



Logo des Projektpartners

Abschlussbericht

Reifenabrieb in der Umwelt - RAU

Berlin, Juli 2021

BMBF-Vorhaben

Förderkennzeichen 13NKE011A

Bewilligungszeitraum: 01.08.2017 bis 31.01.2021

Autoren:

Daniel Venghaus M.Sc., Dr.-Ing. Frank Schmerwitz, Dr. Jens Reiber, Dr. Ing. Harald Sommer, Dipl. Ing. Franklin Lindow, Dominik Herper, M.Sc, Dr.-Ing. habil. Roman Pohrt, Prof. Dr. -Ing. Matthias Barjenbruch

Mit Unterstützung von:

Jonas Griesbaum, Johan Schulthes, Oskar Stiehler



INHALTSVERZEICHNIS

Inhaltsverzeichnis	ii
Tabellenverzeichnis	iii
Abbildungsverzeichnis	v
I. Kurzbericht	1
I.1. Aufgabenstellung.....	1
I.2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	1
I.3. Planung und Ablauf des Vorhabens	2
I.4. Stand des Wissens und der Technik	3
I.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	6
II. Eingehende Darstellung	7
II.1. Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses	7
II.1.1. Probenahmekonzept & -analyse	7
II.1.2. Nutzungsphase Lebenszyklus Reifen (Emission)	50
II.1.3. Untersuchung Immission.....	72
II.1.4. Untersuchung ausgewählter Maßnahmen.....	93
II.1.5. Bewertung	103
II.1.6. Aufstellung des Maßnahmenkatalogs.....	114
II.1.7. Zusammenfassung/ Kernbotschaften	118
II.2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	119
II.3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	119
II.4. Voraussichtlicher Nutzen	119
II.4.1. Für die Wissenschaft	119
II.4.2. Für die Industrie	120
II.4.3. Für Endanwender	120
II.4.4. Für Behörden.....	120
II.5. Fortschritte im Themengebiet bei anderen Stellen	121
II.6. Veröffentlichungen.....	121
Literaturverzeichnis	124

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Analyse zu Stoffen aus Reifenabrieb (Baumann, et al., 1997).....	4
Tabelle 2: Auszug aus einer Übersicht zu Maximalkonzentrationen von Reifenpartikeln in unterschiedlichen Matrices hochgerechnet über entsprechende Marker (Wik, et al., 2009).....	5
Tabelle 3: Leitparameter mit zugeordneter Analysemethoden.....	8
Tabelle 4: Zusammenfassung des Schwefelgehaltes von Compound 1-3 17-182519-01 bis 17-182519-03.....	14
Tabelle 5: Wiederfindungsraten von Kehrversuchen auf unterschiedlichen Oberflächen.....	29
Tabelle 6: Wiederfindung der Kehrproben an den unterschiedlichen Standorten.....	29
Tabelle 7: Zusammenhang zwischen Wiederfindungsrate und der Oberflächenrauheit	30
Tabelle 8: Durchschnittlicher tatsächlicher tägliche Verkehr	31
Tabelle 9: Übersicht der Probenahmetechniken	33
Tabelle 10: Probenahmekorb in Situ: Variation der Siebreihenfolge	36
Tabelle 11: Partikelgrößenklassierung	43
Tabelle 12: Ansatz einer Kalibrierung.....	44
Tabelle 13: Tune-Werte mit festgelegten Massen und Empfindlichkeiten.....	45
Tabelle 14: Übersicht Proben	46
Tabelle 15: Übersicht PAK-Gehalte	48
Tabelle 16: Eingangsgrößen	53
Tabelle 17: Abriebtests.....	55
Tabelle 18: Oberflächenfeinstruktur ausgewählter Fahrbahnoberflächen	58
Tabelle 19 Annahmen in Simulationsrechnungen reale Straßenoberflächen	73
Tabelle 20: Anforderungen an den Beregnungsteststand	74
Tabelle 21: Regenintensitäten und Durchflüsse bezogen auf die Versuchsfläche	76
Tabelle 22: Definition der Teilprüfungen nach DBU und Anpassung für RAU	77
Tabelle 23: Probenübersicht	91
Tabelle 24: Stofffrachtsimulation - Ermittelte Stofffrachtbilanz für die betrachteten Teileinzugsgebiete der Panke.....	108
Tabelle 25: Gegenüberstellung der betrachteten Maßnahmen zur Senkung des Reifenabriebeintrags in das Kanalnetz des Teilgebiets der Panke	112
Tabelle 26: Potenzialabschätzung Behandlungsanlagen - Bewertung und Kategorisierung möglicher Maßnahmen zur Senkung der Reifenabriebemissionen und deren Entfernung im Trockenwetterfall sowie technischer Massnahmen zur Abtrennung von Reifenabrieb aus dem Niederschlags- bzw. Mischwasser	113

Tabelle 27: Potenzialabschätzung Behandlungsanlagen - Detaillierte Bewertung ausgewählter technischer Maßnahmen hinsichtlich ihrer siedlungswasserwirtschaftlicher Parameter	114
Tabelle 28: Reifenabrieb in Abhängigkeit von Fahrsituationen als Summe pro Jahr, Mittelwert in kg/(ha*a) mit Darstellung der Länge der Straßenabschnitte	116
Tabelle 29: Reifenabrieb in Abhängigkeit von DTV-Klassen und Fahrsituationen der jeweiligen Streckenabschnitte als Summe pro Jahr, Mittelwert in kg/(ha*a) mit Darstellung der Länge der Straßenabschnitte	117

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Projektkonsortium	2
Abbildung 2: Übersicht der Probenvorbereitungsschritte im Allgemeinen	9
Abbildung 3: Pyrolyse-GC-MS Chromatogramm Probe 17-203042-03 (oben) und Straßenkehrichtprobe 18-087046-01-1 (unten)	9
Abbildung 4: Ergebnis FTIR-Spektroskopie.....	11
Abbildung 5: REM-Aufnahme des Reifenmaterials 17-203042-03 mit 50-facher Vergrößerung	12
Abbildung 6: EDX-Analyse zur Analyse der Elementzusammensetzung vom Reifenmaterial 17-203042-03.....	12
Abbildung 7: REM-Aufnahme der Straßenkehrichtprobe 18-136850-33-3.	13
Abbildung 8: EDX-Analyse der Straßenkehrichtprobe 18-136850-33-3 der Messposition 1.....	13
Abbildung 9: Darstellung von Compound 1-3 17-182519-01 bis 17-182519-03.....	14
Abbildung 10: Untersuchung der Reproduzierbarkeit von 19-077745-03 des Gesamtverfahrens	15
Abbildung 11: Untersuchung der Reproduzierbarkeit von 19-077745-07 des Gesamtverfahrens	16
Abbildung 12: Fehleranalyse der Analytik-Schritte Probenvorbereitung und Detektion	16
Abbildung 13: Pyrolyseröhrchenhalter	17
Abbildung 14: Vogelperspektive auf alle Standorte (www.openstreetmap.de).....	18
Abbildung 15: Blick auf den Retentionsbodenfilter am Halensee (Joswig, 2016).....	19
Abbildung 16: Einzugsgebiet Retentionsbodenfilter Halensee (Draht, 2020)	19
Abbildung 17: Schaft Zulaufkanal.....	20
Abbildung 18: Ablauf Bodenfilter	20
Abbildung 19: Teilabschnitt der Messstrecke in der Clayallee (links: Foto der 3-spurigen Fahrbahn sowie des separaten Rad- und Fußweges; rechts: systematische Skizze des Anschlusses der Messschächte an die Straßenabläufe)	21
Abbildung 20: Reinigung der Touchdown-Zone der Landebahn Nord des Flughafens Schönefeld mittels Wasser-Hochdruck-Düsen	22
Abbildung 21: Ergebnisse des Vergleichs Fegen vs. Saugen	23
Abbildung 22: Darstellung einer Kehrfläche im Straßenraum mit charakteristischen Abmessungen..	23
Abbildung 23: Saalbesen mit Rosshaar (links) und Handfeger mit Kehrblech (rechts).....	24
Abbildung 24: Messgerät ELAtextur (links) und Vorgehen bei der Rauheitsmessung (rechts)	25
Abbildung 25: Versuchsaufbau für die Querfegung.....	26
Abbildung 26: Sieblinien von Grundreinigungen des Standortes Hochstraße	27

Abbildung 27: Prüfstoffmischung in Gläsern vor (unten) und nach (oben) dem Ausbringen und Vorgehen für die WF-Versuche (rechts).....	28
Abbildung 28: Basic Ex 1 mobiler Probenehmer (ORI, 2021).....	32
Abbildung 29: Rückspülung über 10 µm Sieb durch ROSI.....	34
Abbildung 30: Probenahmekorb	34
Abbildung 31: Siebkaskade.....	35
Abbildung 32: Beladene Siebe einer PNK-in-Situ Probenahme	36
Abbildung 33: Entlüftungsschläuche, hier verwendet zur Pegelmessung beim Überstauen des Probenahmekorbs.....	37
Abbildung 34: Plissierte Ronde zur Reduktion der Filterkuchenbildung.....	38
Abbildung 35: Beprobung der flüssigen Phase mittels Probenahmemodul	38
Abbildung 36: Probenahmekorb-Unterteil mit Dreiecksüberlauf.....	39
Abbildung 37: Leitfähigkeitssonde zur Notüberlauferkennung	40
Abbildung 38: Mittelwerte SBR-BR Gehalte pro Fraktion je Standort in mg SBR-BR/g Straßenkehricht.	47
Abbildung 39: Untersuchung der Partikelgrößenverteilung von Prüfstandproben.....	48
Abbildung 40: Gegenüberstellung Kehren/ Staubsaugen (Gravimetrische Auswertung und Bestimmung SBR-Gehalt).	49
Abbildung 41: Entwicklung der Entsorgungswege von Altreifen von 1996 bis 2010 (ETRMA, 2011)...	50
Abbildung 42: Einflussfaktoren auf die Reifenlebensdauer nach Erfahrung und Experteneinschätzung durch Continental.....	51
Abbildung 43: Einteilung der fahrsituationsspezifischen Einflussfaktoren.....	52
Abbildung 44: Abriebsraten	56
Abbildung 45: Versuchsaufbau Laborversuch modifizierter LAT-100.....	59
Abbildung 46: Bildvergrößerung durch Objektiv und Okular im Lichtmikroskop	60
Abbildung 47 Prinzipskizze von Kalibrierrad mit weißem Tape zur Partikelmikroskopie	60
Abbildung 48 Lichtmikroskopische Aufnahme von TRWP	61
Abbildung 49: Prinzipskizze, Konvertierung von einem Grauwertbild in ein binäres Bild mittels adaptivem Schwellwertverfahren	62
Abbildung 50: Prinzipskizze. Beispiel der Bildnachverarbeitung. Das unbearbeitete Binärbild (links) und das bearbeitete Binärbild (rechts).....	62
Abbildung 51 Lichtmikroskopische Aufnahme von TRWP mit anschließender Umrandung und Nummerierung der segmentierten Partikel.....	63
Abbildung 52 Histogramm Partikelanzahlverteilung. Die Ordinate zeigt die kumulierte Anzahl, die Abszisse zeigt den Äquivalenzdurchmesser	64

Abbildung 53: Histogramm Partikelflächenverteilung(q_2). Ordinate zeigt die kumulierte Fläche der Partikelgruppen, die Abszisse zeigt den dazugehörigen Äquivalenzdurchmesser	65
Abbildung 54 Histogramm Partikelvolumenverteilung(q_3). Ordinate zeigt das kumulierte Volumen, die Ordinate zeigt den Äquivalenzdurchmesser	66
Abbildung 55 Partikelgrößenverteilungen von S350_o5_M#120_3 (q_0 und q_2) nach 10 und nach 600 Bildern	67
Abbildung 56: Bremsprüfstand AIBA.....	68
Abbildung 57: Partikelbild der AIBA Probe.....	69
Abbildung 58: q_3 Volumenverteilung der AIBA Probe.....	70
Abbildung 59: q_3 Volumenverteilung der Probe vom LAT5 bei 15°C	71
Abbildung 60: Beispiel für zufällig raue Oberfläche vor (a) und nach (b) Partikelablösung	72
Abbildung 61: Kontaktzonen (links) und Tangentialspannungsverteilung (rechts) am Beispiel Asphaltprobe 2- 2. Pfeile zeigen isolierte Kontaktzonen mit Durchmesser 5,2 μm (1), 16 μm (2) und 49 μm (3)	73
Abbildung 62: Energiedichteverteilung im elastischen Kontakt für verschiedene Gebietsgrößen (klein nach groß). Die Mittelpunkte der in Abbildung 61 rechts beispielhaft markierten Gebiete sind in der jeweiligen Größe erkennbar	74
Abbildung 63 Berechnungsmodule in der Versuchshalle der TU Berlin	75
Abbildung 64: Regenteststand auf der AIBA-Teststrecke (linke Abbildung), Benetzungsbild (rechte Abbildung)	76
Abbildung 65: Aufbau und Betrieb der Abspül-Lanze	77
Abbildung 66: Aufbau der Abspülversuche am Standort "Böttgerstraße Kurve" und Positionen der Abspül-Lanze während des Versuchs.....	78
Abbildung 67 PNK künstlich Kurve, FS: Abgespülte Masse und Vergleich mit Aufkommen.....	79
Abbildung 68 PNK künstlich Kurve, SBR: Abgespülte Masse und Vergleich mit Aufkommen	80
Abbildung 69: PNK künstlich Kurve, Variation der Akkumulationszeit	81
Abbildung 70: Massenverteilung der Querfegung.....	82
Abbildung 71: Massenverteilungen von SBR und Feststoffen für einen Fahrbahnquerschnitt.....	82
Abbildung 72: Summen Straßenkehrrecht	83
Abbildung 73: Massenverteilung von SK nach Fraktionen.....	84
Abbildung 74: SBR Gesamtsummen.....	85
Abbildung 75: Einfluss von Trockenperiode und Regenspende auf FS	86
Abbildung 76: Einfluss von Trockenperiode und Regenspende auf SBR.....	87
Abbildung 77: SBR Werte bei unterschiedlichen Trockentagen, im Zulauf des Bodenfilters Halensee	88

Abbildung 78: Zusätzliche Werte bei unterschiedlichen Trockentagen, im Zulauf des Bodenfilters Halensee.....	89
Abbildung 79: Ablaufrinne(links) und Rinnensedimen (rechts) der Start- und Landebahn.....	89
Abbildung 80: Probenahmeort und Messaufbau.....	90
Abbildung 81: Luftprobe 18-151391-04 (Hochstraße) mit den zugehörigen Durchmesser	91
Abbildung 82: Partikelgrößenverteilung Luftmessungen.....	92
Abbildung 83: SBR/BR Gehalte von Luftmessungen	93
Abbildung 84: Fotodokumentation des ersten Kehrversuchs in der Halle zur Ermittlung der Kehreffizienz von Reifenabrieb	95
Abbildung 85: Ermittelte Kehreffizienzen im ersten Hallenversuch mit einem Kehrfahrzeug der Berliner Stadtreinigung	96
Abbildung 86: Testfeld zur Ermittlung der Reinigungseffizienz von Kehrfahrzeugen - 2. Versuch.....	97
Abbildung 87: Ermittelte Kehreffizienzen im zweiten Hallenversuch mit einem Kehrfahrzeug der Berliner Stadtreinigung, Berücksichtigung der seitlich verdrängten Partikel	97
Abbildung 88: Ermittlung der Kehreffizienz im Hallenversuch – Zweiter Versuch,Versuchsreihe A1 - langsame Fahrt, langsame Rotation (1300 RPM), feucht, Prüfsubstrat.....	98
Abbildung 89: Kehrversuche an der Clayallee - Markierung der Probenahmebereiche.....	99
Abbildung 90: Kehrversuche an der Clayallee - Korngrößenverteilung Kehrrichtproben.....	99
Abbildung 91: Kehrversuche an der Clayallee – Fotodokumentation des Einsatzes der Kehrmaschine	100
Abbildung 92: Kehrversuche an der Clayalle - Reinigungseffizienz AFS.....	100
Abbildung 93: Kehrversuche an der Clayalle – Bestimmung des SBR-BR-Anteils an AFS vor der Flächenreinigung durch die Kehrmaschine	101
Abbildung 94: Kehrversuche an der Clayalle – Bestimmung des SBR-BR-Anteils an AFS nach der Flächenreinigung durch die Kehrmaschine	101
Abbildung 95: Messungen definierter Parameter im Nassschlammfang und Auswertung der Regenereignisse.....	102
Abbildung 96: Bestimmung der Gesamtfeststoffmassen und der SBR Gehalte im Laubkorb nach 12 und nach 6 Monaten	103
Abbildung 97: "Komponenten" der Stofffrachtsimulation von Reifenabrieb	104
Abbildung 98: Gegenüberstellung von Messdaten und Modellierungsdaten für die betrachteten Messstellen.....	104
Abbildung 99: Relative SBR-Emissionen bezogen auf die "Gerade"	105
Abbildung 100: Untersuchung der dynamischen Akkumulation von Reifenabrieb auf Fahrbahnflächen für 3 Korngrößenklassen	106

Abbildung 101: Darstellung der Reifenabriebintensität (Reifenabrieb je PKW/d) im Bereich der Mischkanalisation, gelber Hintergrund und der Trennkanalisation, grauer Hintergrund, Probenahmeorte der TUB einzeln gekennzeichnet	107
Abbildung 102: Stofffrachtsimulation - Screenshot aus dem STORM-Modell	108
Abbildung 103: Stofffrachtsimulation – Darstellung der Wirkung von Maßnahmen, die die Emission von Reifenabrieb senken.....	110
Abbildung 104: Stofffrachtsimulation – Darstellung der Wirkung einer intensiveren Straßenreinigung	110
Abbildung 105: Stofffrachtsimulation – Darstellung des Einsatzes von Filteranlagen/ semizentralen Anlagen.....	111
Abbildung 106: Stofffrachtsimulation – Darstellung der kombinierten Wirkung einer intensiveren Straßenreinigung und Filteranlagen/ semizentralen Anlagen	111
Abbildung 107: Auswertung - GIS-Tool / Screeningtool zur Vorabbewertung geeigneter technischer Maßnahmen im gesamten Projektgebiet (südl. Teileinzugsgebiete der Panke); schwarzer Rahmen: Straßenattribute; roter Rahmen: Angaben zur entstehenden Reifenabriebmenge; grüner Rahmen: mögliche technische Maßnahmen an Standort	115
Abbildung 108: Auswertung - Ausschnitt aus dem Maßnahmenkatalog mit technischen Angaben zu einer semizentralen Schachtanlage	115

I. KURZBERICHT

I.1. Aufgabenstellung

In Deutschland entsteht durch den gesamten Straßenverkehr eine Gesamtreifenabriebmenge von 111.420 t/a (Hillenbrand, et al., 2005). Diese Menge wird zum größten Teil bei Niederschlag von dem Straßenoberflächenwasser erfasst, abgeführt und größtenteils unbehandelt in die aquatische Umwelt eingetragen. (Wik, et al., 2009)

In der Siedlungswasserwirtschaft sind Reifenpartikel und der Reifenabrieb im Hinblick auf die Eintragungsmengen, Partikelgrößenverteilung und das entsprechende Vermeidungspotential nicht ausreichend erforscht. Dazu zählt besonders das Akkumulations- und Abtragsverhalten des Reifenabriebs bei Niederschlag und der potentielle Eintrag in Oberflächengewässer bzw. möglicherweise in das Grundwasser. Es gibt keine Untersuchungen inwieweit sich Konzepte der Regenwasserbehandlung auf die Eintragungsmengen des Reifenabriebs auswirken und übertragen lassen. Insbesondere das Potential der Straßenreinigung ist bisher nicht näher untersucht.

Im Rahmen des Verbundprojekts sollten Reifenpartikel aus der Nutzungsphase des Reifens umfassend beschrieben und auf theoretischer Basis ggf. Lücken zu Verlusten von Reifenpartikeln im gesamten Lebenszyklus geschlossen werden. Es galt Eintragungspfade von Reifenmaterial in die aquatische Umwelt zu identifizieren, zu bilanzieren und Möglichkeiten der Reduzierung aufzuzeigen. Im Fokus stand im Wesentlichen das Aufkommen und der Verbleib des Reifenabriebs in der Umwelt während der Nutzungsphase. Ausgewählte Maßnahmen zur Reduzierung des Eintrags von Reifenmaterial in die aquatische Umwelt sollten verifiziert werden. Auf Basis dieser wesentlichen Einflussfaktoren, sollte ein Maßnahmenkatalog entwickelt werden, der es ermöglicht für unterschiedliche Standorte geeignete Maßnahmen abzuleiten.

I.2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Forschungsvorhaben RAU beantwortet die Fragen insbesondere zur Beschreibung sogenannter Hot Spots, zum Straßenabfluss und dem Management wirkungsvoller Maßnahmen.

Es wurden Abriebsmengen mithilfe von Verschleißtests und in situ-Beprobungen bei unterschiedlichen Einflussgrößen, Reifentypen und Fahrzeugtypen bestimmt. Für die in situ-Untersuchungen wurden unterschiedliche Einzugsgebiete im Berliner Stadtgebiet untersucht. Zur Abschätzung der Verschleißraten der Reifen in Abhängigkeit der Fahrdynamik wurden existierende Daten ausgewertet und Fahrversuche auf der Teststrecke von Continental (Contidrom) durchgeführt. Für die in situ-Beprobung wurde eine definierte Handkehrichtprobenahme und spezielle Probenahmekörbe für den Einsatz in Straßenablaufschächten entwickelt.

Einen bisher einmaligen Vorteil zur Lösung des Problems bietet die Zusammenarbeit des interdisziplinären Konsortiums um das Produkt Reifen, aus Produzent, Kunde/ Anwender, Fachplaner, Wissenschaft/Forschung, kommunale Betreiber und der Umweltanalytik. Die Ergebnisse wurden auf Grundlage der Daten von Grundlagenforschung, halbtechnischer Versuche bis hin zu in situ Probenahmen beschrieben und verifiziert.

1.3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das geplante Vorhaben wurde in dem Zeitraum vom 08/2017 bis 01/2021 durchgeführt.

Das Projektkonsortium (siehe Abbildung 1) bestand aus den fünf geförderten Projektpartnern Continental Reifen Deutschland GmbH, GKD – Gebr. Kufferath AG, Ingenieurgesellschaft Prof. Dr. Sieker mbH (IPS), WESSLING GmbH - Beratung und Analytik, Technische Universität Berlin und den fünf assoziativen Projektpartnern ADAC, Berliner Wasserbetriebe (BWB), Berliner Stadtreinigungsbetriebe (BSR), ORI Abwassertechnik GmbH & Co. KG und der VW AG. Das Konsortium hat sich mit dem Thema „Reifenabrieb in der Umwelt“ in 3,5 Jahren aus Sicht der Grundlagenforschung empirischer Untersuchungen sowie praxisorientierter In Situ Untersuchungen befasst.

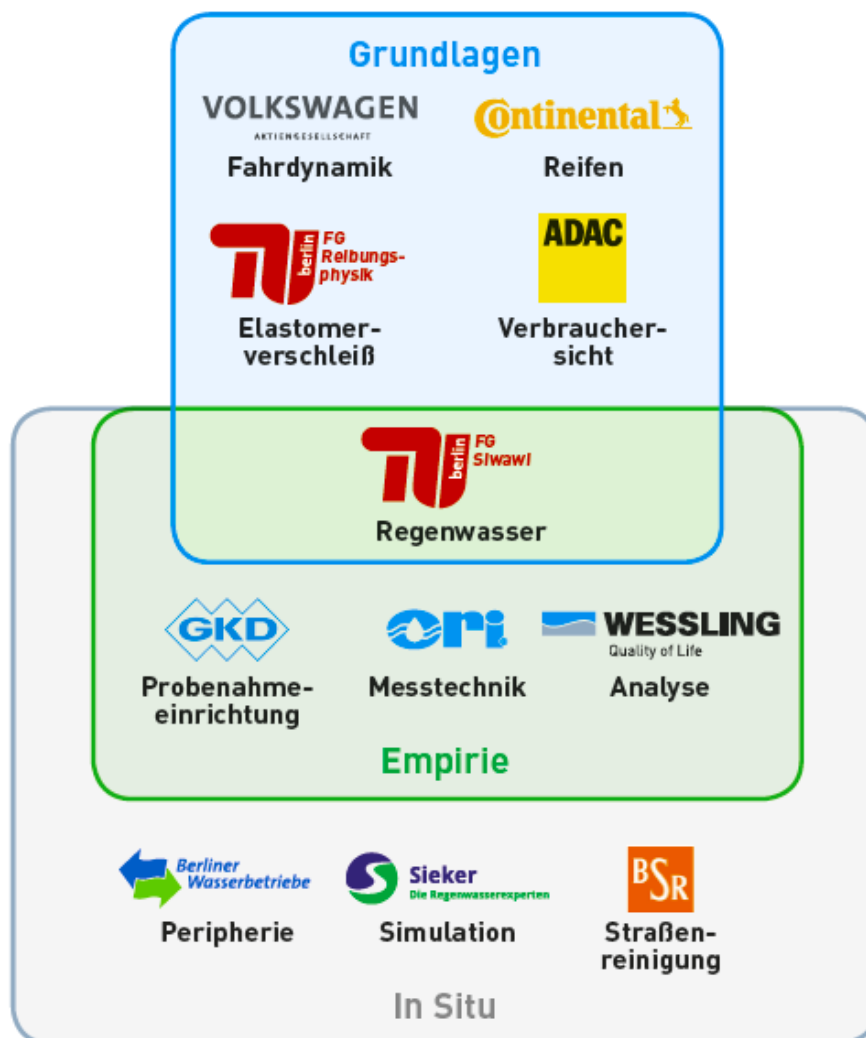


Abbildung 1: Projektkonsortium

Für den Produktlebenszyklus des Reifens, wurden potentielle Einträge von Reifenpartikeln in die Umwelt aus bestehenden Literaturdaten durch Continental, dem Fachgebiet (FG) Reibung sowie dem FG Siedlungswasserwirtschaft (Siwawi) bewertet. Der ADAC hat als assoziativer Partner die Sicht des Verbrauchers mit in das Projekt einfließen lassen und wenn möglich durch eigene Daten unterstützt.

Die Beurteilung des Eintrags von Reifenpartikeln/-abrieb in die Umwelt während der Nutzungsphase erfolgte über verschiedene Untersuchungen an Testständen und in situ-Beprobungen. Hierfür wurde an Testständen von Continental Reibungs- und Verschleißuntersuchungen vor der Fragestellung des

Eintrags in die Umwelt durchgeführt. Die Versuche wurden gemeinsam mit dem FG Reibung und Continental geplant und durchgeführt. Der entsprechende Abrieb wurde mit dem FG Reibung fraktioniert und optisch vermessen. Mit definierten Prüfstoffen wurden Abtrags- und Abspülversuche an ausgewählten innerstädtischen Straßenstandorten durch das FG Siwawi gemeinsam mit IPS geplant und durchgeführt.

Für die Beprobung der in situ-Untersuchungen wurde durch GKD und dem FG Siwawi ein völlig neuartiger Probenahmekorb entwickelt und abgestimmt, sowie an dem speziellen Teststand der TU Berlin verifiziert. Das Prinzip des Probenahmekorbs sollte es ermöglichen, den gesamten Feststoffanteil eines Regenereignisses fraktioniert zu beproben. Eine entsprechende Rückspüleinrichtung wurde ebenfalls entwickelt. Für die in situ-Untersuchungen wurden zwölf unterschiedliche Standorte durch das FG Siwawi beprobt, diese wurden vorher gemeinsam mit IPS, BSR, Continental und BWB ausgewählt.

Zur Abschätzung der Verschleißraten der Reifen in Abhängigkeit der Fahrdynamik wurden Fahrversuche auf einer Teststrecke von Continental mit den Partnern FG Reibung, FG Siwawi, VW und Continental durchgeführt bzw. begleitet.

Zur Beurteilung möglicher Maßnahmen wurde das Potential der Straßenreinigung durch die BSR, IPS und dem FG Siwawi untersucht. Hierfür wurden Straßenkehrmaschinen bei unterschiedlichen Betriebseinstellungen verglichen, um so das Reinigungskonzept im Hinblick auf die Aufnahme von Reifenpartikeln kontinuierlich verbessert zu können.

Zur weiteren Beurteilung potentieller Senken des Reifenabriebs wurde ein Nassschlammfang ohne Grobstoffeimer und ein Straßenablauf mit Grobstoffeimer in einer bestehenden und betriebsbereiten Messstrecke (Hauptstraße/Clayallee) durch das FG Siwawi, WESSLING und IPS beprobt, analysiert und bewertet. An ausgewählten Probenahmestellen wurden zur Beurteilung der luftgetragenen Reifenpartikel stichpunktartig entsprechende Luftmessung durch WESSLING realisiert.

Um Reifenpartikel beschreiben zu können, hat WESSLING die Reifenpartikel mittels geeigneter Analysetechniken in Anlehnung an definierte Leitparameter aus den Umweltproben identifiziert. Dazu war im Vorfeld eine entsprechende Probenaufbereitung notwendig, um Reifenabrieb von anorganischem (Sand u.a.) und organischem Material zu trennen. Diese musste spezifisch entwickelt werden.

Auf Grundlage der ermittelten Messergebnisse wurde eine einzugsgebietsbasierende Schmutzfrachtsimulationen von IPS durchgeführt. Die Modellierungssoftware STORM-SEWSYS wurde speziell angepasst und das Modell kalibriert.

Der Rückhalt (Reifenabrieb) von dezentralen und zentralen Regenwasserbehandlungsanlagen wurden aus bestehenden Daten zur Reduktion des AFS/ AFS63.Gehalts abgeschätzt. Diese Maßnahmen wurden mit der Software STORM-SEWSYS durch IPS einzugsgebietsabhängig modelliert.

Um Handlungsempfehlung zur Vermeidung des Eintrags von Reifenpartikeln in die Umwelt ableiten zu können wurde ein Maßnahmenkatalog erstellt.

1.4. Stand des Wissens und der Technik

Aus der Studie von (Baumann, et al., 1997) zu Reifenabrieb aus dem Jahr 1997 geht hervor, dass im Straßenabflusswasser eine Vielzahl von Substanzen gelöst werden und es wird vermutet, dass einige dieser gelösten Stoffe aus den Reifenabriebspartikeln stammen. Entsprechende Versuche mit selbst

hergestelltem Reifenabrieb (Bandschleifer verschiedener Körnung) und mit Reifenmehl wurden durchgeführt.

In der nachfolgenden Tabelle sind die analysierten Parameter, die wesentlichen Probenaufbereitungsschritte und die entsprechende Analyseverfahren aufgeführt.

Tabelle 1: Analyse zu Stoffen aus Reifenabrieb (Baumann, et al., 1997)

Parameter	Probenaufbereitungsschritte	Analyseverfahren
Methylmercaptobenzthiazol	Aliquot-Festphasenextraktion-Gefriertrocknen-Eluieren	HPLC
Benzthiazol	Aliquot-Festphasenextraktion-Gefriertrocknen-Eluieren-Rotationsverdampfer	GC-NPD
Anilin	Aliquot-pH einstellen-Festphasenextraktion-Gefriertrocknen-Eluieren	GC-NPD
Cyclohexylamin	VDI Richtlinie 2467- Ansäuern	HPLC
PAKs	DIN 38407	HPLC, UV-Floureszenzdetektion

Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass das Elutionspotential von Inhaltsstoffen aus Reifenabrieb unter anderem vom pH-Wert des Wassers abhängig ist. Im direkten Vergleich der pH-Werte 4 und 7 konnte beispielsweise gezeigt werden, dass die Werte für den Parameter Anilin bei geringeren pH-Werten in wässriger Lösung höher sind. Mit dem Wert pH 4 sollte saurer Regen simuliert werden. Die Bundesanstalt für Straßenwesen hat für Straßenabflusswasser einen mittleren pH-Wert von 6,8 ermittelt. (Kocher, et al., 2010)

Zu den Laboruntersuchungen wurden ebenfalls Straßenablaufwasserproben an einer vielbefahrenen Autobahn nach längerer Trockenperiode genommen. Hier wurde gezeigt, dass über einen Zeitraum von 30 Minuten die Konzentration der Stoffe Benzthiazol und Methylmercaptobenzthiazol zunimmt. Außerdem wird beschrieben, dass die PAK Konzentration nur zu 11 – 17 % gelöst ist und der Rest in Feststoffteilchen gebunden ist.

Die Literaturstudie zu Reifenpartikeln in der Umwelt von (Wik, et al., 2009) zeigt, dass Reifenverschleißpartikel in allen Umweltkompartimenten vorhanden sind, darunter fallen Luft, Wasser, Böden/Sedimente und Biota. Die maximal vorhergesagten Umgebungskonzentrationen (PECs) der Reifenverschleiß-Partikel in Oberflächengewässern reichen von 0,03 bis 56 mg/l und die maximalen PECs in Sedimenten von Absetzbecken und städtischen Küstengebieten reichen von 0,3 bis 155 g/kg. Aus den bisherigen Ergebnissen der Langzeitstudien wurden mit den Testorganismen *Ceriodaphnia dubia* und *Pseudokirchneriella subcapitata* die „Predicted No Effect Concentrations“ (PNECs) abgeleitet. Das obere PEC / PNEC Verhältnis in Wasser und Sedimenten lag bei > 1, was bedeutet, dass Reifenverschleißpartikel potenzielle Risiken für Wasserorganismen darstellen können. Eine optimierte Reinigung von Straßenwasserabflüssen wird hier empfohlen. (Wik, et al., 2009)

Tabelle 2: Auszug aus einer Übersicht zu Maximalkonzentrationen von Reifenpartikeln in unterschiedlichen Matrices hochgerechnet über entsprechende Marker (Wik, et al., 2009)

Matrix	Konzentration	Einheit	Marker	Land	Quelle
Straßenkehrriecht	72 000	mg/kg	Zink	USA	(Hopke, et al., 1980)
Straßenkehrriecht	700	mg/kg	SBR*	Dänemark	(Fauser, 1999)
Bankette (0m-8m)	24000 - 1000	mg/kg	SBR*	USA	(Pierson, et al., 1974)
Straßenabfluss	92	mg/l	24MoBT*	USA	(Zeng, et al.)
Flusswasser	0,5	mg/l	24MoBT*	China	(Ni, et al., 2008)
Luft	5,3	µg/m ³	Extr. Org. Zink	Dänemark	(Fauser, 1999)

*SBR: Styrol-Butadien-Kautschuk, 24MoBT: (2-(4-morpholinyl) benzothiazole)

Im Tire Industry Project TIP wurden von 2005 bis 2015 in Zusammenarbeit mit 11 führenden Reifenherstellern die Produktion, die Nutzungsphase und das End-of-Life Tires Management unter Berücksichtigung unterschiedlicher Gesichtspunkte betrachtet. Es wurde bereits gezeigt, dass Reifen- und Straßenbelagspartikel nicht einfach als separate Partikel zu beschreiben sind, sondern eher als eine Agglomeration von Reifenmaterial und Straßenbelagsmaterial zu verstehen sein sollten. (WBCSD, 2015)

Die im Rahmen des TIP unter realitätsnahen Bedingungen auf einem Indoor-Versuchsstand durchgeführten Untersuchungen zum Reifenabrieb an PKW-Reifen wiesen folgende Partikelgrößenverteilung auf (WBCSD, 2015):

- Schwebfähige Partikel (unter 10µm) << 1 Vol.%
- Partikel > 10µm und < 100 µm ca. 40 Vol.%
- Partikel > 100 µm ca. 60 Vol.%

Die Ergebnisse bestätigen die Vermutung, dass der geringste Anteil der Reifenabriebspartikel in Bereichen des Feinstaubes (PM 10) zu finden ist und bestärkt die Vermutung, dass die größeren Partikel auf der Straße verbleiben und mit dem Straßenablaufwasser weggespült werden können.

Für die Analyse der Proben wurden im TIP Projekt eigene Analysemethoden auf Basis thermischer Massedegradation (Pyrolyse GC/MS) entwickelt. Die Untersuchungen zum luftgetragenen Anteil des Reifenabriebs in Straßennähe haben gezeigt, dass eine schädigende Wirkung durch Einatmen der Partikel nicht zu befürchten ist. Für Sedimentproben aus Fließgewässern konnte gezeigt werden, dass flussabwärts einer Stadt mehr Reifenpartikel als flussaufwärts einer Stadt zu finden sind. (WBCSD, 2015).

Der Verschleiß von Elastomeren ist ein sehr komplizierter Prozess, der trotz zahlreicher Untersuchungen bis heute noch nicht ausreichend erforscht wurde. Nach den bahnbrechenden Arbeiten von (Schallamach, 1968) und (Grosch, 1963) (Grosch, 1996) gilt es als allgemein anerkannt, dass die Rheologie von Elastomeren eine entscheidende Rolle in allen Kontaktphänomenen von Elastomeren spielt, einschließlich Reibung, Verschleiß und Adhäsion. Während es aber für Festkörper relativ zuverlässige Verschleißgesetze gibt (die klassischen Gesetze von Archard und Chruschov), gibt es für Elastomere bisher keine anerkannten und zuverlässigen Verschleißgesetze. Aus Not wird sehr oft das "Energetische Verschleißkriterium" benutzt, welches behauptet, dass Verschleißvolumen

proportional zur eingebrachten Energie ist (Popov, 2015), jedoch wird dieses Kriterium in vielen Fällen experimentell nicht bestätigt. Außerdem liefert es nicht eine detaillierte Information über die Verteilung der Größe der Verschleißpartikel. Das Hauptproblem der theoretischen Erfassung des Verschleißes in Elastomeren ist die Tatsache, dass die einfachen und leichthandhabbaren Bruch- und Verschleißkriterien auf energetischer Bilanz basieren (wie die ursprüngliche klassische Bruchtheorie von Griffith). Diese Kriterien versagen aber aufgrund der inneren Dissipation in Elastomeren. Die klassischen Bruchkriterien enthalten elastische Module und Oberflächenenergie, die aber bei Elastomeren beide nicht eindeutig definiert sind, da sie frequenzabhängig sind (Barquins, 1993). Aus diesem Grunde blieb die Verschleißforschung von Elastomeren weitgehend empirisch (Stupak, et al., 1990), (Briscoe, 1981).

Die Wichtigkeit des Problems des Verschleißes wurde jedoch klar erkannt. So geben (Wik, et al., 2009) eine umfassende Übersicht der Untersuchungen über den Einfluss von Reifenabrieb auf die Umwelt. Sie stellen fest, dass der Abrieb in allen Umweltbereichen gefunden wurde und das Hauptrisiko des Weiterverteilens durch das Straßenabwasser besteht. In deren Darstellung fällt auf, dass in Deutschland im Vergleich mit z. B. USA sehr wenige Studien hierfür durchgeführt wurden, so dass zum einen ein deutlicher Nachholbedarf besteht und zum anderen auf vorherige Erfahrungen zurückgegriffen werden kann

Die erforderliche experimentelle Ausrüstung für Verschleißuntersuchungen von Elastomeren ist z.B. ausführlich von (Leister, 2009) beschrieben. Es werden Reifen-Prüfverfahren und Laborprüfungen als auch die Felduntersuchungen vorgestellt, unterschieden nach den Tests bei den Reifenherstellern und den Fahrzeugherstellern. Dabei werden die Gebrauchseigenschaften wie Fahrstabilität, Fahrkomfort, Lenkverhalten sowie Fahrsicherheit, Haltbarkeit und Wirtschaftlichkeit ermittelt. Dies beinhaltet auch die ausführliche Beschreibung der Verschleißuntersuchungen, allerdings ohne die theoretischen Grundlagen zu erläutern. Ausführliche theoretische Abhandlungen der Grundlagen von Gummireibung und Verschleiß liefert z.B. Persson in zahlreichen Veröffentlichungen (z.B. (Persson, 2001), (Persson, et al., 2000)), jedoch ohne Anbindung an Experimente. Keine der bisherigen Studien zu Reifenverschleiß hat sich die Frage nach der Größenverteilung der Verschleißteilchen gestellt und keine hat diese Frage unter Berücksichtigung der realitätsnahen Spannungsverteilungen gemacht. Der Grund dafür liegt überwiegend daran, dass entsprechende numerische Werkzeuge erst vor kurzem geschaffen wurden.

1.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die entsprechenden Projektergebnisse des RAU Projekts wurden in die DIN Normenausschüsse „Kunststoffe und Umweltaspekte“ und „Wasserwesen, Arbeitskreis Probenahme“ mit eingebracht

Im BMBF- Projekt RAU gab es während der Projektlaufzeit über drei Arbeitstreffen und regelmäßige Telefonate einen intensiven Wissensaustausch mit dem BMWi Projekt TyreWearMapping. Da sich das Projekt TyreWearMapping mit der Modellierung der Verteilung und Ausbreitung von Reifenabrieb in die Umwelt befasst ist geplant die Messergebnisse aus dem RAU Projekt zu nutzen, um das TyreWearMapping-TWM-Modell zu evaluieren.

Die Ergebnisse von RAU wurden bei Arbeitstreffen der TRWP Plattform, einer internationalen fach- und institutionenübergreifenden Arbeitsgruppe zum Thema Reifenabrieb in Brüssel vorgestellt. (<https://www.tyreandroadwear.com/>)

II. EINGEHENDE DARSTELLUNG

II.1. Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses

Die Gesamtabriebsmengen in Deutschland können auf der Basis der jährlichen Kilometerleistung des Kraftfahrbundesamtes (Aufschlüsselung nach Fahrzeugart (Kraftfahrbundesamt, 2016) und der spezifischen Abriebsmenge pro km (Peano, et al., 2020) (Strauch, 2018) berechnet werden. Daraus ergibt sich eine geschätzte jährliche Menge von 95.546 – 106.840 t für 2019. Der Reifenabrieb - bzw. Partikel bestehend aus Material des Reifen-Laufstreifens und der Straßenoberfläche mit einer Dichte von $1,8 \text{ g/cm}^3$ und einer mittleren Größe von $100 \text{ }\mu\text{m}$ (Kreider, et al., 2010) gelangt über unterschiedliche Eintragspfade in die aquatische Umwelt und der zunehmende KFZ-Verkehr führt unweigerlich zum vermehrten Aufkommen an Reifenabrieb. Die Mengen an Reifenabrieb und der Eintrag in die aquatische Umwelt über den Straßenabfluss sind bisher kaum erforscht. Genau dort setzt das Verbundprojekt RAU an. Es beschreibt Reifenpartikel aus der Nutzungsphase des Reifens umfassend und untersucht auf theoretischer Basis mögliche Verluste von Reifenpartikeln über den gesamten Lebenszyklus. Es wurden Hot Spots des Reifenabriebs identifiziert, Eintragspfade von Reifenmaterial in die aquatische Umwelt beschrieben und bilanziert sowie Maßnahmen der Reduzierung aufgezeigt. Die Straßenreinigung mittels Kehrmaschinen zur Reduzierung des Eintrags von Reifenmaterial in die aquatische Umwelt wurde verifiziert und digitalisierte Optimierungen aufgezeigt. Auf Basis dieser wesentlichen Einflussfaktoren wurde eine Bewertungsmatrix entwickelt, die es ermöglicht für unterschiedliche Standorte geeignete Maßnahmen abzuleiten.

II.1.1. Probenahmekonzept & -analyse

II.1.1.1. Analysekonzept

Im Berichtszeitraum 2017-2021 wurden grundlegende Verfahren entwickelt, diese geprüft und optimiert sowie an Beispiel von realen Proben angewendet und reproduziert.

Die Projektpartner WESSLING, Continental, TU Berlin FG Siwawi und GKD, haben intensiv an dem Konzept der Analyse von Gummipartikeln gearbeitet. Grundlage ist die ISO/TS 21396 und das darin beschriebene Verfahren Pyrolyse-GC-MS.

Mit diesem Verfahren wird die Menge Gummi anhand von Isopren-Dimer (NR)/Butadien-Dimer (BR & SBR) - Dipenten und Vinylcyclohexen (VCH) quantifiziert. Der Anteil von BR und SBR wird unter Annahme eines Verhältnisses von 65% SBR zu 35% BR berechnet. Zunächst werden die Polymere der Probe durch Pyrolyse in Fragmente zerlegt, die in einer Gaschromatographie aufgetrennt und schließlich mit einer Massenspektrometrie identifiziert werden.

Die korrekte Quantifizierung soll mit einem zusätzlich eingebrachten, deuterierten Polymer („interner Standard“) erreicht werden. Hierfür werden basierend auf SBR und IR (Polyisopren als Referenz für Naturkautschuk) mit Zugabe der jeweiligen internen Standards Kalibrierkurven aufgenommen, mit deren Hilfe die Mengenverhältnisse der Proben bezogen auf den internen Standard eindeutig ermittelt werden. Wir haben verschiedene Typen für die Analyse definiert. Für die Simulation der natürlichen Umweltmatrix wurde ein Sand gewählt.

Polymer mit Sandmatrix kann gut charakterisiert werden. Die Kompensation der Matrix durch die Kalibrierung funktioniert. Die Quantität des Polymers lässt sich mit den Dimeren nach der GC-MS bestimmen.

Ein Gummi-Compound mit der gleichen Sandmatrix liefert bislang ein anderes Bild. Das Pyrolysespektrum mit und ohne Matrix ist sehr unterschiedlich, d.h. es ergeben sich unterschiedliche Matrixeffekte auf den Compound und den internen Standard was eine exakte Quantifizierung des Compounds unmöglich macht. Unser Fazit ist, dass die Matrix weitgehend entfernt werden muss, um die Methode erfolgreich anwenden zu können. Große Bedeutung kommt hier der Probenaufbereitung zuteil, das heißt die Trennung der Partikel von der umgebenden Matrix über eine Dichteseperation. Die Flüssigkeit der Wahl ist Chloroform.

Auch der zweite Teil der Methode, die Identifikation charakteristischer Dimere ist problematisch und befindet sich zudem erneut in der Diskussion im ISO Gremium. Neuere Studien haben herausgearbeitet, dass es vorteilhaft sein kann, mehrere Marker zu verwenden - für BR/SBR sind das VCH und PCH. Da uns eine geeignete Validierung mit Grundlagenuntersuchungen für diese kombinierte Anwendung nicht zur Verfügung stand, haben wir auf die zusätzliche Verwendung von PCH verzichtet. Im Fokus der Arbeit stand die Anwendung der Methode auf Umweltproben.

Die Probenvorbereitung und Detektion erfolgte für alle Matrices durch WESSLING. Im Projektzeitraum wurde ein mehrstufiger Prozess aus physikalischen und chemischen Probenaufbereitungsmethoden von Feststoff- und Nassschlammfangproben grundlegend entwickelt. Ein Ziel war es, anorganische und organische (zum Beispiel biologisches Material) zu eliminieren, um so Reifenabriebpartikel zu konzentrieren und der Detektion zuzuführen. Im weiteren Verlauf wurden die aufbereiteten Proben hinsichtlich der Leitparameter (Tabelle 3) untersucht und Auswertemethoden spezifisch entwickelt, insbesondere für die Quantifizierung von Reifenabrieb in einer Umweltprobe, gaschromatographischen Analysen (Pyrolyse-GC/MS). Zu berücksichtigen war, dass sowohl zerstörungsfreie und Proben-zerstörende Analysetechniken eingesetzt wurden. Das bedeutet, dass die Reihenfolge der Analysen und die Menge des aufgereinigten Materials beachtet werden mussten. In die Routineanalytik für Straßenabfluss und Straßenkehrtricht u.a. wurden nach der Probenvorbereitung (inkl. Siebung) die Detektionsmethoden Gravimetrie (Masse) und Py-GC/MS (SBR/BR-Gehalt) aufgenommen. Weitere Analysemethoden dienen der Charakterisierung der Partikel.

Tabelle 3: Leitparameter mit zugeordneter Analysemethoden

<u>Leitparameter</u>	<u>Analysemethode</u>
Polymere	FTIR-Mikroskopie, Py-GC/MS
PAK	Py-GC/MS
Metalle / Anorganik/ Organik	ICP-MS/OES, REM/EDX
Masse	Gravimetrie
Größe/ Elemente	SLS, Mikroskopie (EM/ LM)
Luftgetragene Partikel	Py-GC/MS

Abk.: FT-IR (Fourier-Transformations-Infrarot); TD-Py-GC-MS (Thermodesorption-Pyrolyse-GC-MS); ICP-MS/OES (Massenspektrometrie mit induktiv-gekoppeltem Plasma/ Optische Emissionsspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma)

II.1.1.1.1. Probenvorbereitung

Die Probenvorbereitung hatte das Ziel Reifenabriebpartikel von anorganischen und organischen Begleitstoffen zu separieren. Die Bausteine dazu sind in Abbildung 2 gezeigt.

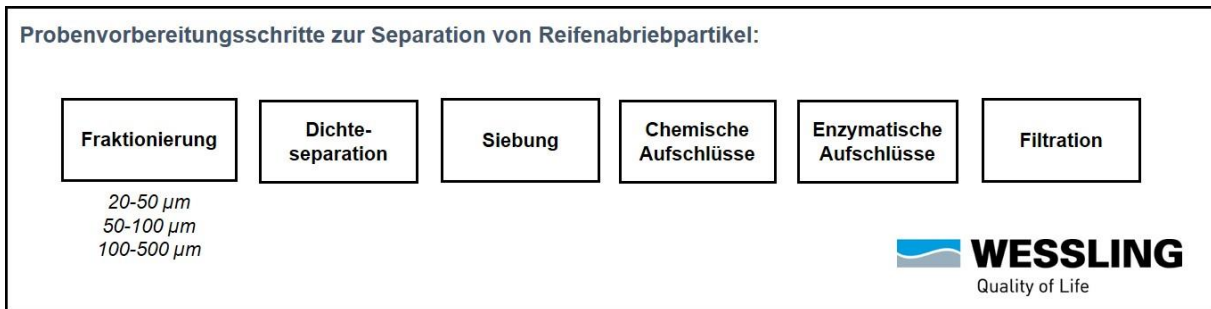


Abbildung 2: Übersicht der Probenvorbereitungsschritte im Allgemeinen

In Kapitel II.1.1.4.1 ist die detaillierte Vorgehensweise der grundlegenden entwickelten Probevorbereitung dargestellt.

II.1.1.1.2. Detektion Pyrolyse-GC/MS

Die Methodenentwicklung erfolgte auf Basis von ISO/TR 21396. Das dort dargestellte Verfahren wurde grundlegend angepasst und auf die zu untersuchenden Matrices abgestimmt.

Eine Übersicht über die erfassten Analyten einer Probe Straßenkehricht (18-087046-01-1) ist mit einem Vergleich zu kryogemahlene Reifenmaterial (17-203042-03) in der folgenden Abbildung 3 dargestellt:

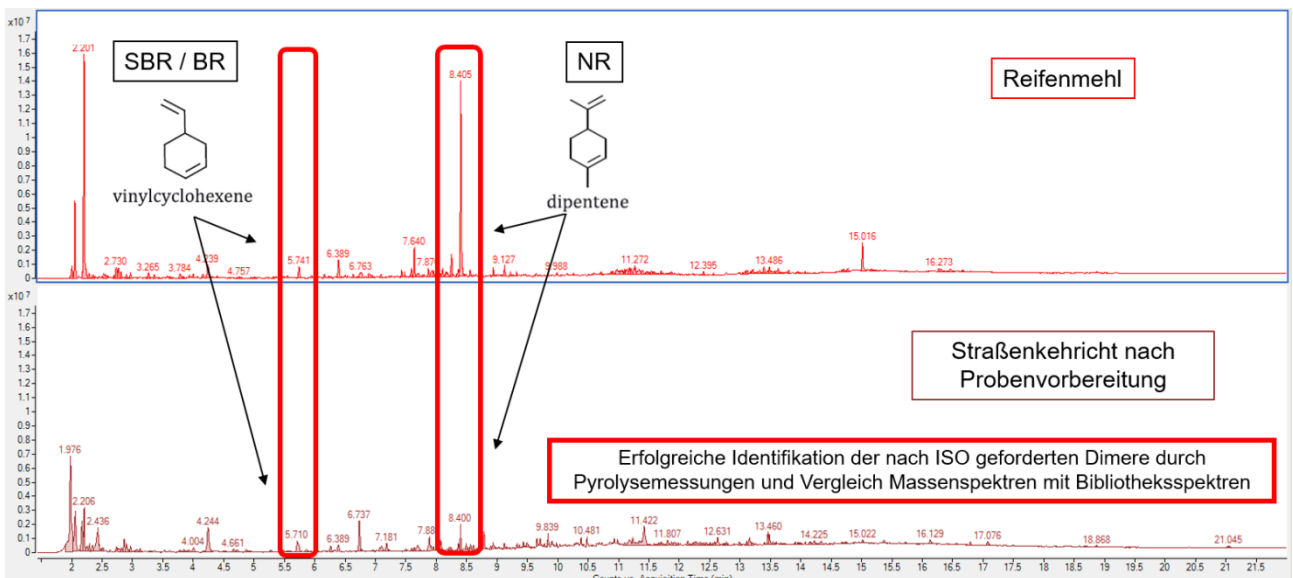


Abbildung 3: Pyrolyse-GC-MS Chromatogramm Probe 17-203042-03 (oben) und Straßenkehrichtprobe 18-087046-01-1 (unten)

Die Analyse zeigte deutlich, dass die Pyrolyseprodukte SBR (Styrol-Butadien-Rubber) und NR (Natural Rubber) entstanden. Als Leitparameter dienen das Vinylcyclohexen für SBR und Dipenten für NR. Ein Bibliotheksabgleich mit dem Massenspektrum von 18-087046-01-1 lieferte eine Identifikation der vorhin beschriebenen Pyrolyseprodukte. Die Signale der für SBR und NR wurden auch in einer

aufbereiteten Kehrlichtprobe (18-087046-01-1) detektiert, so dass eine Übertragung der Messmethode auf Umweltproben grundsätzlich möglich war. Die entwickelte Methode eignet sich daher für die Messung von Reifenabrieb.

Zusammenfassung: SBR/BR wurde als Leitparameter im Reifenmaterial identifiziert. Entscheidend für die Identifizierung von SBR/BR war die Probenvorbereitung. Zur Abtrennung von Organik und Anorganik waren mehrere Stufen in der Probenvorbereitung nötig. Es bestätigte sich die Annahme, dass durch die thermische Zersetzung vom Reifenmaterial SBR/BR entstand. Die Bestimmung des Gehalts an Reifenabrieb in einer Umweltprobe erfolgte im weiteren Verlauf in Anlehnung an ISO/TS 21396. Die Bestimmung des SBR/BR-Gehalts war in der Berechnung berücksichtigt. Eine Identifizierung und Quantifizierung über Naturkautschuk (NR) wurde nicht weiterverfolgt, da es zu Überlagerungen mit Substanzen aus organischen Resten (z.B. Pflanzen) kommen kann und somit eine Diskriminierung zu NR aus Reifenmaterial nicht möglich ist.

II.1.1.1.3. Detektion- FTIR-Mikroskopie

Die FTIR-Mikroskopie wurde als qualitative Analyse verwendet, um nachzuweisen, dass die Probenvorbereitung erfolgreich war. Diese Messmethode ist zerstörungsfrei und wurde im weiteren Verlauf an fünf Partikeln im Rahmen der Methodenentwicklung durchgeführt.

Die mikroskopische und infrarotspektroskopische Untersuchung erfolgte mit einem FTIR-Mikroskop der Firma Bruker (Typ: Lumos). Die Partikel lagen auf einem Filter (Aluminiumhydroxid) vor und wurden im ATR-Modus analysiert.

Abbildung 4 zeigt beispielhaft ein Analyseergebnis von 17-194557-01.

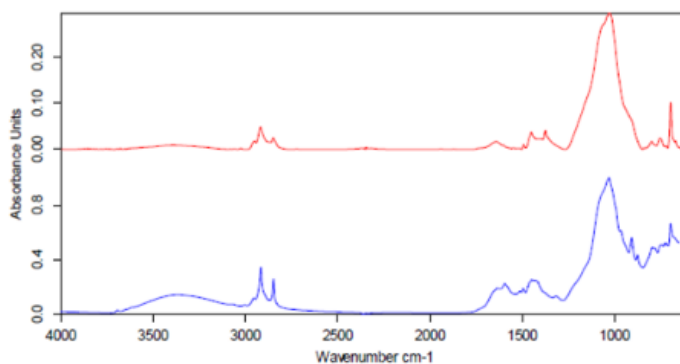
Report

Name der Spektrendatei EXTRACT_18-079131-01-1.0_000002.0
Datum und Zeit der Messung 17/09/2018 9:30:54 (GMT+2)

Suche in Bibliotheken

Treffer-Nr	Treffer-Qual.	Substanzname	Eintrag Nr.	Bibl.-Index	CAS - Nummer
1	680	RUBBER CARBON FILLED #1	1954	2	

Bibliotheksspektren und Anfragespektrum (rot)



Vollständige Information

Treffer-Nr	Bezeichnung	Info
1	Compound Name	RUBBER CARBON FILLED #1
	Molecular Formula	
	Molecular Weight	
	CAS Registry Number	
	Sample Preparation	ATR single bounce
	Comment	rubber
	Reference	D616/ MP0246

Abbildung 4: Ergebnis FTIR-Spektroskopie

Zudem wurde eine Spektrendatenbank der erfolgreich identifizierten Partikel aufgebaut, da durch die sehr heterogene Zusammensetzung eines Reifens ein Datenbankabgleich u.U. durch Überlagerungen verschiedener Substanzen nicht eindeutig ist. Ziel war es, die generierte Spektrendatenbank als Referenzdatenbank zu nutzen.

II.1.1.1.4. Detektion- REM/EDX

Nach der Probenvorbereitung wurde im Rahmen der Methodenentwicklung mittels REM/EDX das Reifenmaterial (17-203042-03) mit einer realen Straßenkehrschichtproben (18-136850-33-3) verglichen. Es sollte gezeigt werden, ob sich Änderungen in der Struktur und Zusammensetzung ergaben. Der Vergleich unterstützt eine Methodenentwicklung für die Pyrolyse GC-MS, da die Elementzusammensetzung einen Einfluss auf die Zersetzungstemperatur hat. Somit wurde im Rahmen der Methodenentwicklung die Einstellung des Temperaturprogramms berücksichtigt. Die Referenz stellte die idealisierten Bedingungen dar. In den Umweltproben liegen im Allgemeinen weitere Störstoffe vor, so dass die Elementeuntersuchung Aufschluss über die Unterschiede zum Referenzmaterial geben sollte.

In der folgenden Abbildung 5 ist die REM-Aufnahme des Reifenmaterials (17-203042-03) dargestellt:

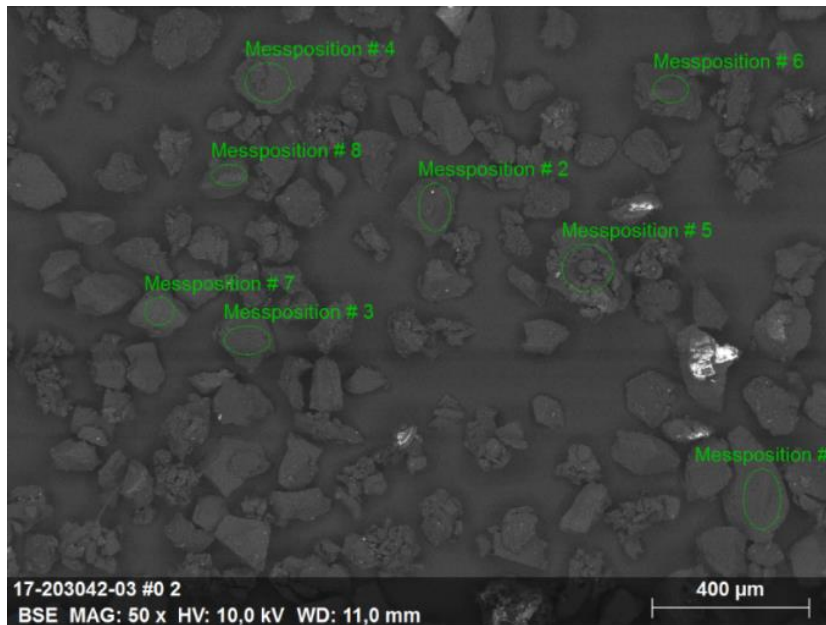


Abbildung 5: REM-Aufnahme des Reifenmaterials 17-203042-03 mit 50-facher Vergrößerung

In Bezug auf Abbildung 5 sind die Partikel deutlich erkennbar. Diese zeigten Flakes-ähnliche Strukturen und zeigten eine enge Größenverteilung.

Die Elementzusammensetzung der Referenz wurde mittels EDX-Analyse untersucht. Die folgende Abbildung 6 stellt beispielhaft die EDX-Analyse vom Reifenmaterial 17-203042-03 der Messposition 6 dar.

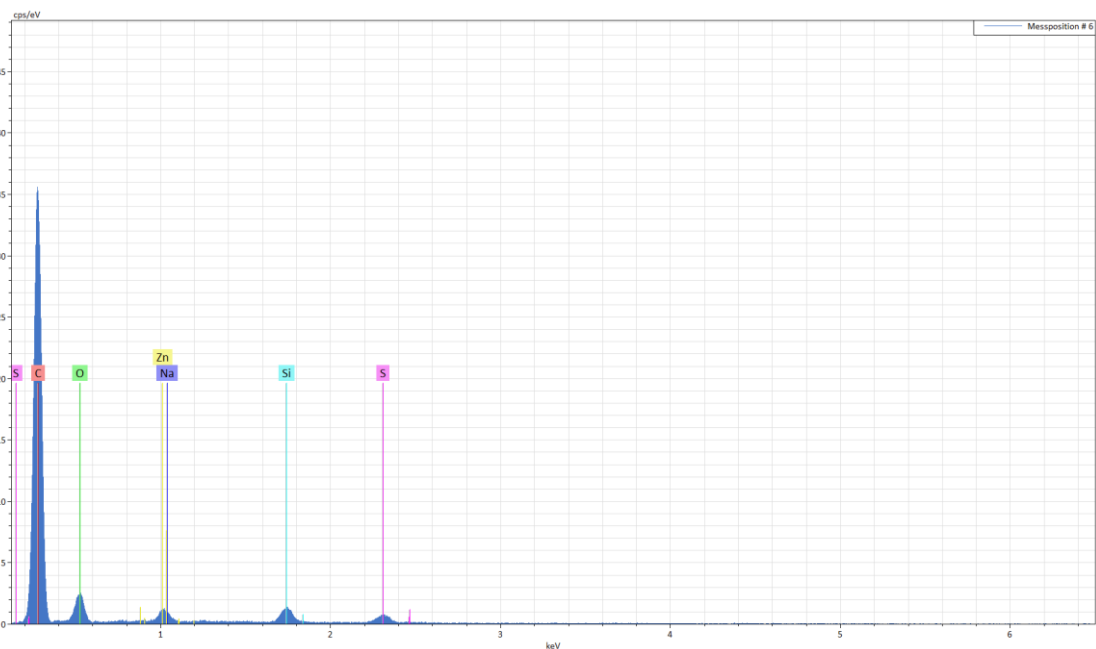


Abbildung 6: EDX-Analyse zur Analyse der Elementzusammensetzung vom Reifenmaterial 17-203042-03.

Abbildung 6 zeigt die Elemente Zink, Natrium, Silizium, Schwefel, Kohlenstoff und Sauerstoff. Dabei werde Schwefelverbindungen als Zusatzstoff im Rahmen von Vulkanisationsprozesse eingesetzt. Zink und Silizium sind ebenfalls bekannte Bestandteile vom Reifenmaterial. Zudem weisen Reifen einen hohen Anteil an Kohlenstoff auf, welcher überwiegend auf Ruß zurückzuführen ist.

Zum Vergleich wurde von der Straßenkehrrichtprobe 18-136850-33-3 eine Aufnahme zur Untersuchung der Struktur mittels REM mit 50-facher Vergrößerung untersucht. Die folgende Abbildung 7 zeigt beispielhaft die REM-Aufnahme der Straßenkehrrichtprobe 18-136850-33-3:

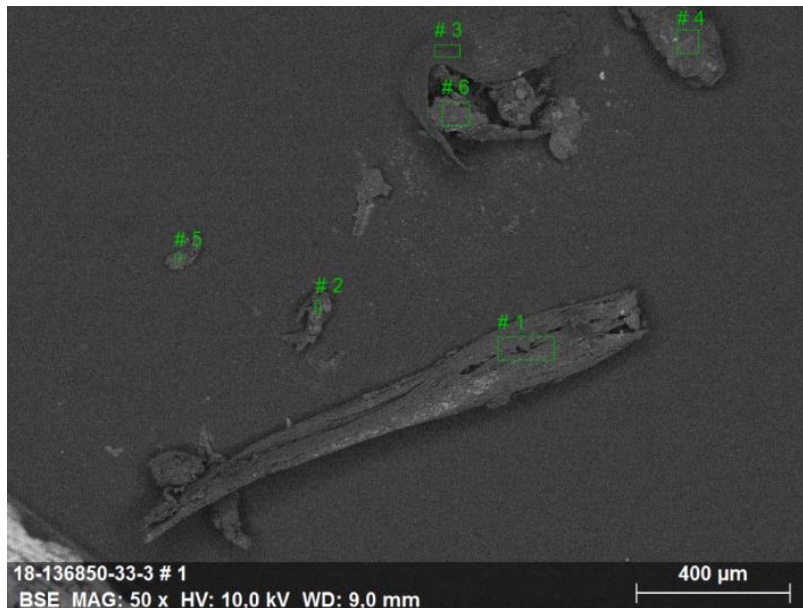


Abbildung 7: REM-Aufnahme der Straßenkehrrichtprobe 18-136850-33-3.

In Bezug zu Abbildung 7 war der Unterschied hinsichtlich der Morphologie zur Referenz (Abbildung 5) deutlich zu erkennen. Während bei der Referenz vereinzelte Stücke zu erkennen waren (Flakes), zeigte das extrahierte Material der Straßenkehrrichtprobe unterschiedliche Formen. Die Morphologie kann „zigarrenförmig“ und partikulär beschrieben werden. Zudem wurden Agglomerate beobachtet. Einige Formen deuten auf während der Probenvorbereitung nicht entferntes organisches Material hin. Zur weiteren Charakterisierung der Partikel erfolgten EDX-Analysen an verschiedenen Positionen. Messposition 1 ist in Abbildung 8 abgebildet.

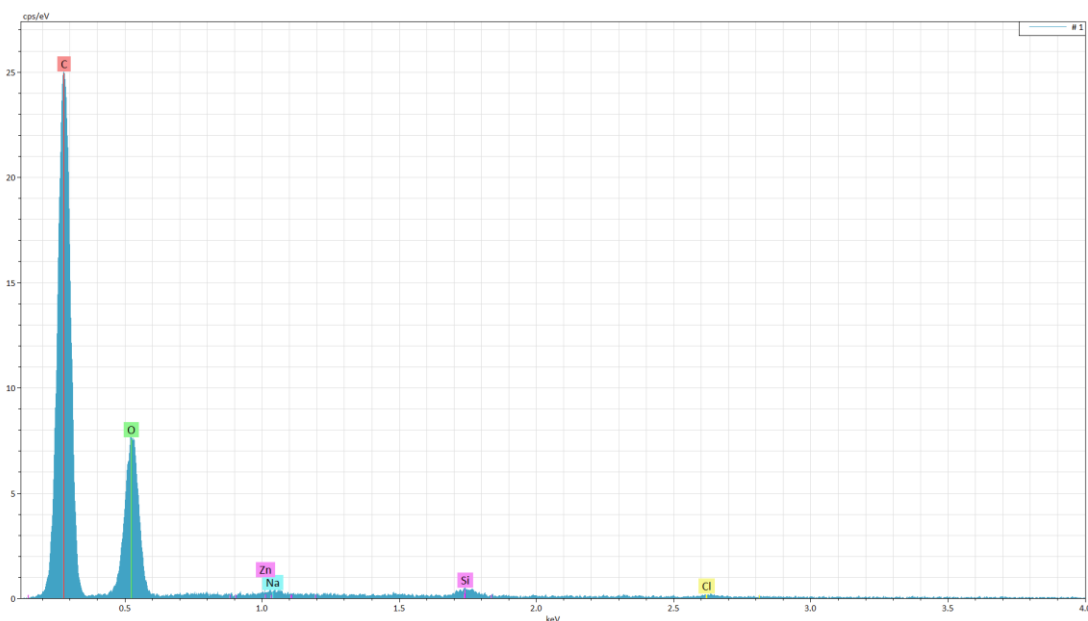


Abbildung 8: EDX-Analyse der Straßenkehrrichtprobe 18-136850-33-3 der Messposition 1

Die dargestellte Abbildung 8 war mit der EDX-Analyse des Reifenmaterials in Abbildung 6 vergleichbar. Es waren ebenfalls die Elemente Kohlenstoff, Sauerstoff, Zink, Natrium und Silicium zu erkennen. Es war zusätzlich Chlor vorhanden, welcher in Abbildung 6 nicht vorkam. Das Chlor könnte auf das Vorhandensein von einem Polymer hindeuten oder Verunreinigung der Probenvorbereitung darstellen. Der Kohlenstoffgehalt in Abbildung 8 war im Vergleich zur Referenz in Abbildung 6 deutlich erhöht. Jedoch war ebenfalls zu erkennen, dass Silicium, Natrium und Zink in kleineren Mengen als in der Referenz in Abbildung 6 wiederzufinden waren. Insgesamt zeigte die Analyse auch, dass im Rahmen der Probenvorbereitung das Fremdmaterial (insbesondere der organische Anteil) nicht vollständig entfernt werden konnte. Jedoch war die Reinheit für eine weitere Quantifizierung mittels Pyrolyse-GC/MS ausreichend, um SBR-Gehalte zu bestimmen.

Zusammenfassung: Zusammenfassend ist die REM/ EDX Analytik dazu geeignet die morphologischen Eigenschaften und Größen der separierten Partikel zu bestimmen, sowie punktuell die Partikel als Reifenabrieb über die elementare Zusammensetzung zu indirekt identifizieren.

II.1.1.1.5. Metallanalytik

Ergänzend zu der REM/EDX-Analyse wurde der Schwefel-, Zink-, und Siliciumgehalt von Referenzen mittels ICP-OES; 17-182519-01-1 bis 17-182519-03-1 untersucht. Bei dieser Referenz handelte es sich um Compound vom Partner Continental, die noch nicht vermahlen wurde. Diese Analysen waren ein Hilfsmittel für die Methodenentwicklung. Die Proben sind in Abbildung 9 dargestellt:



Abbildung 9: Darstellung von Compound 1-3 17-182519-01 bis 17-182519-03

In der folgenden Tabelle 4 ist der Schwefel-, Zink- und Siliciumgehalt der Gummiprobe zusammenfassend dargestellt:

Tabelle 4: Zusammenfassung des Schwefelgehaltes von Compound 1-3 17-182519-01 bis 17-182519-03

Probennummern	Schwefel [Gew %] (erwarteter Wert)	Zink [Gew %] (erwarteter Wert)	Silicium [Gew %] (erwarteter Wert)
17-182519-01 (Gummiprobe 1)	3,1 (>2,8)	3,9 (3,2)	13 (14,1)

Probennummern	Schwefel [Gew %] (erwarteter Wert)	Zink [Gew %] (erwarteter Wert)	Silicium [Gew %] (erwarteter Wert)
17-182519-02 (Gummiprobe 2)	3,50 (>2,1)	3,8 (3,1)	2,2 (2,1)
17-182519-03 (Gummiprobe 3)	1,45 (>1)	1,1 (0,9)	0,6 (-)

In der oben dargestellten Tabelle 4 sind repräsentativ der Schwefel-, Zink-, und Siliciumgehalt von Compoundproben aufgeführt. Grundsätzlich eignete sich die angewendeten Verfahren (in Anlehnung an DIN EN 13656 / 15410/11A / DIN 22022-1/ DIN EN ISO 11885) zur Bestimmung der Elemente Si, Zn und S in Reifenmaterial.

Zusammenfassung: Die Analyse der Metalle mittels ICP-OES ist generell als Methode geeignet Reifenmaterial zu charakterisieren, jedoch ist diese auf Umweltproben nicht übertragbar, da auch durch eine Probenvorbereitung (Separation Störstoffe von Reifenabrieb) Reststörstoffe vorliegen können und somit eine eindeutige Zuordnung der Metalle nicht möglich ist.

II.1.1.1.6. Analyse der Reproduzierbarkeit

Zur Bestimmung der Reproduzierbarkeit der grundlegend entwickelten Methode zur Probenaufbereitung und Detektion erfolgte an zwei Umweltproben durch drei wiederholende Durchführungen (Probenvorbereitung und Detektion) jeweils überprüft, um die Reproduzierbarkeit darzustellen. Versuchsansatz:

- 19-077745-03: Hochstraße Ampel Tagesfegung vom 25.04.2019
- 19-077745-07: Hochstraße Kurve (Spur 1) Tagesfegung vom 25.04.2019

Je Probe und je Fraktion: 3x Probenvorbereitung und je 3x SBR/BR-Bestimmung mittels Pyrolyse-GC/MS.

Die Vorgehensweise ist in Kapitel II.1.1.4 aufgeführt.

Die Ergebnisse sind in Abbildung 10 und Abbildung 11 dargestellt.

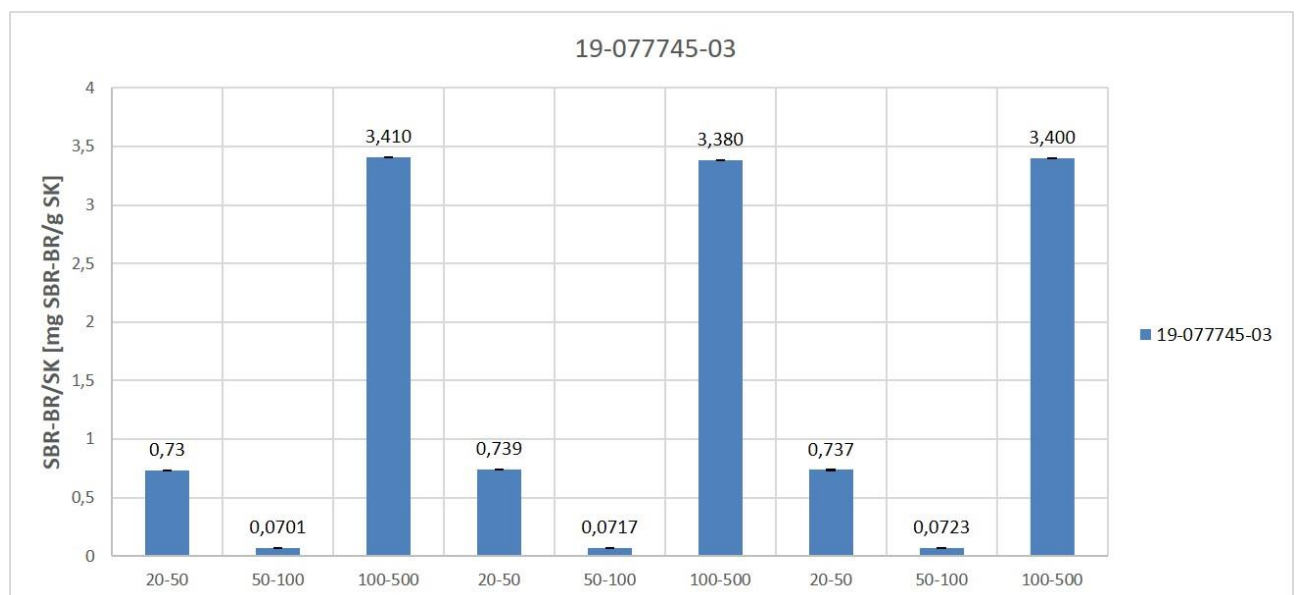


Abbildung 10: Untersuchung der Reproduzierbarkeit von 19-077745-03 des Gesamtverfahrens

Die Untersuchung der Reproduzierbarkeit von Probe 19-07745-03 zeigte Standardabweichungen je Fraktion im Bereich zwischen 0,004 bis 0,235 %.

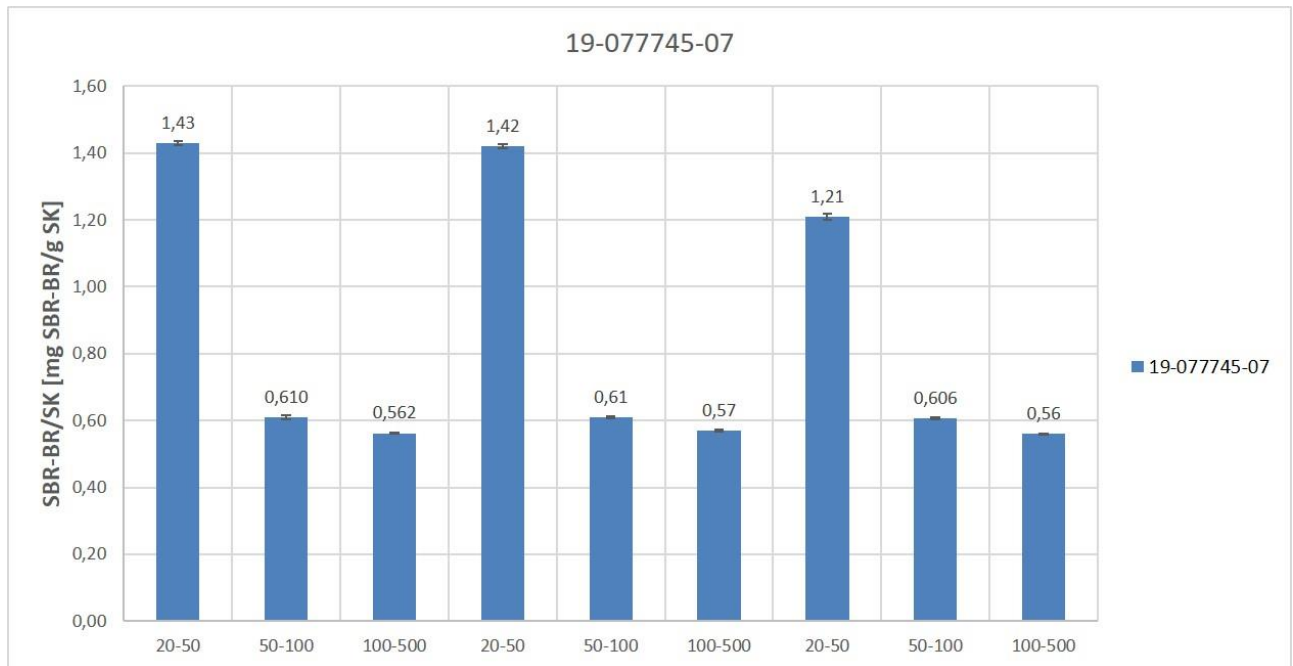


Abbildung 11: Untersuchung der Reproduzierbarkeit von 19-07745-07 des Gesamtverfahrens

Die Untersuchung der Reproduzierbarkeit von Probe 19-07745-07 zeigte Standardabweichungen je Fraktion im Bereich zwischen 0,373 bis 0,773 %.

II.1.1.1.7. Fehleranalyse Probenvorbereitung/ Detektion und Optimierung

Es wurde zudem eine Fehleranalyse durchgeführt, um potenzielle Fehlerquellen in der Probenvorbereitung und Detektion zu ermitteln. Abbildung 12 zeigt eine Zusammenfassung.

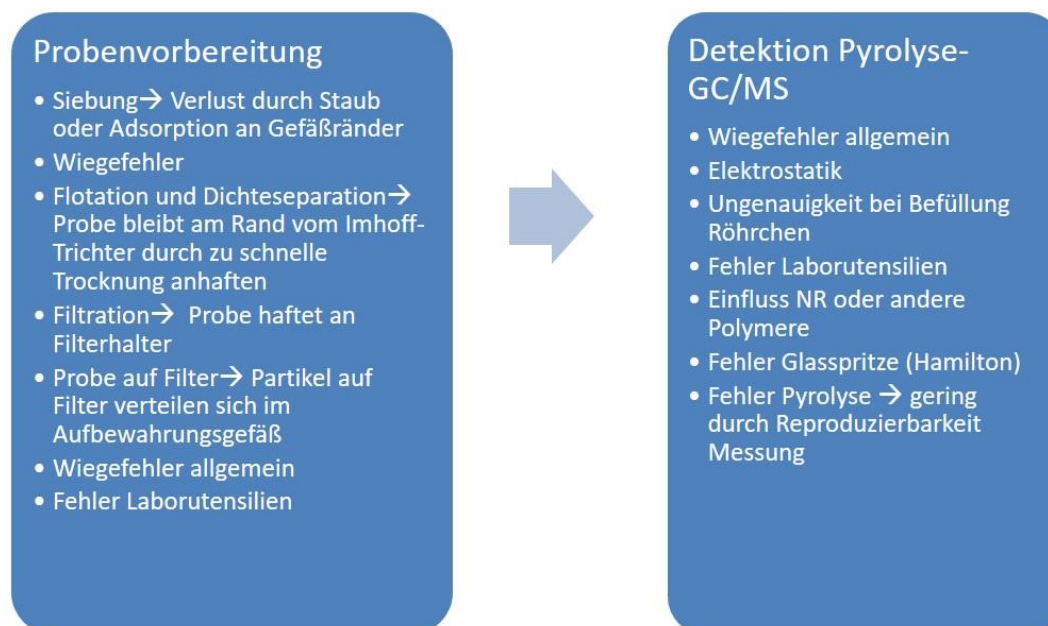


Abbildung 12: Fehleranalyse der Analytik-Schritte Probenvorbereitung und Detektion

Insgesamt wurden die aufgeführten Fehler bestmöglichst minimiert und sind als nicht signifikant hinsichtlich des Messergebnisses zu betrachten.

Optimierung:

Im Rahmen der Durchführung der Probenvorbereitung wurden folgende Vorgehen angepasst:

- Probenteilung: repräsentative Teilung der Proben mit einem Riffelteiler
- Flotation und Dichteseparation: mehrfaches abspülen der Gefäßwänden vor Trocknung
- Filtration: Verwendung von Polycarbonat-Filtern statt Aluminiumoxid zum einfachen und vollständigen Runterspülen der Probe für die Detektion
- Filteraufbewahrung: Auswaage direkt nach Filtration und nach Überführung der Probe Aufbewahrungsgefäß nachspülen
- Gravimetrie: Auswaage der Probe unter zu Hilfenahme eines Antistatik-Ionisators
- Probenüberführung Detektion: repräsentative Probennahme durch Aufziehen der Probe im flüssigen Medium mit einer Glasspritze in einem Glasmesskolben
- Überführung der Probe in Pyrolyseröhrchen: Verwendung eines Halters, spezifisch hergestellt mittels 3D-Druckes.

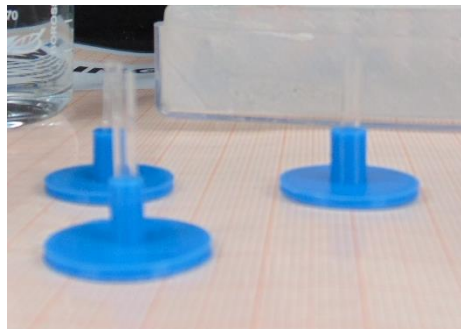


Abbildung 13: Pyrolyseröhrchenhalter

II.1.1.2. Probenahmekonzept

II.1.1.2.1. Auswahl der Untersuchungsgebiete

Bei dem Forschungsprojekt RAU soll im innerstädtischen Bereich der Reifenabrieb untersucht werden. Darum befinden sich alle Standorte, an denen Proben genommen wurden im Berliner Stadtgebiet. Berlin hat 3,5 Mio. Einwohner*innen und einen Bestand an Kraftfahrzeugen von 1,4 Mio. (AfS, 2020). Es liegt im Übergangsbereich zwischen ozeanisch und kontinental geprägtem Klima und zählt mit seiner jährlichen Durchschnittsniederschlagsmenge von 568 mm/m² zu den trockenen Gebieten. Die Durchschnittstemperatur liegt bei 11 °C. Der Wind kommt vorwiegend aus West (21 %) und Südwest (16 %) (SenStadtUm, 2017).

Die Projektpartner TU Berlin Siwawi, WESSLING, IPS, GKD, Continental und die BWB, haben intensiv an dem Konzept zur Probenahme von Umweltproben gearbeitet. Es sollte unter Berücksichtigung der Entwicklung des Analysekonzeptes und dem Ziel einer reproduzierbaren Analytik die Beschaffenheit, Menge und Anzahl der Proben definiert werden.

Die Probenvorbereitung zeigte, dass mindestens 10g Probenmaterial zur Verfügung gestellt werden sollte, auch um Rückstellproben zu bilden.

Die bereits bearbeiteten Umweltproben (Kehricht und nasse Proben) wurden WESSLING seitens der TU Berlin Siwawi zur Verfügung gestellt. Die Luftprobenahme erfolgte durch WESSLING.

Da die Ermittlung der AFS- und SBR-BR-Gehalte der in-situ-Proben von großer Wichtigkeit waren, wurde projektbegleitend und insbesondere nach den turnusmäßigen Projekttreffen abgestimmt welche Proben für die Kalibrierung des physikalischen Reifenabriebmodells geeignet waren. Dieses Modell war die Basis für die Stoffstrommodellierung des Projektpartners IPS.

II.1.1.2.2. Mögliche urbane Hot-Spots

Für die Untersuchung von urbanen Verkehrsflächen, an denen ein besonders hohes Aufkommen an Reifenabrieb vermutet wird, sogenannten Hotspots, wurden sechs Stellen mit unterschiedlichen Fahrsituationen vor dem Hintergrund, dass die Belastungen auf den Reifen, in Form von Längs- und Querkraften, je Fahrsituation variieren, im Berliner Stadtteil Wedding ausgewählt. Davon ausgehend wurde angenommen, dass sich die Entstehung von Reifenabrieb in verschiedenen Fahrsituationen unterscheidet. Als Referenz wurden zwei versiegelte Flächen ausgewählt, an denen kein KFZ- und Radverkehr möglich ist, um zu untersuchen, ob hier Einträge von Reifenabrieb zu finden sind. Diese Referenzflächen liegen in einem Friedhof und einem Stadtpark.

Alle acht gewählten Kehrstandorte für regelmäßige Kehruntersuchungen liegen nahe der Parkanlage Humboldthain im Berliner Stadtteil Wedding. An den Standorten Kurve und Gerade wurden zusätzlich Probenahmekorb (PNK)- Untersuchungen durchgeführt. Das Gebiet, in dem die Standorte liegen ist ein städtisches Wohngebiet mit diversen Angeboten der Daseinsvorsorge und Parkanlagen. Die Gebäude haben in der Regel fünf Etagen und entlang der meisten Straßen gibt es Baumscheiben. Ein besonderes Merkmal der Standorte Gerade, Ampel und Kurve ist die S-Bahntrasse, die auf der östlichen Seite unterhalb der Straße entlangläuft. Die Straßen, an denen Messstandorte liegen, haben ein Dachprofil und entwässern somit auf beide Straßenseiten. Eine Besonderheit an dem Standort Kreisverkehr ist, dass zusätzlich zu den Fahrbahnflächen der Gehweg auf Reifenabrieb untersucht wurde.



Abbildung 14: Vogelperspektive auf alle Standorte (www.openstreetmap.de)

Autobahnabfluss der Stadtautobahn (Einzugsgebiet des Retentionsbodenfilters Halensee)

Zur Beprobung des Reifenabriebaufkommens auf einer Autobahn wurde in Zusammenarbeit mit den Berliner Wasserbetrieben der Zufluss des Retentionsbodenfilters am Berliner Halensee beprobt.



Abbildung 15: Blick auf den Retentionsbodenfilter am Halensee (Joswig, 2016)

Das Einzugsgebiet des Bodenfilters hat eine Gesamtgröße von rund 46 ha. Die abflusswirksame Fläche beträgt 22,8 ha, von denen rund 17 ha der Stadtautobahn A100 im Bereich der Abfahrt „Kurfürstendamm“ zuzuordnen sind (Draht, 2020). Die übrige Fläche besteht im Wesentlichen aus Grünanlagen. Die Stadtautobahn ist an dieser Stelle mit durchschnittlich 210.000 Kfz/d eine der am meisten befahrensten Straßen Deutschlands (FIS Broker, 2014).

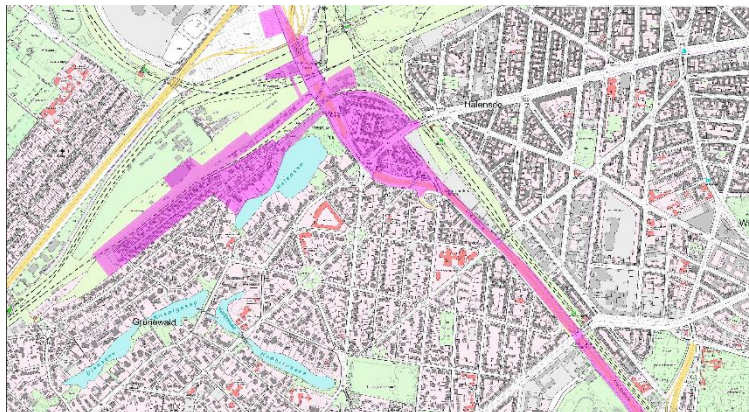


Abbildung 16: Einzugsgebiet Retentionsbodenfilter Halensee (Draht, 2020)

Bei dem Retentionsbodenfilter Halensee wird das Regenwasser über das Kanalgefälle zunächst in ein Absetzbecken (Regenklärbecken) geleitet und von dort über eine schilfbewachsene Filterschicht gepumpt.

Am Retentionsbodenfilter Halensee wurde an zwei Stellen flüssige Proben gezogen. Zum einen im Zufluss zum Retentionsbecken, wo der direkte Abfluss von der Straße beprobt werden konnte und zum anderen im Ablauf des Bodenfilters, um die erwartete hohe Reinigungsleistung des Bodenfilters (s. KURAS Studie 2015 - (Marczinski, 2020)) bestätigen zu können.

Im Zulaufkanal zum Retentionsbecken befindet sich ein 2,92 m tiefer Schacht aus dem fünf Regenabflussereignisse beprobt wurden. Eine Schwierigkeit bestand hier in einer Vertiefung des Kanals im Bereich des Schachtes, in dem sich trotz Leerstand des Kanals Wasser stetig ansammelte und somit die Beprobung des „first flush“ erschwerte. Der Durchfluss wurde durch die BWB hinter diesem Schacht mit einem Wehr und einer Höhenmessung per Ultraschall ermittelt.



Abbildung 17: Schacht Zulaufkanal

Aus dem Retentionsbecken wird das Wasser zum Bodenfilter gepumpt und darüber versickert. Zeitlich verzögert zum Zulauf tritt das gereinigte Wasser aus dem Ablauf des Bodenfilters aus und wird durch einen Kanal in den Halensee geleitet. Aus einem Ablaufschacht konnten hier zwei Regenereignisse beprobt werden. Hinter dem Schacht wurde der Durchfluss durch die BWB mit einem MID ermittelt. Wichtig zu beachten ist, dass das hier beprobte Wasser nicht direkt dem Wasser entspricht, das im Zufluss zum Retentionsbecken erfasst wurde, sondern dem Wasser, das im Bodenfilter durch den frischen Zufluss verdrängt wurde.



Abbildung 18: Ablauf Bodenfilter

Nassschlammfang

Eine vom Bezirksamt Berlin Steglitz/ Zehlendorf für Forschungszwecke zur Verfügung gestellte Fläche im öffentlichen Straßenraum befindet sich in Berlin in der Clayallee zwischen der Pücklerstraße und Dohnenstieg. Die dort eingerichtete In situ Messstrecke hat eine Länge von ungefähr 200 m und umfasst 6 Straßeneinläufe der stadtauswärts-verlaufenden (in südliche Fahrtrichtung: rechts) Fahrbahn. Innerhalb des angrenzenden Grünstreifens sind 6 Messschächte eingebaut, die das auf der Straße gesammelt abfließende Niederschlagswasser über die Straßenabläufe aufnehmen, in einem offenen Gerinne (DN 150) führen und anschließend in den Regenwasserkanal der Trennkanaalisation leiten (Abbildung 19). Die Messstrecke wurde bereits für ein vorheriges UEP-II/2-Forschungsprojekt erstellt und konnte im laufenden RAU-Projekt weiter genutzt werden. Jeder Straßeneinlauf besitzt eine angeschlossene Fläche von $360 \text{ m}^2 \pm 10 \text{ m}^2$, die sich aus ca. 280 m^2 Fahrbahn und ca. 80 m^2 Radweg zusammensetzt. Die Clayallee repräsentiert mit einer hohen Belastung durch Laubanfall von Eichen sowie Kiefernadeln und einer Verkehrsbelastung von 29.600 Kfz/d (SenStadtUm, 2017) ein typisches städtisches Einzugsgebiet. Die Messstrecke befindet sich in einem Streckenabschnitt mit fließendem Verkehr ohne Haltestellen oder Kreuzungen. Der äußere, rechte Fahrstreifen der dreistreifigen Fahrbahn dient der Parkmöglichkeit und ist im Bereich der Straßeneinläufe durch Markierungen (Abbildung 19 links) abgesperrt, um Beeinflussungen bei den Messungen und Störungen bei Wartungsarbeiten durch parkende Fahrzeuge zu vermeiden.

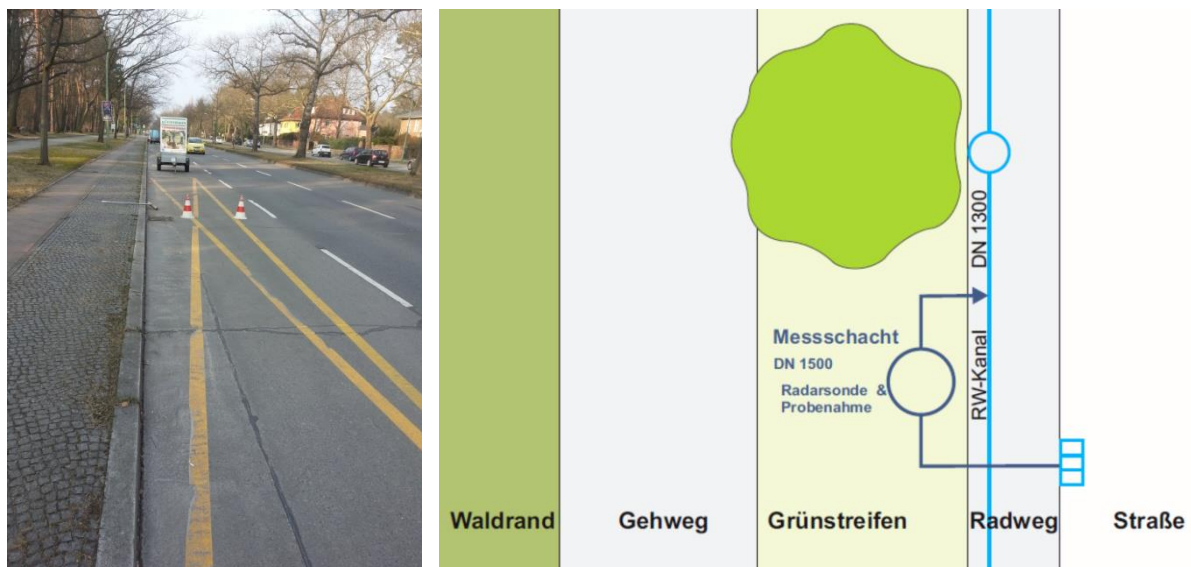


Abbildung 19: Teilabschnitt der Messstrecke in der Clayallee

(links: Foto der 3-spurigen Fahrbahn sowie des separaten Rad- und Fußweges; rechts: systematische Skizze des Anschlusses der Messschächte an die Straßenabläufe)

Flughafen Berlin-Schönefeld

Um den Reifenabrieb auf der Start- und -landebahn eines Flughafens ermitteln zu können wurde der Flughafen Berlin Schönefeld ausgewählt. Der ehemalige Flughafen Berlin-Schönfeld (SFX) liegt 22km südöstlich vom Berliner Stadtzentrum und ist mittlerweile als Terminal 5 Teil des Berliner Flughafens BER.

SFX hatte im Jahr 2018 105.955 Flugbewegungen und ein Fahrgastauskommen von 12,7 Mio Fluggäste. Im Vergleich hat der größte Flughafen Deutschlands in Frankfurt a. Main (FRA) im Jahr 2018 eine Flugbewegung von 512.112 und 69,4 Mio Fluggäste (BER, 2018).

Die Proben wurden auf der neuen Nordstartbahn (ehemals Südstartbahn) genommen. Diese asphaltierte Startbahn ist 3600 m lang und hat eine Breite von 45 m. Am 20.09.2018 gab es erstmals einen Begehungstermin des Flughafens Schönefeld. Es wurden die Beprobungsmöglichkeiten an der Touchdown-Zone betrachtet. Hierbei wurde festgestellt, dass eine Beprobung mittel Probenahmekorb nicht möglich ist, da aus sicherheitstechnischen Gegebenheiten nur zu bestimmten Zeiten die Landebahn während nächtlichen Flugverbots betreten werden darf und auch die Ablaufrinnen keinen Einbau des Probenahmekorbs ermöglichen. Eine Beprobung der Landebahnoberfläche durch Fegen ist nicht möglich, da sich die Reifenabriebspartikel in der Touchdown-Zone direkt mit der Asphaltdecke verbinden. Aus diesem Grund wurde die Beprobung auf die Wartungstermine gelegt, bei dem die Touchdown-Zonen gereinigt werden. Hierfür werden speziell ausgestattete LKW (2 Stück) genutzt, die die zwei Touchdown-Zonen (insgesamt ca. 30.000 m²) der Landebahn Nord mittels Wasser-Hochdruckdüsen (2.500 bar) reinigen. Die Wartung erfolgt alle sechs Monate. Es werden jeweils 6 bis 8 t Reifenabrieb aufgenommen. Dieser in Containern abgesetzt um anschließend thermisch verwertet zu werden. Während der Wasser-Hochdruck Reinigung wurde kein Austrag in die Umwelt festgestellt, da das Spülwasser direkt absaugt wird.

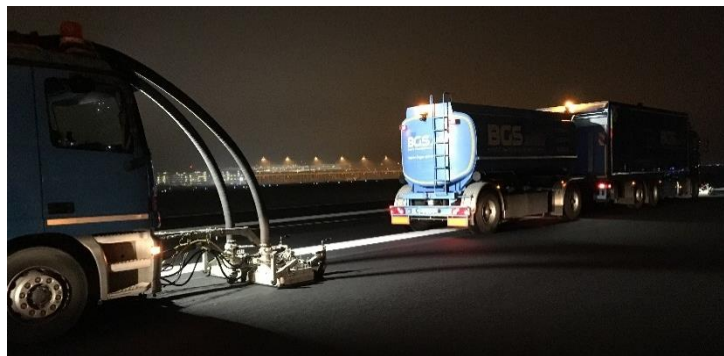


Abbildung 20: Reinigung der Touchdown-Zone der Landebahn Nord des Flughafens Schönefeld mittels Wasser-Hochdruck-Düsen

II.1.1.2.3. Probenahmearten

Wissenschaftliche Kehrung

Fegen vs. Saugen

Für die Probenahme von Feststoffen auf Straßenflächen stehen grundsätzlich zwei verschiedene Verfahren zur Auswahl. Entweder erfolgt die Aufnahme der Partikel über Kehren oder Aufsaugen. In der folgenden Abbildung sind die Massen der einzelnen Fraktionen der beiden Probenahmesmethoden dargestellt. Es wird deutlich, dass mit dem Besen mehr Partikel aufgenommen wurden. Insbesondere von den feinen Fraktionen bis 250 µm wurden etwa 40 % mehr Masse aufgegriffen. Die Fraktionen größer 500 µm werden von Besen und Staubsauger gleich gut erfasst. Reifenabriebspartikel werden in den Fraktionen kleiner 200 µm vermutet. Aus diesen Ergebnissen wurde daher für die folgenden Probenahmen die Methode des Aufkehrens mit dem Besen gewählt.

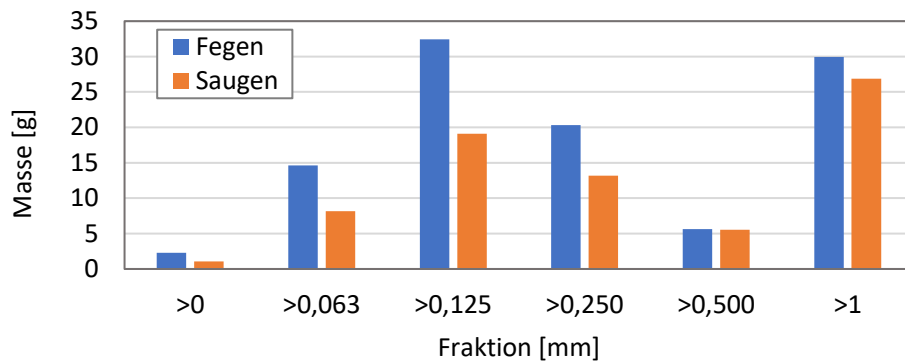


Abbildung 21: Ergebnisse des Vergleichs Fegen vs. Saugen

Grundsätzlich wurden Kehrproben nur auf trockenen Flächen und während Trockenperioden genommen.

Die für Tagesfegungen über 24 h beprobten Flächen, weisen parallel zur Fahrtrichtung eine Länge von 6,0 m und eine Breite von 1,6 m auf. Dabei wird die Fläche in der Breite auf zwei je 0,8 m Bereiche aufgeteilt, eine am Straßenaußenrad angrenzende Spur 1 und daneben eine in Richtung Straßenmitte angrenzende Spur 2 (vgl. Abbildung 22). Die Breite kommt durch den am Straßenrand verlaufenden Radstreifen zustande, auf dem im fließenden Verkehr Proben genommen werden können sowie die Tatsache, dass am Straßenrand der Großteil der Partikel lagert. Um Proben auf den gesamten Fahrstreifen nehmen zu können, muss die Straße gesperrt werden, wofür eine behördliche Genehmigung erforderlich ist. Diese Sperrung wurde im Rahmen der Versuche zur Querverteilung des Straßenkehrrechts durchgeführt. Es wurde die Länge der Probenflächen von 6,0 m gewählt, um sicherzustellen, dass ausreichend große Massen an Feststoffen für die spätere Laboranalysen aufgenommen werden.

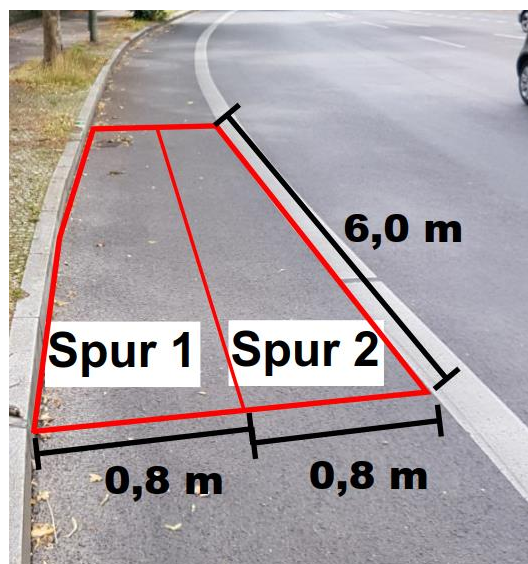


Abbildung 22: Darstellung einer Kehrfläche im Straßenraum mit charakteristischen Abmessungen

Bei der Probenahme wird zuerst auf der Spur 1 mit einem Saalbesen aus Rosshaar mit 80 cm Breite (vgl. Abbildung 23) der Straßenkehrrecht von beiden Enden der Prüffläche in die Mitte der Fläche gekehrt. Das geschieht durch kleine kräftige Schübe des Besens, um auch das Material aus den Zwischenräumen der Gesteinsmatrix zu gewinnen. Die Bewegung der „Fegeschübe“ erfolgen nach dem Prinzip „drei Schritte vorwärts, 2 Schritte zurück“. Dadurch wird der zusammengekehrte Haufen

stetig in eine Richtung gefegt und die Flächen werden mehrmals von dem Besen bearbeitet. Anschließend wird mit einem geeigneten Handfeger aus Rosshaar (vgl. Abbildung 23) der entstandene Haufen in der Mitte auf ein Kehrblech aus Metall gefegt und in ein Probenglas gefüllt. Nun wird die gesamte Fläche erneut mit dem Handfeger gereinigt und das Kehrblech permanent so vor dem Besen geführt, dass durch das Kehren mobilisiertes Material direkt auf das Kehrblech gelangt und nicht erneut in die „Mikro-Fugen“ der Straßenoberfläche geschoben wird. Das gewonnene Material wird von dem Kehrblech in ein Probenbehältnis aus Glas umgefüllt. Dabei ist sorgfältig darauf zu achten, dass kein Material durch Wind verloren geht. Bei Spur 2 wird anschließend analog vorgegangen, wobei nur auf sehr rauen Flächen mit dem Handfeger der gesamte Bereich erneut gereinigt wird.



Abbildung 23: Saalbesen mit Rosshaar (links) und Handfeger mit Kehrblech (rechts)

Rauheitsmessung

Die Rauheit der Messstellen wurde untersucht, denn die Oberflächentextur von Fahrbahnen wirkt sich neben dem Abriebsverhalten auch auf das Akkumulationsverhalten von Feststoffen aus. Dabei erhöht sich mit der Rauheit auch die Verschmutzungsneigung einer Fläche (Momber, et al., 2006). Dieser Zusammenhang wurde auch in weiteren Studien (Zhao, et al., 2018) (Wicke, et al., 2012) (Griesbaum, 2017) festgestellt.

Um die Textureigenschaften von Straßen miteinander vergleichen zu können, werden verschiedene Kenngrößen verwendet, welche sich mit unterschiedlichen Messmethoden erfassen lassen. In der DIN EN ISO 13473-1 werden die drei gängigsten Messzahlen zur Charakterisierung der Makrotexturtiefe beschrieben. Im Projekt wurde die am häufigsten verwendete Messzahl, die mittlere Profiltiefe (MPD) genutzt. Die Profiltiefe (PD) und die mittlere Profiltiefe bezeichnen für einen zweidimensionalen Fall den Abstand zwischen der Oberfläche und durch die zwei höchsten Partikel gebildete Ebene innerhalb einer Oberfläche in der Größenordnung wie die Reifenaufstandsfläche. Für die Bestimmung der MPD werden die Profilsitzenwerte von zwei jeweils 50 mm langen Abschnitten gemittelt und der Mittelwert davon abgezogen. Dieser Wert ist die bevorzugte Größe zur Bewertung von Fahrbahnbelägen (Momber, et al., 2006)

Für die Bestimmung der Rauheit wurde das Texturtiefe-Messgerät ELA-Textur (vgl. Abbildung 24) verwendet. Das Messgerät erfasst die Makrotextur einer Oberfläche durch Abtasten eines Lasers. Die Beschaffenheit der Mikrotextur sowie Unebenheiten der Fahrbahnoberfläche werden nicht erfasst.

Vorteile gegenüber anderen Prüfverfahren sind, dass die Messergebnisse keinen manuellen Einflüssen durch die Prüfenden unterliegen. Weiter sind keine Verbrauchsmaterialien wie Wasser oder Sand notwendig und die Messung kann schnell durchgeführt werden. Bei den Verkehrsflächen wurde eine vergleichbare Rauheit ermittelt. Der Referenzstandort Friedhof und der Standort Parkplatz haben eine Größere Struktur und der Referenzstandort im Park mit einer Betonoberfläche wies eine glattere Struktur auf.

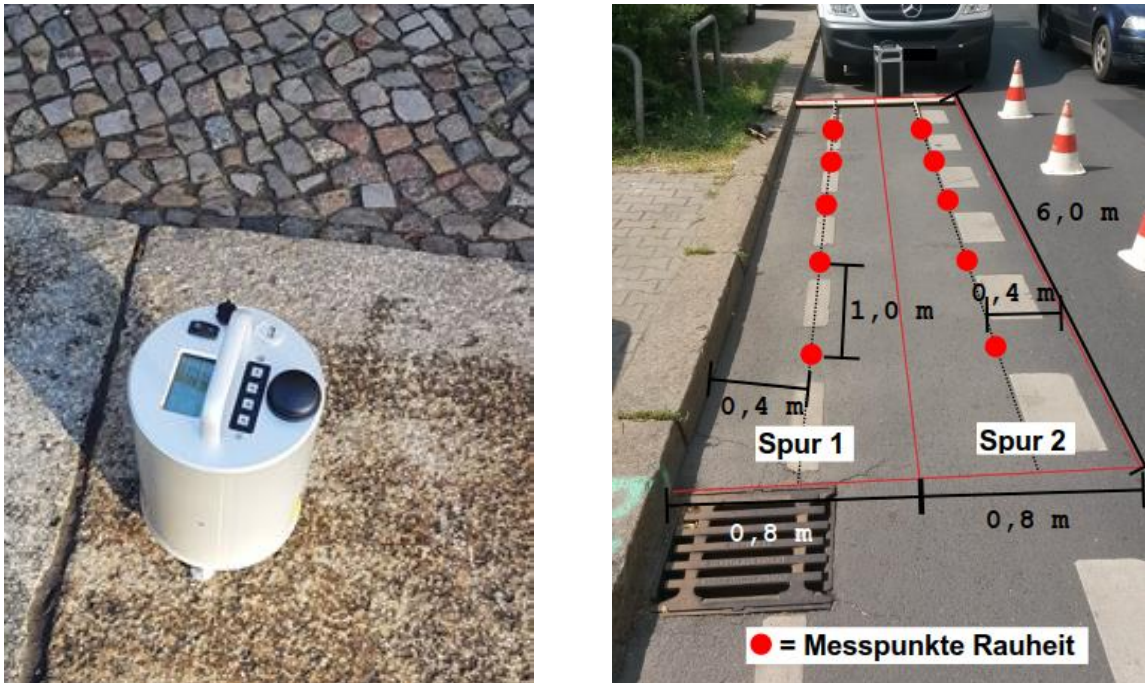


Abbildung 24: Messgerät ELAtextur (links) und Vorgehen bei der Rauheitsmessung (rechts)

Querfegung

Aus der Literatur ist bekannt, dass das Feststoffaufkommen nicht über die Straße hinweg gleichmäßig verteilt ist. Der größte Anteil lagert im Randbereich der Straße. (Pitt, et al., 1973), zitiert nach (Selbig, et al., 2013) haben 90 % des Feststoffaufkommens in dem 0,3 m breiten Randbereich der Straße gefunden. Bei der Untersuchung über einen halben Straßenquerschnitt mit 5 m Breite hat (Grottker, 1987) 96 % der Feststoffe in dem an den Bordstein grenzenden 0,5 m breiten Streifen ermittelt. Dabei sind die feineren Fraktionen am besten über den Straßenquerschnitt verteilt, da turbulenter Fahrtwind für eine ständige Wiederaufwirbelung der Partikel sorgt.

Diese Erkenntnis ist für die Untersuchung des Reifenabriebs auf urbanen Straßenflächen sehr vorteilhaft. Es wird angenommen, dass sich der Reifenabrieb im Straßenkehrriech befindet und sich dieser hauptsächlich im Randbereich der Straße akkumuliert. Darum ist es hinreichend Feststoffproben aus dem Randbereich der Straße zu entnehmen, da hier der Großteil aller vorhanden Partikel enthalten sind. Dies erleichtert die Probenahme im Straßenraum sehr, da für Probenahmen in dem Randbereich keine Straßensperrung notwendig ist.

Um nachzuweisen, dass sich die Feststofferteilung über einen Straßenquerschnitt im Untersuchungsgebiet analog der Literatur verhält, wurden sogenannte Querfegungen durchgeführt. Zusätzlich soll durch die Untersuchungen erfasst werden, wie sich der SBR-BR Gehalt anteilig am Straßenkehrriech über einen Straßenquerschnitt verteilt.

Dazu wurde an dem Standort Gerade die 4,1m breite Straße in fünf Abschnitte in je 0,8 m Breite Abschnitte eingeteilt. In Abbildung 25 ist der Versuchsaufbau dargestellt. Es wurde auf den Spuren 1 bis 5 über 15 m Länge Material nach dem hier festgelegten Verfahren der wissenschaftlichen Kehrung gewonnen, um sicherzugehen, dass genug Masse für eine Laboranalyse auf SBR-BR zusammenkommt. Solch eine Querfegung wurde an der Stelle Gerade an fünf Tagen

durchgeführt. Dabei wurde an drei Messtagen die Fläche 24h zuvor gereinigt, sodass die Proben analog den Tagesfegungen (vgl. nachfolgendes Kapitel) gleichen äußeren Einflüssen ausgesetzt war.

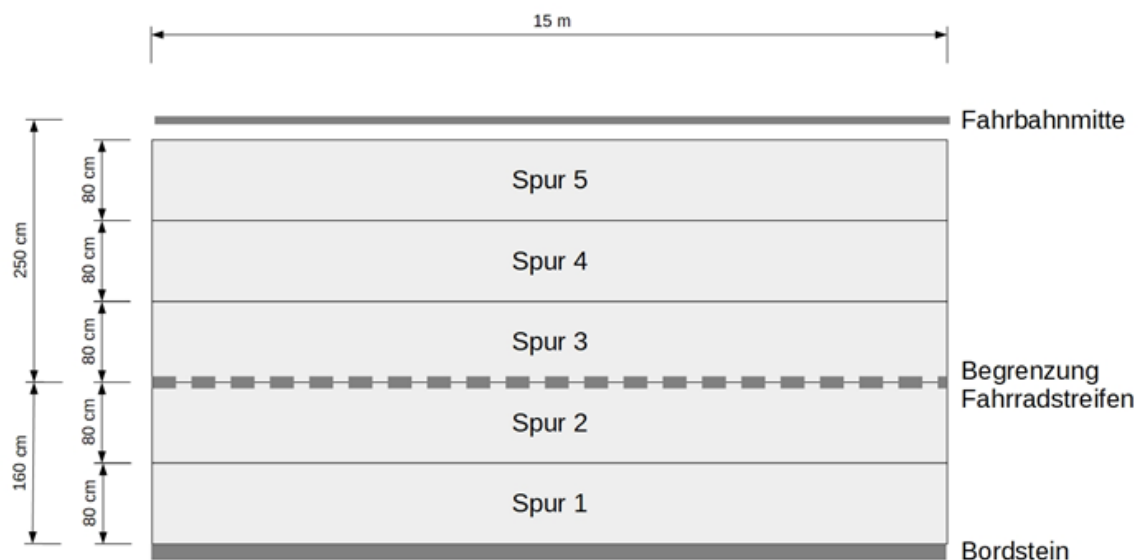


Abbildung 25: Versuchsaufbau für die Querfegung

Tagesfegung (TF)

Tagesfegungen (TF) und Grundreinigungen (GR) werden wie zuvor beschrieben durch Kehren von den Probenflächen auf Spur 1 und Spur 2 auf einer Länge von 6 m gewonnen. Bei einer GR können aus der Probe Rückschlüsse über die Zusammensetzung der undefinierten Straßenmatrix gewonnen werden, allerdings ist nicht bekannt, über welchen Zeitraum sich die Partikel angesammelt haben und wie hoch das Verkehrsaufkommen war. Dies sind wichtige Kenngrößen, die für die vergleichbare Untersuchungen von Reifenabrieb quantifiziert werden sollen. Darum wurden nur Proben von Tagesfegungen auf Reifenabrieb analysiert. Die TF ist eine Probenahme analog der GR, die 24 h nach einer GR oder vorherigen TF erfolgt. Dadurch ist gewährleistet, dass die Probe der TF nur aus Partikeln besteht, die in den 24h seit der vorherigen Reinigung entstanden sind oder von angrenzenden Flächen auf die Probefläche verfrachtet wurden.

Für einen aussagekräftigen Vergleich unter den acht Standorten für Kehrversuche wurden für jeden Standort mindestens fünf TF (drei an den Referenzstellen) vorgenommen. Diese wurden in dem Zeitraum von April 2019 bis Juni 2020 durchgeführt.

Wiederfindung (WF) der wissenschaftlichen Kehrung

Eine große Unsicherheit bei dem wissenschaftlichen Kehren als Probenahme ist nicht aufgenommenes Material. Um abzuschätzen, wie groß deren Anteil an einer Feststoffprobe ist und damit herauszufinden, wie zuverlässig diese Methode zur Probenahme ist, wurden Wiederfindungsversuche durchgeführt.

Für die Bestimmung der Wiederfindung wurden zwei verschiedene Ziele verfolgt, was zu Unterschieden in der Durchführung der Versuche führt. Einerseits wurde untersucht, wie die Wiederfindung auf den Bodenbelägen Asphalt und Beton ist, mit einer genauen Auflösung über die einzelnen Kornfraktionen. Als zweites Ziel sollte standortspezifisch festgestellt werden, wie die

Wiederfindungs-Rate von Straßenkehricht im Fraktionsbereich 20 µm bis 500 µm ist, der für die SBR-BR-Analyse verwendet wird.

Als Prüfmaterial für beide Untersuchungen wurde Straßenkehricht bis 2 mm Korndurchmesser aus zuvor gewonnenen Kehrproben von Standorten aus dem Gebiet Berlin-Wedding verwendet. (Dies hat den Vorteil gegenüber käuflichen Prüfmaterialien, dass es dem Straßenkehricht in physikalischen Eigenschaften entspricht und damit dessen Verhalten bei Kehrversuchen ideal abbildet.) Für die Festlegung der Menge und der Zusammensetzung des Prüfmaterials wurde auf bisherige Erkenntnisse aus dem Projekt RAU zurückgegriffen, um möglichst gleiche Bedingungen wie bei einer TF zu schaffen. Die Prüfmenge je m² im Randbereich (0,8 m Breite) pro gefegte Fläche wurde aus vorherigen TF (n=26) berechnet und beträgt im Mittel 12,6 g/m² Straßenkehricht. Die Massenverhältnisse der Kornfraktionen des Prüfmaterials orientieren sich an Siebungen von Straßenkehrichtproben aus GR des Standortes Hochstraße Gerade. Diese sind in Abbildung 26 zusammen mit den Kornverteilungen anderer Standorte in der Hochstraße dargestellt. Es ist gut erkennbar, dass die Sieblinie der Gerade gemeinsam mit der Sieblinie Kurve im ungefähren Mittel der vier Sieblinien liegt.

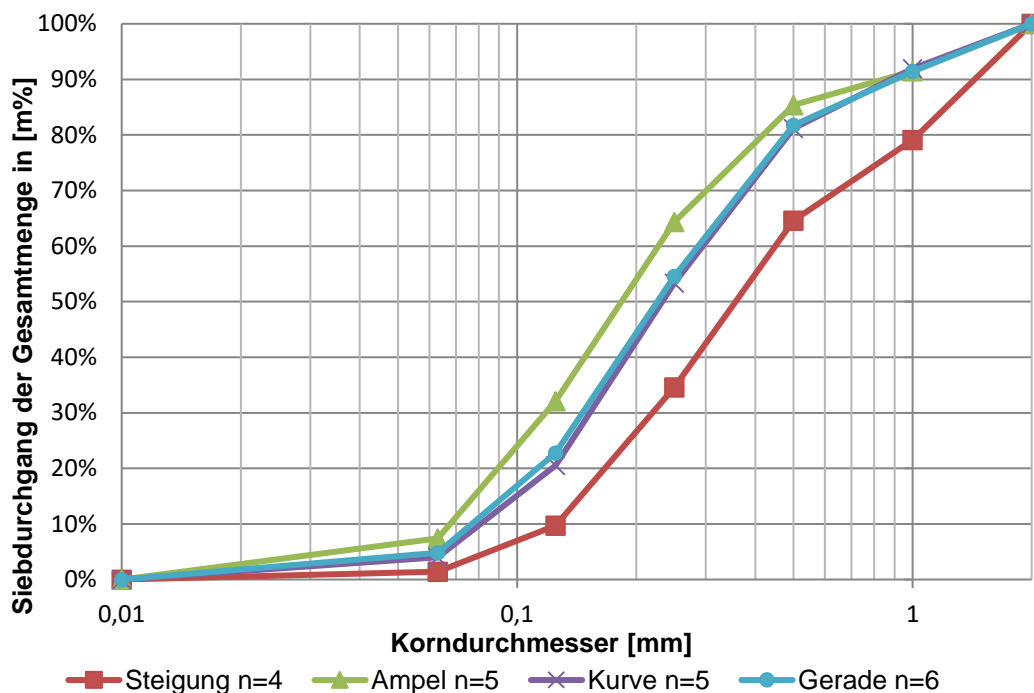


Abbildung 26: Sieblinien von Grundreinigungen des Standortes Hochstraße

Das Prüfmaterial wurde auf einer zuvor gereinigten Fläche von 0,8 m x 3,0 m möglichst gleichmäßig ausgebracht, wie in Abbildung 27 zu sehen ist. Die Größe der Fläche entspricht der halben Untersuchungsflächen, welche für TF verwendet werden. Darüber hinaus wurde auch gezielt auf Untersuchungspur 1 geprüft, da hier die größten Mengen an Straßenkehricht anfallen.

Beim Aufkehren des Prüfmaterials wurde wie bei der Probenahme einer TF vorgegangen (siehe vorangehender Abschnitt).



Abbildung 27: Prüfstoffmischung in Gläsern vor (unten) und nach (oben) dem Ausbringen und Vorgehen für die WF-Versuche (rechts)

Der wiedergewonnene Prüfstoff wurde anschließend bei 30 °C getrocknet und abhängig davon, ob eine Material- oder Standort-Wiederfindung vorlag, weiterbehandelt. Bei der Material- Wiederfindung wurde der Prüfstoff, analog zur Gewinnung des Prüfstoffs, nach der Trocknung durch Siebung fraktioniert und ausgewogen. Dadurch sind Rückschlüsse auf die Wiederfindung in den einzelnen Fraktionen möglich. Die Wiederfindung der Standorte wurde nach der Trocknung lediglich ausgewogen, wodurch eine allgemeine Wiederfindung -Rate für den jeweiligen Ort bestimmt wurde.

In Tabelle 5 sind die Wiederfindung für die beiden unterschiedlichen Oberflächen nach Korngrößen dargestellt. Für Beton wurde dreimal die gleiche Fläche beprobt. Die Wiederfindungsrate ist insgesamt sehr hoch. Sie steigt von der größten Fraktion ausgehend bis zur zweitkleinsten kontinuierlich an und überschreitet dabei sogar die ausgebrachte Menge um durchschnittliche 12 m%. Die kleinste Fraktion dagegen konnte nur zu Dreivierteln wiedergefunden werden. Aber aufgrund des geringen Anteils an der Gesamtmasse ergibt sich eine Wiederfindung von 99 m% für den Korngrößenbereich 0 - 500 µm. Die Standardabweichungen sind bis auf die Abweichung von 9 m% in der Fraktion 1 - 2 mm sehr moderat.

Für die Asphaltflächen wurden die drei Standorte Lichtsignalanlage, Kurve und Steigung jeweils einmal beprobt. Diese wurden gewählt, da deren mittlere Profiltiefe das Spektrum der Asphaltflächen repräsentativ abdeckt. Es konnte in Summe 91 m% Prozent wiedergefunden werden. Auch hier ist die Überschreitung des ausgebrachten Materials in der Fraktion 500 - 1000 µm auffällig, was allerdings an einem Ausreißer von 131 m% an der Lichtsignalanlage liegt. Im Korngrößenbereich 0 - 500 µm wurden 90 m% gemessen. Die Standardabweichung liegt deutlich höher als auf der Betonfläche.

Eine mögliche Erklärung für die Überschreitung von 100 m% in einer Fraktion bei der Wiederfindung könnten Veränderungen der Siebkurve bei mehrmaligem Rütteln sein. Bei Versuchen am Teststand wurde Material, welches für Wiederfindungsversuche verwendet wird, mehrmals über einen Siebturm

gerüttelt und anschließend ausgewogen. Dabei gab es eine Verschiebung von größerem Material in kleinere Fraktionen. Das schwächt die Aussagekraft der erzielten Ergebnisse zur Wiederfindung der unterschiedlichen Materialien, da diese auf Sieblinien basieren. Außerdem spielt neben dem Material die damit verbundene Oberflächenrauheit vermutlich eine entscheidende Rolle. So hat der Standort Beton einen MPD von 0,45 mm, wohingegen die Standorte der Asphaltversuche im Mittel einen MPD von 0,88 mm aufweisen. Auf den Zusammenhang zwischen Rauheit einer Probenfläche und der erzielten Wiederfindung wird in Tabelle 7 eingegangen.

Tabelle 5: Wiederfindungsraten von Kehrversuchen auf unterschiedlichen Oberflächen

(n=3) Siebgrößen	Beton		Asphalt	
	WF	Std.-Abw.	WF	Std.-Abw.
>1 mm	82%	9%	80%	12%
>500 µm	92%	5%	107%	18%
>250 µm	95%	0%	94%	4%
>125 µm	98%	1%	92%	4%
>63 µm	112%	3%	89%	6%
<63 µm	75%	5%	72%	11%
Summe	97%	1%	91%	3%
Fraktion				
500µm - 2mm	88%	6%	90%	7%
0 - 500µm	99%	1%	90%	2%

Die Ergebnisse der Wiederfindungs-Raten der verschiedenen Standorte sind in Tabelle 6 dargestellt. Diese wurden farblich in drei Klassen unterteilt. Sehr gute Werte ≥ 97 m% sind grün markiert, moderate Werte im Größenbereich 83 – 88 m% sind gelb und Werte ≤ 76 m% wurden rot markiert. Der angegebene Mittelwert setzt sich aus den Wiederfindungen von drei Versuchen je Fläche zusammen. Die Standardabweichung dieser Mittelwerte wurde ebenfalls in drei farbliche Kategorien eingeordnet. Standardabweichungen (Std.-Abw.) < 5 % sind grün, Werte im Bereich 5 - 10 m% gelb und > 10 m% rot unterlegt. Durch diese Darstellung ist ersichtlich, dass an Standorten mit hoher Wiederfindungsrate die Standardabweichung gering ist. An den Standorten, an denen weniger Prüfstoff wiedergefunden wurde, sind auch die Schwankungen zwischen den verschiedenen Messungen größer.

Tabelle 6: Wiederfindung der Kehrproben an den unterschiedlichen Standorten

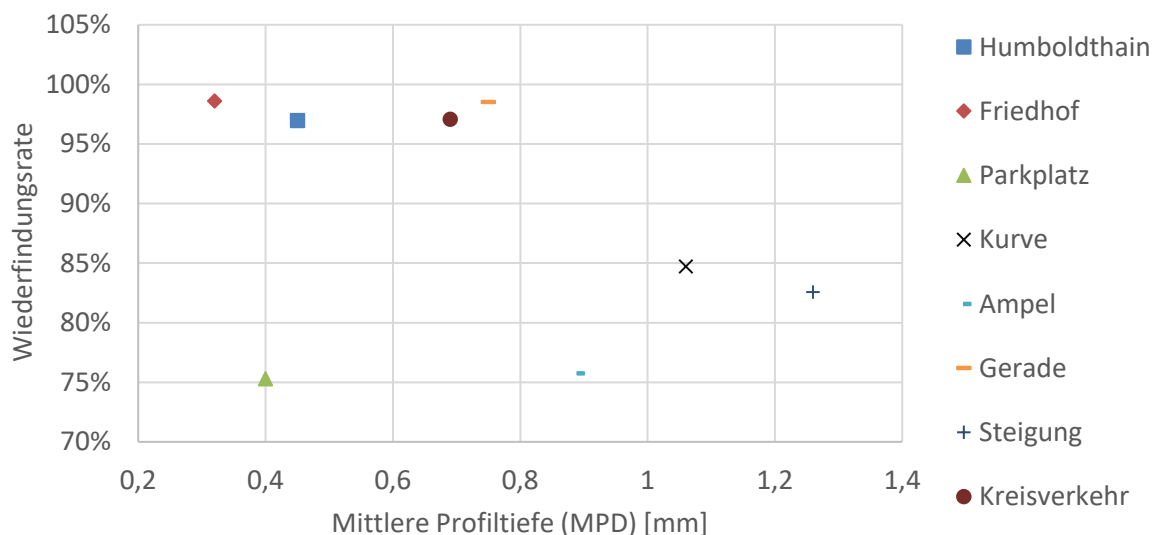
Standort	WF-Rate	Std.-Abw.	MDP [mm]	Versuche
Gerade	99%	4,9%	0,75	3
Lichtsignalanlage	76%	8,1%	0,89	3
Kurve	85%	14,7%	1,06	3
Steigung	83%	6,5%	1,26	3
Kreisverkehr	97%	2,0%	0,55	3

- Gehweg Mosaik	42%	9,7%	-	3
- Gehweg Platte	89%	2,2%	0,66	3
Parkplatz	75%	5,4%	0,40	3
Humboldthain	97%	0,9%	0,45	3
Friedhof	99%	4,3%	0,32	3

Ein statistisch relevanter Zusammenhang zwischen der Makrorauheit und der Wiederfindung konnte nicht festgestellt werden. Jedoch bietet eine Oberfläche, welche mehr Fugen und Poren aufweist, mehr Rückhalteraum für Partikel als eine glatte Fläche. Darum wurde vermutet, dass bei größerer Rauheit die Wiederfindungsrate abnimmt. Mit Ausnahme des Standortes Parkplatz konnte diese Erwartung bei den untersuchten Flächen festgestellt werden. So haben die glatteren Flächen ($MPD \leq 0,75 \text{ mm}$) Friedhof, Humboldthain, Kreisverkehr und Gerade alle Wiederfindungsraten im Bereich von 97 % bis 99 %. Die raueren Flächen ($MPD \geq 0,89 \text{ mm}$) Lichtsignalanlage, Kurve und Steigung haben deutlich niedrigere Wiederfindungsraten, diese liegen zwischen 76 % und 85 %.

Die Ursache für die eher niedrige Wiederfindung von 75 % auf dem Parkplatz trotz geringer relativer Makrorauheit ($MPD = 0,40$) könnte darin liegen, dass die teilweise größeren Fugen zwischen den Betonpflastersteinen die Messung des MPD nicht maßgeblich beeinflussen, aber eine Senke für Partikel bei der WF sind. Die WF der anderen Standorte befinden sich im erwarteten Rahmen entsprechend deren MPD.

Tabelle 7: Zusammenhang zwischen Wiederfindungsrate und der Oberflächenrauheit









Eine Ursache für die Schwankungen der Wiederfindung innerhalb eines Standortes ist der Einfluss der prüfenden Person. Abhängig von Technik, Konzentration und Enthusiasmus werden die Partikel einer Oberfläche unterschiedlich gut beim Kehren derselben Prüfer*in erfasst. Daneben sorgen Verwehungen durch Wind, der zwischen Standorten und Untersuchungstagen variiert, zu Verlusten von Prüfsubstrat während der Messung. Auch die heterogene Beschaffenheit der Prüfflächen und des Prüfstoffs erschweren die Messung identischer Wiederfindung am selben Standort.

Bei der Untersuchung, wie zuverlässig Kehren bei Probenahme von Feststoffen auf Straßenflächen ist, wurden zufriedenstellende Ergebnisse erzielt. Trotz der Schwächen an dem hier angewendeten Verfahren zur Bestimmung der Wiederfindung erscheint dieses sehr praktikabel, um die Ungenauigkeiten beim Kehren innerhalb der verschiedenen Standorte zu charakterisieren.

Verkehrsaufkommen

Eine wichtige Kenngrößen für die Untersuchung und Vergleichbarkeit von Feststoffaufkommen und Abriebprodukten von Fahrzeugen auf Straßenflächen ist das Verkehrsaufkommen. Um dieses möglichst zuverlässig zu bestimmen, wurden Radarmessgeräte des Typs „Traffic Counter“ der Firma Wavetec verwendet. Damit ist es möglich, die Zeit, Länge und Geschwindigkeit von vorbeifahrenden Fahrzeugen an einem bestimmten Straßenquerschnitt zu erfassen. Die Messgeräte wurden auf Höhe der Kehrflächen aufgestellt, um den Verkehr auf der jeweiligen Fahrbahnseite zu erfassen. Als wichtigste Ergebnisse sind der durchschnittliche tatsächliche tägliche Verkehr [dttV] für PKW und deren durchschnittliche Fahrgeschwindigkeiten in Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 8: Durchschnittlicher tatsächlicher tägliche Verkehr

Messstelle	Fahrzeugart	Anzahl [Fz/d]	Stabw. [Fz/d]	Anteil	Ø-Geschw. [km/h]	Stabw. [km/h]
	Fahrrad	886	113	13%	15	4
	Gerade PKW (< 7m)	5.932	320	84%	40	6
	m = 19 d LKW (> 7m)	246	41	3%	40	6
	Fahrrad	1.086	52	14%	16	4
	LSA PKW (< 7m)	6.262	221	82%	40	6
	n = 7 d LKW (> 7m)	272	35	4%	40	6
	Fahrrad	1.012	52	15%	15	3
	Kurve PKW (< 7m)	5.510	139	81%	24	3
	n = 7 d LKW (> 7m)	275	41	4%	24	3
	Fahrrad	987	53	14%	13	4
	Steigung PKW (< 7m)	5.836	110	83%	41	6
	n = 14 d LKW (> 7m)	212	9	3%	41	6
	Fahrrad	1.216	45	15%	16	2
	Kreisverkehr PKW (< 7m)	6.308	211	78%	25	5
	n = 10 d LKW (> 7m)	596	5	7%	25	5
	Fahrrad	270	45	15%	5	1
	Parkplatz PKW (< 7m)	1.476	211	80%	13	4
	n = 8 d LKW (> 7m)	90	5	5%	13	4

Probenahmetechniken Halensee

Da das Ziel der Probenkampagne am Halensee die Beprobung von Regenereignissen ab Beginn des Abflusses war, wurde der Probenzeitpunkt spontan der Wettervorhersage angepasst. Im Verlauf des Projekts gelangten so fünf Beprobungen vom Zulauf zum Retentionsbecken, wobei bei zwei von diesen auch der Ablauf des Bodenfilters beprobt wurde. Dabei kamen zum Einsatz die Handprobenahme mit einem Schöpfbecher und kontinuierliche Probenahmen (s. Tabelle 9). Es wurden immer Proben für die eigene Analyse von Parametern im TU Labor sowie separate Proben für die Analyse durch den Projektpartner WESSLING auf SBR genommen. Die durch die TU Berlin Siwawi ermittelten Parameter waren AFS, AFS fein, CSB homogenisiert, CSB filtriert, Kupfer, Zink, TR und oTR. Im Folgenden werden die Handprobenahme und die kontinuierliche Probenahme detaillierter beschrieben.

Handprobenahme Halensee

Die Handprobenahme wurde an drei Probenahmetagen im Zulauf (27.11.19) und im Ablauf (10.03.20 und 02.09.20) durchgeführt. Hierbei wurde ein Winkelbecher an einer Teleskopstange befestigt und damit mit der Öffnung des Winkelbeckers in Fließrichtung im Abstand von 10 Minuten je zehnmal 1 Probe (600ml) genommen und diese dann, zur Analyse der zu messenden Parameter im TU Labor und der Darstellung eines entsprechenden Verlaufs, analysiert.

Am 27.11.19 wurde aus den Handprobenahmen zudem eine Mischprobe für die SBR Analyse generiert. Dazu wurden aus den 600 ml Gläsern jeweils 350 ml zu einer Mischprobe für die SBR – Analyse durch WESSLING vereinigt.

Auch die Proben aus dem Ablauf des Bodenfilters wurden mit der Handprobenahme durchgeführt. Dabei wurden 4 Proben (600 ml) in 10 Minuten Abständen genommen. Diese wurden am 10.03.20 einzeln und am 02.09.20 vereint auf AFS und AFS fein analysiert.

Kontinuierliche Probenahme durch Schlauchpumpe Halensee

Die kontinuierliche Probenahme mit einer Schlauchpumpe wurde mit mobilen Probenehmern der Firma ORI Abwassertechnik GmbH & Co. KG durchgeführt. Dazu kam am 26.02.20 und am 25.09.20 der BASIC Ex1 Mobil Probenehmer zum Einsatz. Dabei handelt es sich um ein mobiles, automatisches Probenahmegerät, welches eine zeit- und ereignisproportionale Entnahme von Einzel- und Mischproben erlaubt. Am 02.09.20 kam das einfache Probenehmerpumpmodul zum Einsatz, welches durch einen Taster gestartet wurde.

Bei beiden Geräten erfolgt die Förderung des Mediums durch ein Schlauchpumpenprinzip mit einer maximalen Leistung von 2,8 l/min. Der Basic Ex 1 Probenehmer ist dabei in der ATEX Schutzzone 1 und das Probenehmer Modul in der Ex- Zone 1, zugelassen. Die kontinuierliche Probenahme über einen längeren Zeitraum und der daraus resultierenden Mischprobe, ist ähnlich der einer qualifizierten Stichprobe.



Abbildung 28: Basic Ex 1 mobiler Probenehmer (ORI, 2021)

Am 26.02.20 konnte 30 Minuten ab Beginn des Durchflusses. Beprobte werden. Dabei wurden 20,7 Liter gezogen, aus denen 2 Liter Mischprobe für die Analysen der Parameter im TU Labor entnommen wurden. Die restlichen 18,7 Liter wurden über ein 20 µm Sieb gegeben und für die SBR Analyse beim Projektpartner WESSLING zurückgespült.

Die Probenahme am 25.09.20 wurde über Nacht durchgeführt und wurde durch ein Signal der gemessenen Leitfähigkeit im Zulaufschacht gestartet. Dort wurde in einem vorherigen Testlauf eine Leitfähigkeit von über 1200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ gemessen. Sobald frisches Regenwasser den Schacht durchströmt hat sank die Leitfähigkeit innerhalb weniger Minuten auf unter 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Der Basic Ex 1 Probennehmer wurde daher so eingestellt, dass die Probenahme ab einer Leitfähigkeit von 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ausgelöst wurde. So wurden ab 15 Minuten nach Beginn des Durchflusses im Zulaufschacht über 36 Minuten insgesamt 48,3 Liter gezogen. Diese Probe wurde gerührt und eine 1 Liter Mischprobe zur weiteren Analyse der zusätzlichen Parameter im Labor der TU Berlin Siwawi gezogen. Der Rest der Probe wurde über ein 10 μm Sieb gegeben und für die Analyse auf den Parameter SBR zurückgespült. Das Diagramm zeigt auch schon einen früheren Abfall der Leitfähigkeit bis auf fast 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Dieser Abfall ist durch einen sehr schwachen Abfluss zu erklären, der das Wasser im Schacht noch nicht verdrängen konnte und somit auch nicht beprobt werden sollte.

Am 02.09.2020 kam das einfache Probennehmer Modul zum Einsatz, welches durch einen Taster gestartet wurde. Hierbei wurde parallel zur Handprobenahme 100 Minuten lang ab Beginn des Durchflusses insgesamt 180 Liter Probe gezogen und diese über ein 10 μm Sieb gegeben und Anschließend zur Analyse zur SBR Analyse an den Projektpartner WESSLING übergeben.

Tabelle 9: Übersicht der Probenahmetechniken

Probenahme Datum	Probenahmetechnik: SBR Probe – Zulauf Absetzbecken	Probenahmetechnik: sekundäre Parameter – Zulauf Absetzbecken	Probenahmetechnik Ablauf Bodenfilter
27.11.19	Handprobenahme	Handprobenahme	Keine Beprobung
26.02.20	Kontinuierliche Probenahme	Kontinuierliche Probenahme	Keine Beprobung
10.03.20	Verlustig	Handprobenahme	Handprobenahme
02.09.20	Kontinuierliche Probenahme	Handprobenahme	Handprobenahme
25.09.20	Kontinuierliche Probenahme	Kontinuierliche Probenahme	Keine Beprobung

Zur Volumenreduzierung wurde die SBR Probe für WESSLING wie beschrieben in der Regel über 10 μm gesiebt und von dort zurück in ein kleineres Probeglas gespült. Die Siebung über 10 μm erfolgte durch die „Rosi“, ein Siebaufbau, der am Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft der TU Berlin im Schwesterprojekt REPLAWA entwickelt wurde. Ein 10 μm Sieb ist dabei in einen umgebauten Betonmischer eingespannt. Durch eine Rückspülvorrichtung und die rotierende Bewegung wird verhindert, dass sich das Sieb zusetzt. Somit können auch große Volumen und Frachten über das 10 μm in kurzer Zeit gesiebt werden. Bei großen Probenvolumen wurde die gewonnenen Probe vom Halensee mit einer Schlauchpumpe direkt aus dem Gefäß in die Rosi gepumpt.



Abbildung 29: Rückspülung über 10 µm Sieb durch ROSI

II.1.1.3. Entwicklung Probenahmekorb

II.1.1.3.1. Aufbau

Die Projektpartner GKD, TU Berlin Siwawi, WESSLING, IPS, ORI und die BWB, haben intensiv an der Entwicklung des Probenahmekorbs gearbeitet. Der Probenahmekorb sollte in einem beliebigen Norm Straßenablaufschacht zur Beprobung der abgespülten Feststoffe eingesetzt werden können. Dies sollte für den gesamt abfließenden Volumenstrom bis zu einer unteren Trenngrenze von $> 10 \mu\text{m}$ ermöglicht werden.

Der entwickelte Probenahmekorb (PNK) besteht aus einer Siebkaskade mit Sieben abnehmender Maschenweite, die in Straßenablaufschächten installiert wird, um die partikuläre Phase von Straßenablaufwasser zu erfassen. Da es sich bei den verbauten Sieben um Analysensiebe zur Siebung gemäß DIN 66165 handelt, können die Siebe nach der Probenahme in eine Siebmaschine eingespannt und zur DIN-konformen Siebung verwendet werden.



Abbildung 30: Probenahmekorb

Unterhalb der Siebkaskade befindet sich ein Dreieckswehr, in dem mittels eines kapazitiven Drucksensors der Wasserspiegel und damit der Volumenstrom des beprobten Straßenablaufs gemessen wird. Optional kann an dieser Stelle auch ein Schlauchprobenehmer installiert werden, um eine Teilprobe des Siebablaufs zu nehmen. Die Montage des Probenahmekorbs erfolgt über ein Oberteil, an dem Siebkaskade und Durchflusseinheit über Schnallen befestigt werden. Das Oberteil besteht aus einem Auflagering mit einem Griff, über den der Probenahmekorb in den Straßenablaufschacht gehängt werden kann. Unterhalb des Auflagerings befinden sich seitliche Öffnungen, die einen Notüberlauf im Falle eines Überstauens der Siebkaskade ermöglichen und eine Leitfähigkeitssonde, die den Notüberlauf anhand der Leitfähigkeit des überlaufenden Wassers registriert. Durchflusseinheit und Leitfähigkeitssonde sind angeschlossen an ein MLog (Projektpartner ORI). Über diesen Multifunktionsdatenlogger werden die Messwerte in 5-Sekunden-Intervallen aufgezeichnet und über Mobilfunk in die ORI MCloud hochgeladen, aus der die gesammelten Daten heruntergeladen werden können. Zusätzlich findet über das MLog im Falle eines Regenereignisses oder Notüberlaufs eine entsprechende Benachrichtigung via E-Mail oder SMS statt. Im Folgenden wird auf die einzelnen Bauteile sowie auf Problemstellungen während der Entwicklung und Lösungsansätze näher eingegangen.

II.1.1.3.2. Probenahmetechnik

Siebkaskade

Die im Probenahmekorb verbauten Siebe wurden vom Projektpartner GKD bereitgestellt und teils mit Edelmetallgeweben besonders feiner Maschenweiten ($6\mu\text{m}$, $10\mu\text{m}$ und $20\mu\text{m}$) versehen. Sie sind im Probenahmekorb in Form einer Kaskade angeordnet (Abbildung 31). Während die Anzahl der Siebe durch die Länge der Schnallen auf sechs festgelegt ist, kann die Reihenfolge der Siebe nach Bedarf geändert werden, und ermöglicht je nach Anwendung eine Variation der Trenngrenze.



Abbildung 31: Siebkaskade

Um makroskopische Störstoffe, wie zum Beispiel grobes Pflanzenmaterial oder Müll abzuscheiden, befindet sich über dem obersten Sieb zusätzlich ein plissiertes Stahlgitter, das auf das Sieb gelegt wird.

Neben der Möglichkeit, unterschiedliche Siebe im Probenahmekorb verbauen zu können, ergibt sich aus der Verwendung von Laborsieben die Möglichkeit einer Siebanalyse, indem der Siebstapel nach

dem Bergen des Probenahmekorbs auf eine Siebmaschine gespannt wird. Da die Siebanalyse nach DIN 66165 eine Beladung der Siebe mit

20 mL/dm² ≈ 156 mL (1 mm Maschenweite)

2 mL/dm² ≈ 16 mL (20 µm Maschenweite)

vorsieht, die bei den erhaltenen Proben oft überschritten wird, ist diese Form der Siebanalyse als Analyse in Anlehnung an DIN 66165 zu betrachten. Vor der Siebanalyse ist ein händisches Abtrennen makroskopischer Störstoffe sinnvoll, wobei an makroskopischen Stoffen anhaftende kleinere Partikel abgespült und auf das größte Sieb gegeben wurden. Die Anordnung der Siebe im Probenahmekorb legt nahe, dass bereits bei der Probenahme eine In-Situ-Fraktionierung der Probe stattfindet. Es konnte jedoch durch Vergleiche der einzelnen Fraktionen nach der Probenahme und nach der Siebung über die Rüttelmaschine gezeigt werden, dass dies nicht der Fall ist: Große Teile der feineren Fraktionen befinden sich vor der Siebung durch die Rüttelmaschine in der Form von Filterkuchen auf größeren Sieben. Zudem wurden auch Partikel unterhalb der Trenngrenze des feinsten Siebes nachgewiesen. Ein Problem der Probenahmetechnik ist die Verstopfung der Siebe durch den bei zunehmender Beladung gebildeten Filterkuchen, gezeigt in Abbildung 32.

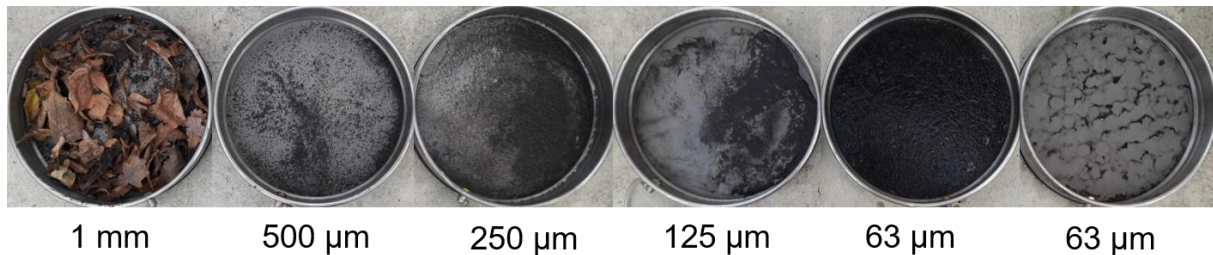


Abbildung 32: Beladene Siebe einer PNK-in-Situ Probenahme

Die Verstopfung der Siebe ist auf mehrere Gründe zurückzuführen, die im Folgenden aufgeführt werden.

Das Überstauen des Probenahmekorbs ist in der Regel auf ein Verstopfen des feinsten verwendeten Siebes zurückzuführen. Es wurden zwei grundlegende Lösungsansätze für dieses Problem getestet: Zum einen wurde versucht, das feinste Sieb durch eine Optimierung der Reihenfolge der darüberliegenden Siebe zu entlasten, zum anderen wurden statt eines 20 µm-Siebes ein weiteres 63 µm-Sieb als feinstes Sieb verwendet (vgl. Abbildung 32). Eine Zusammenfassung der Versuche ist in Tabelle 10 gezeigt.

Tabelle 10: Probenahmekorb in Situ: Variation der Siebreihenfolge

Siebreihenfolge in µm	Regenhöhe in mm	Überläufe/Probenahmen
1000, 500, 250, 125, 63, 20	0.1 – 0.7	0/2
1000, 500, 125, 63, 63, 20	0.5 – 2.9	2/4
1000, 500, 250, 125, 63, 63	1.6 – 6	3/3
1000, 500, 250, 125, 125, 63	1 – 5.5	4/5
1000, 500, 250, 250, 125, 125	5.5	1/1

Wie in Tabelle 10 zu sehen ist, ist ein Überlaufen des Probenahmekorbs auch bei einer Trenngrenze von 125 µm nicht völlig auszuschließen.

Zusätzlich zur Bildung von Filterkuchen kann unterhalb eines Siebes ein Luftpolster entstehen. Dieses unterbricht die Wassersäule und verringert entsprechend den auf den darunterliegenden Sieben lastenden Druck. Mitunter kann eine Verstopfung des Siebes durch die Oberflächenspannung des Wassers bereits durch die Bildung eines derartigen Luftpolsters stattfinden. Eine Entlüftung der Siebe durch PVC-Schläuche verhindert den Einschluss von Luft. Zusätzlich zur Entlüftung kann im Fall eines Überstauens der Wasserspiegel im Probenahmekorb anhand des Wasserspiegels der transparenten Schläuche abgelesen werden (Abbildung 33). Um Probenverluste durch die Belüftungsschläuche zu verhindern, ist es wichtig, die Schläuche in das oberste Sieb zurückzuführen.



Abbildung 33: Entlüftungsschläuche, hier verwendet zur Pegelmessung beim Überstauen des Probenahmekorbs

Da es sich um modifizierte Analysensiebe handelt, findet eine frontale Anströmung (Dead-End-Filtration) der Siebe statt. Im Gegensatz zu einer seitlichen Anströmung (Cross-Flow-Filtration) ist bei dieser Technik eine Bildung von Filterkuchen stark begünstigt. Der Lösungsansatz mittels plissierter Siebronde unterschiedlicher Maschenweiten den gebildete Filterkuchen durch das vorbeiströmende Wasser ständig aufzubrechen ist das in Abbildung 34 gezeigt.



(a) Teilweise beladene Ronde

(b) Unterhalb der Ronde befindliches Sieb

Abbildung 34: Plissierte Ronde zur Reduktion der Filterkuchenbildung

Die den Siebweiten entsprechenden Ronden werden auf die im Probenahmekorb verbauten Analysensiebe gelegt und sollen Partikel abfangen, um die Bildung des Filterkuchens auf dem waagerechten Gewebe zu verringern. In einer erfolgreichen in-Situ-Probenahmekampagne konnten mit den plissierten Ronden 6 Regen mit Gesamtabflussvolumina bis 33 L und Feststoffeinträge von 8.6 g bei einer Trenngrenze von 20 μm ohne Überlaufen des Probenahmekorbs beprobt werden. In weiteren in situ Tests mit längeren Trockenphasen (284h) zwischen den Regen zeigte sich, dass wegen Inkrustationen auf den Sieben ein Dauerbetrieb des Probenahmekorbs nicht sinnvoll ist, und eher einzelne Regenereignisse beprobt werden sollten.

Pumpmodul

Der entwickelte Probenahmekorb kann optional mit einer Beprobung der flüssigen Phase betrieben werden. Die Beprobung erfolgt über ein Probenahme-Modul der Firma ORI (Abbildung 35), das über eine Peristaltikpumpe das den Probenahmekorb durchlaufene Wasser beprobt. Das aus dem Wehr laufende Wasser wird hierzu in einer unter dem Probenahmekorb befestigten Edelstahlwanne aufgefangen, in der sich neben dem Silikonschlauch zur Probenahme ein Schwimmerschalter befindet, der die Probenahme durch das Pumpmodul startet. Um ein Abschalten des Pumpmoduls durch Leerpumpen der Auffangwanne zu unterbinden, ist der Schwimmerschalter in einem Reservoir befestigt, aus dem kein Straßenablaufwasser abgepumpt wird.



(a) Schwimmerschalter und Probeneinlass



(b) ORI Probenahmemodul (ORI, 2021)

Abbildung 35: Beprobung der flüssigen Phase mittels Probenahmemodul

Das Pumpmodul fördert das Straßenablaufwasser, über frei gewählte, 36 Minuten mit einer konstanten Rate von 46 mL/s was einem Gesamtvolumen von 100 L entspricht.

Während bei niedrigen Regenintensitäten eine quantitative Beprobung des Ablaufwassers möglich ist, handelt es sich durch die gegebene Förderrate bei Proben starker Regen um Stichproben. Eine repräsentative Probenahme von groben Partikeln über eine Schlauchpumpe nicht möglich, da sich grobe Partikel zunehmend in dem Bodenbereich bewegen und auch den Schlauch verstopfen können. In dieser Hinsicht ergänzen sich die beiden Probenahmeverfahren Siebkaskade und Pumpmodul: Durch die Kombination von Beprobung der gröberen Fraktionen über die Siebkaskade und Beprobung der feineren Fraktionen über ein Pumpmodul ist eine vollständige Beprobung des Straßenablaufs einschließlich aller Partikelfraktionen möglich.

II.1.1.3.3. Durchflussmessung

Aufbau und Hintergrund

Die Messung des Durchflusses des beprobten Straßenablaufs wird durch einen unterhalb der Siebkaskade befindlichen Dreiecksüberlauf realisiert, der in Abbildung 36 gezeigt ist.

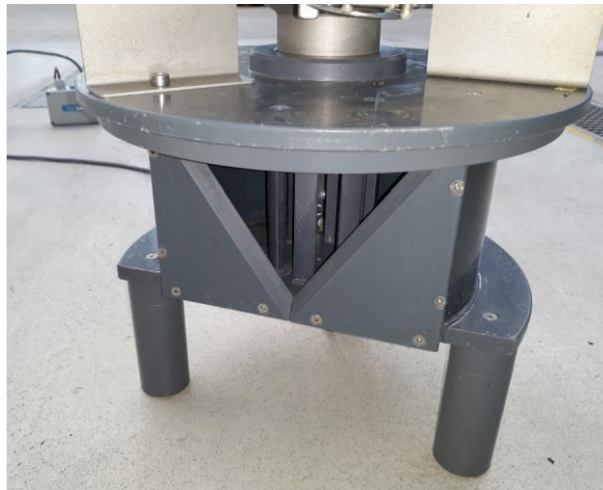


Abbildung 36: Probenahmekorb-Unterteil mit Dreiecksüberlauf

Der Überlauf ist scharfkantig geformt und hat einen Winkel von 60°. Im Inneren des Wehrs befindet sich ein kapazitiver Drucksensor (Fa. BD|SENSORS), der die Höhe der im Wehr befindlichen Wassersäule misst und in 5-Sekunden-Intervallen über ein angeschlossenes MLog (Fa. ORI Abwassertechnik GmbH) aufzeichnet. Aus der Höhe der Wassersäule kann anhand von Wehrformeln Durchfluss bestimmt werden.

Die Kalibrierung erfolgte gegen Messungen mittels Schwebekörper-Durchflussmessern. Dabei wurde der Bereich von 6 – 21 L/h mit 6 Messwerten im Abstand von jeweils 3 L/h und der Bereich von 60 – 600 L/h mit 12 Messwerten im Abstand von 50 L/h abgedeckt. Nach dem Einstellen des Durchflusses am Schwebekörper-Durchflussmesser wurde der Druck sekundlich gemessen und über zwei Minuten gemittelt, um Wertepaare von eingestelltem Durchfluss und gemessener Wassersäule zu erhalten.

Neben der Unsicherheit bei der Druckmessung findet durch den Einbau des Probenahmekorbs in den Straßenablaufschacht eine Verzögerung des Abflusses statt, der entsprechend des Aufbaus nicht an der Geländeoberkante, sondern unterhalb des Probenahmekorbs gemessen wird. Die Verzögerung wird zum einen durch die Siebe selber, zum anderen durch den sich bildenden Filterkuchen verursacht und führt dazu, dass gegenüber einer Durchflussmessung oberhalb des Probenahmekorbs eine höhere

Abflussdauer und ein niedrigerer Abfluss gemessen wird. Abgesehen von der höheren Messunsicherheit bei kleinen Durchflüssen hat diese Verzögerung auf das gemessene Gesamtvolumen jedoch keine Auswirkungen.

Notüberlauferkennung

Im Falle eines Verstopfens staut der Probenahmekorb über und der Straßenablauf läuft über die im Oberteil des Probenahmekorbs befindlichen Notüberlaufsöffnungen in den Straßenablaufschacht. Da in diesem Fall keine repräsentative Probenahme mehr gegeben ist, ist in einer der Öffnungen eine Leitfähigkeitssonde installiert, die den Überlauf anhand der Leitfähigkeit des beprobten Straßenablaufs registriert. Da die Leitfähigkeitssonde außer im Fall des Überlaufens nicht ins Wasser eintaucht, ist beim Überlauf ein deutlicher Anstieg der Leitfähigkeit messbar. Entsprechend sind die umweltbedingten Schwankungen der Leitfähigkeit von Straßenablauf für die Erkennung des Notüberlaufs nicht relevant.



(a) Einbauvorrichtung der Leitfähigkeitssonde



(b) Position der Sonde in Notüberlaufsöffnung

Abbildung 37: Leitfähigkeitssonde zur Notüberlauferkennung

Die Leitfähigkeit wird über ein MLog aufgezeichnet, dass die Leitfähigkeitsmessung über eine ISM[®] Schnittstelle registriert. Im Falle des Überschreitens eines voreingestellten kritischen Wertes kann vom MLog ein Alarm per Email oder SMS versendet werden und die Messung ggf. verworfen werden.

Regen- und Windmessung

Zusätzlich zu den im Probenahmekorb verbauten Messgeräten wurden Wind und Niederschlag – im Speziellen Regen – gemessen. Die Regenmessung erfolgte über einen Regenschreiber (Modell *OTT WAD 200*, Fa. *Ott*), der auf dem Gelände des Technologie- und Innovationsparks Berlin (*TIB*) gegenüber des TUB Siwawi installiert wurde. Der Regenschreiber besteht aus einem Auffangbehälter und einem Kipp-Waagen-System, das die Niederschlagsmenge- und Intensität misst. Während der Regenschreiber verschiedene digitale Schnittstellen hat, wurde er im Projekt über die Anlogschnittstelle betrieben, um eine Datenaufzeichnung über ein ORI MLog zu ermöglichen. Auf diesem Weg wurde ein Einspeisen der Regendaten in das ORI-MCloud-System ermöglicht. Dabei wurde das Signal des Regenschreibers alle 20 s aufgezeichnet. Die Windmessung erfolgte über ein Schalen-Anemometer. Da das Messgerät ebenfalls auf dem TIB-Gelände installiert wurde, ist eine Auswertung der Windrichtung nicht sinnvoll, die Messung der Windgeschwindigkeit diente als orientierende Messung für beprobten Standorte im Stadtteil Berlin Wedding. Die eigenen Messungen wurden mit den Wind- und Regenmessungen der Wetterstationen Berlin Tegel und Berlin Dahlem im Projekt abgeglichen und ergänzt.

II.1.1.4. Analytische Bewertung der Methodik und Routineanalytik

II.1.1.4.1. Probenvorbereitung Umweltproben

Die Probenvorbereitung im Berichtszeitraum erfolgte nach dem in Abbildung 2 aufgeführten Schema:

Ein Prüfplan wurde vor Bearbeitungsbeginn der jeweiligen Probe festgelegt, Anpassungen und Änderungen wurden dokumentiert.

Die genaue Abfolge der Probenvorbereitung konnte variieren und war abhängig von der Probenmatrix. Bei geringen Anteilen an Organik wurde auf eine enzymatische und/oder oxidative Behandlung verzichtet oder diese reduziert. Die eingesetzte Menge sollte repräsentativ für die gesamte Probe sein, aber nicht >5 g je Fraktion. Probe die mehr als 5 g enthielten wurden mit einem Riffelteiler geteilt. Eine mechanische Beanspruchung der Probe insgesamt ist zu vermeiden.

Maßnahmen und Methoden zur Reduzierung von Kontaminationen:

- Baumwollkleidung: Kittel/ Mund-Nasen-Schutz (keine Fleece-Kleidung)
- Kunststoffe substituieren (Glas/ Metall): Verbrauchsmaterialien aus Thermoplasten (Analyt) werden durch andere Materialien wie Glas oder Metall ersetzt.
- Kunststoffe verwenden, die in der Umwelt selten vorkommen: spezielle Kunststoffe (z.B. Teflon)
- Lösungen filtrieren: Alle eingesetzten Lösungen werden vor dem Einsatz filtriert (< 0,45 µm)
- Laborgefäße reinigen und geschlossen halten und abdecken (Glas/ Metall): Laborgeräte/Glaswaren vor dem Einsatz mehrfach mit filtriertem Reinstwasser reinigen
- Reinhaltung der Laborluft, z.B. durch Filtration und oder Laborschleuse; Partikeleintrag von außen vermeiden
- optional: Verwendung von LaminarFlow-Boxen für Arbeitsschritte bei denen die Probengefäße geöffnet werden (z.B. Filtration, Überführen). Während der Probenvorbereitungsschritte sind die eingesetzten Probengefäße nur solange zu öffnen, wie es für den jeweiligen Schritt (z.B. Überführen oder Filtration) notwendig ist. Zwischen den Schritten oder bei Unterbrechungen sind alle Glaswaren geschlossen zu halten, z.B. durch den Einsatz von Glasstopfen oder Aluminiumfolie.

Materialien

Chemikalien

Technische Enzyme: Cellulase

Millipore H₂O

H₂O₂ (30%ig)

Natriumacetat

HCl konz.

Hellmannex

CHCl₃

Reagenzlösungen

Filtration von Flüssigkeiten:

NaAC-Lösung

Um den Eintrag von Mikroplastik durch Reagenzien, Chemikalien und Lösemittel in den

Probenvorbereitungsprozess zu minimieren, wurden alle Lösungen über einen 0,45 µm-Membranfilter filtriert.

Analysengeräte

Analysenwaage; Laborwaage; Siebturm; Laminar-Flowbox; Filtrationsleiste mit Zubehör; Ionisator; diverses Verbrauchsmaterial

Probenlagerung

Die Lagerung vor Aufbereitung der Proben erfolgte wie folgt:

- wässrige Proben: Kühlraum
- trockene Proben: Raumtemperatur

Durchführung

Fotodokumentation

Nach Eingang der registrierten Proben im Labor erfolgte eine Fotodokumentation unter Zuhilfenahme der Fotobox und einer Größenskala als Hintergrund.

Reinigung der Laborgefäße

Alle Laborgefäße und -geräte die im Rahmen der Analytik eingesetzt wurden, wurden vor der Nutzung gründlich gereinigt. Im Anschluss wurden sämtliche Geräte unter der Flowbox mindestens 5x mit partikelfreiem Wasser (gefiltert) nachgereinigt. Die sauberen Gefäße wurden abschließend mit Alufolie verschlossen und im Trockenschrank getrocknet.

Extraktion der Reifenabrieb-Partikel

a) Probenahme (aufgeteilt nach Matrix):

Kehricht/ Sedimente:

- vor einer Trocknung und /oder Siebung Entnahme von großen organischen Resten, z.B. Laub; etwaige Anhaftungen abklopfen
- Siebung: Einwaage max. 500gr
- zur Probenvorbereitung Einwaage max. 5g verwenden. Bei Proben >5g Riffelteiler einsetzen

Nass-Schlammfang:

- Nasssiebung (größte zu messende Fraktion) der kompletten Probe
- Entnahme von großen organischen Resten, z.B. Laub; etwaige Anhaftungen abspülen
- Trocknung
- Zur Probenvorbereitung max. 5g verwenden. Bei Proben >5g Riffelteiler einsetzen

b) Trocknung:

Die Trocknung erfolgte bei maximal 70°C im Trockenschrank.

Bestimmung Masse/ Volumen der Laborprobe

c) Überführung der Proben zwischen den Schritten (Siebung/ Filtration):

Zur Extraktion der Partikel aus den Flüssigkeiten wurden Analysesiebe der jeweiligen Fraktion verwendet.

Fraktionierung

Die Aufteilung der Proben in unterschiedliche Größenklassen ist vorteilhaft im Hinblick auf weitere Aufbereitungsschritte und das anschließende Detektionsverfahren. Die Siebfractionen erfolgten gemäß Tabelle 11 für thermoanalytische Detektionsverfahren.

Tabelle 11: Partikelgrößenklassierung

Partikelgrößenklassen/ μm	500-100	100-50	50-20
--------------------------------------	---------	--------	-------

Siebung:

Im Rahmen des gesamten Probenvorbereitungsprozesses wurde zur Volumenreduktion eine Siebung durchgeführt. Die Siebgrößen wurden nach der unteren Grenze der Fraktion gewählt.

d) Dichteseperation

Die Laborprobe wurde mittels Glastrichter in einen Immhoftrichter überführt und mit einem Lösungsmittel eine Suspension zur Dichteseperation hergestellt. Die Probengefäße wurden generell mit Alufolie abgedeckt.

e) Oxidativer Aufschluss mit H_2O_2

f) Enzymatischer Aufschluss mit Cellulase

g) Filtration

II.1.1.4.2. Detektion Umweltproben

Materialien

Chemikalien

Ethanol absolute

Trineso- BUNA™ SB 1500-SCHKOPAU

Kühlmittel Pyrolyse-GC/MS.

Analysegeräte

- Pyrolyse-GC/MS, bestehend aus:
 - Gaschromatograph 7890B (Gerstel)
 - Massenspektrometer G7077B (Agilent Technologies)

Pinzette aus Metall; Quarzwatte; Analysenwaage; Ionisator; Pyrolyse; Röhrchen aus Quarzglas; Pyrolyseröhrchenhalter; diverses Verbrauchsmaterial

Durchführung

Probenvorbereitung

Die zu untersuchende Probe lag in Form von Partikeln auf einem PC- Filter vor. Das Probenmaterial wurde repräsentativ in Pyrolyse-Röhrchen überführt.

Reinigung der Utensilien

Extraktion der Partikel vom Substrat

Pyrolyse-GC/MS

Allgemeines: Die Probe wird in einem Pyrolysator thermisch fragmentiert. Anschließend werden diese durch eine GC-Säule und ein Temperaturprogramm getrennt und am Detektor analysiert. Als Detektor wurde ein Massenspektrometer mit Quadrupol verwendet. Die qualitative und quantitative Auswertung erfolgte durch die MassHunter Software. Dabei wurden die Komponenten in einer Probe qualitativ bestimmt und quantitativ über die Fläche ausgewertet.

Kalibrierung:

Die Kalibriergerade wurde mit dem Referenzmaterial Trineso- BUNA™ SB 1500-SCHKOPAU erstellt. Dazu wird die Kalibriersubstanz in Chloroform gelöst und analog zu Tabelle 12 verdünnt. Anschließend wird ein spezifisches Volumen in ein Pyrolyse-Röhrchen pipettiert und im Trockenschrank getrocknet. Mit einer internen Methode wurde die Kalibrierung analysiert. Als Zielfragment wurde die Massenzahl 54 des Vinylcyclohexens ausgegeben (siehe Norm ISO-TS 21396). Es erfolgten für jeden Kalibrierpunkt Dreifachmessungen.

Tabelle 12: Ansatz einer Kalibrierung

Kalibrierpunkt	Masse SBR 1500 entsprechend der Verdünnung [µg]
1	0,2
2	0,5
3	1
4	2
5	5
6	9
7	25
8	50
9	75
10	100

Aus den Signalflächen und den Einwaagen des SBR 1500 ließ sich eine Kalibrierkurve erstellen, die für die Quantifizierung herangezogen wurde.

Messung:

Die Messung des Probenmaterials erfolgte mit einer internen Methode, die über die MassHunter-Software eingeladen wurde. Die bereits platzierten Proben wurden nochmals auf mögliche Verunreinigungen oder falsch Positionierungen überprüft. Über die Software wurde die Position des Pyrolyse-Röhrchens im Tray, der Daten Speicherort und der Probenname angegeben. Nach dem Starten der Messung erfolgten die Messung vollautomatisiert.

Qualitätssicherung:

Anhand der Referenzstandards und der Tunes wurde die Empfindlichkeit der Pyrolyse-GC/MS überprüft. Bei Abweichung der in Tabelle 13 aufgeführten Werte, nach eigenen festgelegten Vorgaben, in den Tunes erfolgte je nach Störung der Pyrolyse eine Quellenreinigung, Reinigung des Massenspektrometers oder Austausch von Verschleißteilen, wie z.B. den Austausch der Säule.

Tabelle 13: Tune-Werte mit festgelegten Massen und Empfindlichkeiten

Actual m/z	Abund	Rel Abund	Pw50
69.00	452,727	100.0%	0.60
218.90	499,896	110.4%	0.56
501.90	20,252	4.5%	0.64

Verfahrenskenndaten:

Nachweisgrenze und Bestimmungsgrenze für die Methode zur Messung von SBR/BR in Umweltproben wurde mittels der Leerwertmethode ermittelt.

Die Linearität wurde anhand der Kalibriergerade überprüft. Für die Mehrpunktkalibrierung wurden mindestens sechs Punkte ausgewählt und grafisch in der Form einer Regressionsgleichung aufgetragen. Anhand des Bestimmtheitsmaßes $R^2 > 0,95$ wurde die Aussage getroffen, dass eine Linearität gegeben war.

Blindwerte:

Aufgrund von Matrixeffekten entstanden hohe S/N-Verhältnis. Somit wurden vor jeder Messung der Blindwert überprüft. Der Blindwert wurde vom Spektrum abgezogen.

Überprüfung der Präzision:

Bei jeder Messung wurde die Standardabweichung ermittelt. Da jede Probe dreimal gemessen wurde, wurde eine Standardabweichung ermittelt. Sobald die Standardabweichung mehr als 10% betrug, wurde die Probe mit fünf Messungen wiederholt.

Überprüfung des Gesamtverfahrens:

Das Gesamtverfahren zur Analyse von SBR/BR in Umweltproben wurde durch das Referenzmaterial Trineso- BUNA™ SB 1500-SCHKOPAU überprüft. Die Chromatogramme wurden anhand der Datenbank und Literatur abgeglichen. Sobald ein Chromatogramm Auffälligkeiten aufwies, wie z.B. fehlende signifikante Peaks oder ein zu großes Rauschen, wurde die Messung nicht durchgeführt und die Pyrolyse-GC/MS auf gerätetechnische Fehler untersucht und dokumentiert.

Berechnung:

Die Berechnung des SBR/BR-Gehalts erfolgte nach:

$$\text{Formel I: } m(\text{SBR/BR auf Filter in } \mu\text{g}) = \frac{m(\text{SBR/BR aus Geradengleichung in } \mu\text{g})}{m(\text{Einwaage Pyrolyse in mg})} * m(\text{Filter in mg})$$

$$\text{Formel II: } m(\text{SBR/BR in } \frac{\mu\text{g}}{\text{g}} \text{ oder } \mu\text{g/L}) = \frac{m(\text{SBR/BR auf Filter } \mu\text{g})}{m(\text{Einwaage Probe g oder L})}$$

Die Ergebnisse wurden je nach vorliegender Probe fest oder flüssig in SBR/BR [$\mu\text{g/g}$] oder SBR/BR [$\mu\text{g/L}$] angegeben. Dabei wurde das Ergebnis auf zwei Nachkommastellen angegeben.

Die Bestimmungsgrenze lag bei: $< 0,01\mu\text{g/g}$ bzw. $\mu\text{g/L}$

II.1.1.4.3. Detektion Partikelgrößenverteilung mittels Lichtmikroskopie

Materialien

Analysegeräte

- Raman-Mikroskop
- Diverses Verbrauchsmaterial

Durchführung

Die zu untersuchenden Partikel lagen entweder in Lösung vor und wurden durch Filtration auf ein Substrat abgeschieden oder im Rahmen der Luftmessungen (vgl. Kapitel II.1.3.4) bereits auf Substrate vor.

Die Proben des Partners Continental wurden in Lösung zur Verfügung gestellt. Wenige ml wurden mittels Vakuum-Filtration auf einen Goldkernporenfilter abgeschieden und getrocknet. Eine Überbelegung des Filters wurde vermieden.

Der gesamte Filterbereich wurde vollständig mit dem Mikroskop erfasst und per Software bzgl. der Partikelgrößenverteilung ausgewertet. Eine spektroskopische Identifizierung von Reifenabriebpartikel ist mittels Raman nur bedingt möglich und nicht für eine Massanalytik geeignet.

Die Untersuchungsergebnisse sind in Kapitel II.1.1.4.4 aufgeführt.

II.1.1.4.4. Untersuchungsergebnisse

Bestimmung der SBR/BR Gehalte in verschiedenen Umweltproben für den Partner TUB

Die Proben wurden gemäß Kapitel II.1.1.4.1 vorbereitet und gemäß Kapitel II.1.1.4.2 analysiert.

Tabelle 14 zeigt eine Übersicht der Probenanzahlen je Probenart. Jeweils wurden drei Fraktionen analysiert.

Tabelle 14: Übersicht Proben

Probenart	Probenanzahl	Probenanzahl Fraktionen (20-50/50-100/100-500)
Fegungen (Kehrichtproben:Tagesfegung und Querfegung)	62	186
PNK (Probenahmekorb) insitu	7	21
PNK (Probenahmekorb) künstlich	9	27
NSF (Nassschlammfang)	9	27
Halensee	5	15

Abbildung 38 zeigt eine Übersicht Mittelwerte SBR-BR Gehalte pro Fraktion je Standort in mg SBR-BR/g am Beispiel von Straßenkehrriecht.

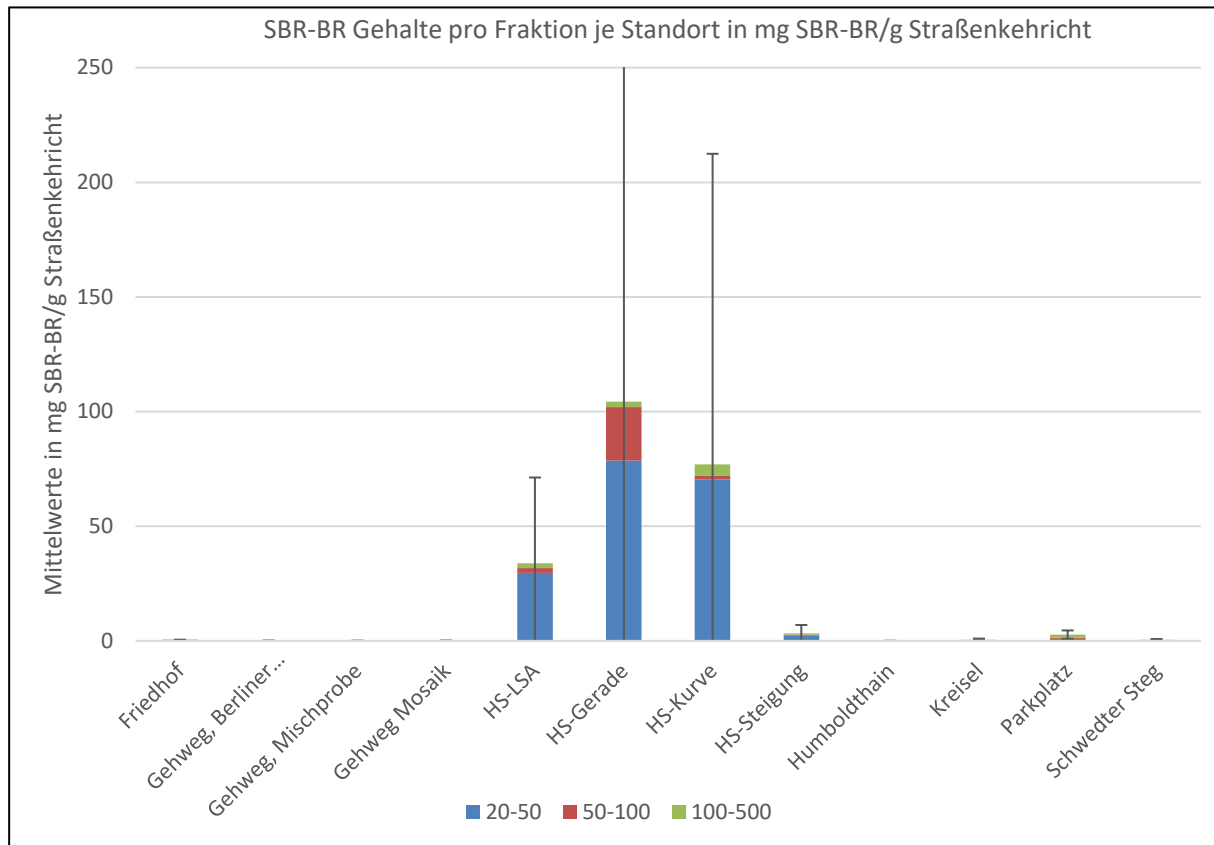


Abbildung 38: Mittelwerte SBR-BR Gehalte pro Fraktion je Standort in mg SBR-BR/g Straßenkehrriecht.

Die weiteren Untersuchungsergebnisse sind im letzten Zwischenbericht aufgeführt (Prüfberichtsnummer: CAL21-057552-1, CAL21-057791-1, CAL21-057887-1, CAL21-057904-2, CAL21-058527-1, CAL21-058558-1, CAL21-058563-1, CAL21-058585-1, CAL21-058649-1, CAL21-058709-1, CAL21-058722-1, CAL21-058732-1, CAL21-058759-1, CAL21-058834-1, CAL21-058855-1, CAL21-059599-1, CAL21-059605-1).

Die Ergebnisse wurden dem Partner TU Berlin zur weiteren Interpretation zur Verfügung gestellt

Bestimmung der SBR/BR Gehalte für den Partner Sieker

Die Proben wurden gemäß Kapitel II.1.1.4.1 vorbereitet und gemäß Kapitel II.1.1.4.2 analysiert. Insgesamt wurden 16 Proben mit je drei Fraktionen untersucht.

Die Untersuchungsergebnisse sind im letzten Zwischenbericht aufgeführt (Prüfberichtsnummern: CAL20-168224-1, CAL20-168949-1, CAL20-168962-1, CAL20-168964-1, CAL20-168965-1, CAL20-168970-1, CAL20-168981-1, CAL20-168982-1, CAL20-168985-1, CAL20-168997-1, CAL20-168999-1, CAL20-169009-1, CAL20-169020-1, CAL20-169021-1, CAL20-169032-1, CAL20-169044-1). Insgesamt wurden 16 Proben mit je 3 Fraktionen analysiert.

Die Ergebnisse wurden dem Partner Sieker zur weiteren Interpretation zur Verfügung gestellt.

Partikelgrößenverteilung mittels Lichtmikroskopie

Proben Partner Continental:

Die Proben wurden gemäß Kapitel II.1.1.4.3 vorbereitet und analysiert. Die Proben wurden durch Abriebversuche an einem Prüfstand sowie auf der Teststrecke AIBA gewonnen. Abbildung 39 zeigt die Partikelgrößenverteilung der Abriebversuche.

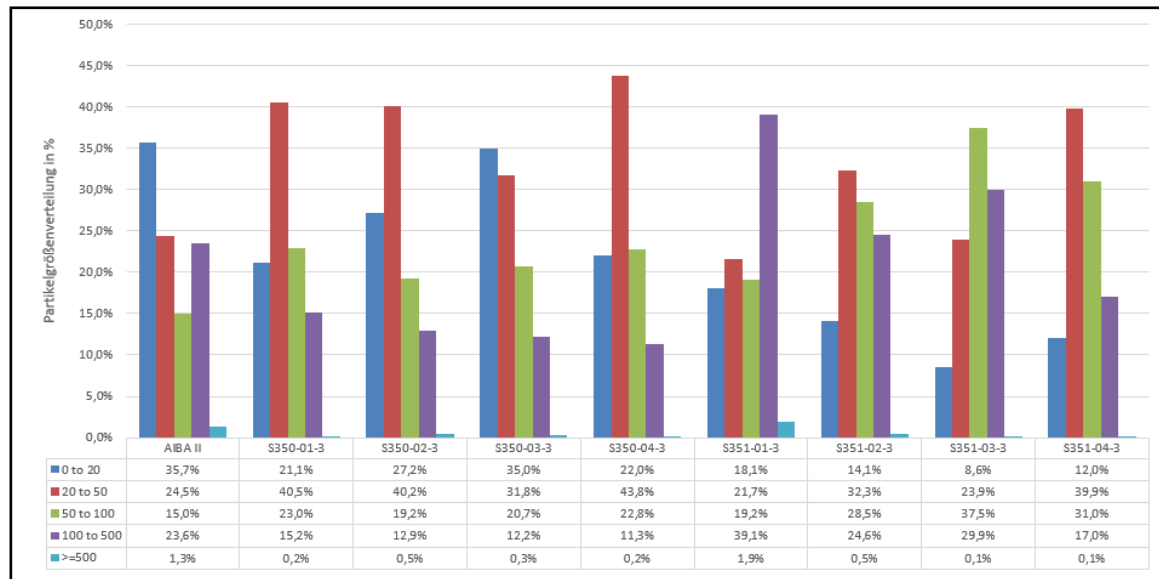


Abbildung 39: Untersuchung der Partikelgrößenverteilung von Prüfstandproben.

Die Ergebnisse wurden dem Partner Continental zur weiteren Interpretation zur Verfügung gestellt.

Untersuchungen PAK in Nassschlammfang

Erste orientierende Untersuchungen (LC/MS) des Nassschlammfanges (18-159156-01-1) auf PAK ergaben keine signifikant hohen Werte:

Tabelle 15: Übersicht PAK-Gehalte

Parameter	Ergebnis [$\mu\text{g/L}$]	Parameter	Ergebnis [$\mu\text{g/L}$]
Naphthalin	<0,2	Benzo(a)anthracen	<0,2
Acenaphylen	<0,2	Chrysen	<0,2
Acenapthen	<0,2	Benzo(b)fluoranthen	<0,2
Fluoren	<0,2	Benzo(k)fluoranthen	<0,2
Phenanthren	0,03	Benzo(a)pyren	<0,2
Anthracen	<0,2	Dibenz(ah)anthracen	<0,2
Fluoranthen	<0,2	Benzo(ghi)perylen	<0,2
Pyren	<0,2	Indeno(1,2,3-cd)pyren	<0,2

Vergleich Staubsaugen/ Kehren

In Zusammenarbeit mit dem Partner Continental sollte eruiert werden, welche Probenahmetechnik geeignet ist. Dazu wurden Proben aus Kehrung und mithilfe durch Staubsaugen untersucht.

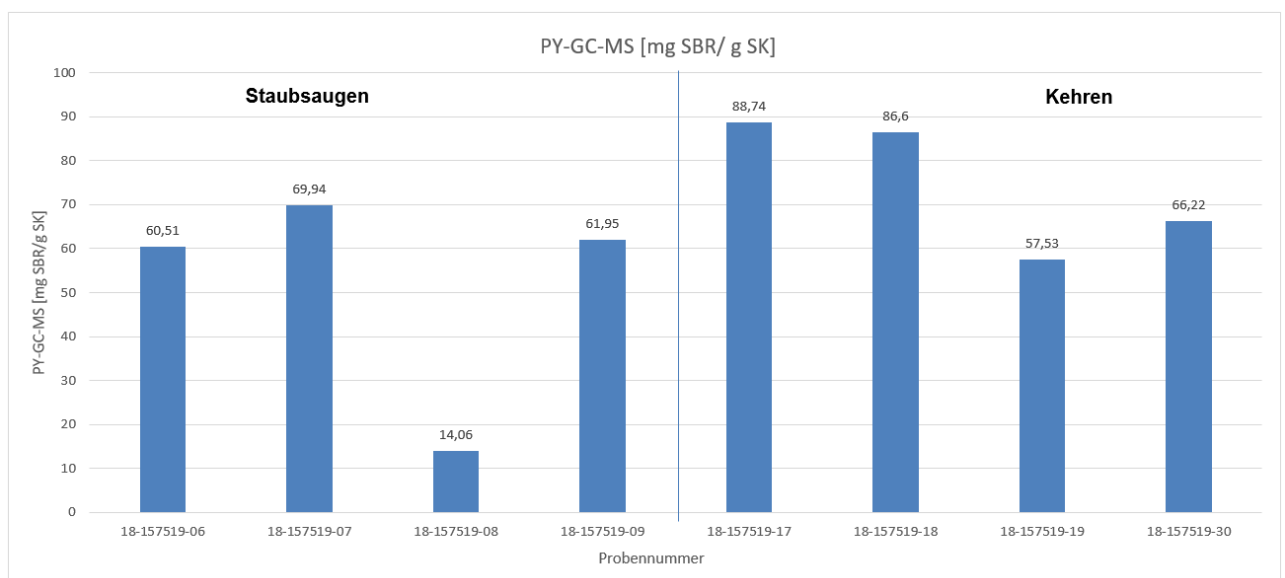
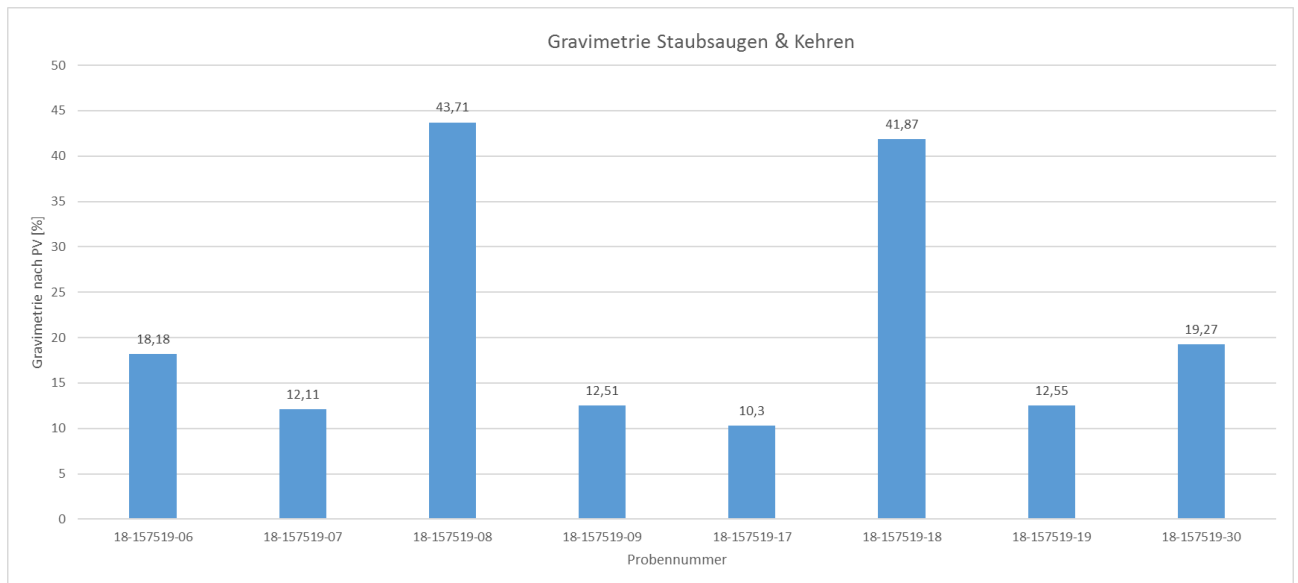


Abbildung 40: Gegenüberstellung Kehren/ Staubsaugen (Gravimetrische Auswertung und Bestimmung SBR-Gehalt).

Die Untersuchungen zeigten, dass die SBR-Gehalte beim Kehren höher lagen als beim Staubsaugen. Diese bessere Aufnahme des Gesamtkehrrechts konnte auch in Kapitel 1.1.2.3 Probenahmearten, „Fegen vs Saugen“, gezeigt werden.

Eine weitere Abschätzung der Effektivität kann hier nicht getroffen werden.

II.1.2. Nutzungsphase Lebenszyklus Reifen (Emission)

II.1.2.1. Produktion, Nutzung, Recycling/ Verwertung/Entsorgung

Die beiden Fachgebiete der TUB, Reibung und Siwawi, haben gemeinsam mit dem Projektpartner Continental relevante Literatur und bestehende Daten bezüglich des Lebenszyklus Reifen ausgewertet. Dafür wurden rund 90 Literaturstellen recherchiert und katalogisiert.

Im Vordergrund stand immer wieder die Frage, inwiefern Zahlen und Daten in den letzten Jahren Veränderungen unterlegen waren durch technologische Fortschritte oder geänderte Nachfrage.

In der Entwicklungs- und Produktionsphase konnten keine nennenswerten Mengen emittierter Reifenpartikel ermittelt werden und scheinen vernachlässigbar zu sein.

Die Umweltexposition findet vermutlich ausschließlich in der Nutzungsphase statt. In Deutschland gibt es aktuell 47,7 Mio. gemeldete PKW (Statista, 2019). Die Gesamtabriebsmengen in Deutschland können auf der Basis der jährlichen Kilometerleistung des Kraftfahrbundesamtes (Aufschlüsselung nach Fahrzeugart (Kraftfahrbundesamt, 2016)) und der spezifischen Abriebsmenge pro km (Peano, et al., 2020) (Strauch, 2018) berechnet werden. Daraus ergibt sich eine geschätzte jährliche Menge von 95.546 – 106.840 t für 2019.

Auf Basis der ermittelten Daten Literaturdaten kommt man für den europäischen Raum zu einer klaren Aussage: Der massenmäßig allergrößte Teil des Reifens fällt am Lebensende als Altreifen an, wird in dieser Form in aller Regel verwertet und gelangt nicht in die Umwelt. Dies hängt damit zusammen, dass europaweit effektive Mechanismen zur Altreifenrückführung installiert sind. Die Verwertungswege und die Veränderung der entsprechenden Anteile seit 1996 sind in Abbildung 41 dargestellt

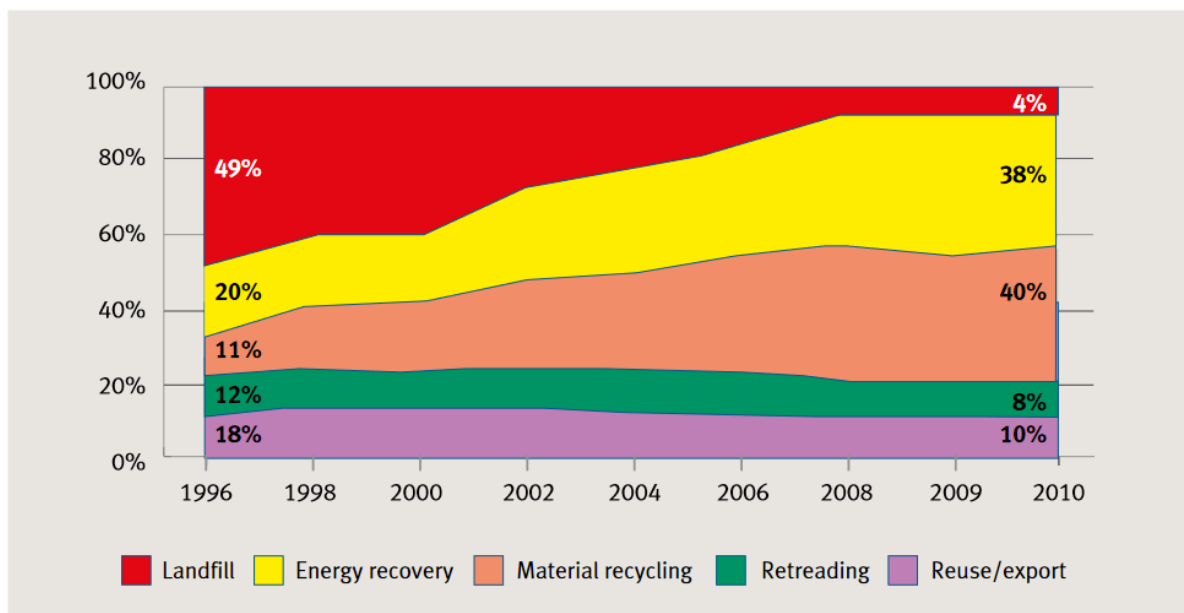


Abbildung 41: Entwicklung der Entsorgungswege von Altreifen von 1996 bis 2010 (ETRMA, 2011)

II.1.2.2. Identifizierung der Einflussgrößen in der Nutzungsphase

Die Projektpartner TUB FG Reibung und Continental mit Unterstützung von TUB FG Siwawi, ADAC, VW, IPS haben intensiv an der Identifizierung der Einflussgrößen in der Nutzungsphase gearbeitet. In

diesem Arbeitspaket konnten entscheidende Erkenntnisse zu den Einflussgrößen auf die Emission während der Nutzungsphase gewonnen werden.

Als Ausgangspunkt wurde aus dem Erfahrungsschatz von Continental die Experteneinschätzung zu wichtigen Einflussfaktoren übernommen. Abbildung 42 zeigt diese Einschätzungen, die sich getrennt nach PKW und LKW geringfügig unterscheiden.

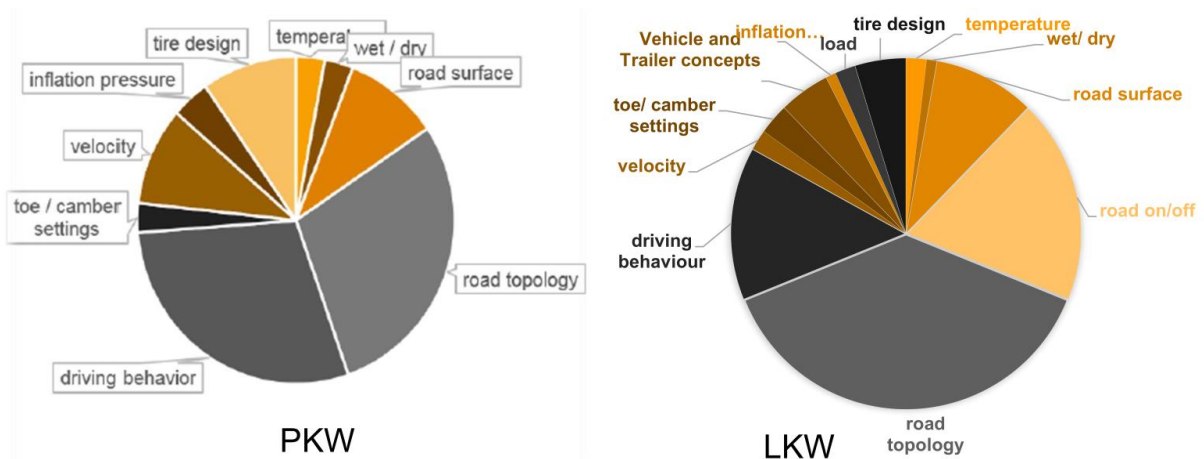


Abbildung 42: Einflussfaktoren auf die Reifenlebensdauer nach Erfahrung und Experteneinschätzung durch Continental

Im Austausch mit den Projektpartnern und den assoziierten Partnern wurde das Thema weiter erörtert. Als relevante Größe wurde die Emissionsrate von Reifenmaterial je gefahrener Strecke ermittelt. Diese beträgt im groben Mittel 100 µg/m für einen PKW. Nach einstimmiger Einschätzung kann die Größe, in Abhängigkeit der Einflussfaktoren, extrem stark variieren. Diese wurden zunächst grob kategorisiert in

- Fahrzeugspezifische Einflussfaktoren (FZS)
- Fahrsituationsspezifische Einflussfaktoren (FSS)

So gehört z.B. der Reifendruck zu den fahrzeugspezifischen Faktoren (FZS), während die aktuelle Fahrgeschwindigkeit und der Kurvenradius zu den fahrsituationsspezifischen (FSS) Faktoren gehören.

Für die Ermittlung von Hotspots und den Vergleich der Messstellen im Projekt sind lediglich die FSS-Faktoren ausschlaggebend. Die an einem konkreten Hotspot emittierte Reifenmasse ergibt sich aus der Gesamtsumme verschiedenster Fahrzeuge, die diese Stelle passiert haben. Die FZS-Faktoren hingegen beziehen sich auf ein konkretes Fahrzeug, und die von ihm emittierte Masse ergibt sich aus der Gesamtsumme über verschiedenste Fahrsituationen. Die FZS-Faktoren sind z.B. in Verbraucherzeitschriften dokumentiert und Gegenstand der meisten vergleichenden Reifenverschleißtests. Sie sind allerdings nicht geeignet um eine Straßensituation zu bewerten. Es wurde daher folgerichtig vereinbart, den Projektfokus auf die fahrsituationsspezifischen Faktoren zu legen. Eine Kategorisierung dieser wurde vom Fachgebiet Reibungsphysik vorgeschlagen und im Projektkonsortium verfeinert. Sie ist in Abbildung 43 dargestellt.

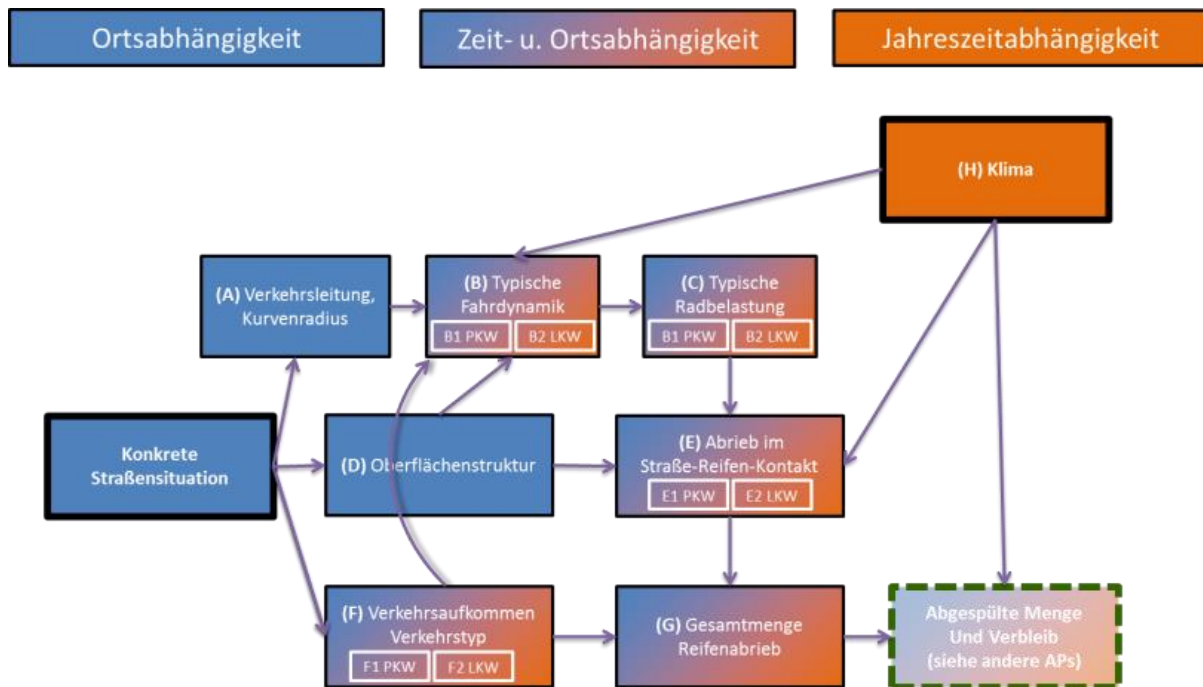


Abbildung 43: Einteilung der fahrsituationsspezifischen Einflussfaktoren

Für die Bestimmung der makroskopischen, fahrsituationsspezifischen Faktoren wurde vom FG Reibungsphysik zunächst eine Sichtung der Literatur vorgenommen. Dabei konnten folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

- Literatur zu FSS-Faktoren ist nur spärlich vorhanden
- Direkte Tests an Reifen sind technisch schwierig. Wird ein Reifen beispielweise nur für eine Kurvenfahrt untersucht, so wird er während des Tests sehr schnell überhitzen.
- Einige makroskopische Faktoren lassen sich mit einfachen Modellen zur Wirkung der dynamischen Kräfte abschätzen.

Analyse der FSS-Einflussfaktoren, mit Ausnahme Oberflächenfeinstruktur

Im weiteren Projektverlauf wurden die Einflussfaktoren detaillierter ausgearbeitet. Ziel war es, die Menge von Reifenabrieb den konkreten Straßenabschnitten anhand der FSS-Faktoren qualitativ zuzuordnen, um Hot-Spots zu identifizieren. Die zentrale Frage ist dabei die Emissionsrate von Reifenmaterial je Strecke. Diese beträgt nach Auswertung verschiedener Literaturangaben im groben Mittel $100 \mu\text{g}/\text{m}$ für einen einzelnen PKW, mit starken Abweichungen im Streckenverlauf. Wenn sie für einen konkreten Straßenabschnitt bekannt ist, kann sie für den jeweiligen Fahrzeugtyp mit der lokal herrschenden Verkehrsdichte multipliziert werden um die dortigen Gesamtemissionen zu erhalten.

Auf Seite der Proben-Analytik war im Projektkonsortium festgestellt worden, dass derzeit der Anteil der schweren Nutzfahrzeuge im Reifenabrieb nicht bestimmt werden kann wegen der unterschiedlichen Zusammensetzung des Reifenmaterials nicht bestimmt werden kann. Gleichzeitig ist festzustellen, dass bezüglich des Verschleißverhaltens von Reifen die Datenlage für PKW ungleich besser ist. Entsprechende Tests und Vergleiche auch zwischen den Herstellern sind verfügbar, teilweise auch systematische Laborversuche bei unterschiedlichen Belastungen. Für LKW Reifen sind derartige Messreihen nicht veröffentlicht und auch auf Herstellerseite weniger üblich. Im weiteren Projektverlauf wurde daher der Fokus auf die Emissionen von PKW gelegt.

Durch das Fachgebiet Reibung wurde zur Unterscheidung der unterschiedlichen Straßensituationen eine semi-empirische Berechnungsansatz vorgeschlagen, die eine Schätzung der kumulierten lokalen Emissionen aus den FSS-Faktoren erlaubt. Die an einer konkreten Straßensituation emittierte Menge Reifenmaterial je Meter Fahrbahn wird demnach abgeschätzt mit

$$V = \Psi \cdot G \left[(1-P) \sqrt{F_{hor,ns}^4 + 49F_{lat}^4} + P \sqrt{F_{hor,s}^4 + 49F_{lat}^4} \right]$$

Die Abschätzung wichtet die auftretenden dynamischen Kräfte F am Fahrzeug in Fahrtrichtung („hor“) und in Querrichtung („lat“), wobei zwischen durchfahrenden Fahrzeugen („ns“) und beschleunigenden bzw. bremsenden Fahrzeugen („s“) unterschieden wird. Die einzelnen Kräfte werden bestimmt nach

$$F_{hor,ns} = \left[0.178 + 14s + \left(\frac{v}{164 \text{ km/h}} \right)^2 \right] \text{kN}$$

Reifenlängskraft, die bzgl. des Fahrzeugs nach vorn wirkt, für Fahrzeuge, die *nicht* beschleunigen.

$$F_{hor,s} = [\pm 1.96 + 0.178 + 14s] \text{kN}$$

ebenfalls Reifenlängskraft, hier für diejenigen Fahrzeuge die anhalten oder beschleunigen.

$$F_{lat} = \left[\frac{2988 \text{ m}}{R} \left(\frac{v}{164 \text{ km/h}} \right)^2 - 14q \right] \text{kN}$$

Reifenquerkraft

Die enthaltenen Größen sind in Tabelle 16 aufgeführt.

Tabelle 16: Eingangsgrößen

Symbol	Größe	Bemerkung
v	Charakteristische Geschwindigkeit	in Kilometer pro Stunde [km/h]
R	Krümmungsradius der Kurve	in Meter [m], ∞ für gerade Strecken
P	Anteil anhaltender oder beschleunigender Fahrzeuge	Als Faktor, z.B. 1 für Stoppschild, 0.25 für Ampel, 0 für Autobahn
s	Steigung	Als Faktor: z.B. 0.03 für 3%-Steigung positiv für bergauf; negativ für bergab
q	Querneigung	Als Faktor: z.B. 0.025 für 2.5%-Regel-Querneigung zur Straßenentwässerung.
G	Gesamtverkehrsaufkommen	in Tonnen [t] z.B. 16000 t für 10.000 PKW je 1.6 t

Aus dieser Abschätzung lassen sich bereits einige Schlüsse ziehen. Zum einen sagt sie Hot Spots voraus, nicht wie ursprünglich angenommen an Steigungen, sondern insbesondere in Kurven. Wichtigster Einzelfaktor ist dabei die Fahrgeschwindigkeit. Eine weitere Erkenntnis ist der wichtige Einfluss der Straßenquerneigung. Sie beträgt im Regelfall 2,5% zum Zwecke der Straßenentwässerung. Für ein ansonsten frei rollendes Fahrzeug führt sie dazu, dass permanent eine Kraft in Querrichtung von den Reifen aufzubringen ist.

Das Modell zur Vorhersage von Hot Spots an lokalen Straßensituationen wurde mit dem Projektpartner Sieker in einer Software umgesetzt und für vielfältige Auswertungen verwendet. Für die beprobten Messtellen des Projekts wurden die relevanten Parameter von Straße und Verkehr ermittelt und in das Modell eingepflegt. Somit konnten Vorhersagen für die erwartete Menge SBR für die Messtellen Lichtsignalanlage (LSA), Kurve, Gerade, Kreisell, Steigung getroffen werden. Mit Bekanntwerden der Messergebnisse der entsprechenden Tagesbefahrungen konnten diese mit den Vorhersagen verglichen werden. Die Identifikation z.B. von Kurve und LSA als Hot Spots entspricht den Vorhersagen. Eine quantitative korrekte Übereinstimmung von vorhergesagten Reifenabriebsmengen und gemessenen SBR-Werten konnte nicht geleistet werden. Die Plausibilität und Streuung der SBR-Messwerte wurden im Konsortium diskutiert.

Das Modell diente ebenfalls der Abschätzungen von Maßnahmen im Maßnahmenkatalog.

Das Modell wurde ebenfalls den Forschern des parallel-laufenden Projekts TyreWearMapping vorgestellt, die es geringfügig abwandeln und vielfach einsetzen.

Es ist zu beachten, dass das Modell nicht die Oberfläche der Straße beinhaltet, obwohl nach allgemeiner Beobachtung der Belagtyp (Asphalt, Beton, Kies,..) und auch der Alterungsgrad der Straßenoberfläche einen Einfluss auf den Reifenverschleiß haben. Wie sich im Projektverlauf herausstellte, sind die entsprechenden Daten zum Straßenbelag in der Regel nicht kartografiert, weshalb sie zur Identifikation von Hotspots nicht herangezogen werden können. Der folgende Abschnitt fasst die Arbeiten zum Einfluss der Straßenoberfläche zusammen.

II.1.2.2.1. Halbempirische Beschreibung des Fahrzeugabriebs

Reifen werden vor allem durch häufiges Beschleunigen, Kurven fahren und Bremsen abgerieben. Ebenfalls höheren Abrieb beobachtet man bei Bergfahrten oder auf Schotterpisten. Auf Straßen, auf denen lange Passagen ohne große Geschwindigkeitsänderung vorherrschen, reiben Reifen eher weniger ab (Autobahnen). Fahrverhalten, Geschwindigkeit, Straßenoberfläche und Straßenführung haben kumuliert einen vielfach höheren Einfluss auf den Reifen (und Straßen-) Abrieb als das Reifendesign.

Die Gesamtmenge des Reifenabriebs für ein Fahrzeug ist proportional zur Exponentialfunktion der Reibenergie, die der Reifen im Kontakt mit der Fahrbahn freisetzt.

$$WearRate\left[\frac{g}{m}\right] = \alpha FE^\beta$$

Die Reibenergie setzt sich als die Summe aller Komponenten zusammen, die Komponenten jeweils als Produkt von Schlupflänge und Reibkraft. Die unbekannte Schlupflänge wird durch die Schlupfsteifigkeit ersetzt. Diese ist meßtechnisch zugänglich bzw. kann gut abgeschätzt werden.

$$FE = slip \times Force = \frac{Force}{slip \ stiffness} \times Force = \frac{Force^2}{slip \ stiffness}$$

Für die Formulierung der Abriebsmenge werden die Parameter alpha und beta eingeführt, welche Reifen- bzw. Fahrbahnspezifisch sind. Der Faktor q entspricht der Verkehrsdichte.

$$V_{driven} = \alpha \cdot q \cdot \left[\left[\frac{F_{x,Drive}}{2} \right]^2 + \left[\frac{F_{x,Brake}}{4} \right]^2 + K \left[\frac{F_Y}{4} \right]^2 \right]^\beta$$

Dieser Ansatz basiert auf der Auswertung von Abriebtests. Die Parameter Vorfaktor und Verhältnis lateral/horizontal werden mit zwei Datensätzen separat bestimmt. Dazu wurden Versuche mit einem Front-getriebenen Fahrzeug und den Reifen ContiPremiumContact™ 2, Size 205/55 R16 durchgeführt. Um einen geeigneten Datensatz zu erzeugen, wurden unterschiedliche Fahrmodi gewählt: High lateral / High longitudinal / Medium.

Tabelle 17: Abriebtests

Requirements	High lateral	High longitudinal	Medium
Roundabout	47/55 km/h	30 km/h	40 km/h
Acceleration	Soft (cruise control)	Strong 2. Gear	Standard
Braking	Soft Engine brake forward-looking	Strong	Standard

Die Versuche führten zu folgenden Testergebnissen:

- Starker Abrieb wird durch große laterale Kräfte verursacht
- Vergleichsweise große longitudinale Kräfte führen nur zu einer leichten Erhöhung der Abriebrate

Für das Modell wurden mit einer Best Fit Algorithmus die Parameter alpha und beta ermittelt. Das Bild unten zeigt die Ergebnisse. Test und Modell stimmen hervorragend überein.

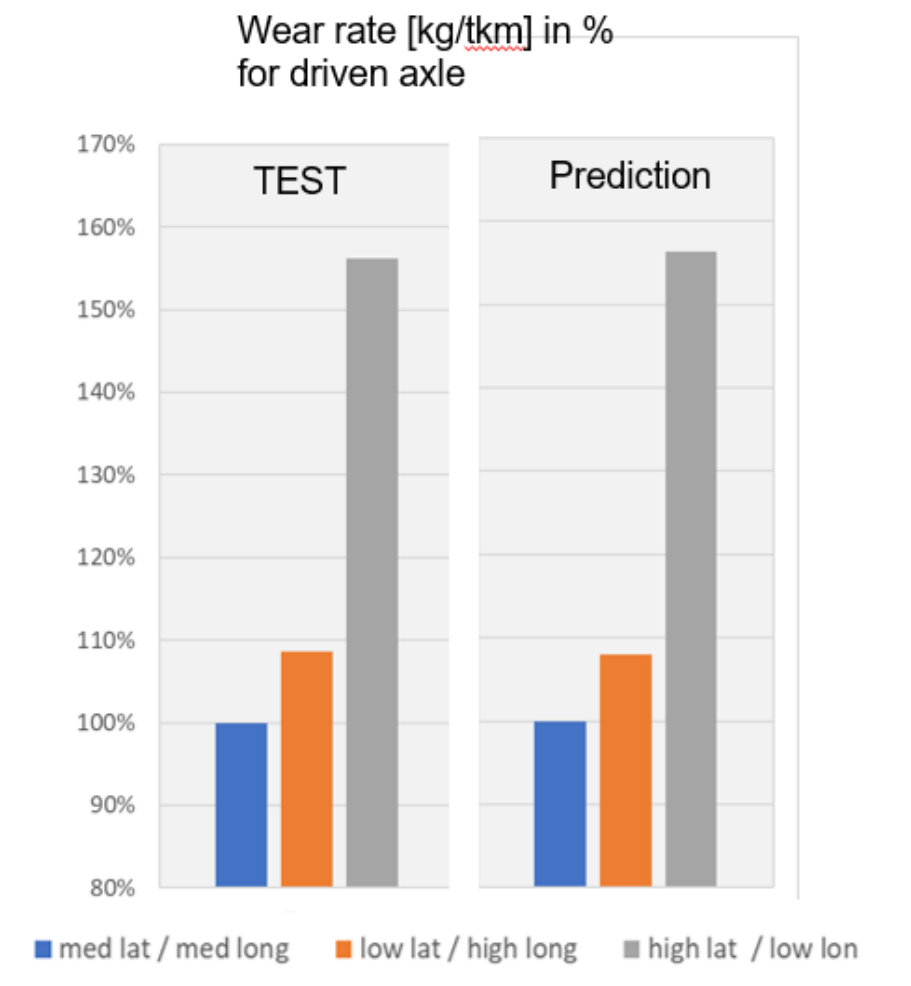


Abbildung 44: Abriebsraten

II.1.2.3. Labor Prüfstand Abrieb

Das FG Reibungsphysik stand dem Partner Continental bei der Durchführung der Laborversuche zur Verfügung. Es wurden Verschleißversuche gefahren mit verschiedenen Gummisorten auf kreisförmiger Asphaltbahn (Grosch). Im Projektzeitraum konnten auf diese Art Proben generiert werden, die teilweise an den Projektpartner WESSLING versandt wurden. Das Fachgebiet Reibung hat darüber hinaus einen Probensatz in Empfang genommen nebst zugehöriger Asphaltoberfläche für die konkrete Nachbildung im numerischen Teilchenmodell.

Das FG Reibungsphysik beteiligte sich an der Auswertung der Abriebsversuche die vom Partner Continental durchgeführt wurden. Es standen dabei die Laborversuche im verkleinerten Maßstab im Mittelpunkt. Es wurden Partikelgrößenverteilungen ermittelt und verglichen mit denen aus der Literatur und aus den vorrausgegangenen Fahrversuchen am Bremsprüfstand. Dabei wurde festgestellt, dass sich die Partikelgrößenverteilungen trotz der unterschiedlichen Größe der beteiligten Prüfkörper nur unwesentlich unterscheiden.

Für die Forschung an Abriebspartikeln bedeutet das, dass auch kostengünstige Laborversuche im kleinen Maßstab geeignet sind, um Reifen miteinander vergleichen zu können bezüglich ihrer Partikelwirkung.

Am FG Reibungsphysik wurden darüber hinaus die Oberflächen der verwendeten Asphaltproben in 3D vermessen und die charakteristischen Oberflächenwerte bestimmt. Dies geschah nicht nur zu Dokumentationszwecken sondern ebenso, um vergleichende Simulationsrechnungen durchführen zu können.

Tabelle 18 zeigt 3D Darstellungen für zwei Asphaltproben und zwei Betonproben. Auch aufgeführt sind die Mittenrauheit R_a , die maximale Rautiefe R_{max} und der Oberflächengradient ∇z . Man sieht, dass Rauigkeiten auf verschiedensten Längenskalen vorhanden sind, bis hinunter zur Auflösung des Mikroskops. Außerdem ist die isotrope Natur der Oberflächenfeinstruktur zu erkennen, es existiert keine Vorzugsrichtung. Da aus den Laborversuchen bekannt war, dass die erzeugten Partikel eine mittlere Größe um $100\ \mu\text{m}$ hatten, wurden die Rauheiten auf unterschiedlichen Größenskalen mittels Fourieranalyse getrennt ausgewertet. Im einseitigen Amplitudenspektrum besitzt die Rauheit im Bereich um $100\ \mu\text{m}$ keine hervorstechenden Charakteristika. Demnach kann die Rauheit auch kein Einflussparameter für die Partikelgrößenverteilung sei. Stattdessen lässt sich in der doppellogarithmischen Darstellung ein langer linearer Abfall erkennen. Die Rauheit der Asphaltproben kann daher mit dem Modell „fraktale Rauheit“ sehr gut beschrieben werden. Die beobachtete Feinstruktur fraktaler Natur ohne charakteristische Längenskala deckt sich mit Literaturangaben.

Tabelle 18: Oberflächenfeinstruktur ausgewählter Fahrbahnoberflächen

	3D-Darstellung Oberflächenfeinstruktur $z(x,y)$	Einseitiges Amplitudenspektrum von $z(x y)$	
inhalt 1 - 1			R_a 0.086 mm R_{max} 0.797 mm ∇z 1.01
inhalt 2 - 1			R_a 0.043 mm R_{max} 0.403 mm ∇z 1.68
inhalt 2 - 2			R_a 0.022 mm R_{max} 0.235 mm ∇z 1.69
bn 1 - 1			R_a 0.0492 mm R_{max} 0.364 mm ∇z 1.85
bn 1 - 2			R_a 0.071 mm R_{max} 0.512 mm ∇z 2.20

Am Laborabriebprüfstand (Grosch) wurden beim Projektpartner Continental Verschleißmechanismen untersucht und Abriebraten für Laufstreifenmischungen bestimmt (Bild unten). Mit dieser Methode kann das Ranking der Compounds im Straßentest gut abgebildet werden. Testparameter sind

Schräglaufwinkel, Anpresskraft und Geschwindigkeit. Die Abriebpartikel werden mit einem Staubsauger im Kontakt Prüfrad-Fahrbahn unmittelbar nach der Entstehung abgesaugt.

Im Jahr 2018 erfolgte eine Weiterentwicklung der Abriebprozedur. Neu ist die Hinzugabe von Straßenstaub-Modellpartikeln. Hierfür wird eine Mischung aus Korund und MgO verwendet. Mit dieser neuen Methode konnte die Wiedergabe des Rankings der Compounds des Straßentests weiter verbessert werden. Mit der Anwendung der neuen Methode war es aber auch notwendig, die Probenahme neu zu gestalten, da Absaugung der überschüssigen Straßenstaub-Modellpartikel und die Probenahme an der gleichen Stelle stattfinden. Um das Problem zu lösen, wurde ein sequentielles, automatisches Verschieben beider Einrichtungen installiert.

Nach der Messung liegen die Proben als Gemisch von Straßenstaub-Modellpartikeln und Gummi-Partikeln vor. Diese Probe wurde entsprechend an den Projektpartner WESSLING versendet.

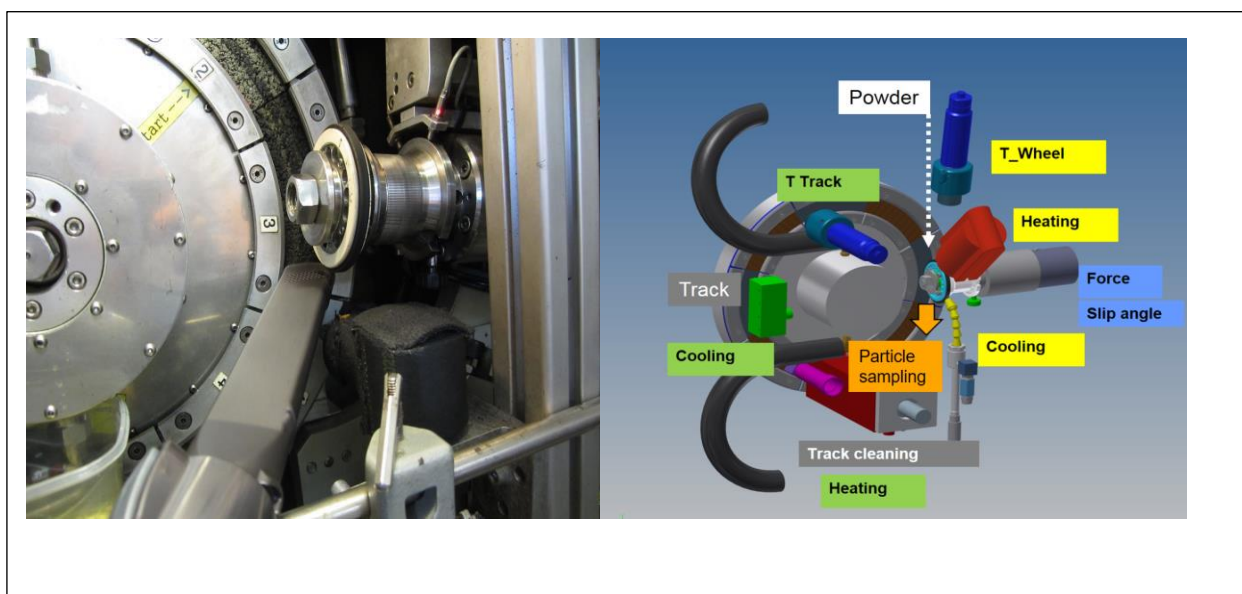


Abbildung 45: Versuchsaufbau Laborversuch modifizierter LAT-100

Ein Teil der Proben wurde alternativ bei Continental aufbereitet und vermessen. Die Abtrennung der leichteren Reifenfenstraßenabriebspartikel (englisch TRWP) erfolgte durch Dekantieren in Chloroform. Für die Erstellung der Partikelverteilung wurde die Probe auf einem Objektträger im Abzug getrocknet. Mit einem Lichtmikroskop wurden Bilder erstellt. Anschließend wurden die Partikel mit einer Bildverarbeitungssoftware identifiziert und klassifiziert.

II.1.2.3.1. Laborprüfstand – Partikelverteilung

Im Jahr 2018 erfolgte eine Weiterentwicklung der Abriebprozedur. 2019 wurden 8 Proben aus Laborprogrammen an WESSLING geliefert. Die Proben unterscheiden sich bezüglich der Gummimischungen und repräsentieren das Portfolio der PKW-Laufstreifenmischungen. Für die Parameter Last, Temperatur und Fahrbahn wurden mittlere, repräsentative Werte gewählt.

Für die erzeugten Partikel wurde eine Methode zur Erstellung der Partikelverteilung erarbeitet

Lichtbildmikroskopie

Eigenschaften wie die Größe, Breite und Länge der TRWP können durch eine Lichtmikroskopie untersucht werden. Da mit dem Mikroskop „MikroCad plus“ von LMI (früher GFM) sowohl dreidimensionale, wie auch lichtmikroskopische Aufnahmen erstellt werden können, kann dasselbe

Gerät für diese Untersuchung eingesetzt werden. Die Lichtmikroskopieaufnahmen scheinen intuitiv einer Auswertung oft zugänglicher.

Zentraler Bestandteil des Lichtbildmikroskops ist das zusammengesetzte Linsensystem mit wenigstens zwei konvexen Linsen. Die vordere Linse wird Objektiv genannt. Sie erzeugt innerhalb des Mikroskops ein vergrößertes, reelles Bild von dem untersuchten Objekt. Dieses Bild lässt sich mit einer Kamera aufnehmen oder auf einen Schirm projizieren. Die zweite Linse nennt sich Okular und dient der erneuten Vergrößerung des Bildes. Dabei erzeugt das Okular ein virtuelles Bild von dem Zwischenbild und wirkt wie eine Lupe.

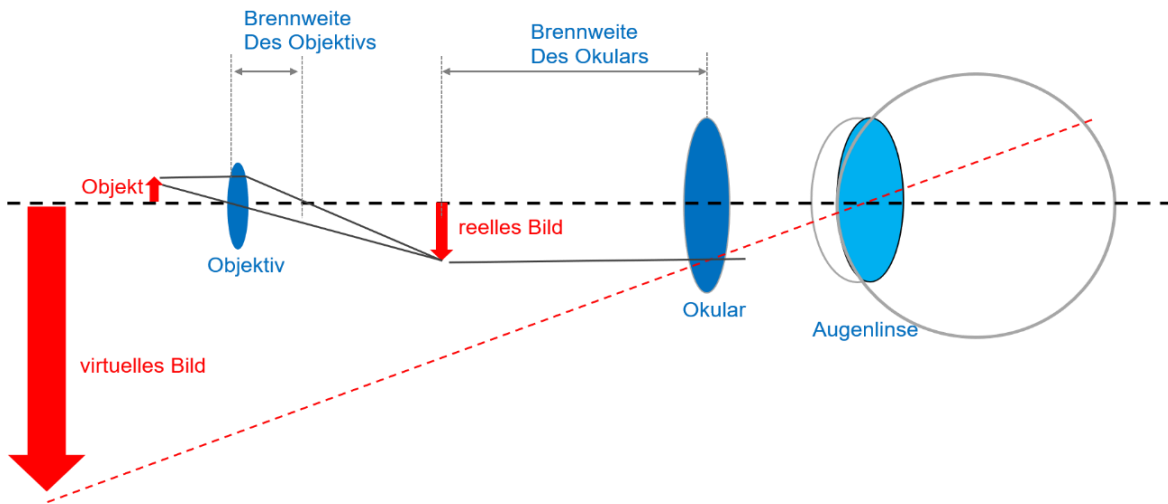


Abbildung 46: Bildvergrößerung durch Objektiv und Okular im Lichtmikroskop

Der Objektträger wird hierzu mit einem weißen Tape beklebt. Der helle Untergrund dient der besseren Erkennbarkeit der schwarzen TRWP. Anschließend werden die aufbereiteten Partikel mit einer Pipette aufgetragen. Die Partikel müssen für ca. 30 Minuten trocknen. In der Abbildung sind diese Vorbereitungsmaßnahmen in einer Prinzipskizze dargestellt.

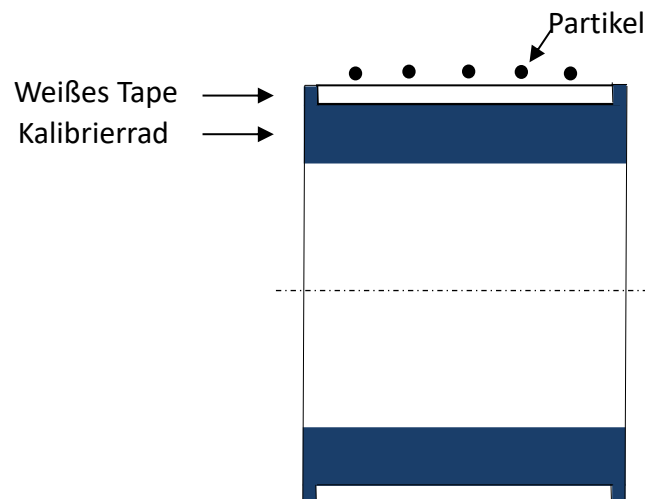


Abbildung 47 Prinzipskizze von Kalibrierrad mit weißem Tape zur Partikelmikroskopie

Die nächste Abbildung zeigt eine lichtmikroskopische Aufnahme von TRWP.

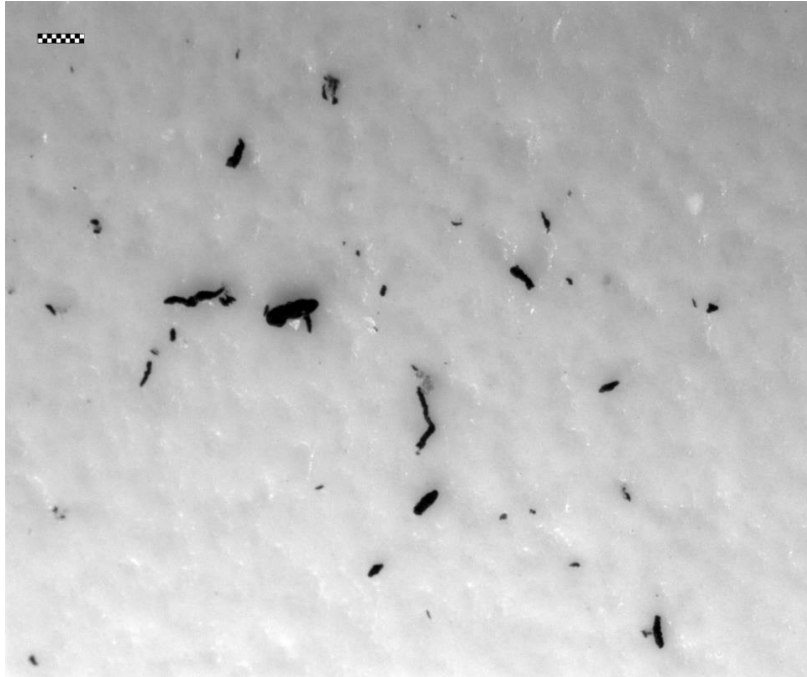


Abbildung 48 Lichtmikroskopische Aufnahme von TRWP

Der Balken in der oberen linken Ecke der Abbildung dient der Skalierung des Bildes und ist insgesamt 100 μm lang. Um die Partikel besser analysieren zu können, werden die Bilder anschließend mit Hilfe eines Schwellenwertverfahrens bearbeitet. Es gibt für die Ermittlung des Schwellenwertes zwischen dem Vordergrund und dem Hintergrund verschiedene Verfahren. Hier wurde das adaptive Schwellenwertverfahren angewandt. Dieses hat den Vorteil, dass es den Helligkeitswert der umliegenden Pixel mit einbezieht. Dadurch können Faktoren wie ein variierender Lichteinfall besser erkannt und ausgeglichen werden.

Im weiteren Prozess der Bildverarbeitung wird zunächst das Lichtmikroskopiebild mit Hilfe des adaptiven Schwellenwertes in Vordergrund und Hintergrund unterteilt. Die Abbildung unten zeigt eine Prinzipskizze, wobei links ein Grauwertbild von TRWP und rechts das daraus mittels des adaptiven Schwellenwertverfahrens erstellte binären Bild dargestellt ist.

Das binäre Bild wird anschließend weiterbearbeitet. Die Partikel am Rande des Bildes, die nicht vollständig zu erkennen sind, werden entfernt. TRWP, die „Löcher“ in ihrer Struktur aufweisen, werden aufgefüllt. Die Löcher entstehen durch Fehler bei dem Aufnahmeverfahren oder bei der Konvertierung zu einem Grauwertbild. Außerdem werden „Partikel“, die kleiner als 5 μm sind, aus dem Bild entfernt, da es sich hierbei in der Regel nur um ein Rauschen im Bild handelt. Zusätzlich werden Agglomerate aus dem Bild entfernt, weil diese andernfalls fälschlicherweise als ein großes Partikel erkannt werden könnten. Zur Detektion, welche Partikel ein Agglomerat bilden, wird die konvexe Hülle der besonders groß wirkenden Partikel bestimmt. Die konvexe Hülle beschreibt hierbei die kleinste konvexe Menge, welche in dem scheinbar großen Partikel enthalten ist. Für eine konvexe Menge gilt, dass jegliche zwei Punkte innerhalb dieser Menge miteinander verbunden werden können und die Verbindungsstrecke zwischen den Punkten ebenfalls in dieser Menge enthalten sein muss.



Abbildung 49: Prinzipskizze, Konvertierung von einem Grauwertbild in ein binäres Bild mittels adaptivem Schwellwertverfahren

Wenn die konvexe Hülle 22% größer ist als die Gesamtfläche der Partikel, wird der Bereich als Agglomerat erkannt. In Abbildung 50 sind diese Schritte noch einmal beispielhaft zu sehen.

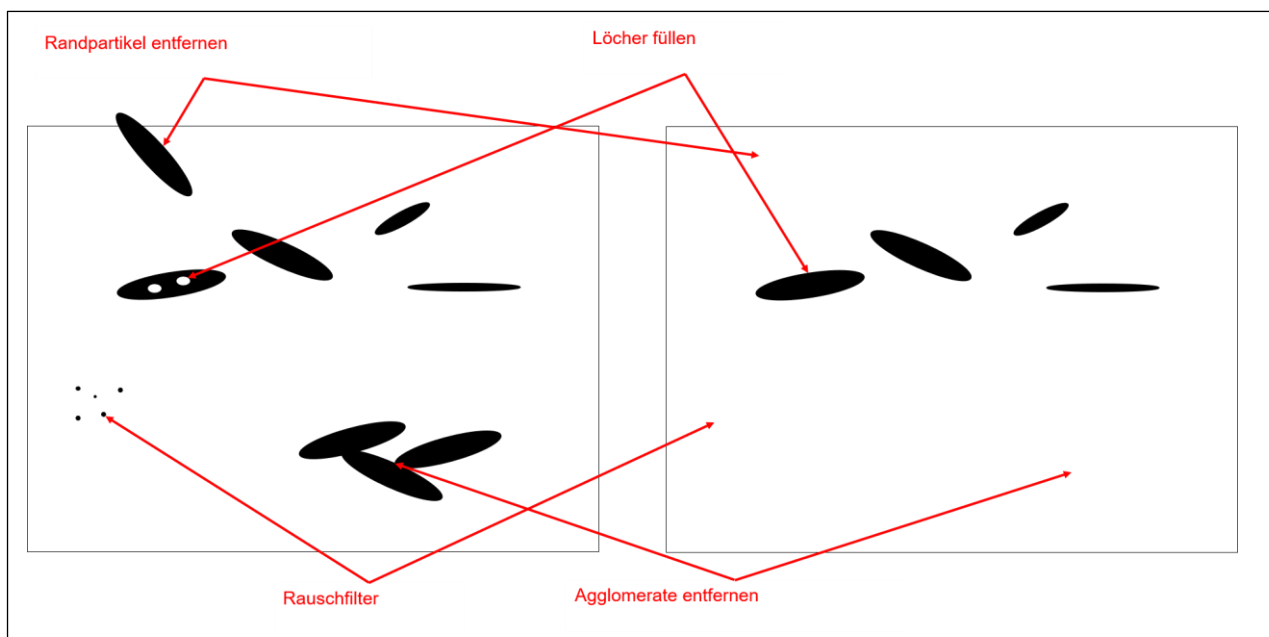


Abbildung 50: Prinzipskizze. Beispiel der Bildnachverarbeitung. Das unbearbeitete Binärbild (links) und das bearbeitete Binärbild (rechts)

Um die TRWP besser zu visualisieren, können diese umrandet und nummeriert werden.

Nach Abschluss der Bildbearbeitung werden die Partikel gezählt und Eigenschaften wie die Größe, die Breite und die Länge der Partikel in einer Tabelle zusammengetragen. Anschließend werden das Volumen und der Äquivalenzdurchmesser der Partikel berechnet. Mit diesen Daten lassen sich sodann Histogramme der verschiedenen Mengenarten erstellen.

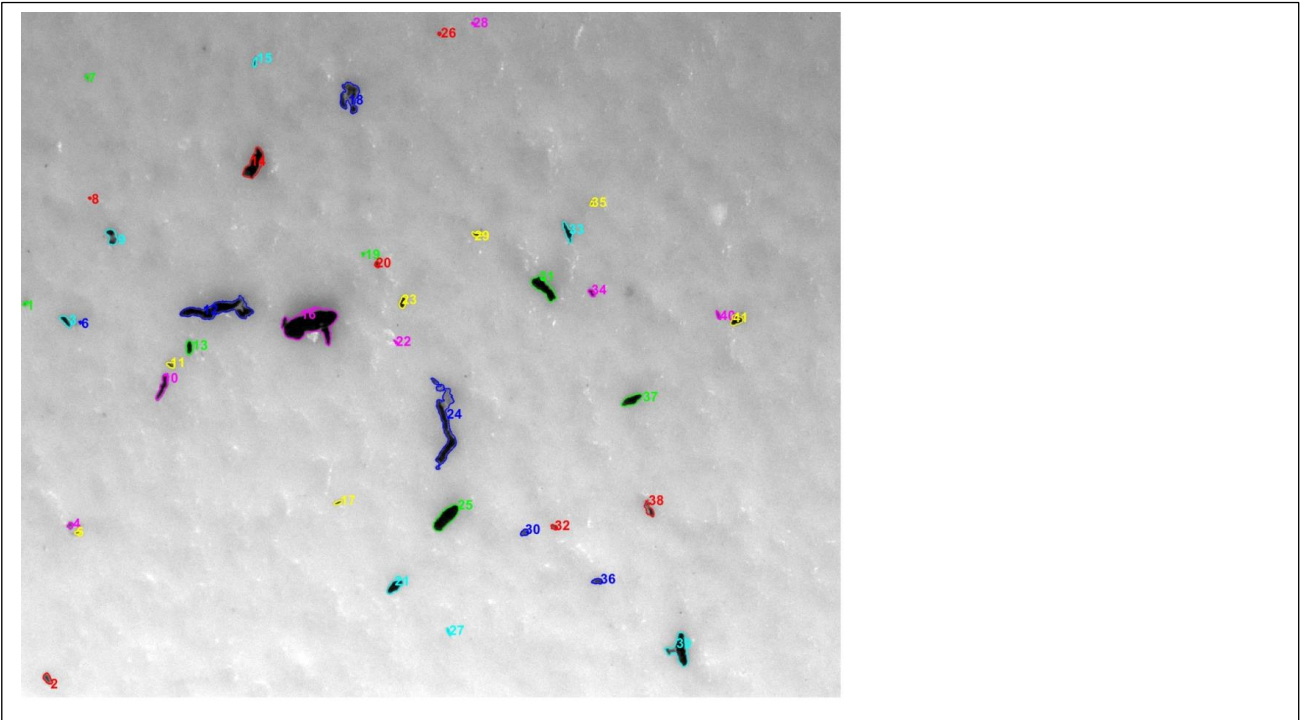


Abbildung 51 Lichtmikroskopische Aufnahme von TRWP mit anschließender Umrandung und Nummerierung der segmentierten Partikel

Abbildung 52 zeigt die Partikelanzahl (q_0) an der Primärachse, das Längen- zu Breitenverhältnis der Partikel an der Sekundärachse und deren Äquivalenzdurchmesser (Size) an der Abszisse. Die Abszisse wird logarithmisch aufgetragen. Die Partikelanzahl wird zur besseren Abgrenzung der anderen Mengenarten grün gezeichnet.

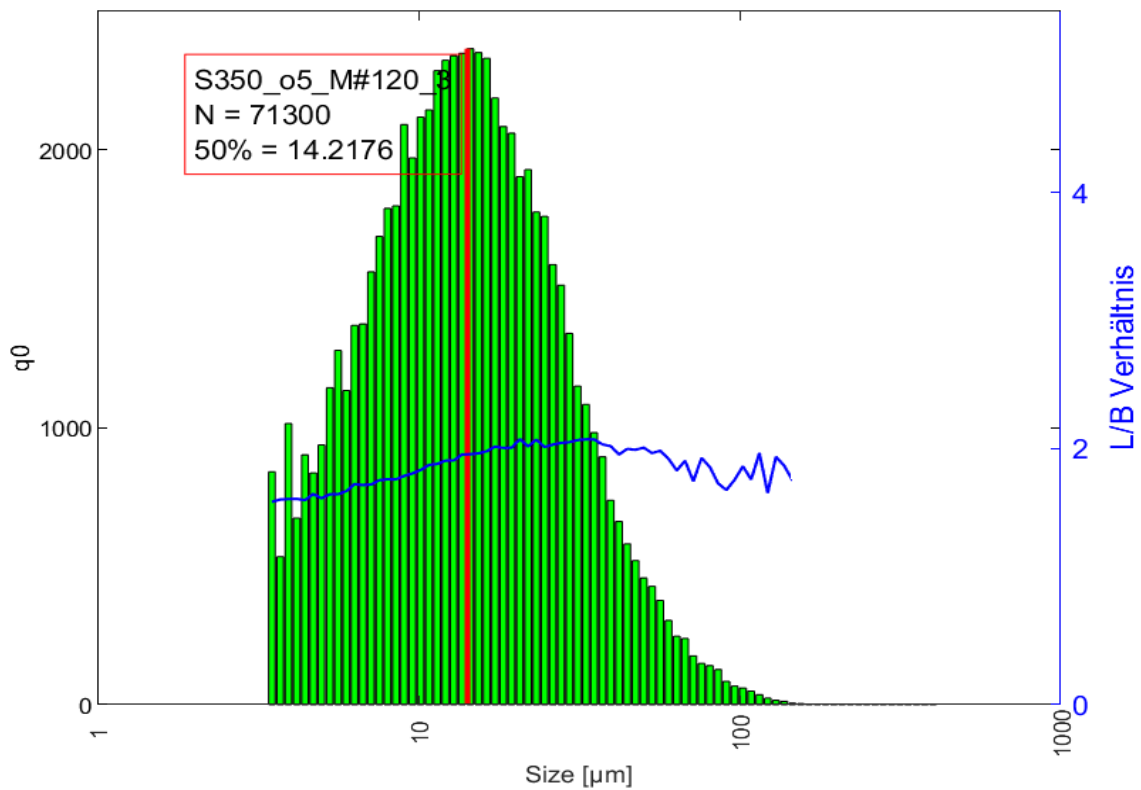


Abbildung 52 Histogramm Partikelanzahlverteilung. Die Ordinate zeigt die kumulierte Anzahl, die Abszisse zeigt den Äquivalenzdurchmesser

In der oberen linken Ecke des Bildes (s. Abbildung 52) wird angegeben, welchem Versuchsobjekt das Diagramm zuzuordnen ist. S350_o5_M#120_3 ist die Bezeichnung für die Versuchsreihe. In der Zeile unter dieser Bezeichnung wird die Anzahl der insgesamt gezählten Partikel N angegeben und darunter (50%=) der durchschnittliche Äquivalenzdurchmesser, der zum Median gehört. Letzteres ist zusätzlich als rote vertikale Linie in dem Histogramm eingezeichnet.

Das Histogramm für die kumulierte Fläche der TRWP ist in der folgenden Abbildung 53 zu sehen.

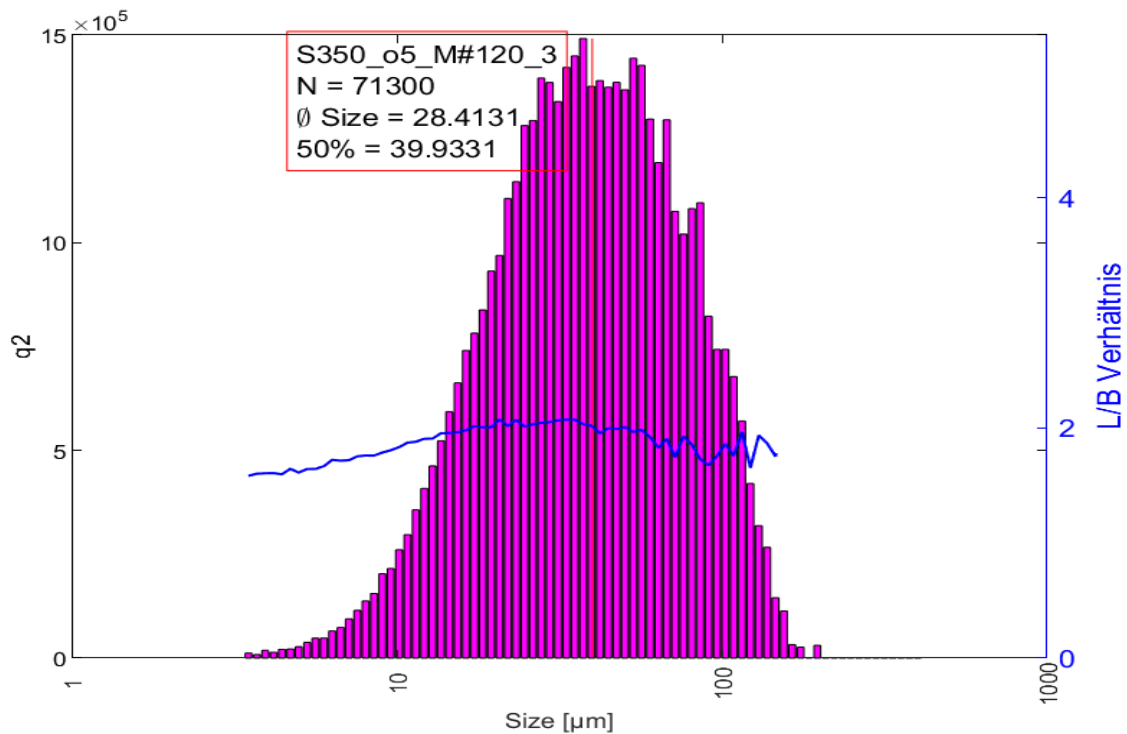


Abbildung 53: Histogramm Partikelflächenverteilung(q2). Ordinate zeigt die kumulierte Fläche der Partikelgruppen, die Abszisse zeigt den dazugehörigen Äquivalenzdurchmesser

Die Ordinate zeigt die kumulierte Fläche der einzelnen Gruppen und wird mit q2 beschriftet. Die X-Achse zeigt den als Size bezeichneten Äquivalenzdurchmesser an, wobei dieser logarithmisch aufgetragen ist. Wie in dem ersten Histogramm werden auch hier oben links in der Abbildung in einem roten Kasten die Objektbezeichnung und die Gesamtzahl der Partikel N angegeben. Hinzu kommt bei dem Histogramm zur kumulierten Fläche eine Angabe zur durchschnittlichen Fläche der Partikel. \emptyset Size gibt sodann den zur Durchschnittsfläche zugehörigen durchschnittlichen Äquivalenzdurchmesser an. Zusätzlich wird berechnet bei welchem Äquivalenzdurchmesser 50% der Gesamtmasse erreicht ist. Dieser stellt das erste Moment dar und ist mit einer vertikalen roten Linie in das Histogramm eingezeichnet.

Das Histogramm für das kumulierte Volumen der TRWP findet sich in der folgenden Abbildung

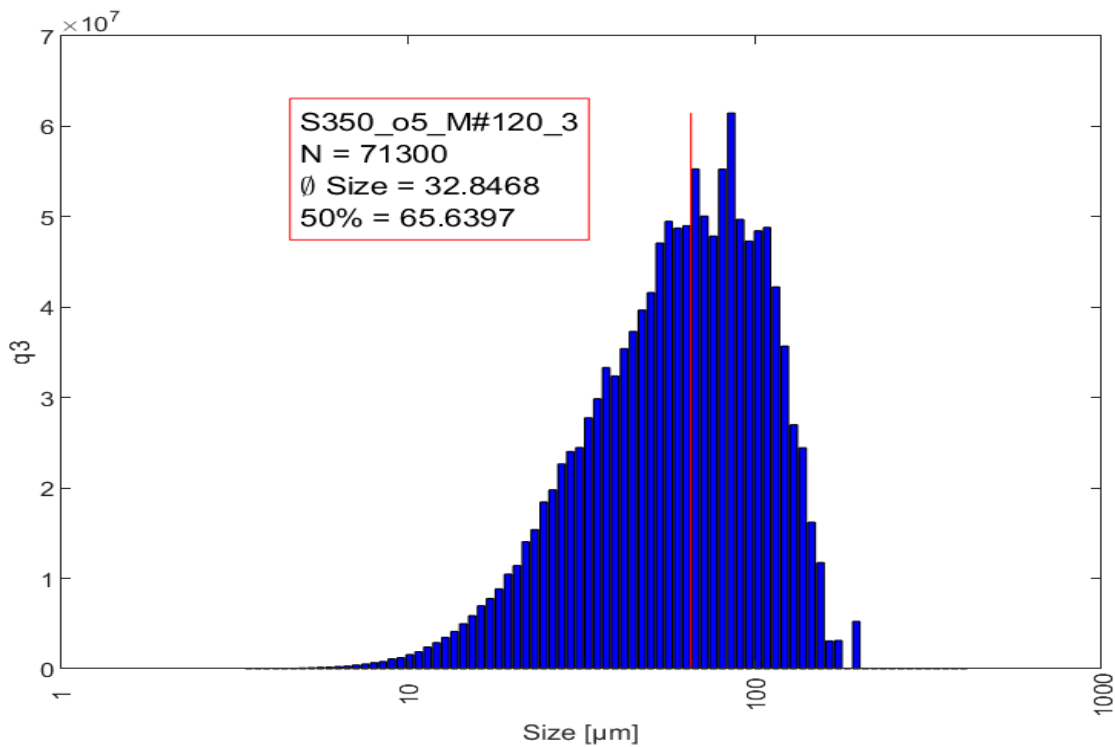


Abbildung 54 Histogramm Partikelvolumenverteilung(q_3). Ordinate zeigt das kumulierte Volumen, die Ordinate zeigt den Äquivalenzdurchmesser

Die Ordinate zeigt das kumulierte Volumen der einzelnen Gruppen und wird mit q_3 beschriftet. Die X-Achse zeigt den als Size bezeichneten Äquivalenzdurchmesser an, wobei dieser Logarithmisch aufgetragen ist. Wie in dem ersten Histogramm werden auch hier oben links in der Abbildung in einem roten Kasten die Objektbezeichnung und die Gesamtzahl der Partikel N angegeben. Hinzu kommt bei dem Histogramm zum kumulierten Volumen eine Angabe zu dem durchschnittlichen Volumen $\emptyset\text{Vol}$ eines Partikels. $\emptyset\text{Size}$ gibt sodann den zum $\emptyset\text{Vol}$ zugehörigen durchschnittlichen Äquivalenzdurchmesser an. Die Angabe „50%“ zeigt an, bei welchem Äquivalenzdurchmesser 50% des Gesamtvolumens erreicht ist und stellt das erste Moment dar. Dieser ist auch mit einer vertikalen roten Linie in das Histogramm eingezeichnet.

Insgesamt werden 200 lichtmikroskopische Aufnahmen von den auf einer Felge aufgetragenen Partikeln erstellt und pro Laufstreifenmischung werden 3 Felgen mit Partikeln präpariert. Somit ergeben sich 600 Bilder von Partikeln einer Laufstreifenmischung, die für die Auswertung genutzt werden. Bevor die automatisierte Lichtmikroskopie entwickelt wurde, wurden nur jeweils 10 Bilder von den Partikeln erstellt. Ein Vergleich der daraus resultierenden Graphen, lässt sich in Abbildung unten sehen. In grün ist jeweils die Anzahlverteilung(q_0) zu sehen, während die Flächenverteilung(q_2) lila dargestellt wird. Oben ist jeweils die Verteilung nach Auswertung von 10 Bildern zu sehen, während unten die Verteilung nach Auswertung von 600 Bildern zu sehen ist. Es ist klar zu erkennen, dass eine Zunahme der Datenmenge zu einer aussagekräftigeren Verteilung führt. Nach 10 Bildern wurden nur 513 Partikel erkannt, während auf 600 Bildern 71254 Partikel detektiert wurden. Die Kurvenverläufe sind glatter und zeigen ein präziseres Ergebnis.

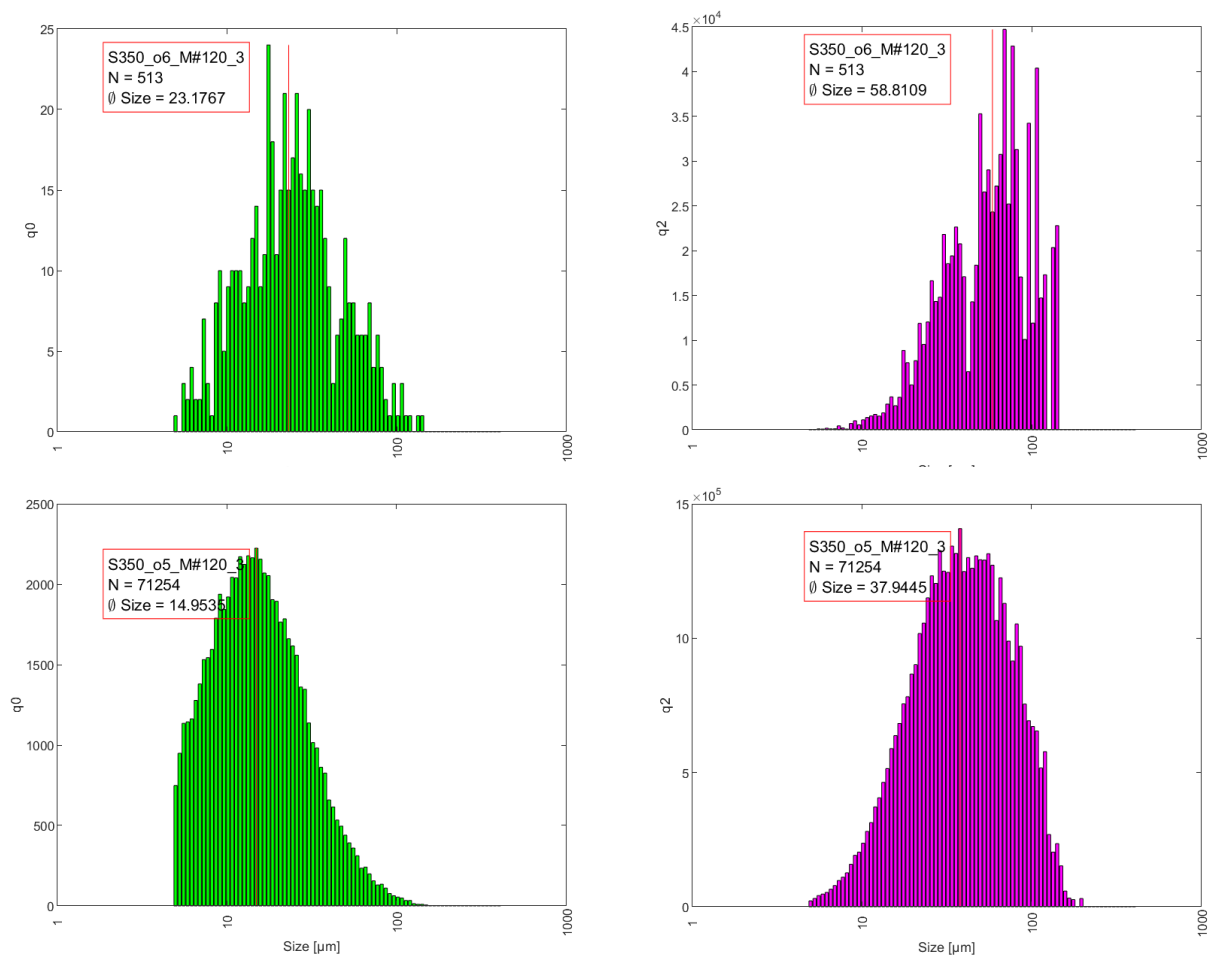


Abbildung 55 Partikelgrößenverteilungen von S350_o5_M#120_3 (q_0 und q_2) nach 10 und nach 600 Bildern

II.1.2.4. Fahrversuche

II.1.2.4.1. Durchführung

Für die Erzeugung von Abriebpartikeln aus dem Kontakt Reifen-Fahrbahn wurden an der Teststrecke „Indoor-Bremstest AIBA“ der Continental AG Untersuchungen durchgeführt. Die Projektpartner Continental, TUB FG Siwawi, TUB FG Reibung und VW haben sich hierzu regelmäßig ausgetauscht. Bei diesem Versuch wurde ein autonom fahrendes Auto von 100 km/h moderat abgebremst. Die ABS-Regelung trat hierbei nicht in Aktion. Während des 10-stündigen Tests wurde das Bremsmanöver 260-mal wiederholt. Dabei entstand etwa 3 g Abrieb pro Reifen. Nach dem Versuchsende wurden die Abriebpartikel mit einem Staubsauger von der Fahrbahn abgesaugt.



Abbildung 56: Bremsprüfstand AIBA

In der Teststrecke „Indoor-Bremstest AIBA“ auf dem Testgelände „Contidrom“ wurden 29 Proben parallel zum Bremsstest Abrieb eingesammelt. Die Proben wurden durch Kehren und Saugen auf einer definierten Fläche gewonnen.

II.1.2.4.2. Auswertung

Im Zwischenbericht 2018 wurde berichtet, dass die Fahrversuche auf dem Teststand AIBA abgeschlossen sind. Im Berichtszeitraum wurde die Methode der Messung der Partikelverteilung auf die Proben angewendet.

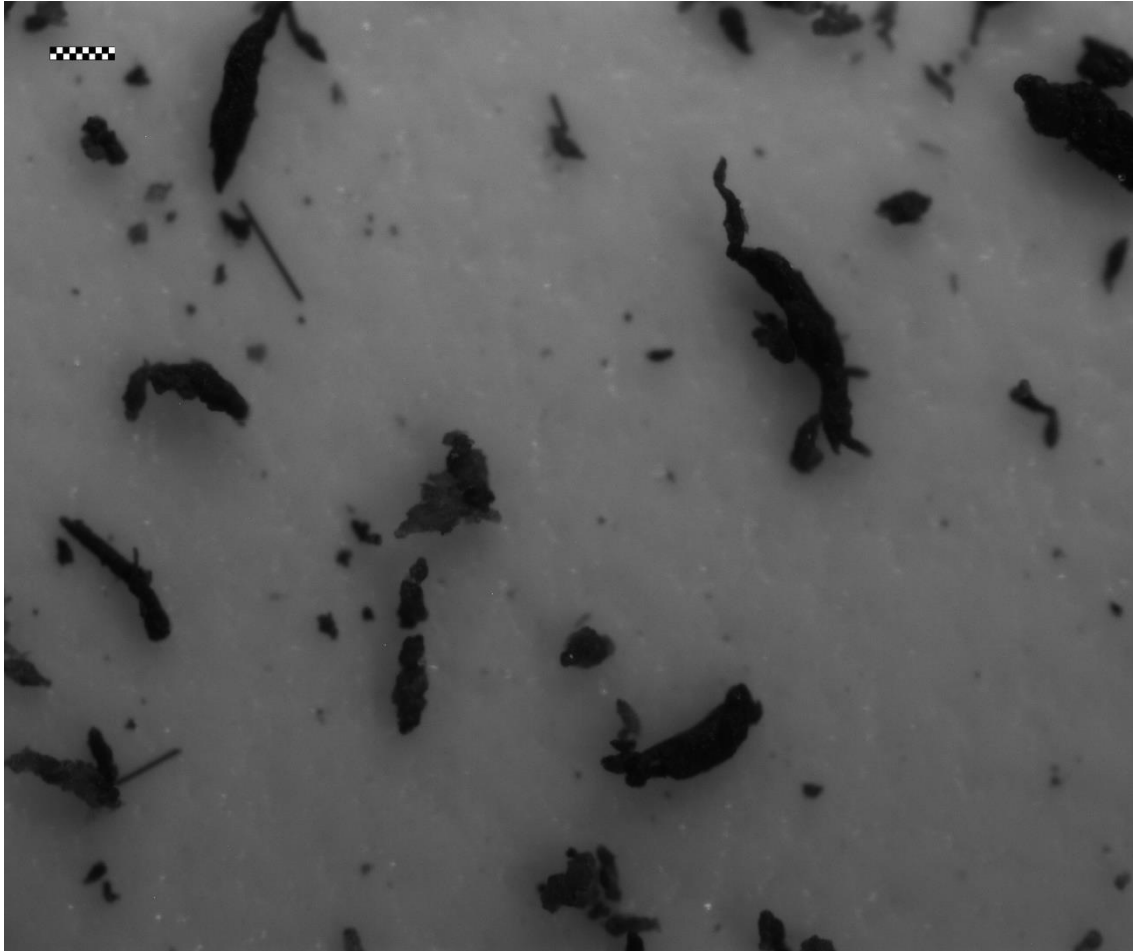


Abbildung 57: Partikelbild der AIBA Probe

Im Abbildung 57 ist ein Balken dargestellt, der eine Länge von 100 µm hat und als Skalierung dient. Die Partikel haben tendenziell eine länglichere Form, sind jedoch sehr divergent. Aus den 600 Lichtmikroskopiebildern wurde eine Volumenverteilung erstellt.

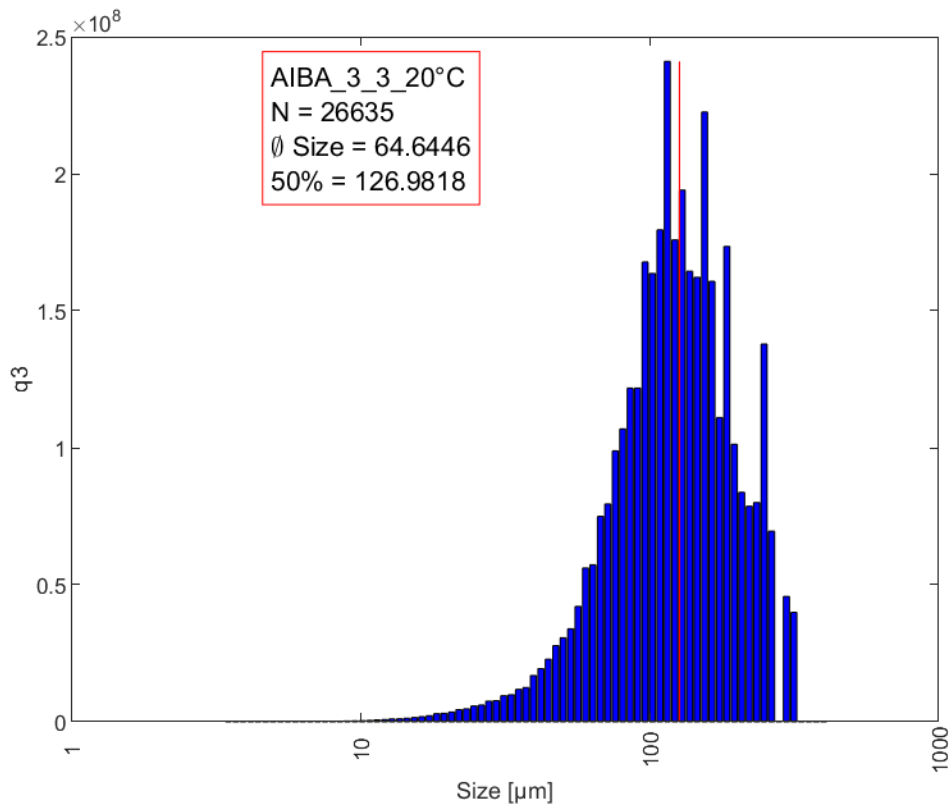


Abbildung 58: q3 Volumenverteilung der AIBA Probe

Bei der Probe von der AIBA wurden bei der lichtmikroskopischen Auswertung 26635 Partikel detektiert. Diese besitzen einen durchschnittlichen Äquivalenzdurchmesser von 64,6 µm. Die Partikel mit einem Äquivalenzdurchmesser von unter 127 µm machen genau 50% des Gesamtvolumens der Partikel aus. Das kumulierte Partikelvolumen der einzelnen Gruppen ist bei 5µm Äquivalenzdurchmesser sehr gering, nimmt aber bis 127µm exponentiell zu. Oberhalb von 127µm nimmt es wieder stetig ab.

Bei der Probe aus dem Labortest wurden bei der gleichen Laufstreifenmischung lediglich 4038 Partikel identifiziert. Diese Probe lief bei 15°C Asphalt-Oberflächentemperatur, was ungefähr den Bedingungen an der AIBA entspricht. Die durchschnittliche Partikelgröße liegt bei 57µm und die 50% Grenze liegt hier bei 145µm. Die dazugehörige Grafik ist in Abbildung 59 gezeigt. Genauso wie bei der Probe von der AIBA nimmt das kumulierte Volumen zunächst mit steigendem Äquivalenzdurchmesser exponentiell zu, hat seinen Höhepunkt bei ungefähr 150µm und nimmt anschließend wieder ab. Der Kurvenverlauf der Probe aus dem LAT5 ist nicht so stetig wie der Probe aus der AIBA, was der geringeren Probenmenge geschuldet ist.

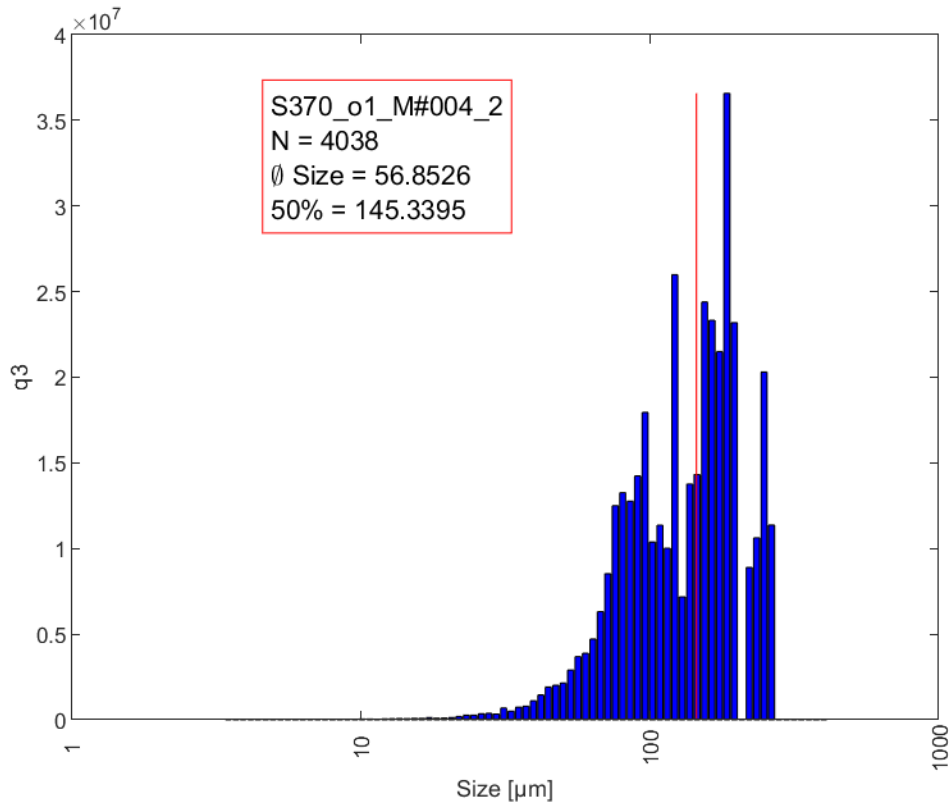


Abbildung 59: q3 Volumenverteilung der Probe vom LAT5 bei 15°C

Vergleicht man die beiden Proben miteinander (s. Abbildung 58 und Abbildung 59), lassen sich Unterschiede feststellen. Der durchschnittliche Äquivalenzdurchmesser unterscheidet sich um 7,7µm. Die 50% Grenze ist um 18µm voneinander verschoben. Allerdings ist die Partikelanzahl der Labormessung mit 4038 Partikeln klein. Beide Verteilungen sind repräsentativ und gut vergleichbar. Für das gleiche Laufstreifenmaterial und ähnlich gewählte Versuchsbedingungen sind Mittelwert (57 zu 65 µm) und Medianwert (145 zu 127 µm) nahezu gleich. Die Verteilung ähnlicher Tests zeigt eine vergleichbare Größenordnung. Das Material aus Labor und Reifenprüfstandtests wird für die Validierung der GCMS Methode.

II.1.3. Untersuchung Immission

Analyse des Einflusses der Oberflächenfeinstruktur

Bezüglich der Oberflächenfeinstruktur und anderen mikroskopischen Einflussfaktoren, das heißt der Prozesse unmittelbar im Kontakt von Reifen und Straßen, wurde im Wesentlichen wie geplant vorgegangen. Es wurde am FG Reibung ein Simulationsmodell geschaffen, das die Straßenrauheit im Kontakt mit dem Reifengummi abbildet. Das Verfahren funktioniert wie folgt: Das Simulationsverfahren liest zunächst die zu untersuchende Oberflächenrauheit als 3D-Datensatz ein. Im nächsten Schritt wird berechnet, wie ein glatter Gummikörper sich verformt, wenn er gegen diese Oberfläche gedrückt wird. Im Allgemeinen entstehen dabei in der Nähe der Rauheitsspitzen Gebiete von „echtem“ Kontakt und es entstehen Zwischenräume dort, wo die Rauheit ihre Täler hatte.

Die gesamte Kontaktkraft muss in den echten Kontaktzonen aufgenommen werden, wodurch dort mechanische Druck-Spannungen auftreten. Es wird davon ausgegangen, dass diese Druckspannungen allein keinen Verschleiß in Form von Partikeln hervorrufen.

Als nächstes wird in der Simulation eine Belastung parallel zur Straßenoberfläche aufgebracht (entspricht Anfahren, Bremsen oder dem Spurhalten des Fahrzeugs (Fzg.) in einer Kurve). Dadurch entstehen in den Kontaktzonen zusätzliche Spannungen, die zwei gefährliche Eigenschaften haben. Zum einen handelt es sich um Scherspannungen, die das Potenzial zum Öffnen eines Risses im Reifenmaterial besitzen. Zum anderen nehmen sie, aus kontaktmechanischen Gründen, ihren größten Wert an den Rändern der mikroskopischen Kontaktzonen an. Zur Einschätzung der Verschleißfähigkeit werden diese Spannungen analysiert.

Das zentrale Vorhaben, die Entwicklung eines statistischen Verfahrens zur automatischen Erkennung von konzentrierten Spannungen, konnte erfolgreich durchgeführt werden. Das Verfahren basiert auf der lokal vorhandenen elastischen Energie und ist vom FG Reibungsphysik im qualitätsgesicherten open-source Journal Friction veröffentlicht worden und von der wissenschaftlichen Community gut angenommen worden.

Die Anwendung auf generierte, zufällig raue Oberflächen ist dort ebenfalls dokumentiert. Das Verfahren erlaubt Auswertungen nicht nur statistischer Natur, sondern kann spezifische Orte und Größen der Partikelentstehung abbilden. Abbildung 60 aus der genannten Veröffentlichung zeigt eine raue Oberfläche vor und nach dem Herauslösen mehrerer Partikel.

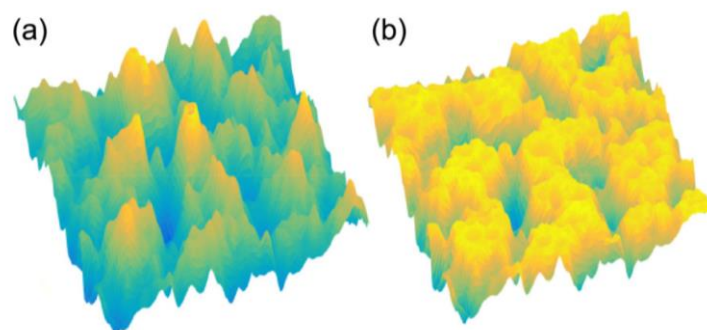


Abbildung 60: Beispiel für zufällig raue Oberfläche vor (a) und nach (b) Partikelablösung¹

¹ Zu beachten ist, dass im gezeigten Bild idealrauer Oberflächen die Materialablösung ausnahmsweise auf der Rauheit dargestellt ist, nicht auf dem Gegenkörper.

Das Berechnungspaket auf die realen Straßenoberflächen anzuwenden, wurde mit den real eingesetzten Straßenoberflächen (Asphalt und Beton) aus dem Prüfstand von Continental berechnet, wobei den Werkstoffen Rechnung getragen wurde.

Im Vergleich zur Straßenoberfläche ist der Reifengummi sehr weich. Die Non-Konformität der Oberflächen von Reifen und Straßen (Rauheiten) werden daher durch die Elastizität des Gummis aufgenommen. Dieser verformt sich elastisch und speichert in seiner Verformung Energie, die für die Materialablösung nötig ist. Die mikroskopische Verformung der Straßenoberfläche kann dagegen vernachlässigt werden, weshalb ihre Materialeigenschaften kein Einflussparameter sein kann und in der Simulation nicht berücksichtigt wird.

Tabelle 19 Annahmen in Simulationsrechnungen reale Straßenoberflächen

Elastizitätsmodul	$E=1,3 \text{ MPa}$
Querkontraktionszahl	$\eta=0,5$
Reifendruck/Aufstandsdruck	$P_{\text{mean}}=0,2 \text{ MPa}$

Tabelle 19 listet die Annahmen auf, die den Simulationsrechnungen an realen Straßenoberflächen zugrunde lagen, zusammen mit einem frequenzunabhängigen linearelastischen Modell des Gummis. Ausgehend davon kann der statische elastische Kontakt zwischen Gummi und Straßen für die entsprechende Oberflächenfeinstruktur berechnet werden

Abbildung 61 links zeigt die Kontaktzonen für die Oberfläche „Asphalt 2-2“. Sie ist exemplarisch für die im Projekt untersuchten Fahrbahnoberflächen.

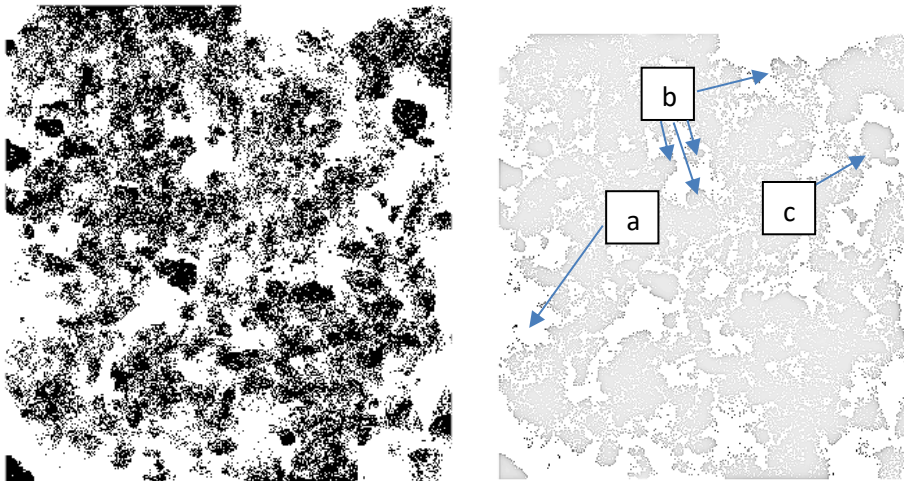


Abbildung 61: Kontaktzonen (links) und Tangentialspannungsverteilung (rechts) am Beispiel Asphaltprobe 2- 2. Pfeile zeigen isolierte Kontaktzonen mit Durchmesser 5,2 μm (1), 16 μm (2) und 49 μm (3)

Die Ergebnisse der Simulationsrechnungen an realen Straßenoberflächen sind an dieser Stelle mit dem fraktalen Oberflächenmodell gut erklärbar. Die mehrskalige Struktur ohne charakteristische Länge führt zu einzelnen Kontaktgebieten in allen denkbaren Größen. Für die partikelerzeugenden Tangentialspannungen sind die Außenkanten dieser Gebiete ausschlaggebend, wobei die verschleißfördernden Zustände erreicht werden bei relativ isolierten Kontaktinseln. Durch Auswertung der elastischen Energiedichte können diese Inseln für verschiedene Größen identifiziert werden, siehe Abbildung 62.

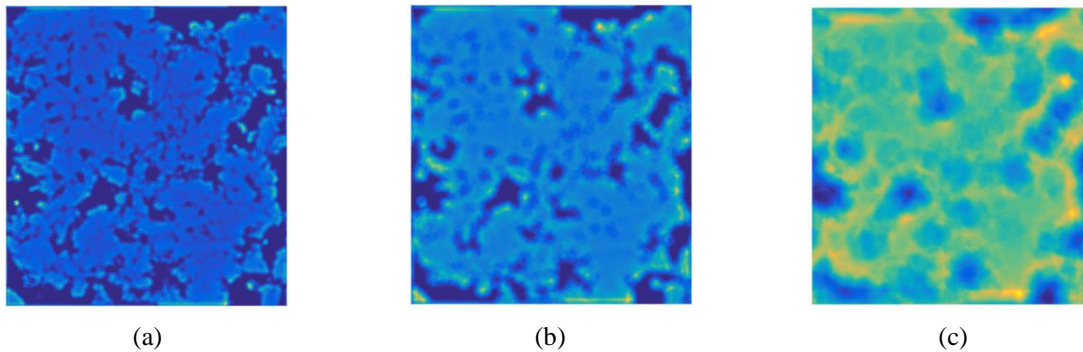


Abbildung 62: Energiedichteverteilung im elastischen Kontakt für verschiedene Gebietsgrößen (klein nach groß). Die Mittelpunkte der in Abbildung 61 rechts beispielhaft markierten Gebiete sind in der jeweiligen Größe erkennbar

Es kann anhand der Simulationen davon ausgegangen werden, dass solche Inseln in der für das Reifenmaterial ungünstigen Größe immer auftreten können. Sie korrespondieren dann mit einer konkreten mikroskopischen Stelle im Asphalt. Anzumerken ist, dass diese Stellen auch fahrbahnseitig besonders belastet sind, wodurch dort auch der *Fahrbahnverschleiß* mikroskopisch lokal am größten ist. Mit fortschreitender Alterung der Fahrbahn werden diese Stellen somit geglättet und das Verschleißverhalten am Reifen verbessert sich. Aufgrund der Fixierung des Projekts auf die FSS-Faktoren wurde auf eine genaue mechanische Charakterisierung verschiedener Gummimaterialien verzichtet.

II.1.3.1. Untersuchungen mittels (in situ) Teststand

II.1.3.1.1. Abspülversuche mittels Berechnungsmodul und Abspül-Lanze

Die Projektpartner TU Berlin Siwawi, IPS und die BWB, haben intensiv an der Konzeptionierung und der technischen Realisierung der in situ Teststandversuche zusammengearbeitet.

Da der Probenahmekorb zur Beprobung von Straßenablauf aus natürlichen Regenereignissen geeignet ist, wurden auch ein Versuchsaufbau mittels künstlicher Beregnung entwickelt. Dieser bietet die Möglichkeit, charakteristische Regenintensitäten in Form definierten Teilprüfungen (in Anlehnung an DIBT) abzubilden. Zusätzlich können die Bedingungen der Probenahme kontrolliert werden: Sowohl das Einzugsgebiet des beprobten Straßenablaufschachts, als auch die der Probenahme vorangehende Zeit zur Akkumulation von Abrieb – und anderen Partikeln – werden durch den Entwurf des Abspülversuchs definiert.

Im RAU-Projekt wurden zwei Aufbauten zur künstlichen Beregnung entwickelt. Während der erste ein modulares System zur Erzeugung von künstlichen Regentropfen ist, legt der als "Abspül-Lanze" bezeichnete Aufbau den Fokus auf das über die Fahrbahn fließende Wasser und ist technisch deutlich weniger aufwendig.

II.1.3.1.2. Beregnungsmodule

Die Herausforderung war es einen Beregnungstest zu entwickeln, der im Betrieb folgenden Anforderungen erfüllt (Tabelle 20):

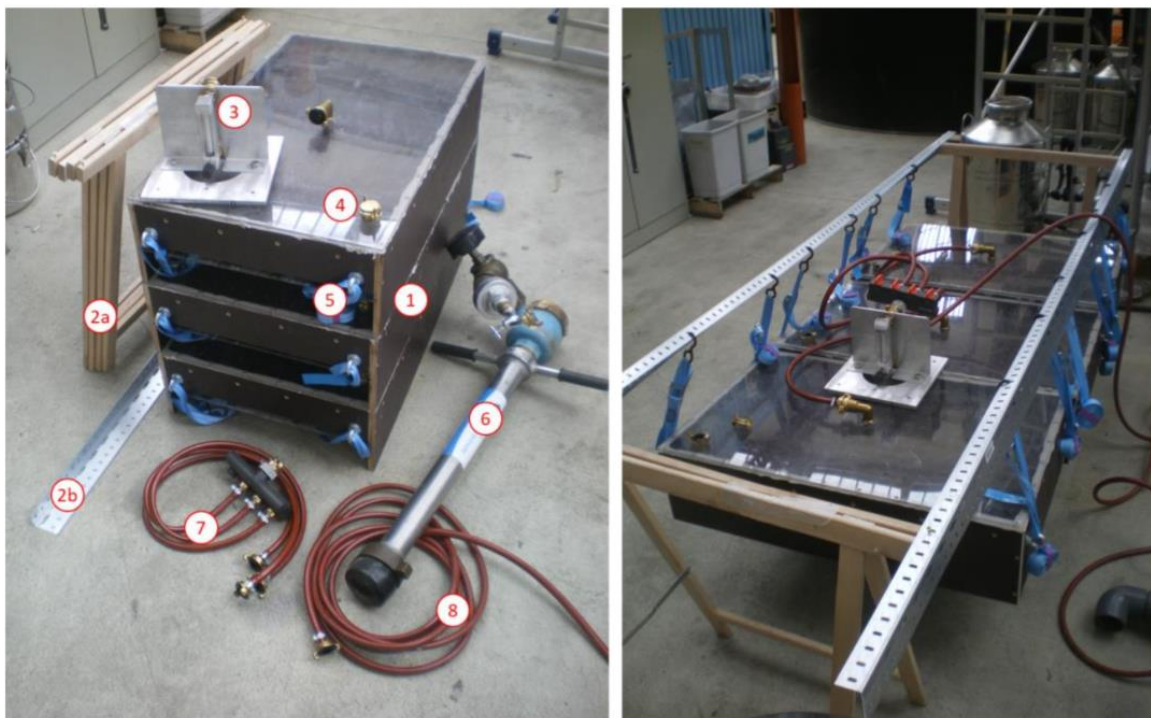
Tabelle 20: Anforderungen an den Beregnungsteststand

Anforderungen	
Regenintensitäten	leicht / mäßig / stark
Regendauer	variabel

Beregnungsfläche	individuell
Beregnungsuntergrund	Asphalt / in situ
Mobilität	Transportfähig mit Lastenfahrrad / unabhängig von Stromversorgung

Zunächst wurden sogenannte Beregnungsmodule entwickelt deren Tropfengenerierung mit Edelstahlkanülen aus dem medizinischen Bereich umgesetzt wurde. Der Einsatz von Kanülen zur Tropfengenerierung erwies sich als sehr gut geeignet, um auch für niedrige Intensitäten ein entsprechendes Tropfbild einzustellen zu können.

Ein Ansatz, um die Abmaße und gleichzeitig gute Mobilität zu erfüllen, wurden drei Beregnungsmodule (0,5 m x 0,8 m) gebaut. Die modulare Bauweise bietet die Möglichkeit, die Beregnungsfläche nachträglich beliebig zu erweitern. Der Prototyp konnte mit unterschiedlichen Kanülengrößen getestet werden.



- | | | | |
|----|--------------------------------|-----|--------------------------------|
| 1: | Beregnungssegmente | 6: | Standrohr |
| 2: | Gestell | 7: | Wasseranschluss (Verteiler) |
| 3: | Schwebekörper-Durchflussmesser | 8: | Wasseranschluss (Verlängerung) |
| 4: | Acryldeckel mit Entlüftung | 9: | Schutzplane |
| 5: | Befestigung zum Einhängen | 10: | Ablaufrinne |

Abbildung 63 Beregnungsmodule in der Versuchshalle der TU Berlin

Da die Versuche mit unterschiedlichen Regenintensitäten durchgeführt werden sollten, war eine präzise Regulierung des Durchflusses nötig. Hierfür wurde ein Schwebekörper-Durchflussmesser des Modells „Uniflux ¼“ L“ der Firma Influx verwendet. So konnten Durchflüsse wie in Tabelle 21 dargestellt erreicht werden.

Tabelle 21: Regenintensitäten und Durchflüsse bezogen auf die Versuchsfläche

Regenintensität	Niederschlags- höhe h [mm]	Niederschlags- volumen V [cm ³]	Durchfluss Q [cm ³ /min]	Durchfluss Q [l/s]
Leicht	0- 0,5	0 - 160	0 - 16	0 – 0,00027
Mäßig	0,5 – 1,7	160 -544	16 – 54	0,00027 – 0,0009
Stark	1,7 – 8,3	544-2656	54 - 266	0,0009 – 0,0044

Auf der AIBA-Teststrecke von Continental wurde der Regenteststand nach Bremstests aufgebaut und auf Funktion getestet. Dabei kam es nur zu geringen Abfluss, der die Partikel nicht ausreichend mobilisieren konnte. Es konnte beobachtet werden, dass das Wasser auf dem Bereich der Reifenspur (roter Rahmen in der folgenden rechten Abbildung) von der Fahrbahnoberfläche abperl. Weitere kleinskalige Untersuchungen zum Abspülverhalten mit dem Regenteststand in der Versuchshalle des TUB Siwawi wurden durchgeführt. Es hat sich herausgestellt, dass das Beregnungsmodul nicht optimal geeignet ist um die abgespülten Feststoffe im Straßenrandbereich zu simulieren. Ein wesentlicher Grund liegt in der vergleichsweise geringen Fläche und der zusätzlichen Annahme, dass der Haupteintrag durch das akkumuliert abfließende Wasser im Rinnsteinbereich im Wesentlichen für die entsprechende Partikelfracht verantwortlich ist. Die Beregnungsmodule scheinen hingegen bestens für weitere Versuche zur Regenabflussbildung für unterschiedliche Randbedingungen wie Fahrbahnoberfläche, Außentemperatur und zusätzlichem Wind geeignet.

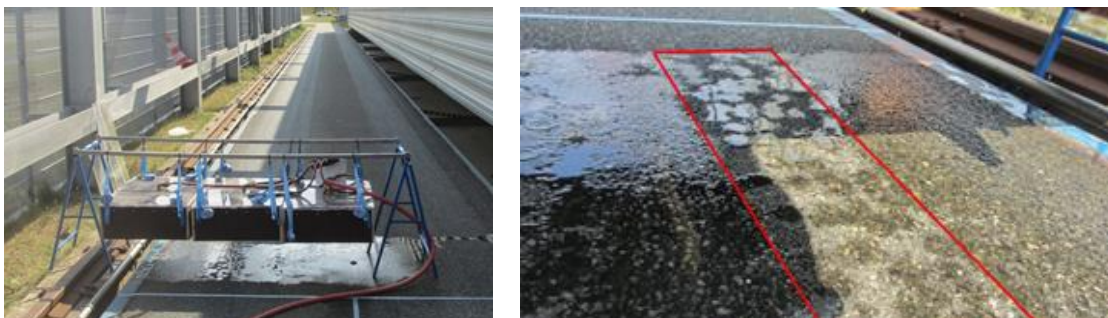


Abbildung 64: Regenteststand auf der AIBA-Teststrecke (linke Abbildung), Benetzungsbild (rechte Abbildung)

Als weitere Möglichkeit das abfließende Wasser im Rinnsteinbereich simulieren zu können wurde eine geeignete „Abspüllanze“ entwickelt

II.1.3.1.3. Aufbau Abspüllanze

Als weitere Möglichkeit das abfließende Wasser im Rinnsteinbereich simulieren zu können wurde eine geeignete „Abspüllanze“ entwickelt. Sie besteht aus einem seitlich perforierten Rohr, das im Inneren eines winkelförmigen Edelstahlblechs befestigt ist. Während ein Ende des Rohres verschlossen ist, wird über das andere Ende Wasser zugeführt, das aus dem Rohr auf das Edelstahlblech und anschließend flächig verteilt auf die Straße fließt. Der Volumenstrom wird über einen Schwebekörperdurchflussmesser erfasst und mittels eines Kugelventils eingestellt. Da das Wasser über ein von den Berliner Wasserbetrieben bereitgestelltes Standrohr zugeführt wird, kann nach Abschluss eines Versuchs das Gesamtvolumen vom im Standrohr integrierten Wasserzähler abgelesen werden. Es wurden zwei Rohre mit unterschiedlich großen Bohrungen angefertigt, um ein breites Spektrum von Regenintensitäten abbilden zu können.



(a) Perforiertes Rohr mit Edelstahlblech



(b) Abspülen von Spur 1



(c) Standrohr mit Wasserzähler und Schwebekörperdurchflussmesser



(d) Schwebekörperdurchflussmesser

Abbildung 65: Aufbau und Betrieb der Abspül-Lanze

Teilprüfungen

Die Abflussspenden der im Projekt durchgeführten Abspülversuche wurden in Anlehnung an die in (Schmitt, et al., 2010) vorgeschlagenen Teilprüfungen dimensioniert, wobei die Versuchsdauern zur Durchführung der Versuche im Straßenverkehr verkürzt wurde. Die vorgeschlagenen und angepassten Regen- und Abflussspenden sind in Tabelle 22 gezeigt. Teilprüfungen 1-3 wurden anhand der Verteilungsfunktion der Regenspenden q_R gewählt.

Tabelle 22: Definition der Teilprüfungen nach DBU und Anpassung für RAU

Teil- prüfung	Regenspende in L/(s·ha)	Dauer (DBU) in min	Dauer (TU) in min	Höhe (TU) in mm
1	2.5	480	100	1.5
2	6.0	200	100	3.6
3	25.0	48	48	7.2
4	100.0	15	15	9.0

Die vierte Teilprüfung wurde als 15-minütiger Spülstoß hinzugefügt, und soll prüfen, ob in einem Filter der im Straßenablaufschacht verbaut werden könnte, akkumulierte Partikel bei starken Regen ausgespült werden.

Die zur Dimensionierung der in (Schmitt, et al., 2010) vorgeschlagenen Teilprüfungen verwendeten Regenspenden aus Daten der Wetterstation Mühldorf am Inn stammen, deren langjährige mittlere Jahresniederschlagshöhe deutlich höher ist als die mittlere Jahresniederschlagshöhe der im RAU-Projekt beprobten Standorte:

$$\text{Höhe}_{\text{ges}} = 888 \text{ mm (Mühldorf am Inn)} \quad \text{Höhe}_{\text{ges}} = 496 \text{ mm (Berlin Tegel)}.$$

Eine Auswertung von Rohdaten aus (DWD, 2021) ergibt allerdings, dass sich die Jahresniederschlagshöhen der Berliner Wetterstationen im bundesweiten Vergleich in den 5 %- bis 13 %-Quantilen befinden, wobei die Station Tegel den niedrigsten Platz einnimmt. Mühldorf am Inn befindet sich im 67 %-Quantil und ist damit deutlich näher am Bundesdurchschnitt von

$$\text{Höhe}_{\text{ges}} = 831 \text{ mm} \quad (\text{Bundesweit, Mittelwert})$$

$$\text{Höhe}_{\text{ges}} = 781 \text{ mm} \quad (\text{Bundesweit, Median}).$$

Während die Teilprüfungen für die Prüfung von Behandlungsanlagen ausreichend sind, wäre es für das Berechnen von Mobilisierungsraten an unterschiedlichen Standorten sinnvoll, Teilproben bei weiteren Regenspenden durchzuführen.

Durchführung

Der Aufbau der mittels Abspül-Lanze durchgeführten Abspülversuche ist in Abbildung 66 gezeigt.

Analog der im Projekt durchgeführten Fegeversuche wurde die Fahrbahn in zwei 80 cm breite Spuren S1 und S2 aufgeteilt, wobei mit S1 der direkt an den Bordstein angrenzende und mit S2 der darauffolgende Streifen bezeichnet wird. Die beiden Spuren haben entlang der Fahrtrichtung eine Länge von 6 m. Anders als bei den Fegeversuchen musste sich am niedriger gelegenen Ende der Spur ein Straßenablaufschacht befinden, damit die abgespülten Partikel mittels Probenahmekorb aufgefangen werden können.

Vor dem eigentlichen Abspülversuch wurde, analog zu den Fegeversuchen, eine Grundreinigung der Spuren durchgeführt. Anschließend wurden über einen Zeitraum von 24 h Partikel akkumuliert und der Verkehr mittels automatischem Verkehrszähler erfasst.

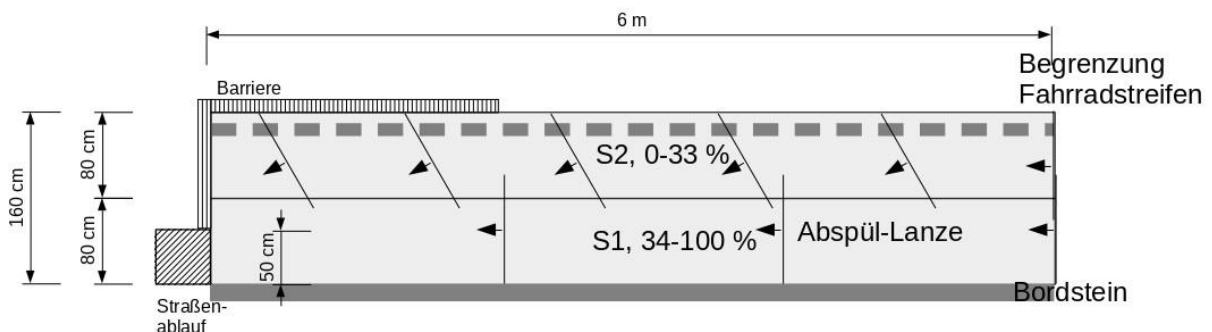


Abbildung 66: Aufbau der Abspülversuche am Standort "Böttgerstraße Kurve" und Positionen der Abspül-Lanze während des Versuchs

Da die Hauptbelastung in S1 vorliegt, wurde der Fokus auf das Abspülen dieser Spur gelegt: Während des ersten Drittels der jeweiligen Teilprüfung werden Partikel durch Versetzen der Abspül-Lanze von

S2 auf S1 gespült, um während der verbleibenden Zeit die in S1 akkumulierten Partikel in den Straßenablaufschacht zu spülen.

Das in den Straßenablauf fließende Wasser wurde über einen Probenahmekorb mit kleinster Sieböffnung 63 µm aufgefangen. Der entsprechende Siebdurchgang wurde mittels Pumpmodul beprobt.

Ergebnisse Abspültest

Mit den definierten Abspültest konnte gezeigt werden, dass je stärker der Regen, desto mehr Feststoffe werden über alle Fraktionen abgespült. Bezogen auf die Gesamtmasse von 8,9 g/m wurden jedoch maximal 13 % in den Straßenablauf gespült.

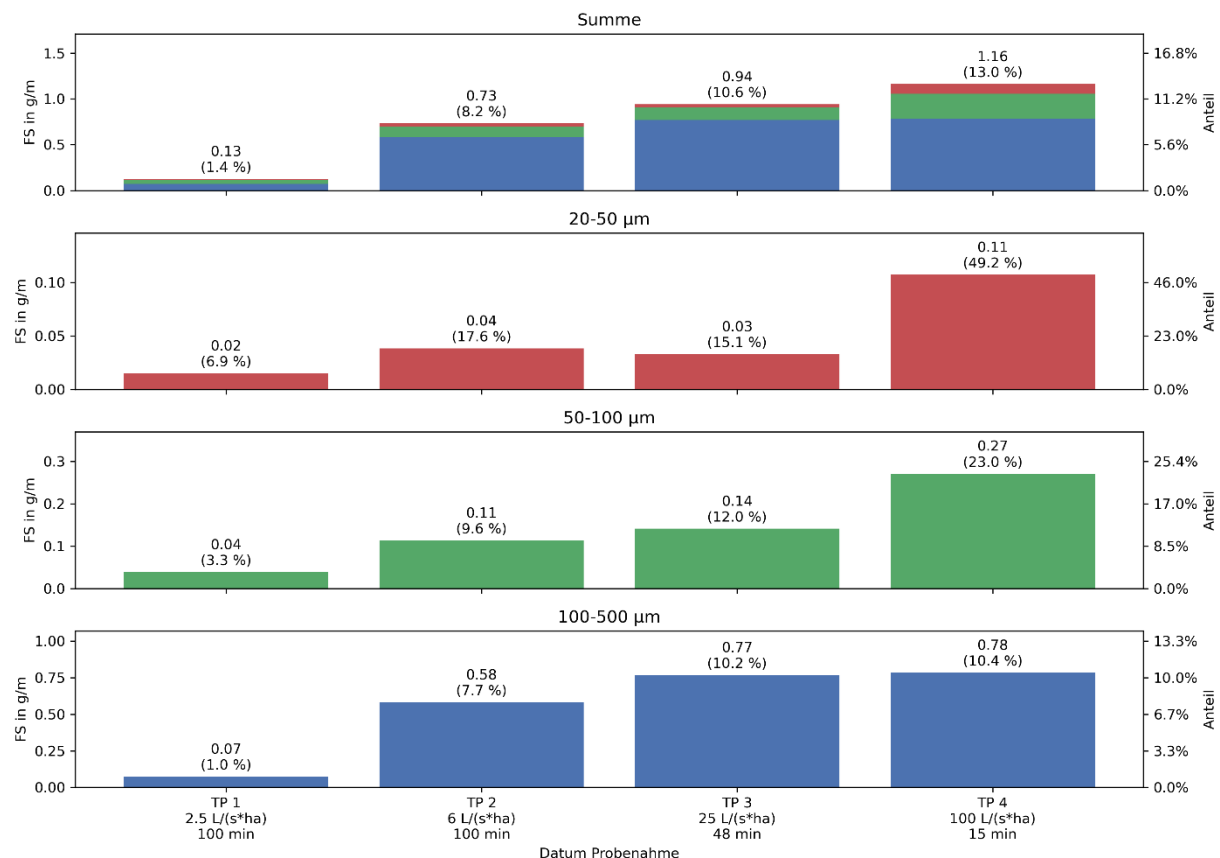


Abbildung 67 PNK künstlich Kurve, FS: Abgespülte Masse und Vergleich mit Aufkommen

Lediglich bei Teilversuch 4 wird deutlich, dass je mehr Abfluss desto mehr wird abgespült umso kleiner die Partikel werden. So werden noch in der größten Fraktion 100-500µm 10,4% von 7,5 g/m, in der mittleren Fraktionen 50-100µm schon 23% von 1,2 g/m und in der feinsten Fraktion 20-50 µm sogar 49,2 % von 0,2 g/m abgespült

Bezogen auf die Masse an abgespülten SBR konnte der für der oben beschrieben Zusammenhang zwischen Regenintensität und abgespülter Masse nicht bestätigt werden. Hier lag der größte abgespülte Anteil an SBR mit 3,9 % von 6,8 mg/m Gesamtmasse SBR, bei Teilversuch 2. Das traf auch für die Fraktionen 100-500 µm mit 5,8% von 3,9 mg/m und 50-100 µm mit 3,7 % von 0,6 mg/m zu. Für die feinste Fraktion 20-50 µm konnte lediglich für den Teilversuch 3 der abgespülte Massenanteil an SBR von 1,5% von 1,8 mg/m festgestellt werden.

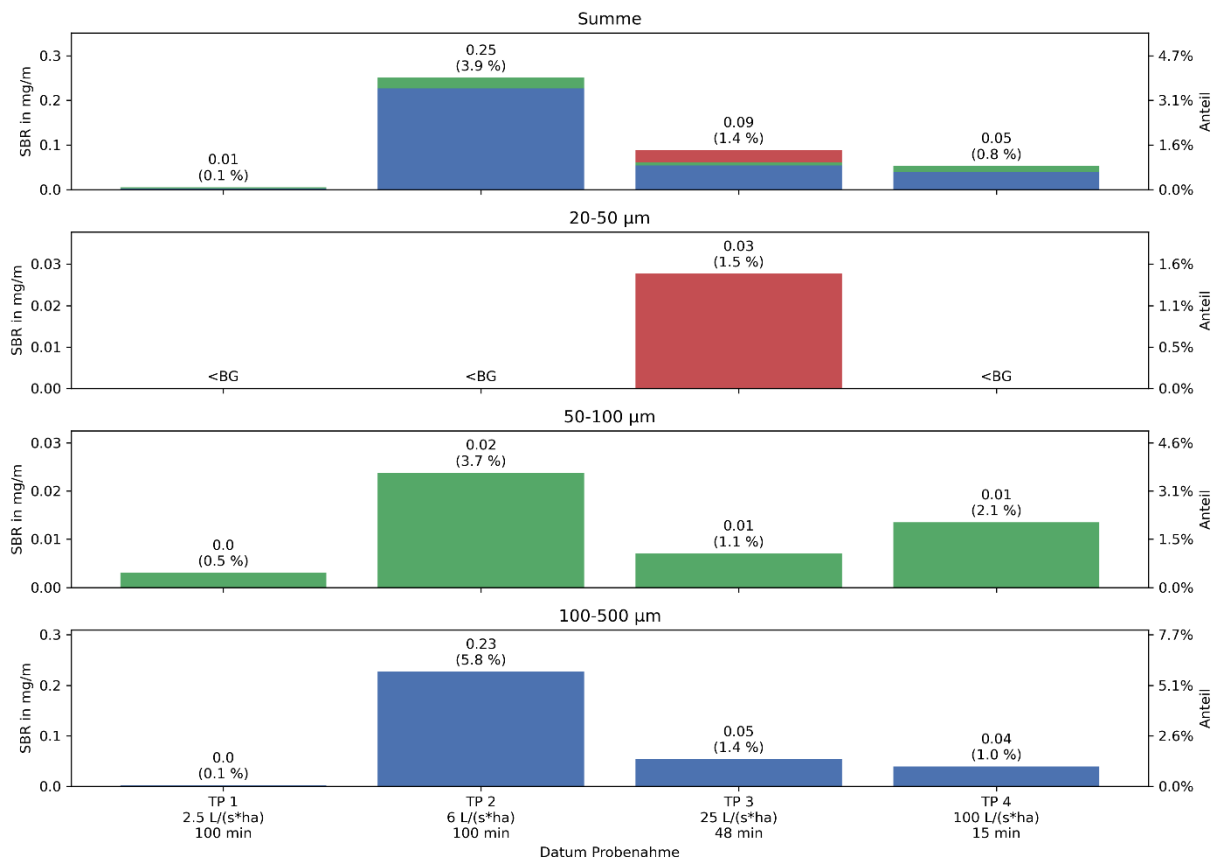


Abbildung 68 PNK künstlich Kurve, SBR: Abgespülte Masse und Vergleich mit Aufkommen

Die Messwerte lassen vermuten, dass sich SBR anders zu der Gesamtfeststoffmatrix verhält und eher auf der Fahrbahn liegen bleibt. Da es sich um eine Einzelmessung handelt sollten dieser Prozess noch weitergehend untersucht werden.

In einem weiteren Versuch konnte, wie in Abbildung 65 dargestellt, gezeigt werden, dass sich die Masse an abgespültem SBR mit zunehmendem Beprobungszeitraum erhöht. Hier ist jedoch wiederum auffällig, dass die abgespülte Masse (AFS) mit zunehmender Beprobungsdauer abnimmt.

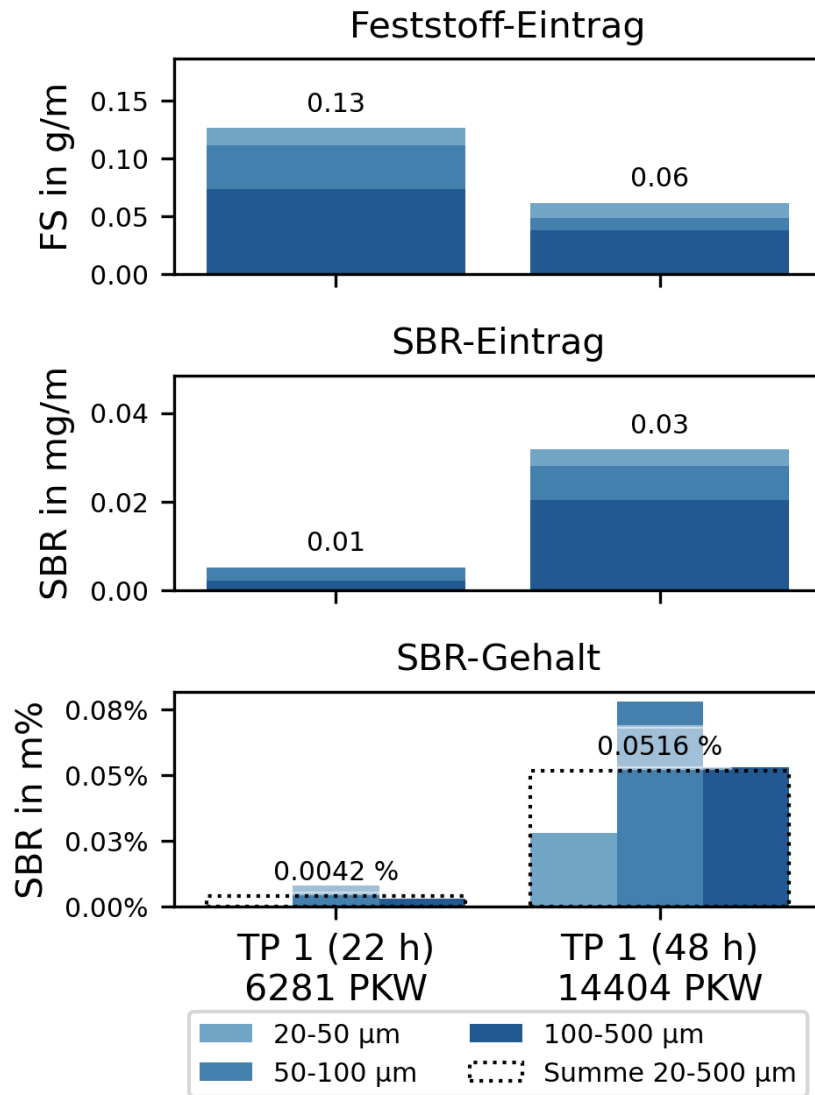


Abbildung 69: PNK künstlich Kurve, Variation der Akkumulationszeit

II.1.3.2. Kehrrichtuntersuchung Straße

Die Untersuchungen an dem Standort *Gerade* zur Massenverteilung über einen Straßenquerschnitt konnten bestätigen, dass sich Straßenkehrrecht vorwiegend im Randbereich (90 % (Pitt, et al., 1973) ; (Selbig, et al., 2013) und 96% (Grottker, 1987)) der Straße ansammelt. Die Ergebnisse aus fünf Querfegungen für die relative Massenverteilung aller Feststoffe sind in Abbildung 70 dargestellt. Es wurden 95,4 % der Feststoffe im äußersten Untersuchungsfeld (Spur1, Rinnsteinbereich) gefunden und 2,8 % im angrenzenden Bereich (Spur 2). In den drei straßenmittigeren Feldern lagen die Anteile zwischen 0,4 % und 0,8 %.

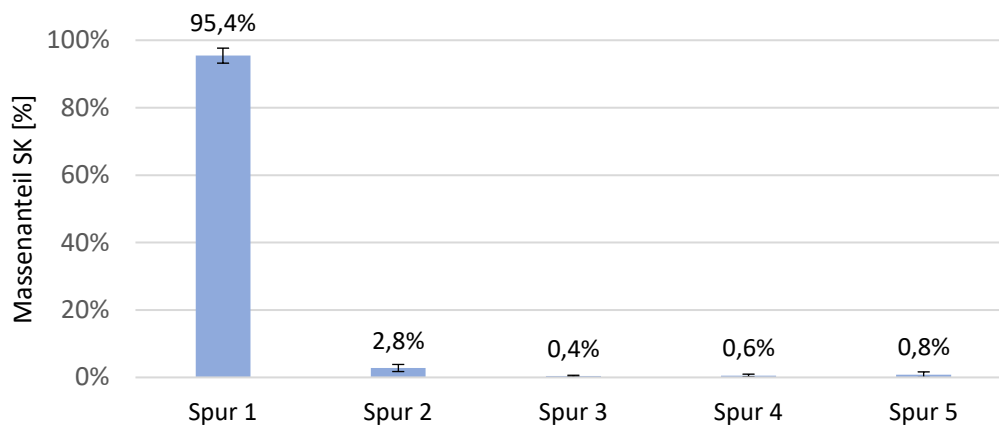


Abbildung 70: Massenverteilung der Querfegung

Die gemessenen über 98 % Feststoffe im Bereich von Spur 1 und Spur 2 bestätigen, dass der 1,6 m breiten Randbereich ausreichend ist, um Feststoffe von Straßenflächen repräsentativ zu beproben.

Weiter wurde der SBR Gehalt von drei Querfegungen bestimmt, um herauszufinden, wie sich der Reifenabrieb über den Fahrbahnquerschnitt verteilt. Weil für die Analyse nur der Korngrößenbereich 20 bis 500 µm untersucht wurde, wurden davon die relativen Massen je Spur an der Gesamtmasse von Feststoffen dargestellt.

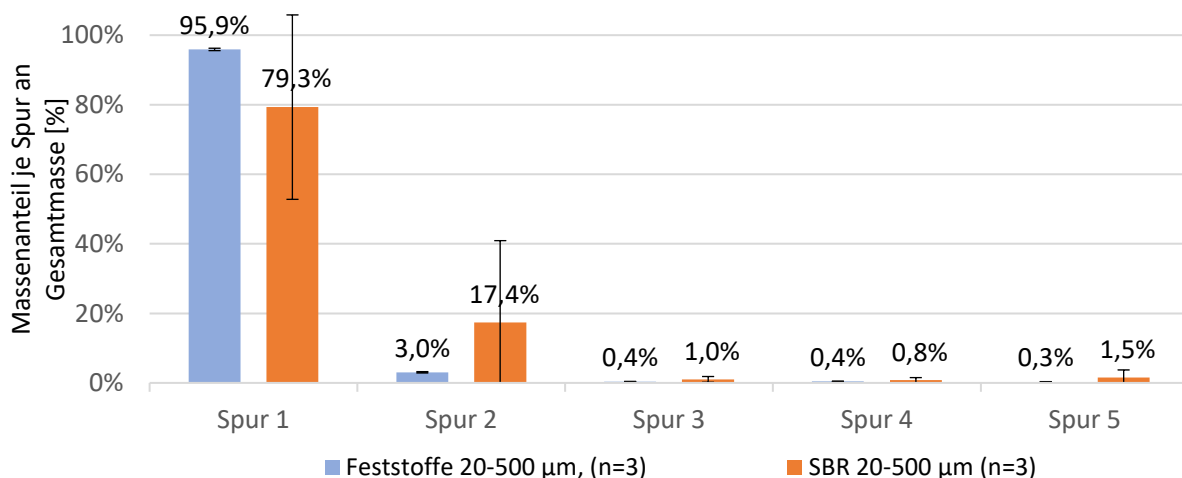


Abbildung 71: Massenverteilungen von SBR und Feststoffen für einen Fahrbahnquerschnitt

Es ist gut erkennbar, dass die Feststoffmassen zu größten Teilen auf Spur 1 (95,9 %) und Spur 2 (3,0 %) lagern. Die geringen Standardabweichungen der Massenverteilung auf allen Spuren verdeutlichen die Homogenität der Ergebnisse. Die Massenverteilung von SBR hingegen ist innerhalb der drei Messtage nicht so einheitlich, das zeigt sich in den hohen Standardabweichungen von Spur 1 (26,5 m%) und Spur 2 (23,5 m%). Dennoch lagert der Großteil des SBR auf Spur 1 (79,3 m%) und Spur 2 (17,4 m%).

Die Gesamtmassen nach Fraktionen von allen Tagesfegungen je Standort sind in Abbildung 72 dargestellt. Die Werte des aufgekehrten Straßenkehricht variieren zwischen 0,46 g/m*Rand am *Parkplatz* und 22,00 g/m*Rand am *Gehweg*. Diese großen Unterschiede lassen sich mit den verschiedenen Randbedingungen an den Standorten erklären. Es gibt in der näheren Umgebung des *Parkplatzes* kaum Vegetation und vorwiegend versiegelte Flächen. Zusätzlich sind 85 % der Proben des

Parkplatzes nicht im Bereich 20 – 500 µm enthalten. Die Fläche des *Gehwegs* besteht zur Hälfte aus kleinen Pflastersteinen, in dessen breiten Fugen sich viel Material ablagert bzw. als sandiges Material enthalten ist. Daher wurden bei den Kehrunen auch Feststoffe aufgenommen, die sich nicht innerhalb der vergangenen 24 Std. akkumuliert haben. Somit ist der Standort schwierig zu bewerten. Am *Schwedter Steg* ist die Probefläche umgeben von Grünflächen, sandigem Untergrund und dient als „Bremsstrecke“ für Radfahrer“, was die hohen Massen des Straßenkehrichts erklärt.

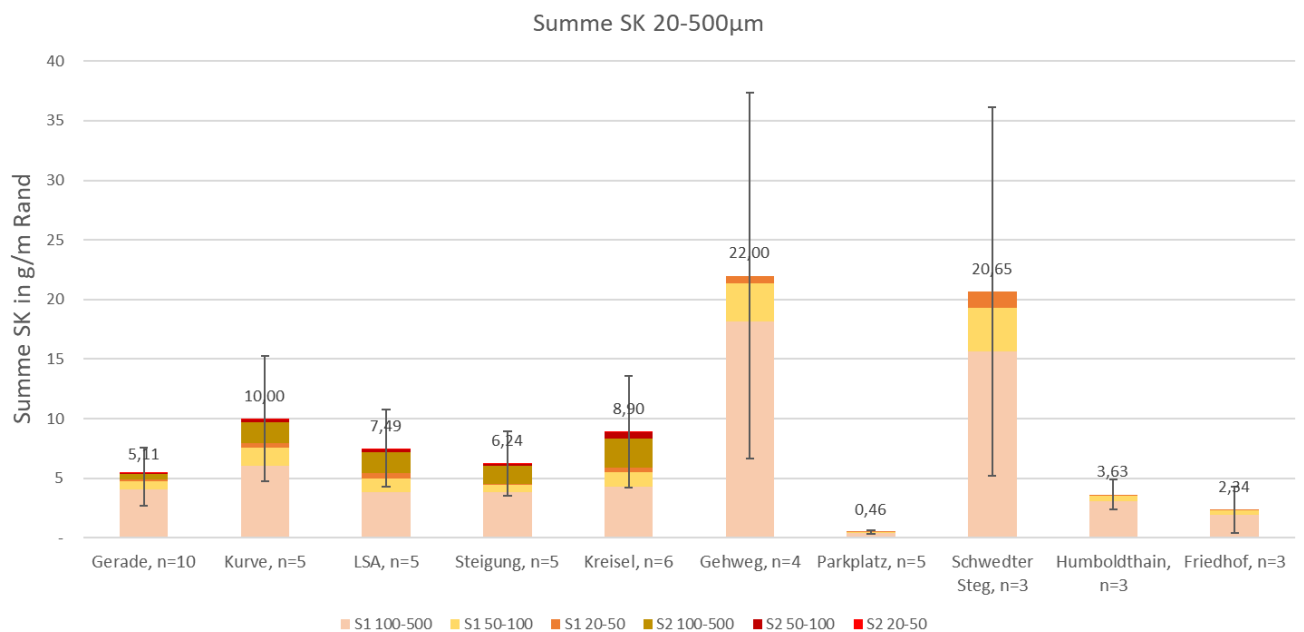


Abbildung 72: Summen Straßenkehricht

Neben den absoluten Straßenkehrichtmassen der Standorte wurden die relativen Massenverteilungen innerhalb der Fraktionen miteinander verglichen (siehe Abbildung 73). Über alle Standorte hinweg zeichnet sich ein ähnliches Bild der Korngrößenverteilung ab, lediglich der *Parkplatz* sticht mit einem besonders hohen Anteil (95 ± 1 %) in der größten Fraktion hervor, was sich nicht weiter erklären lässt. In der Fraktion 20 – 50 µm ist wenig Straßenkehricht (1 – 5 %) vorhanden. Die Standardabweichungen sind an vielen Standorten gleich oder größer als der Massenanteile der Fraktion. Der Bereich 50 – 100 µm weist größere Anteile Straßenkehricht (5 – 19 %) auf. In der größten Fraktion ist der größte Anteil Straßenkehricht (77 – 95 %). Das liegt einerseits an dem deutlich größeren Korngrößenbereich dieser Fraktion gegenüber den anderen. Andererseits beschreibt es gut das allgemeine Verhalten der Korngrößenverteilungen von Straßenkehricht.

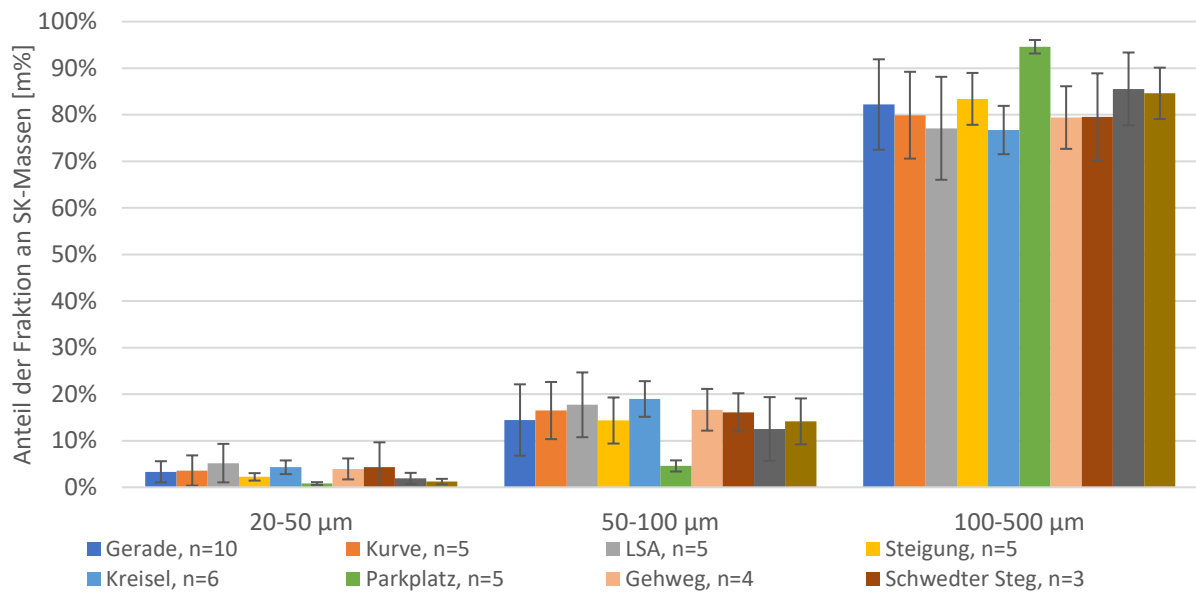


Abbildung 73: Massenverteilung von SK nach Fraktionen

Für die ermittelten Massen an SBR/mRand zeigen sich deutliche Unterschiede. Der Mittelwert der *Kurve* liegt bei $34,43 \pm 36,06$ (mg SBR/m*Rand) am höchsten und der Wert der Lichtsignalanlage (LSA) liefert den zweithöchsten SBR-Wert von $16,03 \pm 8,12$ (mg/m*Rand). Die *Gerade* $5,46 \pm 4,21$ (mg SBR/m*Rand) und die *Steigung* $4,50 \pm 3,89$ (mg SBR/m*Rand) zeigen geringere Werte liegen aber im gleichen Größenbereich. Der Standort *Kreisverkehr* $0,49 \pm 0,45$ (mg SBR/m*Rand) hat innerhalb der fünf Straßenstandorte mit Abstand den geringsten SBR-Summenwerte, was vermutlich daran liegt, dass der Probenahmeort im Kreisverkehr in einem geraden Abschnitt liegt. Die drei weiteren Kehrflächen *Gehweg*, *Parkplatz* und *Schwedter Steg* liegen im Bereich von Faktor drei unter, bzw. über den Messwerten des *Kreisverkehrs*. Die Standardabweichungen sind hoch und liegen zwischen 21 % (*Schwedter Steg*) und 141 % (*Parkplatz*) des Summenwertes. In der Kornfraktion 100 – 500 µm wurde an allen Standorten am meisten SBR gemessen. Trotz der stark schwankenden Messwerte lässt sich erkennen, dass die Standorte *Kurve* und *Lichtsignalanlage* mit höherer Belastung resultierend aus der Fahrsituation deutliche mehr SBR aufweisen als die Standorte *Steigung* und *Gerade* und somit als Hot-Spot einzustufen sind.

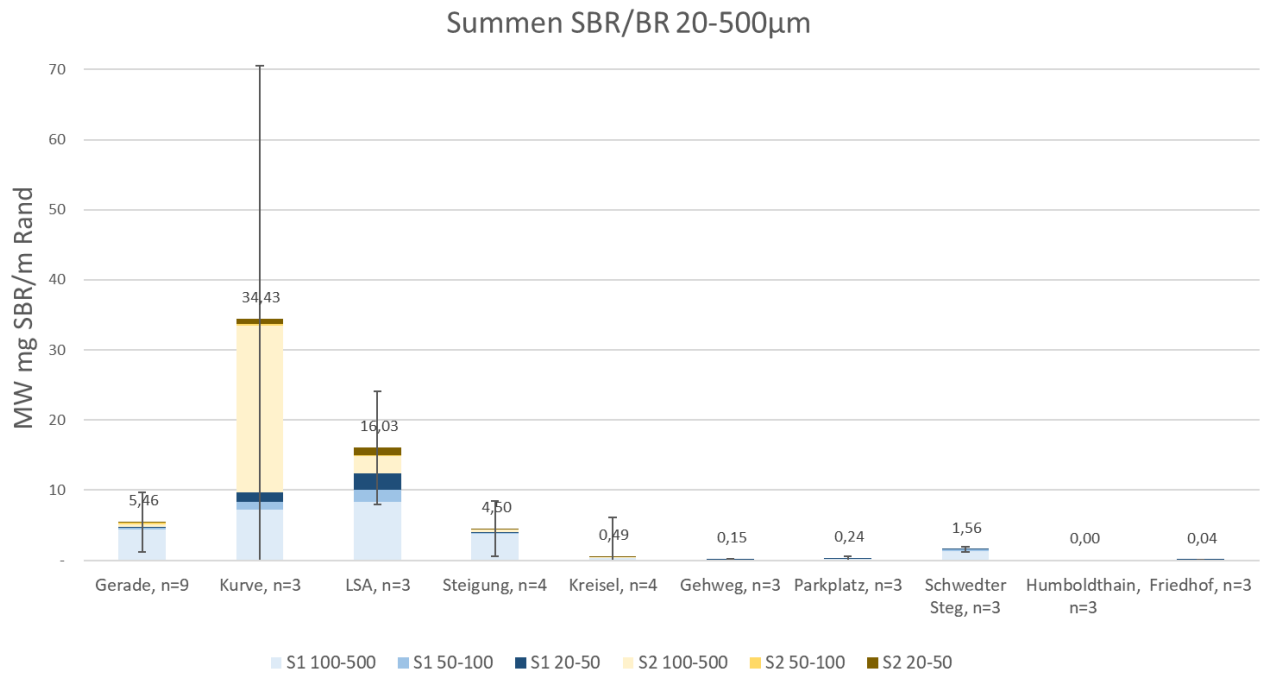


Abbildung 74: SBR Gesamtsummen

II.1.3.3. In situ-Messung Probenahmekorb

II.1.3.3.1. Messstandorte Gerade und Kurve

Die Projektpartner TU Berlin Siwawi, GKD, IPS und die BWB, haben intensiv an der Konzeptionierung und der technischen Realisierung der in situ Probenahmekorbversuche zusammengearbeitet.

Im Projektzeitraum gab es insgesamt nur sehr wenige Regenereignisse die zur Einschätzung der abgespülten Massen an SBR herangezogen werden konnten. Aus diesem Grunde wurden die vorher beschriebenen Kehrrichtuntersuchungen auch entsprechend intensiv durchgeführt. In der nachfolgenden Abbildung sind dennoch fünf erfolgreich durchgeführte in situ Probenahmen vom Messstandort Kurve und vier vom Messstandort Gerade, im Vergleich zu den definierten Abspülversuchen (Kapitel 1.3.1.1 Abspülversuche mittels Beregnungsmodul und Abspül-Lanze), dargestellt. Die in Situ Regenereignisse lassen sich mit der ersten (TP1) und zweiten (TP2) Teilprüfung der definierten Abspültests vergleichen. Hier liegen die abgespülten Feststoffmassen für die in situ Messung für die besonders kleinen Regen (0,22 bis 3,6 l/s*ha) trotz kürzerer Trockenzeit (6,3- 23 h) mit 4,03g – 6,87g zu 0,76g für den definierten Versuchsaufbau deutlich höher was vermutlich im Wesentlichen an dem größeren Einzugsgebiet des real abgespülten Regens an dieser Messstelle liegt. Eine eindeutige Korrelation zwischen abgespülter Masse und Länge der Trockenzeit lässt sich hier nicht erkennen. Für die leichten Regen entsprechend Teilversuch 2 werden zwar Gesamtmassen ähnlicher Größenordnung für die in situ Probenahmen an den Standorten Kurve und Gerade abgespült die aber angesichts der mit bis zu 180 Stunden Trockenzeit zu 24 Stunden Trockenzeit für die definierten Abspülversuche bei kleinerer Anschlussfläche vergleichsweise niedrig zu sein scheinen.

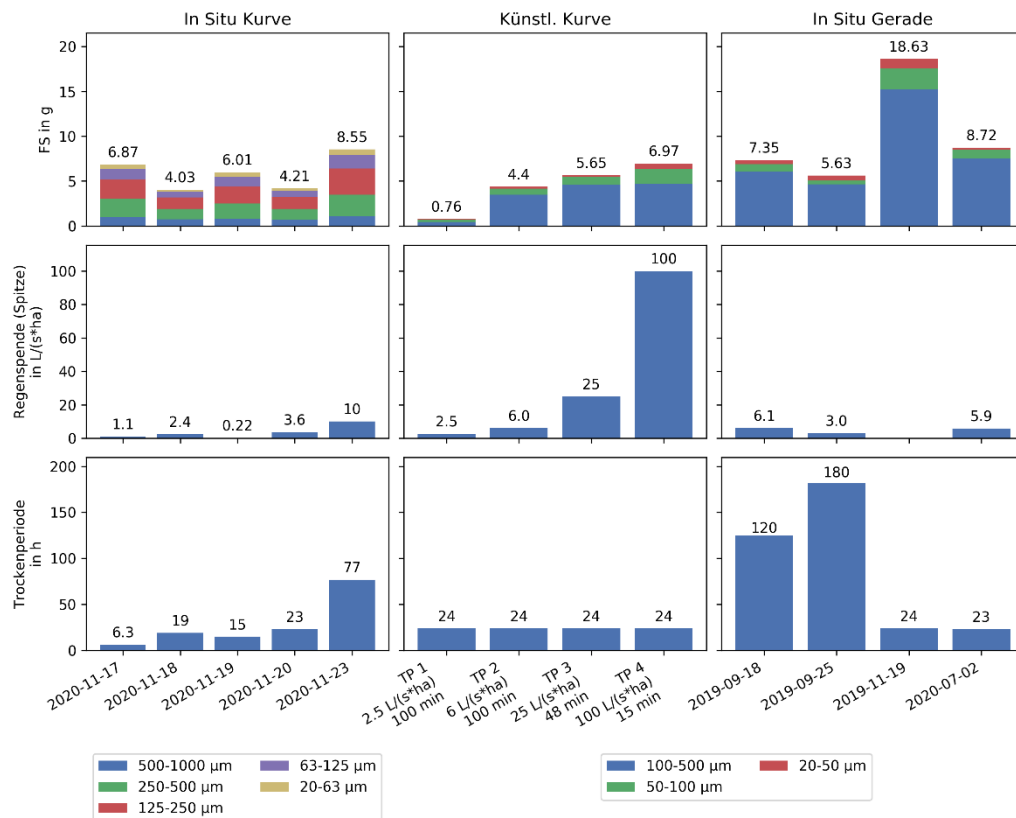


Abbildung 75: Einfluss von Trockenperiode und Regenspende auf FS

Für die abgespülte Masse an SBR konnte für den Standort Gerade nach einer Trockenzeit von 180 Stunden für die in situ Beprobung eines leichten Regens gemäß Teilprüfung 2 mit 4,12 mg eine vergleichsweise große Menge zu 0,55 mg für eine Trockenzeit von 23 Stunden gemessen werden. Im Vergleich zum ersten Messtag am 18.09.2018 mit 0,37 mg bei 120 Stunden Trockenzeit kann sich aber auch hier nicht der Zusammenhang zwischen Länge der Trockenzeit zu abgespülter Masse an SBR für vergleichbare Regen eindeutig zeigen lassen.

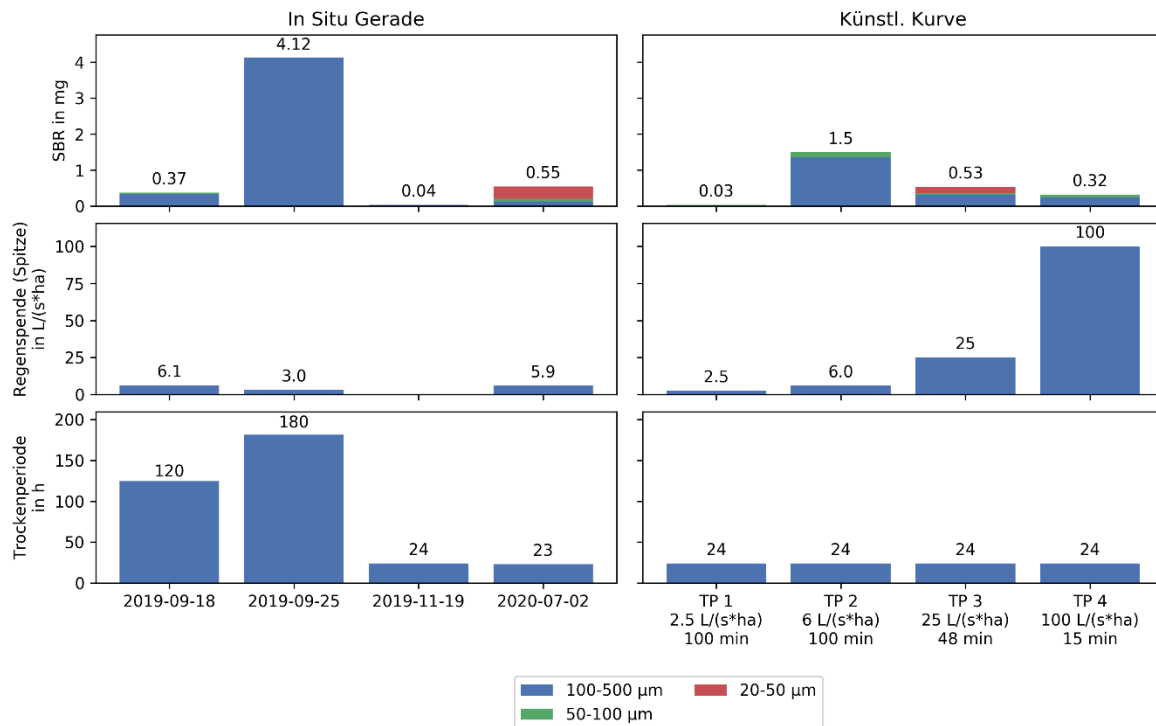


Abbildung 76: Einfluss von Trockenperiode und Regenspende auf SBR

Die vergleichsweise uneinheitlichen Messwerte zwischen künstlichem Regen und den in situ Versuchen machen deutlich, dass es neben den Parametern Trockenzeit und Regenintensität noch weitere Transportprozesse geben muss, die wesentlich zur Verteilung der Feststoffe im Bereich 20µm – 500µm beitragen.

Autobahnabfluss Halensee

Im Projekt konnten von fünf erfolgreich gewonnenen Straßenwasserablaufproben drei Proben auf den Parameter SBR analysiert werden. In Abbildung 77 ist für eine längere Trockenzeit vor dem beprobten Abfluss auch eine größere Masse SBR festzustellen. Die entsprechend dem DTV zuzuordnenden KFZ Zahlen der Probenahmen vom 27.11.2019 und 25.09.2020 im Vergleich zum 26.02.2020 lassen die Vermutung zu, dass je mehr Fahrzeuge das Einzugsgebiet befahren desto größer ist auch die abgespülte Masse an SBR. Der Vergleich der Probenahmen vom 27.11.2019 und 25.09.2020 zueinander lässt auch vermuten, dass die Masse an abgespülten SBR noch von weiteren Faktoren abhängig sein muss, als Regenmenge und gefahrene Kfz im Einzugsgebiet.

Datum	Verkehr	Zeit seit letztem Regen	AFS (mg/l)	SBR (mg/l)				Zeitpunkt der Probenahme	Regenmenge (mm) Regenschreiber Halensee	Probenahmetechnik	Probenvolumen
				20 - 50 µm	50 - 100 µm	100 - 500 µm	Gesamt				
27.11.2019	1.050.000	5 Tage	133	0,337 (2,2 % /FS)	0,074 (2,1 % /FS)	0,016 (1,4 % /FS)	0,42 (2,11 % /FS)	Über 90 Minuten ab Beginn des Durchflusses	0,4	Handprobenahme	SBR (3,5 l) Rest (10 x 250 ml)
26.02.2020	70.000	8 Stunden	51	0,007 (0,7 % /FS)	0,003 (0,4 % /FS)	0,008 (0,5 % /FS)	0,02 (0,52 % /FS)	Über 30 Minuten ab Beginn des Durchflusses	0,5	Probenehmer (vor Ort gestartet)	SBR (18,7 l) Rest (2,0 l)
10.03.2020	210.000	1 Tag	74	verlustig				Über 90 Minuten ab 115 Minuten nach Beginn des Durchflusses (während Probenahme wieder Zunahme des Durchflusses)	0,4 – 0,6	Handprobenahme	SBR (19,4 l) Rest (10 x 600 ml)
02.09.2020	420.000	2 Tage	43	verlustig				Über 90 Minuten ab Beginn des Durchflusses	2,0	Schlauchpumpe (SBR) Handprobenahme (AFS & alle anderen Parameter)	SBR (180 l) Rest (10 x 600 ml)
25.09.2020	3.150.000	15 Tage	871	0,079 (0,05 % /FS)	0,067 (0,08 % /FS)	0,201 (0,22 % /FS)	0,35 (0,11 % /FS)	36 Minuten, ab 15 Minuten nach Beginn des Durchflusses	4,0 - 5,0	Probenehmer (automatisch über die Leitfähigkeit)	SBR (47,3 l) Rest (1 l)

Abbildung 77: SBR Werte bei unterschiedlichen Trockentagen, im Zulauf des Bodenfilters Halensee²

Die in Abbildung 78 dargestellten Messwerte zeigen für kleinere Regenmengen von 0,4- 0,6 mm ähnliche Konzentrationen von AFS und AFS_{fein}, was bedeutet, dass kaum größere Partikel > 63 µm abgespült wurden. Lediglich für den Messtag am 25.09.2020 liegen die AFS Werte deutlich über den AFS_{fein} Werten bei deutlich mehr Verkehr und einer Regenmenge von max. 5 mm. Hier wird deutlich, dass die Behandlung der Feianteile <63µm im Straßenablaufwasser, bezogen auf die möglichen eingetragenen Massen eine wichtige Rolle spielen. Für die Parameter Kupfer und Zink, welche immer wieder in Bezug auf fahrzeugbezogene Immissionen im Straßenablaufwasser herangezogen werden, lassen sich, aus den dargestellten Werten, keine eindeutigen Zusammenhänge zwischen Verkehr und Konzentrationen erkennen. Für die Parameter CSB (chemischer Sauerstoffbedarf) homogenisiert und CSB filtriert hingegen ist zu erkennen, dass die Konzentrationen für längere Trockenzeiten und mehr gefahrenem Verkehr im Einzugsgebiet ansteigen.

² hochgerechnet aus FIS-Broker DTV Zahlen (FIS Broker, 2014) min. : 170.000 Kfz/d, med. : 210.000 Kfz/d, max. : 250.000 Kfz/d (gerechnet mit mittlerer Zahl)

Datum	Verkehr	Zeit seit letztem Regen	AFS (mg/l)	AFS fein (mg/l)	CSB homogenisiert (mg/l)	CSB filtriert (mg/l)	Kupfer (mg/l)	Zink (mg/l)	TR (mg/l)	oTR (mg/l)	oTR/TR	SBR (mg/l)
27.11.2019	1.050.000	5 Tage	133	115	205	50	0,24	4,20	x	x	x	0,42
26.02.2020	70.000	8 Stunden	51	46	77	25	0,13	0,71	163	94	58%	0,02
10.03.2020	210.000	1 Tag	74	72	x	x	0,64	0,14	x	x	x	verlustig
02.09.2020	420.000	2 Tage	43	17	100	46	0,29	1,96	183	66	36%	verlustig
25.09.2020	3.150.000	15 Tage	871	42	823	86	1,1	2,9	1.048	464	44%	0,35

Abbildung 78: Zusätzliche Werte bei unterschiedlichen Trockentagen, im Zulauf des Bodenfilters Halensee³

In zwei orientierenden Messungen des AFS im Ablauf des Bodenfilters konnten keine relevanten Massen ermittelt werden, was die besonders gute Reinigungsleistung des Bodenfilters für partikuläre Stoffe (insbesondere Partikel < 63 µm) und ggf. weitere Stoffe unterstützt.

Flughafen

Da es nicht möglich war am Flughafen Schönefeld einen Probenahmekorb zu installieren wie auch Feststoffmaterial mittels Kehrriechtprobenahme von der Start und Landebahn zu gewinnen wurde entsprechendes Rinnenmaterial und Bodenproben ca. 20 cm neben der Start und Landebahn aus ca. 4-5 cm Tiefe unterhalb der Grasnarbe, beprobt.

Das Rinnensediment wurde aus einer Regenabflussrinne wie in der Abbildung 79 dargestellt gewonnen.

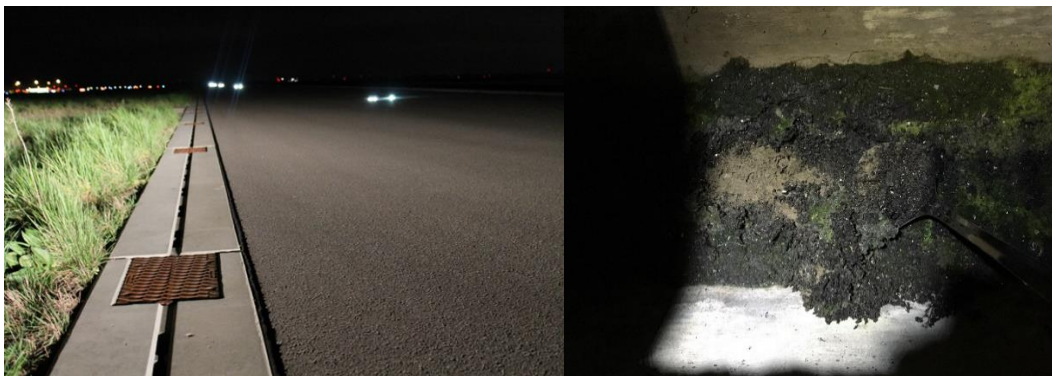


Abbildung 79: Ablaufrinne(links) und Rinnensedimen (rechts) der Start- und Landebahn

Bei der Analyse des Probenmaterials konnte weder SBR noch NR detektiert werden, was vermuten lässt, dass sich der Abrieb der Flugzeugreifen überwiegend auf der Start und Landebahn festsetzt und anschließend bei der turnusmäßigen Spezialreinigung der Landebahn entfernt wird. Eine weitere

³ hochgerechnet aus FIS-Broker DTV Zahlen (FIS Broker, 2014) min. : 170.000 Kfz/d, mid. : 210.000 Kfz/d, max. : 250.000 Kfz/d (gerechnet mit mittlerer Zahl)

Vermutung ist, dass durch die starke Belastung Reifenmaterial zusätzlich verdampfen könnte. Für weitere Untersuchungen solle ggf. überprüft werden, ob es statt den Markern SBR und NR für den Nachweis von Flugzeugreifenmaterial in Umweltproben andere geeignete Marker gibt.

II.1.3.4. Luftmessung

Die Projektpartner WESSLING und TU Berlin Siwawi, haben intensiv an der Konzeptionierung und der technischen Realisierung der in situ Luftmessungen zusammengearbeitet.

Im Projekt orientierende Luftmessungen von Außenluft in Bezug auf Reifenabrieb durchgeführt werden. Dazu sollten ein Probenahmekonzept erarbeitet und die gesammelten Partikel hinsichtlich einer Größenverteilung und des SBR/BR-Gehalts analysiert werden. Es wurden 2018 und 2019 Messkampagnen durchgeführt. Im Rahmen der Messkampagne 2018 erfolgte die Bestimmung der Partikelgrößenverteilung mittels REM, 2019 mittels automatisierter Lichtmikroskopie. Die Bestimmung SBR/BR erfolgte mittels Pyrolyse-GC/MS.

II.1.3.4.1. Messkampagne 1 (2018)

Die Probenahme erfolgte am 18.09.2018 in Berlin Abbildung 80 zeigt den Messaufbau; durchgeführt wurde ein Aktivsammlung durch eine Vakuumpumpe und auf einen Goldkernporenfilter der in einem Probenahmekopf eingelassen war. Die Messung erfolgte in Anlehnung an BIA 7485. Die Messdauer betrug 8h. Das Probenahmenvolumen lag im Bereich von 1m³ je Messtag und je Standort.



Messpunkt Probenahme von / bis	Probenahme- Intervall 1	Probenahme- Intervall 2	Probenahme- Intervall 3
Böttgerstr. / Badstr.	05:17 - 08:57	09:07 - 12:59	13:07 - 18:17
Hochstr. / Böttgerstr.	05:35 - 09:08	09:15 - 13:05	13:10 - 18:00
Hochstr. 21	05:22 - 09:15	09:21 - 13:16	13:20 - 18:23
Hochstr. 42	05:36 - 09:26	09:36 - 13:22	13:25 - 18:48
Messpunkt Probenahmenvolumen [m ³]	Probenahme- Intervall 1	Probenahme- Intervall 2	Probenahme- Intervall 3
Böttgerstr. / Badstr.	0,4453	0,4696	0,6349
Hochstr. / Böttgerstr.	0,4342	0,4733	0,5907
Hochstr. 21	0,4721	0,4761	0,6160
Hochstr. 42	0,4738	0,4656	0,6596

Abbildung 80: Probenahmeort und Messaufbau

Das Probenmaterial wurde im weiteren Verlauf von den Filtern gespült und ein Aliquot zunächst zur Ausmessung der Partikelgrößen mittels REM untersucht.

Abbildung 81 zeigt beispielhaft die Partikelgrößenauswertung der Luftprobe 18-151391-04 (Hochstraße).

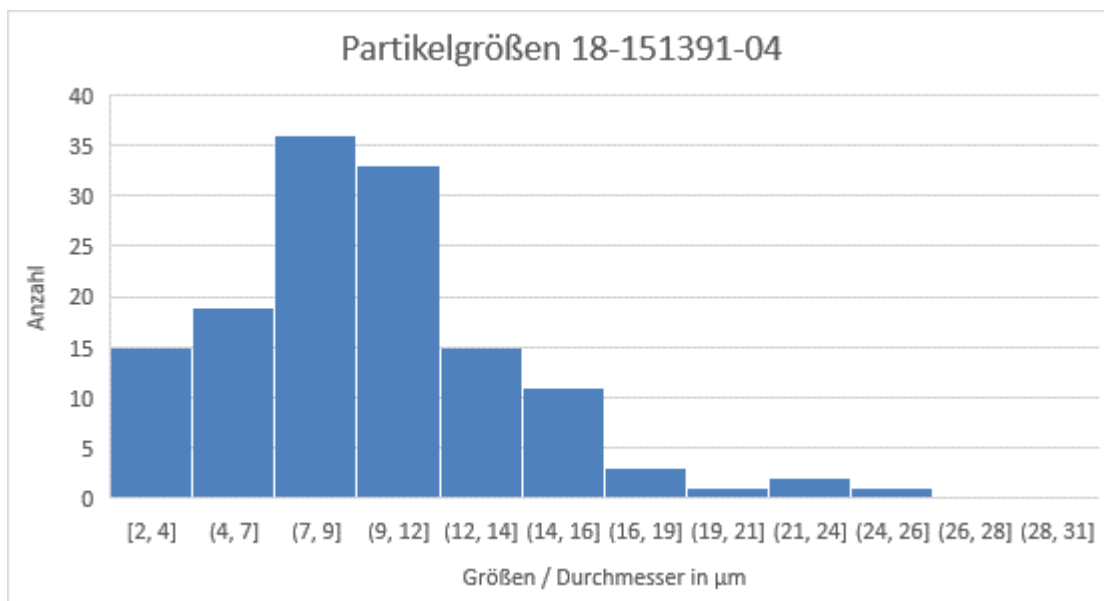


Abbildung 81: Luftprobe 18-151391-04 (Hochstraße) mit den zugehörigen Durchmesser

Die in Abbildung 81 dargestellten Partikelgrößen der Luftprobe zeigten kleinste Partikel mit einer Größe von 2 µm. Der größte Durchmesser lag bei einer Größe von 26 µm. Den höchsten Anteil machten Partikel mit einer Größe von 7 und 12 µm mit einer Anzahl von 30 aus. Die Analyse differenziert nicht die Partikelart

Das übrige Material wurde ohne weitere Probenvorbereitung eingetrocknet und mittels Pyrolyse-GC/MS analysiert.

Die Ergebnisse zeigten unplausibel hohe Messwerte an SBR/BR [µg/m³]. Zurückgeführt wurde dies auf einen technischen Gerätefehler. Somit wurden die Ergebnisse nicht weiter berücksichtigt.

Die Probenahme und Analysen der Messkampagne 2 fanden 2019 und 2020 statt.

Die Bestimmung der Partikelgrößenverteilung erfolgte aufgrund einer technischen Aufrüstung im Labor mit dem Mikroskop eines Raman-Mikroskops. Die Probenahme wurde wie beschrieben an mehreren Standorten durchgeführt.

II.1.3.4.2. Bestimmung der Partikelgrößenverteilung

Die Partikel wurden sind auf dem Substrat verblieben und wurden mit der Mikroskopie-Einheit des Raman-Mikroskops untersucht.

Tabelle 23 zeigt die Übersicht der gemessenen Proben und Abbildung 82 die Partikelgrößenverteilung.

Tabelle 23: Probenübersicht

Probennummer	Bezeichnung	Probenahmedatum
19-202247-03	Messpunkt 3 (Gerade 50 km/h gegenüber Hochstr. 21, 13357	23.10.2019
19-202247-04	Messpunkt 4 (Steigung, Hochstr. 42, südöstlich 13357 Berlin	23.10.2019
19-202247-09	Messpunkt 3 (Gerade 50 km/h gegenüber Hochstr. 21, 13357 Berlin)	24.10.2019

Probennummer	Bezeichnung	Probenahmedatum
19-202247-10	Messpunkt 4 (Steigung, Hochstr. 42, südöstlich 13357 Berlin)	24.10.2019
19-202247-13	Messpunkt 3 (Gerade 50 km/h gegenüber Hochstr. 21, 13357 Berlin)	25.10.2019
19-202247-14	Messpunkt 4 (Steigung, Hochstr. 42, südöstlich 13357 Berlin)	25.10.2019

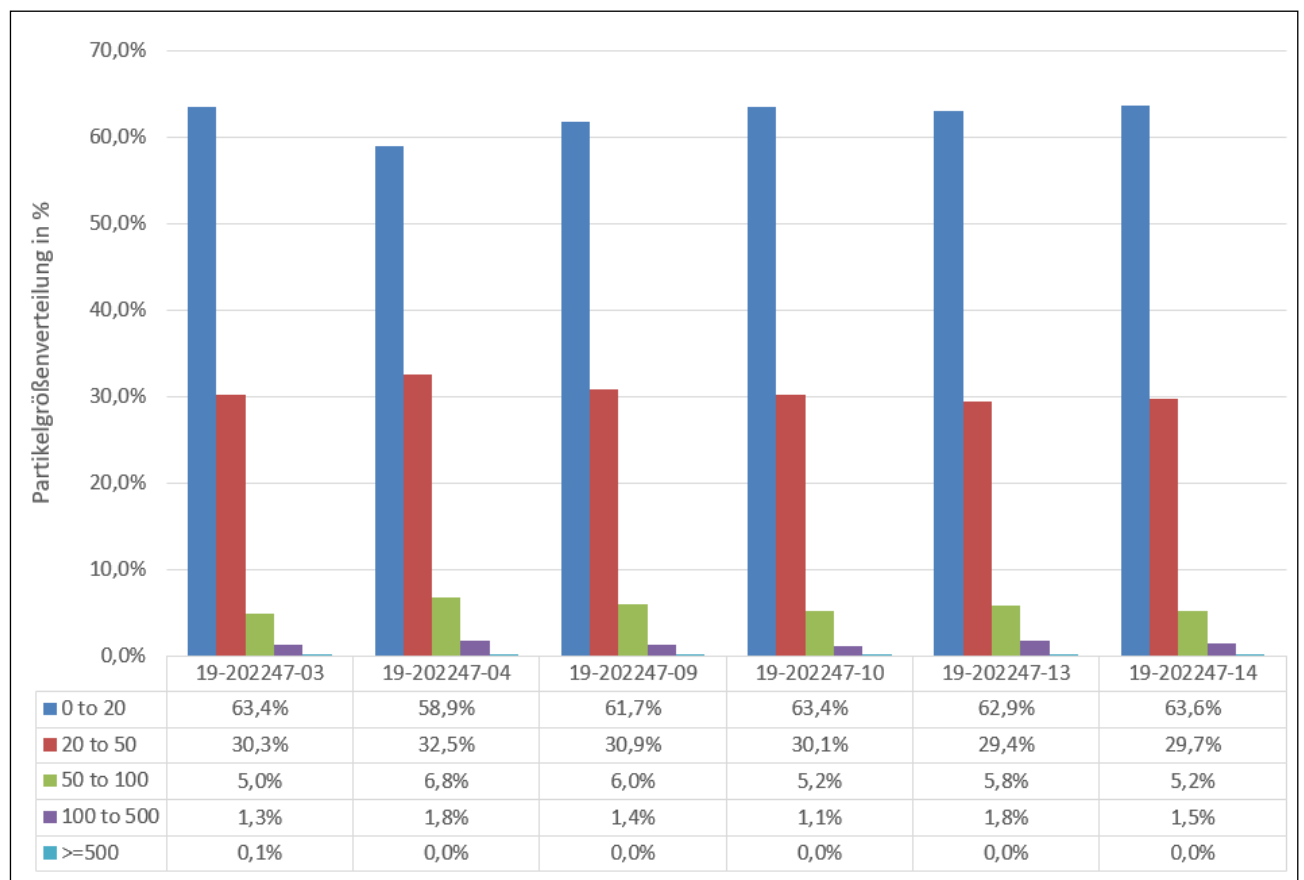


Abbildung 82: Partikelgrößenverteilung Luftmessungen

Der höchste Anteil der Partikel wurde in der Fraktion $< 20\mu\text{m}$ detektiert. Die Anzahl der Partikel lag zwischen 48.875 und 162.954 mit einer minimalen Größe von $2,43\mu\text{m}$. Die Untersuchung zeigte keine Differenzierung der vorhandenen Partikelarten.

II.1.3.4.3. Bestimmung der SBR/BR-Gehalt:

Die Proben wurden gemäß Kapitel II.1.1.4.2 analysiert. Eine Probenvorbereitung erfolgte nicht, da der Anteil an Störstoffen gering war und keinen Einfluss auf die Messung hatte (Matrixeffekte). Zudem wurde auch keine Fraktionierung durchgeführt, was unter Umständen zu Partikelverlusten geführt hätte.

Abbildung 83 zeigt eine Übersicht der SBR/BR-Gehalte.

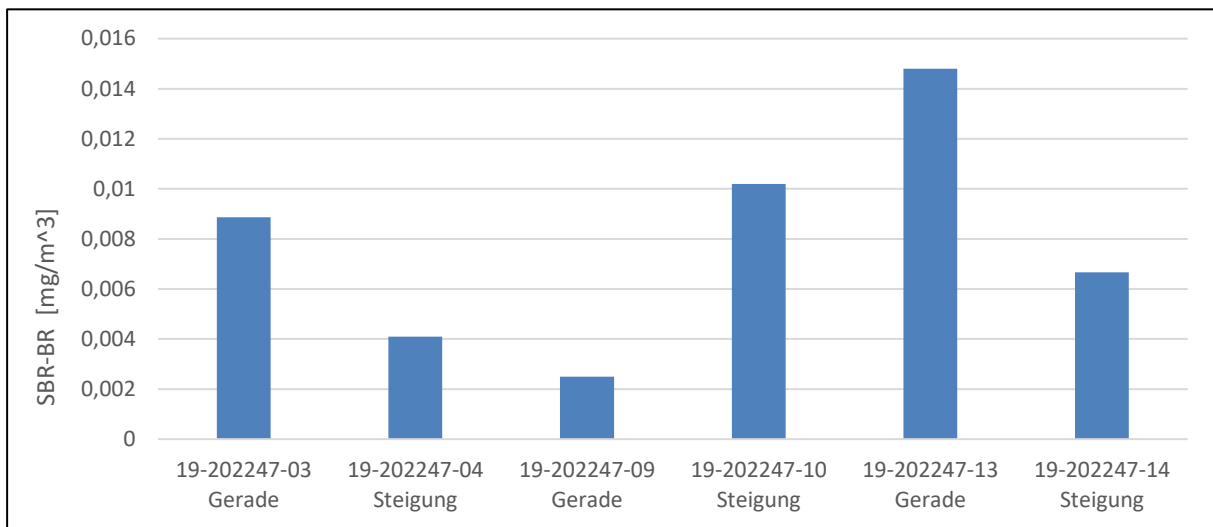


Abbildung 83: SBR/BR Gehalte von Luftmessungen

Die Konzentrationen des Parameters SBR/BR lagen im Konzentrationsbereich zwischen $0,004 \text{ mg/m}^3$ und $0,0148 \text{ mg/m}^3$, das entspricht 2 bis 13 % (w/w). Die gemessenen Konzentrationen lagen im Größenbereich von aktuellsten Literaturdaten (Höchstkonzentration: $0,00191 \text{ mg/m}^3$ und 7,5%) in einem Größenbereich. Die in diesem Projekt gemessenen Höchstkonzentrationen lagen maximal um den Faktor 8 höher (mg/m^3) bzw. um den Faktor 3 höher (% w/w). (Baensch-Baltruschat, et al., 2020)

Zusammenfassend zeigte die Untersuchung, dass Reifenabriebpartikel in der Außenluft im Straßenverkehr vorhanden sind. Thermoanalytische Methoden wie die Pyrolyse-GC/MS sind nicht in der Lage Partikelgrößen zu detektieren, so dass für eine vollständige Charakterisierung eine Kombination von analytischen Methoden notwendig ist.

II.1.4. Untersuchung ausgewählter Maßnahmen

II.1.4.1. Untersuchung Straßenreinigung

Die Projektpartner IPS, TU Berlin Siwawi, und die BSR, haben intensiv an der Konzeptionierung und der technischen Realisierung der Maschinenkehrversuche zusammengearbeitet.

Für die Bewertung des Einflusses der Straßenreinigung als Senke der Reifenabriebemissionen und -immissionen wurden umfangreiche Kehrversuche in einer Halle der Berliner Stadtreinigung und in situ in der Clayallee in Berlin durchgeführt.

Es wurden zwei Testreihen, nach Inaugenscheinahme der zur Verfügung stehenden Fahrzeuge, durchgeführt. Dazu wurde ein Fahrzeug aus dem aktuellen und auch zukünftigen Bestand der Berliner Stadtreinigung ausgewählt. Dieses ist PM10 zertifiziert ist als wendiges Allroundfahrzeug auf Straßen und auch großen Plätzen unterwegs. Es wird aller Voraussicht nach langfristig im Einsatz bleiben. Es wurde darauf verzichtet die gleichen Versuche mit älteren Fahrzeugtypen zu verwenden, da diese zu dem damaligen Zeitpunkt kurz vor der Ausmusterung waren.

Zwei Testreihen wurden in einer Halle auf einem Betriebsgelände der BSR unter vorgegebenen Bedingungen durchgeführt. Dabei kam das ausgesuchte Fahrzeug der BSR und sowohl aufgesammelter Straßenkehrschutt als auch ein selbst erstelltes künstliches Substrat, welches dem Straßenkehrschutt von der Korngrößenverteilung nahekommt, zum Einsatz.

II.1.4.1.1. Erster Kehrversuch:

Die Flächenbelegungen lagen bei 125-200 g/m². Der Straßenkehrricht wurde auf einer Berliner Nebenstraße aufgenommen. Das künstliche Substrat wurde aus Sand 0-2, Millisil W4 und einem kryogemahlenen Reifenmehl (LKW-Reifen) gemischt.

Für die einzelnen Versuche wurden die Flächen mit Straßenkehrricht bzw. künstlichem Prüfsubstrat belegt. Die Belegung erfolgte mit einem auch in der Garten- und Landwirtschaft verwendeten Gerät, das eine einstellbare Dosierung der aufgetragenen Menge ermöglicht. Die Güte der Dosierung war allerdings von der Korngrößenverteilung und dem Feuchtegrad des Materials abhängig. Daher musste bei den Versuchen auf den Zustand der Eingangsmaterialien geachtet werden.

In Abbildung 84 ist ein Auszug aus der Fotodokumentation des 1. Hallenversuchs zur Ermittlung der Kehrreifeffizienz dargestellt.

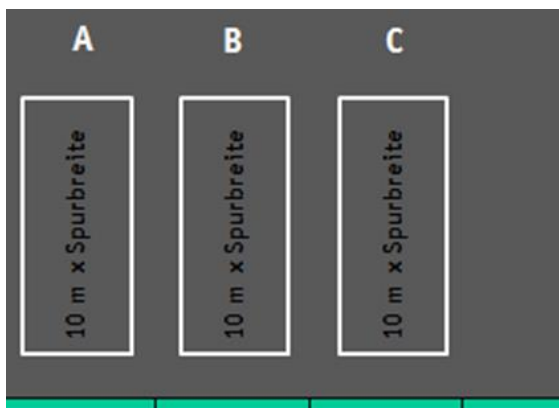
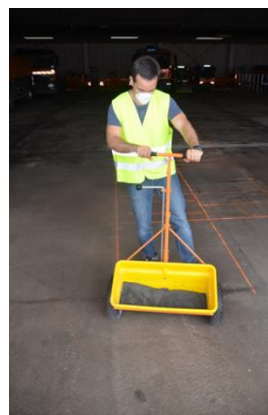




Abbildung 84: Fotodokumentation des ersten Kehrversuchs in der Halle zur Ermittlung der Kehreffizienz von Reifenantrieb

Folgende Reinigungsparameter der Kehrmaschine wurden geprüft:

- Geschwindigkeit:
 - Normale Geschwindigkeit
 - Schnelles Fahren
 - Langsames Fahren
- Kehren:
 - Feucht
 - Trocken
- Saugleistung:
 - Normal

Die Besendrehzahl und der Besenandruck wurden nicht weiter variiert, weil nach Aussage der BSR der Materialverschleiß der Stahlbesen exorbitant zunähme.

Jeder Versuch wurde auf drei parallelen Flächen hintereinander durchgeführt, um im Anschluss eine mittlere Reinigungsleistung ermitteln zu können. Vor der Befahrung durch die Kehrmaschine wurden definierte Flächen beprobt. Nach der Reinigung durch das Kehrfahrzeug wurden Proben anderer Flächen als vor der Reinigung genommen. Aus der Differenz der Mengen zwischen der ersten und zweiten Beprobung wurde die Kehreffizienz ermittelt.

Es zeigte sich, dass eine stärkere Saugleistung nur bei schnellem Fahren sinnvoll ist, um die aufgewirbelten Partikel und Staub schnell aufzunehmen. Der Hinweis der BSR hierzu war, dass der Energieverbrauch überproportional steigt.

Trockenes Kehren als Alternative zu feuchtem Kehren, hatte den Vorteil, dass weniger Partikel auf der Straße „kleben“ blieben. Allerdings wurden durch das deutliche Aufwirbeln des Staubes wesentlich mehr Partikel als bei der Nasskehrung verstreut und belasteten auch die Lüftung der Fahrerkabine durch mehr Staub in der Kabinenluft.

Die im ersten Kehrversuch ermittelten Kehreffizienzen für die unterschiedlichen Versuchsreihen werden in Abbildung 85 dargestellt.

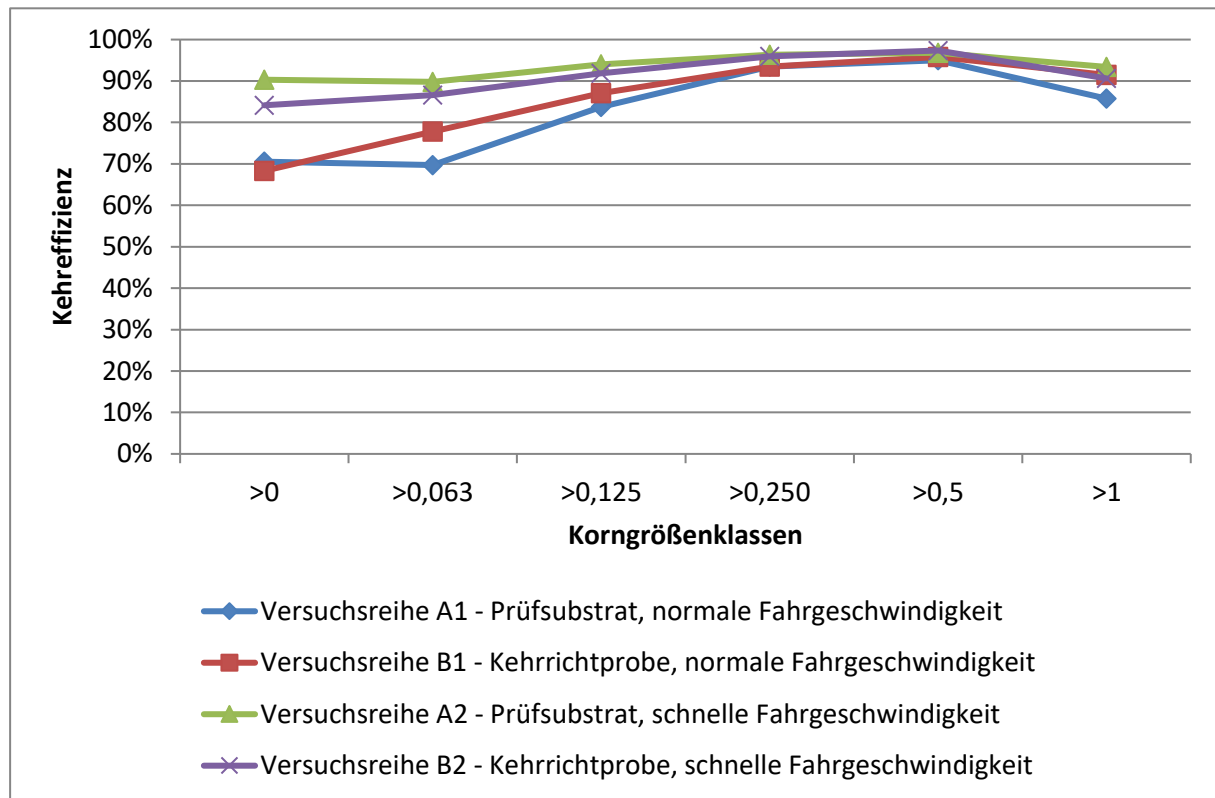


Abbildung 85: Ermittelte Kehreffizienzen im ersten Hallenversuch mit einem Kehrfahrzeug der Berliner Stadtreinigung

Da die Aufwirbelung von sehr feinen Partikeln („PM10“) als wenig relevant für die massenmäßige Ermittlung der Kehreffizienz angesehen wurde⁴, gab es keine Bestrebungen diesen Verlust zu quantifizieren. Jedoch stellte sich während des Versuchs heraus, dass größere Partikel während der Reinigung durch die Kehrmaschine seitlich verdrängt wurden. Für die Durchführung des zweiten Kehrversuchs wurde festgelegt, dass die seitlich verdrängte Menge zu berücksichtigen war.

II.1.4.1.2. Zweiter Kehrversuch

Der zweite Kehrversuch erfolgte in Anlehnung an den ersten Versuch. Da sich im ersten Kehrversuch gezeigt hatte, dass das verwendete künstliche Substrat dem Straßenkehrriech hinreichend ähnlich ist, wurde in diesem Versuch auf die aufwendige Verwendung von Straßenkehrriech verzichtet. Des Weiteren wurden Vorkehrungen getroffen, um die Partikel, die während des Kehrvorgangs zur Seite verdrängt werden möglichst aufzufangen und zu beproben (s. Abbildung 86).

⁴ Die Masse steigt mit der 3. Potenz des Radius, wodurch kleine Partikel kaum zur Gesamtmasse beitragen



Abbildung 86: Testfeld zur Ermittlung der Reinigungseffizienz von Kehrfahrzeugen - 2. Versuch

Die Auswertung der ermittelten Kehreffizienzen, unter Berücksichtigung der seitlich verdrängten Partikel wird in Abbildung 87 dargestellt.

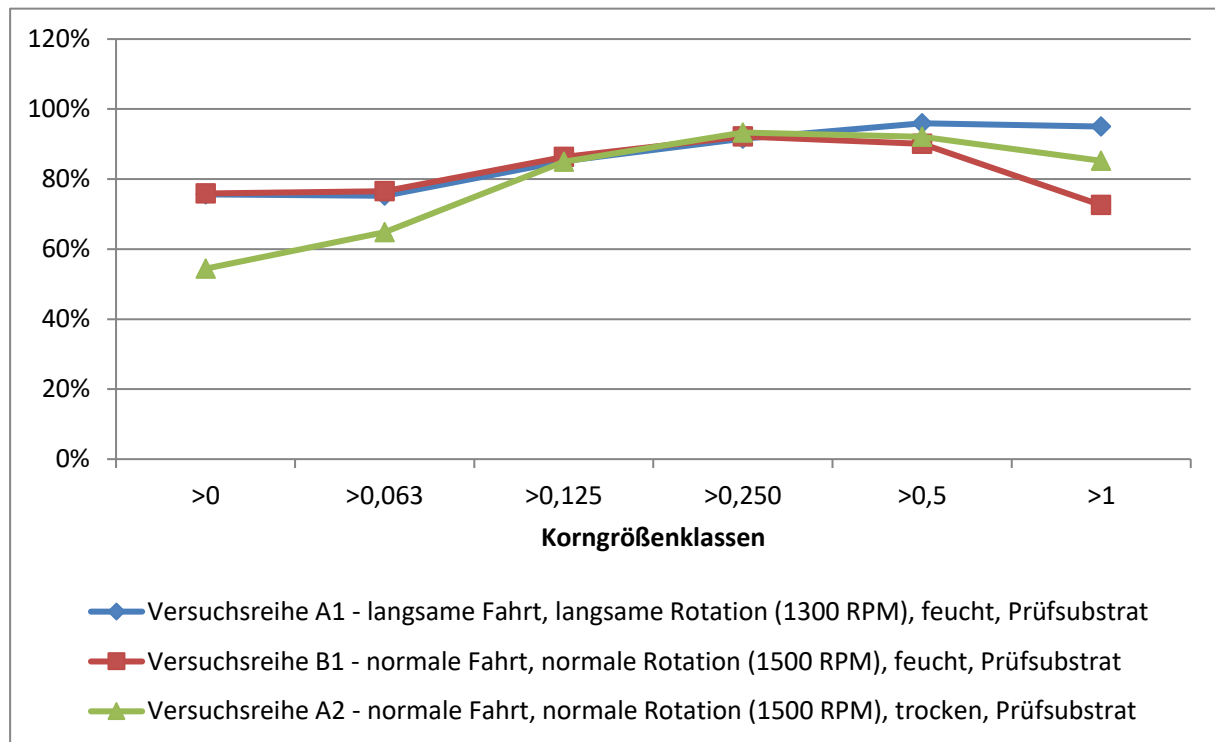


Abbildung 87: Ermittelte Kehreffizienzen im zweiten Hallenversuch mit einem Kehrfahrzeug der Berliner Stadtreinigung, Berücksichtigung der seitlich verdrängten Partikel

Der Versuch zeigte, dass die Kehrmaschine eine relevante Menge an Material während der Reinigung der Testflächen seitlich verdrängte. Die ermittelten Kehreffizienzen sind dementsprechend spürbar niedriger als diejenigen, die im ersten Kehrversuch ermittelt wurden (vgl. Abbildung 85). Vor allem der Versuchsreihe „A2“ in der keine Benetzung der zu reinigenden Oberfläche durch das Kehrfahrzeug erfolgte („Trockenreinigung“) zeigt, dass sehr viele Partikel kleinerer Korngrößen seitlich verdrängt wurden.

In Abbildung 88 wird dezidiert dargestellt welche Korngrößenklassen von der Kehrmaschine aufgenommen, seitlich verdrängt wurden oder auf der gereinigten Testfläche verblieben. Es ist deutlich erkennbar, dass die Kehreffizienz bei steigenden Korngrößen (welche die meiste Masse

ausmachen) deutlich steigt. Die insgesamt ermittelten Kehreffizienzen liegen in der Spanne von 54 % für Partikel < 63 µm und 89 % für Partikel von 1mm Korngröße.

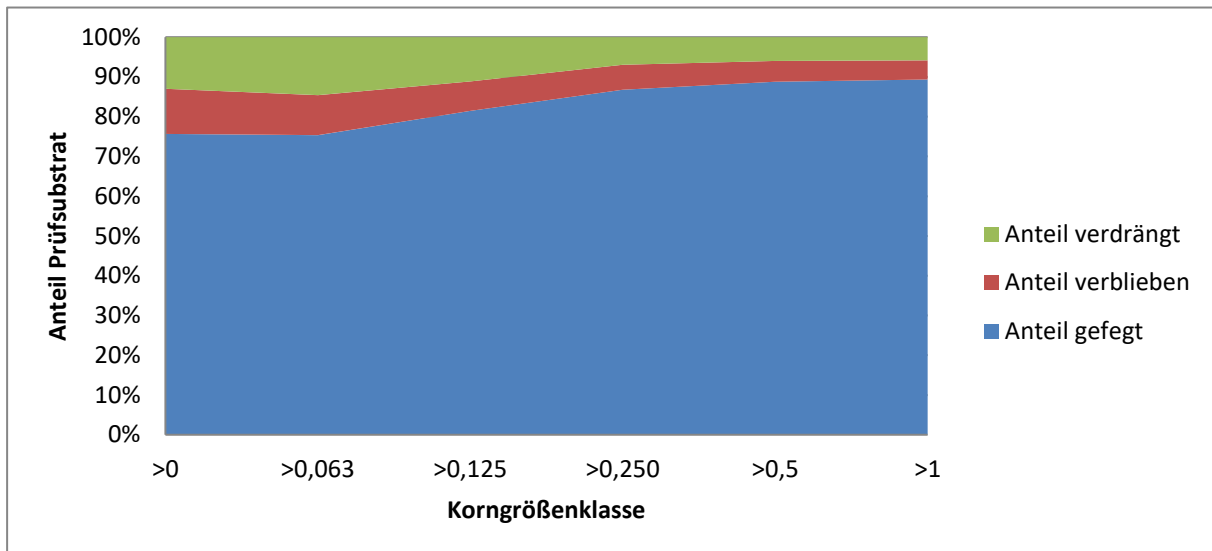


Abbildung 88: Ermittlung der Kehreffizienz im Hallenversuch – Zweiter Versuch, Versuchsreihe A1 - langsame Fahrt, langsame Rotation (1300 RPM), feucht, Prüfsubstrat

Die ermittelten Kehreffizienzen wurden im späteren Projektverlauf in situ an der Clayallee in Berlin überprüft.

II.1.4.1.3. In-Situ Kehrversuche an der Clayallee in Berlin:

Für die Untersuchung der Reinigungsleistung beim Fahren auf der Straße wurden monatliche Untersuchungen in Zusammenarbeit mit der BSR von April 2019 bis Oktober 2019 an 6 Terminen durchgeführt. Damit sollten die in der Versuchshalle der BSR durchgeführten Untersuchungen in situ verifiziert werden. Ziel war auch die Erlangung von Erkenntnissen zur Optimierung der Reinigungsintervalle.

Die Versuchsstrecke befand sich auf der westlichen Seite der Clayallee in Berlin südlich der Einmündung Dohnenstieg (s. Kapitel II.1.1.2.2).

Bei jedem Termin wurden auf dem unbeparkten Streifen für die Kehrungen 2-3 Wiederholungen durchgeführt. Da der Parkstreifen nicht abmarkiert wurde, wurden die Kehrungen in den freien, nicht beparkten Bereichen durchgeführt. Dort wurden Kehrungen vor (rot) und nach (blau) dem Befahren durch die Kehrmaschine durchgeführt (s. Abbildung 89). Insofern konnte die Menge vor und nach dem Fahren der Kehrmaschine ermittelt werden. Diese Ermittlung der Kehreffizienz anhand der Differenzmethode war analog zu den Hallenversuchen.

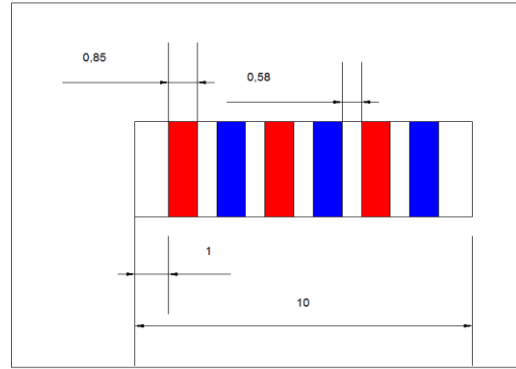


Abbildung 89: Kehrversuche an der Clayallee - Markierung der Probenahmebereiche

Dadurch ergaben sich leicht unterschiedliche Voraussetzungen für Kehrungen in den Abschnitten. Eine wichtige Beobachtung war, dass es, je nach Jahreszeit, einen stark in seiner Menge und Zusammensetzung unterschiedlichen Organikanteil gibt. Die ermittelte Korngrößenverteilung im Bereich $< 500 \mu\text{m}$ war in den meisten Proben sehr ähnlich (s. Abbildung 90).

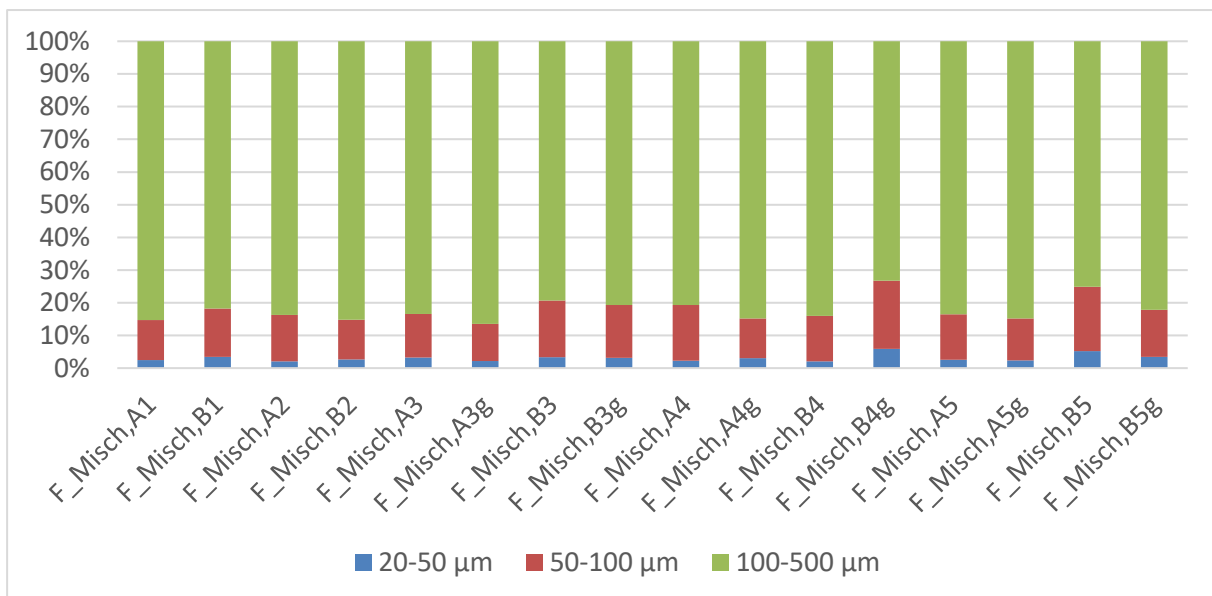


Abbildung 90: Kehrversuche an der Clayallee - Korngrößenverteilung Kehrrichtproben

Die Art der Reinigung durch die Kehrmaschine war aufgrund der nicht immer selben Fahrern immer etwas unterschiedlich. Es ergaben sich, trotz möglichst hoher Standardisierung der Fahrweise leichte Unterschiede im Betrieb.

In Abbildung 91 wird der Einsatz der Kehrmaschine vor und während des Kehrversuches dargestellt. Wie auch in den Hallenversuchen war während der Flächenreinigung ein leichtes Aufwirbeln von Staub zu sehen.



Abbildung 91: Kehrversuche an der Clayallee – Fotodokumentation des Einsatzes der Kehrmaschine

Die erzielten Ergebnisse zur Reinigungseffizienz von abfiltrierbaren Stoffen (AFS) werden in Abbildung 92 dargestellt. Die Proben des sechsten Versuchs waren aufgrund der hohen Feuchtigkeit verschimmelt und wurden nicht ausgewertet.

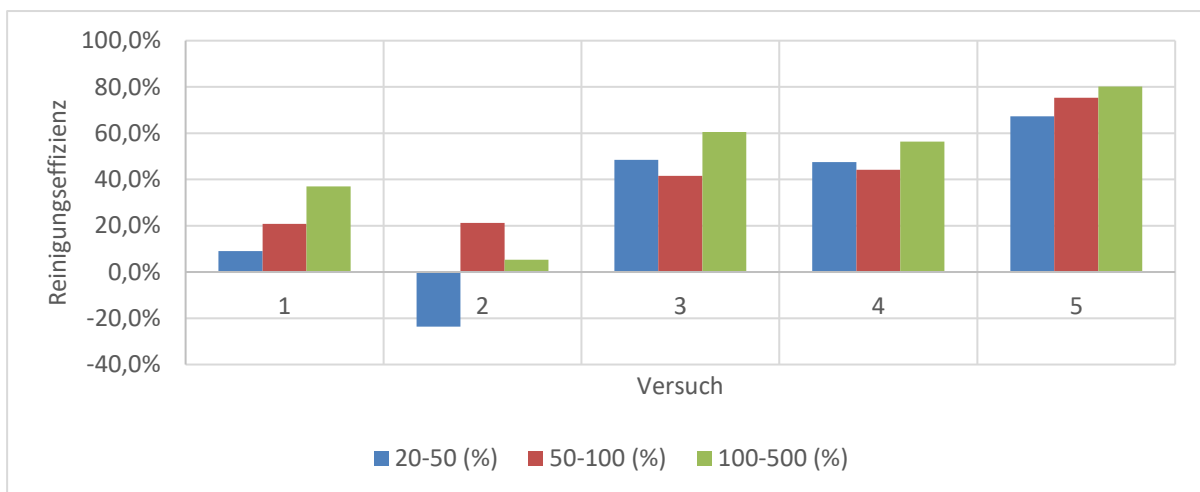


Abbildung 92: Kehrversuche an der Clayalle - Reinigungseffizienz AFS

Wie in Abbildung 92 zu sehen, unterscheiden sich die Ergebnisse der ersten beiden und der letzten drei Versuche. Der Grund hierfür ist, dass die Rinne im Bordsteinbereich sehr viel Material enthält und bei unzureichender Reinigung dieser Bereiche in den Testflächen (Probenahme 1, rot, s. Abbildung 89) unter Umständen mehr Material in den Testflächen nach Befahrung durch die Kehrmaschine (Probenahme 2, blau, s. Abbildung 89) gefunden wurde. In den Versuchen 3 bis 6 wurde auf eine akkurate Reinigung des Rinnensteinbereichs geachtet. Für die Festlegung der Reinigungseffizienz wurden nur die Ergebnisse der Versuch 3 bis 5 genutzt.

Die entnommenen Proben wurden durch den Projektpartner WESSLING auf SBR-BR untersucht. Die Ergebnisse werden für die Proben vor Flächenreinigung durch die Kehrmaschine in Abbildung 93 und nach der Reinigung durch die Kehrmaschine in Abbildung 94 dargestellt.

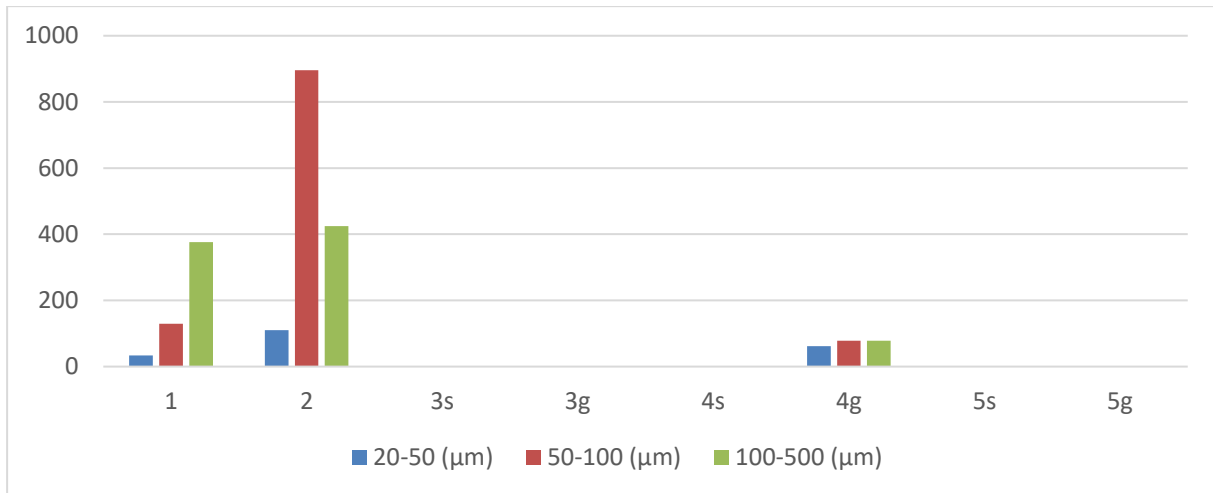


Abbildung 93: Kehrversuche an der Clayalle – Bestimmung des SBR-BR-Anteils an AFS vor der Flächenreinigung durch die Kehrmaschine

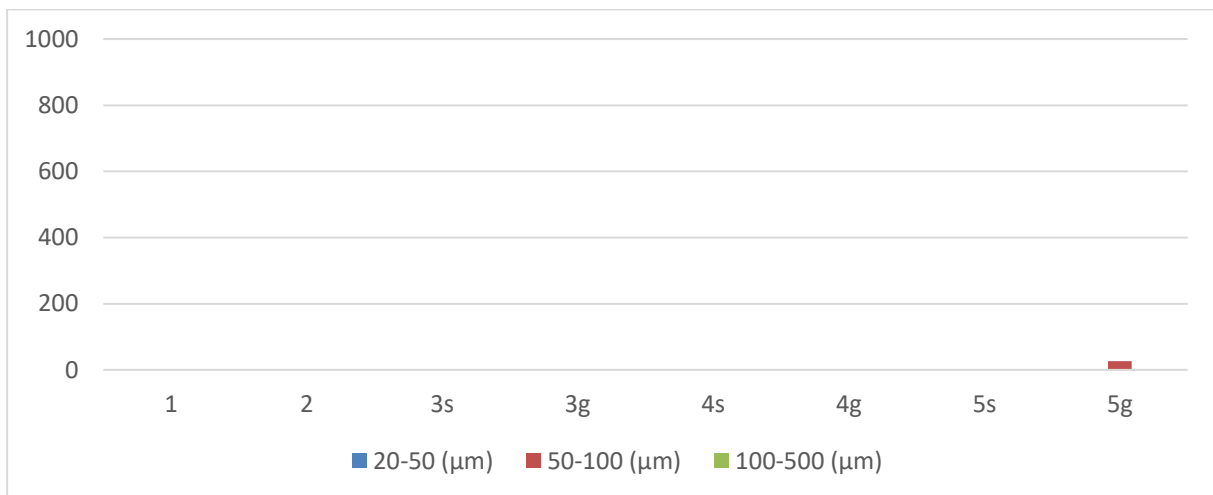


Abbildung 94: Kehrversuche an der Clayalle – Bestimmung des SBR-BR-Anteils an AFS nach der Flächenreinigung durch die Kehrmaschine

Da die SBR-BR-Bestimmung (Abbildung 93f) unplausible Ergebnisse hervorbrachte, wurde die Kehreffizienz für den Parameter AFS (s. Abbildung 92) für die weiteren Berechnungen genutzt. Insgesamt zeigte sich, dass die in-situ-Reinigung eine deutlich niedrigere Kehreffizienz hatte als in den zuvor durchgeführten Hallenversuchen (vgl. Abbildung 92 vs. Abbildung 87)

II.1.4.2. in situ-Messung Straßenabläufe

Im Projektzeitraum wurde der Nassschlammfang im Straßenablauf in der in situ Messstrecke Clayallee in der Zeit von Februar 2019 bis Juni 2020 regelmäßig beprobt. Die Standard-Analysen wurden im Labor der TU Berlin Siwawi durchgeführt und zusätzlich entsprechende SBR Analysen mit dem Projektpartner WESSLING abgestimmt. Weiterhin wurde im Dezember 2019 die BSR-Wartung der

Nassschlammfänge unterstützt und eine Vergleichsprobe eines Grobstoff-Eimers nach 12-monatigem Betrieb und im Juni 2020 nach 6-montigem Betrieb beprobt und auf den Parameter SBR analysiert.

Die nachfolgend dargestellten Messwerte der Nassschlammfanguntersuchungen zeigen, dass an vier von fünf Messtagen im Nassschlammfangmaterial SBR insbesondere in der Fraktion 100-500µm detektiert werden konnte.

Es kann davon ausgegangen werden, dass insbesondere die Größeren Reifenabriebspartikel während oder nach einem Regenereignis im Nassschlammfang sedimentieren.

Eine Korrelation zwischen SBR und den weiteren gemessenen Parametern lässt sich nicht erkennen. Eine Bilanzierung ist darüber hinaus auch nicht möglich, da während zwischenzeitiger Regenereignisse unterschiedlicher Intensität und Dauer immer wieder bereits im Nassschlammfang zurückgehaltenes Material ausgespült worden sein könnte. Die Erkenntnis der Sedimentation von SBR im Schacht könnte aber dazu dienen, zukünftige dezentrale Filterkonzepte zu entwickeln oder bestehende Systeme zu optimieren.

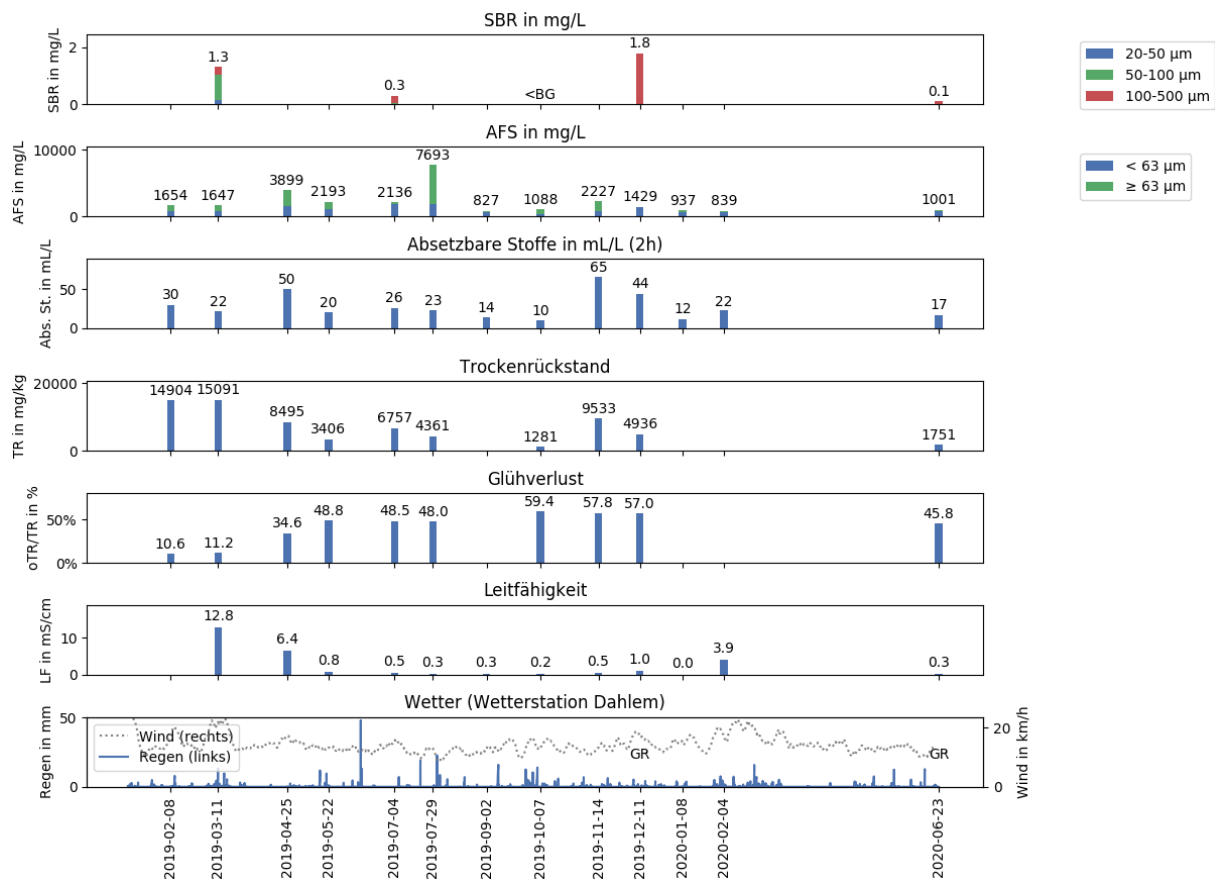


Abbildung 95: Messungen definierter Parameter im Nassschlammfang und Auswertung der Regenereignisse

Die Vergleichsproben im parallel eingesetzten Grobstoffeimer welcher vorrangig genutzt wird, um insbesondere Laub und andere größere Feststoffe aus dem Straßenablaufwasser aufzunehmen haben gezeigt, dass bei Verdopplung der Betriebszeit von 6 statt 12 Monaten auch ungefähr doppelt so viel Gesamtmasse zurückgehalten werden konnte. Bezüglich des Parameters SBR wurde hingegen bei doppelter Betriebszeit 171-mal so viel Masse an SBR zurück gehalten. Außerdem fällt auf, dass bei höherer Gesamtfeststoffbelastung des Grobstoffeimers auch besonders viel SBR in der feinsten Fraktion von 20-50 µm gemessen werden konnte.

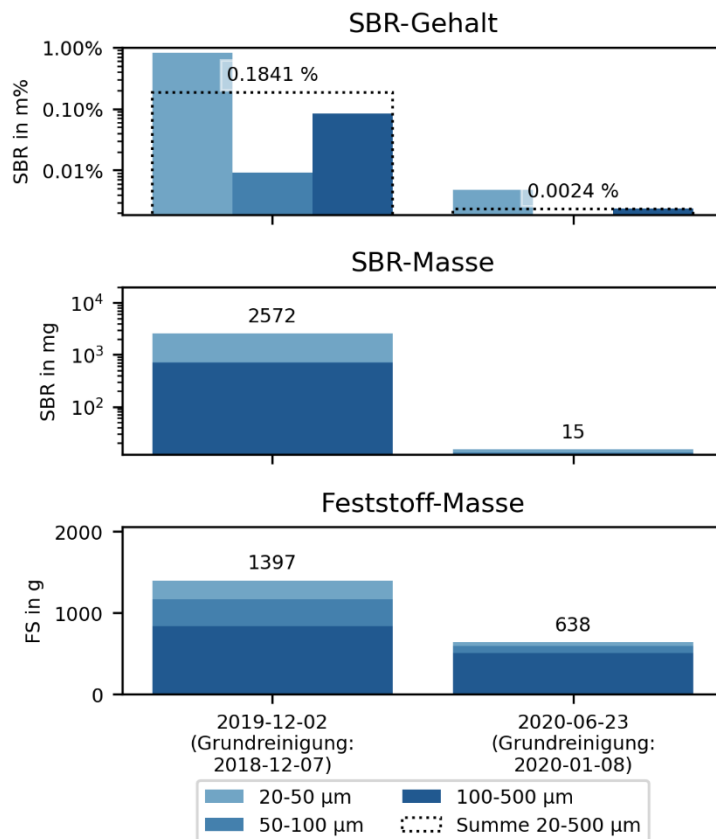


Abbildung 96: Bestimmung der Gesamtfeststoffmassen und der SBR Gehalte im Laubkorb nach 12 und nach 6 Monaten

Es kann vermutet werden, dass mit zunehmendem Filterkuchen in Grobstoffeimer zunehmend auch SBR zurückgehalten wird. Der hohe Anteil der Feinfraktion könnte auch durch den zunehmend wachsenden Filterkuchen begünstigt werden oder eventuell bauen sich auch größere Partikel im Grobstoffeimer um.

II.1.5. Bewertung

II.1.5.1. Schmutzfrachtsimulation

Für die Durchführung der Stofffrachtsimulation in den südlichen Teileinzugsgebieten der Panke waren sehr umfangreiche Arbeiten, beim Projektpartner IPS nötig, die über die gesamte Projektlaufzeit durchgeführt wurden. Die „Komponenten“ dieser Prozesskette werden schematisch in Abbildung 97 dargestellt.

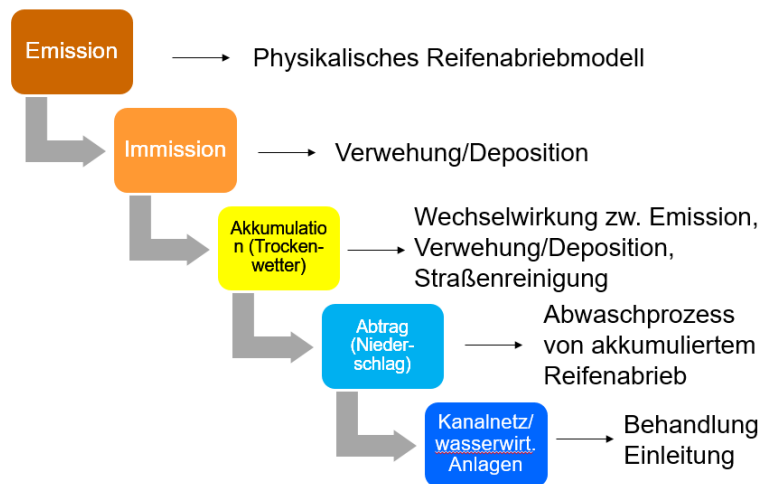


Abbildung 97: "Komponenten" der Stofffrachtsimulation von Reifenabrieb

Im Folgenden wird erläutert wie die Berechnungen in dieser Prozesskette durchgeführt wurden.

II.1.5.1.1. Ermittlung der Reifenabriebemissionen

Basierend auf der Formel vom Projektpartner Reibungsphysik der TU Berlin (TUB)⁵ wurde der Reifenabrieb für die einzelnen Messstellen „Gerade“, „Kurve“, „Lichtsignalanlage“, „Steigung“ und „Kreisverkehr“ modelliert. Die Ergebnisse der Modellierung sind in Abbildung 98 dargestellt. Da der Querfaktor⁶ nicht bekannt ist, wurden 3 verschiedene Abschätzungen genutzt und die Ergebnisse den Messwerten gegenübergestellt. Das Ziel war den Querfaktor festzulegen, der am besten die Messergebnisse der TUB widerspiegelt.

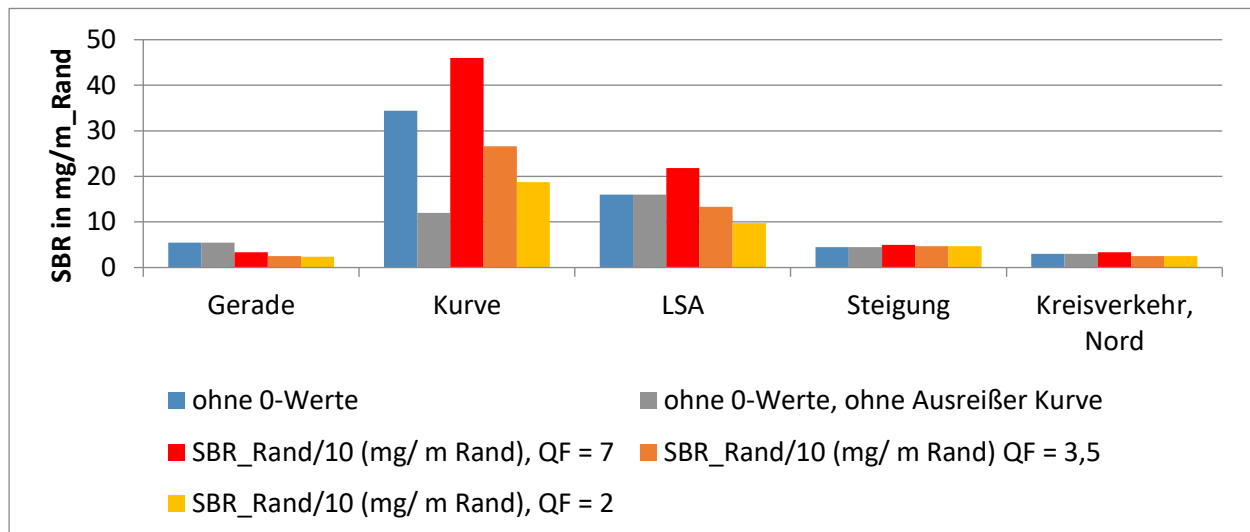


Abbildung 98: Gegenüberstellung von Messdaten und Modellierungsdaten für die betrachteten Messstellen

Da aus Abbildung 98 nicht klar hervorging, welcher Querfaktor am besten geeignet ist, um die Messergebnisse der TUB zu modellieren, wurden in einem zweiten Schritt die relativen Emissionen im Vergleich zur Messstelle „Gerade“ bestimmt. Da die Messwerte als SBR-Konzentration vorlagen, mussten die Modellierungswerte, die den Reifenabrieb ermittelt zuerst in SBR-Werte umgewandelt werden. Aus der Literatur lässt sich abschätzen, dass Reifenabrieb von PKWs aus rund 50 % SBR

⁵ S. Abschnitt II.1.2.2.1

⁶ Der Querfaktor beschreibt wie viel mehr Abrieb durch Querkräfte als durch Längskräfte erzeugt wird

bestehen. Als nächstes wurden alle Messwerte durch die Messwerte der Messstelle „Gerade“ geteilt. Analog wurden alle Ergebnisse der Modellierung durch den rechnerisch ermittelten Reifenabrieb für die „Gerade“ geteilt. Das Ergebnis ist in Abbildung 99 dargestellt.

Das Diagramm in Abbildung 99 zeigt wie viel mehr oder weniger SBR-BR⁷ an den betrachteten Messstellen im Vergleich zur Messstelle „Gerade“ gemessen und rechnerisch ermittelt wurde. Aus diesem Diagramm lässt sich ableiten, dass die Modellierung mit dem Querfaktor 2 am besten zu den betrachteten Messwerten passt.

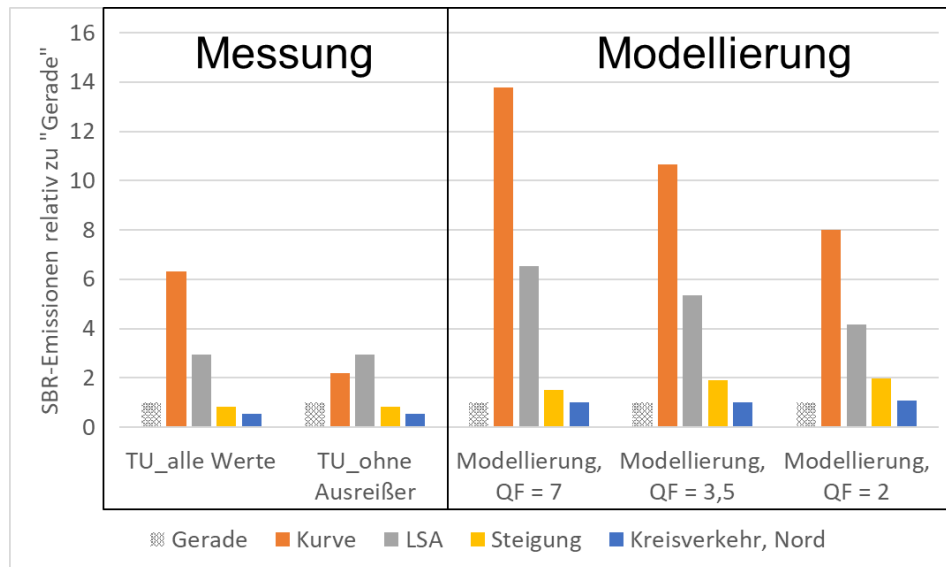


Abbildung 99: Relative SBR-Emissionen bezogen auf die "Gerade"

II.1.5.1.2. Modellierung der Immission/Akkumulation von Reifenabrieb auf Straßenflächen

Für die Modellierung der Einträge von Reifenabrieb in die Oberflächengewässer im Panke EZG war die Betrachtung der Akkumulation und des Abtrags von Reifenabrieb unumgänglich. Die umfangreiche Untersuchung möglicher Ansätze zu deren modellhaften Abbildung in der Literatur brachte keine praktikablen Ergebnisse zutage. Die ursprünglich geplante Anpassung des hydrologischen Schmutzfrachtmodells STORM-SEWSYS wurde nach Tests zur Abbildung von Akkumulation und Abtrag von Reifenabrieb und nach ausführlichen Diskussionen als nicht umsetzbar verworfen, weil sich die dort zugrundeliegenden Ansätze zur Akkumulation und Abtrag mit den vorhandenen Messwerten nicht verifizieren ließen. Weiterhin lag die Auswertung für die Windverwehung im jährlichen Mittel im betrachteten Teileinzugsgebiet der Panke aus dem parallelen Projekt TyreWearMapping vor, die sich mit STORM-SEWSYS nicht hätten nutzen lassen.

Für die Umsetzung der Stofffrachtsimulation wurde eine eigene Methodik unter Zuhilfenahme von Berechnungen⁸ aus dem Projekt TyreWearMapping hergeleitet.

Für die Akkumulation von Reifenabrieb sind im Trockenwetterfall zwei Faktoren wichtig:

- Tägliche Verwehungsrate (%)
- Entfernung durch die Straßenreinigung (%)

Unter Zugrundelegung der Massenverteilung in 3 Korngrößenklassen (KGK) wurde für jede KGK die mittlere tägliche Verwehungsrate aus der Fahrbahnfläche ermittelt. Für die Straßenreinigung wurden

⁷ Als eindeutiger Marker für Reifenabrieb von PKW-Reifen

⁸ Zinzeszinsberechnung unter Zugrundelegung der täglichen Verwehungsraten (Verluste)

unterschiedliche Reinigungszyklen untersucht. Für das Basisszenario wurde festgelegt, dass die Straßenreinigung in Hauptverkehrswegen 1x pro Woche stattfindet und in Nebenstraßen 1x pro Monat. Die benötigten Kehreffizienzen wurden in den Messungen an der Clayallee (s. Abschnitt II.1.4.1.3) ermittelt. Auf Basis der Zinseszinsberechnung wurde die Ermittlung der dynamischen Akkumulation für die 3 angesetzten K GK durchgeführt. Diese ist in Abbildung 100 dargestellt. Diese Berechnungen dienen im späteren Projektverlauf der Ermittlung von Akkumulationsganglinien für die hydrologische Modellierung.

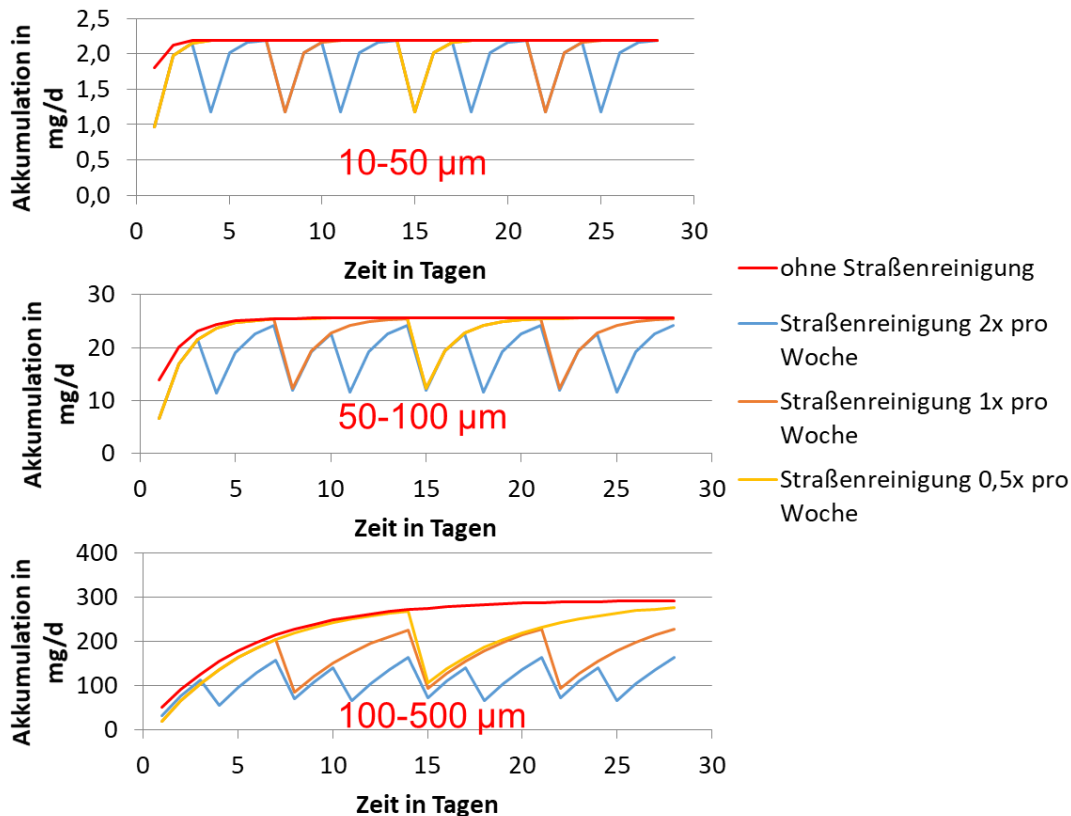


Abbildung 100: Untersuchung der dynamischen Akkumulation von Reifenabrieb auf Fahrbahnflächen für 3 Korngrößenklassen

II.1.5.1.3. Modellierung des Abtrags von Reifenabrieb auf Straßenflächen

Für den Abtrag von Reifenabrieb wurde der Wert 1 angesetzt. Dies bedeutet, dass der im Regenwetterfall vorliegende Reifenabrieb je Straßenabschnitt (s. Abbildung 100) in die Kanalisation eingetragen wird. Es ist davon auszugehen, dass der Abtrag für die meisten Regenereignisse wesentlich kleiner als 1 (100% der verfügbaren Stoffmenge) ist. Da jedoch kein funktionaler Zusammenhang bekannt ist, wurde auf die Abschätzung verzichtet. Diese soll in zukünftigen Iterationen jedoch in die Stofffrachtsimulation Einzug finden.

II.1.5.1.4. Flächendeckende Bestimmung von Emission und Akkumulation von Reifenabrieb

Die beschriebenen Methoden wurden angewandt, um die Emission und Akkumulation von Reifenabrieb flächenscharf in den einzelnen Straßenabschnitten in den relevanten Teileinzugsgebieten der Panke zu bestimmen. In Abbildung 101 wird die Reifenabriebintensität der einzelnen

Straßenabschnitte beispielhaft dargestellt⁹. Hierbei handelt es sich um die Emission eines PKW in mg/km und soll veranschaulichen wie abriebintensiv einzelne Straßenabschnitte sind. Durch Multiplikation dieser Abriebintensität mit der jeweiligen DTV lässt sich die Gesamtemission an Reifenabrieb je Straßenabschnitt ermitteln.

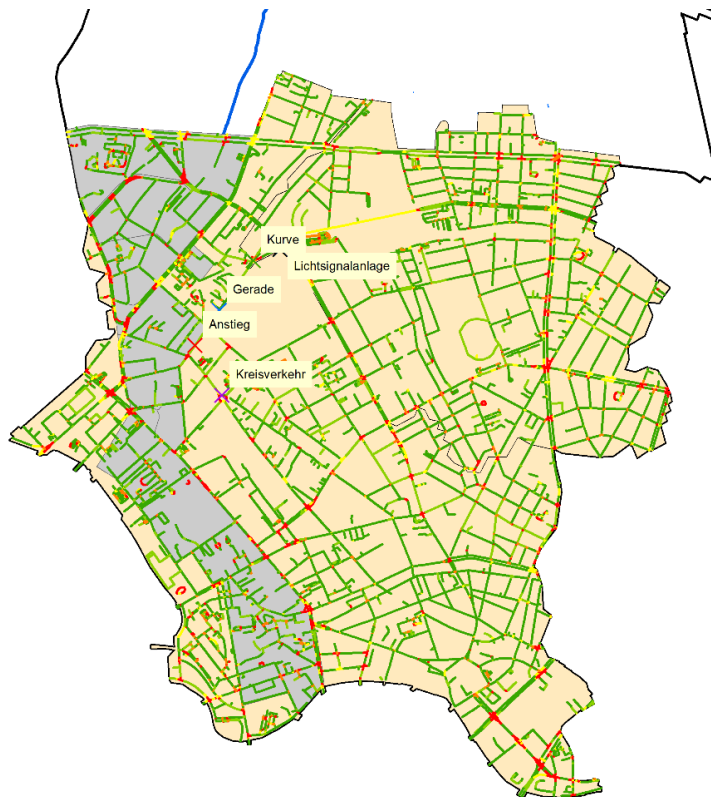


Abbildung 101: Darstellung der Reifenabriebintensität (Reifenabrieb je PKW/d) im Bereich der Mischkanalisation, gelber Hintergrund und der Trennkanalisation, grauer Hintergrund, Probenahmeorte der TUB einzeln gekennzeichnet

Mit den flächendeckenden Emissions- und Akkumulationsdaten für Reifenabrieb wurde die Basis geschaffen um im Jahr 2021 eine Stofffrachtsimulation durchzuführen.

II.1.5.1.5. Durchführung der Stofffrachtsimulation

Die Stofffrachtsimulation wurde mit dem NA-Modell STORM (Niederschlags-Abflussmodell) durchgeführt. Hierbei wurden die flächenscharfen Emissions- und Akkumulationsdaten (s. Abbildung 101) genutzt, und nach Teilezugsgebiet, Fahrsituation (Kreuzung, Kurve, Gerade, etc.) und Reinigungszyklus der Straßenreinigung zu Elementarflächen aggregiert. Dieser Schritt diente dazu die Anzahl der zu berechnenden Elementen drastisch zu reduzieren, um die Simulationslaufzeit wesentlich zu verringern. Weitere Eingangsdaten waren:

- Teilezugsgebiete (Misch- und Trennkanalisation)
- Weitere an die Kanalisation angeschlossene Flächen
- Trockenwetterabflüsse
- Akkumulationsganglinien je Reinigungsfrequenz der Straßenreinigung
- Mischwasserüberläufe

⁹ Die notwendigen Geodaten wurden aus dem Projekt TyreWearMapping für das Einzugsgebiet übernommen und im Bereich der Hochstraße händisch angepasst bzw. mit den Messwerten der TUB überarbeitet

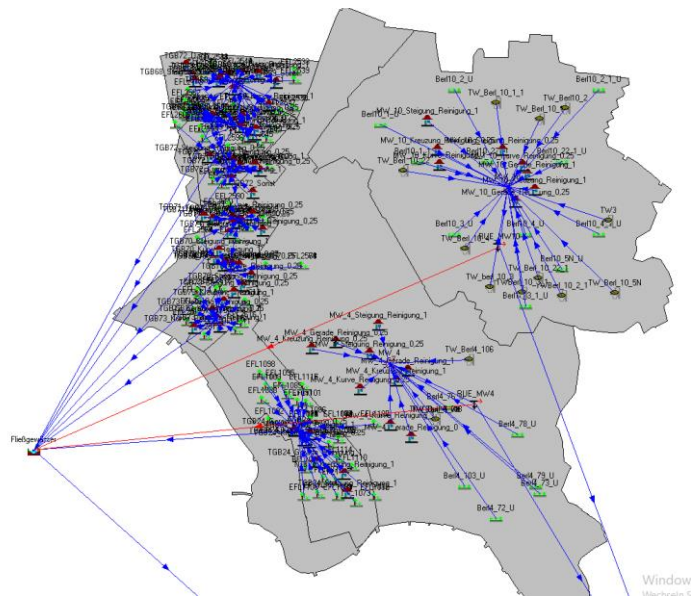


Abbildung 102: Stofffrachtsimulation - Screenshot aus dem STORM-Modell

Mithilfe realer Regendaten wurde eine Langzeitsimulation von 10 Jahren in 5 min Schritten durchgeführt. Durch die Verknüpfung von Flächenabflüssen und einem rudimentären Entwässerungsnetz samt Mischwasserüberläufen und Kläranlage ließ sich eine Stofffrachtbilanz erstellen.

Das Ergebnis der Stofffrachtsimulation wird in Tabelle 24 dargestellt.

Tabelle 24: Stofffrachtsimulation - Ermittelte Stofffrachtbilanz für die betrachteten Teileinzugsgebiete der Panke

Reifenabriebemissionen	22,2 t/a
Hiervon:	
Verwehung in seitliche Straßenbereiche	-6,6 t/a
Entfernung durch Straßenreinigung	- 4,3 t/a
Eintrag ins Kanalnetz	= 11,3 t/a
Ableitung zur Kläranlage	- 8,4 t/a
Eintrag in Panke (Misch- /Trennkanalisation)	= 0,7/2,2 t/a

Wie in Tabelle 24 zu sehen, werden rund die Hälfte der entstehenden Reifenabriebemissionen entweder vom Wind in benachbarte Bereiche der Straßen verweht oder von der Straßenreinigung entfernt. Von den Einträgen in die Mischkanalisation wird der Großteil des Reifenabriebs durch die

sehr hohe Absetzleistung in der Kläranlage entfernt¹⁰. Der Eintrag von Reifenabrieb in die Panke aus dem Mischsystem erfolgt durch Mischwasserüberläufe infolge von Starkregenereignissen, die die Kapazität der Mischkanalisation überschreiten. Für die Trennkanalisation wurde angenommen, dass der eingetragene Reifenabrieb weitgehend ohne Behandlung in die Panke eingeleitet wird. Diese Annahme basiert auf einem vorliegenden Modell der Panke aus dem Jahr 2015/16 und entspricht ggf. nicht mehr dem aktuellen Stand.

Mithilfe der Stofffrachtsimulation wurden im Anschluss unterschiedliche Szenarien zur Senkung des Eintrags von Reifenabrieb in die Panke untersucht.

Folgende Maßnahmen wurden jeweils einzeln untersucht:

Minimierung der Emissionen:

- $V_{max} = 40$ km/h (Gemeindestraßen + Servicestraßen)
- $V_{max} = 30$ km/h (Gemeindestraßen + Servicestraßen)
- Grüne Welle an Hauptstraßen (gleichmäßiger Verkehr)

Intensivere Straßenreinigung:

- 0,25x pro Wo. → 0,5x pro Wo. – Nebenstraßen
- 1x pro Wo. → 3x pro Wo. – Hauptstraßen
- 1x pro Wo. → 3x pro Wo. – nur Kreuzungen von Hauptstraßen

Einsatz von Filteranlagen/semizentralen Anlagen¹¹:

- Filter: 50 % Wirkung – Kreuzungen, Hauptstraßen
- Semizentrale Anlagen: 80 % Wirkung – Kreuzungen Hauptstraßen

Kombination Straßenreinigung und Filteranlagen:

- SR: 3x pro Wo + Filter: 50 % Wirkung – *Kreuzungen*, Hauptstraßen
- SR: 3x pro Wo + Semizentrale Anlagen: 80 % Wirkung – *Kreuzungen*, Hauptstraßen

Die Ergebnisse dieser Maßnahmen auf die Senkung des Eintrags auf das Kanalnetz werden in den Abbildung 102ff dargestellt.

¹⁰ Aus der allgemein niedrigen Konzentration von AFS im Kläranlagenablauf abgeleitet

¹¹ Hier wurde auf Abschätzungen zu „Potentialabschätzung von de- /zentralen Regenwasserbehandlungsanlagen“ zurückgegriffen (s. Kapitel II.1.5.2)

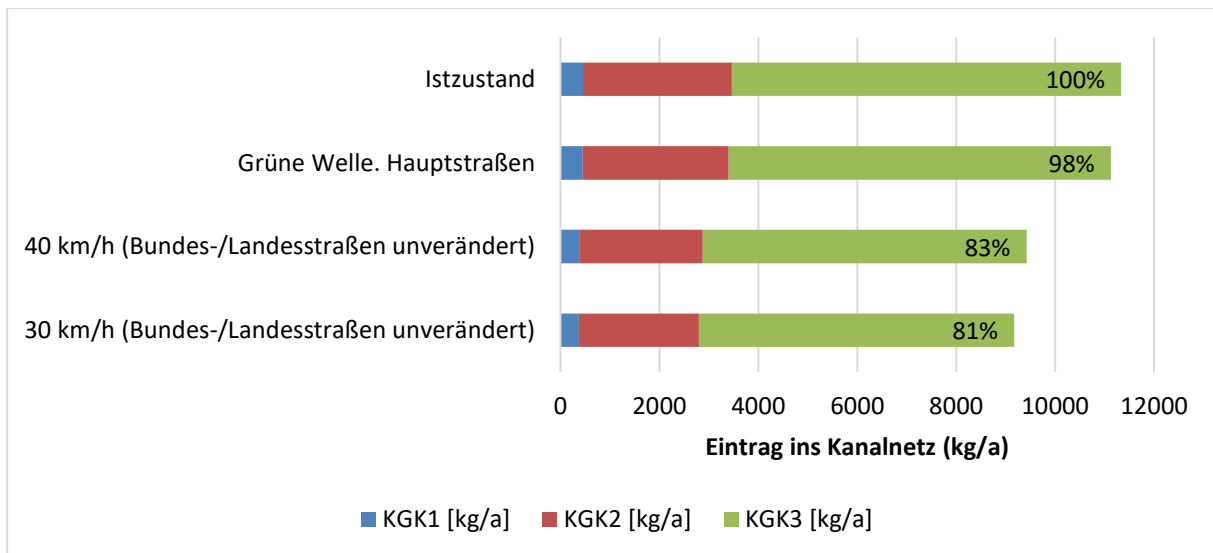


Abbildung 103: Stofffrachtsimulation – Darstellung der Wirkung von Maßnahmen, die die Emission von Reifenabrieb senken

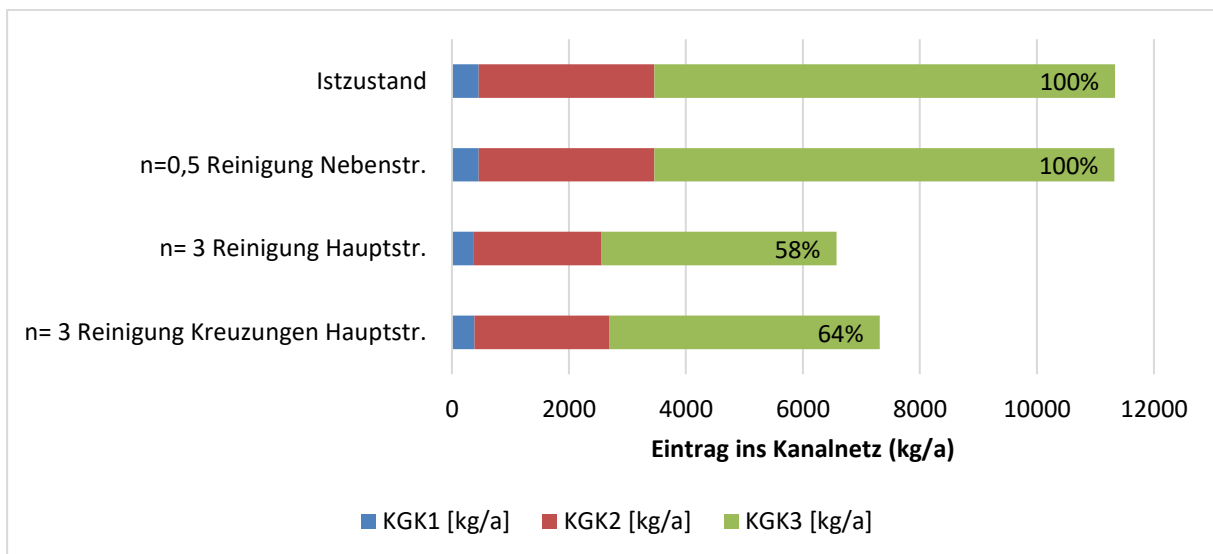


Abbildung 104: Stofffrachtsimulation – Darstellung der Wirkung einer intensiveren Straßenreinigung

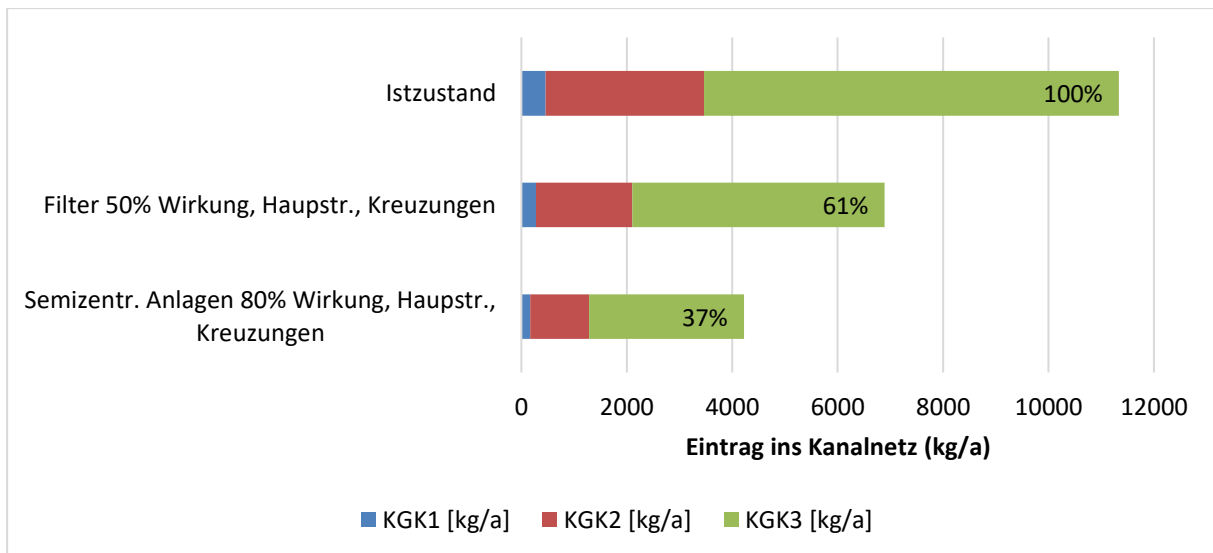


Abbildung 105: Stofffrachtsimulation – Darstellung des Einsatzes von Filteranlagen/ semizentralen Anlagen

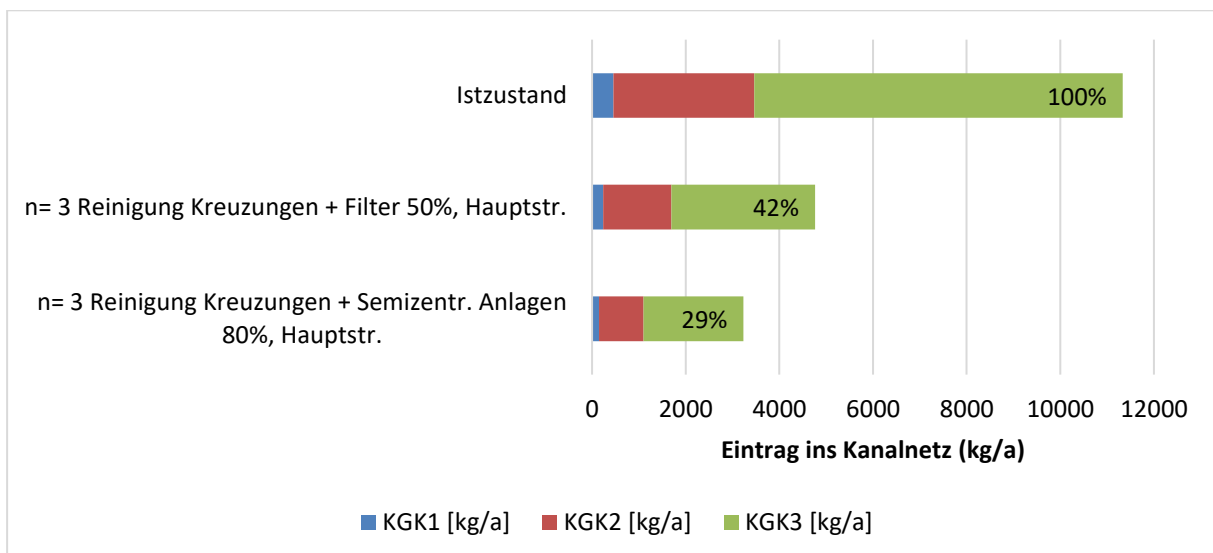


Abbildung 106: Stofffrachtsimulation – Darstellung der kombinierten Wirkung einer intensiveren Straßenreinigung und Filteranlagen/ semizentralen Anlagen

Wie in den Abbildung 102ff zu sehen, gibt es viele verschiedene Möglichkeiten, um die Menge an Reifenabrieb, die ins Kanalnetz eingetragen wird zu senken. Die Senkung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit kann bereits verhindern, dass ein Teil der Emissionen entsteht. Die intensivere Straßenreinigung von stark befahrenen Straßenabschnitten kann zu einer deutlichen Reduktion des Eintrags in das Kanalnetz führen. Hier wird insbesondere darauf hingewiesen, dass die Fokussierung auf die Kreuzungen als Hotspots bereits für eine signifikante Senkung ausreicht. Die Verwendung technischer Anlagen (Filteranlagen für kleinere Straßenabschnitte und semizentrale Anlagen für größere Bereiche) hat den höchsten Effekt bei der Senkung der Einträge ins Kanalnetz.

In Kombination erreichen die intensivere Straßenreinigung und der Einsatz von technischen Entfernungsanlagen eine Senkung von 58 % bis 71 %. Hierbei ist der Effekt niedrigerer zulässiger Höchstgeschwindigkeiten nicht berücksichtigt und dürfte zu einer weiteren Senkung um ca. 6 bis 8 %p führen.

In Tabelle 25 werden die genannten Maßnahmen und Ihre Wirkung gegenübergestellt.

Tabelle 25: Gegenüberstellung der betrachteten Maßnahmen zur Senkung des Reifenabriebeintrags in das Kanalnetz des Teilgebiets der Panke

Maßnahmentyp	Maßnahme	Reifenabriebeintrag in:	
		Kanalnetz %	Panke %
	Istzustand	100%	100%
Senkung der Emissionen	40 km/h (Bundes-/Landesstraßen unverändert)	83%	84%
	30 km/h (Bundes-/Landesstraßen unverändert)	81%	81%
	Grüne Welle. Hauptstraßen	98%	99%
Intensivere Straßenreinigung	n=0,5 Reinigung Nebenstr.	100%	100%
	n= 3 Reinigung Hauptstr.	58%	58%
	n= 3 Reinigung Kreuzungen Hauptstr.	64%	59%
Einsatz von Filteranlagen/ semizentralen Anlagen	Filter 50% Wirkung, Hauptstr., Kreuzungen	61%	68%
	Semizentr. Anlagen 80% Wirkung, Hauptstr., Kreuzungen	37%	49%
Kombination Straßenreinig. und Filteranlagen	n= 3 Reinigung Kreuzungen + Filter 50%, Hauptstr.	42%	47%
	n= 3 Reing. Kreuzungen + Semizentr. Anlagen 80%, Hauptstr.	29%	36%

Wie bereits erwähnt können die dargestellten Maßnahmen und insbesondere ihre Kombination für eine deutliche Absenkung des Eintrags von Reifenabrieb in das Kanalnetz sorgen. An dieser Stelle wird nochmal darauf hingewiesen, dass der Abtrag von Reifenabrieb im Regenwetterfall nicht gesondert betrachtet wurde (s. Abschnitt II.1.5.1.3). Hier ist zu erwarten, dass der reale Abtrag wesentlich niedriger liegt und bspw. die reale Wirksamkeit der Straßenreinigung deutlich höher liegt.

II.1.5.2. Potentialabschätzung von de-/zentralen Regenwasserbehandlungsanlagen

Die Projektpartner IPS, TU Berlin Siwawi, und die BWB, haben intensiv zum Bewertungskonzept von dezentralen Regenwasserbehandlungsanlagen basierend auf Erfahrungswerten und standort-spezifischen Randbedingungen aus dem RAU Projekt zusammengearbeitet, um Entwässerungsanlagen bezüglich des Parameters Reifenabrieb bewerten zu können.

Für die Bewertung der Eignung technischer Anlagen zur Entfernung von Reifenabrieb wurde eine umfangreiche multikriterielle Analyse durchgeführt. Zuerst wurden grundlegende Maßnahmen kategorisiert und bewertet, die grundsätzlich geeignet waren, um die Reifenabriebemissionen zu senken oder die Entfernung im Trockenwetterfall zu optimieren (s. Tabelle 26).

Tabelle 26: Potenzialabschätzung Behandlungsanlagen - Bewertung und Kategorisierung möglicher Maßnahmen zur Senkung der Reifenabriebemissionen und deren Entfernung im Trockenwetterfall sowie technischer Massnahmen zur Abtrennung von Reifenabrieb aus dem Niederschlags- bzw. Mischwasser

Maßnahme	Kategorie	Entwässerungssystem	Einsatzorte nach DWA-A 102-2	Straßenkategorie	DTV max	Straßentypen aus RAU
Mulde	technisch	Misch-/ Trennsystem	<15000 DTV (Wohnen, Erschließen), <2000 DTV (Misch,Gewerbe,Industrie), <15000 DTV (Wohnen, Erschließen), <2000 DTV (Misch,Gewerbe,Industrie)	Landesstraßen, Gemeindestraßen, Service	15000	Kurve, Kreuzungen, LSA, Kreisverkehr, Steigung, Gerade
Mulden-Rigolen-Element, kompakt	technisch	Misch-/ Trennsystem	<15000 DTV (Wohnen, Erschließen), <2000 DTV (Misch,Gewerbe,Industrie)	Landesstraßen, Gemeindestraßen, Service	15000	Kurve, Kreuzungen, LSA, Kreisverkehr, Steigung, Gerade
Versickerungsrinne mit Substrat	technisch	Misch-/ Trennsystem	<15000 DTV (Wohnen, Erschließen), <2000 DTV (Misch,Gewerbe,Industrie)	Landesstraßen, Gemeindestraßen, Service	15000	Kurve, Kreuzungen, LSA, Kreisverkehr, Steigung, Gerade
Schacht mit Wirbelabscheider und Filter	technisch	Trennsystem	>15000 DTV (außerhalb Misch,Gewerbe,Industrie), >2000 DTV	Bundesstraßen, Landesstraßen, Gemeindestraßen	15000-100000	Kurve, Kreuzungen, LSA, Kreisverkehr
Schacht mit Filter	technisch	Trennsystem	>15000 DTV (außerhalb Misch,Gewerbe,Industrie), >2000 DTV	Bundesstraßen, Landesstraßen, Gemeindestraßen	15000-100000	Kurve, Kreuzungen, LSA, Kreisverkehr
Sedimentationsstrecke	technisch	Trennsystem	>15000 DTV (außerhalb Misch,Gewerbe,Industrie), >2000 DTV	Bundesstraßen, Landesstraßen, Gemeindestraßen	15000-100000	Kurve, Kreuzungen, LSA, Kreisverkehr
Straßenablauf mit Filter und Sedimentation	technisch	Trennsystem	>15000 DTV (außerhalb Misch,Gewerbe,Industrie), >2000 DTV	Landesstraßen, Gemeindestraßen, Service	15000	Kurve, Kreuzungen, LSA, Kreisverkehr
Straßenablauf mit Sedimentation	technisch	Trennsystem	>15000 DTV (außerhalb Misch,Gewerbe,Industrie), >2000 DTV	Landesstraßen, Gemeindestraßen, Service	15000	Kurve, Kreuzungen, LSA, Kreisverkehr, Steigung, Gerade
Becken mit Bodenfilter	technisch	Trennsystem	>15000 DTV (außerhalb Misch,Gewerbe,Industrie), >2000 DTV (Misch,Gewerbe,Industrie)	Bundesstraßen, Landesstraßen, Gemeindestraßen, Service	15000-100000	Kurve, Kreuzungen, LSA, Kreisverkehr, Steigung, Gerade
Becken ohne Filter	technisch	Trennsystem	>15000 DTV (außerhalb Misch,Gewerbe,Industrie), >2000 DTV (Misch,Gewerbe,Industrie)	Bundesstraßen, Landesstraßen, Gemeindestraßen, Service	15000-100000	Kurve, Kreuzungen, LSA, Kreisverkehr, Steigung, Gerade
Kläranlage	technisch	Mischsystem	>15000 DTV (außerhalb Misch,Gewerbe,Industrie), >2000 DTV (Misch,Gewerbe,Industrie)	Bundesstraßen, Landesstraßen, Gemeindestraßen, Service	15000-100000	Kurve, Kreuzungen, LSA, Kreisverkehr, Steigung, Gerade
Straßenreinigung intensiv (Hauptstraßen Hochbordbereich)	Stadtreinigung	Misch-/ Trennsystem	>15000 DTV (außerhalb Misch,Gewerbe,Industrie), >2000 DTV (Misch,Gewerbe,Industrie)	Bundesstraßen, Landesstraßen, Gemeindestraßen, Service	15000-100000	Kurve, Kreuzungen, LSA, Kreisverkehr, Steigung, Gerade
Straßenreinigung intensiv (Hotspots Hochbordbereich)	Stadtreinigung	Misch-/ Trennsystem	<15000 DTV (Wohnen, Erschließen), <2000 DTV (Misch,Gewerbe,Industrie), außerhalb Ortschaften	Bundesstraßen, Landesstraßen, Gemeindestraßen, Service	15000	Kurve, Kreuzungen, LSA, Kreisverkehr mit DTV
Straßenreinigung intensiv (größte Hotspots Hochbordbereich)	Stadtreinigung	Misch-/ Trennsystem	<15000 DTV (Wohnen, Erschließen), <2000 DTV (Misch,Gewerbe,Industrie), außerhalb Ortschaften	Bundesstraßen, Landesstraßen, Gemeindestraßen, Service	15000	Kreuzungen, LSA
Straßenreinigung Bankett (Hauptstraßen ohne Bord)	Stadtreinigung	Trennsystem	>15000 DTV (außerhalb Misch,Gewerbe,Industrie), >2000 DTV (Misch,Gewerbe,Industrie)	Bundesstraßen, Landesstraßen, Gemeindestraßen, Service	15000-100000	Kurve, Kreuzungen, LSA, Kreisverkehr, Steigung, Gerade
Geschwindigkeitslimitierung (30 km/h max in der Stadt, außer Bundesstraßen/ Autobahnen)	Administrativ	Misch-/ Trennsystem		Landesstraßen, Gemeindestraßen, Service	15000	Steigung, Gerade
Geschwindigkeitslimitierung für "Nebenstraßen"	Administrativ	Misch-/ Trennsystem		Gemeindestraßen, Service	2000	Steigung, Gerade
Grüne Welle: Weniger Bremsungen an Kreuzungen	Administrativ	Misch-/ Trennsystem		Bundesstraßen, Landesstraßen, Gemeindestraßen, Service	100000	LSA

Für die ausgewählten technischen Maßnahmen fand eine detaillierte Bewertung hinsichtlich unterschiedlicher siedlungswasserwirtschaftlicher Parameter statt (s.u.)

Tabelle 27: Potenzialabschätzung Behandlungsanlagen - Detaillierte Bewertung ausgewählter technischer Maßnahmen hinsichtlich ihrer siedlungswasserwirtschaftlicher Parameter

Maßnahme	Anteil behandeltes Wasser [%]	Stoffrückhalt AFS [%]	Stoffrückhalt AFS 63 [%] (Für A 102)	Quelle Angabe	Stoffrückhalt Reifenpartikel <63 [%] Ergänzung A 102
Mulde	99	99	99	nach RISA 2013 sowie VKU 2013	99
Mulden-Rigolen-Element, kompakt	99	88	95	nach RISA 2013 sowie VKU 2013	99
Versickerungsrinne mit Substrat	99	95	80		80
Schacht mit Wirbelabscheider und Filter	80	95	80	nach A 102 Seite 43	80
Schacht mit Filter	80	95	80	nach A 102 Seite 43	80
Sedimentationsstrecke	80	88	80		80
Straßenablauf mit Filter und Sedimentation	80	70	55	Angabe vom Hersteller; Messung	55
Straßenablauf mit Sedimentation	80	60	30	DSWT	30
Becken mit Bodenfilter	95	98	95	nach RISA 2013 sowie VKU 2013	95
Becken ohne Filter	95	50	20	nach RISA 2013 sowie VKU 2013	40
Kläranlage	95	98	95		95

Die dargestellten rot umrandeten Werte der Reinigungsleistung bezgl. AFS63 bei Anlagen mit DIBt-Zulassung sind vorläufig abgeschätzte Werte. In der Praxis können sich deutlich niedrigere Rückhalteleistungen von ca. 60-70 % ergeben. Erste Erfahrungen an in-situ gemessenen Anlagen lassen diesen Schluss zu. Gleiches gilt für Schwermetalle. Dies muss durch weitere Untersuchungen weiter untermauert werden.

Die vorläufig erarbeiteten Parameter von Tabelle 26ff wurden sowohl in der Stofffrachtsimulation (s. Abschnitt II.1.5.1.5) als auch im nachfolgenden Bewertungstool eingesetzt.

II.1.6. Aufstellung des Maßnahmenkatalogs

Der Maßnahmenkatalog wurde durch den Projektpartner IPS gemeinsam mit dem gesamten Projektverbund erstellt. Die gewählte Darstellung ist erst durch die Zusammenführung der Projektergebnisse des Forschungsvorhabens RAU möglich gewesen.

Die Ergebnisse aus der Stofffrachtsimulation (AP5.1) und der Potenzialabschätzung Behandlungsanlagen (AP5.2) wurden in einem GIS-Tool vereint. In diesem Tool, welches als Screeningtool einsetzbar ist, wurde mittels Pythonskript ermittelt welche technischen Maßnahmen in welchem Straßenabschnitt sinnvoll wären. Diese wurden mit dem ebenfalls erstellten Maßnahmenkatalog verknüpft, sodass sämtliche Informationen über eine einfache Benutzerführung einsehbar sind. Ein Beispiel für das GIS-Tool wird in Abbildung 107 dargestellt.

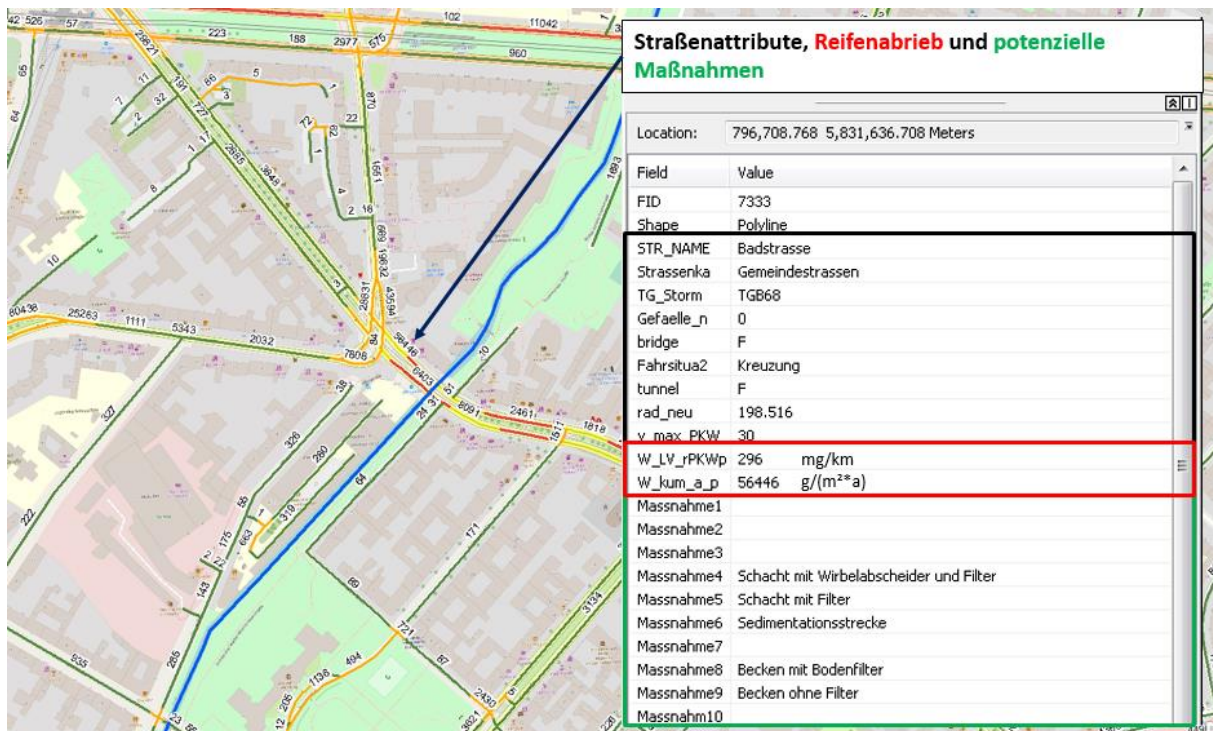


Abbildung 107: Auswertung - GIS-Tool / Screeningtool zur Vorabbewertung geeigneter technischer Maßnahmen im gesamten Projektgebiet (südl. Teileinzugsgebiete der Panke); schwarzer Rahmen: Straßenattribute; roter Rahmen: Angaben zur entstehenden Reifenabriebmenge; grüner Rahmen: mögliche technische Maßnahmen an Standort

Der erwähnte Maßnahmenkatalog wird beispielhaft in Abbildung 108 dargestellt. Hier sind sehr detaillierte technische Angaben zur jeweiligen Maßnahme hinterlegt und für einen Vergleich mit anderen Maßnahmen aufbereitet.

Der Maßnahmenkatalog bildet die Maßnahmen aus der Potenzialabschätzung ab. Es wird damit aber kein Anspruch auf Vollständigkeit gegeben, da immer wieder neue Maßnahmen dazukommen und für vorhandene Maßnahmen neue Ergebnisse vorliegen.

Abbildung 108: Auswertung - Ausschnitt aus dem Maßnahmenkatalog mit technischen Angaben zu einer semizentralen Schachtanlage

Maßnahme	Schacht mit Wirbelabscheider und Filter
<p>Semizentrale Schachtanlage</p> 	<p>Die Schachtsysteme sind vor allem für die Reinigung von Straßenabflüssen vor Einleitung ins Grundwasser oder Anschluss an den Kanal bzw. Gewässer vorgesehen. Von unterschiedlichen Herstellern werden verschiedene Systemkonfigurationen mit Filtersubstraten angeboten.</p> <p>Die Zuleitung des Regenwassers erfolgt in der Regel unterirdisch in den unteren Bereich des Schachtes. Hier findet bspw. durch einen Wirbelabscheider oder in einem speziellen Sedimentationsraum die Sedimentation von Partikeln statt. Die Art der Strömungsführung entscheidet über den Grad der Sedimentation. Die Sedimente werden in einem Schlammraum unter dem eigentlichen Filter aufgefangen und können bei Bedarf entfernt werden. Im Aufstrom wird das Wasser durch spezielle Filtersubstrate gefiltert und dabei ein Großteil der Fein- und gelösten Schadstoffe gebunden.</p>
Kategorie	technisch
Entwässerungssystem	Trennsystem
Einsatzbereiche nach DWA-A 102-2	>15000 DTV (außerhalb Misch, Gewerbe, Industrie), >2000 DTV (Misch, Gewerbe, Industrie)
Straßenkategorie	Bundesstraßen, Landesstraßen, Gemeindestraßen
DTV max	15000-100000
Straßentypen aus RAU	Kurve, Kreuzungen, LSA, Kreisverkehr
Produktname	Hydrosystem/ Hydroclean HAT
Art der Anlage	Filter
Behandlung / Versickerung	+/-
Einsatzort	Straße und Straßenseitenraum
Einleitung in Oberflächengewässer (OW)/ Grundwasser (GW)	OW
Produkt	Hydrosystem/ Hydroclean HAT
Hersteller	3P Technik Filtersysteme GmbH/ Rehau AG/ Eurofiltrator e. K.
anschließbare Fläche [m ²]	Variabel durch Module, 500 - 2.500 m ²
Oberflächenbedarf [%]	Nein
Spez. Speichervolumen [m ³ /ha]	1
Spez. Filterfläche [m ² /ha]	<100
Systempreis pro Stk. (Listenpreise) [€]	6.000 - 7.000 €
Investition ca. [€/m ²]	7 - 12

II.1.6.1. Einordnung in die Systematik des Arbeitsblattes DWA A-102-2 (2020)

Seit Dezember 2020 ist das DWA Arbeitsblatt DWA-A 102-2 veröffentlicht. Dort erfolgt eine Zuordnung der Flächen bezüglich AFS63 je nach Flächenart zu 3 Belastungsklassen. Im Folgenden erfolgt eine Betrachtung des orts- und nutzungsspezifischen Reifenabriebanfalls. Dazu wurde die Fraktion <math><50\mu\text{m}</math> der Reifenabriebberechnung ausgewertet. Diese wird mit 10% des Gesamtanfalls an Reifenabrieb angesetzt. Berücksichtigt man die Verluste an der Oberfläche durch Windverluste bei gleichzeitig wöchentlich einmaliger Straßenreinigung kann der potentiell in die Kanalisation abgetragenen Anteil mit ca. 5% abgeschätzt werden. Bei größeren Partikeln ist die Windverfrachtung, und damit die Verluste in die Umgebung, deutlich geringer.

Insgesamt ergeben sich folgende flächenbezogenen Werte ($\text{kg}/(\text{ha}\cdot\text{a})$) $\leq 50\mu\text{m}$ an entstehendem Reifenabrieb TWP in Abhängigkeit von Fahrsituation und Geschwindigkeit. Einen maßgeblichen Einfluss in der Gesamtbetrachtung haben die Verkehre an den Kreuzungen, bei denen ein Abbiegeanteil von 30% angenommen wurde. Hier ist der größte Anteil des berechneten Reifenabriebs zu finden.

Tabelle 28: Reifenabrieb in Abhängigkeit von Fahrsituationen als Summe pro Jahr, Mittelwert in $\text{kg}/(\text{ha}\cdot\text{a})$ mit Darstellung der Länge der Straßenabschnitte

Fahrsituationen	Summe Reifenabrieb <math><50\mu\text{m}</math> g/a	Mittelwert Reifenabrieb <math><50\mu\text{m}</math> Kg/(ha*a)	Summe Länge Fahrbahn m
Gerade	1.806.305	1,3	158.486
Kreuzung	18.820.092	36,0	37.440
Kurve	1.005.624	11,3	11.289
Steigung	641.338	6,2	9.728
Gesamt Ergebnis	22.273.360	14,6	216.944

Die Kreuzungen bei Straßen größer 2.000 KFZ/d DTV liefern insgesamt den größten Anteil im Straßenbereich. Dieser beträgt für das betrachtete Einzugsgebiet mehr als 80 % bei 10% der gesamten Straßenlänge. Daraus kann abgeleitet werden, dass eine Reinigung der Kreuzungsbereiche den größten Effekt auf die Verringerung der Einträge von Reifenabrieb hat. Nur Kurven, in Abhängigkeit von Geschwindigkeit und Radius, sowie Steigungen stellen noch einen nennenswerten Beitrag. Das Fahren auf geraden Straßenabschnitten liefert in diesem Zusammenhang relativ geringe Mengen.

Tabelle 29: Reifenabrieb in Abhängigkeit von DTV-Klassen und Fahrsituationen der jeweiligen Streckenabschnitte als Summe pro Jahr, Mittelwert in kg/(ha*a) mit Darstellung der Länge der Straßenabschnitte

DTV-Klasse (PKW/d)	Fahrsituation	Summe Reifenabrieb <50 µm in g/a	Mittelwert Reifenabrieb <50 µm in kg/(ha*a)	Summe Länge Fahrbahn in m
<= 300	Gerade	29.992	0,1	42.007
	Kreuzung	83.188	0,8	8.273
	Kurve	23.001	0,7	4.035
	Steigung	9.907	0,3	4.281
>300<=2000	Gerade	97.458	0,4	38.936
	Kreuzung	739.298	9,2	7.107
	Kurve	47.299	2,7	2.520
	Steigung	26.201	2,7	1.393
>2000<=15000	Gerade	1.326.239	2,8	72.101
	Kreuzung	15.092.714	62,9	20.291
	Kurve	850.505	30,1	4.150
	Steigung	486.13	19,2	3.707
>15000	Gerade	352.61	12,1	5.443
	Kreuzung	2.904.89	147,1	1.769
	Kurve	84.819	16,6	585
	Steigung	119.096	41,8	348
Gesamt Ergebnis		22.273.361	14,6	216.944,0

Die errechneten Werte bei der Entstehung von Reifenabrieb (TWP) zeigen deutlich, dass die höchsten Abriebmengen an Kreuzung und Kurven entstehen. Damit könnte eine Ergänzung der Einstufung in die DWA-A 102-2 durch Ermittlung der Fahrbereiche erfolgen. Als Vorschlag kann die Einstufung von Kreuzungen bezüglich Reifenabrieb ab 2000-15000 KFZ DTV in Kategorie II und ab 15.000 KFZ DTV in Kategorie III erfolgen.

Da es sich bei den dargestellten Werten um reinen Reifenabrieb (TWP) handelt, kann dieser bei Vorliegen als Mischung aus Reifenabrieb und Straßenabrieb (TRWP) mit einem Faktor 2 multipliziert werden. Zu beachten ist ferner, dass die in situ gemessenen Werte mit einem Faktor 0,5 – 0,1 wiederum deutlich geringer lagen. Zu genaueren Bestimmung der Werte sind zukünftig noch weitere Messungen erforderlich.

II.1.7. Zusammenfassung/ Kernbotschaften

II.1.7.1. Ergebnisse

- Der Vergleich der Größenverteilung des Reifenabriebs im Labor und auf einer Indoor Teststrecke zeigte eine gute Übereinstimmung, der Medianwert der Verteilungen liegt bei 140 µm
- Im Labormassstab wurden in einem weiteren Testprogramm mit verschiedenen Gummimischungen Größenverteilungen erzeugt. Die Messergebnisse zeigen, dass Mischungen mit einem großen Abriebwiderstand, Verteilungen mit einem kleineren Medianwert erzeugen.
- Unter Berücksichtigung der Straßentopologie lassen sich geeignete in situ Messstellen (Hot Spots) für Monitoringprogramme und ggf. den Einsatz von Maßnahmen identifizieren
- Bezogen auf den Straßenquerschnitt wurde im Abstand von 1,6 m (Spur1 mit 80 cm +Spur2 mit 80 cm) vom Bordstein die größte Reifenabriebs- und Partikelmenge festgestellt.
- Zur Beprobung einer trockenen Umweltprobe eignet sich die definierte Handkehrichtprobenahme am besten
- Zur Beprobung einer nassen Umweltprobe wurde ein Probenahmekorb für den Straßenablaufschacht entwickelt was sich als beste Probenahme für den wässrigen Eintrag erwies.
- Zur massenbezogenen Analyse des Leitparameters SBR/BR ist die Pyrolyse-GC/MS, gemäß ISO 21396, geeignet. Es sollte eine entsprechende Probenvorbereitung durchgeführt werden um Störstoffe zu entfernen.
- Die Messungen von Reifenabrieb aus Umweltproben ist anspruchsvoll und Ergebnisse müssen sehr sorgfältig interpretiert werden
- Die (trockene) Feststofffraktion von 20- 500 µm beschreiben das entsprechende Eintragspotential an Reifenabrieb, welches bei Regen abgespült werden kann
- Als Hot Spot für den Reifenabrieb stellen sich der Standort Kurve und die Lichtsignalanlage mit vergleichbaren Emissionen heraus.
- Für den Standort Kreisel ist die Verkehrsführung und der Radius entscheidend
- Bei den Standorten Steigung und Gerade fallen geringere Reifenabriebe an. Sie liegen beide auf dem gleichen Level
- Versuche zu Reinigungsleistung von Straßenkehrmaschinen liefern unter definierten Bedingungen reproduzierbare Ergebnisse
- Es konnte für den Prüfstoff Reifenmehl gezeigt werden, dass Straßenkehrmaschinen, je nach Fahrweise, die Partikelgrößenbereiche > 50 µm um bis zu 95 % und den besonders feinen Partikelgrößenbereich 20- 50 µm um bis zu 78 % aufnehmen können.
- Es wurde ein physikalisches Modell für die Reifenabriebentstehung erstellt. Dieses berücksichtigt unterschiedliche Parameter und kann die in situ ermittelten Messergebnisse für unterschiedliche Fahrsituationen in guter Qualität abbilden.
- Maßnahmen wie optimierte Straßenreinigung und dezentrale Filtereinrichtungen lassen sich bewerten und können zur Reduzierung beitragen
- Der diffuse Eintrag von Reifenabrieb in die Umwelt findet in der Nutzungsphase des Produktlebenszyklus- Reifen statt

II.1.7.2. Kernbotschaften

- Es konnten Reifenabrieb Hot Spots identifiziert und klassifiziert werden
- Die auf den Reifen wirkenden erhöhten Kräfte an der Kurve und Lichtsignalanlage führen zu einer vergleichsweise großen Abriebsmenge
- Die Straßenreinigung kann einen wesentlichen Beitrag zur Reduzierung des Eintrags von Feststoffen im Allgemeinen und Reifenabrieb im Speziellen leisten
- Durch den Einsatz der Straßenreinigung vor einem Regenereignis kann der Eintrag in die aquatische Umwelt deutlich reduziert werden

- Da sich die Feststoffe und der Reifenabrieb im Bereich von 1,6 m vom Bordstein akkumulieren, sollten parkende Autos den relevanten Randbereich für die Straßenreinigung zeitweise freigeben
- Bei zusätzlichen Untersuchungen am Flughafen konnte im Landebahn kein Reifenabrieb gefunden werden
- Durch ein breit angelegtes in situ Monitoringprogramm können weitere Einflussfaktoren identifiziert werden und Maßnahmen zur Reduzierung des Eintrags in die Umwelt kontinuierlich verbessert werden

II.2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Projektmittel wurden fast vollständig für den Personalaufwand bei den Partnern Continental, WESSLING, GKD, IPS, und TU Berlin aufgewendet.

Beim Projektpartner TU Berlin musste zur Realisierung der Tests mittels Straßenkehrmaschinen ein entsprechender Unterauftrag an die BSR vergeben werden.

Vom Projektpartner GKD musste zur Aufbereitung und Wartung der Siebeinsätze, welche im Probenahmekorb verbaut wurden, ein spezieller Siebrüttelturm, ein Trockenschrank und ein Ultraschallbad beschafft werden.

Vom Projektpartner WESSLING mussten zur Realisierung der SBR Messungen aus Umweltproben eine entsprechende Pyrolyse-GC/MS, Analysenwaage und ein Ionisator beschafft werden

II.3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Arbeiten waren notwendig und angemessen, um die vorgegebenen Ziele gemäß Arbeitsplan zu erreichen.

II.4. Voraussichtlicher Nutzen

II.4.1. Für die Wissenschaft

Die wissenschaftlichen Erfolgsaussichten des Projektkonzepts liegen im Erkenntnisgewinn im Zusammenhang zwischen Aufkommen von Reifenabrieb speziell in der Nutzungsphase vor dem Hintergrund der technischen und konzeptionellen Vermeidungsstrategien und dem Eintrag in die aquatische Umwelt. Der entwickelte Maßnahmenkatalog wird es ermöglichen wirkungsvolle Strategien zu entwickeln und Handlungsempfehlungen für die relevanten Stakeholder abzuleiten.

Außerdem werden die Ergebnisse durch die TU Berlin und WESSLING in die DIN Normenausschüsse „Kunststoffe und Umweltaspekte“ und „Wasserwesen, Arbeitskreis Probenahme“, welche mindestens zweimal pro Jahr zu unterschiedlichen Terminen tagen, mit einfließen und verwertet. Continental nutzt die Ergebnisse um die Immissionen des Reifens in die Umwelt zu bewerten und entsprechende Verbesserungspotentiale bei der Entwicklung berücksichtigen. Das Konzept des Probenahmekorbs, welches mit der Firma GKD entwickelt und realisiert wurde, kann einen wichtigen Beitrag zur detaillierten zukünftigen Beschreibung des AFS63 beitragen.

II.4.2. Für die Industrie

Die anschauliche Demonstration des neuen Verfahrens zur Probenahme und Analyse sowie der gezielten Vorstellung von zielgerichteter Behandlungsanlagen unterstützt die kurzfristige Vermarktung der Ergebnisse aus *RAU* bei interessierten Kunden. Neben großen, deutschen Reifenherstellern und der Automobilindustrie profitieren sowohl Stadtreinigungsbetriebe als auch kleine und mittlere Unternehmen im Bereich der Umwelt- und Verkehrsplanung von den Projektergebnissen.

Den Reifenherstellern helfen die Ergebnisse von *RAU*, mittelfristig das Ausmaß die Mengen des Reifenabriebs zu quantifizieren und entsprechende Maßnahmen zur Minimierung des Eintrages zu entwickeln und vorzuschlagen. Da der Reifenverschleiß wesentlich von dem Fahrverhalten des Fahrzeugs abhängt lassen sich die Ergebnisse auch für Maßnahmen durch die Nutzer/Verbraucher verwenden.

II.4.3. Für Endanwender

Wenn das Planungs- und Entscheidungsinstrument, das gegenwärtig noch als Demonstrator vorliegt, als Softwareanwendung für interessierte Kunden, wie z.B. Planungs- und Ingenieurbüros bzw. bzw. Verantwortlichen in den öffentlichen Planungsabteilungen weiterentwickelt wird, kann es entweder direkt als Dienstleistung oder in Weiterentwicklung als Softwaretool oder Datenbank vermarktet werden. Die neue Methodik lässt sich mittelfristig auch auf andere Anwendungsfälle generell zur Ausbreitung von Partikeln oder an Partikeln haftenden Schadstoffen und für andere Länder übertragen, so dass sich noch weitere potentielle Märkte erschließen.

Ein kurzfristig umzusetzender unternehmerischer Verwertungsweg ist die Erstellung von Potential-/Hotspotkarten als Grundlage für die Generalentwässerungsplanung. Strategische Planungen zur Regenentwässerung (Generalentwässerungsplanung oder auch Niederschlagswasserkonzepte) müssen heute Aussagen zur Regenwasserbehandlung enthalten. Die Ergebnisse des Projektes *RAU* können dazu verwendet werden, punktuelle oder linienhafte Bereiche mit hohem Schadstoffanfall gezielt zu behandeln und die Emissionen entscheidend zu verringern.

II.4.4. Für Behörden

Es wurden neue Untersuchungsinstrumente zur Quantifizierung von Hotspot durch Probenahme und Analyse entwickelt. Die flächigen GIS-basierten Planungsinstrumente dienen der Identifikation Hotspots mit hohen Verschmutzungspotenzialen und der Entscheidungsunterstützung für Verantwortliche für die Maßnahmenauswahl, die auch die Lage in den Entwässerungssystemen und deren potenziellem Verbleib nach Abtrag von den Flächen berücksichtigt.

Für das Land Berlin mit der Senatsverwaltung für Umweltschutz und der Straßenbauverwaltung können die gewonnen Informationen konkret zur Priorisierung von Maßnahmen insbesondere in den Einzugsgebieten mit Trennsystem und direktem Eintrag in ein Gewässer bei Planung und Einsatz von Maßnahmen unterstützen. Diese Maßnahmen können sowohl straßenbegleitende Versickerung als auch andere technische Filter sein. Auch die Einbeziehung der Straßenreinigung ist ein wichtiger Bestandteil in der Gesamtsicht auf Entstehung und Verbleib von Reifenabrieb. Die Entscheidungsfindung kann durch Ausnahme der Belastungen durch die entwickelten Anlagen und Verfahren zur Probenahme und Analyse unterstützt werden. Die Ergebnisse der Analyse sind Grundlage für Überprüfungen der durch die GIS-Methode ermittelten Belastungspunkte und -zonen.

Die Ergebnisse bieten den Entscheidungsträgern auch eine Grundlage zur Beurteilung des Anteils von Reifenabrieb am in der Wasserwirtschaft mittlerweile maßgeblichen Parameter abfiltrierbare Stoffe, fein (AFS63)., Die Betrachtung der Hotspots qualifiziert die Anwendung der differenzierten Flächenbelastung vorliegenden Arbeitsblatt der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft und Abfall DWA-A 102 für Reifenabrieb. So können wasserwirtschaftliche Anlagen in größeren Bauprojekten auch auf den Parameter Reifenabriebebelastung dimensioniert werden. Konkret erwartet SIEKER, dass es zu Beauftragungen seitens von Städten und Kommunen kommen wird.

Eine Bereitstellung der Daten als GeoDaten WFS bzw. WMS ist möglich. Diese können von Behörden veröffentlicht werden. Im Arbeitsbereich des Landes Berlin sind außerdem Anwendungen bei der Prüfung der Luftqualität von Innenstadtstraßen vorstellbar.

II.5. Fortschritte im Themengebiet bei anderen Stellen

Dem Projektteam sind keine weiteren Aktivitäten bei anderen Stellen bekannt.

II.6. Veröffentlichungen

- Li Q, Pohrt R, Lyashenko IA, Popov VL. Boundary element method for nonadhesive and adhesive contacts of a coated elastic half-space. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology. 2020;234(1):73-83. doi:10.1177/1350650119854250
- Pohrt R. Tire Wear Particle Hot Spots – Review of Influencing Factors. Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering. 2019; 17(1): 17-27
- Li Q, Pohrt R, Popov VL. Adhesive Strength of Contacts of Rough Spheres. Front. Mech. Eng. 2019; 5:7. doi:10.3389/fmech.2019.00007
- Popov VL, Pohrt R. Adhesive wear and particle emission: Numerical approach based on asperity-free formulation of Rabinowicz criterion. Friction 2018; 6(3): 260-273. doi:10.1007/s40544-018-0236-4
- Reiber J. et al., Statuspapier- Mikroplastik-Analytik: Probenahme, Probenaufbereitung und Detektionsverfahren, im Rahmen des Forschungsschwerpunktes Plastik in der Umwelt, 2020, BMBF
- Reiber J., gwf- Wasser Abwasser; Reifenabrieb in der Umwelt (RAU); 2019
- Pohrt R. "Prediction and mitigation of tyre and road wear particle emission", International Workshop Wear Particle Transport and Emission: Mechanisms and Environmental Implications, 24. - 25. Februar 2021 Berlin / online
- Pohrt R. "The paradox of large particles in Rabinowicz wear criterion", International Workshop Contact Mechanics and Friction – Foundations and Applications, 14.-17. Oktober 2019 Berlin
- Pohrt R. "Usage of an asperity-free formulation in asperity models", 9th Contact Mechanics International Symposium, Mai 2018, Biella Italien
- Pohrt R. "Energy based wear particle prediction with application in automotive tyres" International Workshop on Science of Wear, September 2018, Beijing China

- Reiber J., 2019, Workshop des Querschnittsthemas „Analytik und Referenzmaterialien“ im Rahmen des Forschungsschwerpunktes Plastik in der Umwelt, Vortrag: Effiziente optische Detektion von Mikroplastik in wässrigen Systemen- Neue Ansätze und Verfahren
- Reiber J., 2019, Workshop des Querschnittsthemas „Analytik und Referenzmaterialien“ im Rahmen des Forschungsschwerpunktes Plastik in der Umwelt, Vortrag: Probennahme Luft
- Lange S., Reiber J.; 22nd Conference Odour and Emissions of Plastic Materials Universität Kassel; Tyre Wear in the Environment, 2019, Poster
- Reiber J.;2021, Webinar #1: Reifenabrieb in der Umwelt -- Neue Erkenntnisse aus drei Jahren Forschung, Neue Analysekonzepte zur Untersuchung von Reifenabrieb in Umweltproben
- Barjenbruch, M.: Spurenstoffe – Mikroplastik in der Wasserwirtschaft – Aktueller Sachstand und Ausblick. DWA-Seminar für den Gewässerschutzbeauftragten, Mainz, 11.12.2018
- Herper, D; Knefel, M. (Fa. GKD); Venghaus, D. (TUB): Woven metal filter media for microplastics sampling from water; MICRO 2018 – Fate and impacts of Microplastics: Knowledge, Actions and Solutions; International Conference; Lanzarote, Spanien, 19.-23.11.2018
- Bjenbruch, M. Venghaus, D.: Mikroplastik in der Siedlungswasserwirtschaft, DWA Seminar Weitergehende Abwasserreinigung, Bad Hersfeld, 14.11.2018
- Venghaus, D.; Lau, P; Barjenbruch, M.: Microplastic in urban water management; Mecana Umwelttechnik – Kolloquium, Reichenburg, Schweiz, 06.11.2018
- Venghaus, D.; Barjenbruch, M.: Reifenabrieb in der Umwelt - RAU; Wanderausstellung – Oceans Plastic LAB, Berlin, 21.- 29.10.2018
- Venghaus, D., Lau, P, Barjenbruch, M.: Wer räumt auf? – Mikroplastik in der Siedlungswasserwirtschaft, 34. Deutscher Naturschutztag, Kiel, 25.- 29.09.2018
- Barjenbruch, M.; Venghaus, D.; Lau P, Entfernung von Plastik aus Abwasser – die besondere Bedeutung des Abriebs von Autoreifen, KWB-Wasserwerkstatt, Berlin, 13.09.2018
- Barjenbruch, M., - Mikroplastik - kommunalen Kläranlagen - DWA-Biofilter-Erfahrungsaustausch, Enzen, 06.09.2018
- Venghaus, D.; Barjenbruch, M.: Mikroplastik in der Siedlungswasserwirtschaft; DWA Landesverbandstagung 2018 "Aktuelle Herausforderungen in der Wasserwirtschaft", Berlin, 31.05.-01.06.2018
- Lau, P.; Venghaus, D.; Barjenbruch, M.: Event-driven automatic sampling in road runoff to catch microplastic and total suspended solids; 10th Easter European Young Water Professionals Conference, 07.-12.05.2018, Zagreb, Croatia. ISBN: 978-953-8168-23- 9
- Lau, P.; Venghaus, D.; Barjenbruch, M.: Ereignisgesteuerte automatische Probenahme, Lehrer- und Obleutetag 2018, DWA-Landesverband Nord-Ost, Zeuthen, 23.02.2018
- Venghaus, D., Reiber, J., 2019: RAU | Messung von Reifenemissionen, Reifenemissionen | Daten | Umwelt; Emission und Ausbreitung von Reifenabrieb deutschlandweit minimieren, Fraunhofer Umsicht, 03.12.19, Berlin.
- Barjenbruch, M., Poppe, A., 2019: Mikroplastik und Nanomaterialien in der Siedlungswasserwirtschaft, Weitergehende Abwasserreinigung, DWA, 07.11.19, Göttingen.

- Barjenbruch, M., 2019: Mikroplastik in der Siedlungswasserwirtschaft, 9. Kitzbüheler Wassersymposium, Gemeinde Kitzbühel und VTA Österreich, 06.11.19, Kitzbühl, Österreich.
- Venghaus, D., 2019: Tyre wear and microplastic in road runoff and the surrounding environment, CEDR Call 2016 Final Workshop on Water Quality, Conference of European Directors of Roads, 09.10.19, Lissabon, Portugal.
- Lau, P., Barjenbruch, M., 2019: Mikroplastikprobenahme in der Siedlungswasserwirtschaft, Probenahmeschulung Oberflächengewässer und Abwasser, BEW - Das Bildungszentrum für die Ver- und Entsorgungswirtschaft gGmbH, 23.09.19, Essen.
- Kober, P., 2019: Probenahmekonzept im Projekt RAU - Reifenabrieb in der Umwelt, Expertenworkshop: Leistungsfähigkeit dezentraler Niederschlagswasserbehandlungsanlagen, LANUV, 17.09.19, Duisburg.
- Venghaus, D., Lau, P., Neupert, J., Barjenbruch, M., 2019: Reifenabrieb in der Siedlungswasserwirtschaft, REGENWASSER WEITERDENKEN – BEMESSEN TRIFFT GESTALTEN, Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzbeauftragter, 10.09.19, Rigi Kaltbad, Schweiz.
- Barjenbruch, M., Venghaus, D., Lau, P., Neupert, J., 2019: Entfernung von Mikroplastik aus Abwasser unter besonderer Berücksichtigung des Reifenabriebs. In: 12. Rostocker Abwassertagung, Rostock, Universität, Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät, Professur Wasserwirtschaft Rostock.
- Barjenbruch, M., Bannick, C.G., Drewes, J., Montag, D., Steinmetz, H., 2019: Mikroplastik - Überblick zum Kenntnisstand und zur Bedeutung für die Abwasserbehandlung, 4. KläranlagenTage, DWA, 27.06.19, Bad Soden.
- Venghaus, D., 2019: Reifenabrieb in der Siedlungswasserwirtschaft, Dresdner Wasserseminar 2019, TU Dresden, 27.06.19, Dresden.
- Venghaus, D., Barjenbruch, M., 2019: Reifenabrieb in der Umwelt - RAU, Berliner Workshopreihe zu Mikroplastik in der marinen Umwelt, Bundesumweltministerium, 25.06.19, Berlin.
- Barjenbruch, M., 2019: Herausforderungen für die Siedlungswasserwirtschaft, 50 Jahre Kooperation MGSU TU Berlin, Technische Universität Berlin, 17.05.19, Berlin.
- Venghaus, D., Lau, P.: In-situ Probenahme in der Siedlungswasserwirtschaft, PidU PhD-Winterschool, 11.02.20, Döllnsee
- Venghaus D. 2020: Niederschlagswasserverschmutzung durch Reifenabrieb, Lehrer und Obleutetag 2020, 27.-28.02.2020, Zeuthen
- Lau, P.: Mikroplastikprobenahme in der Siedlungswasserwirtschaft, BEW-Probenahmeschulung "Oberflächengewässer und Abwasser - Vertiefung", 23.09.2020, Essen
- Venghaus D., Barjenbruch M., Reifenpartikel – vom Fahrzeug bis in den Boden, Kunststoffe in der Umwelt – Ein Problem für unsere Böden, oder nur falscher Alarm?, Tagung der Kommission Bodenschutz beim UBA (KBU), 03.12.2020, Online Tagung
- Venghaus D., Barjenbruch M. Neupert J., Mikroplastik in der Siedlungswasserwirtschaft, Oekotoxzentrum, Eawag, 26./27. Januar 2021, Online Konferenz

LITERATURVERZEICHNIS

- AfS, Berlin Brandenburg. 2020.** Berlin im Überblick. [Online] 2020. <https://www.berlin.de/berlin-im-ueberblick/zahlen-und-fakten/>.
- Baensch-Baltruschat, B., et al. 2020.** Tyre and road wear particles (TRWP) - A review of generation, properties, emissions, human health risk, ecotoxicity, and fate in the environment. *Science of The Total Environment*. 733, Sep 2020.
- Barquins, M. 1993.** Friction and wear of rubber-like materials. *Wear*. 1993, S. 1-11.
- Baumann, W. und Ismeier, M. 1997.** *Exemplarische Erfassung der Umweltexposition ausgewählter Kautschukderivate*. UBA. Dessau : UBA, 1997.
- BER. 2018.** Verkehrsstatistik. [Online] BER - Flughafen Berlin Brandenburg, 2018. [Zitat vom: 25. 07 2021.] https://www.berlin-airport.de/de/presse/presseinformationen/verkehrsstatistik/index.php?vs_month=1&vs_year=2018.
- Boucher, J. und D., Friot. 2017.** *Primary Microplastics in the Oceans: A Global Evaluation of Sources*. IUCN. 2017. ISBN: 978-2-8317-1827-9.
- Briscoe, B. 1981.** Wear of polymers: an essay on fundamental aspects. *Trib. Int.* 1981, 14, S. 231-243.
- Draht, Katharina (BWB). 2020.** *Einzugsgebiet Halensee*. [E-Mail an Oskar Stieler] Berlin : BWB, 2020. E-mail an Oskar Stieler.
- DWD. 2021.** Niederschlag: vierteljährliche Mittelwerte 1982 - 2010. [Online] 2021. [Zitat vom: 25. 07 2021.]
- ETRMA. 2011.** End of life tyres - A valuable resource with growing potential. [Online] 2011. [Zitat vom: 25. 07 2021.] <https://www.etrma.org/wp-content/uploads/2019/09/brochure-elt-2011-final.pdf>.
- Fausser, P., Tjell, J.C., Mosbaek, H., Pileegard, K. 1999.** Quantification of tire-tread particles using extractable organic zinc as tracer. *Rubber Chemistry and Technology*. 1999, 72, S. 969–977.
- FIS Broker, Stadtentwicklung Berlin. 2014.** Verkehrsmengen 2014 (Umweltatlas). [Online] 2014. <https://fbinter.stadt-berlin.de/fb/index.jsp>.
- Griesbaum, J. 2017.** Charakterisierung von Einzugsgebieten mittels GIS und Ermittlung geeigneter Methoden zur Untersuchung der Feststoffakkumulation. *Bachelorarbeit*. Karlsruhe : Karlsruher Institut für Technologie, 2017.
- Grosch, K. A. 1963.** The Relation between the Friction and Visco-Elastic Properties of Rubber. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences*. 1356, 1963, 274,, S. 21-39.
- **1996.** The rolling resistance, wear and traction properties of tread compounds. *Rubber Chemistry and technology*. 1996.
- Grottker, M. 1987.** Runoff quality from a street with medium traffic loading. *Science of The Total Environment*. 56, 1987, 457-466.
- Hillenbrand, Thomas, et al. 2005.** *Einträge von Kupfer, Zink und Blei in Gewässer und Böden- Analyse der Emissionspfade und möglicher*. 2005.

- Hopke, P.K. und Lamb, R.E., Natusch, D.F.S., 1980.** Multielemental characterization of. *Environmental Science and Technology*. 1980, 14, S. 164–172.
- Joswig, K. (BWB). 2016.** Retentionsbodenfilter am Halensee. *Halensee - Badegewässerprofil*. [Online] Landesamt für Gesundheit und Soziales, 2016. [Zitat vom: 25. 07 2021.] <https://www.berlin.de/lageso/gesundheit/gesundheitschutz/badegewaesser/badegewaesserprofile/artikel.468919.php>.
- Kocher, Birgit, et al. 2010.** *Stoffeintrag in Straßenrandböden Messzeitraum 2005/2006*. Bundesanstalt für Straßenwesen. 27511 Bremerhaven : Verlag für neue Wissenschaft GmbH, 2010. ISBN 978-3-86918-056-4.
- Kraftfahrbundesamt. 2016.** Verkehr in Kilometern – Inländerfahrleistung. Entwicklungen der Fahrleistungen nach Fahrzeugarten seit 2016. [Online] 2016. [Zitat vom: 23. Juli 2021.] https://www.kba.de/DE/Statistik/Kraftverkehr/VerkehrKilometer/vk_inlaenderfahrleistung/vk_inlaenderfahrleistung_inhalt.html.
- Kreider, M.L., et al. 2010.** Physical and chemical characterization of tire-related particles: comparison of particles generated using different methodologies. *The Science of zhe total environment*. 408, 2010, 3.
- Leister, G. 2009.** *Fahrzeugreifen und Fahrwerkentwicklung*. Wiesbaden : Vieweg+Teubner | GWV Fachverlage GmbH,, 2009.
- Marczinski, Henrik (BWB). 2020.** *Ergebnisse KURAS Studie 2015*. [E-mail an Oskar Stieler / 26.03.2020] Berlin : BWB, 2020.
- Momber, A. W. und Schulz, R.-R. 2006.** *Handbuch der Oberflächenbearbeitung Beton. Bearbeitung ; Eigenschaften ; Prüfung*. s.l. : Springer Verlag, 2006.
- Ni, H.-G., et al. 2008.** Occurrence, phase distribution, and mass loadings of benzothiazoles in riverine runoff of the Pearl River Delta, China. *Environmental Science and Technology*. 2008, 42.
- ORI. 2021.** Basic Ex 1 mobil. *mobiler Probennehmer für professionelle Ansprüche für den Einsatz in explosionsgefährdeten Umgebungen*. [Online] ORI Abwassertechnik GmbH & Co. KG, 2021. [Zitat vom: 25. 07 2021.]
- **2021.** Probenahme Modul. *Ferngesteuerte Probenahme auch innerhalb der Ex-Zone 1*. [Online] ORI Abwassertechnik GmbH & Co. KG, 2021. [Zitat vom: 25. 07 2021.] <https://www.origmbh.de/de/probenahme/mobile-probennehmer/probenahme-modul.html>.
- Peano, L., et al. 2020.** Plastic Leak Project. Methodological Guidelines. [Online] 2020. [Zitat vom: 07. August 2020.] <https://quantis-intl.com/report/the-plastic-leak-project-guidelines>.
- Persson, B.N.J. 2001.** Theorie of Rubber Friction and Contact Mechanics. *Journal of Chemical Physics*. 2001, 8, S. 3840-3861.
- Persson, B.N.J. und E. Tosatti. 2000.** Qualitative Theory of Rubber Friction and Wear. *Journal of Chemical Physics*. 2000, 112, S. 2021-2019.
- Pierson, W.R. und Brachaczek, W.W. 1974.** Airborne particulate debris from rubber tires. *Rubber Chemistry and Technology*. 1974, 47, S. 1275–1299.
- Pitt, R. und Amy, G. 1973.** *Toxic materials analysis of street surface constituents*. Washington D.C. : U.S. Environmental Protection Agency, 1973.

- Popov, V.I. 2015.** *Kontaktmechanik und Reibung. Von der Nanotribologie bis zur Erdbebendynamik.* 3. Auflage. s.l. : Springer, 2015.
- Schallamach, A. 1968.** Recent Advances in Knowledge of Rubber Friction and Tire Wear. *Rubber Chemistry and Technology.* 1968, 41, S. 209-244.
- Schmitt, T.G., et al. 2010.** Entwicklung von Prüfverfahren für Anlagen zur dezentralen Niederschlagswasserbehandlung im Trennverfahren. *Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt, gefördert unter dem Az: 26840-23 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt.* [Online] 2010. [Zitat vom: 25. 07 2021.] <https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-26840.pdf>.
- Selbig, W. R., Bannermann, R. und Corsi, S. R. 2013.** From streets to streams: assessing the toxicity potential of urban sediment by particle size. *Science of The Total Environment.* 444, 2013.
- SenStadtUm. 2017.** Verkehrsmengen 2017. [Online] 2017. https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwizivm4jfnxAhXggPOHHZ8MBjwQFjACegQIBBAD&url=https%3A%2F%2Fwww.stadtentwicklung.berlin.de%2Fumwelt%2Fumweltatlas%2Ftext%2Fkd701.docx&usg=AOvVaw20BE_pEpgnVfsevMZiwkDG.
- Statista. 2019.** Weltweite Automobilindustrie. [Online] 2019. <https://de.statista.com/statistik/studie/id/31199/dokument/weltweite-automobilindustrie-statista-dossier/>.
- Strauch, A. 2018.** *Teststandversuche optimierter dezentraler Niederschlagswasserbehandlungsanlagen zur Entfernung von Mikroplastik/Reifenabrieb aus dem Straßenabfluss.* s.l. : Masterarbeit Technische Universität Berlin, 2018.
- Stupak, P.R. und J.H. Kang, J.A. Donovan. 1990.** Fractal characteristics of rubber wear surfaces as a function of load and velocity. *Wear.* 1990, 141, S. 73-84.
- WBCSD. 2015.** TIP TIRE INDUSTRY PROJECT 10-Year Report (2005-2015). 2015.
- Wicke, D., A., Cochrane T. und O'Sullivan, A. D. 2012.** Atmospheric deposition and storm induced runoff of heavy metals from different impermeable urban surfaces. *Journal of environmental monitoring.* 14, 2012, Bd. 1.
- Wik, A. und Dave, G. 2009.** Occurrence and effects of tire wear particles in the environment – A critical review and an initial risk assessment. *Environmental Pollution.* 157, 2009, 1.
- Zeng, E.Y. und Tran, K., Young, D.** Evaluation of potential molecular markers for urban stormwater runoff. *Environmental Monitoring and Assessment.* 90, S. 23–43.
- Zhao, H., et al. 2018.** Role of urban surface roughness in road-deposited sediment build-up and wash-off. *Journal of Hydrology.* 560, 2018.