/EG 12000/60/EC, document 5408/1/07 REV 1, 21.02.07
- FGSV (2002): Merkblatt über Luftverunreinigungen an Straßen, Teil: Straßen ohne oder mit lockerer Randbebauung – Ausgabe 2002, geänderte Fassung 2005 (MLuS-02). S. 28
- FGSV (2002b): Richtlinien für bautechnische Maßnahmen an Straßen in Wassergewinnungsgebieten (RiStWag) – Ausgabe 2002. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln
- FGSV (2005): Richtlinien für die Anlage von Straßen RAS – Teil: Entwässerung (Ras-Ew). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln
- GEBBE, HARTUNG, BERTHOLD (1997a): Quantifizierung des Reifenabriebs von Kraftfahrzeugen in Berlin. Teil I: Literaturstudie. 98 S., Technische Universität Berlin, Institut für Straßen- und Schienenverkehr. ISS-Fahrzeugtechnik
- GEBBE, HARTUNG, BERTHOLD (1997b): Quantifizierung des Reifenabriebs von Kraftfahrzeugen in Berlin. Teil II: Endbericht. S. 77 Technische Universität Berlin, Institut für Straßen- und Schienenverkehr, ISS-Fahrzeugtechnik
- GIESE, U. (2007): EU-Chemical Policy REACH-Principle, Application and Consequences. 23 S., Vortrag bei Advanced Rubber Technology (ART), Metropolregion, Hannover, 6. Februar 2007
- GOLWER, A. (1991): Belastung von Böden und Grundwasser durch Verkehrswege. Forum Städte-Hygiene 42 (8/9), S. 266-275
- GOLWER, A. (1999). Beeinflussung der Grundwasserbeschaffenheit durch Straßenverkehr in Wasserschutzgebieten. Geol. Jb. Hessen 127, 131-146
- GROTEHUSMANN, D., KASTING, U., KUNZE, M. (2006): Optimierung von Absetzbecken. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik 944, S. 120
- Handbuch MLuS 02 (2002): PC-Berechnungsverfahren zum Merkblatt über Luftverunreinigungen an Straßen, Handbuch mit Hintergrundinformationen, Version 5.0. RWTÜV Fahrzeug GmbH Würselen, Ing.-Büro Lohmeyer Karlsruhe und Dresden, INFU-Technik Bochum, Bundesanstalt für Straßenwesen
- HILLENBRAND, Th., TOUISSANT, D., BÖHM, E., FUCH, S., SCHERER, U., RUDOLPHI, A., HOFFMANN, M., KREIBIG, J., KOTZ, Ch. (2005): Einträge von Kupfer, Zink und Blei in Gewässer und Böden – Analyse der Emis-

- sionspfade und möglicher Emissionsminderungsmaßnahmen. UBA-Texte 19/05, Umweltbundesamt
- IFTA (1998): Bestimmung von Zink-Ionen in Bitumen nach Aufschluss. Unveröffentlichte Labormethode, Ingenieurgesellschaft für Technische Analytik mbH Essen
- KOCHER, B. (2007): Schadstoffgehalte in Bankettmaterial. Forschungsbericht der BAST (AP 06636), Veröffentlichung in Vorbereitung
- KOCHER, B., WESSOLEK, G. (2003): Verlagerung straßenverkehrsbedingter Stoffe mit dem Sickerwasser. 99 S., Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 864, Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Abt. Straßenbau, Bonn
- KRUMWIEDE, D. (2001): Umwelteintrag von Benzothiazolen aus dem Reifenabrieb über Kanalisation und Kläranlage und vergleichende Untersuchungen zu umweltrelevanten Eigenschaften von Benzothiazolen, Benzoimidazolen und Benzoxazolen. Dissertation an der Universität Bremen, Fachbereich Biologie/Chemie, S. 155, Dissertation.de – Verlag im Internet – www.dissertation.de, Berlin
- LANGE, G., GROTEHUSMANN, D., KASTING, U., SCHÜTTE, M., DIETERICH, M., SONDERMANN, W. (2001). Wirksamkeit von Entwässerungsbecken im Bereich von Bundesfernstraßen. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik 861. Bundesverkehrsministerium, Bonn. S. 170
- MERIAN, E., ANKE, M., IHNAT, M., STOEPLER, M. (Hrsg., 2004): Elements and their Compounds in the Environment. Vol. I-III, VCH-Verlag, Weinheim
- MIKKELSEN, P. S., HÄFLIGER, M., OCHS, M., TJELL, J. C., JACOBSON, P., BOLLER, M. (1996): Experimental Assessment of Soil and Groundwater Contamination from Two Old Infiltration Systems for Road Run-off in Switzerland. *Sci. Total Environ* 189/190, 341-347
- MUSCHACK, W. (1989): Straßenoberflächenwasser – eine diffuse Quelle der Gewässerbelastung. *Vom Wasser* 72, 267-282
- MUSCHACK, W. (1990): Pollution of Street Run-off by Traffic and Local Conditions. *The Science of the Total Environment* 93, 419-431, Elsevier, Amsterdam
- NEHLS, Th. (2006): Water and Heavy Metal Fluxes in Paved Urban Soils. 80 S. Dissertation am Institut für Ökologie der TU Berlin
- REDMANN, S. (2002): Einsatz der Thermo-Gravimetrischen-Analyse (TGA) zur Prüfung der Gummimischung von Pkw-Reifen. Forschungsbericht der Bundesanstalt für Straßenwesen (unveröffentlicht)
- STACHEL, B., TEGGE, K. T., JANTZEN, E. (2007): Schadstoffe in Hamburger Autobahnabwässern und ihre Einschätzung unter Berücksichtigung der EG-Wasserrahmenrichtlinie (EG-WRRL). *Straße und Autobahn* 6, 2007, S. 326-333, Kirschbaum-Verlag
- UBA (2003): OECD Emission Scenario Document – Additives in the Rubber Industry IC 11 (polymer industry): Exposure Assessment of the environmental Releases of Chemicals in the Rubber Industry. Final Draft, 27 S., Umweltbundesamt, Berlin

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Verkehrstechnik“

2005

- V 111: Autobahnverzeichnis 2004 (erschienen 2005)
Kühnen € 21,50
- V 119: Alternative Methoden zur Überwachung der Parkdauer sowie zur Zahlung der Parkgebühren
Boltze, Schäfer, Wohlfarth € 17,00
- V 120: Fahrleistungserhebung 2002 – Inländerfahrleistung
Hautzinger, Stock, Mayer, Schmidt, Heidemann € 17,50
- V 121: Fahrleistungserhebung 2002 – Inlandsfahrleistung und Unfallrisiko
Hautzinger, Stock, Schmidt € 12,50
- V 122: Untersuchungen zu Fremdstoffbelastungen im Straßenseitenraum – Band 1 bis Band 5
Beer, Herpetz, Moritz, Peters, Saltzmann-Koschke, Tegethof, Wirtz € 18,50
- V 123: Straßenverkehrszählung 2000: Methodik
Lensing € 15,50
- V 124: Verbesserung der Radverkehrsführung an Knoten
Angenendt, Blase, Klöckner, Bonfranchi-Simović, Bozkurt, Buchmann, Roeterink € 15,50
- V 125: PM₁₀-Emissionen an Außenortsstraßen – mit Zusatzuntersuchung zum Vergleich der PM₁₀-Konzentrationen aus Messungen an der A1 Hamburg und Ausbreitungsberechnungen
Düring, Bösinger, Lohmeyer € 17,00
- V 126: Anwendung von Sicherheitsaudits an Stadtstraßen
Baier, Heidemann, Klemps, Schäfer, Schuckliß € 16,50
- V 127: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2003 – Jahresauswertung der automatischen Dauerzählstellen
Fitschen, Koßmann € 24,50
- V 128: Qualitätsmanagement für Lichtsignalanlagen – Sicherheitsüberprüfung vorhandener Lichtsignalanlagen und Anpassung der Steuerung an die heutige Verkehrssituation
Boltze, Reusswig € 17,00
- V 129: Modell zur Glättewarnung im Straßenwinterdienst
Badelt, Breitenstein € 13,50
- V 130: Fortschreibung der Emissionsdatenmatrix des MLuS 02
Steven € 12,00
- V 131: Ausbaustandard und Überholverhalten auf 2+1-Strecken
Friedrich, Dammann, Irzik € 14,50
- V 132: Vernetzung dynamischer Verkehrsbeeinflussungssysteme
Boltze, Breser € 15,50

2006

- V 133: Charakterisierung der akustischen Eigenschaften offener Straßenbeläge
Hübelt, Schmid € 17,50
- V 134: Qualifizierung von Auditoren für das Sicherheitsaudit für Innerortsstraßen
Gerlach, Kesting, Lippert € 15,50
- V 135: Optimierung des Winterdienstes auf hoch belasteten Autobahnen
Cypra, Roos, Zimmermann € 17,00
- V 136: Erhebung der individuellen Routenwahl zur Weiterentwicklung von Umlegungsmodellen
Wermuth, Sommer, Wulff € 15,00

- V 137: PM_x-Belastungen an BAB
Baum, Hasskelo, Becker, Weidner € 14,00
- V 138: Kontinuierliche Stickoxid (NO_x)- und Ozon (O₃)-Messwertaufnahme an zwei BAB mit unterschiedlichen Verkehrsparametern 2004
Baum, Hasskelo, Becker, Weidner € 14,50
- V 139: Wirksamkeit und Wirtschaftlichkeit von Taumittelsprühanlagen
Wirtz, Moritz, Thesenvitz € 14,00
- V 140: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2004 – Jahresauswertung der automatischen Dauerzählstellen
Fitschen, Koßmann € 15,50
- V 141: Zählungen des ausländischen Kraftfahrzeugverkehrs auf den Bundesautobahnen und Europastraßen 2003
Lensing € 15,00
- V 142: Sicherheitsbewertung von Maßnahmen zur Trennung des Gegenverkehrs in Arbeitsstellen
Fischer, Brannolte € 17,50
- V 143: Planung und Organisation von Arbeitsstellen kürzerer Dauer an Bundesautobahnen
Roos, Hess, Norkauer, Zimmermann, Zackor, Otto € 17,50
- V 144: Umsetzung der Neuerungen der StVO in die straßenverkehrsrechtliche und straßenbauliche Praxis
Baier, Peter-Dosch, Schäfer, Schiffer € 17,50
- V 145: Aktuelle Praxis der Parkraumbewirtschaftung in Deutschland
Baier, Klemps, Peter-Dosch € 15,50
- V 146: Prüfung von Sensoren für Glättmeldeanlagen
Badelt, Breitenstein, Fleisch, Häusler, Scheurl, Wendl € 18,50
- V 147: Luftschadstoffe an BAB 2005
Baum, Hasskelo, Becker, Weidner € 14,00
- V 148: Berücksichtigung psychologischer Aspekte beim Entwurf von Landstraßen – Grundlagenstudie –
Becher, Baier, Steinauer, Scheuchenpflug, Krüger € 16,50
- V 149: Analyse und Bewertung neuer Forschungserkenntnisse zur Lichtsignalsteuerung
Boltze, Friedrich, Jentsch, Kittler, Lehnhoff, Reusswig € 18,50
- V 150: Energetische Verwertung von Grünabfällen aus dem Straßenbetriebsdienst
Rommeiß, Thrän, Schlägl, Daniel, Scholwin € 18,00

2007

- V 151: Städtischer Liefer- und Ladeverkehr – Analyse der kommunalen Praktiken zur Entwicklung eines Instrumentariums für die StVO
Böhl, Mause, Kloppe, Brückner € 16,50
- V 152: Schutzeinrichtungen am Fahrbahnrand kritischer Streckenabschnitte für Motorradfahrer
Gerlach, Oderwald € 15,50
- V 153: Standstreifenfreigabe – Sicherheitswirkung von Umnutzungsmaßnahmen
Lemke € 13,50
- V 154: Autobahnverzeichnis 2006
Kühnen € 22,00
- V 155: Umsetzung der Europäischen Umgebungslärmrichtlinie in Deutsches Recht
Bartolomaeus € 12,50
- V 156: Optimierung der Anfeuchtung von Tausalzen
Badelt, Seliger, Moritz, Scheurl, Häusler € 13,00
- V 157: Prüfung von Fahrzeugrückhaltesystemen an Straßen durch Anprallversuche gemäß DIN EN 1317
Klöckner, Fleisch, Balzer-Hebborn, Ellmers, Friedrich, Kübler, Lukas € 14,50
- V 158: Zustandserfassung von Alleebäumen nach Straßenbaumaßnahmen
Wirtz € 13,50

- V 159: Luftschadstoffe an BAB 2006
Baum, Hasskelo, Siebertz, Weidner € 13,50
- V 160: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2005 – Jahresauswertung der automatischen Dauerzählstellen
Fitschen, Koßmann € 25,50
- V 161: Quantifizierung staubedingter jährlicher Reisezeitverluste auf Bundesautobahnen – Infrastrukturbedingte Kapazitätsengpässe
Listl, Otto, Zackor € 14,50
- V 162: Ausstattung von Anschlussstellen mit dynamischen Wegweisern mit integrierter Stauinformation – dWiSta
Grahl, Sander € 14,50
- V 163: Kriterien für die Einsatzbereiche von Grünen Wellen und verkehrsabhängigen Steuerungen
Brilon, Wietholt, Wu € 17,50
- V 164: Straßenverkehrszählung 2005 – Ergebnisse
Kathmann, Ziegler, Thomas € 15,00

2008

- V 165: Ermittlung des Beitrages von Reifen-, Kupplungs-, Brems- und Fahrbahnabrieb an den PM₁₀-Emissionen von Straßen
Quass, John, Beyer, Lindermann, Kuhlbusch, Hirner, Sulkowski, Sulkowski, Hippler € 14,50
- V 166: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2006 – Jahresauswertung der automatischen Dauerzählstellen
Fitschen, Koßmann € 26,00
- V 167: Schadstoffe von Bankettmaterial – Bundesweite Datenauswertung
Kocher, Brose, Siebertz € 14,50
- V 168: Nutzen und Kosten nicht vollständiger Signalisierungen unter besonderer Beachtung der Verkehrssicherheit
Frost, Schulze € 15,50
- V 169: Erhebungskonzepte für eine Analyse der Nutzung von alternativen Routen in übergeordneten Straßennetzen
Wermuth, Wulff € 15,50
- V 170: Verbesserung der Sicherheit des Betriebspersonals in Arbeitsstellen kürzerer Dauer auf Bundesautobahnen
Roos, Zimmermann, Riffel, Cypra € 16,50
- V 171: Pilotanwendung der Empfehlungen für die Sicherheitsanalyse von Straßennetzen (ESN)
Weinert, Vengels € 17,50
- V 172: Luftschadstoffe an BAB 2007
Baum, Hasskelo, Siebertz, Weidner € 13,50
- V 173: Bewertungshintergrund für die Verfahren zur Charakterisierung der akustischen Eigenschaften offenerporiger Straßenbeläge
Altreuther, Beckenbauer, Männel € 13,00
- V 174: Einfluss von Straßenzustand, meteorologischen Parametern und Fahrzeuggeschwindigkeit auf die PM_x-Belastung an Straßen
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Düring, Lohmeyer, Moldenhauer, Knörr, Kutzner, Becker, Richter, Schmidt € 29,00
- V 175: Maßnahmen gegen die psychischen Belastungen des Personals des Straßenbetriebsdienstes
Fastenmeier, Eggerdinger, Goldstein € 14,50

2009

- V 176: Bestimmung der vertikalen Richtcharakteristik der Schallabstrahlung von Pkw, Transportern und Lkw
Schulze, Hübel € 13,00
- V 177: Sicherheitswirkung eingefräster Rüttelstreifen entlang der BAB A24
Lerner, Hegewald, Löhe, Velling € 13,50

- V 178: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2007 – Jahresauswertung der automatischen Dauerzählstellen
Fitschen € 13,00
- V 179: Straßenverkehrszählung 2005: Methodik
Kathmann, Ziegler, Thomas € 15,50
- V 180: Verteilung von Tausalzen auf der Fahrbahn
Hausmann € 14,50
- V 181: Voraussetzungen für dynamische Wegweisung mit integrierten Stau- und Reisezeitinformationen
Hülsemann, Krems, Henning, Thiemer € 18,50
- V 182: Verkehrsqualitätsstufenkonzepte für Hauptverkehrsstraßen mit straßenbündigen Stadt-/Straßenbahnkörpern
Sümmermann, Lank, Steinauer, M. Baier, R. Baier, Klemps-Kohnen € 17,00
- V 183: Bewertungsverfahren für Verkehrs- und Verbindungsqualitäten von Hauptverkehrsstraßen
Lank, Sümmermann, Steinauer, Baur, Kemper, Probst, M. Baier, R. Baier, Klemps-Kohnen, Jachtmann, Hebel € 24,00
- V 184: Unfallrisiko und Regelakzeptanz von Fahrradfahrern
Alrutz, Bohle, Müller, Prahlow, Hacke, Lohmann € 19,00
- V 185: Möglichkeiten zur schnelleren Umsetzung und Priorisierung straßenbaulicher Maßnahmen zur Erhöhung der Verkehrssicherheit
Gerlach, Kesting, Thiemeyer € 16,00
- V 186: Beurteilung der Streustoffverteilung im Winterdienst
Badelt, Moritz € 17,00
- V 187: Qualitätsmanagementkonzept für den Betrieb der Verkehrsrechnerzentralen des Bundes
Kirschfink, Aretz € 16,50

2010

- V 188: Stoffeinträge in den Straßenseitenraum – Reifenabrieb
Kocher, Brose, Feix, Görg, Peters, Schenker € 14,00

Alle Berichte sind zu beziehen beim:

Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Postfach 10 11 10
D-27511 Bremerhaven
Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0
Telefax: (04 71) 9 45 44 77
Email: vertrieb@nw-verlag.de
Internet: www.nw-verlag.de

Dort ist auch ein Kompletverzeichnis erhältlich.