



Ruß in Baden-Württemberg

 Statistische Auswertung von Rußmessungen an ausgewählten Luftmesstationen von 1995-2008



Baden-Württemberg

Ruß in Baden-Württemberg

 Statistische Auswertung von Rußmessungen an ausgewählten Luftmessstationen von 1995-2008



Baden-Württemberg

HERAUSGEBER	LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg 76231 Karlsruhe, Postfach 100163, poststelle@lubw.bwl.de, www.lubw.de
REDAKTION	LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg Referat 33 – Luftqualität Sigrun Stoll
BEARBEITUNG	Meteorologisches Institut der Universität Freiburg Dr. Dirk Schindler Prof. Helmut Mayer
STAND	März 2010
BERICHTSUMFANG	60 Seiten



Berichte und Anlagen dürfen nur unverändert weitergegeben werden. Eine auszugsweise Veröffentlichung ist ohne schriftliche Genehmigung der LUBW nicht gestattet.

ZUSAMMENFASSUNG		7
1	EINLEITUNG	11
2	RUSSPARTIKEL	12
2.1	Grundbegriffe	12
2.2	Definition	12
2.3	Herkunft	12
2.4	Bildung	13
2.5	Zusammensetzung	14
2.6	Verweildauer und Transportwege in der Atmosphäre	15
2.7	Klimawirksamkeit	16
2.7.1	Direkte Wirkung von Rußpartikeln auf den Strahlungshaushalt	16
2.7.2	Semidirekte und indirekte Wirkung von Rußpartikel auf den Strahlungshaushalt	16
2.8	Gesundheitsrisiko	17
2.9	Beurteilungsmaßstab atmosphärischer Rußkonzentrationen	17
3	UNTERSUCHUNGSMETHODIK	18
3.1	Datengrundlage	18
3.2	Messmethodik	18
3.3	Datenanalyse	20
4	ERGEBNISSE	21
4.1	Entwicklung der Rußkonzentrationen	21
4.1.1	Tagesmittelwerte der Rußkonzentration	21
4.1.2	Jahresmittelwerte der Rußkonzentrationen	24
4.1.2.1	Jahresmittelwerte der Rußkonzentrationen aller Luftmessstationen	24
4.1.2.2	Jahresmittelwerte der Rußkonzentrationen für die ausgewählten Luftmessstationen	26
4.2	Einfluss atmosphärischer Umgebungsbedingungen auf die Rußkonzentration	27
4.2.1	Bodennahe Lufttemperatur	27
4.2.2	Niederschlag	29
4.2.3	Bodennahe Windgeschwindigkeit	31
4.3	Einfluss atmosphärischer Austauschbedingungen auf die Rußkonzentration	33
4.3.1	Mischungsschichthöhe	33
4.3.2	Stagnationsindex	34
4.4	Abhängigkeit der Ruß- von der PM10-Konzentration	36

5	ANHANG	38
5.1	Tabellen	38
5.1.1.	Untersuchungsumfang	38
5.1.2	Standorte in Baden-Württemberg mit temporären Messungen	39
5.2	Abbildungen	41
5.2.1	Tagesmittelwerte der Rußkonzentrationen	41
5.2.2	Tagesmittelwerte der Rußkonzentration in Abhängigkeit von Tagesmittelwerten der bodennahen Lufttemperatur	44
5.2.3	Tagesmittelwerte der Rußkonzentration in Abhängigkeit von Tagessummen des Niederschlags	46
5.2.4	Tagesmittelwerte sowie 95%-Konfidenzintervall der Rußkonzentration für die Messtage -1 bis 1 im Jahr 2005	48
5.2.5	Tagesmittelwerte der Rußkonzentration in Abhängigkeit von Tagesmittelwerten der bodennahen Windgeschwindigkeit	50
5.2.6	Tagesmittelwerte der Rußkonzentration in Abhängigkeit von der für 12:00 Uhr Mez berechneten Mischungsschichthöhe	52
5.2.7	Tagesmittelwerte der Rußkonzentration in Abhängigkeit von dem um 12:00 Uhr Mez berechneten Stagnationsindex	54
5.2.8	Tagesmittelwerte der Rußkonzentration in Abhängigkeit von Tagesmittelwerten der PM10-Konzentration	56
6	ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	58
7	LITERATURVERZEICHNIS	59

Zusammenfassung

Der Bericht analysiert die zeitliche Entwicklung gemessener Rußkonzentrationen im Luftmessnetz Baden-Württemberg zwischen 1.1.1995 und 31.5.2008 und den Einfluss meteorologischer Variablen, atmosphärischer Austauschbedingungen sowie lokaler PM10-Konzentrationen. Datengrundlage für die Untersuchungen waren Tagesmittelwerte an vier Verkehrsmessstationen (Stuttgart, Mannheim, Freiburg, Karlsruhe), sieben städtischen Hintergrundstationen (Freiburg-Mitte, Karlsruhe-Nordwest, Mannheim-Nord, Stuttgart-Bad Cannstatt, Kehl-Hafen, Ludwigsburg, Weil am Rhein) und einer ländlichen Hintergrundstation (Schwarzwald-Süd).

- An den Verkehrsmessstationen streute der Jahresmittelwert von Ruß im Zeitraum von 1995-2008 zwischen $8,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Stuttgart-Mitte-Straße) und $5,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Freiburg-Straße).
- An den Hintergrundstationen lag der Jahresmittelwert von Ruß im Zeitraum von 2000-2008 zwischen $3,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in Stuttgart-Bad Cannstatt und $1,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ an der Station Schwarzwald-Süd.
- Im Sommerhalbjahr war die Rußkonzentration niedriger als im Winterhalbjahr, bei den Verkehrsmessstationen im Zeitraum von 1995-2008 um ca. 7 % und bei den städtischen Hintergrundstationen im Zeitraum von 2000-2008 um ca. 12 %.
- Die einzelnen Tagesmittelwerte der Rußkonzentration waren an den Verkehrsmessstationen stets höher als an den städtischen Hintergrundstationen. Die höchsten Tagesmittelwerte mit knapp $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ wurden an der Station Stuttgart-Mitte-Straße gemessen.
- Im Wochenverlauf werden an den Verkehrsmessstationen die niedrigsten Tagesmittelwerte jeweils am Samstag und Sonntag gemessen, zwischen Montag und Freitag ist kein signifikanter Unterschied zu erkennen. Dieser Wochengang ist an städtischen Hintergrundstationen wesentlich schwächer ausgeprägt. An der ländlichen Hintergrundstation ist er aufgrund der Ferne zur Emissionsquelle Kfz-Verkehr nicht mehr erkennbar.
- An allen Luftmessstationen nahm die jährliche Rußkonzentration im Untersuchungszeitraum geringfügig ab. Die Abnahme war an den Verkehrsmessstationen deutlich stärker ausgeprägt als an den städtischen Hintergrundstationen.
- In der zweiten Hälfte des Untersuchungszeitraums (2001 bis 2008) verringerte sich die Abnahme der jährlichen Rußkonzentration, was vermutlich auf die Zunahme des Anteils der Diesel-Pkw an der Gesamtzahl aller Pkw in Baden-Württemberg ab dem Jahre 2001 zurückgeführt werden kann.

Aufgrund der inhomogenen Datenbasis war es nicht möglich, eine statistisch belastbare Analyse des Jahresganges der Rußkonzentrationen durchzuführen. Der Untersuchungszeitraum muss daher eher für die potenzielle Verfügbarkeit von Rußkonzentrationsmesswerten in Baden-Württemberg verstanden werden.

Die durchgeführten, univariaten Regressionsanalysen zwischen der täglichen Rußkonzentration und Tageswerten der meteorologischen Variablen Lufttemperatur, Niederschlag und Windgeschwindigkeit und den atmosphärischen Austauschbedingungen wie

Mischungsschichthöhe und Stagnationsindex zeigen, dass es keine verallgemeinerbaren, funktionalen Abhängigkeiten an den untersuchten Luftmessstationen gibt. Den bedeutendsten Einfluss auf die lokalen Rußkonzentrationen übt die bodennahe Windgeschwindigkeit aus, während die bodennahe Lufttemperatur und die untersuchten Niederschlagsereignisse von eher untergeordneter Bedeutung für die lokalen Rußkonzentrationen sind. Am ehesten erklärt der Stagnationsindex, der die atmosphärischen Austauschbedingungen charakterisiert, den größten Teil der Varianz in den Datenkollektiven der Rußkonzentration.

Anders als bei den meteorologischen Parametern ist ein deutlicher Zusammenhang zwischen der PM₁₀-Konzentration und der lokalen Rußkonzentration erkennbar. Er ist bei den städtischen Hintergrundstationen stärker ausgeprägt als bei den Verkehrsmessstationen. Der prozentuale Anteil von Ruß an der PM₁₀-Fraktion beträgt an den Verkehrsmessstationen 16 - 23 %, an den städtischen Hintergrundstationen im Mittel zwischen 12 % und 14 % und an der ländlichen Hintergrundstation Schwarzwald-Süd 10 %.

1 Einleitung

In straßennahen Belastungsbereichen mit schlechter Durchlüftung kommt es in Baden-Württemberg zu Überschreitungen der PM₁₀-Grenzwerte. PM₁₀ besteht einerseits aus direkt emittierten Partikeln (primäre Partikel) und wird andererseits auch in der Atmosphäre aus Vorläufer-substanzen chemisch gebildet (sekundäre Partikel). Der Straßenverkehr trägt sowohl bei den primär emittierten als auch bei den sekundär gebildeten Partikeln einen entscheidenden Anteil bei. Bei den primär emittierten Partikeln ist es vor allem Ruß aus Dieselantrieben, Anteile aus Brems-, Reifen- und Straßenabrieb, sowie schwer quantifizierbarer aufgewirbelter Straßenstaub. Den Rußpartikeln kommt dabei aus toxikologischer Sicht eine besondere Bedeutung zu. Aufgrund zahlreicher Untersuchungen im Bereich der Umweltmedizin können Rußpartikel auf der Basis übereinstimmender Befunde aus Tierexperimenten und epidemiologischen Studien als wahrscheinliches Humankarzinogen angesehen werden [LAI, 2006]. An Arbeitsplätzen sind Dieselmotoremissionen nach § 3, Abs. 2, Nr. 3 der GefStoffV und nach TRGS 906 als kanzerogen eingestuft. Ein toxikologisch begründeter Grenzwert für Ruß existiert nicht. Nach Aufhebung der 23. BImSchV sollen Rußpartikel künftig nach der 22. BImSchV, ohne besonders ausgewiesen zu werden, als Bestandteil der PM₁₀-Fraktion messtechnischerfasst und über die PM₁₀-Minderungsmaßnahmen reduziert werden.

In Baden-Württemberg werden an Luftmessstationen des amtlichen Luftmessnetzes seit 01.01.1995 Tagesmittelwerte der Rußkonzentrationen ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) gemessen. Bisher erfolgte jedoch noch keine umfassende Analyse

- der zeitlichen und räumlichen Entwicklung lokaler Rußkonzentrationen und
- des Einflusses atmosphärischer Umgebungs- und Austauschbedingungen auf die zeitliche und räumliche Entwicklung lokaler Rußkonzentrationen.

In der für diese Untersuchung relevanten Literatur finden sich kaum Hinweise auf bereits durchgeführte wissenschaftliche Untersuchungen zur zeitlichen und räumlichen

Entwicklung von bodennahen Rußkonzentrationen über einen längeren Zeitraum. Da Ruß ein Bestandteil der an den Luftmessstationen gemessenen PM₁₀-Fraktion ist, ergeben sich aus der Literatur [Harrison et al., 2004; Holst et al., 2005; Hooyberghs et al., 2005; Kukkonen et al., 2005; Wise und Comrie, 2005; Holst et al., 2006a, 2006b, 2006c; Sansone et al., 2006] dennoch Hinweise auf die Bedeutung meteorologischer Austauschbedingungen für den Betrag lokaler Rußkonzentrationen. So sind z.B. hohe Rußkonzentrationen bei Wetterlagen mit eingeschränkten atmosphärischen Austauschbedingungen zu erwarten, z.B. während austauscharmer Hochdruckwetterlagen im Winter oder nächtlicher Inversionswetterlagen im Sommer. Die Reduzierung des Luftmassenaustauschs in der atmosphärischen Grenzschicht während solcher Wetterlagen lässt sich über die Mischungsschichthöhe und den Stagnationsindex quantifizieren.

Um einen umfassenden Überblick über die Ruß-Trends in Baden-Württemberg der letzten Jahre zu erhalten, wurde das meteorologische Institut der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg von der LUBW beauftragt mit den zur Verfügung stehenden Ruß-Daten statistische Analysen durchzuführen. Zielsetzung dieser Untersuchung ist es, sowohl die

- zeitliche und räumliche Entwicklung lokaler Rußkonzentrationen
- als auch den Einfluss
- atmosphärischer Umgebungsbedingungen,
- atmosphärischer Austauschbedingungen und
- der PM₁₀-Fraktion

auf den Betrag von Tagesmittelwerten lokaler Rußkonzentrationen im Zeitraum 01.01.1995 bis 31.08.2008 zu analysieren.

2 Rußpartikel

2.1 GRUNDBEGRIFFE

Die Lufthülle unserer Erde ist ein Gemisch aus gasförmigen, flüssigen und festen Stoffen. Luftgetragene feste oder flüssige, meist kolloidale Partikel, die überwiegend aus einer oder mehreren weiteren Substanzen als nur Wasser bestehen, bilden in der Atmosphäre das sogenannte atmosphärische Aerosol (particulate matter, PM). Sind die Partikel fest, so spricht man von Staub. Als Schwebstaub gelten alle Staubpartikel in der Außenluft, die nicht sofort zu Boden sinken bzw. koagulieren (Partikel stoßen aufeinander und bleiben aneinander haften), sondern eine gewisse Zeit in der Atmosphäre verweilen. Nach dem Ursprung der Partikel wird zwischen primären Aerosolen und sekundären Aerosolen unterschieden. Die Partikel der primären Aerosole stammen meistens aus mechanischen oder thermischen Prozessen, bei denen die Partikel direkt in die Atmosphäre eingetragen werden. Sekundären Aerosolen werden erst in der Luft durch Umwandlung aus gasförmigen Vorläufersubstanzen gebildet.

Die Größe eines Partikels wird üblicherweise mit Hilfe seines aerodynamischen Durchmessers bestimmt. Der aerodynamische Durchmesser ist eine abstrakte Größe zur Beschreibung des Verhaltens eines gasgetragenen Partikels. Er ist definiert als der Durchmesser einer Kugel mit der normierten Dichte von 1 g/cm^3 , welche die gleiche Sinkgeschwindigkeit hat wie der Partikel selbst. Die Staubpartikel lassen sich nach der Größe in die Fraktionen

- ultrafeines Aerosol (Partikeldurchmesser $< 0,1 \text{ }\mu\text{m}$),
- feines Aerosol (Partikeldurchmesser $0,1\text{-}2,5 \text{ }\mu\text{m}$),
- grobes Aerosol (Partikeldurchmesser $> 2,5 \text{ }\mu\text{m}$)

unterteilen. Als Feinstaub (PM₁₀) bezeichnet man die im Gesamtstaub enthaltenen Partikel, deren aerodynamischer Durchmesser kleiner als $10 \text{ }\mu\text{m}$ ist [LfU/UMEG, 1998].

2.2 DEFINITION

Der Begriff „Ruß“ ist aufgrund unterschiedlicher Entstehungsprozesse und Erscheinungsformen weder im chemischen noch im physikalischen Sinn klar definiert. In Abhängigkeit von seinen Entstehungsbedingungen hat er eine mehr oder weniger komplexe Zusammensetzung aus flüchtigen und nicht flüchtigen organischen Verbindungen und Polyaromaten (organic carbon = OC) sowie aus elementarem Kohlenstoff (elemental carbon = EC). Da es sich bei „Ruß“ um luftgetragene, feste, meist kolloidale Teilchen handelt, spricht man auch von Rußpartikeln.

2.3 HERKUNFT

Rußpartikel sind primäre Aerosole, die bei der nicht vollständigen Verbrennung fossiler Brennstoffe wie z.B. Dieselmotorkraftstoff, Heizöl, Holz oder Kohle entstehen. Die Hauptrußquellen sind in Baden-Württemberg Dieselmotorkraftfahrzeuge und Hausbrand [LfU/UMEG, 1998].

Beim Diesel-Verbrennungsverfahren wird im Gegensatz zum Verbrennungsverfahren in Ottomotoren kein zündfähiges Luft-Kraftstoff-Gemisch zugeführt, sondern flüssiger Dieselmotorkraftstoff. Dieser verdampft bei einer sehr viel höheren Temperatur als Benzin und wird unter hohem Druck in die komprimierte Ansaugluft des Brennraums eingespritzt. Dadurch entsteht ein heterogenes Kraftstoff-Luft-Gemisch aus feinsten Flüssigkeitströpfchen, welches sich bei einer Temperatur von etwa $1.000 \text{ }^\circ\text{C}$ selbst entzündet. Obwohl im Brennraum hoher Luftüberschuss herrscht, ist die Verbrennung des Kraftstoff-Luft-Gemischs unvollständig. Dabei können sich primäre Rußteilchen bilden, deren Zusammensetzung durch alle unverbrannten kohlenstoffhaltigen Partikel bestimmt wird.

Auch bei modernen direkteinspritzenden Ottomotoren wird aufgrund der gleichen Mechanismen Rußbildung beobachtet, die allerdings in erheblich geringerem Umfang als beim Dieselmotor stattfindet.

Hausbrand umfasst die Gesamtheit der Kleinf Feuerungsanlagen, die insbesondere für Heizzwecke und für die Erwärmung von Brauchwasser eingesetzt werden. Für die Rußemission durch Hausbrand ist die Verfeuerung von Kohle, Heizöl und Holz relevant. Bei schlecht eingestellten Öfen und Brennern kann es ähnlich wie bei Verbrennungsprozessen in Kfz-Motoren zu unvollständiger Verbrennung kommen, die zur Bildung primärer Rußteilchen führt [LFA, 2004].

2.4 BILDUNG

Durch Oxidationsprozesse und thermische Pyrolyse werden Kohlenwasserstoffe von Kraft- oder Brennstoffen unter sauerstoffarmen Bedingungen zu Acetylen (C_2H_2) abgebaut, das als Vorstufe zur Rußbildung gilt. An diesen Abbauprozess schließen sich Polymerisationsprozesse und Ringschlüsse an, die die Bildung hochmolekularer zyklischer Verbindungen (u.a. von polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen) zur Folge haben. Weitere heterogene Wachstums- und Oxidationsreaktionen an der Teilchenoberfläche führen zur Entstehung graphitähnlicher Rußteilchen. Diese Teilchen, die einen Durchmesser von ca. 1 nm aufweisen, vergrößern sich durch Koagulation (Partikelkollisionen) zu kugelförmigen primären Rußteilchen mit einem Durchmesser von 10-50 nm. Die primären Rußteilchen treten nicht einzeln auf, sondern ballen sich zu losen Ketten mit räumlicher Verzweigung zusammen (Agglomeration), die aus mehreren tausend primären Rußteilchen bestehen können. Die Hauptmenge dieser Partikel weist einen Durchmesser von ca. 100 nm auf [Seinfeld und Pandis, 1992]. In Abbildung 1 ist die Bildung von Rußpartikeln schematisch dargestellt.

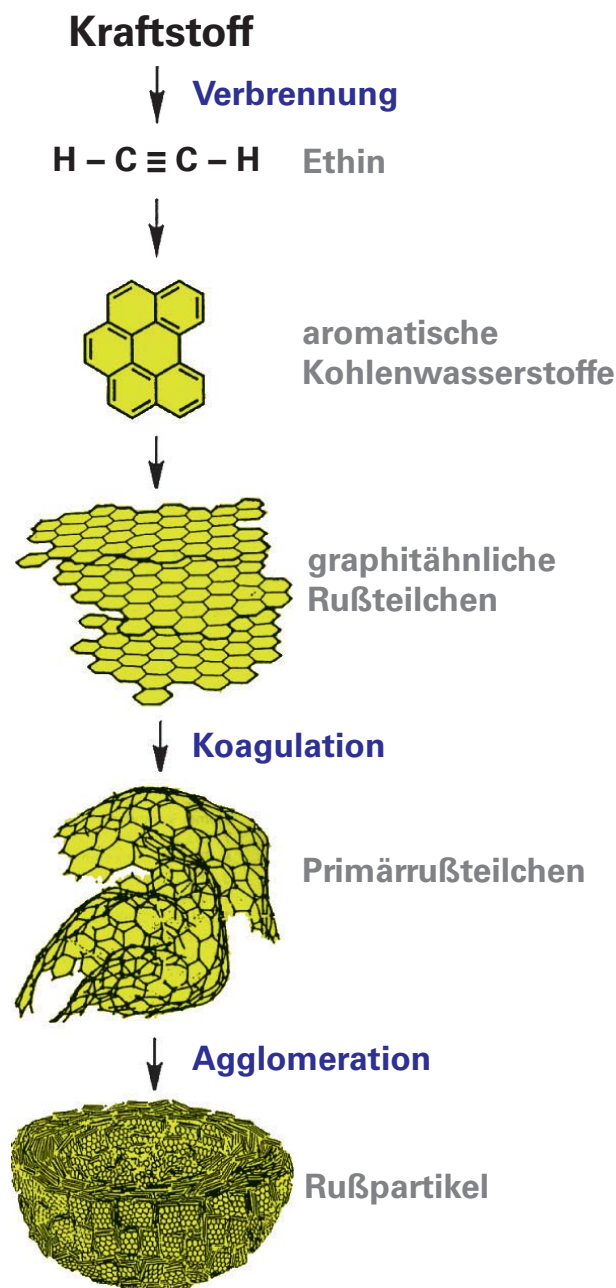


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Bildung von Rußpartikeln [Siegmann und Siegmann, 1999].

2.5 ZUSAMMENSETZUNG

Die Größe und Zusammensetzung der Rußpartikel hängt von ihrem Entstehungsprozess ab und wird durch ihre physikalischen und chemischen Eigenschaften bestimmt. Rußpartikel sind filigran verästelt und schwarz. Ihre Größe ist sehr variabel. Abbildung 2 zeigt eine typische Rußpartikelverteilung im Abgas eines modernen Dieselmotors auf [Schindler, 2003]. Rußpartikel weisen ein Größenspektrum auf, das generell zwischen 10 nm und 300 nm liegt. Neugebildete Rußpartikel haben einen aerodynamischen Durchmesser im Bereich von 100 nm und eine reine Sinkgeschwindigkeit von 76 cm/Tag [LfU/UMEG, 1998].

Die chemische Zusammensetzung von Rußpartikeln hängt stark von ihrem Entstehungsprozess ab. Bei der chemischen Charakterisierung von Ruß muss zwischen dem anorganischen Kern aus reinem Kohlenstoff (elemental carbon = EC) und der Hülle aus oberflächenadsorbierten Stoffen unterschieden werden [Risse, 2009]

Neugebildete Rußpartikel sind weitgehend inert, geruchlos und wasserunlöslich, jedoch hochadsorbent für Kohlenwasserstoffe, Aldehyde und sauerstoffhaltige Geruchbildner [Motorlexikon, 2009]. An die Rußpartikel können sich weitere für den Menschen krebserregende und toxische Abgaskomponenten anlagern. Im Abgasstrom von Dieselfahrzeugen kann bei Luftmangel eine thermische

Zersetzung stattfinden, die u.a. zur Bildung neuer, ursprünglich nicht im Brennstoff enthaltener Kohlenwasserstoffe wie z.B. polyzyklischer aromatischer Kohlenwasserstoffe (PAK) führen kann. Daneben werden auch zahlreiche andere Verbindungen sowie Derivate der Stoffgruppe der PAK im Dieselfuß nachgewiesen (Nitro-PAK, Oxo-PAK etc.). Die adsorbierten organischen Kohlenwasserstoffe werden als organischer Kohlenstoff (organic carbon = OC) bezeichnet. Die Partikelgrößenverteilung sowie die jeweilige Beladung mit organischen Stoffen hängen stark von den Verbrennungsbedingungen (z.B. von den unterschiedlichen Betriebsbedingungen der Motoren) ab. Zusätzlich kann es sich bei den angelagerten Abgaskomponenten auch um anorganische Bestandteile wie z.B. Sulfate oder auch Metalle handeln [Risse, 2009]. In Abbildung 3 ist die stoffliche Zusammensetzung von Dieselfußpartikeln aus Personenkraftwagen (Pkw) dargestellt [Klingenberg et al., 1992]. Demnach bestehen Dieselfußpartikel überwiegend aus elementarem (71 %) und organischem (24 %) Kohlenstoff sowie zu geringen Anteilen aus Sulfat (3 %) und sonstigen Bestandteilen (2 %).

In den Rußpartikeln von Dieselfahrzeugen aus dem PKW-Bereich ist der Anteil an elementarem Kohlenstoff (EC) ungefähr dreifach so hoch wie der Anteil an organisch gebundenen Kohlenstoff (OC). Der Anteil und die Zusammensetzung der organischen Verbindungen sind vom

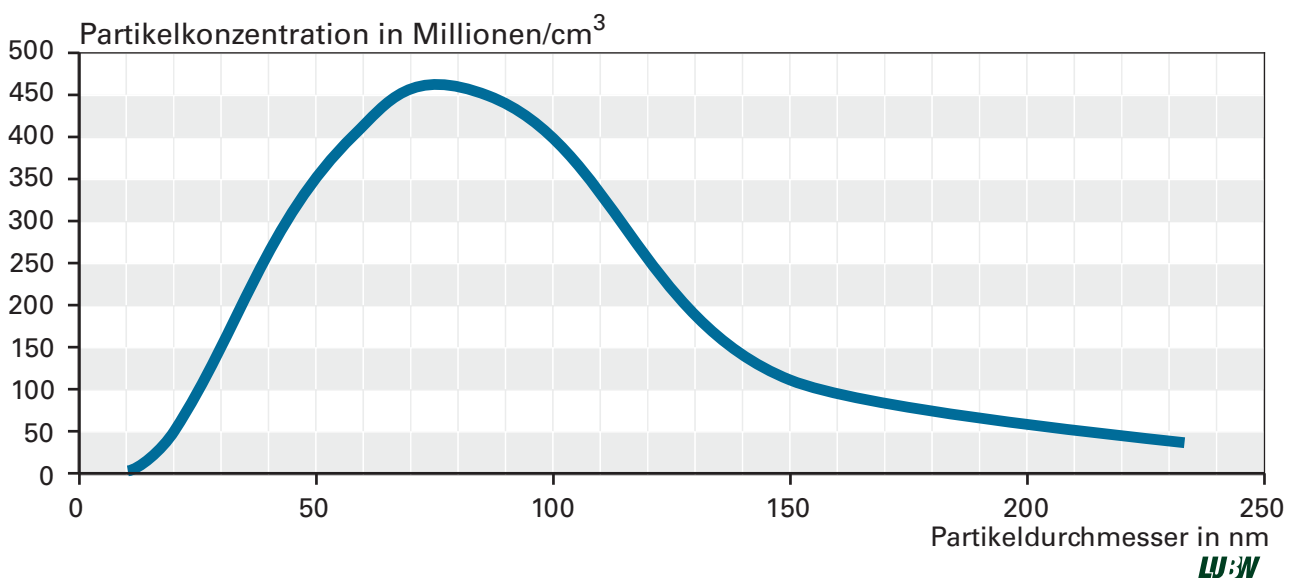


Abbildung 2: Typische Partikelverteilung im Abgas eines modernen Dieselmotors [Schindler, 2003]

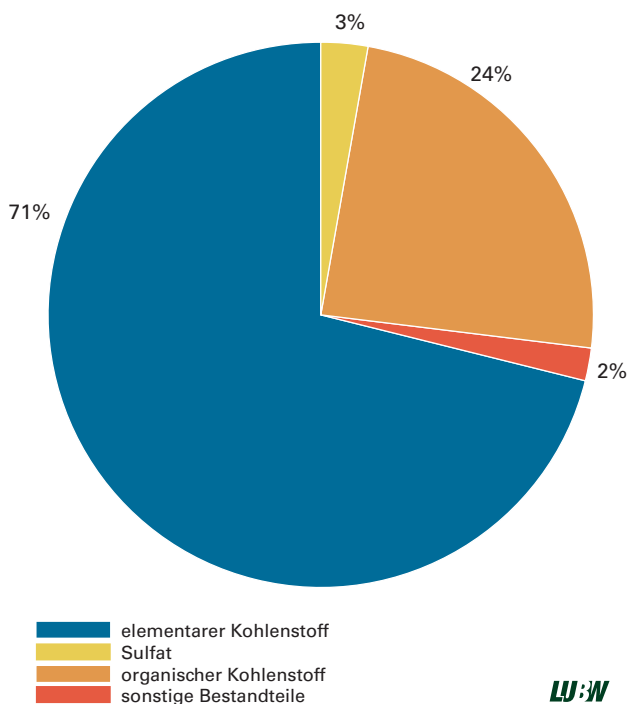


Abbildung 3: Stoffliche Zusammensetzung von Dieselpartikeln (Mittelwerte aus Messungen an PKW) [Klingenberg et al., 1992]

jeweiligen Motorkonzept sowie von der Gastemperatur im Messfilter abhängig [Klingenberg et al., 1992].

Über die chemische Zusammensetzung von Rußpartikeln aus Heizungsanlagen (Öl- oder Holzheizungen) gibt es weniger Informationen. Prinzipiell dürften sich die Partikel aus einer Ölheizungsanlage und die Dieselpartikel in ihrer Struktur ähnlich sein. Allerdings wird Heizöl bei einer anderen Temperatur verbrannt als Dieselpartikel, wodurch sich die spezifische Oberfläche des Partikels verändert. Für Rußpartikel aus der Holzfeuerung ist bekannt, dass sie einen viel höheren Anteil an organischen Verbindungen besitzen als Dieselpartikel [Hippeli et al., 1999]. Der Vergleich von Dieselpartikeln und Staub aus einer sehr unvollständigen Verbrennung von Holz in einem Holzofen zeigt, dass der untersuchte Ruß aus der Holzfeuerung einen rund zwanzigfach höheren Gehalt an polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen als der untersuchte Dieselpartikel aufweist [Klipper und Nussbaumer, 2007].

2.6 VERWEILDAUER UND TRANSPORTWEGE IN DER ATMOSPHERE

Die Partikelgröße und die Eigenschaften der Atmosphärenschicht, in der sich die Aerosolpartikel befinden, bestimmen deren Verweilzeiten und Transportwege in der Atmosphäre [Roedel, 2000]. Die atmosphärische Verweilzeit der Rußpartikel hängen primär vom Partikeldurchmesser ab. In Abbildung 4 ist die Lebensdauer von Aerosolpartikeln in Abhängigkeit des aerodynamischen Durchmessers graphisch dargestellt.

Ultrafeine Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser von $< 0,1 \mu\text{m}$ weisen hohe Diffusionsgeschwindigkeiten auf, koagulieren innerhalb weniger Stunden mit größeren Partikeln oder wachsen durch Kondensation. Teilchen im Akkumulationsmodus zwischen $0,1$ bis $2,5 \mu\text{m}$ verbleiben mehrere Tage in der Atmosphäre und werden durch nasse Deposition (d.h. durch Niederschlag wie z.B. Regen, Schnee oder Nebel) aus der Atmosphäre ausgetragen. Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser von $> 10 \mu\text{m}$ sedimentieren rasch. Sie werden durch trockene Deposition (d.h. durch Sedimentation im Gravitationsfeld) aus der Atmosphäre ausgetragen.

Trockene Deposition spielt für Rußpartikel aufgrund ihres aerodynamischen Durchmessers von $0,1$ bis $1 \mu\text{m}$ eine untergeordnete Rolle. Rußpartikel werden vorwiegend durch nasse Deposition aus der Atmosphäre ausgewaschen. Die Verweilzeit in der Atmosphäre wird

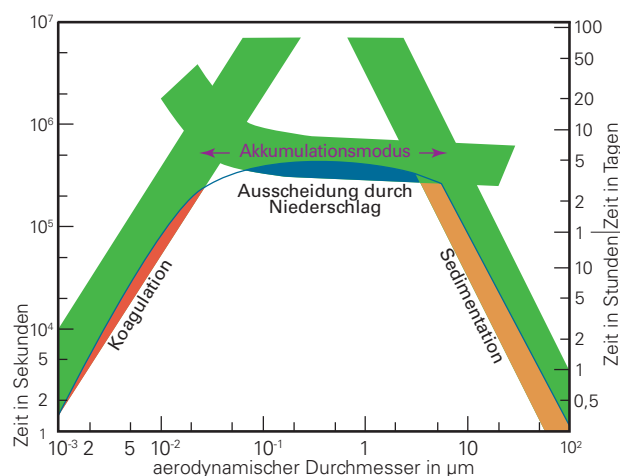


Abbildung 4: Lebensdauer von Aerosolpartikeln in Abhängigkeit des aerodynamischen Durchmessers [Jaenicke, 1998]

- von ihrem Alter beeinflusst.

Der unmittelbare Abbau neugebildeter Rußpartikel kann nahezu ausgeschlossen werden, da elementarer Kohlenstoff inert, hydrophob und thermisch stabil ist [Goldberg 1985]. Während des Alterungsprozesses verändern sich allerdings die chemisch-physikalischen Eigenschaften von Rußpartikeln. Mit zunehmender Lebensdauer werden Rußpartikel hygroskopischer, das heißt, Wasser kann sich zunehmend anlagern und sie werden vermehrt aus der Atmosphäre ausgewaschen;

- von ihrem aerodynamischen Durchmesser beeinflusst. Aufgrund ihres Akkumulationsmodus (0,1 bis 1 μm) ist die Rußaustragsgeschwindigkeit aus der Atmosphäre gering und der Transport über weite Strecken möglich;
- vom Wasserstatus der Atmosphäre beeinflusst.

Starke Niederschläge können die Verweilzeit auf wenige Stunden begrenzen, während in niederschlagsarmen Perioden Verweilzeiten von bis zu einigen Wochen erreicht werden können [Ogren und Carlson, 1983]. Die durchschnittliche Verweildauer in Mitteleuropa beträgt 4,5 Tage [Müller, 1984].

2.7 KLIMAWIRKSAMKEIT

Rußpartikel wirken auf vielfältige Weise auf das Klimasystem ein. Grundsätzlich werden ein direkter, ein semidirekter und ein indirekter Einfluss von Rußpartikeln auf den Strahlungshaushalt und das Klima unterschieden.

2.7.1 DIREKTE WIRKUNG VON RUßPARTIKELN AUF DEN STRALUNGSHAUSHALT

Rußpartikel absorbieren Sonnenstrahlung, kühlen die Erdoberfläche ab und erwärmen aber dadurch die Atmosphäre. Im Gegensatz zu Treibhausgasen absorbieren die Rußpartikel nicht die langwellige Wärmestrahlung, sondern ausschließlich die kurzwelligen Sonnenstrahlen. Die Absorption der einfallenden Sonnenstrahlung in der Atmosphäre führt zu einer Verringerung der Einstrahlung und somit zu einer Abkühlung am Erdboden. Durch die Absorption wird die Ruß-Aerosole umgebende Atmosphäre erwärmt [Hamburger Bildungserver, 2009].

Am stärksten ist die direkte Wirkung von Aerosolen auf der Nordhalbkugel und im Nordsommer. Auf der Nordhalbkugel befinden sich die wichtigsten Emissionsgebiete.

Regionale Schwerpunkte bilden dabei die mittleren Breiten mit einem hohen Verbrauch an fossilen Energien und die tropischen Gebiete mit einer großen Biomasseverbrennung. Im Nordsommer (Monate Juni, Juli, August) ist die Einstrahlung der Sonne am höchsten.

Die Schätzungen der direkten Wirkung von Aerosolen auf den gesamten Strahlungshaushalt sind sehr unterschiedlich. Sie beruhen auf Modellstudien, die schwer zu verifizieren sind. Die Unsicherheiten bestehen zum einen darin, dass selbst der aktuelle atmosphärische Gehalt einzelner Aerosolarten nicht genau feststeht, zum anderen die Größenverteilung, die chemische Zusammensetzung, die Mischung und die horizontale und vertikale Verteilung der Aerosole nicht genau erfasst werden können.

2.7.2 SEMIDIREKTE UND INDIREKTE WIRKUNG VON RUßPARTIKEL AUF DEN STRALUNGSHAUSHALT

Der semidirekte Effekt entsteht dadurch, dass Rußpartikel durch Absorption solarer Strahlung eine Wolkenauflösung und damit eine größere Durchlässigkeit der Atmosphäre für die Sonnenstrahlung bewirken. Dadurch kann es sowohl an der Obergrenze der Atmosphäre als auch in der bodennahen Luftschicht zu einer Erwärmung kommen.

Andererseits können Rußpartikel vermischt mit wasserlöslichen Substanzen als Wolkenkondensationskerne dienen. Eine Zunahme von solchen Kondensationskernen erhöht die Anzahl von Wolkentröpfchen und macht die Wolke heller, d.h. die Wolke reflektiert mehr Sonnenstrahlung zurück in den Weltraum. Wolken die aus kleinen Tröpfchen bestehen, regnen weniger aus und weisen damit eine längere Lebensdauer auf. Beide Effekte führen zu einer Abkühlung des Systems Erde-Atmosphäre (indirekte Effekt) [Feichter, 2005].

Da Ruß nicht nur Wolken und Niederschlagsprozesse beeinflusst, sondern die Auswaschung durch Niederschlag zugleich die Hauptsenke für die Rußpartikel darstellt, sind die Wechselwirkungen Ruß und Klima vielfältig und komplex. Aufgrund dieser Komplexibilität ist die Klimawirkung von Ruß bisher nur sehr unvollkommen erforscht worden. Auch die Frage, ob Ruß aus Verbrennungsprozessen insgesamt erwärmend oder abkühlend wirkt, ist noch nicht endgültig entschieden [Feichter, 2005].

2.8 GESUNDHEITSRISIKO

Größe, Anzahl, physikalische und chemische Eigenschaften von Partikeln bestimmen die Aufnahme in die Lunge und Verteilung im Körper des Menschen und damit die gesundheitliche Wirkung. Einen Einfluss auf das Ausmaß gesundheitlicher Wirkungen haben die Wasserlöslichkeit und die elektrische Ladung der Partikel [Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie].

Dieselpartikel zählen mit einem aerodynamischen Durchmesser von $< 2,5 \mu\text{m}$ zur Fraktion der feinen Partikel. Darin enthalten ist die Teilfraktion der ultrafeinen Partikel, deren Durchmesser $< 0,1 \mu\text{m}$ beträgt. Aufgrund ihrer hohen Partikelanzahl verfügen ultrafeine Partikel über eine große Gesamtoberfläche, an der organische Stoffe in hohem Maße adsorbieren. Die Rußpartikel dringen in das Atemwegsystem ein und können aufgrund des geringen Durchmessers tiefere Lungenregionen erreichen, sich dort festsetzen und Entzündungen auslösen. Über die Alveolen können sie in den Blutstrom und mit diesem in verschiedene Körperorgane gelangen.

Die möglichen kanzerogenen Wirkungen von Dieselpartikeln wurden in einer Vielzahl von Tierversuchen und kontrollierten Expositionsexperimenten untersucht. Eine tumorinduzierte Wirkung von Dieselruß konnte bisher nur bei der Ratte gezeigt werden. Laut der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Immissionsschutz (LAI) können Rußpartikel auf der Basis übereinstimmender Befunde aus Tierversuchen und epidemiologischen Studien als wahrscheinlich Humankanzerogen angesehen werden. Die Evidenz für die Humankanzerogenität ist aufgrund zahlreicher Untersuchungen mit konsistenten Befunden als hoch einzuschätzen, auch wenn zu Fragen zum Wirkungsmechanismus beim Menschen noch weiterer Untersuchungsbedarf besteht [LAI, 2006].

2.9 BEURTEILUNGSMASSTAB ATMOSPHERISCHER RUßKONZENTRATIONEN

Für atmosphärische Rußkonzentrationen existiert kein gesetzlich festgelegter Grenzwert. Der in der aufgehobenen 23. BImSchV aufgeführte Konzentrationswert für Ruß (Jahresmittelwert von $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$) wurde durch den strengeren und verbindlichen Grenzwert für PM10-Konzentrationen

abgelöst. In der Begründung heißt es hierzu, dass der PM10-Jahresgrenzwert der 22. BImSchV von $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ im Bundesdurchschnitt an innerstädtischen Verkehrsstraßen umgerechnet zahlenmäßig in etwa dem Prüfwert der 23. BImSchV für Ruß ($8 \mu\text{g}/\text{m}^3$) entspricht [Deutscher Bundestag, 2003]. Der Begründung liegt die Abschätzung zugrunde, dass der Anteil von Ruß an PM10 zwischen 2001 und 2003 an innerstädtischen Verkehrsstraßen bis zu 20 % betrug [LAI, 2004].

Im Rahmen der europäischen Luftqualitätsrahmenrichtlinie über die Beurteilung und Kontrolle der Luftqualität wurden mit der ersten Tochterrichtlinie vom 22. April 1999 (1999/30/EG) u.a. Grenzwerte für Feinstaub (PM10) in der Außenluft erlassen. Die Übernahme der ersten Tochterrichtlinie in deutsches Recht erfolgte mit der Verordnung über Immissionswerte für Schadstoffe in der Luft (22. BImSchV) im September 2002. Die PM10-Grenzwerte wurden im Hinblick auf die Vermeidung, Verhütung und Verringerung schädlicher Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit festgelegt. Das EU Regelwerk zur Luftqualität wurde mit der Richtlinie 2008/50/EG des Europäischen Parlaments und des Rats vom 21. Mai 2008 über Luftqualität und saubere Luft für Europa novelliert.

Die immissionsbezogenen Grenzwerte für PM10-Konzentrationen (Feinstaubkonzentrationen) umfassen die Massenkonzentrationen der inhalierbaren Partikel in Mikrogramm pro Kubikmeter Luft ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). In die gesundheitsbezogene Beurteilung gehen Langzeitwirkungen mit einem Jahresmittelwert und Kurzzeiteffekte über einen Tagesmittelwert ein. Zusätzlich gilt für den Tagesmittelwert eine Beschränkung der Überschreitungshäufigkeit, die keine gesundheitsbezogene Begründung hat. Seit dem 1. Januar 2005 sind durch die 22. BImSchV für Feinstaub (PM10) folgende Grenzwerte einzuhalten:

- 24 Stunden: $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, bei 35 zugelassenen Überschreitungen pro Kalenderjahr
- Kalenderjahr: $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$

In Baden-Württemberg wird an einem Teil der Messstationen des Luftmessnetzes und der straßennahen Spotmessstationen, Ruß als Anteil an der PM10-Fraktion bestimmt.

3 Untersuchungsmethodik

3.1 DATENGRUNDLAGE

Für die durchgeführten Analysen standen Tagesmittelwerte (00:00 bis 24:00 Uhr) der Rußkonzentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) zur Verfügung, die an 47 Luftmessstationen des Luftmessnetzes Baden-Württemberg zwischen 1.1.1995 und 31.5.2008 gemessen wurden (siehe Abbildung 5). Da an allen Luftmessstationen eine Datenlücke im Zeitraum zwischen Ende 1998 und Februar 2000 auftritt, wurde der Untersuchungszeitraum in die Messperioden 1 und 2 unterteilt (siehe 5.1.1 im Anhang). Die Datenverfügbarkeit von Rußkonzentrationsmesswerten war nicht an allen Luftmessstationen gleich. Die zur Verfügung stehenden Messreihen

- beginnen nicht alle zum selben Datum (1.1.1995),
- enden nicht alle zum selben Datum (31.5.2008),
- weisen neben der bereits erwähnten Datenlücke zwischen Ende 1998 und Februar 2000 weitere mehrtägige, -wöchige, -monatige und z.T. mehrjährige Datenlücken auf,
- weisen Messtermine und -intervalle auf, die sich sowohl zwischen den Luftmessstationen als auch an derselben Luftmessstation unterscheiden (z.B. tägliche Messwerte der Rußkonzentration, Messwerte der Rußkonzentration an jedem zweiten oder dritten Tag, z.T. noch geringere zeitliche Auflösungen).

Die im Untersuchungszeitraum gemessenen Rußkonzentrationen unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Ausgangsprobe.

- An den Verkehrsmessstationen beziehen sich die Rußkonzentrationen im gesamten Untersuchungszeitraum von 1995 bis 2008 auf den Feinstaub (PM10).
- Bei den städtischen Hintergrundstationen beziehen sich die Rußkonzentrationen von 1995 bis 1999 auf den Schwebstaub (TSP) und von 1.10.2000 bis 31.5.2008 auf den Feinstaub (PM10).
- Ein unmittelbarer Vergleich der Rußkonzentrationen der Straßenstationen mit den städtischen Hintergrundstationen ist somit nur für den Untersuchungszeitraum 1.10.2000 bis 31.5.2008 gegeben.

Aufgrund der heterogenen Struktur der zur Verfügung stehenden Rußdaten wurden von 12 Luftmessstationen Zeitreihen der täglichen Rußkonzentration mit einer vergleichsweise hohen Anzahl von Messwerten zur Analyse der zeitlichen Entwicklung der Rußkonzentration im Untersuchungszeitraum und -gebiet ausgewählt. Es handelt sich bei den ausgewählten Stationen um

- 4 Verkehrsmessstationen
 - Freiburg-Straße (1274 Messwerte)
 - Mannheim-Straße (1424 Messwerte)
 - Karlsruhe-Straße (1401 Messwerte)
 - Stuttgart-Mitte-Straße (1612 Messwerte)
- 7 städtische Hintergrundluftmessstationen
 - Freiburg-Mitte (1339 Messwerte)
 - Karlsruhe-Nordwest (1440 Messwerte)
 - Mannheim-Nord (1867 Messwerte)
 - Stuttgart-Bad Cannstatt (1705 Messwerte)
 - Kehl-Hafen (850 Messwerte)
 - Weil am Rhein (933 Messwerte)
 - Ludwigsburg (1180 Messwerte)
- 1 ländliche Hintergrundluftmessstation
 - Schwarzwald Süd (1330 Messwerte).

Zusätzlich zu den langfristigen Messungen der täglichen Rußkonzentration wurden aus diversen Gründen an verschiedenen Orten temporär und in unterschiedlichen Zeiträumen tägliche Rußkonzentrationen gemessen. Die entsprechenden Messperioden und die dabei erzielten Mittelwerte der Rußkonzentrationen sind in Tabelle 8 bis 12 (siehe 5.1.2 im Anhang) zu Informationszwecken zusammengefasst. Im Folgenden wird auf diese Daten jedoch nicht weiter eingegangen.

3.2 MESSMETHODIK

Die Probenahme von Ruß sowohl im Gesamtstaub (TSP) als auch im Feinstaub (PM10-Fraktion) erfolgt als Tagesmittelwert von 00:00 bis 24:00 Uhr über einen Digital High-Volume-Sampler (DHA-80) in Anlehnung an die VDI

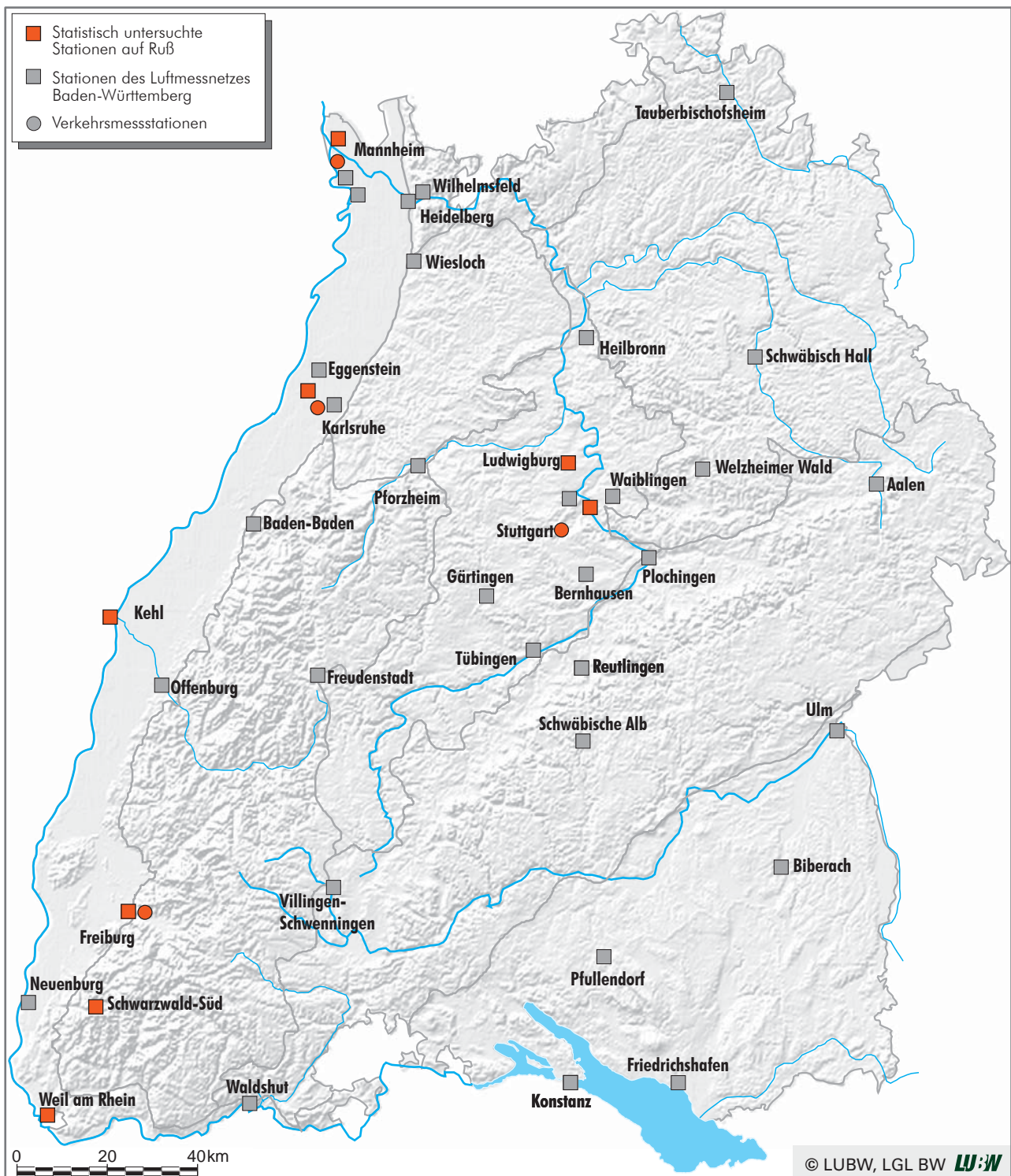


Abbildung 5: Lage der Luftmessstationen im amtlichen Luftmessnetz Baden-Württemberg, für die Tagesmittelwerte der Rußkonzentration vorliegen; rote Punkte kennzeichnen die Luftmessstationen, deren Zeitreihen der täglichen Rußkonzentration statistisch untersucht wurden.

Richtlinie 2465 Bl.2 „Messen von Ruß (Immission) - Thermographische Bestimmung des elementaren Kohlenstoffs nach Thermosorption des organischen Kohlenstoffs“. Das Verfahren ist äquivalent zu dem in der 23. BImSchV beschriebenen Verfahren. Die Gesamtstaubmessungen (TSP) werden in einem Ringspaltvorabscheider, die Feinstaub-

messungen (PM₁₀-Fraktion) mit einem PM₁₀-Vorabscheider durchgeführt. Beim PM₁₀-Vorabscheider weist ein vorgeschalteter, gröbenselektierender Lufteinlass eine Abscheidewirksamkeit von 50 % für Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser von bis zu 10 µm auf (PM₁₀-Einlass). Zur Bestimmung der Ruß- aus der Schwebstaubkonzentra-

tion erfolgt die Probenahme auf Quarzfasernfiltern. Der Volumenstrom der angesaugten Luft wird konstant auf 720 m³/24 h geregelt.

Die Bestimmung der Rußkonzentration als elementarer Kohlenstoff (EC) und organischer Kohlenstoff (OC) im abgeschiedenen Gesamt- und Feinstaub erfolgt durch Verbrennen der Probe unter Sauerstoffatmosphäre und der IR-spektroskopischen Detektion des dabei gebildeten Kohlenstoffdioxids (CO₂). Die Spezifität des Verfahrens auf elementaren Kohlenstoff wird durch ein Zweiphasentemperaturprogramm erreicht. In einem ersten Schritt wird der organisch gebundene Kohlenstoff zu CO₂ und Wasser (H₂O) verbrannt. Dies lässt sich durch das Auftreten eines Wasserpeaks feststellen. In einem zweiten Schritt wird der verbliebene Kohlenstoff als EC bestimmt. Die relativen Nachweisgrenzen dieses Verfahrens liegen bei einem Probenahmevolumen von 720 m³ bei 0,2 µg Kohlenstoff/m³.

3.3 DATENANALYSE

Statistische Analysen konnten nur an den Stationen durchgeführt werden, an denen Rußdaten, Messdaten der meteorologischen Variablen wie Lufttemperatur (T_a), Niederschlagsmenge (N), bodennahe Windgeschwindigkeit (U), Mischungsschichthöhe (H_{mix}), Stagnationsindex (I_{stag}) und Analysen der PM10-Konzentrationen in ausreichender Anzahl zur Verfügung standen. In Tabelle 1 ist der jeweilige Untersuchungsumfang der ausgewählten Messstationen aufgelistet.

Für die Zeitreihen der täglichen Rußkonzentration wurde zunächst die zeitliche Entwicklung im Untersuchungsraum untersucht und über lineare Regressionsgleichungen quantifiziert. Zusätzlich erfolgte eine Mittelwertbildung über die einzelnen Jahre im Untersuchungszeitraum sowie das Sommer- und Winterhalbjahr im gesamten Untersuchungszeitraum. Als einziger Zyklus wurde der Wochengang untersucht.

Zur Analyse des Einflusses atmosphärischer Umgebungsbedingungen, atmosphärischer Austauschbedingungen und der PM10-Fraktion wurden die Tagesmittelwerte der Lufttemperatur, die Tagessummen des Niederschlags, Tagesmittelwerte der bodennahen Windgeschwindigkeit, die Mischungsschichthöhe, der Stagnationsindex und die Tagesmittelwerte der PM10-Konzentration herangezogen und ihre Bedeutung für die lokalen Rußkonzentrationen über univariate Regressionsanalysen untersucht.

Tabelle 1: Untersuchungsumfang an den ausgewählten Luftmessstationen in Abhängigkeit der meteorologischen Variablen atmosphärischen Austauschbedingungen und der PM10-Konzentration.

Messstationen	Zeitreihen der		Abhängigkeit der Rußkonzentration von				
	Täglichen Rußkonzentration	PM10-Konzentration	Bodennaher Lufttemperatur [T _a]	Niederschlag [N]	Bodennaher Windgeschwindigkeit [U]	Mischungsschichthöhe [H _{mix}]	Stagnationsindex [I _{stag}]
Freiburg-Straße	x	x	x	x		x	x
Mannheim-Straße	x	x	x	x		x	x
Karlsruhe-Straße	x	x	x	x		x	x
Stuttgart-Mitte-Straße	x	x	x	x		x	x
Freiburg-Mitte	x	x	x	x	x	x	x
Karlsruhe-Nordwest	x	x	x	x	x	x	x
Mannheim-Nord	x	x	x	x	x	x	x
Stuttgart-Bad Cannstatt	x	x	x	x	x	x	x
Kehl-Hafen	x	x	x	x	x	x	x
Weil am Rhein	x	x	x	x	x	x	x
Ludwigsburg	x	x	x	x	x	x	x
Schwarzwald-Süd	x	x	x	x	x		

4 Ergebnisse

In den folgenden Kapiteln werden beispielhaft für die 12 ausgewählten Messstationen die Streudiagramme der Verkehrsmessstation-Mannheim, der städtischen Hintergrundstation Mannheim, der Verkehrsmessstation Stuttgart-Mitte-Straße und der ländlichen Hintergrundstation Schwarzwald-Süd gegenübergestellt. Die Streudiagramme aller ausgewählten Luftmessstationen sind im Anhang aufgelistet.

4.1 ENTWICKLUNG DER RUSSKONZENTRATIONEN

4.1.1 TAGESMITTELWERTE DER RUSSKONZENTRATION

Die Abbildungen 6 bis 9 zeigen die zeitliche Entwicklung der Tagesmittelwerte der Rußkonzentrationen in Abhängigkeit der laufenden Tage im Untersuchungszeitraum an den ausgewählten Luftmessstationen.

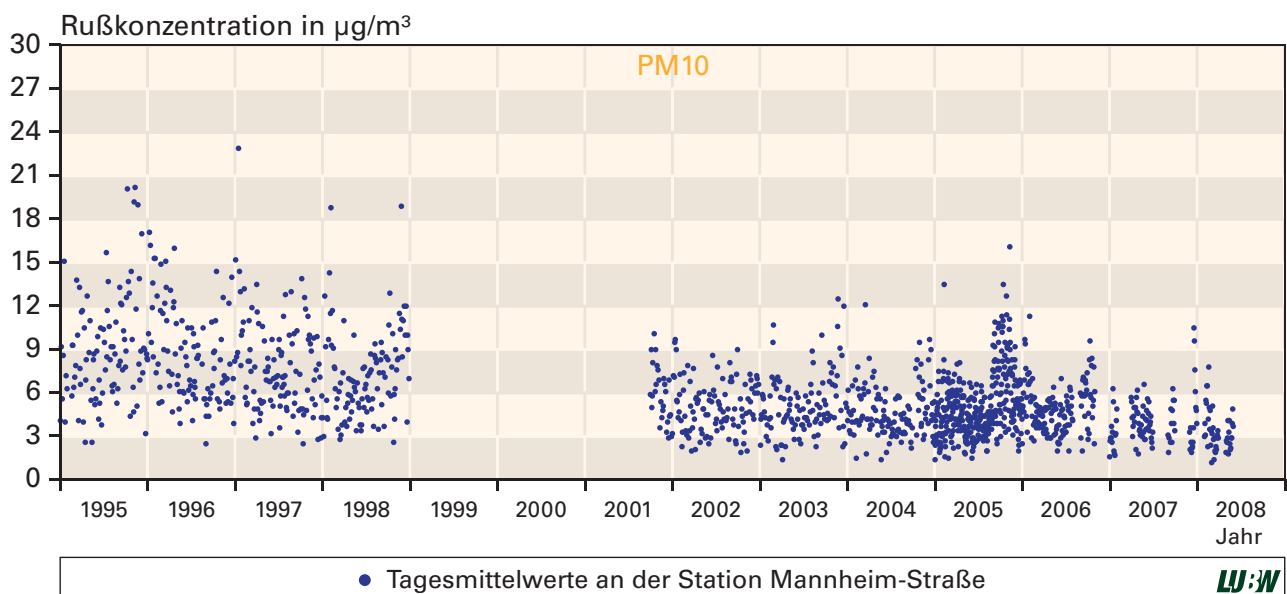


Abbildung 6: Tagesmittelwerte der Rußkonzentration an der Luftmessstation Mannheim-Straße in Abhängigkeit der laufenden Tage im Zeitraum 2.1.1995 bis 31.5.2008

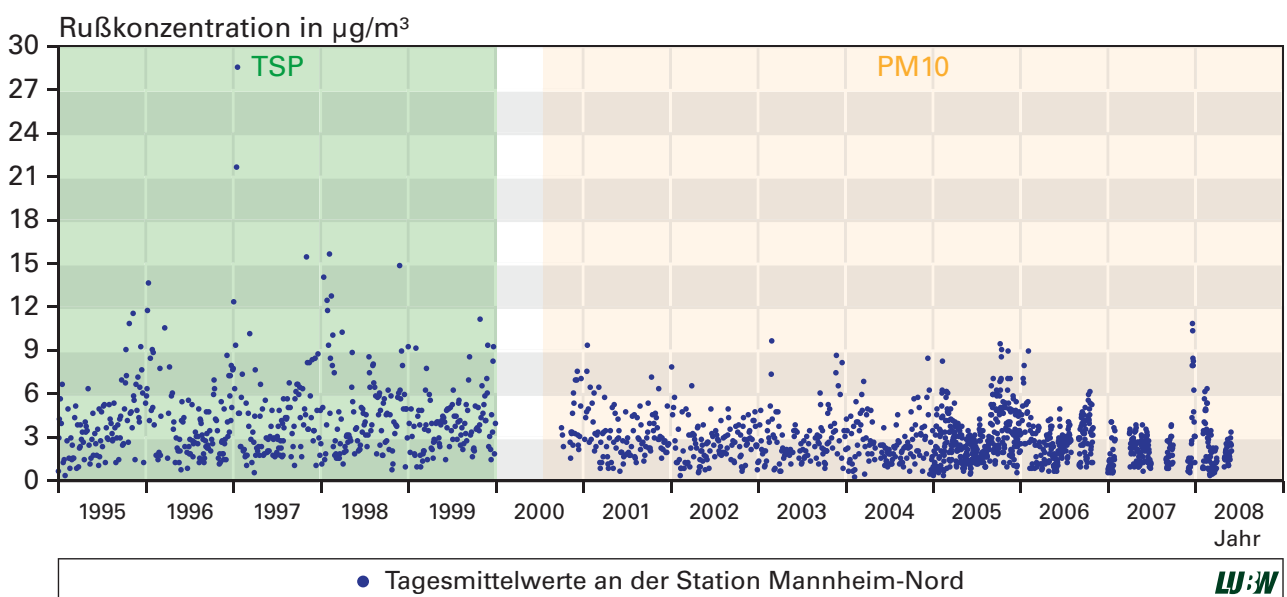


Abbildung 7: Tagesmittelwerte der Rußkonzentration an der Luftmessstation Mannheim-Nord in Abhängigkeit der laufenden Tage im Zeitraum 1.1.1995 bis 31.12.1999 (TSP, Grün hinterlegt); 2.10.2000 bis 31.05.2008 (PM10 Orange hinterlegt)

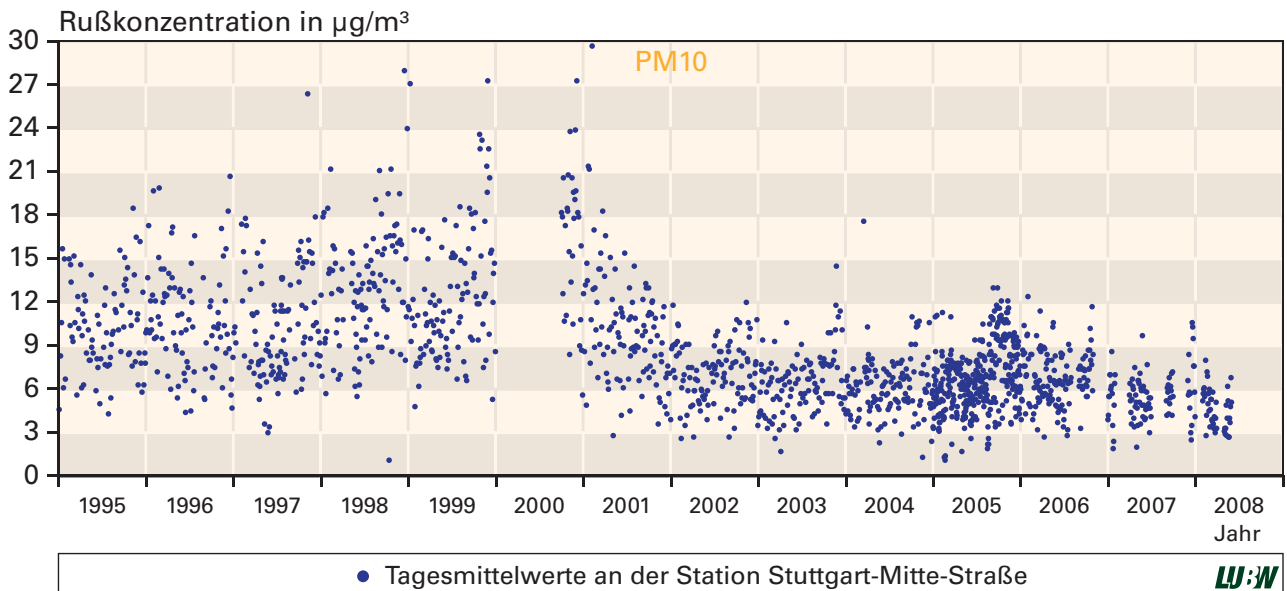


Abbildung 8: Tagesmittelwerte der Rußkonzentration an der Luftmessstation Stuttgart-Mitte-Straße in Abhängigkeit der laufenden Tage im Zeitraum 4.1.1995 bis 31.5.2008

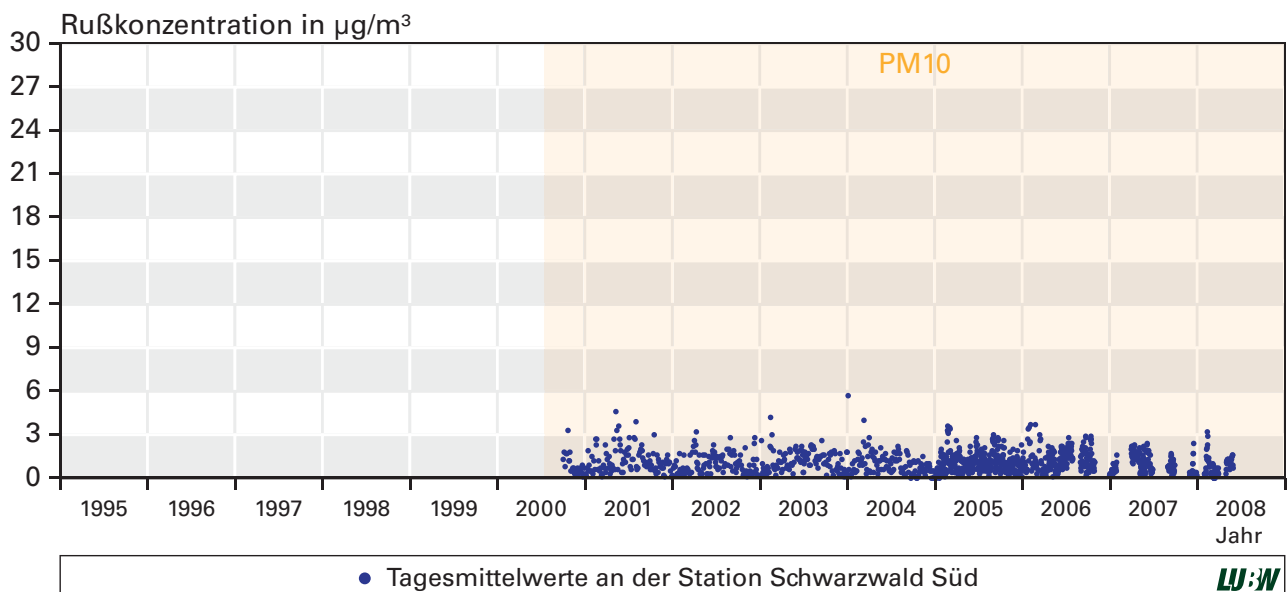


Abbildung 9: Tagesmittelwerte der Rußkonzentration an der Luftmessstation Schwarzwald-Süd in Abhängigkeit der laufenden Tage im Zeitraum 2.10.2000 bis 31.5.2008

An den Verkehrsmessstationen beziehen sich die Rußkonzentrationen durchgängig von 1995 bis 2008 auf den Feinstaub (PM10). Bei den städtischen Hintergrundstationen beziehen sich die Rußkonzentrationen von 1995 bis 1999 auf den Gesamtstaub (TSP) und von 1.10.2000 bis 31.5.2008 auf den Feinstaub (PM10).

Es ist zu erkennen, dass an den Verkehrsmessstationen sowohl das höchste Grundniveau als auch die höchsten Einzelwerte der täglichen Rußkonzentrationen zu finden sind. An diesen Luftmessstationen gehen die Rußkonzentrationen

äußerst selten gegen die Nachweisgrenze ($0,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$) zurück. An der Station Stuttgart-Mitte-Straße treten zusätzlich die stärksten Streuungen und die höchsten Einzelwerttage (bis zu $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$) der Rußkonzentrationen auf. An der Luftmessstation Schwarzwald-Süd ist das Grundniveau der täglichen Rußkonzentration sehr viel niedriger und erreicht Werte nahe an der Nachweisgrenze. An dieser Luftmessstation werden die niedrigsten täglichen Rußkonzentrationen im Stationskollektiv der ausgewählten Luftmessstationen gemessen.

In den Abbildungen 6 bis 9 lässt sich näherungsweise ein Jahresgang für die Tagesmittelwerte der Rußkonzentrationen erkennen. Er weist ein Maximum im Winter auf und ist bei Verkehrsmessstationen ausgeprägter als bei Hintergrundstationen.

Deutlicher ist der Wochengang der Rußkonzentration an Verkehrsmessstationen ausgeprägt. Aus der Abbildung 10 folgt exemplarisch für die Luftmessstation Stuttgart-Mitte-Straße, dass der Wochengang ein Minimum am Sonntag hat und dass der Mittelwert der Rußkonzentration am Samstag niedriger als die Vergleichswerte von Montag bis Freitag liegt. Die Ausprägung dieses Wochengangs der Tagesmittelwerte der Rußkonzentration ist an den städtischen Hintergrundstationen reduziert (Abbildung 11). Die ländliche Hintergrundstation Schwarzwald-Süd (Abbildung 12) zeigt dagegen nahezu keinen Wochengang der Rußkonzentrationen. Primär ausschlaggebend für die Ausbildung eines Wochengangs der Rußkonzentration ist die Nähe zur Rußemissionsquelle Kfz-Verkehr. Verkehrsmessstationen liegen in direktem Einflussbereich, während städtische Hintergrundstationen einen gewissen Abstand dazu aufweisen. Die ländliche Hintergrundstation ist durch eine Ferne zu dieser Emissionsquelle gekennzeichnet, weshalb die dort gemessenen, relativ geringen Tagesmittelwerte der Rußkonzentrationen hauptsächlich aus Transportprozessen in der atmosphärischen Grenzschicht stammen.

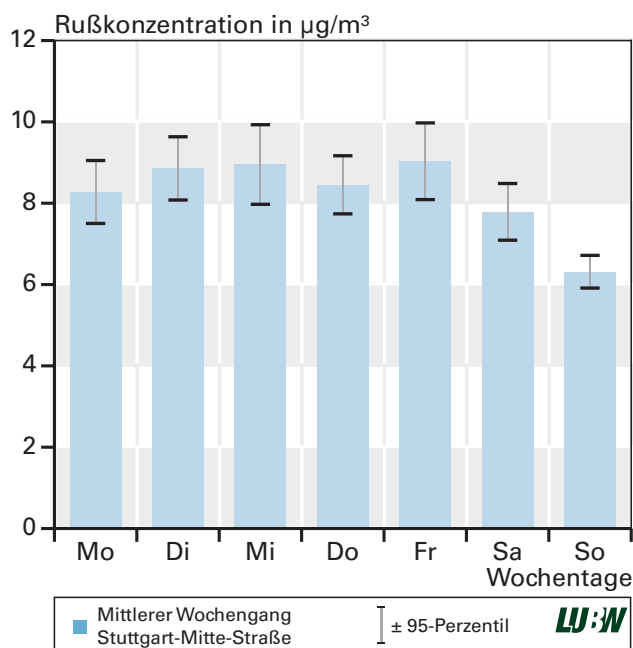


Abbildung 10: Mittlerer Wochengang der Rußkonzentration (mit 95 %-Konfidenzintervallen) an der Luftmessstation Stuttgart-Mitte-Straße im Zeitraum 4.1.1995 bis 31.5.2008

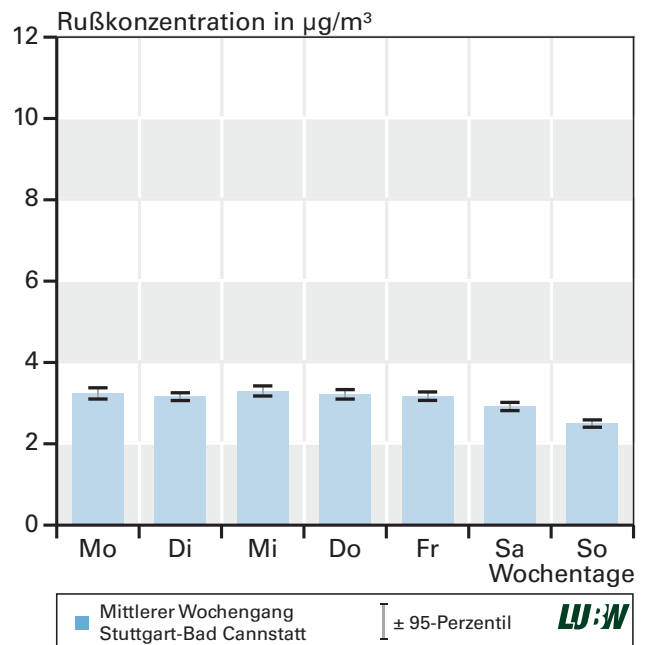


Abbildung 11: Mittlerer Wochengang der Rußkonzentration (mit 95 %-Konfidenzintervallen) an der Luftmessstation Stuttgart-Bad Cannstatt im Zeitraum 02.10.2000 bis 31.5.2008

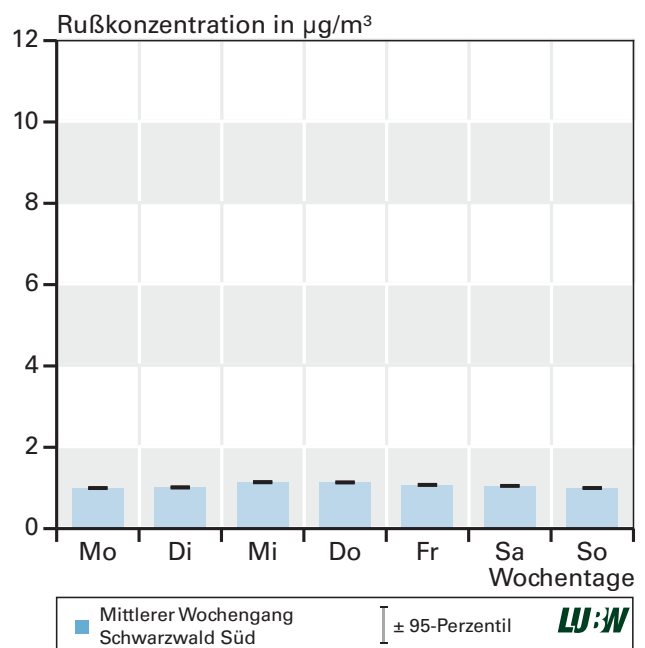


Abbildung 12: Mittlerer Wochengang der Rußkonzentration (mit 95 %-Konfidenzintervallen) an der Luftmessstation Schwarzwald-Süd im Zeitraum 2.10.2000 bis 31.5.2008

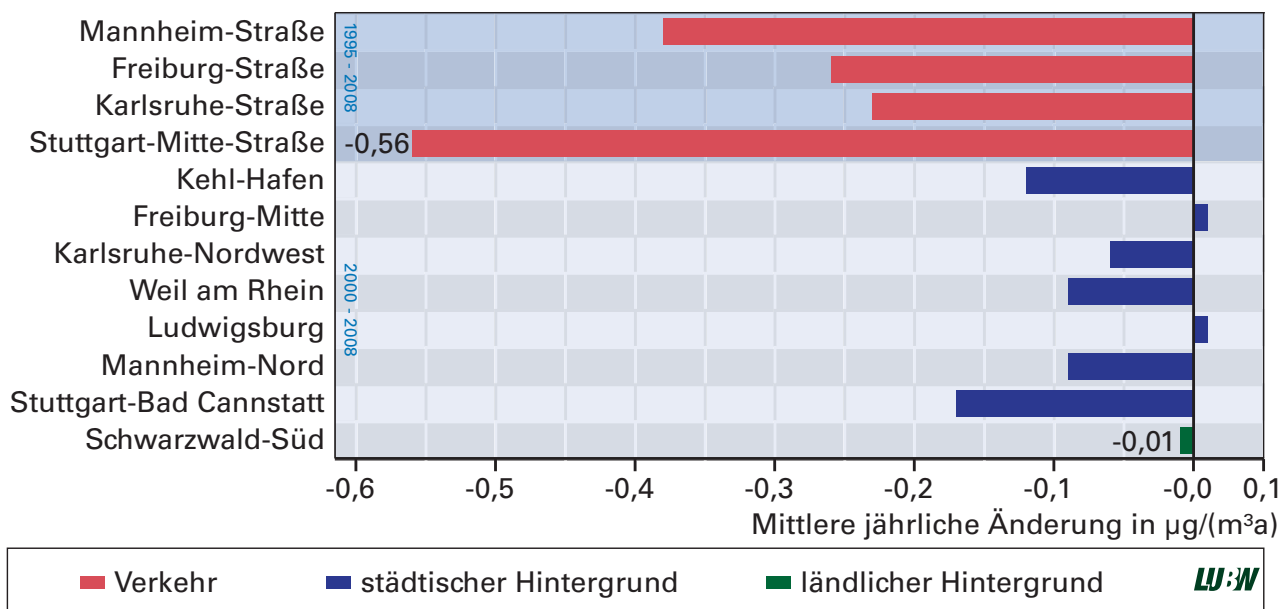


Abbildung 13: Mittlere jährliche Änderung der Rußkonzentrationen an den Verkehrsmessstationen in Baden-Württemberg vom 01.01.1995-31.05.2008 (Dunkelblau hinterlegt), an den städtischen Hintergrundstationen und der ländlichen Hintergrundstation vom 1.10.2000 - 31.05.2008 (Hellblau hinterlegt)

An allen Verkehrsmessstationen nahm die Rußkonzentration im Untersuchungszeitraum 1995-2008 ab (Abbildung 13). Die höchste mittlere jährliche Abnahme ergab sich für die Verkehrsmessstationen Stuttgart-Mitte-Straße $-0,56 \mu\text{g}/(\text{m}^3\text{a})$, Mannheim-Straße $-0,38 \mu\text{g}/(\text{m}^3\text{a})$, Freiburg-Straße $-0,26 \mu\text{g}/(\text{m}^3\text{a})$ und Karlsruhe-Straße $-0,23 \mu\text{g}/(\text{m}^3\text{a})$. Die geringste Abnahme war erwartungsgemäß an der ländlichen Hintergrundstation Schwarzwald-Süd $-0,01 \mu\text{g}/(\text{m}^3\text{a})$.

4.1.2 JAHRESMITTELWERTE DER RUSSKONZENTRATIONEN

4.1.2.1 JAHRESMITTELWERTE DER RUSSKONZENTRATIONEN ALLER LUFTMESSSTATIONEN

In den Abbildungen 14 und 15 sind die Jahresmittelwerte der Rußkonzentrationen aller Luftmessstationen in Baden-Württemberg zusammengestellt an denen im Untersuchungszeitraum mindestens 90 Rußmesswerte pro Jahr vorlagen. In diesen Abbildungen ist die zeitlichen Veränderungen der Rußkonzentrationen an allen Messstationen, an denen über den betrachtenden Untersuchungszeitraum von 1995 bis 2008 die Rußkonzentration gemessen wurden aufgezeigt.

An allen Stationen nahmen die Rußkonzentrationen über den beobachtenden Zeitraum hinweg ab. An den städtischen Hintergrundstationen ist die Abnahme deutlicher zu erkennen als an den Verkehrsmessstationen. Die Luft-

messstation Stuttgart-Mitte-Straße zeigt die höchsten Einzelmesswerte im Datenkollektiv der Rußkonzentrationen im beobachteten Untersuchungszeitraum auf. Für die Verkehrsmessstation Freiburg-Straße „Siegesdenkmal“ liegen nur Messwerte bis zum Jahre 2006 vor. Danach wurde diese Station durch die Station „Schwarzwaldstraße“ ersetzt. Aufgrund des erheblich höheren Verkehrsaufkommens an der Station „Schwarzwaldstraße“ sind die Werte dieser beiden Stationen nicht untereinander vergleichbar und der Anstieg der Rußkonzentration im Jahre 2008 lässt sich durch den geänderten Standort der Luftmessstation erklären.

Auffällig ist, dass die Abnahme der Rußkonzentration an den Verkehrsmessstationen in der ersten Hälfte des Untersuchungszeitraums deutlicher als in seiner zweiten Hälfte ausgeprägt ist. Eine mögliche Ursache für den Rückgang der Abnahme der jährliche Rußkonzentration im Untersuchungszeitraum ab 2001 könnte die Zunahme des Anteils der Diesel-Pkw an der Gesamtzahl aller Pkw in Baden-Württemberg ab 2001 sein (Abbildung 16). In Abbildung 14 ist zu erkennen, dass von 2002 bis 2005 die Rußkonzentration weitgehend stagniert, erst ab dem Jahre 2006 ist wieder eine deutliche Abnahme zu erkennen. Vergleicht man dazu die zeitliche Entwicklung der technischen Ausstattung der Diesel-Pkw mit Partikelfiltern, so stellt man fest, dass 2003 mit der Ausstattung mit Partikelfiltern begon-

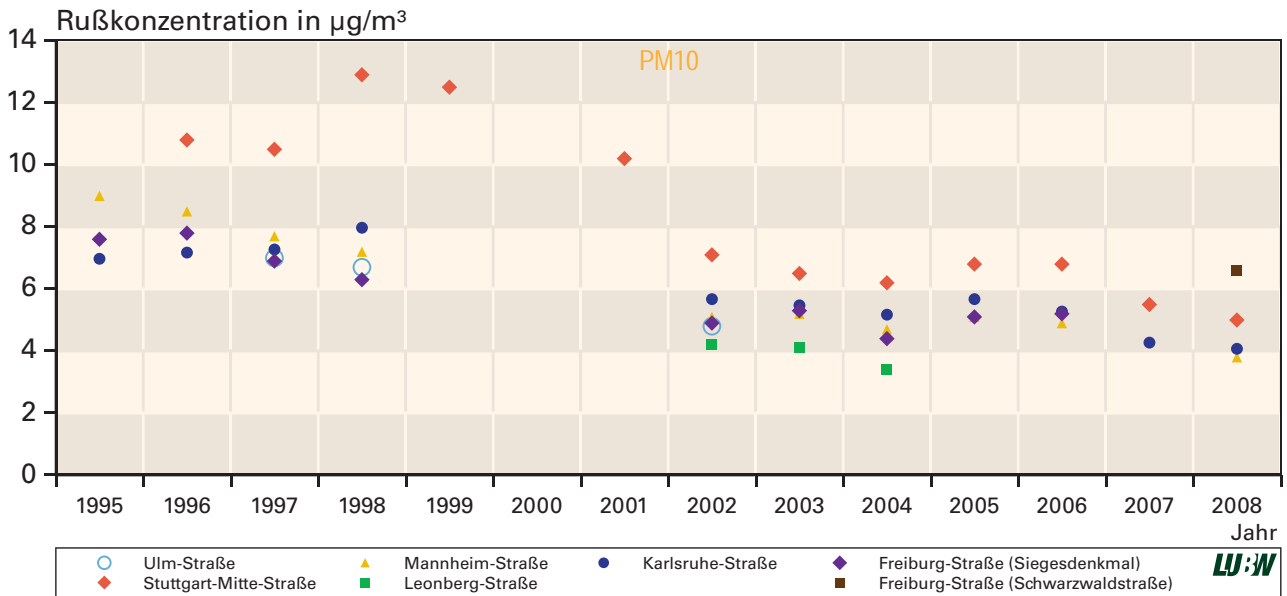


Abbildung 14: Jahresmittelwerte der Rußkonzentrationen ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) an den Verkehrsmessstationen im Untersuchungszeitraum 1995-2008

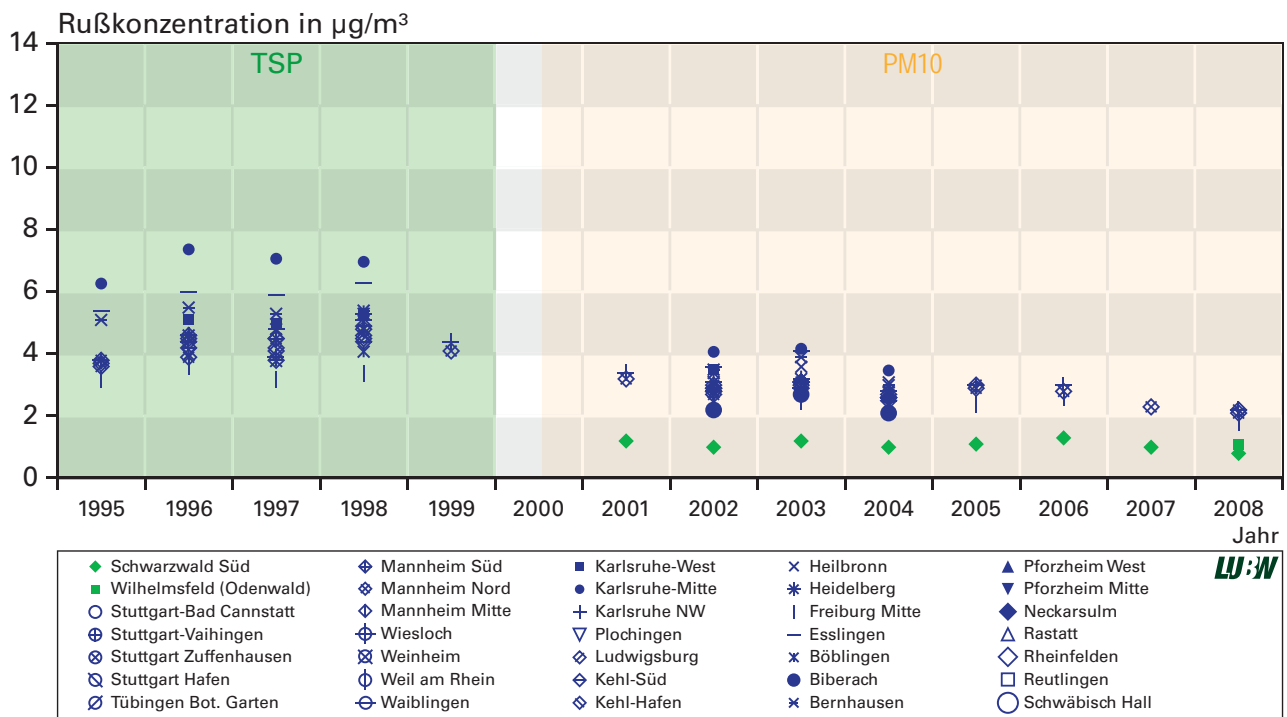


Abbildung 15: Jahresmittelwerte der Rußkonzentrationen an den städtischen Hintergrundstationen von 1995-1999 (TSP, Grün hinterlegt), 1.10.2000-31.05.2008 an den städtischen Hintergrundstationen und der ländlichen Hintergrundstation (PM10, Orange hinterlegt)

nen wurde, eine weiträumige Ausstattung der Diesel-Fahrzeuge jedoch erst ab 2005 stattgefunden hat. Der Einbau von Partikelfilter in Diesel-Pkw könnte eine Ursache dafür sein, dass ab 2006 trotz weiterhin steigender Anzahl an zugelassenen Diesel-Pkw die Rußkonzentrationen insbesondere an den Verkehrsmessstationen wieder stärker abgenommen haben.

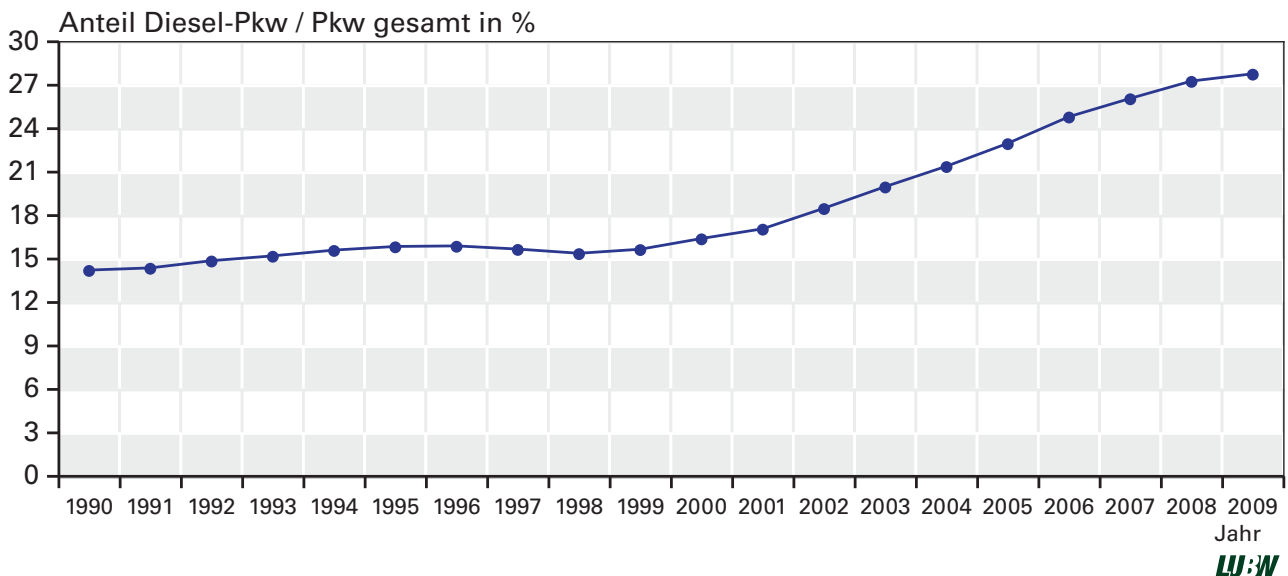


Abbildung 16: Anteil der Diesel-Pkw (%) an der Gesamtzahl aller Pkw in Baden-Württemberg im Zeitraum 1995 bis 2005 [Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, 2009]

4.1.2.2 JAHRESMITTELWERTE DER RUSSKONZENTRATIONEN FÜR DIE AUSGEWÄHLTEN LUFTMESSSTATIONEN

Die höchsten Jahresmittelwerte (nur Messjahre mit mehr als 69 Tagesmittelwerten der Rußkonzentrationen) der Rußkonzentrationen wurden im Untersuchungszeitraum 1995 bis 2008 an den Verkehrsmessstationen gemessen. Sie liegen zwischen $5,9 \pm 1,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Mittelwert \pm Standardabweichung) an der Luftmessstation Freiburg-Straße, $6,1 \pm 1,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Karlsruhe-Straße), $6,2 \pm 1,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Mannheim-Straße) und $8,8 \pm 2,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Stuttgart-Mitte-Straße). Die Jahresmittelwerte der Rußkonzentrationen liegen an den ausgewählten Hintergrundstationen im Untersuchungszeitraum 1.10.2000 bis 31.5.2008 zwischen $1,1 \pm 0,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ an der Luftmessstation Schwarzwald-Süd und $3,3 \pm 0,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ an der Luftmessstation Stuttgart-Bad Cannstatt (Abbildung 17).

Die Unterscheidung der Jahresmittelwerte der Rußkonzentration in Sommer- und Winterhalbjahresmittelwerte über den gesamten Untersuchungszeitraum ergibt in der Regel höhere Mittelwerte im Winterhalbjahr (Abbildung 18). Die höchsten Halbjahresmittelwerte wurden für die Luftmessstation Stuttgart-Mitte-Straße bestimmt (Winterhalbjahr: $8,70 \mu\text{g}/\text{m}^3$; Sommerhalbjahr $8,26 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Gemittelt über alle berücksichtigten Verkehrsmessstationen beträgt der Mittelwert der Rußkonzentration im Untersuchungszeitraum 01.01.1995 bis 31.05.2008 im Winterhalbjahr $6,73$

$\mu\text{g}/\text{m}^3$ und im Sommerhalbjahr $6,26 \mu\text{g}/\text{m}^3$, d.h. die mittlere Rußkonzentration ist im Sommerhalbjahr um ca. 7 % niedriger. Für alle berücksichtigten städtischen Hintermesssta-

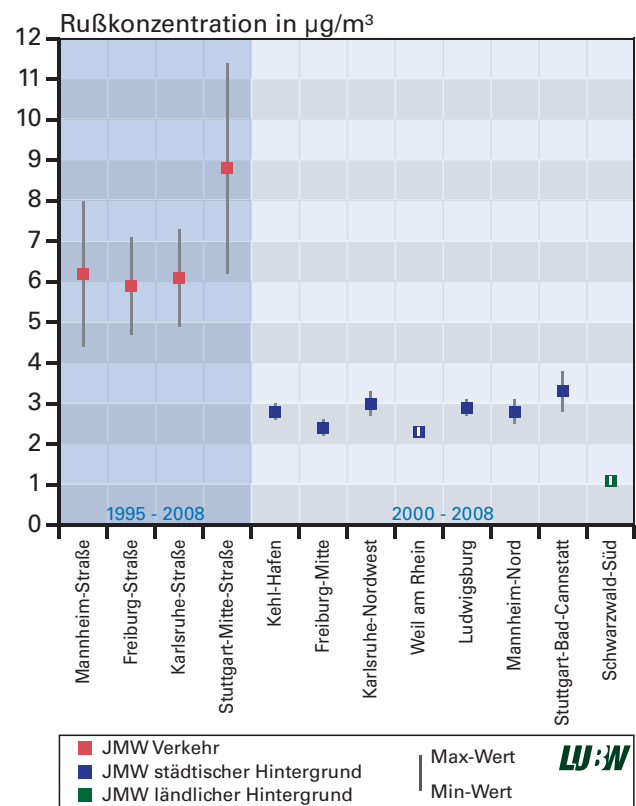


Abbildung 17: Jahresmittelwerte + Standardabweichung (nur vollständige Messjahre) der Rußkonzentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) für die Straßenstationen in Baden-Württemberg vom 01.01.1995 bis 31.05.2008 (Dunkelblau hinterlegt), für die städtischen Hintergrundstationen und die ländliche Hintergrundstation vom 1.10.2000-31.05.2008 (Hellblau hinterlegt)

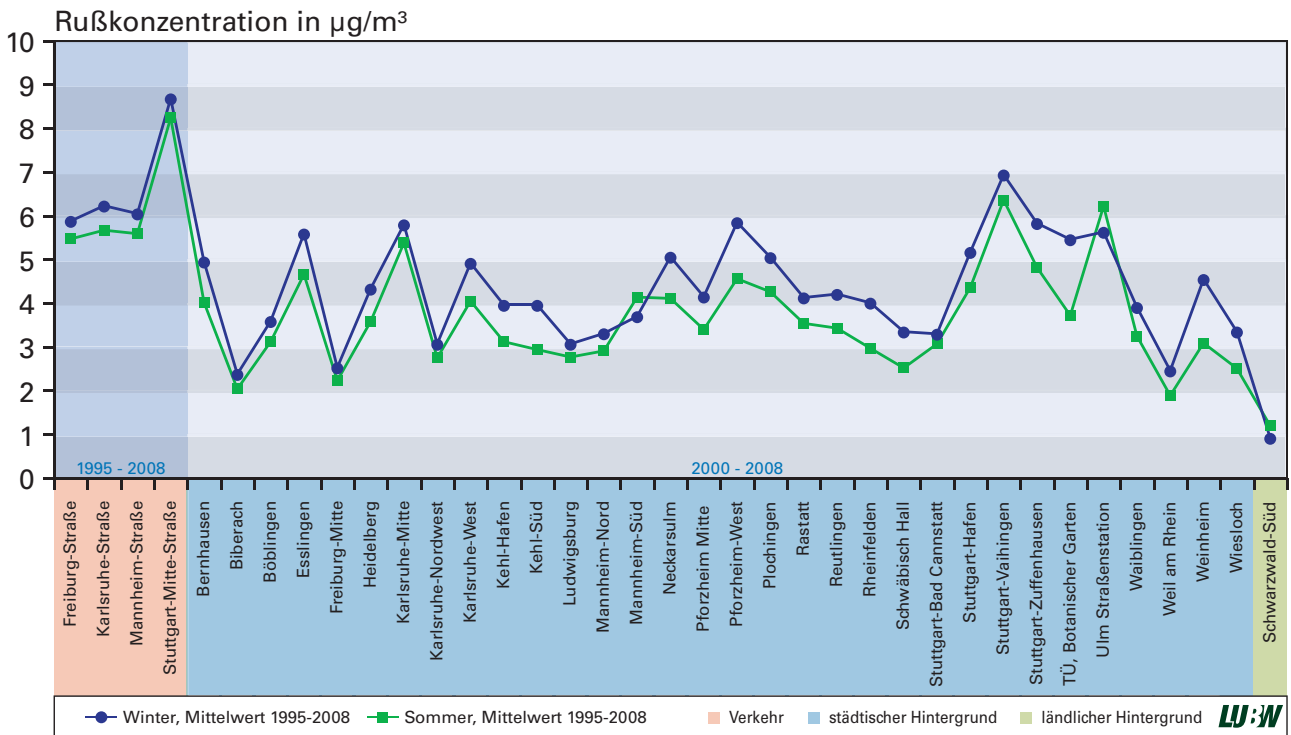


Abbildung 18: Sommer- und Winterhalbjahresmittelwerte der Rußkonzentration an Straßenstationen in Baden-Württemberg im Zeitraum 1.1.1995 bis 31.5.2008 (Dunkelblau hinterlegt), an städtischen Hintergrundstationen und der ländlichen Hintergrundstation vom 1.10.2000 - 31.5.2008 (Dunkelblau hinterlegt); Sommerhalbjahr: Mai bis Oktober, Winterhalbjahr: November bis April

tionen beträgt der Mittelwert der Rußkonzentration im Untersuchungszeitraum 2.10.2000 bis 31.05.2008 im Winterhalbjahr $2,73 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und im Sommerhalbjahr $2,39 \mu\text{g}/\text{m}^3$, d.h. die mittlere Rußkonzentration ist im Sommerhalbjahr um ca. 12 % niedriger. Dieser relativ geringen Unterschiede weisen auf eine Emissionsquelle für Ruß hin, die keinen deutlichen saisonalen Schwankungen unterliegt.

4.2 EINFLUSS ATMOSPHERISCHER UMGEBUNGSBEDINGUNGEN AUF DIE RUßKONZENTRATION

4.2.1 BODENNAHE LUFTTEMPERATUR

Die Abbildungen 19 bis 22 zeigen die Tagesmittelwerte der Rußkonzentration an den ausgewählten Luftmessstationen in Abhängigkeit von den Tagesmittelwerten der bodennahen Lufttemperatur für den Untersuchungszeitraum von 1995 bis 2008 auf. Die dafür benötigten Tagesmittelwerte der Lufttemperatur stammen von benachbarten Klimastationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD).

An allen ausgewählten Luftmessstationen bis auf Stuttgart-Mitte-Straße weisen die Streudiagramme ein mehr oder weniger ausgeprägtes Minimum der Rußkonzentration im Lufttemperaturbereich von 0°C und 20°C auf. Bei den niedrigsten und höchsten Tagesmittelwerten der Lufttemperatur steigen die Rußkonzentrationen jeweils wieder an. An der Luftmessstation Stuttgart-Mitte-Straße weist das Streudiagramm im Lufttemperaturbereich (0°C bis 20°C) ein Maximum der Rußkonzentrationen auf. Die Ursachen für den spiegelverkehrten Verlauf der Rußkonzentrationen an der Station Stuttgart-Mitte-Straße konnten auf der zur Verfügung stehenden Datenbasis nicht ermittelt werden. Über die Art der funktionalen Abhängigkeit der Rußtages-

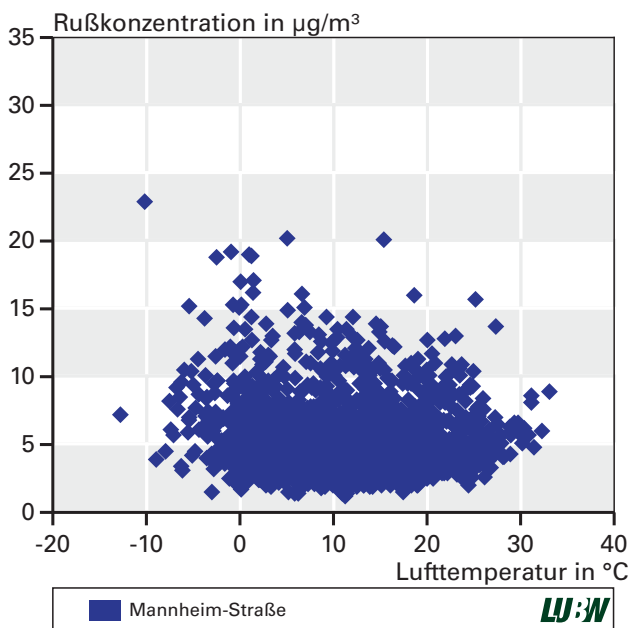


Abbildung 19: Tagesmittelwerte der Rußkonzentration an der Luftmessstation Mannheim-Strasse in Abhängigkeit

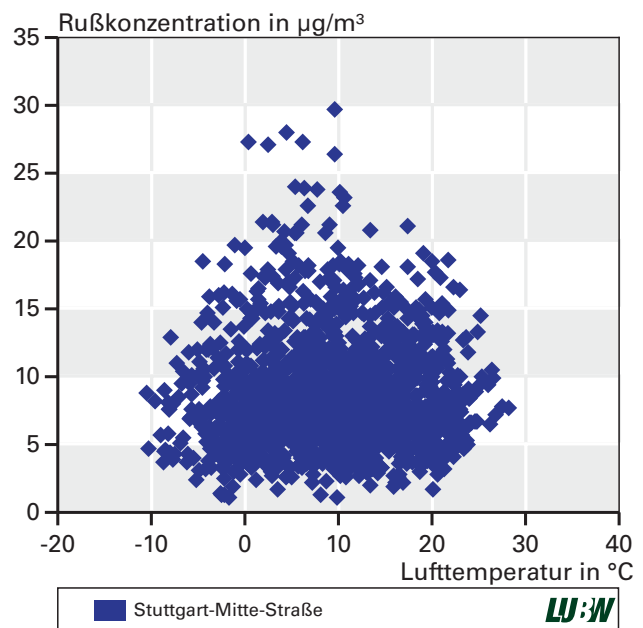


Abbildung 21: Tagesmittelwerte der Rußkonzentration an der Luftmessstation Stuttgart-Mitte-Strasse in Abhängigkeit von Tagesmittelwerten der bodennahen Lufttemperatur im Zeitraum 4.1.1995 bis 31.5.2008

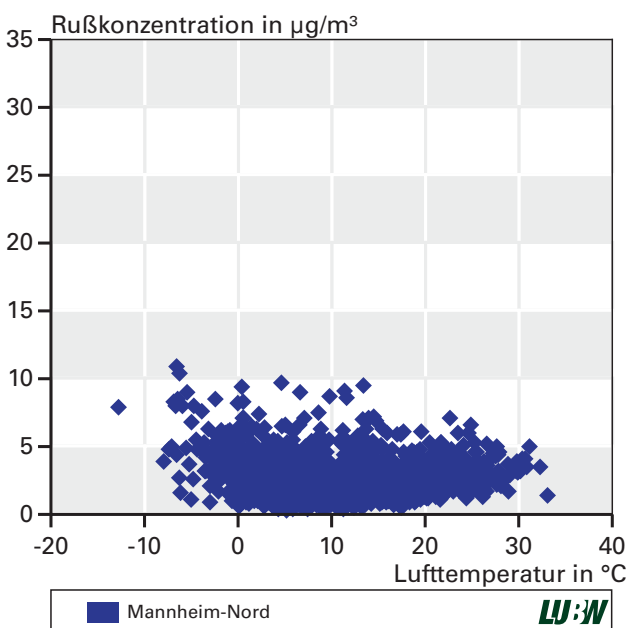


Abbildung 20: Tagesmittelwerte der Rußkonzentration an der Luftmessstation Mannheim-Nord in Abhängigkeit von Tagesmittelwerten der bodennahen Lufttemperatur im Zeitraum 2.10.2000 bis 31.5.2008

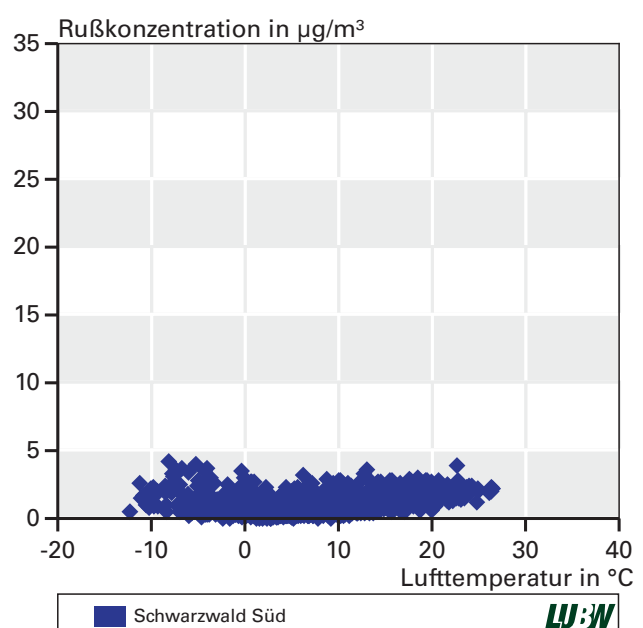


Abbildung 22: Tagesmittelwerte der Rußkonzentration an der Luftmessstation Schwarzwald-Süd in Abhängigkeit von Tagesmittelwerten der bodennahen Lufttemperatur im Zeitraum 2.10.2000 bis 31.5.2008

mittelwerte von Tagesmittelwerten der Lufttemperatur kann auf der Basis der zur Verfügung stehenden Daten nur spekuliert werden. Möglicherweise hängt das Ansteigen der lokalen Rußkonzentrationen sowohl bei sehr niedriger als auch bei sehr hoher Lufttemperatur von den atmosphärischen Schichtungs- bzw. Austauschbedingungen ab. Im Winter wie im Sommer treten austauscharme Wetterlagen

mit stabiler Schichtung (Hochdruckwetterlagen mit nächtlicher Inversion) auf, die zu einer Erhöhung der lokalen Rußkonzentration führen können. Da für diese Untersuchung nur Tageswerte verwendet werden konnten, kann der tageszeitliche Einfluss der atmosphärischen Schichtungsbedingungen auf die Rußkonzentration nicht näher analysiert werden.

Die funktionale Abhängigkeit der Rußkonzentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) von der bodennahen Lufttemperatur T_a ($^{\circ}\text{C}$) konnte am besten durch ein Polynom zweiter Ordnung gekennzeichnet werden. In Tabelle 2 sind für alle ausgewählten Luftmessstationen die Regressionskoeffizienten a_2 , a_1 und a_0 zusammengefasst, die für die Regressionsgleichung

$$\text{Rußkonzentration} = a_2 \cdot T_a^2 + a_1 \cdot T_a + a_0 \quad (1)$$

bestimmt wurden.

Insgesamt ist das anhand der Regressionsgleichung ermittelte Bestimmtheitsmaß für alle Luftmessstationen sehr gering. Mit Ausnahme der Station Schwarzwald-Süd ($R^2 = 0,2522$) lassen sich lediglich zwischen 0,7 % und 16 % der Varianz der täglichen Rußkonzentration über die funktionale Abhängigkeit von der bodennahen Lufttemperatur erklären.

4.2.2 NIEDERSCHLAG

In den Abbildungen 23 bis 26 sind die Streudiagramme der ausgewählten Luftmessstationen dargestellt, die die Wertepaarverteilungen der Rußkonzentration und des Niederschlags zeigen. Die dafür benötigten Tagessummen des Niederschlags stammen von benachbarten Klimastationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD).

Für keine Luftmessstation konnte über eine Regressionsanalyse eine funktionale Abhängigkeit zwischen den täglichen Rußkonzentrationen und den Tagessummen des

Tabelle 2: Regressionskoeffizienten a_2 , a_1 , a_0 der polynomischen Ausgleichskurve nach Gleichung (1), d.h. Kennzeichnung der funktionalen Abhängigkeit der Rußkonzentration von der bodennahen Lufttemperatur, sowie dazugehöriges Bestimmtheitsmaß R^2 für ausgewählte Luftmessstationen im Luftmessnetz Baden-Württemberg. Für die Verkehrsmessstationen im Untersuchungszeitraum 1.1.1995 bis 31.5.2008 für die städtischen Hintergrundstationen und die ländliche Hintergrundstation im Untersuchungszeitraum 1.10.2000 bis 31.5.2008

Luftmessstation	a_2	a_1	a_0	R^2
Freiburg-Straße	0,0093	-0,2726	7,0176	0,0776
Karlsruhe-Straße	0,0021	-0,0830	6,5035	0,0147
Mannheim-Straße	0,0044	-0,1448	6,6343	0,0298
Stuttgart-Mitte-Straße	-0,0052	0,0928	8,3763	0,0073
Freiburg-Mitte	0,0060	-0,1712	3,2025	0,1603
Karlsruhe-Nordwest	0,0054	-0,1511	3,5963	0,0772
Mannheim-Nord	0,0068	-0,1943	3,6407	0,1404
Stuttgart-Bad Cannstatt	0,0059	-0,1280	3,5399	0,0598
Kehl-Hafen	0,0060	-0,1890	3,8131	0,1454
Ludwigsburg	0,0034	-0,0925	3,3077	0,0403
Weil am Rhein	0,0058	-0,1436	2,7281	0,2522
Schwarzwald-Süd	0,0041	-0,0350	0,8645	0,2522

Niederschlags festgestellt werden. Es treten zwar häufig hohe Rußkonzentrationen an den Messterminen auf, an denen kein Niederschlag fällt, aber die Rußkonzentration nimmt nicht in einer funktional beschreibbaren Rate mit ansteigender Niederschlagssumme ab. Zudem kann die Streuung der Wertepaare bei gegebener Niederschlagshöhe, z.B. an den Verkehrsmessstationen in Mannheim (Abbildung 23) und Stuttgart (Abbildung 25) sehr groß sein.

Da weder Regressionsanalysen zwischen Tageswerten der Rußkonzentration und Tagessummen des Niederschlags noch die Skalierung der Tagessummen des Niederschlags in Klassen zu brauchbaren Ergebnissen führten, wurde der Einfluss des Niederschlags über die in Holst et al. (2008) beschriebene Methode analysiert. Dazu wurden mehrtägige Perioden in den ausgewählten Rußzeitreihen gesucht, in denen kontinuierlich Messwerte der täglichen Rußkonzentration vorliegen und die folgende Niederschlagsstruktur aufweisen:

- Tag -1: Tag ohne Niederschlagsereignis ($N < 1$ mm), bezogen auf Tag 0
- Tag 0: Tag mit Niederschlagsereignis ($N \geq 1$ mm)
- Tag 1: Tag ohne Niederschlagsereignis ($N < 1$ mm), bezogen auf Tag 0

Die Abbildungen 27 bis 30 zeigen für die Tage -1 bis 1 während der selektierten Perioden Tagesmittelwerte sowie das dazugehörige 95 %-Konfidenzintervall der Rußkonzentration. Anhand des Konfidenzintervalls kann mit einer 95 %-iger Wahrscheinlichkeit direkt auf die Signifikanz der Änderungen der Tagesmittelwerte der Rußkonzentrationen von Tag -1 bis Tag 1 geschlossen werden.

An den Luftmessstationen Mannheim-Straße, Mannheim-Nord und Schwarzwald-Süd stimmt der Verlauf der gemessenen Rußkonzentrationen von Tag -1 bis Tag 1 gut überein. Die Minima der mittleren Rußkonzentrationen treten an Tag 0 auf, d.h. an dem Tag mit $N \geq 1$ mm. Ab Tag 1 steigen die Rußkonzentrationen wieder an. An der Luftmessstation Stuttgart-Mitte-Straße sind die Rußkonzentrationen an Tag 1, dem Tag nach einem Niederschlagsereignis am geringsten. Bei den Auswertungen ist allerdings zu bedenken, dass nur Tagessummen des Nie-

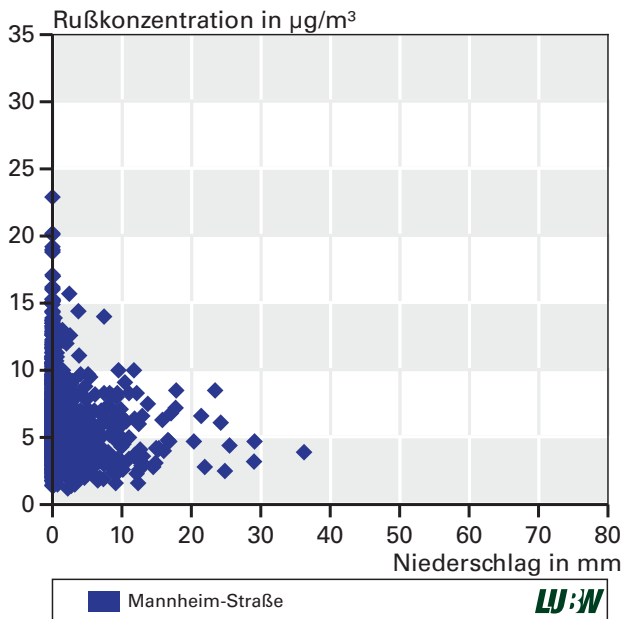


Abbildung 23: Tagesmittelwerte der Rußkonzentration an der Luftmessstation Mannheim-Strasse in Abhängigkeit von Tagessummen des Niederschlags im Zeitraum 2.1.1995 bis 31.5.2008

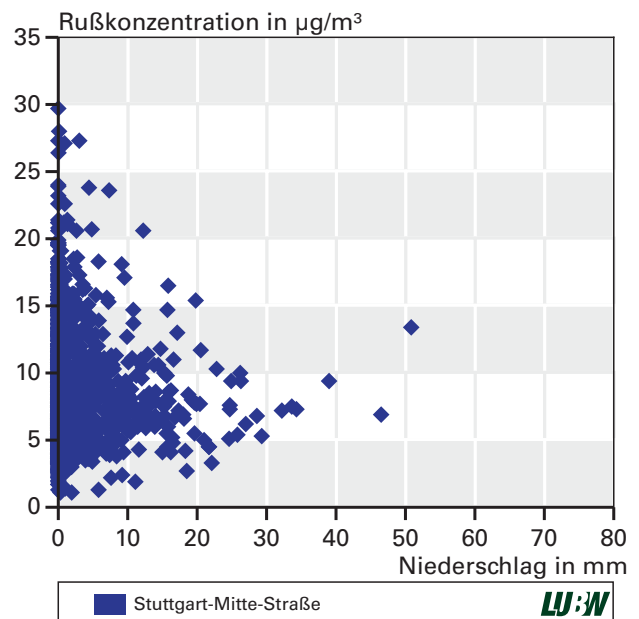


Abbildung 25: Tagesmittelwerte der Rußkonzentration an der Luftmessstation Stuttgart-Mitte-Strasse in Abhängigkeit von Tagessummen des Niederschlags im Zeitraum 4.1.1995 bis 31.5.2008

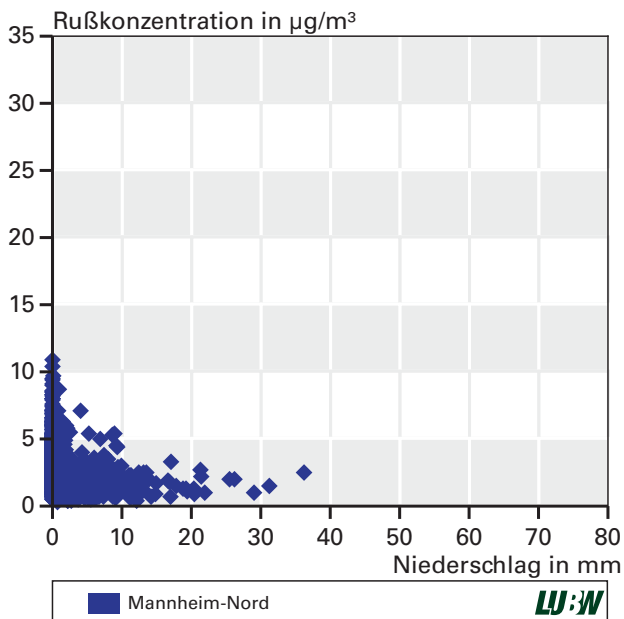


Abbildung 24: Tagesmittelwerte der Rußkonzentration an der Luftmessstation Mannheim-Nord in Abhängigkeit von Tagessummen des Niederschlags im Zeitraum 2.10.2000 bis 31.5.2008

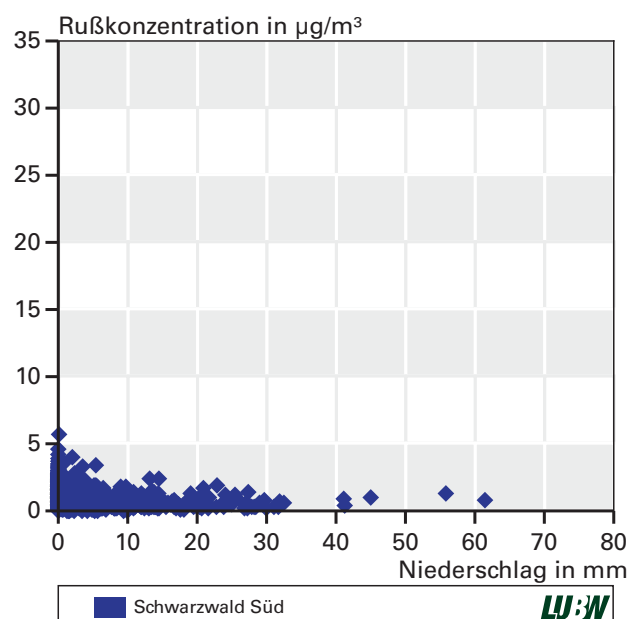


Abbildung 26: Tagesmittelwerte der Rußkonzentration an der Luftmessstation Schwarzwald-Süd in Abhängigkeit von Tagessummen des Niederschlags im Zeitraum 2.10.2000 bis 31.5.2008

derschlags herangezogen werden konnten, so dass die tageszeitliche Verteilung des Niederschlags, die hier möglicherweise eine Rolle spielt, unberücksichtigt bleiben musste. Daher ist es nicht verwunderlich, dass die Abnahme der Rußkonzentration im Zusammenhang mit einem Niederschlagsereignis allenfalls an der Hälfte der ausgewählten Luftmessstationen signifikant ist.

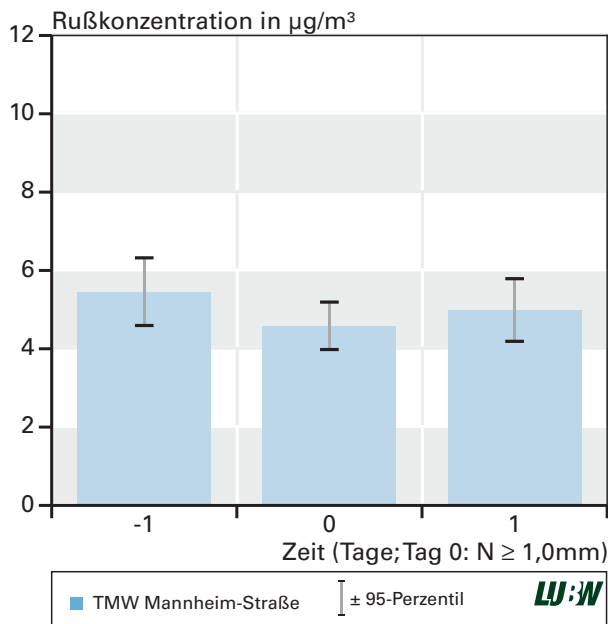


Abbildung 27: Tagesmittelwerte sowie 95 %-Konfidenzintervall der Rußkonzentrationen ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) an der Luftmessstation Mannheim-Strasse für die Messtage -1 bis 1 im Jahr 2005, Tag 0: $N \geq 1 \text{ mm}$, an allen anderen Messtagen: $N < 1 \text{ mm}$ (Anzahl der Perioden 35)

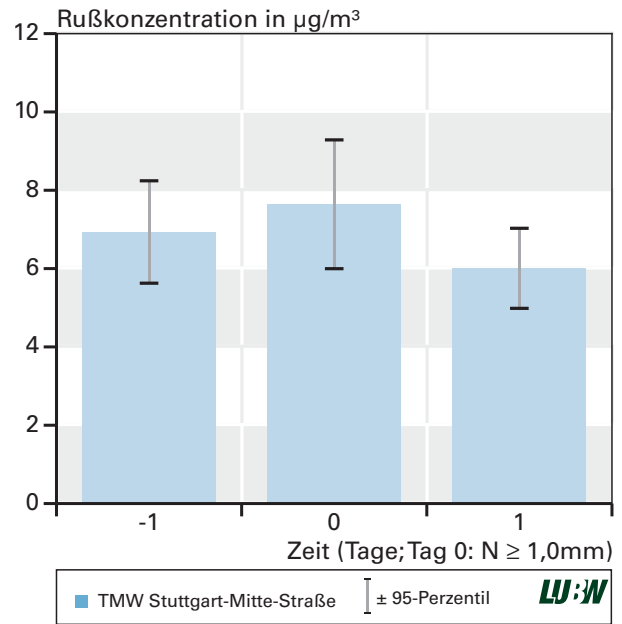


Abbildung 29: Tagesmittelwerte sowie 95 %-Konfidenzintervall der Rußkonzentrationen ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) an der Luftmessstation Stuttgart-Mitte-Strasse für die Messtage -1 bis 1 im Jahr 2005 Tag 0: $N \geq 1 \text{ mm}$, an allen anderen Messtagen: $N < 1 \text{ mm}$ (Anzahl der Perioden 29)

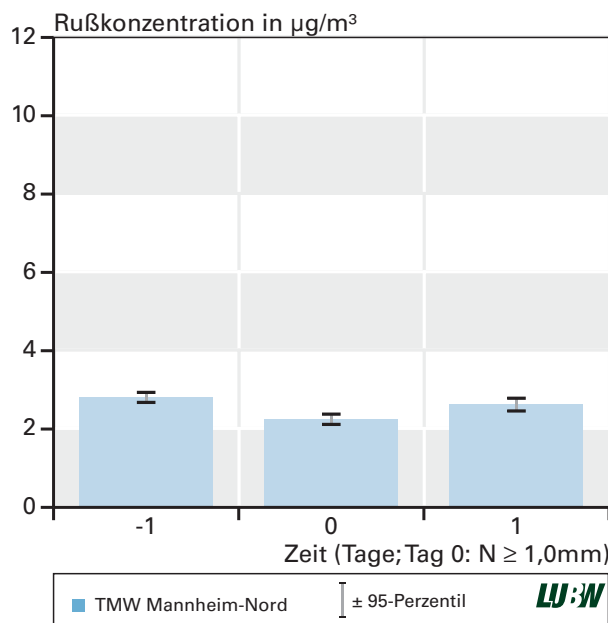


Abbildung 28: Tagesmittelwerte sowie 95 %-Konfidenzintervall der Rußkonzentrationen ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) an der Luftmessstation Mannheim-Nord für die Messtage -1 bis 1 im Jahr 2005, Tag 0: $N \geq 1 \text{ mm}$, an allen anderen Messtagen: $N < 1 \text{ mm}$ (Anzahl der Perioden 66)

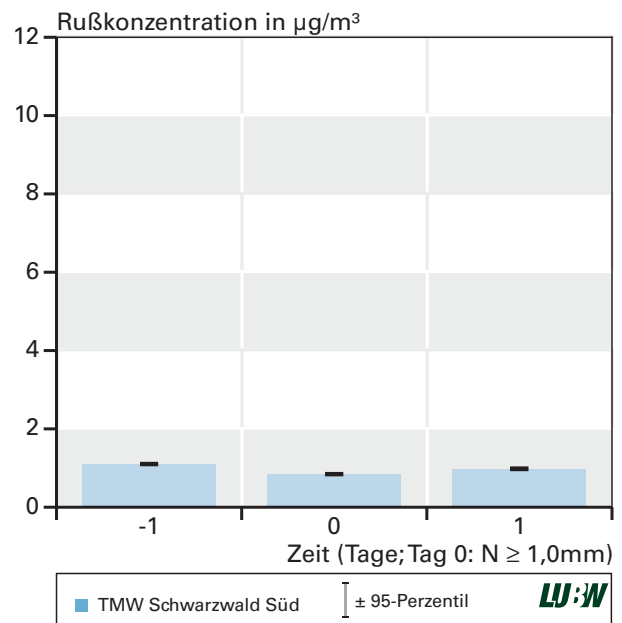


Abbildung 30: Tagesmittelwerte sowie 95 %-Konfidenzintervall der Rußkonzentrationen ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) an der Luftmessstation Schwarzwald-Süd für die Messtage -1 bis 1 im Jahr 2005, Tag 0: $N \geq 1 \text{ mm}$, an allen anderen Messtagen: $N < 1 \text{ mm}$ (Anzahl der Perioden 30)

4.2.3 BODENNAHE WINDGESCHWINDIGKEIT

Für acht der zwölf ausgewählten Luftmessstationen konnte die funktionale Abhängigkeit der Tagesmittelwerte der Rußkonzentration von Tagesmittelwerten der bodennahen Windgeschwindigkeit anhand von Windgeschwindigkeitsdaten aus direkten Messungen an den Luftmessstationen

untersucht werden. Für die vier Verkehrsmessstationen in Freiburg, Karlsruhe, Mannheim und Stuttgart standen keine Tagesmittelwerte der bodennahen Windgeschwindigkeit aus direkten Messungen zur Verfügung.

In Abbildungen 31 und 32 sind die Tagesmittelwerte der Rußkonzentration in Abhängigkeit von den Tagesmittel-

werten der bodennahen Windgeschwindigkeit im Untersuchungszeitraum 1995 bis 2008 dargestellt.

Alle Streudiagramme der städtischen Hintergrundstationen weisen, bis auf die ländliche Hintergrundstation Schwarzwald-Süd, ein Maximum der Rußkonzentrationen im Windgeschwindigkeitsbereich 1 m/s bis 4 m/s auf. Die höchsten Einzelwerte der Rußkonzentrationen werden bei der städtischen Hintergrundstation Mannheim-Nord gemessen. Auffällig ist, dass bei allen städtischen Hintergrundstationen auch bei hohen Windgeschwindigkeiten die Rußkonzentrationen nahe der Nachweisgrenze liegen, aber nie $0,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ erreichen. An der Luftmessstation Schwarzwald-Süd werden insgesamt die niedrigsten Rußkonzentrationen im Stationskollektiv der Luftmessstationen gemessen.

Die funktionale Abhängigkeit der täglichen Rußkonzentration von Tagesmittelwerten der bodennahen Windgeschwindigkeit konnte am besten durch eine potenzielle Ausgleichskurve gekennzeichnet werden. In Tabelle 3 sind für alle ausgewählten Luftmessstationen die Regressionskoeffizienten a und b zusammengefasst, die für die Regressionsgleichung

$$\text{Rußkonzentration} = a \cdot U^b \quad (2)$$

bestimmt wurden.

Tabelle 3: Regressionskoeffizienten a und b einer potenziellen Ausgleichskurve nach Gleichung (2) zur Kennzeichnung der funktionalen Abhängigkeit der Rußkonzentration von der bodennahen Windgeschwindigkeit sowie dazugehöriges Bestimmtheitsmaß R^2 , ausgewählte Luftmessstationen im Luftmessnetz Baden-Württemberg im Untersuchungszeitraum 1.10.2000 bis 31.5.2008

Luftmessstation	a	b	R^2
Freiburg-Mitte	2,9456	-0,8317	0,5692
Karlsruhe-Nordwest	3,4246	-0,7781	0,3367
Mannheim-Nord	5,2401	-0,8585	0,4961
Stuttgart-Bad Cannstatt	2,9051	-0,6087	0,3096
Kehl-Hafen	4,8887	-0,7320	0,4624
Ludwigsburg	4,1063	-0,6394	0,3063
Weil am Rhein	2,7945	-0,4752	0,1720
Schwarzwald-Süd	0,8417	-0,0410	0,0010

Mit Ausnahme der ländlichen Hintergrundstation Schwarzwald-Süd kann über die funktionelle Abhängigkeit der Rußkonzentration von der bodennahen Windgeschwindigkeit ein höherer Anteil der Varianz in den Messreihen der täglichen Rußkonzentration erklärt werden, als über die an den Luftmessstationen herrschenden Lufttemperaturverhältnisse (Tabelle 3). Für die Luftmessstationen Freiburg-Mitte und Mannheim-Nord lassen sich zwischen 40 % und 50 % der Varianz der täglichen Rußkonzentration über die funktionelle Abhängigkeit von der bodennahen Windgeschwindigkeit erklären.

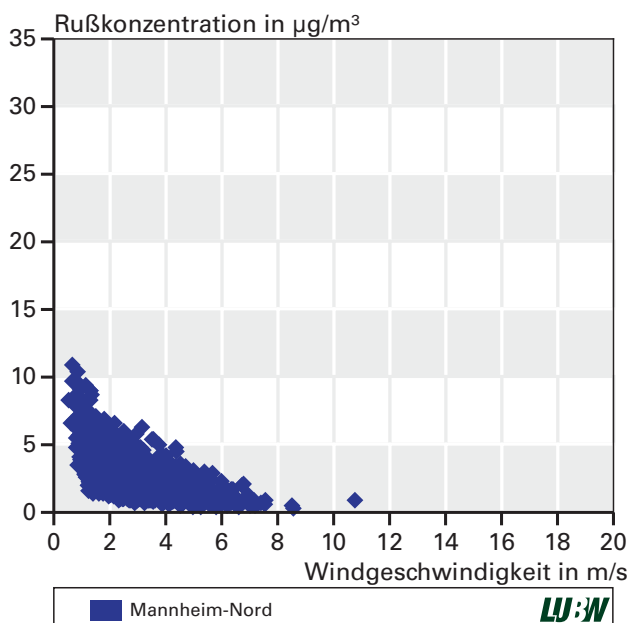


Abbildung 31: Tagesmittelwerte der Rußkonzentration an der Luftmessstation Mannheim-Nord in Abhängigkeit von Tagesmittelwerten der bodennahen Windgeschwindigkeit im Zeitraum 1.1.1995 bis 31.5.2008

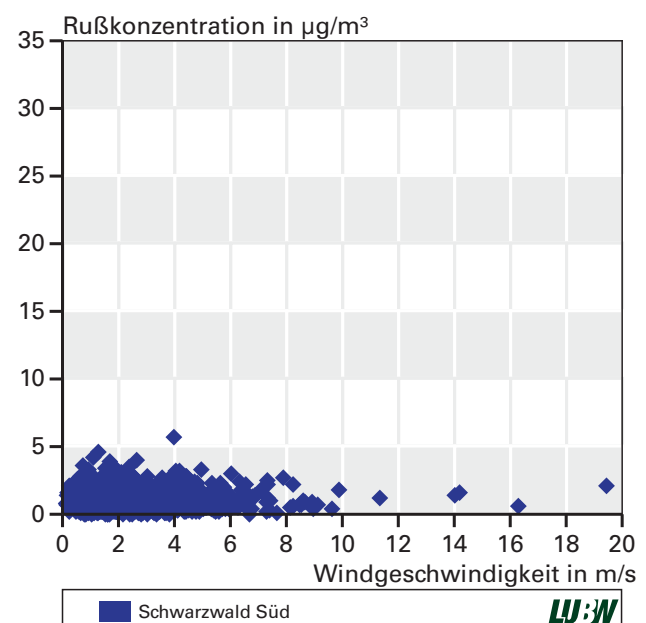


Abbildung 32: Tagesmittelwerte der Rußkonzentration an der Luftmessstation Schwarzwald-Süd in Abhängigkeit von Tagesmittelwerten der bodennahen Windgeschwindigkeit im Zeitraum 2.10.2000 bis 31.5.2008

4.3 EINFLUSS ATMOSPHERISCHER AUSTAUSCHBEDINGUNGEN AUF DIE RUßKONZENTRATION

4.3.1 MISCHUNGSSCHICHTHÖHE

Zusätzlich zu den bodennah gemessenen Variablen Lufttemperatur, Niederschlag und Windgeschwindigkeit standen für diese Untersuchung meteorologische Simulationsdaten aus dem Lokal-Modell (LME) des DWD für den Zeitraum 1.1.2001 bis 31.3.2006 zur Verfügung. Aus diesen Simulationsdaten wurde die Mischungsschichthöhe H_{mix} , die die lokalen Austauschbedingungen in der atmosphärischen Grenzschicht kennzeichnet [Dandou et al., 2006], für jeden Tag um 12:00 Uhr MEZ aus dem Vertikalprofil der Lufttemperatur berechnet [Holst et al., 2005, 2006a, 2006b]. Die Berechnung erfolgte bisher nur für die Luftmessstationen in Städten, so dass zur Zeit keine H_{mix} -Werte für die Luftmessstation Schwarzwald-Süd vorliegen.

In Abbildungen 33 bis 35 sind die Streudiagramme der ausgewählten Luftmessstationen dargestellt, die die Wertepaarverteilung der Rußkonzentration und der Mischungsschichthöhe für den Untersuchungszeitraum 2000 bis 2006 zeigen.

Stationsabhängig nimmt an allen ausgewählten Luftmessstationen die Rußkonzentration bis zu einer Mischungsschichthöhe von etwa 1000 m bis 1500 m über Grund ab.

Es ist anzunehmen, dass sich das zur Verdünnung stehende Mischungsvolumen im Tagesverlauf vergrößert hat, was den Rückgang der lokalen Rußkonzentrationen erklärt.

Die funktionale Abhängigkeit der Rußkonzentration von der Mischungsschichthöhe H_{mix} konnte, wie für die bodennah gemessene Lufttemperatur T_a , am besten durch eine lineare Ausgleichsgerade gekennzeichnet werden. In Tabelle 4 sind für alle ausgewählten Luftmessstationen, für die H_{mix} -Werte zur Verfügung standen, die Regressionskoeffizienten a_2 , a_1 und a_0 zusammengefasst, die für die Regressionsgleichung

$$\text{Rußkonzentration} = a \cdot H_{mix} + b \quad (3)$$

bestimmt wurden.

Der höchste Anteil der durch die Variabilität von H_{mix} erklärbaren Varianz der Rußkonzentration wurde für die Luftmessstation Ludwigsburg ($R^2 = 0,2880$) bestimmt. Für die Luftmessstation Freiburg-Mitte ($R^2 = 0,0851$) konnte der geringste Anteil der Variabilität der Rußkonzentration durch die Variabilität von H_{mix} erklärt werden.

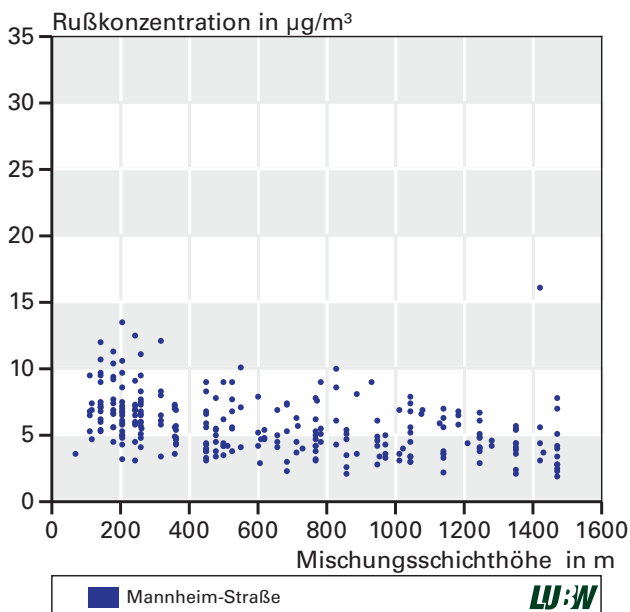


Abbildung 33: Tagesmittelwerte der Rußkonzentration an der Luftmessstation Mannheim-Straße in Abhängigkeit von der für 12:00 Uhr MEZ berechneten Mischungsschichthöhe (m über Grund) im Zeitraum 1.10.2001 bis 31.3.2006 (Anzahl der Wertepaare: 454)

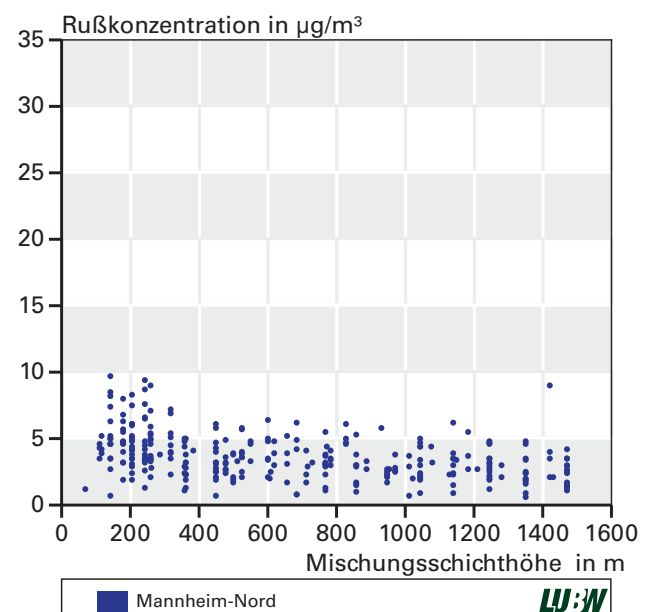


Abbildung 34: Tagesmittelwerte der Rußkonzentration an der Luftmessstation Mannheim-Nord in Abhängigkeit von der für 12:00 Uhr MEZ berechneten Mischungsschichthöhe (m über Grund) im Zeitraum 2.10.2000 bis 31.3.2006 (Anzahl der Wertepaare: 527)

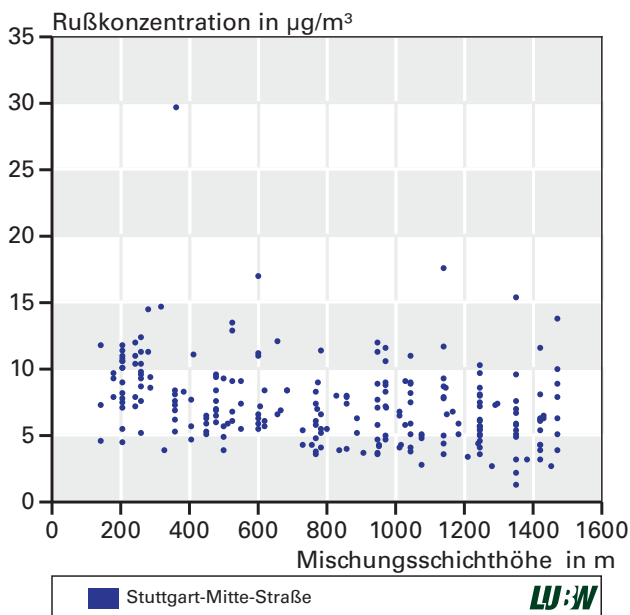


Abbildung 35: Tagesmittelwerte der Rußkonzentration an der Luftmessstation Stuttgart-Mitte-Straße in Abhängigkeit von der für 12:00 Uhr MEZ berechneten Mischungsschichthöhe (m über Grund) im Zeitraum 2.10.2000 bis 31.3.2006 (Anzahl der Wertepaare: 460)

4.3.2 STAGNATIONSINDEX

Der Stagnationsindex $I_{\text{stag}} (\mu\text{s}/\text{m}^2)^{0,5}$ nach Fett (1974) ist eine Maßzahl für die Zeit (sec), in der eine belastende Luftströmung von einem Meter Breite und einer Mischungsschichthöhe (m) stagniert, bevor sie um einen Kubikmeter weiterrückt [Helbig et al., 1999]. I_{stag} stand wie H_{mix} aus den Simulationsdaten des LME für den Zeitraum 1.1.2001 bis 31.3.2006 zur Verfügung. Der Stagnationsindex wird aus der regionalen Mischungsschichthöhe und der lokalen Windgeschwindigkeit gebildet. Die lokalen Werte von I_{stag} wurden folgendermaßen bestimmt [Holst et al., 2006c]:

$$I_{\text{stag}} = \sqrt{\frac{10^6}{H_{\text{mix}} \cdot U_s}}$$

H_{mix} : lokale Mischungsschichthöhe (m über Grund)

U_s : simulierte lokale Windgeschwindigkeit (m/s) in 10 m Höhe über Grund

Die Streudiagramme 36 bis 38 zeigen die Tagesmittelwerte der Rußkonzentrationen an den ausgewählten Luftmessstationen in Abhängigkeit vom Stagnationsindex. Bei den Verkehrsmessstationen sind sowohl das höchste Grundniveau als auch die höchsten Einzelwerte zu finden. An diesen Luftmessstationen gehen die Rußkonzentrationen äußerst selten gegen die Nachweisgrenze, d.h. $0,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ zurück. Für alle Luftmessstationen gilt, je höher der Stagna-

Tabelle 4: Regressionskoeffizienten a und b einer linearen Ausgleichsgerade nach Gleichung (3) zur Kennzeichnung der funktionalen Abhängigkeit der Rußkonzentration von der Mischungsschichthöhe H_{mix} sowie dazugehöriges Bestimmtheitsmaß R^2 ; ausgewählte Luftmessstationen im Luftmessnetz Baden-Württemberg im Zeitraum 1.1.2001 bis 31.3.2006

Luftmessstation	a	b	R^2
Freiburg-Straße	-0,0021	7,0490	0,1074
Karlsruhe-Straße	-0,0020	7,3308	0,1002
Mannheim-Straße	-0,0020	7,0148	0,1482
Stuttgart-Mitte-Straße	-0,0024	9,2974	0,0986
Freiburg-Mitte	-0,0011	3,8386	0,0851
Karlsruhe-Nordwest	-0,0010	4,5156	0,1507
Mannheim-Nord	-0,0015	4,6660	0,1522
Stuttgart-Bad Cannstatt	-0,0018	5,7847	0,1256
Kehl-Hafen	-0,0021	5,3791	0,2176
Ludwigsburg	-0,0023	5,4567	0,2880
Weil am Rhein	-0,0010	3,7488	0,1107

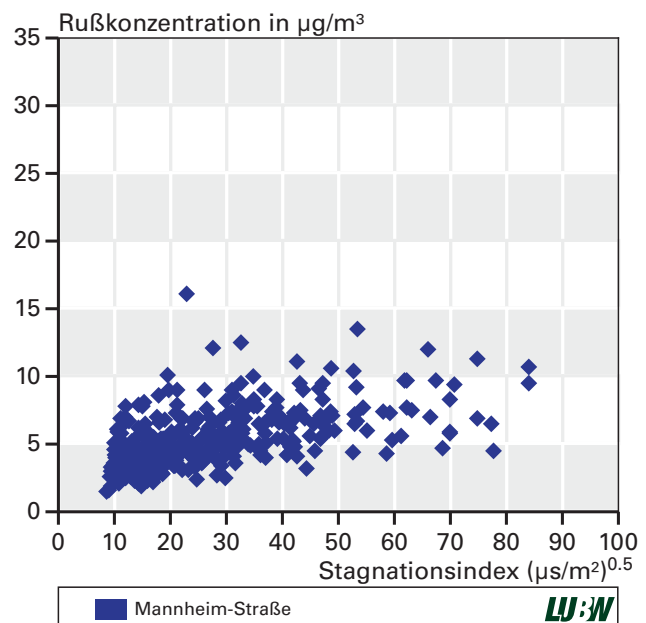


Abbildung 36: Tagesmittelwerte der Rußkonzentration an der Luftmessstation Mannheim-Straße in Abhängigkeit von dem für 12:00 Uhr MEZ berechneten Stagnationsindex im Zeitraum 1.10.2001 bis 31.3.2006 (Anzahl der Wertepaare: 454)

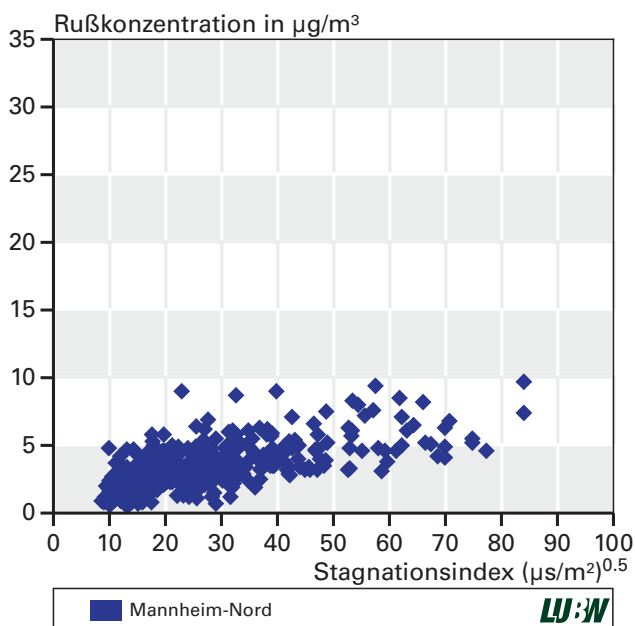


Abbildung 37: Tagesmittelwerte der Rußkonzentration an der Luftmessstation Mannheim-Nord in Abhängigkeit von dem für 12:00 Uhr MEZ berechneten Stagnationsindex im Zeitraum 2.10.2000 bis 31.3.2006 (Anzahl der Wertepaare: 527)

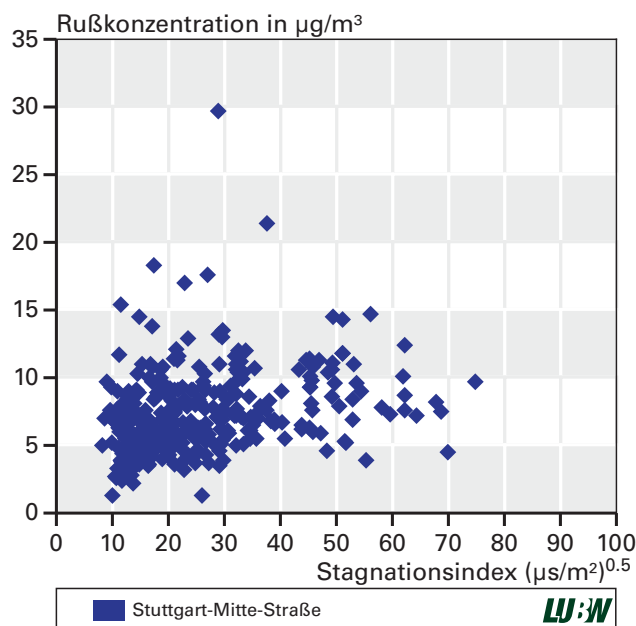


Abbildung 38: Tagesmittelwerte der Rußkonzentration an der Luftmessstation Stuttgart-Mitte-Straße in Abhängigkeit von dem für 12:00 Uhr MEZ berechneten Stagnationsindex im Zeitraum 2.10.2001 bis 31.3.2006 (Anzahl der Wertepaare: 460)

tionsindex, umso höher die gemessenen Rußkonzentrationen. Die Abhängigkeit der Rußkonzentration vom Stagnationsindex ist noch stärker ausgeprägt als die Abhängigkeit von der Mischungsschichthöhe, da zusätzlich auch der Einfluss der lokalen Windgeschwindigkeit in die Betrachtung eingeht. Hohe Windgeschwindigkeiten bewirken einen niedrigen I_{stag} , niedrige Windgeschwindigkeiten einen hohen I_{stag} . Der Stagnationsindex beschreibt deshalb die örtlichen Austauschbedingungen der bodennahen Luftschichten.

Tabelle 5: Regressionskoeffizienten a und b einer logarithmischen Ausgleichskurve nach Gleichung (4) zur Kennzeichnung der funktionalen Abhängigkeit der Rußkonzentration vom Stagnationsindex I_{stag} sowie dazugehöriges Bestimmtheitsmaß R^2 , ausgewählte Luftmessstationen im Luftmessnetz Baden-Württemberg im Zeitraum 1.1.2001 bis 31.3.2006

Luftmessstation	a	b	R2
Freiburg-Straße	2,7858	-3,2082	0,3528
Karlsruhe-Straße	1,5266	1,1078	0,1695
Mannheim-Straße	2,0860	-1,1312	0,3026
Stuttgart-Mitte-Straße	1,2327	3,5430	0,0888
Freiburg-Mitte	1,7746	-2,6960	0,4235
Karlsruhe-Nordwest	1,6729	-1,7911	0,3252
Mannheim-Nord	1,9661	-2,8187	0,4477
Stuttgart-Bad Cannstatt	1,8214	-1,7112	0,2497
Kehl-Hafen	1,9040	-2,4535	0,3547
Ludwigsburg	1,7704	-2,0584	0,4046
Weil am Rhein	0,9856	-0,4857	0,1524

Die funktionale Abhängigkeit der Rußkonzentration von I_{stag} konnte am besten durch eine logarithmische Ausgleichskurve gekennzeichnet werden. In Tabelle 5 sind für alle ausgewählten Luftmessstationen, für die I_{stag} -Werte zur Verfügung standen, die Regressionskoeffizienten a und b enthalten, die für die Regressionsgleichung

$$\text{Rußkonzentration} = a \cdot \ln(I_{stag}) + b \quad (4)$$

bestimmt wurden.

Über die Variabilität von I_{stag} konnten zwischen 8,9 % (Stuttgart-Mitte-Straße) und 44,8 % (Mannheim-Nord) der Variabilität der gemessenen Rußkonzentrationen erklärt werden. Der Anteil der durch die Variabilität von I_{stag} erklärbarer Varianz der Rußkonzentrationen lag für alle Luftmessstationen deutlich über dem Anteil erklärbarer Varianz von H_{mix} .

4.4 ABHÄNGIGKEIT DER RUSS- VON DER PM10-KONZENTRATION

Da für die ausgewählten Luftmessstationen frühestens seit 28.9.1997 (Zeitpunkt des Messbeginns und -endes der PM10-Konzentration variiert) sowohl Tagesmittelwerte der PM10- als auch der Rußkonzentration vorliegen, wurde die

funktionale Abhängigkeit zwischen beiden Partikelkonzentrationen untersucht. Die Abbildungen 39 bis 42 zeigen die Tagesmittelwerte der Rußkonzentrationen in Abhängigkeit von Tagesmittelwerten der PM10-Konzentration im Untersuchungszeitraum 1997 bis 2008.

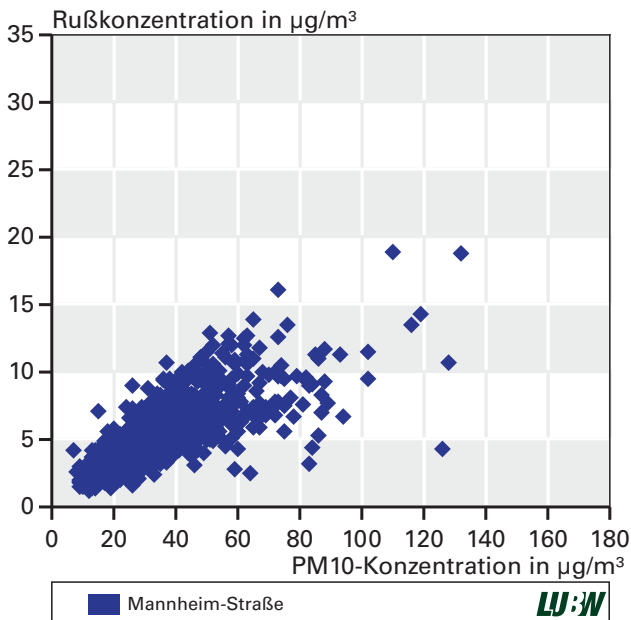


Abbildung 39: Tagesmittelwerte der Rußkonzentration an der Luftmessstation Mannheim-Straße in Abhängigkeit von Tagesmittelwerten der PM10-Konzentration im Zeitraum 28.9.1997 bis 31.5.2008 (Anzahl der Wertepaare: 1135)

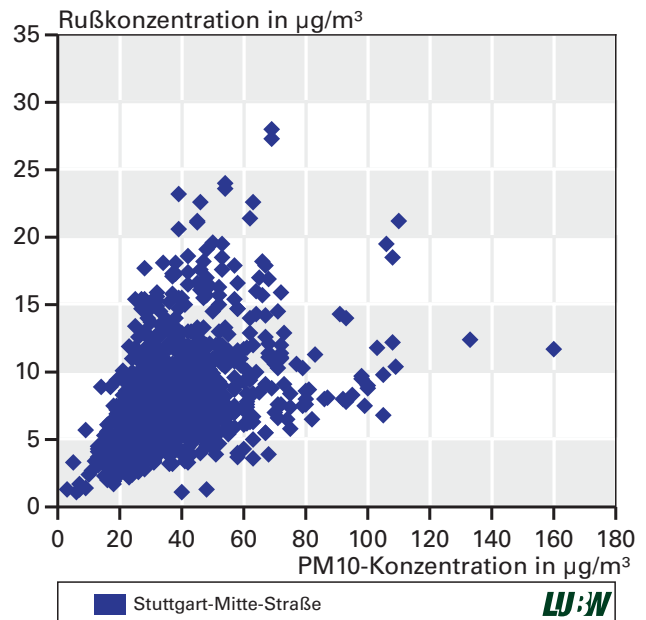


Abbildung 41: Tagesmittelwerte der Rußkonzentration an der Luftmessstation Stuttgart-Mitte-Straße in Abhängigkeit von Tagesmittelwerten der PM10-Konzentration im Zeitraum 1.12.1997 bis 31.5.2008 (Anzahl der Wertepaare: 1241)

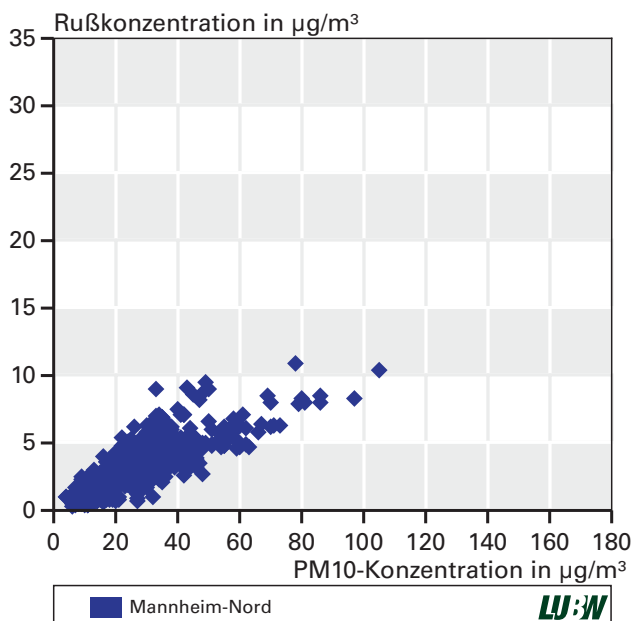


Abbildung 40: Tagesmittelwerte der Rußkonzentration an der Luftmessstation Mannheim-Nord in Abhängigkeit von Tagesmittelwerten der PM10-Konzentration im Zeitraum 2.10.2001 bis 31.5.2008 (Anzahl der Wertepaare: 1135)

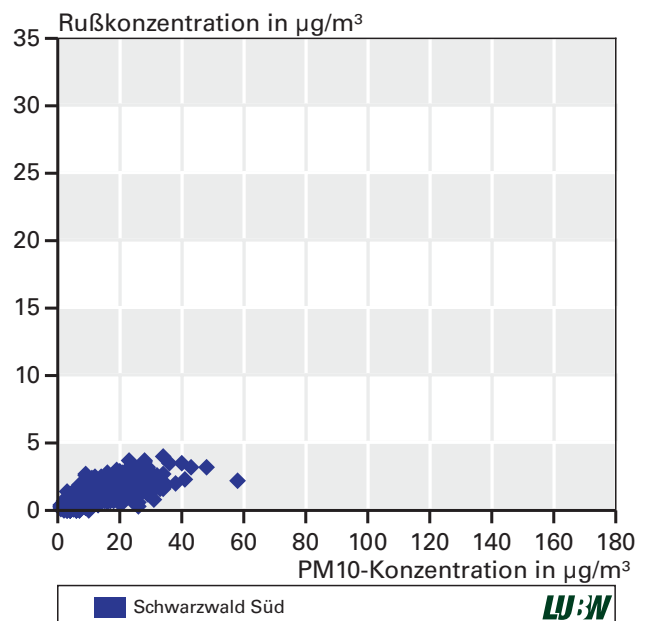


Abbildung 42: Tagesmittelwerte der Rußkonzentration an der Luftmessstation Schwarzwald-Süd in Abhängigkeit von Tagesmittelwerten der PM10-Konzentration im Zeitraum 2.10.2000 bis 31.5.2008 (Anzahl der Wertepaare: 1145)

An den Verkehrsmessstationen sind sowohl das höchste Grundniveau als auch die höchsten Einzelwerte der täglichen Rußkonzentrationen zu finden. In Analogie zu den verwendeten meteorologischen Prädiktoren ist die Streuung der Rußkonzentrationen an den Verkehrsmessstationen größer als an den städtischen Hintergrundstationen. Die größte Bandbreite der Streuung liegt an den Stationen Karlsruhe-Straße und Stuttgart-Mitte-Straße vor. Bei den Verkehrsmessstationen wirken zunehmend Lokaleffekte hinein, so dass bei diesen nicht unbedingt ein direkter Zusammenhang zwischen Ruß- und PM10-Konzentration erkennbar ist.

Die funktionale Abhängigkeit konnte am besten durch eine potenzielle Ausgleichskurve gekennzeichnet werden. In Tabelle 6 sind für alle ausgewählten Luftmessstationen die Regressionskoeffizienten a und b zusammengestellt, die für die Regressionsgleichung

$$\text{Rußkonzentration} = a \cdot \text{PM10}^b \quad (5)$$

bestimmt wurden.

Von allen zur Verfügung stehenden Prädiktoren der Tagesmittelwerte der Rußkonzentration weisen die Tagesmittelwerte der PM10-Konzentration, die besten prädiktiven Eigenschaften auf. R^2 liegt für alle Luftmessstationen zwischen 0,288 (Stuttgart-Mitte-Straße) und 0,7545 (Kehl-Hafen).

In Abbildung 43 sind die mittleren Anteile (%) von Ruß an der PM10-Fraktion getrennt nach Sommer (Mai bis Oktober) und Winter (November bis April) sowie für das gesamte Jahr an ausgewählten Luftmessstationen im Luftmessnetz Baden-Württemberg im Zeitraum zwischen 28.7.1997 bis 31.5.2008 graphisch aufgezeigt.

Tabelle 6: Regressionskoeffizienten a und b einer potenziellen Ausgleichskurve nach Gleichung (5) zur Kennzeichnung der funktionalen Abhängigkeit der Ruß- von der PM10-Konzentration sowie dazugehöriges Bestimmtheitsmaß R^2 , ausgewählte Luftmessstationen im Luftmessnetz Baden-Württemberg, stationspezifische Zeiträume: siehe Legenden zu den Abbildungen 32 bis 35

Luftmessstation	a	b	R^2
Freiburg-Straße	0,2920	0,8645	0,7190
Karlsruhe-Straße	0,6135	0,6469	0,4340
Mannheim-Straße	0,4332	0,7082	0,6114
Stuttgart-Mitte-Straße	0,9261	0,5882	0,2880
Freiburg-Mitte	0,1966	0,8541	0,7281
Karlsruhe-Nordwest	0,1781	0,8837	0,6734
Mannheim-Nord	0,1367	0,9544	0,6944
Stuttgart-Bad Cannstatt	0,2293	0,8212	0,7061
Kehl-Hafen	0,2147	0,7985	0,7546
Ludwigsburg	0,2588	0,7780	0,6212
Weil am Rhein	0,2074	0,7908	0,7502
Schwarzwald-Süd	0,1228	0,8539	0,4083

ber) und Winter (November bis April) sowie für das gesamte Jahr an ausgewählten Luftmessstationen im Zeitraum zwischen 28.07.1997 bis 31.05.2008 graphisch aufgezeigt.

Der jährliche mittlere Anteil von Ruß an der PM10-Fraktion liegt an der ländlichen Hintergrundstation bei 10 %, an den städtischen Hintergrundstationen zwischen 12 % bis 14 %, und an den Verkehrsmessstationen zwischen 16 % und 23 %. In den Sommermonaten ist der mittlere Anteil von Ruß an der PM10-Fraktion vor allem an den Verkehrsmessstationen höher als in den Wintermonaten. An den Verkehrsmessstationen steigt der mittlere Anteil in den Sommermonaten im Vergleich zu den Wintermonaten um 2,6 % (Mannheim-Straße), 3,6 % (Karlsruhe-Straße), 3,8 % (Freiburg-Straße), und um 5,3 % (Stuttgart-Mitte-Straße) an.

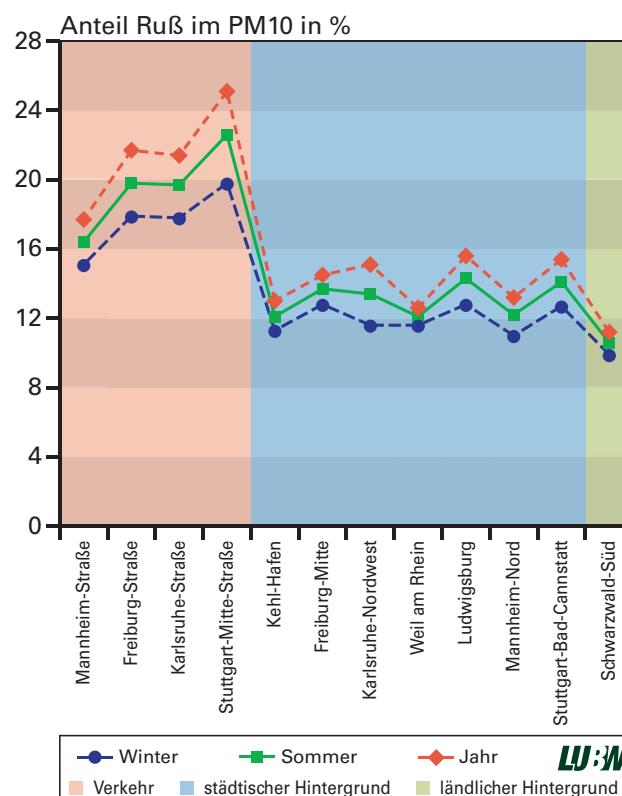


Abbildung 43: Mittlere Anteile (%) von Ruß an der PM10-Fraktion getrennt nach Sommer (Mai bis Oktober) und Winter (November bis April) sowie für das gesamte Jahr an ausgewählten Luftmessstationen im Luftmessnetz Baden-Württemberg im Zeitraum zwischen 28.7.1997 bis 31.5.2008 (Zeitpunkt des Messbeginns und Messendes variiert stationspezifisch)

5 Anhang

5.1 TABELLEN

5.1.1. UNTERSUCHUNGSUMFANG

Tabelle 7: Luftmessstationen im Luftmessnetz Baden-Württemberg, für die Tagesmittelwerte der Rußkonzentration für zwei Messperioden (Messperiode 1 und Messperiode 2) im Rahmen dieser Untersuchung zur Verfügung standen

Luftmessstation	Messperiode 1		Messperiode 2		Koordinaten (Hoch-, Rechtwert)
	Messbeginn	Messende	Messbeginn	Messende	
Karlsruhe-Mitte	02.01.1995	30.03.1999	01.10.2001	30.12.2004	5430520, 3457500
Karlsruhe-West	01.01.1995	30.03.1999	01.10.2001	07.07.2003	5430400, 3452800
Mannheim-Nord	01.01.1995	31.12.1999	02.10.2000	31.05.2008	5489825, 3461425
Mannheim-Mitte			01.10.2001	01.02.2004	5482225, 3462250
Mannheim-Süd	05.08.1995	30.03.1999	01.10.2001	30.12.2004	5477375, 3465660
Weinheim	02.01.1995	28.12.1998			5490725, 3475275
Heidelberg	01.01.1995	30.03.1999	01.10.2001	30.12.2004	5475900, 3476625
Wiesloch	02.01.1995	07.04.1999	01.10.2001	28.12.2004	5462670, 3478250
Stuttgart-Zuffenhausen	11.11.1995	30.03.1999	01.10.2001	30.12.2004	5409800, 3512740
Stuttgart-Bad Cannstatt	10.11.1995	31.12.1999	02.10.2000	31.05.2008	5407950, 3516950
Stuttgart-Hafen	06.09.1995	07.12.1999	02.10.2000	07.07.2003	5401670, 3519600
Heilbronn			01.10.2001	30.12.2004	5447615, 3516475
Neckarsulm	02.01.1995	30.03.1999			5451550, 3516725
Rastatt	02.01.1995	30.03.1999	01.10.2001	30.12.2003	5413010, 3443175
Kehl-Süd	01.01.1995	30.03.1999	01.10.2001	01.01.2005	5381150, 3413500
Kehl-Hafen	02.01.1995	30.03.1999	01.10.2001	29.05.2008	5382825, 3411700
Weil am Rhein	01.01.1995	30.03.1999	01.10.2001	31.05.2008	5273100, 3397275
Ludwigsburg	01.01.1995	30.03.1999	01.10.2001	31.12.2005	5418000, 3512750
Esslingen	02.01.1995	30.03.1999	01.10.2001	30.12.2003	5398925, 3524650
Plochingen	02.01.1995	30.03.1999	01.10.2001	30.12.2004	5396850, 3530600
Reutlingen	06.01.1995	30.03.1999	01.10.2001	28.02.2004	5372370, 3515400
Schwarzwald-Süd			02.10.2000	31.05.2008	5297430, 3407525
Pforzheim-Mitte	02.01.1995	30.03.1999	01.10.2001	01.01.2005	5417060, 3478450
Pforzheim-West	03.01.1995	07.04.1999			5417060, 3478450
Waiblingen	01.01.1995	30.03.1999	01.10.2001	30.12.2004	5410600, 3522175
Böblingen	19.11.1995	30.03.1999	01.10.2001	28.12.2004	5394840, 3501100
Tübingen-Botan. Garten	06.01.1995	30.03.1999	01.10.2001	21.01.2002	5376300, 3504400
Rheinfelden	02.01.1995	30.03.1999	01.10.2001	30.12.2003	5270125, 3408950
Bernhausen	01.01.1995	30.03.1999	01.10.2001	30.12.2004	5393425, 3516835
Biberach			02.10.2000	31.05.2008	5328325, 3559650
Schwäbisch Hall			02.10.2000	30.12.2004	5441375, 3553640
Ravensburg	06.03.1997	03.03.1998			5293375, 3545675
Karlsruhe-Straße	02.01.1995	28.12.1998	01.10.2001	30.05.2008	5430250, 3455225
Karlsruhe-Nordwest	01.01.1995	31.12.1999	02.10.2000	29.05.2008	5432580, 3452950
Freiburg-Mitte	01.01.1995	30.03.1999	01.10.2001	29.05.2008	5318815, 3412900
Ulm-Straßenstation	08.09.1996	28.12.1998	01.10.2001	01.07.2003	5362150, 3572665
Freiburg-Straße	02.01.1995	28.12.1998	01.10.2001	31.01.2007	5318435, 3414460
Mannheim-Straße	02.01.1995	28.12.1998	01.10.2001	31.05.2008	5484100, 3461750
Stuttgart-Vaihingen					
Straßenstation	02.01.1995	28.12.1998			5399176, 3508410
Holzhausen-BAB			01.10.2001	01.01.2002	5326235, 3411425
Kenzingen-BAB			01.10.2001	05.01.2002	5340285, 3406900
Pfullendorf			01.09.2005	29.12.2005	5310445, 3517788
Offenburg			02.09.2005	01.01.2006	5371500, 3421538
Stuttgart-Mitte-Straße	04.01.1995	31.12.1999	02.10.2000	31.05.2008	5405160, 3513250
Wilhelmsfeld (Odenwald)			01.01.2002	30.09.2008	5480910, 3482230
Leonberg-Straßenstation			01.10.2001	01.01.2005	5405275, 3501050
Schwäb. Alb-Erpfingen	01.07.1998	19.04.1999			5356415, 3515475

5.1.2 STANDORTE IN BADEN-WÜRTTEMBERG MIT TEMPORÄREN MESSUNGEN

Tabelle 8: Standorte in Baden-Württemberg mit temporären Messungen (in unterschiedlichen Zeiträumen) der täglichen Rußkonzentration

Messpunkt	Messperiode 1		Mittelwert Rußkonzentration (µg/m ³)
	Messbeginn	Messende	
Adelsheim - Marktstraße	11.09.2002	22.09.2003	2,8
Bad Friedrichshall - Uhlandstraße	10.01.2003	02.01.2004	4,8
Bad Mergentheim - Wachbacher Straße	11.09.2002	23.09.2003	4,1
Baden-Baden - Lichtentaler Straße	07.02.2003	18.02.2004	3,8
Baden-Baden - Stefaniestraße	07.02.2003	18.02.2004	3,7
Blaufelden - Hauptstraße (B290)	12.09.2002	23.09.2003	4,7
Crailsheim - Schillerstraße	12.09.2002	23.09.2003	3,9
Crailsheim - Wilhelmstraße	12.09.2002	23.09.2003	4,5
Eislingen - Ulmer Straße	09.01.2003	08.01.2004	10,1
Ellwangen - Halterstraße	09.01.2003	08.01.2004	6,1
Elztal-Neckarburken - Mosbacher Straße (B27)	11.09.2002	22.09.2003	5,0
Freiburg-Ebnet - Schwarzwaldstraße	09.12.2002	16.12.2003	2,5
Freiburg-Oberau - Schwarzwaldstraße	07.01.2003	29.12.2003	9,1
Gaildorf - Bahnhofstraße	09.01.2003	08.01.2004	5,8
Hardheim - Walldürner Straße	11.09.2002	22.09.2003	4,5
Heidelberg - Karlsruher Straße	08.01.2003	30.12.2003	4,4
Heilbronn - Paulinenstraße	12.12.2002	29.12.2003	5,4
Heilbronn - Am Wollhaus	12.12.2002	29.12.2002	4,2
Karlsruhe - B10 - Südtangente	09.12.2002	19.12.2003	9,0
Königshofen - Hauptstraße (B290)	11.09.2002	22.09.2003	4,8
Künzelsau - Stuttgarter Straße	18.10.2002	20.10.2003	3,2
Lauffen am Neckar - Hohe Straße (B27)	10.01.2003	02.01.2004	5,8
Lauffen am Neckar - Stuttgarter Straße	18.11.2002	18.11.2003	3,5
Leonberg - Grabenstraße	10.12.2002	29.12.2003	7,4
Ludwigsburg - Friedrichstraße (West)	10.01.2003	02.01.2004	7,8
Mühlacker - Stuttgarter Straße	08.01.2003	07.01.2004	7,0
Nagold - Marktstraße	12.02.2003	11.02.2004	3,6
Neckarsulm - Friedrich-Ebert-Straße	12.12.2002	02.01.2004	3,6
Offenau - Hauptstraße (B27)	10.01.2003	02.01.2004	7,8
Öhringen - Schillerstraße	10.01.2003	09.01.2004	5,5
Ostfildern Ruit - Kirchheimer Straße	11.12.2002	17.12.2003	4,1
Pfintzal-Berghausen - B10	17.04.2003	16.04.2004	5,5
Pforzheim - Zerrenner Straße	08.01.2003	02.01.2004	4,7
Pforzheim - Jahnstraße	12.02.2003	17.02.2004	5,9
Reutlingen - Karlstraße	09.12.2002	17.12.2003	6,9
Schwäbisch Hall - Johanniterstraße	09.01.2003	30.12.2003	5,6
Stuttgart - Neckartor	09.01.2003	29.12.2003	10,8
Stuttgart - Hohenheimer Straße	09.01.2003	29.12.2003	10,4
Stuttgart - Paulinenstraße	09.01.2003	29.12.2003	5,9
Stuttgart - Siemensstraße	09.01.2003	29.12.2003	9,2
Tauberbischofsheim - Würzburger Straße	14.11.2002	18.11.2003	3,8
Umkirch - Hauptstraße	07.01.2003	09.01.2004	5,2
Untereisesheim - Hauptstraße	14.11.2002	18.11.2003	3,3
Unterjesingen - Hauptstraße	10.01.2003	09.01.2004	8,4
Untermünkheim - Hohenloher Straße	09.01.2003	09.01.2004	4,7
Weinsberg - Nelkenweg	17.10.2002	21.10.2003	3,2
Weinsberg - Weißenhofstraße	10.09.2002	23.09.2003	2,7
Wertheim - Rechte Tauberstraße	11.09.2002	22.09.2003	3,6

Tabelle 9: Charakteristika der Spot-Messungen der täglichen Rußkonzentration im Jahr 2004

Messort	Mittelwert Rußkonzentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Anzahl Tagesmittelwerte Rußkonzentration
Stuttgart - Hohenheimer Straße	8,3	2,8
Stuttgart - Siemensstraße	8,6	4,8
Stuttgart - Waiblinger Straße	6,7	4,1
Stuttgart - Am Neckartor	12,4	3,8
Ludwigsburg - Friedrichstraße	8,1	3,7
Ludwigsburg - Frankfurter Straße	4,8	4,7
Ilfeld	5,1	3,9
Tübingen - Mühlstraße	4,7	4,5
Pleidelsheim	7,3	10,1
Schwäbisch Gmünd	8,7	6,1

Tabelle 11: Charakteristika der Spot-Messungen der täglichen Rußkonzentration im Jahr 2006

Messort	Mittelwert Rußkonzentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Anzahl Tagesmittelwerte Rußkonzentration
Mannheim - Strasse	4,9	190
Mühlacker	7,1	179
Stuttgart - Neckartor	13,1	357
Tübingen - Mühlstrasse	6,4	183
Ulm - Zinglerstrasse	6,6	180
Unterjesingen	8,1	182
Berghausen	7,3	177
Freiburg - Strasse	5,0	184
Heidelberg	4,5	183
Herrenberg	7,0	181
Karlsruhe - Straße	5,5	179
Pforzheim - Zerrennerstraße	5,3	172
Stuttgart - Strasse	6,8	180
Stuttgart - Waiblingerstrasse	7,4	176

Tabelle 10: Charakteristika der Spot-Messungen der täglichen Rußkonzentration im Jahr 2005

Messort	Mittelwert Rußkonzentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Anzahl Tagesmittelwerte Rußkonzentration
Pleidelsheim	8,1	361
Ludwigsburg - Friedrichstraße West	8,8	361
Leonberg - Grabenstraße	5,1	339
Stuttgart - Siemensstraße	9,1	339
Stuttgart - Neckartorstraße 25	12,4	205
VMS 25	15,8	123
Stuttgart - Neckartorstraße	12,9	229
VMS	16,9	123
Stuttgart - Hohenheimer Straße	9,5	347
Stuttgart - Hohenheimer Straße 25	8,8	360
Stuttgart - Hohenheimer Straße 9	3,8	352
Schwäbisch Gmünd - Lorcher Straße	9,6	359
Mannheim - Luisenring	5,3	362
Mannheim - Seckenheim	4,0	360
Freiburg Oberau	8,4	362
Reutlingen Feuerwehr	5,4	339

Tabelle 12: Charakteristika der Spot-Messungen der täglichen Rußkonzentration im Jahr 2007

Messort	Mittelwert Rußkonzentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Anzahl Tagesmittelwerte Rußkonzentration
Berghausen - Karlsruher Straße	5,8	122
Freiburg - Zähringer Straße	4,3	121
Heidelberg - Karlsruhe Straße	3,7	121
Heidenheim - Wilhelmstraße	6,3	121
Heilbronn - Weisberger Straße	6,2	119
Herrenberg - Hindenburgstraße	5,5	122
Ilfeld-König - Wilhelm Straße	5,0	121
Jöhlingen	7,6	126
Karlsruhe - Krieg Straße	3,7	121
Leonberg - Grabenstraße	6,2	121
Ludwigsburg - Friedrichstraße-West	6,8	121
Markgröningen	5,6	121
Mühlacker - Stuttgarter Straße	6,0	121
Pforzheim - John Straße	4,9	118
Pleidelsheim - Beihingerstraße	5,6	120
Reutlingen - Lederstraße Ost	7,3	94
Schramberg	5,2	119
SBC - Waiblinger Straße	6,1	120
Stuttgart - Siemensstraße	7,4	120
Stuttgart - Hohenheimerstraße	7,5	121
Tübingen - Mühlstraße	5,0	122
Ulm - Zinglerstraße	5,1	112
Unterjesingen - Hauptstraße	5,9	108
Wiesloch - Baiertalerstraße	7,1	119
VMS	10,1	363
VMS 25	9,2	364
Mannheim - Straße	4,1	179
Stuttgart - Mitte - Straße	5,5	181
Freiburg - Schwarzwaldstraße 41	7,0	176
Karlsruhe - Straße	4,5	182

5.2 ABBILDUNGEN

5.2.1 TAGESMITTELWERTE DER RUSSKONZENTRATIONEN

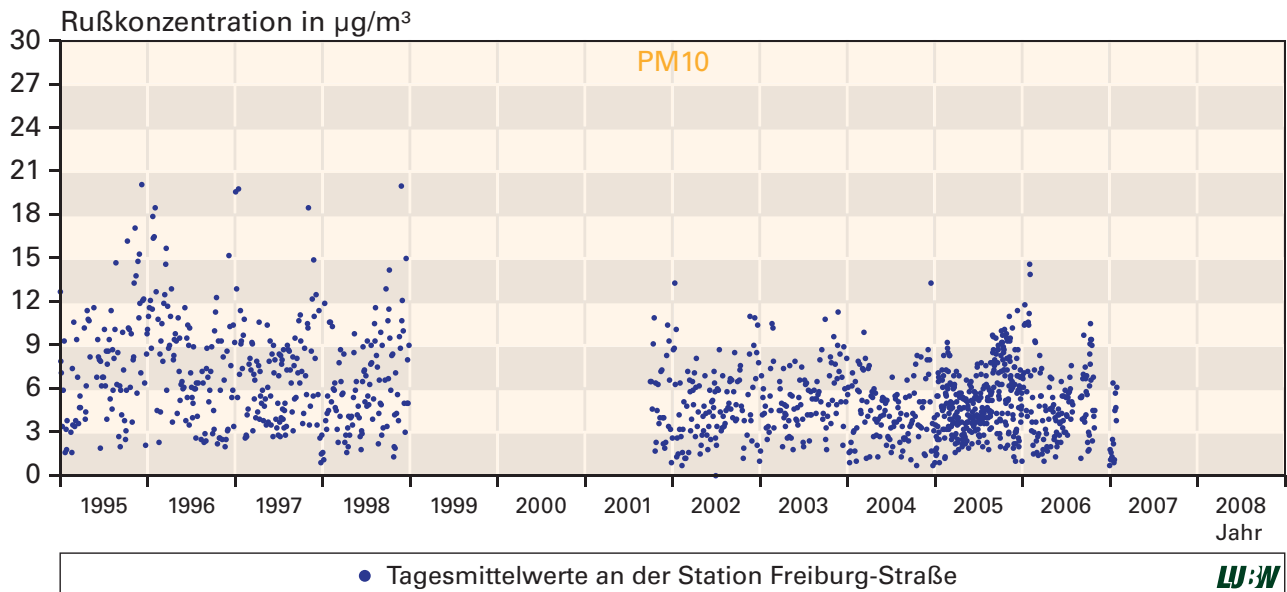


Abbildung 44: Freiburg-Strasse im Zeitraum: 2.1.1995-31.1.2007

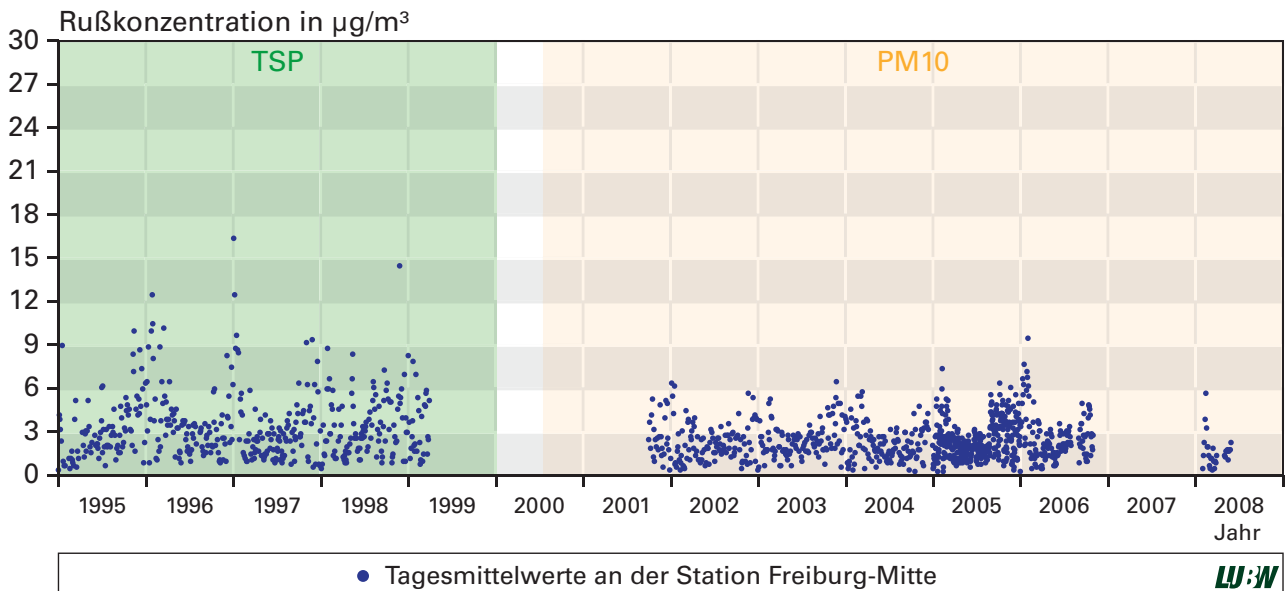


Abbildung 45: Freiburg-Mitte im Zeitraum: 1.1.1995-30.03.1999 (TSP, Grün hinterlegt); 1.10.2001-29.05.2008 (PM10, Orange hinterlegt)

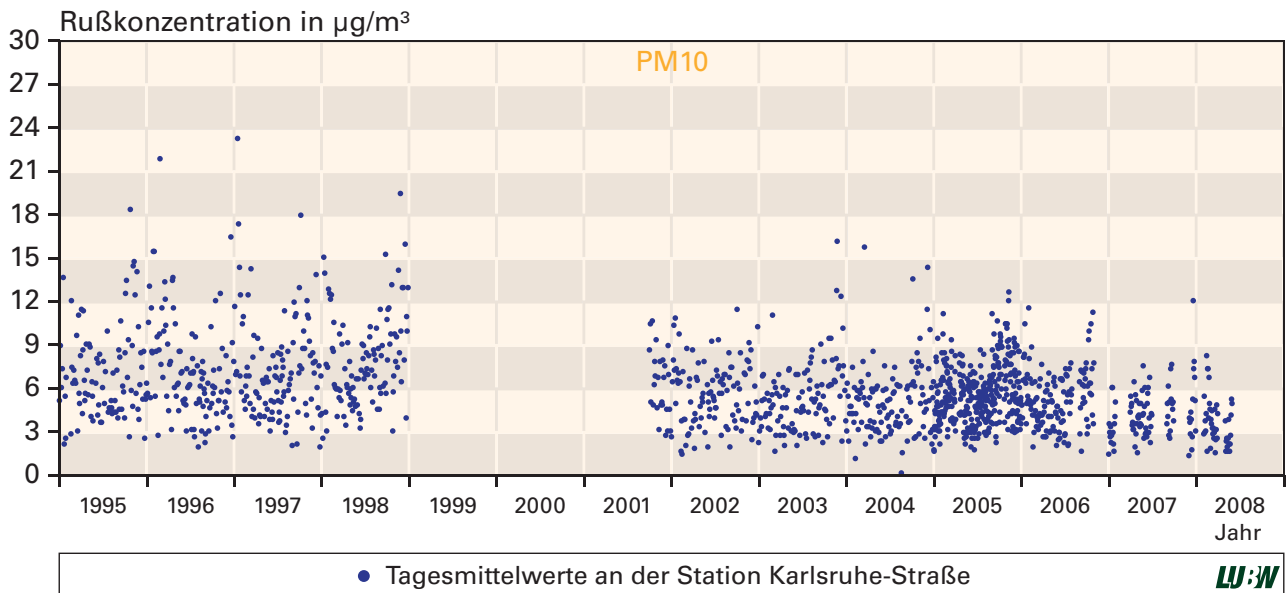


Abbildung 46: Karlsruhe-Straße im Zeitraum: 2.1.1995-30.5.2008

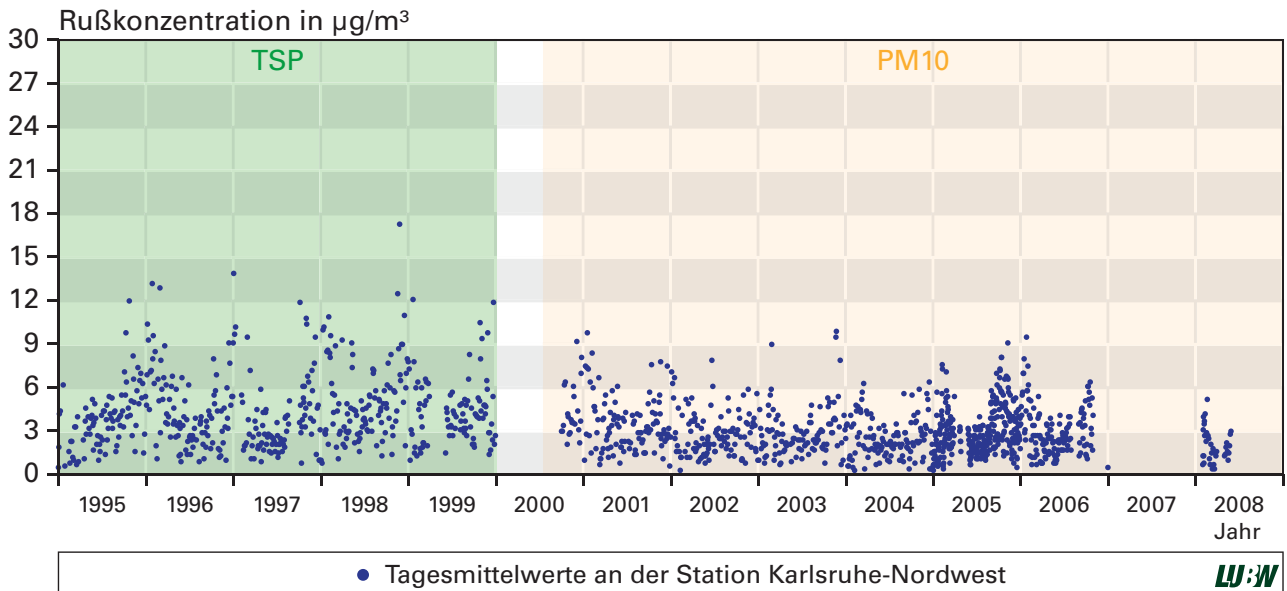


Abbildung 47: Karlsruhe-Nordwest im Zeitraum: 1.1.1995-31.12.1999 (TSP, Grün hinterlegt); 2.10.2001-29.5.2008 (PM10, Orange hinterlegt)

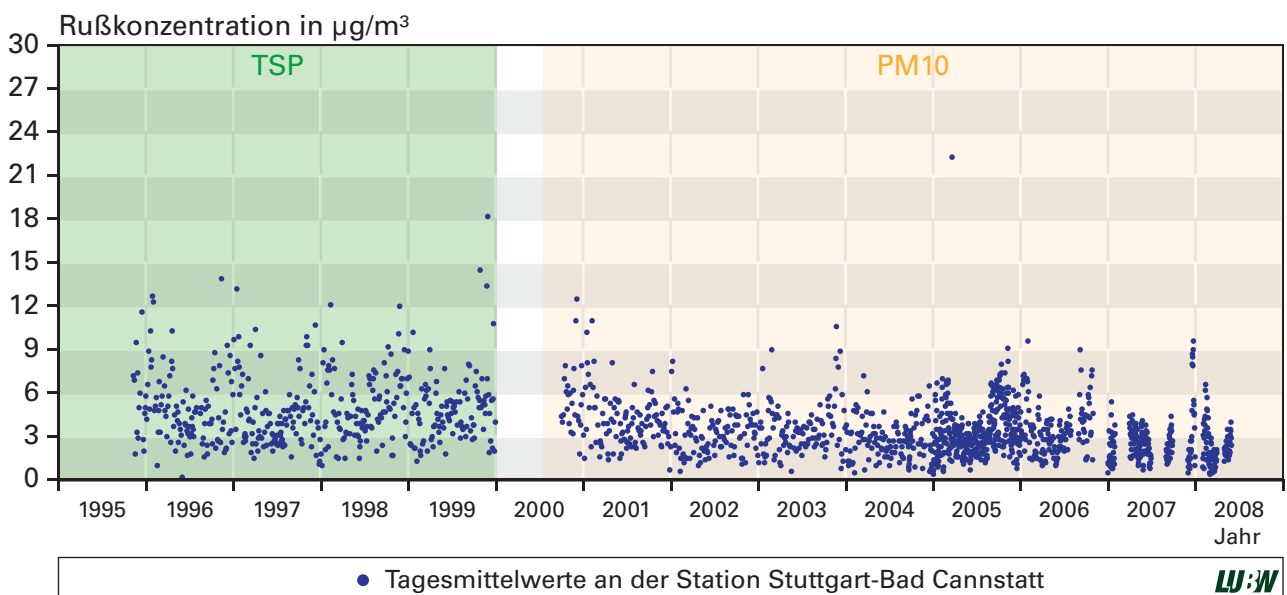


Abbildung 48: Stuttgart-Bad Cannstatt im Zeitraum: 10.11.1995-31.12.1999 (TSP, Grün hinterlegt); 2.10.2000-31.5.2008 (PM10, Orange hinterlegt)

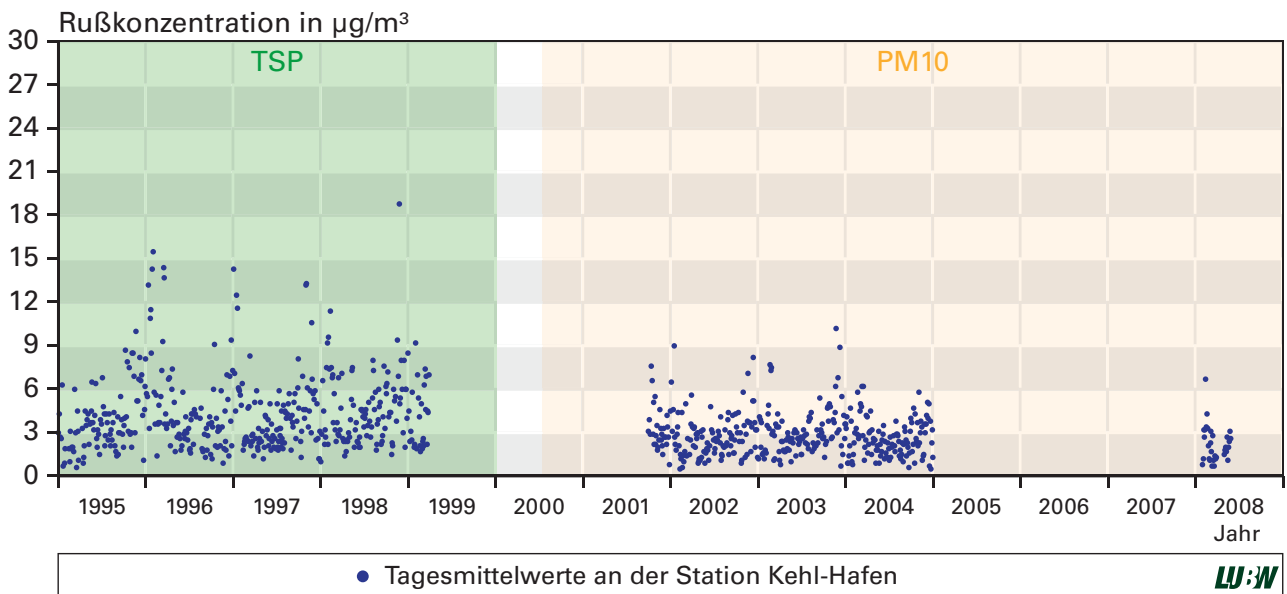


Abbildung 49: Kehl-Hafen im Zeitraum: 2.1.1995-31.12.1999 (TSP, Grün hinterlegt); 1.10.2000-29.5.2008 (PM10, Orange hinterlegt)

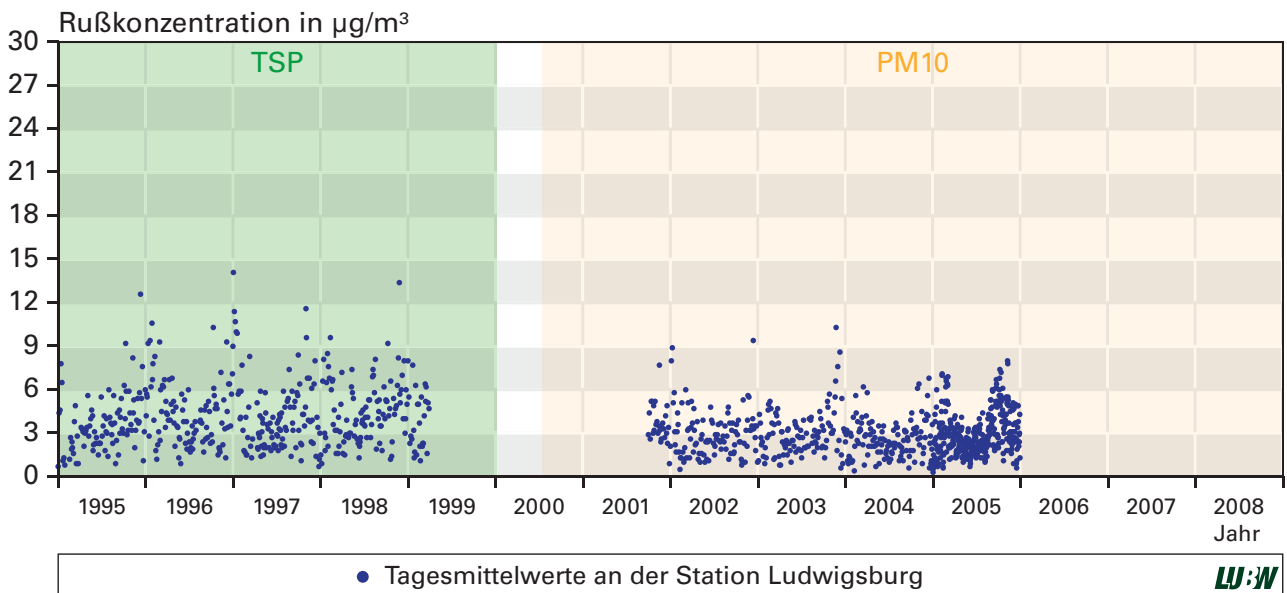


Abbildung 50: Ludwigsburg im Zeitraum: 1.1.1995-30.3.1999 (TSP, Grün hinterlegt); 1.10.2001-31.5.2005 (PM10, Orange hinterlegt)

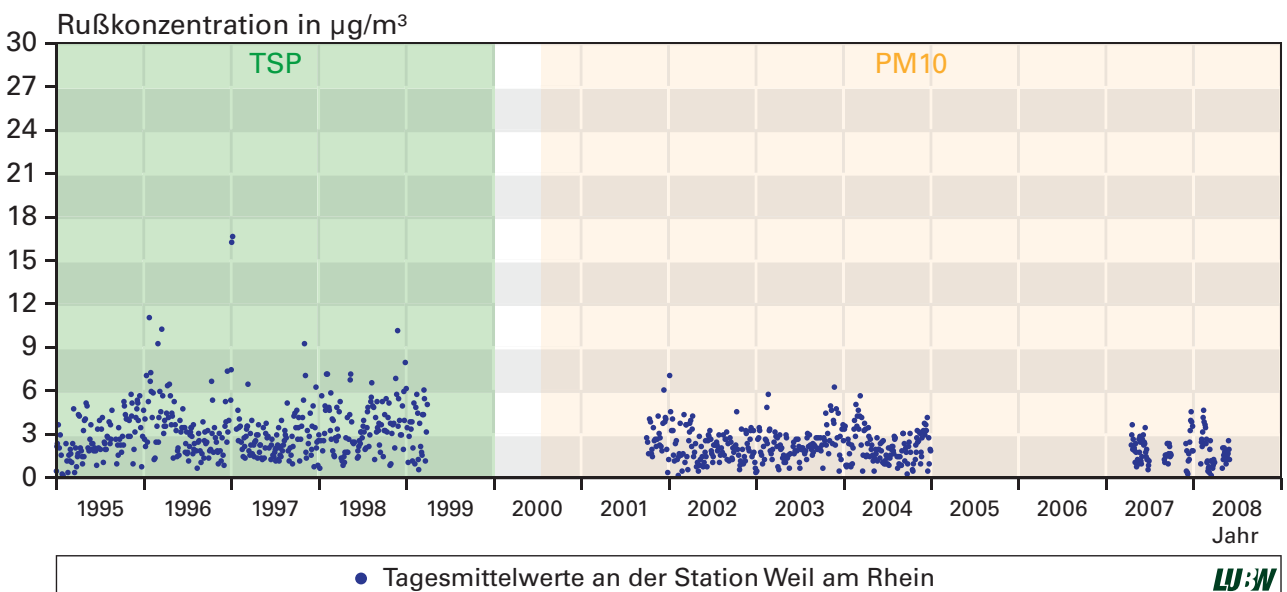


Abbildung 51: Weil am Rhein im Zeitraum: 1.1.1995-30.3.1999 (TSP, Grün hinterlegt); 1.10.2001-31.5.2008 (PM10, Orange hinterlegt)

5.2.2 TAGESMITTELWERTE DER RUSSKONZENTRATION IN ABHÄNGIGKEIT VON TAGESMITTELWERTEN DER BODENNAHEN LUFTTEMPERATUR

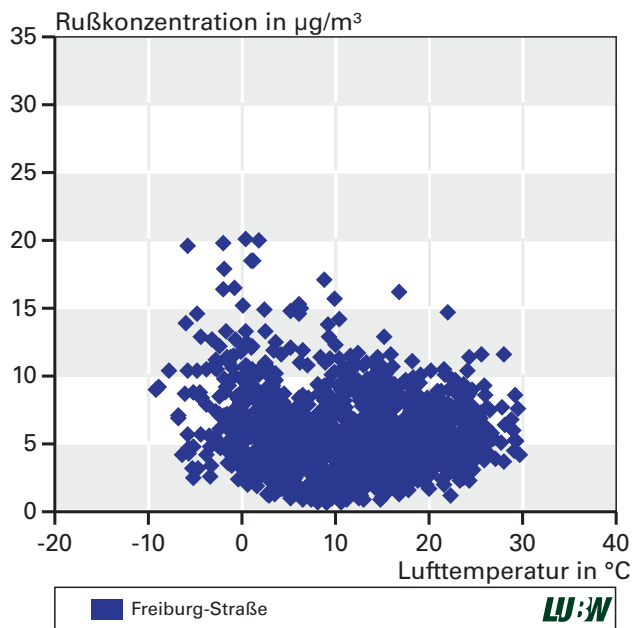


Abbildung 52: Freiburg-Straße im Zeitraum: 2.1.1995-31.1.2007

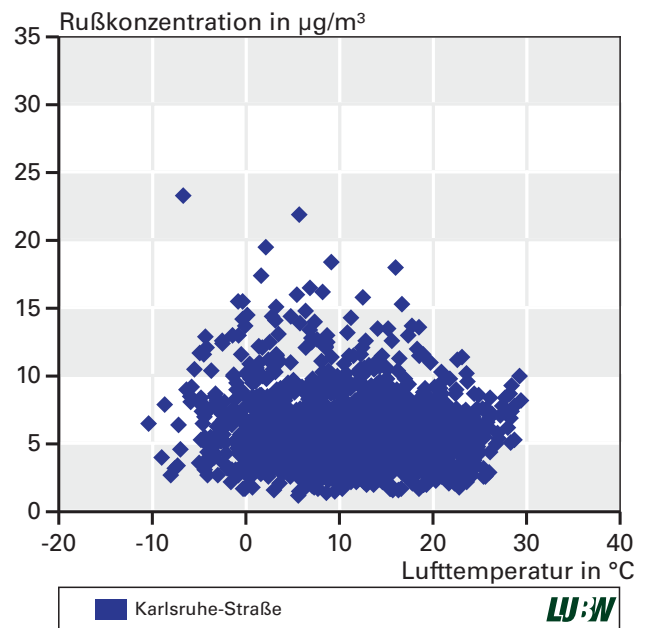


Abbildung 54: Karlsruhe-Straße im Zeitraum: 2.1.1995-30.5.2008

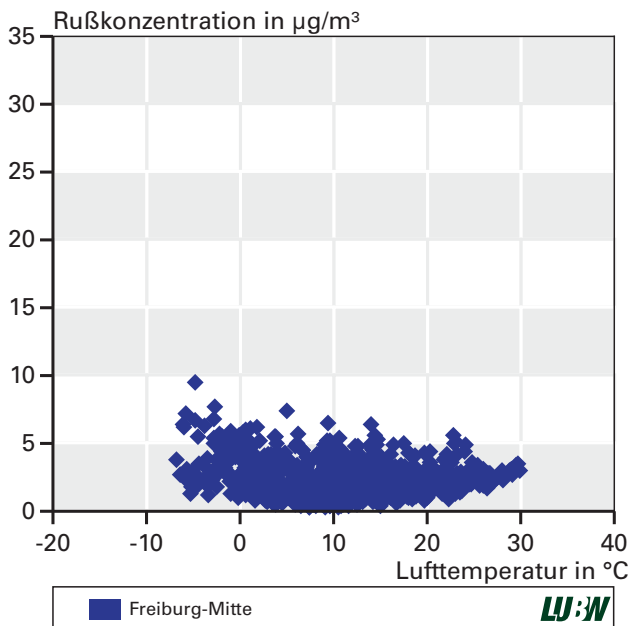


Abbildung 53: Freiburg-Mitte im Zeitraum: 1.10.2000-29.5.2008

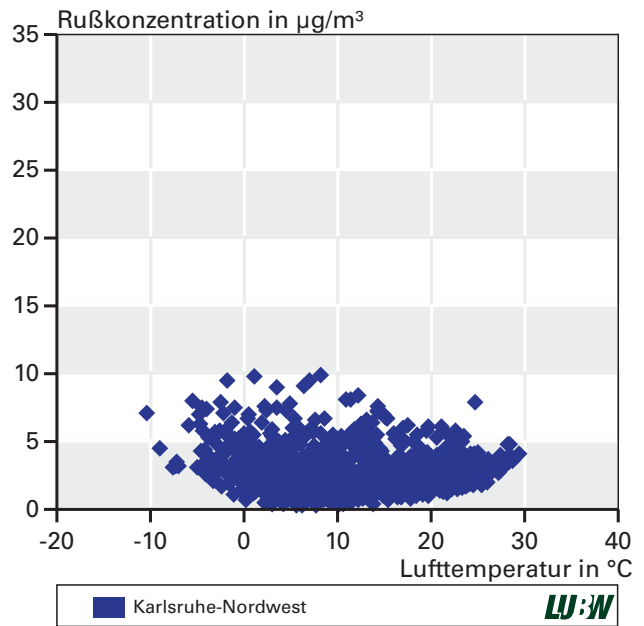


Abbildung 55: Karlsruhe-Nordwest im Zeitraum: 1.10.2000-29.5.2008

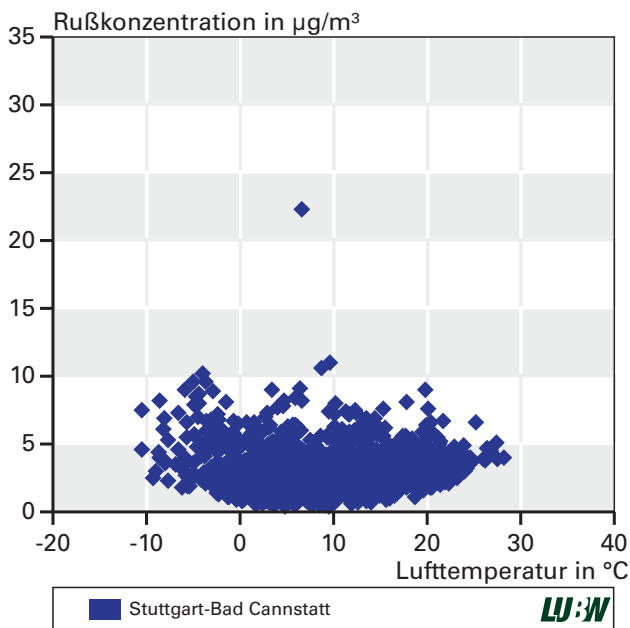


Abbildung 56: Stuttgart-Bad Cannstatt
im Zeitraum: 2.10.2000-31.5.2008

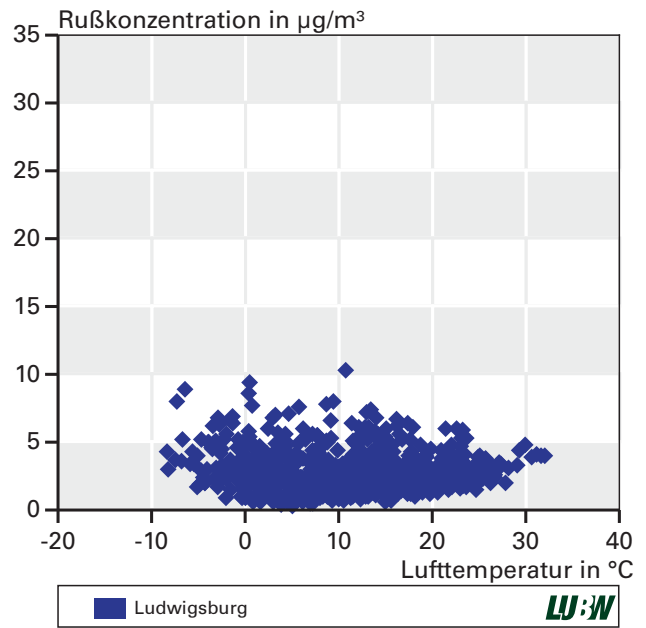


Abbildung 58: Ludwigsburg
im Zeitraum: 1.10.2001-31.12.2005

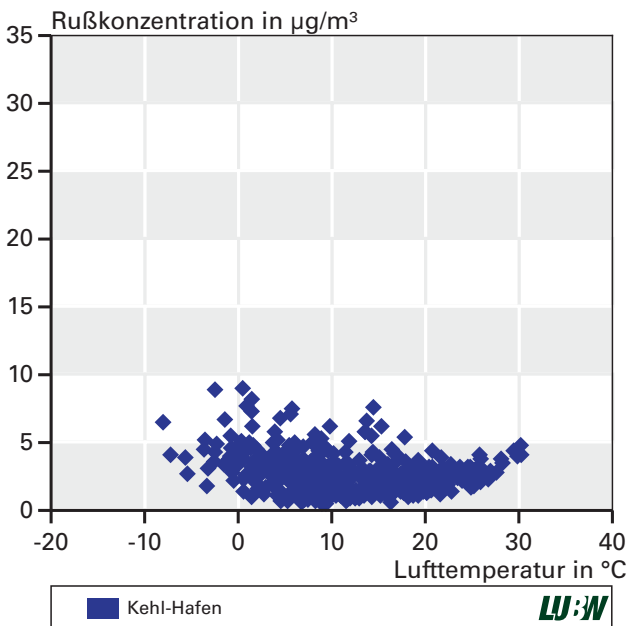


Abbildung 57: Kehl-Hafen
im Zeitraum: 1.10.2001-29.5.2008

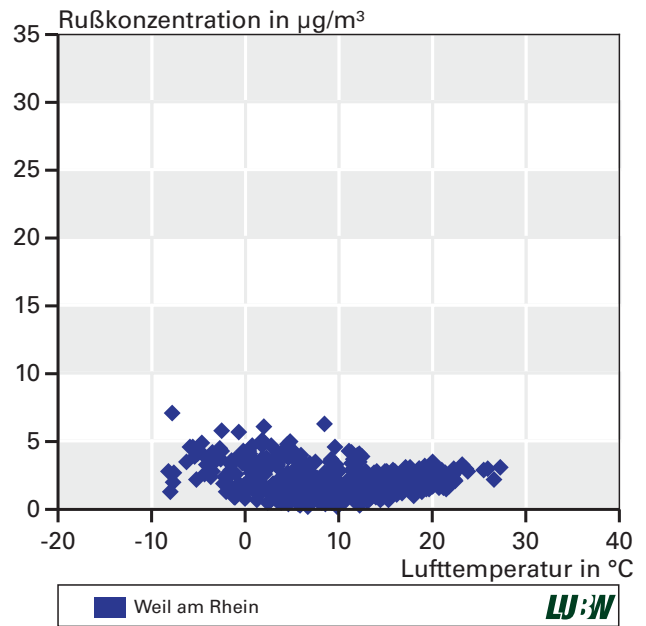


Abbildung 59: Weil am Rhein
im Zeitraum: 1.10.2001-31.5.2008

5.2.3 TAGESMITTELWERTE DER RUSSKONZENTRATION IN ABHÄNGIGKEIT VON TAGESSUMMEN DES NIEDERSCHLAGS

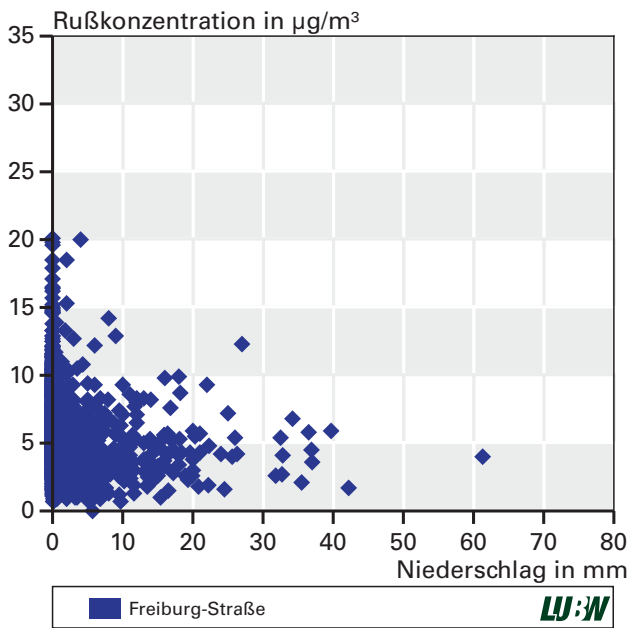


Abbildung 60: Freiburg-Straße im Zeitraum: 2.1.1995-31.1.2007

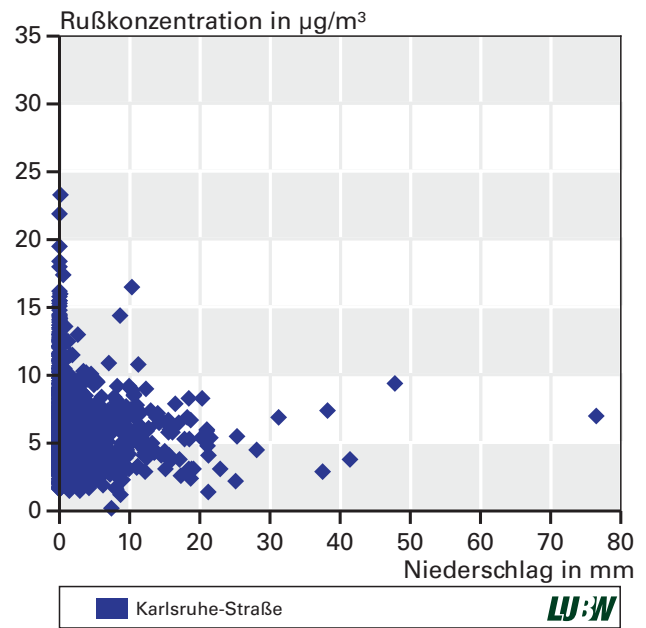


Abbildung 62: Karlsruhe-Straße im Zeitraum: 2.1.1995-30.5.2008

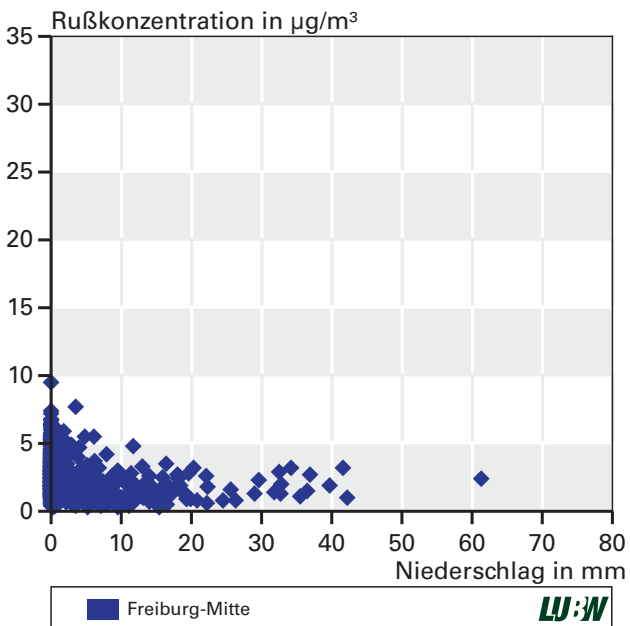


Abbildung 61: Freiburg-Mitte im Zeitraum: 1.10.2000-29.5.2008

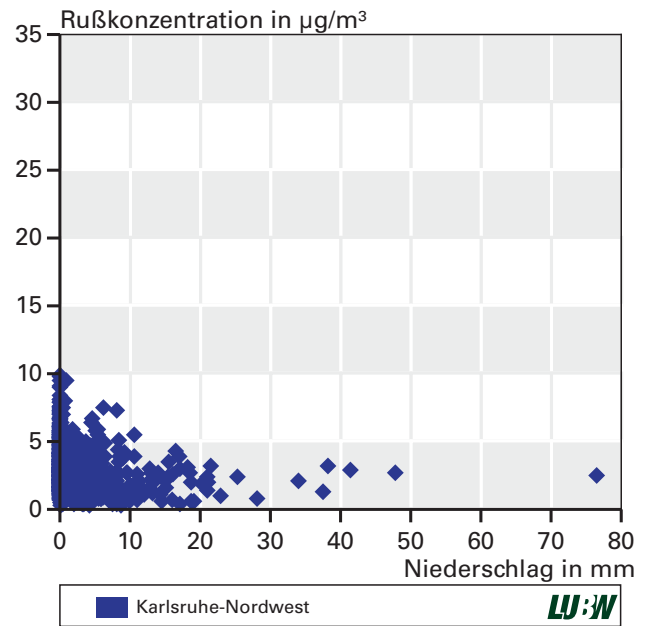


Abbildung 63: Karlsruhe-Nordwest im Zeitraum: 2.10.2001-29.5.2008

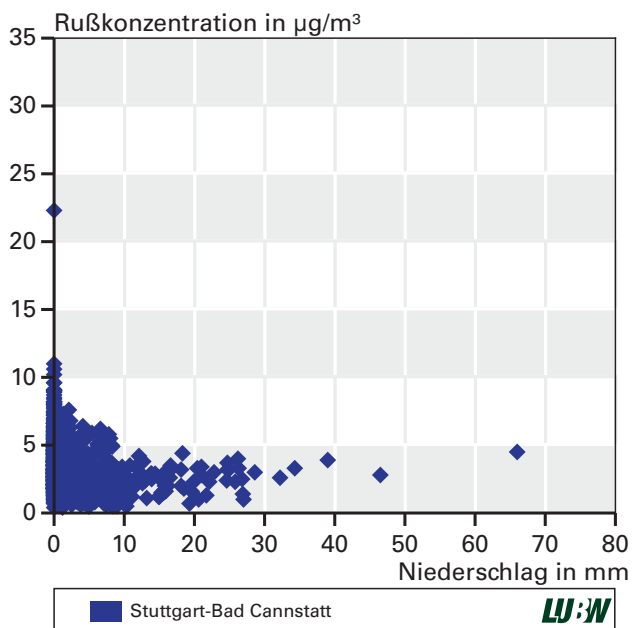


Abbildung 64: Stuttgart-Bad Cannstatt
im Zeitraum: 2.10.2000-31.5.2008

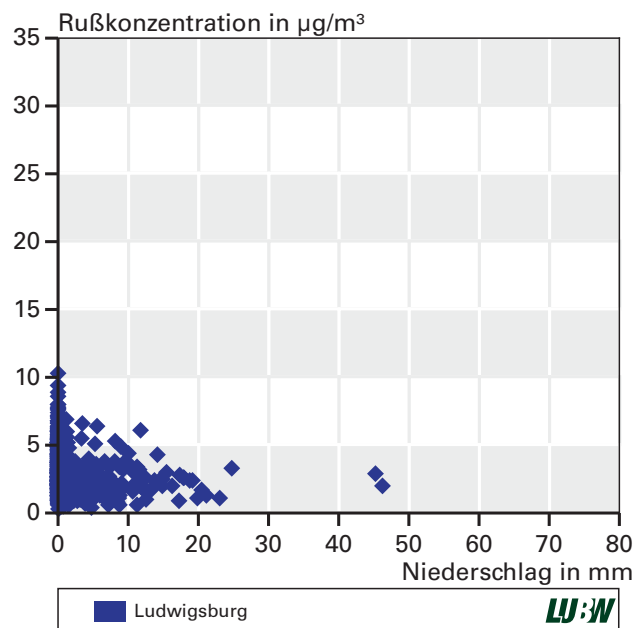


Abbildung 66: Ludwigsburg
im Zeitraum: 1.10.2001-31.12.2005

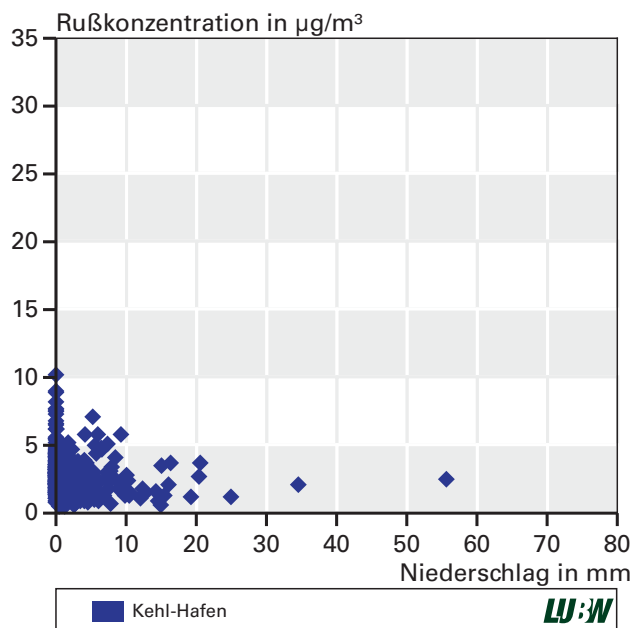


Abbildung 65: Kehl-Hafen
im Zeitraum: 1.10.2001-29.5.2008

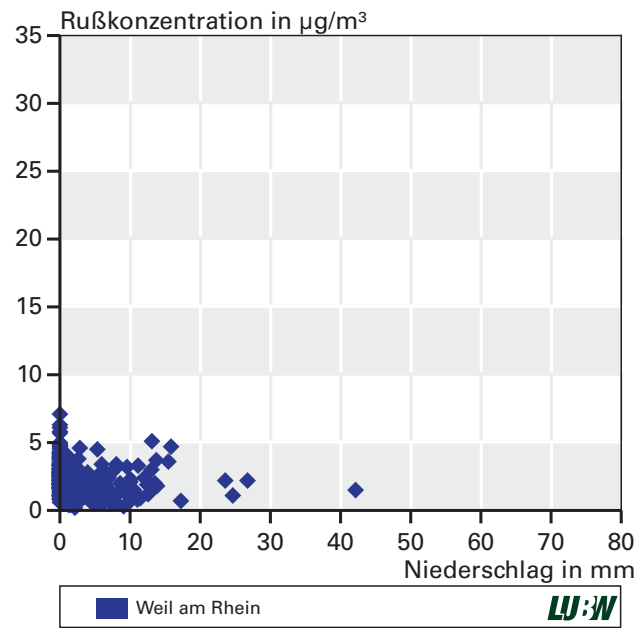


Abbildung 67: Weil am Rhein
im Zeitraum: 1.10.2001-31.5.2008

5.2.4 TAGESMITTELWERTE SOWIE 95%-KONFIDENZINTERVALL DER RUßKONZENTRATION FÜR DIE MESSTAGE -1 BIS 1 IM JAHR 2005

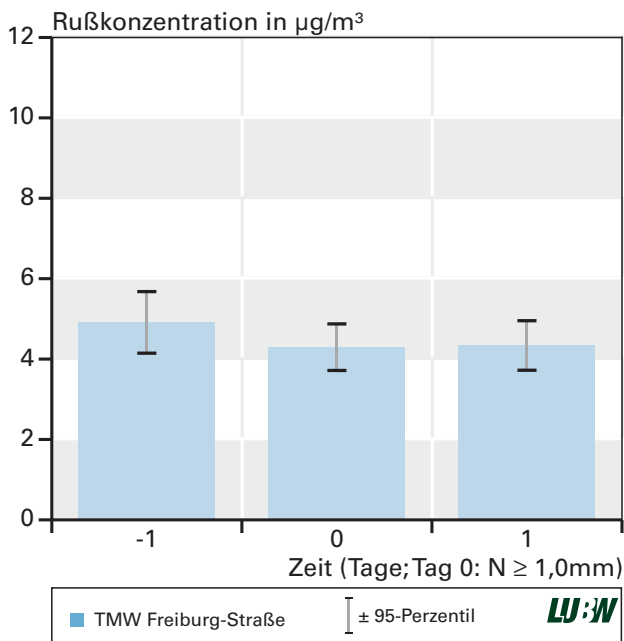


Abbildung 68: Freiburg-Strasse
Anzahl der Perioden:21

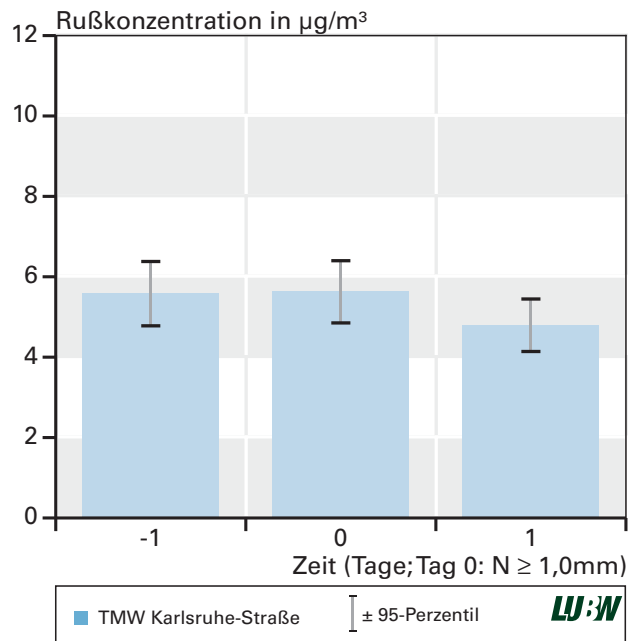


Abbildung 70: Karlsruhe-Strasse
Anzahl der Perioden:35

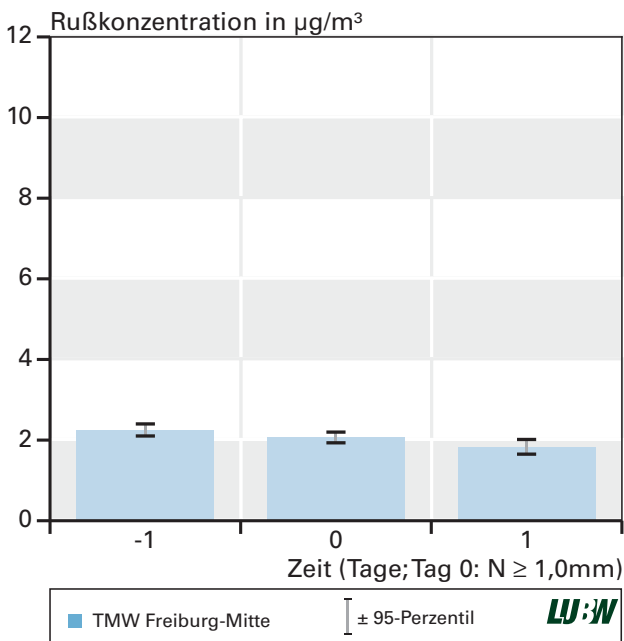


Abbildung 69: Freiburg-Mitte
Anzahl der Perioden:20

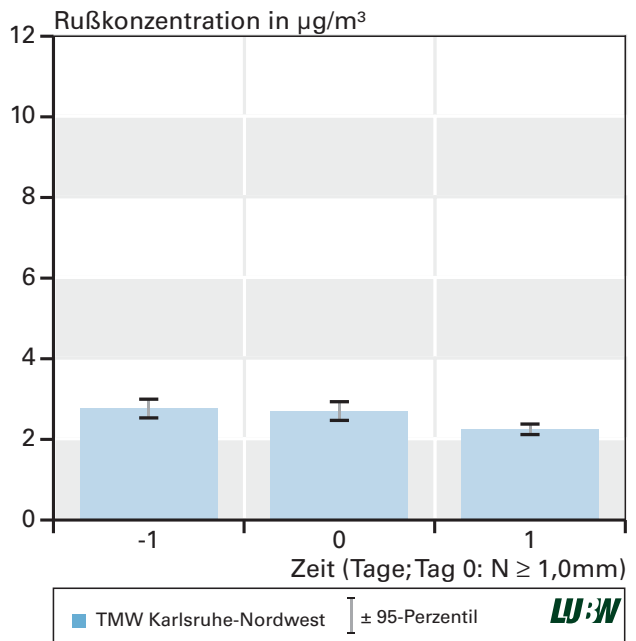


Abbildung 71: Karlsruhe-Nordwest
Anzahl der Perioden:33

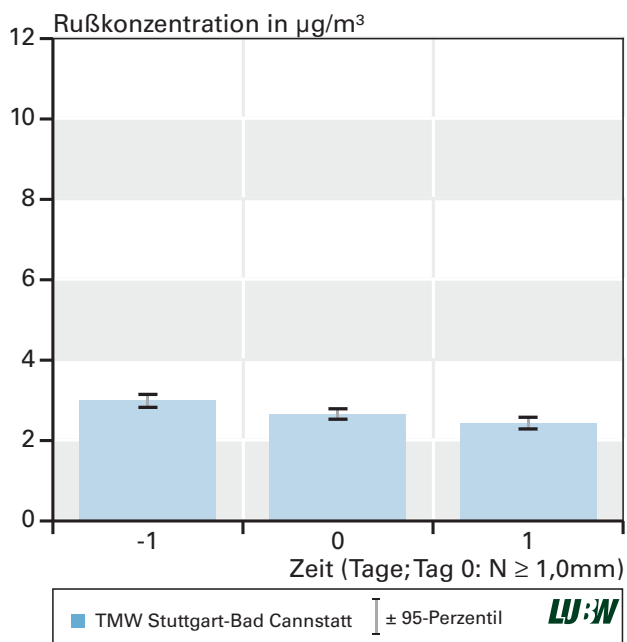


Abbildung 72: Stuttgart-Bad Cannstatt
Anzahl der Perioden:59

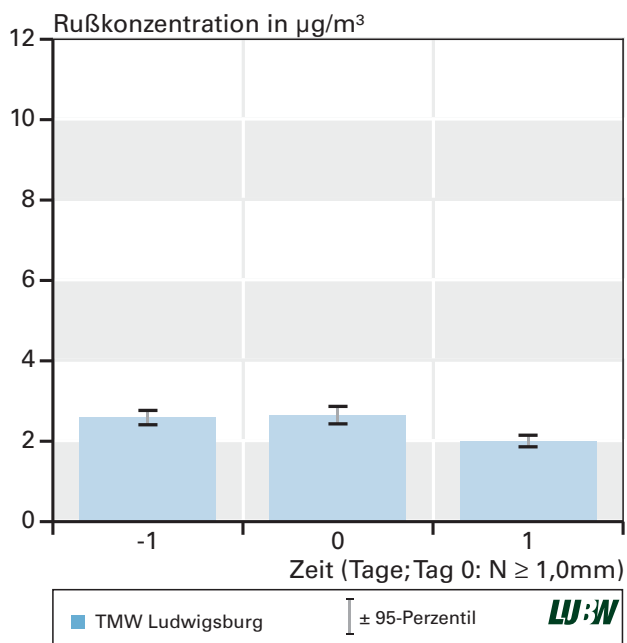


Abbildung 73: Ludwigsburg,
Anzahl der Perioden:27

5.2.5 TAGESMITTELWERTE DER RUSSKONZENTRATION IN ABHÄNGIGKEIT VON TAGESMITTELWERTEN DER BODENNAHEN WINDGESCHWINDIGKEIT

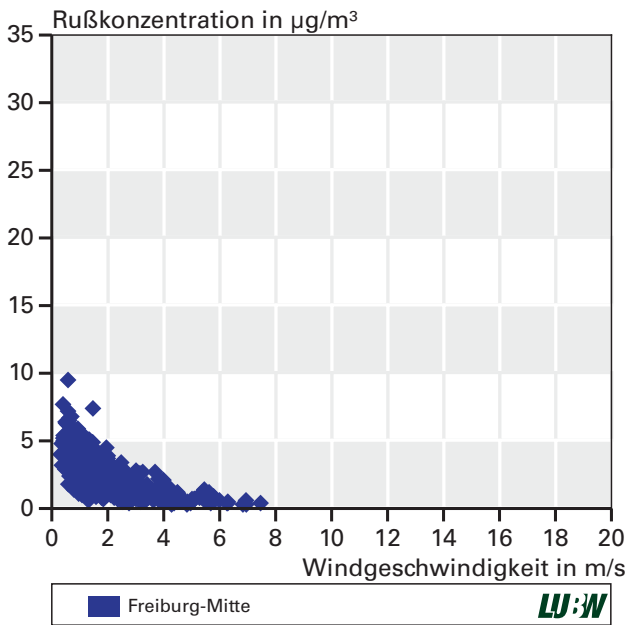


Abbildung 74: Freiburg-Mitte
im Zeitraum: 1.10.2001-29.5.2008

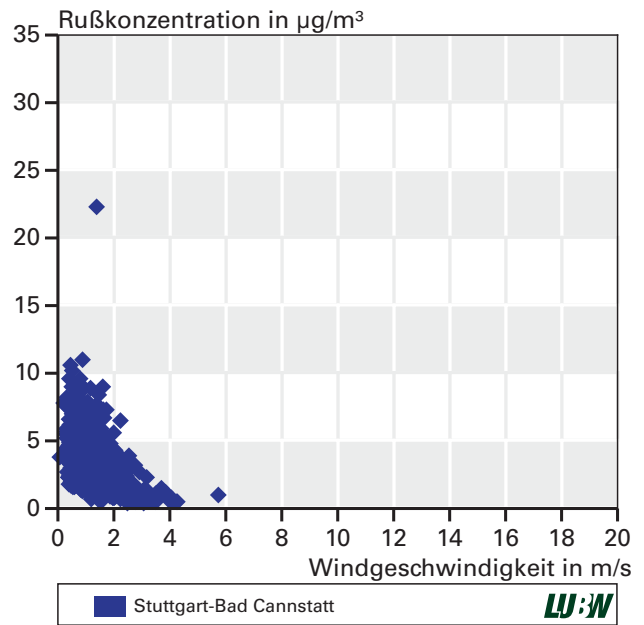


Abbildung 76: Stuttgart-Bad Cannstatt
im Zeitraum: 2.10.2000-31.5.2008

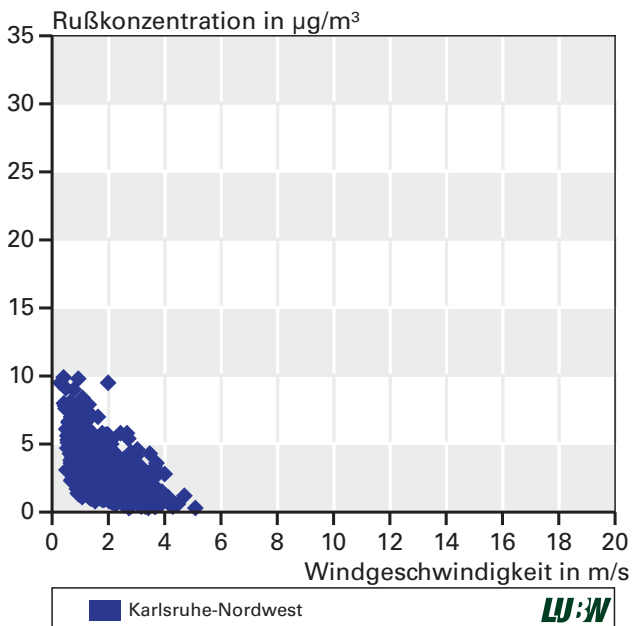


Abbildung 75: Karlsruhe-Nordwest
im Zeitraum: 2.10.2000-29.5.2008

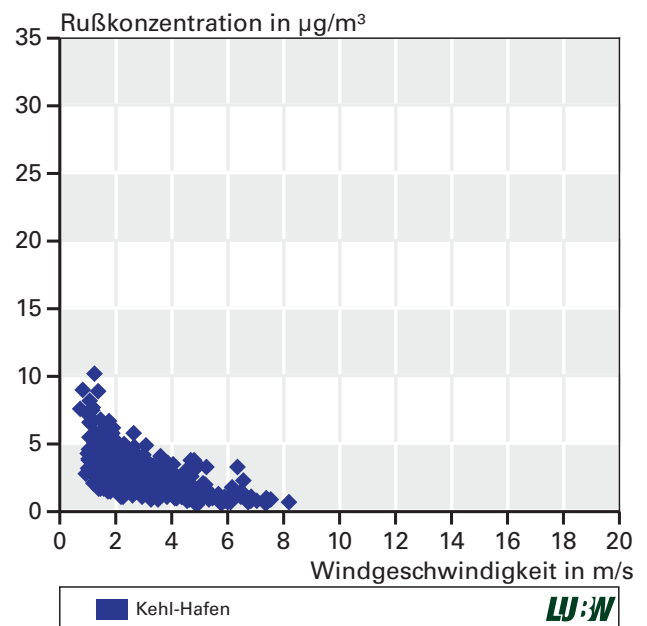


Abbildung 77: Kehl-Hafen
im Zeitraum: 1.10.2001-29.5.2008

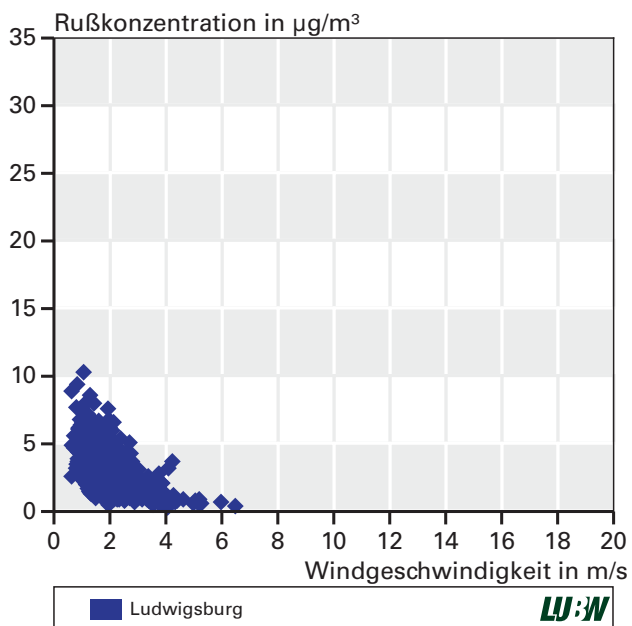


Abbildung 78: Ludwigsburg
im Zeitraum: 1.10.2001-31.12.2005

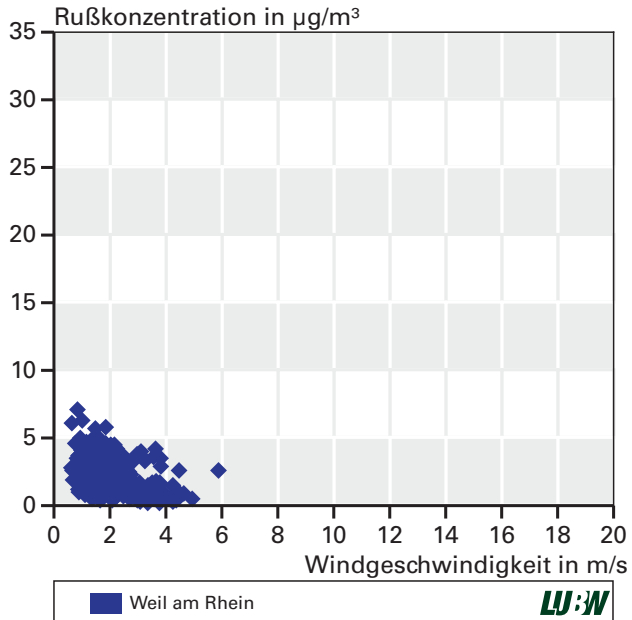


Abbildung 79: Weil am Rhein
im Zeitraum: 1.10.2001-31.5.2008

5.2.6 TAGESMITTELWERTE DER RUSSKONZENTRATION IN ABHÄNGIGKEIT VON DER FÜR 12:00 UHR MEZ BERECHETEN MISCHUNGSSCHICHTHÖHE

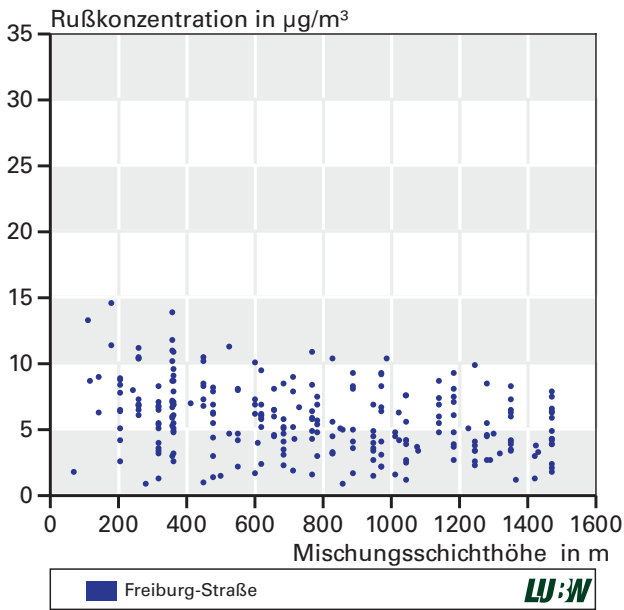


Abbildung 80: Freiburg-Strasse, Anzahl der Wertepaare: 456 im Zeitraum: 1.10.2001-31.3.2006

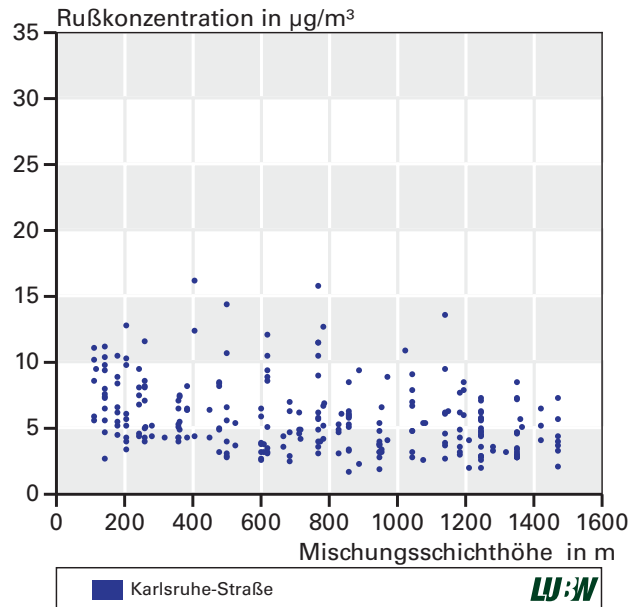


Abbildung 82: Karlsruhe-Strasse, Anzahl der Wertepaare: 470 im Zeitraum: 1.10.2001-31.3.2006

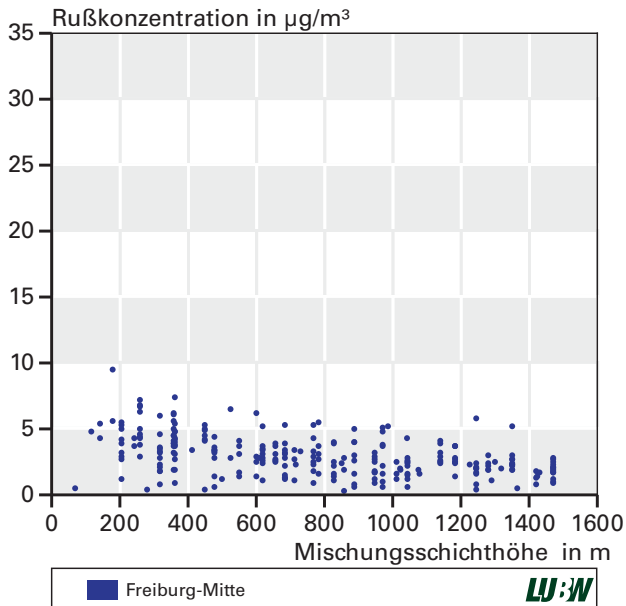


Abbildung 81: Freiburg-Mitte, Anzahl der Wertepaare: 513 im Zeitraum: 1.10.2001-31.3.2006

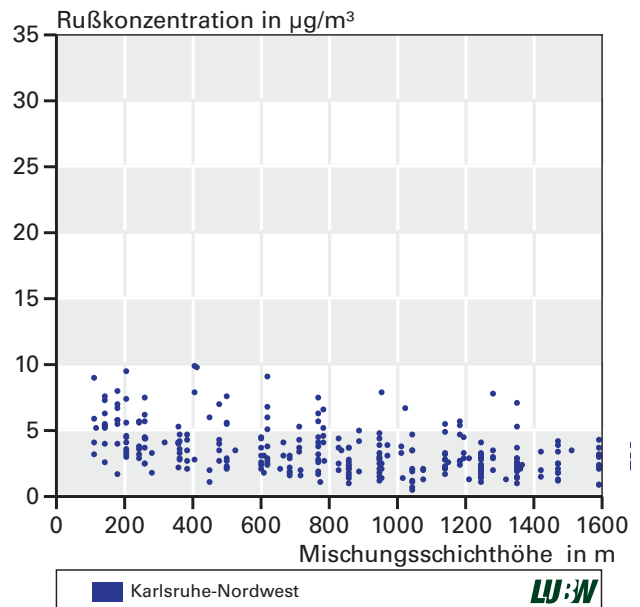


Abbildung 83: Karlsruhe-Nordwest, Anzahl der Wertepaare: 466 im Zeitraum: 2.10.2000-31.3.2006

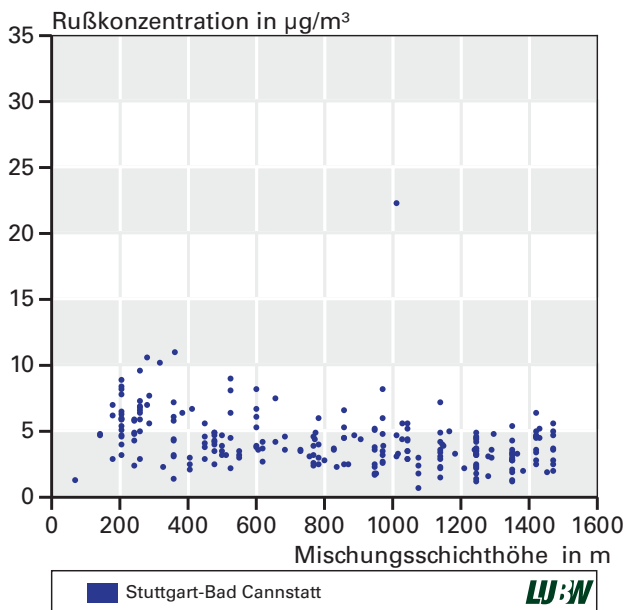


Abbildung 84: Stuttgart-Bad Cannstatt, Anzahl der Wertepaare: 474 im Zeitraum: 2.10.2000-31.3.2006

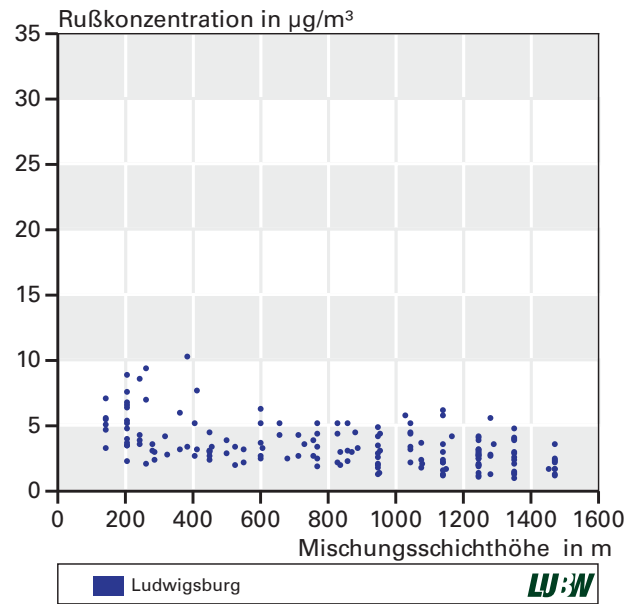


Abbildung 86: Ludwigsburg, Anzahl der Wertepaare: 281 im Zeitraum: 1.10.2001-31.5.2005

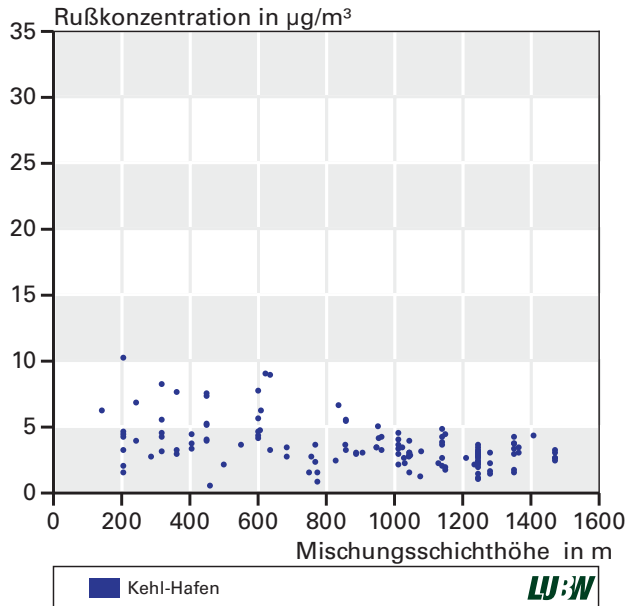


Abbildung 85: Kehl-Hafen, Anzahl der Wertepaare: 298 im Zeitraum: 1.10.2001-31.3.2006

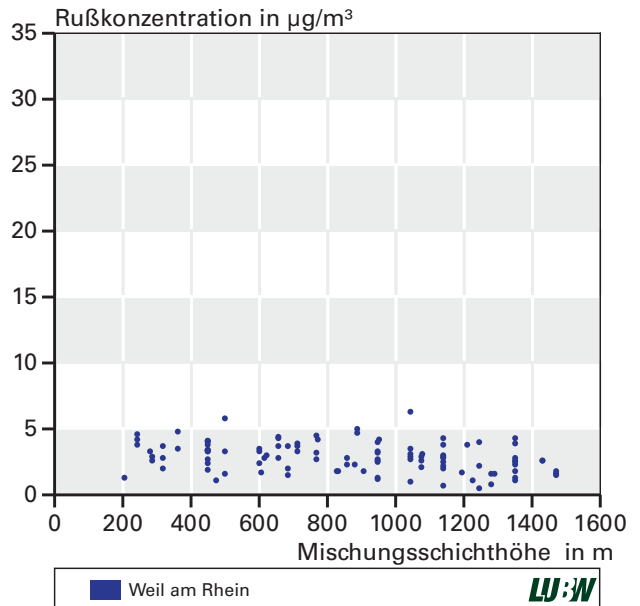


Abbildung 87: Weil am Rhein, Anzahl der Wertepaare: 376 im Zeitraum: 1.10.2001-31.3.2006

5.2.7 TAGESMITTELWERTE DER RUSSKONZENTRATION IN ABHÄNGIGKEIT VON DEM UM 12:00 UHR MEZ BERECHNETEN STAGNATIONSINDEX

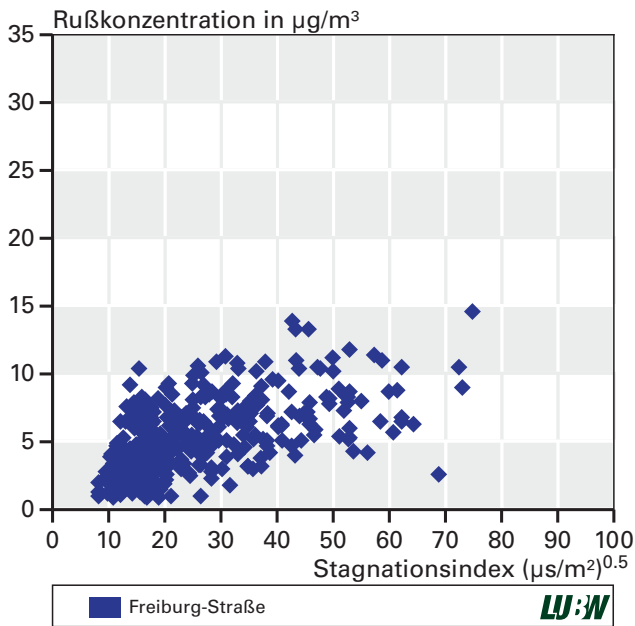


Abbildung 88: Freiburg-Straße, Anzahl der Wertepaare: 456 im Zeitraum: 1.10.2001-31.3.2006

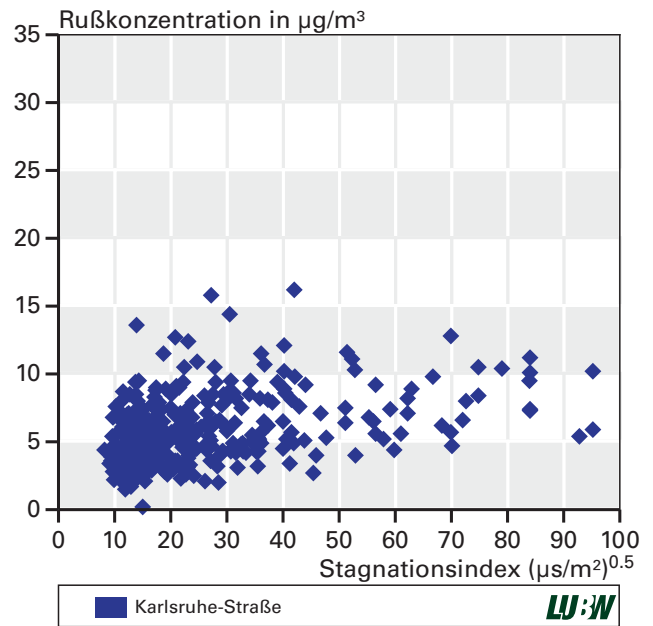


Abbildung 90: Karlsruhe-Straße, Anzahl der Wertepaare: 470 im Zeitraum: 1.10.2001-31.3.2006

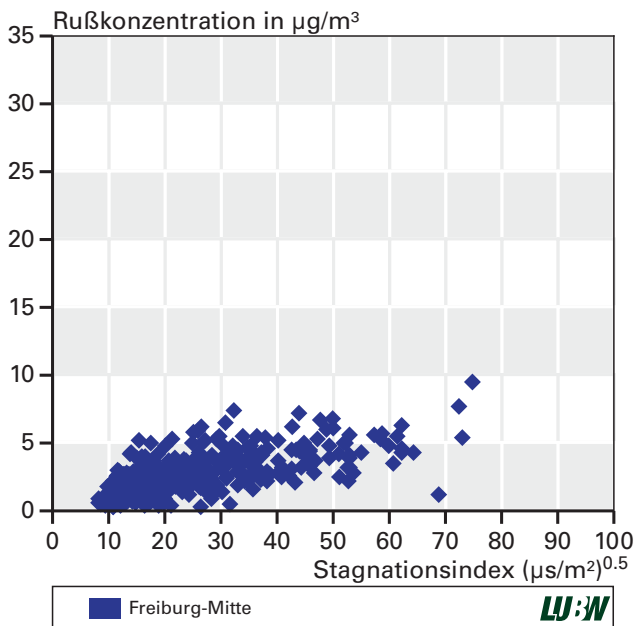


Abbildung 89: Freiburg-Mitte, Anzahl der Wertepaare: 513 im Zeitraum: 1.10.2001-31.3.2006

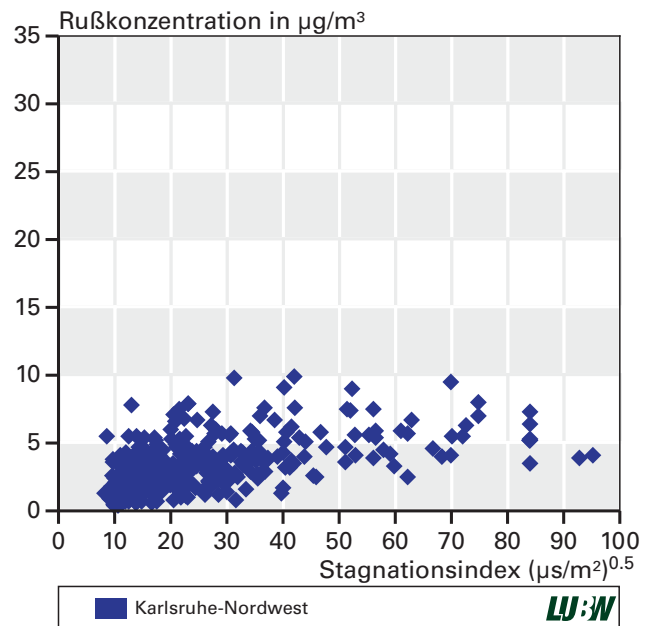


Abbildung 91: Karlsruhe-Nordwest, Anzahl der Wertepaare: 466 im Zeitraum: 2.10.2000-31.3.2006

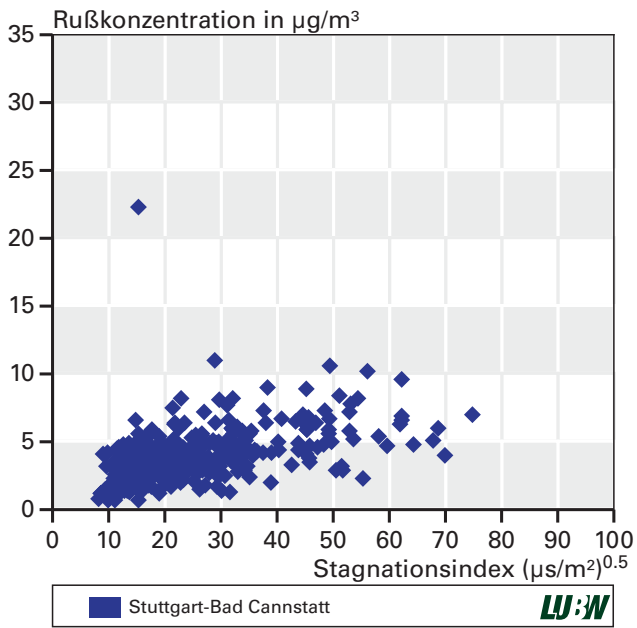


Abbildung 92: Stuttgart-Bad Cannstatt, Anzahl der Wertepaare: 474 im Zeitraum 2.10.2000-31.3.2006

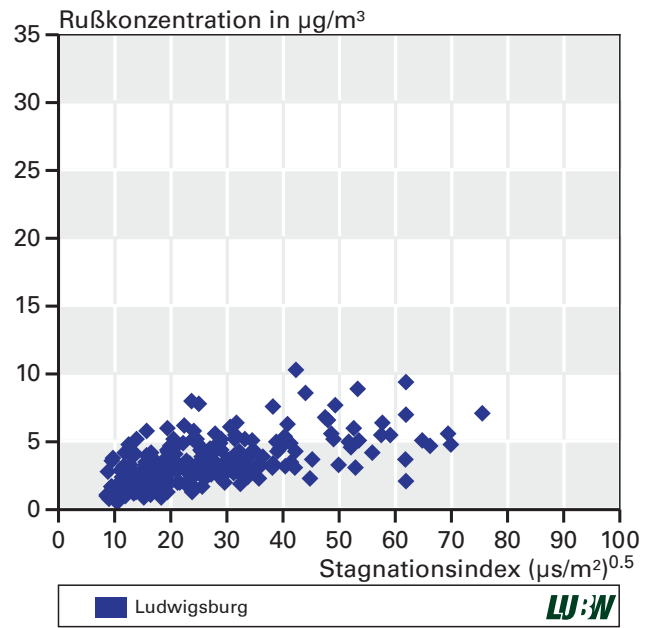


Abbildung 94: Ludwigsburg, Anzahl der Wertepaare: 281 im Zeitraum: 1.10.2001-31.5.2005

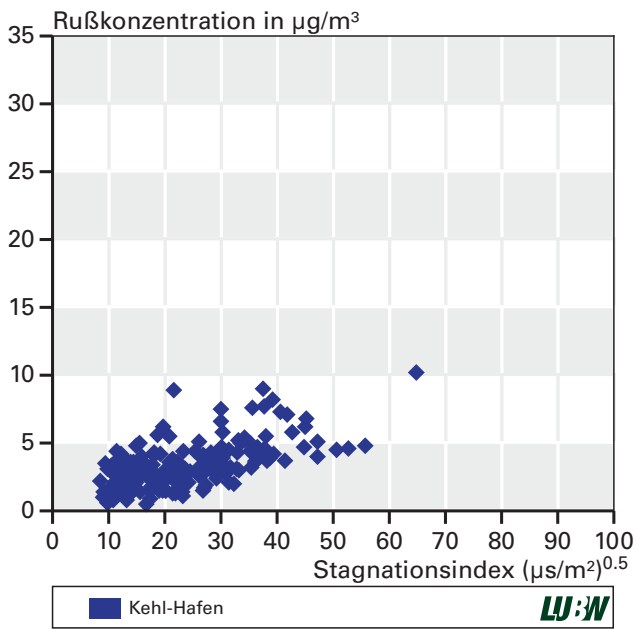


Abbildung 93: Kehl-Hafen, Anzahl der Wertepaare: 298 im Zeitraum: 1.10.2001-31.3.2006

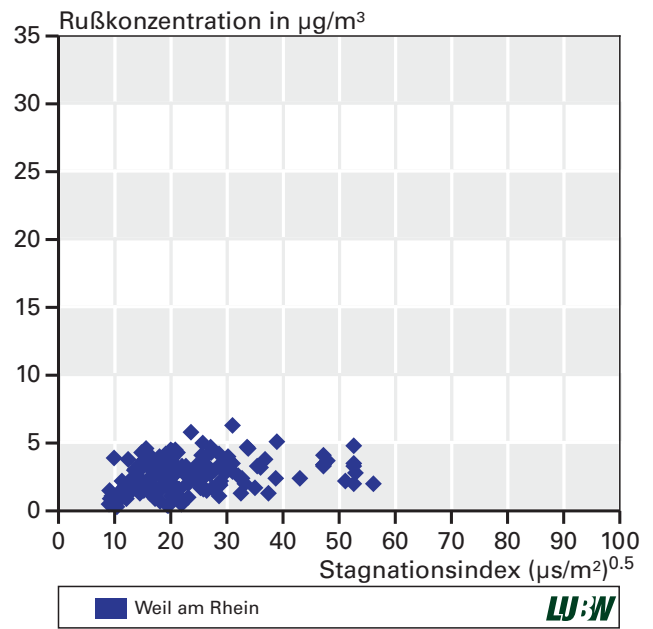


Abbildung 95: Weil am Rhein, Anzahl der Wertepaare: 376 im Zeitraum: 1.10.2001-31.3.2006

5.2.8 TAGESMITTELWERTE DER RUSSKONZENTRATION IN ABHÄNGIGKEIT VON TAGESMITTELWERTEN DER PM10-KONZENTRATION

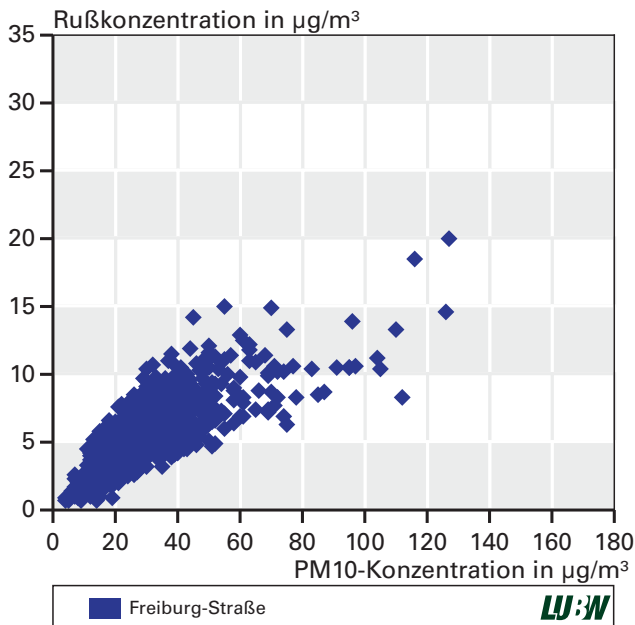


Abbildung 96: Freiburg-Straße, Anzahl der Wertepaare: 985 im Zeitraum 28.9.1997-31.12.2007

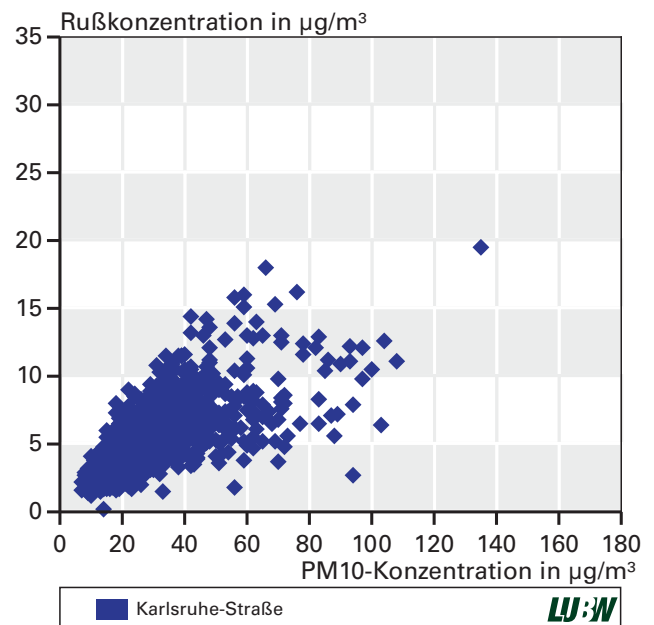


Abbildung 98: Karlsruhe-Straße, Anzahl der Wertepaare: 1104 im Zeitraum: 28.9.1997-30.5.2008

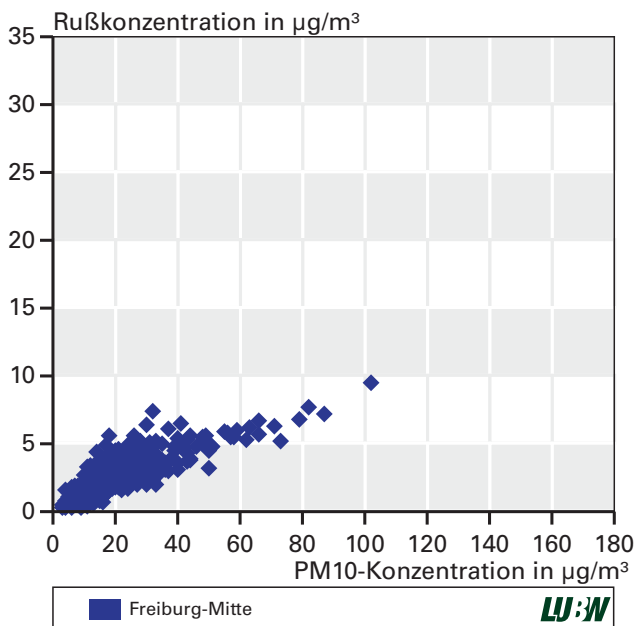


Abbildung 97: Freiburg-Mitte, Anzahl der Wertepaare: 723 im Zeitraum: 2.10.2001-29.5.2008

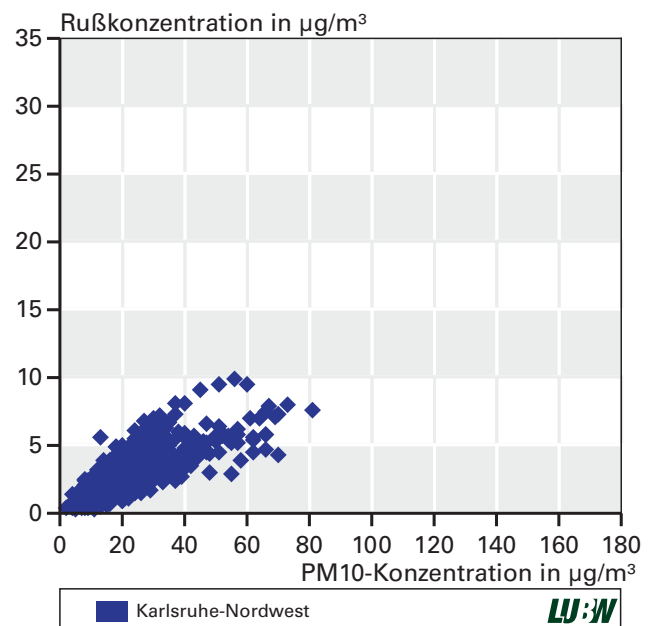


Abbildung 99: Karlsruhe-Nordwest, Anzahl der Wertepaare: 677 im Zeitraum: 2.10.2001-29.5.2008

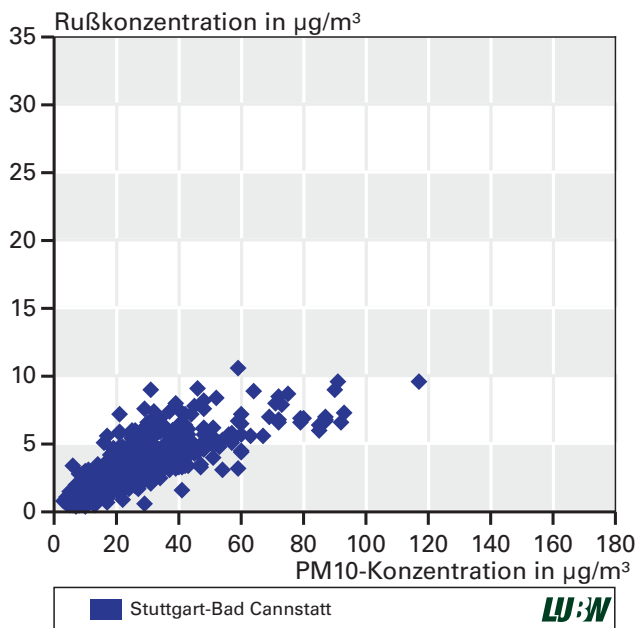


Abbildung 100: Stuttgart-Bad Cannstatt, Anzahl der Wertepaare: 991 im Zeitraum: 2.10.2001-31.5.2008

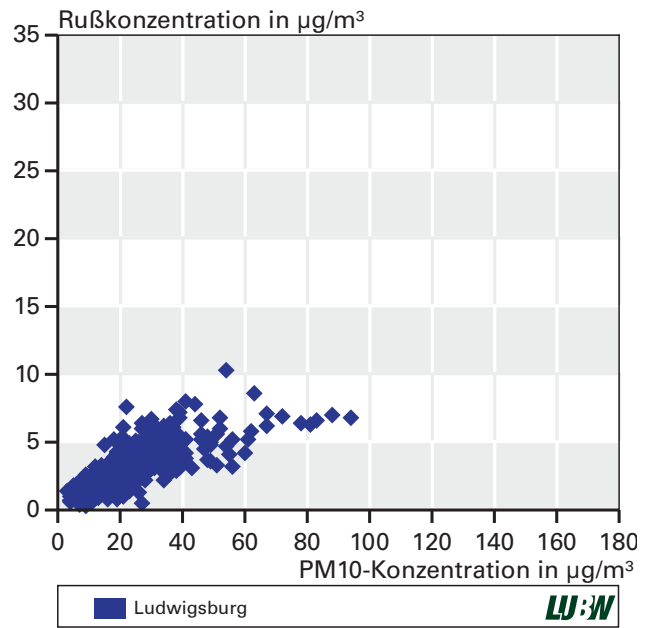


Abbildung 102: Ludwigsburg, Anzahl der Wertepaare: 578 im Zeitraum: 1.10.2001-31.12.2005

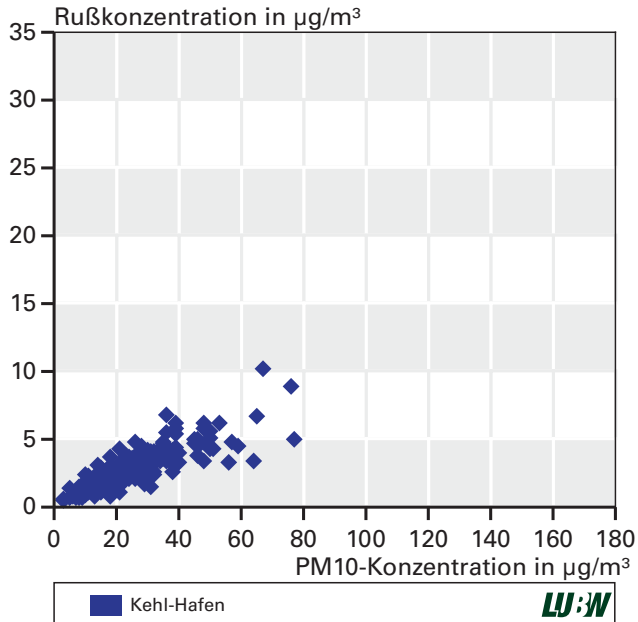


Abbildung 101: Kehl-Hafen, Anzahl der Wertepaare: 254 im Zeitraum: 1.10.2001-29.5.2008

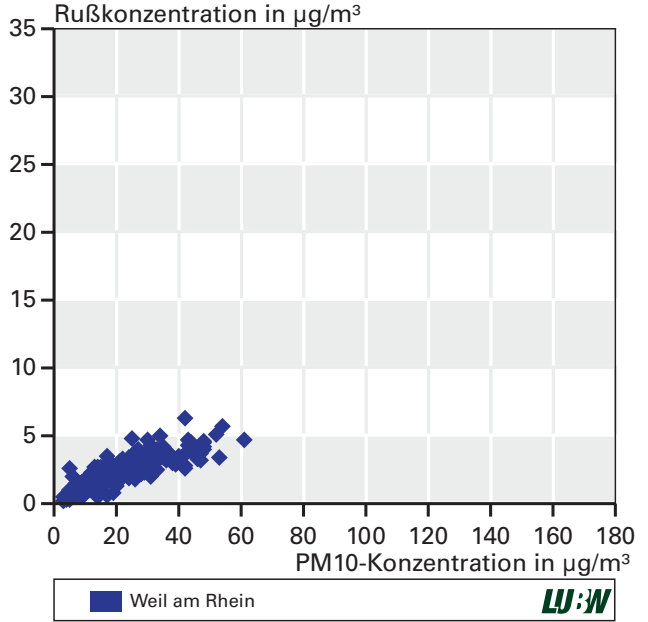


Abbildung 103: Weil am Rhein, Anzahl der Wertepaare: 324 im Zeitraum: 1.10.2001-31.5.2008

6 Abkürzungsverzeichnis

BImSchV:	Bundes-Immissionsschutzverordnung	Varianz:	Die Variabilität, ist ein Maß, das beschreibt, wie stark eine Messgröße „streut“. Sie wird berechnet, indem man die Abstände der Messwerte vom Mittelwert quadriert, addiert und durch die Anzahl der Messwerte teilt.
Erklärte Varianz:	Die Varianz der mittels Regressionsgleichung geschätzten Werte.		
EU:	Europäische Union	VDI:	Verein Deutscher Ingenieure, Kommission Reinhaltung der Luft
GefStoffV:	Gefahrstoffverordnung		
Kfz:	Kraftfahrzeug		
LAI:	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz		
multivariat:	Es wird nicht die Abhängigkeit von einer Variable isoliert (univariat), sondern das Zusammenwirken mehrerer Variablen zugleich betrachtet.		
PM10:	Feinstaub (particulate matter) Als Feinstaub (PM10) bezeichnet man die im Gesamtstaub enthaltenen Partikel, deren aerodynamischer Durchmesser kleiner als 10 μm ist. [LfU/UMEG, 1998]		
R ² :	Bestimmtheitsmaß. Das Bestimmtheitsmaß ist das Quadrat des Korrelationskoeffizienten. Er gibt das Verhältnis von „erklärter“ Varianz zur Gesamtvarianz an. Er nimmt Werte zwischen 0 und 1 an.		
TSP	Gesamtstaub (total suspended particle)		
univariat:	Es wird isoliert die Abhängigkeit von einer Variablen betrachtet.		

7 Literaturverzeichnis

- Dandou, A., Tombrou, M., Schäfer, K., Emeis, S., Soulakellis, N., Protonotariou, A., Bossoli, E., Suppan, P., 2006: A comparison between modelled and measured mixing layer heights over Munich. Prepr. 6th Intern. Confer. Urban Climate, Göteborg, 619-622.
- Deutscher Bundestag (2003): Verordnung der Bundesregierung: Verordnung zur Umsetzung EG-rechtlicher Vorschriften, zur Novellierung der Zweiundzwanzigsten Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über Immissionswerte für Schadstoffe in der Luft – 22. BImSchV) und zur Aufhebung der Dreiundzwanzigsten Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über die Festlegung von Konzentrationswerten – 23. BImSchV); Deutscher Bundestag, 15. Wahlperiode, Drucksache 15/1178, Berlin, 18.6.2003.
- Feichter, Johann, 2005: Zur Rolle von Rußpartikeln im Klimasystem, Max-Planck-Institut für Meteorologie Hamburg.
- Fett, W., 1974: Ein Index für das Stagnieren der bodennahen Luft. Beilage zur Berliner Wetterkarte 41/74.
- Goldberg, E.D., 1985: Black carbon in the Environment. New York, Wiley-Verlag.
- Hamburger Bildungsserver, 2009: Treibhausgase und Aerosole.
- Harrison, R.M., Jones, A.M., Barrowcliffe, R., 2004: Field study of the influence of meteorological factors and traffic volumes upon suspended particle mass at urban roadside sites of differing geometries. Atmospheric Environment 38, 6361-6369.
- Helbig, A., Baumüller, J., Kerschgens, M.J., 1999 (Hrsg.): Stadtklima und Luftreinhaltung. Berlin, Springer-Verlag.
- Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie: Feinstaub (PM10).
- Hippeli, S., Schneider, S., Dornisch, K., Elstner, E.F., 1999: Aufklärung von Toxizitätsmechanismen partikulärer Emissionen mit Hilfe biochemischer Modellreaktionen. Forschungsbericht FZ-KA-BWPLUS.
- Holst, T., Rost, J., Mayer, H., 2005: Analyse meteorologischer Einflussgrößen auf regionale und lokale Muster von Schwebstaub (PM10) und Stickstoffdioxid-Immissionen (NO₂, NO). Ber. Meteor. Inst. Univ. Freiburg für die Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg.
- Holst, T., Rost, J., Mayer, H., 2006a: Muster regional differenzierter atmosphärischer Austauschbedingungen bei Überschreitungen des Tagesgrenzwerts für PM10 von 50 µg/m³. Ber. Meteor. Inst. Univ. Freiburg für die Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg.
- Holst, T., Rost, J., Mayer, H., 2006b: Meteorologische Analyse der Feinstaubepisode im Januar 2006 im südöstlichen Baden-Württemberg. Ber. Meteor. Inst. Univ. Freiburg für das Umweltministerium Baden-Württemberg.
- Holst, T., Rost, J., Mayer, H., 2006c: Analyse der lokalen Austauschbedingungen während der Feinstaubepisode Januar 2006. Ber. Meteor. Inst. Univ. Freiburg für die Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg.
- Holst, J., Mayer, H., Holst, T., 2008: Effect of meteorological exchange conditions on PM10 concentration. Meteorol. Z. 17, 273-282.
- Hooyberghs, J., Mensink, C., Dumont, G., Fierens, F., Brasseur, O., 2005: A neural network forecast of daily average PM10 concentrations in Belgium. Atmospheric Environment 39, 3279-3289.
- Jaenicke, 1998: Lebensdauer von Aerosolpartikeln, 1998 aus W. Roeder, Physik unserer Umwelt: Die Atmosphäre.
- Klingenberg, H., Schürmann, D., Lies, K.H., 1992: Rußpartikel im Dieselmotorabgas - Entstehung und Messung, In: Auswirkungen von Dieselmotorabgasen auf die Gesundheit. 5 Jahre Forschungsförderung: ein Arbeitsschwerpunkt im Rahmen des Programms "Umweltforschung und Umwelttechnologie" Förderschwerpunkt "Umweltbelastung und Gesundheit", München, GSF.

- Klipper, N., Nussbaumer, T., 2007:** Vergleich der Gesundheitsrelevanz von Holzfeuerungen und Dieselmotoren. Schlussbericht Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr und Kommunikation.
- Kukkonen, J., Pohjola, M., Sokhi, R.S., Luhana, L., Kitwiroon, N., Fragkou, L., Rantamäki, M., Berge, E., Ødegaard, V., Slørdal, L.H., Denby, B., Finardi, S., 2005:** Analysis and evaluation of selected local-scale PM10 air pollution episodes in four European cities: Helsinki, London, Milan and Oslo. *Atmospheric Environment* 39, 2759-2773.
- LAI, 2004:** Bewertung von Schadstoffen, für die keine Immissionswerte festgelegt sind“, Ergebnismitschrift über die 108. Sitzung des LAI vom 21. bis 22. September 2004 in Leipzig, TOP:7.4.3.
- LAI, 2006:** „Kancerogene Wirkungen von Partikeln in der Atemluft“ der Bund/Länder- Arbeitsgemeinschaft Immissionsschutz (LAI) vom September 2006.
- LfA, 2004:** Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern. Feinstaubmessungen in Mecklenburg-Vorpommern, Materialien zur Umwelt.
- LfU/UMEG, 1998:** Schwebstaubbelastungen in Baden-Württemberg. Hrsg. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg und UMEG, Mai 1998.
- Müller, J., 1984:** Atmospheric Residence Time of Carbonaceous Particles and Particulate PAH-Compounds. *Sci. Total Environ.* 36, 339-346.
- Motorlexikon, 2009:** Internetseite 09.02.2009.
- Ogren, J.A., Carlson, R.J., 1983:** Elemental Carbon in the Atmosphere: Cycle and Lifetime. *Tellus* 35B, 241-254.
- Roedel, W., 2000:** Physik unserer Umwelt. 3. Aufl. Berlin, Springer-Verlag.
- Dr. Risse, Uwe, 2009:** Partikuläre Luftinhaltsstoffe (Aerosole): Internetseite 2009-02-24.
- Sansone, M., Bressan, M., Pernigotti, D., Rossa, A., Ferrario, M., Benassi, A., 2006:** A multiple regression-approach to forecasting PM concentration in the city of Padua, Italy. Prepr. 6th Intern. Confer. Urban Climate, Göteborg, 128-131.
- Schindler, Klaus-Peter, 2003:** Zukünftige Anforderungen Abgasemissionen Diesel, Volkswagen AG; FAD-Konferenz 12.11.-13.11.2003 Dresden.
- Seinfeld, J.H., Pandis, S.N., 1992:** Atmospheric Chemistry and Physics. Wiley & Sons, New York.
- Siegmann, K., Siegmann, H.C., 1999:** Entstehung von Kohlenstoffpartikeln bei der Verbrennung organischer Treibstoffe. Haus der Technik, Seminar „Feinstoffpartikelemissionen von Verbrennungsmotoren, 12./13. Oktober 1999, München.
- Statistische Landesamt Baden-Württemberg, Statistik Verkehr, Stuttgart 2009**
- Wise, E.K., Comrie, A.C., 2005:** Meteorologically adjusted urban air quality trends in the Southwestern United States. *Atmospheric Environment* 39, 2969-2980.

