

Feinstaubmessungen in Gastronomiebetrieben

Verfügung Nr. 07.005778

Schlussbericht Vorgehen und Ergebnisse

Bern, 17. Juni 2008

Erstellt in Zusammenarbeit von

- Institut für Sozial- und Präventivmedizin der Universität Bern
Michael Breuer, Martin Rössli
- inNET Monitoring AG
Peter Böhler, Thomas Zünd
- Lungenliga Schweiz
Cornelis Kooijman, Silja Wenk

Dieses Forschungsprojekt wurde finanziert durch den Tabakpräventionsfonds

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	3
2	Methode	5
2.1	Messmethode	5
2.1.1	Messgeräte	5
2.1.2	Qualitätssicherung	6
2.1.3	Messdatenkorrektur	6
2.2	Statistische Analyse	8
2.2.1	Fragestellungen	9
2.2.2	Datenaufbereitung	9
2.2.3	Deskriptive Analyse	10
2.2.4	Regressionsanalyse	10
3	Resultate	11
3.1	Vergleich der Feinstaubbelastung unter verschiedenen Rauchregelungen	11
3.1.1	Durchschnittliche PM2.5 Belastung	11
3.1.2	Durchschnittliche Anzahl Partikel	12
3.1.3	Spitzenbelastung mit PM2.5	13
3.1.4	Spitzenbelastung in der Partikelanzahl	14
3.2	Einflussfaktoren auf die Feinstaubbelastung in Raucherlokalen	15
3.2.1	Der Einfluss der räumlichen Trennung von Raucher- und Nichtraucherbereichen	15
3.2.2	Zusammenhang zwischen Anzahl Rauchenden und der Feinstaubbelastung	16
3.3	Weitere Einflussfaktoren	18
3.3.1	Andere Feinstaubquellen	18
4	Diskussion	22
Anhang 1: Rauchregelungen in Gastronomielokalen		24
Anhang 2: Tabellen zu den Abbildungen im Text		25
Anhang 3: Zusätzliche Abbildungen und Tabellen zur deskriptiven Analyse		29
Anhang 4: Parameterliste		33

1 Zusammenfassung

Immer mehr Arbeitsplätze werden rauchfrei. In der Gastronomie ist das aber noch viel zu selten der Fall. In Restaurants, Café, Bars und Diskotheken sind Wirte und Servicepersonal oftmals während 8 Stunden pro Tag dem Tabakrauch anderer ausgesetzt – sie rauchen unfreiwillig mit.

Das so genannte Passivrauchen bezeichnet das Einatmen von Tabakrauch aus der Umgebungsluft. Im Tabakrauch wurden bisher mehr als 4'000 Stoffe identifiziert, wovon mindestens 40 Krebs erregend sind. Der durch Tabakrauch erzeugte Feinstaub besteht vorwiegend aus feinen und ultrafeinen Partikeln kleiner als 1 Mikrometer. Sie sind besonders gefährlich für die Gesundheit, da sie beim Atmen bis tief in die Lungen eindringen. Feinstaub aus Tabakrauch ist zudem Krebs erregend, auch für Personen, die den Tabakrauch aus der Umgebungsluft einatmen.

Die Debatte um Feinstaubbelastung konzentriert sich heute häufig auf die Belastung der Aussenluft, das heisst auf Verkehr oder Industrie als primäre Schadstoffquellen. Feinstaubbelastung in der Innenraumluft (d.h. grösstenteils aus Tabakrauch) wird in der öffentlichen Diskussion um Feinstaub noch weniger wahrgenommen, er ist jedoch aus den oben genannten Gründen ein ebenso gravierendes Problem.

Verschiedene wissenschaftliche Studien befassen sich bisher mit der Feinstaubbelastung durch Tabakrauch in Innenräumen. Die Belastung in der Gastronomie untersuchte eine vergleichende Studie zu Luftbelastung und Umsatz in Basler Raucher- und Nichtraucher-Restaurants¹. Die Studie "Tabakrauchbelastung in Lokalen des Gastgewerbes" des SECO² untersuchte die Belastungen in der Stadt Zürich. Das Deutsche Krebsforschungszentrum Heidelberg führte die sehr umfangreiche Studie „Tabakrauchbelastungen in deutschen Gastronomiebetrieben und Fernreisezügen“³ durch.

Alle diese Untersuchungen zeigen sehr hohe Feinstaubbelastungen in Innenräumen, in denen geraucht wird.

Um umfassende Daten zu erhalten und damit das tatsächliche Ausmass der Feinstaubbelastungen in Schweizer Gastronomiebetrieben zu bestimmen, hat die Lungenliga Schweiz in Zusammenarbeit mit der inNET Monitoring AG und dem Institut für Sozial- und Präventivmedizin der Universität Bern Feinstaubmessungen durchgeführt. Die vorliegende Forschungsarbeit orientiert sich weitgehend an der zuletzt genannten Studie des Deutschen Krebsforschungszentrums Heidelberg.

Mit der Untersuchung soll die Frage beantwortet werden, ob die Feinstaubbelastung auf den Tabakrauch als Hauptquelle zurückzuführen ist und wie weit unterschiedliche Rauchregelungen in Gastronomielokalen einen Einfluss auf die Feinstaubbelastung haben. Die tatsächliche Belastung in Lokalen, in denen geraucht wird, soll quantifiziert werden.

Die 129 Messreihen in 99 Gastronomiebetrieben zeigen ein deutliches Bild:

- In Lokalen, in denen geraucht wird, finden sich sehr hohe Massenkonzentrationen an lungengängigem, gesundheitsschädigendem Feinstaub (PM_{2.5}).

¹ N. Künzli, P. Mazzeletti, M. Adam, T. Götschi, P. Mathys, C. Monn, O. Brändli. 2003. Smokefree cafe in an unregulated European city: highly welcomed and economically successful. In Tobacco Control 2003; 12; 282–288.

² Deutsches Krebsforschungszentrum, Heidelberg. 2006. Tabakrauchbelastungen in deutschen Gastronomiebetrieben und Fernreisezügen, www.tabakkontrolle.de

³ Staatssekretariat für Wirtschaft, SECO. 2007. Tabakrauchbelastung im Gastgewerbe. Fachbereich Arbeit und Gesundheit, Zürich.

- Die Feinstaubkonzentrationen in Raucherlokalen liegen ein Mehrfaches über den gemessenen Konzentrationen in Nichtraucherlokalen.
- Die hohen Belastungen sind auf den Tabakrauch zurückzuführen.
- Auch in abgetrennten Nichtraucherträumen wird der Schutz für Gäste und Servicepersonal nicht ausreichend gewährleistet. Ein umfassender und wirksamer Schutz vor Passivrauchen ist daher nur in vollständigen Nichtraucherlokalen garantiert.

Im vorliegenden Bericht werden die detaillierten Ergebnisse der Feinstaubmessungen präsentiert. Nebst einer Erläuterung der verwendeten Mess- und Analysemethoden werden die Ergebnisse dargestellt und diskutiert.

Ergänzend zu diesem Bericht existiert ein Faktenblatt mit den Ergebnissen und den daraus resultierenden politischen Forderungen der Lungenliga Schweiz.

2 Methode

Um ein differenziertes Bild der Luftbelastung durch Feinstaubpartikel zu erhalten, wurde die Belastung in zwei Dimensionen erhoben. Zum einen wurde die **Partikelanzahlkonzentration** in zwei Grössenklassen (grösser 0.5 Mikrometer und grösser 5 Mikrometer) erfasst, zum anderen die **Partikelmassenkonzentration** in den Fraktionen PM₁, PM_{2.5}, PM_{7.5} PM₁₀ und TSP⁴. Besonderes Augenmerk ist aus gesundheitlicher Sicht und aus Gründen der Vergleichbarkeit mit anderen Untersuchungen auf die Grösse PM_{2.5} zu legen.

2.1 Messmethode

In jedem untersuchten Gastronomielokal wurden ein bis zwei Messreihen erhoben, um der Situation im jeweiligen Betrieb gerecht zu werden. Insbesondere in Lokalen mit Raucher- und Nichtraucherbereich wurde nach Möglichkeit in beiden Bereichen gemessen. Die begleitenden Umstände der Messung (die Rauchregelung im Lokal, die Zahl der anwesenden Personen und Rauchenden) wurden alle zehn Minuten in einer separaten Excel-Datei dokumentiert (siehe Parameterliste im Anhang 4). Daneben wurden auch weitere Fakten dokumentiert, die auf die Feinstaubbelastung im Messlokal einen Einfluss haben können. Hierzu gehören mögliche andere Feinstaubquellen als Tabakrauch (z.B. Kerzen oder eine offene Küche) und Angaben zum Standort des Lokals (Entfernung zur nächsten Hauptstrasse) sowie zu den Wetterverhältnissen (Aussentemperatur, Luftfeuchtigkeit). Weiter wurde die Art der Lüftung im jeweiligen Lokal, die Temperatur sowie der Bodenbelag im Lokal erhoben.

2.1.1 Messgeräte

Für die Messungen wurden Messgeräte vom Typ Aerocet 531 von Met One Instruments Inc. eingesetzt. Die Anzahlkonzentration und die Partikelgrösse werden bei diesen Geräten mit Laserstreulicht bestimmt. Die Geräte können so konfiguriert werden, dass entweder die Partikelanzahlkonzentration oder die Partikelmassenkonzentration ausgegeben wird. Gemessen wird in beiden Fällen die Partikelanzahlkonzentration, welche im Massenmodus über eine angenommene Dichtefunktion in Massenanteile pro Grössenfraktion umgerechnet wird.

	Grössenbereiche	Zeitauflösung
Partikelanzahl	> 0.5 Mikrometer > 5.0 Mikrometer	1 Minute
Partikelmasse	PM ₁ , 2.5, 5, 7.5, PM ₁₀ und TSP	2 Minuten

Diese Messgeräte haben den Vorteil, dass sie durch ihre geringe Baugrösse und den niedrigen Geräuschpegel in den Gastronomiebetrieben kaum auffallen und deshalb keine Störung des Betriebes und der Gäste darstellen. Nachteilig ist, dass die untere Erfassungsgrenze mit 0.5 Mikrometern sehr hoch liegt, und ein beachtlicher Teil der relevanten Partikel damit nicht gemessen werden kann (Abbildung 2)

Insgesamt waren vier Aerocet 531 Messgeräte im Einsatz, zwei zur Bestimmung der Anzahlkonzentration und zwei zur Bestimmung der Massenkonzentration. Die Konfiguration der

⁴ Die Feinstaubmassenkonzentration von Partikeln mit einem Durchmesser von weniger als 2.5 Mikrometer wird als PM_{2.5} bezeichnet. Analoges gilt für die Fraktionen PM₁ bis PM₁₀. PM steht für „particulate matter“. TSP (total suspended particles) ist die Massenkonzentration aller sich in der Luft befindenden Partikel.

Geräte (Massen- oder Anzahlmodus) wurde während der ganzen Messkampagne nicht verändert.

2.1.2 Qualitätssicherung

Vor und nach jeder Wochenendmessung wurden die vier Aerocet-Messgeräte in einem eigens dafür eingerichteten Kalibrierraum überprüft. Die Aerocet Messgeräte wurden dabei parallel zu zwei Referenzgeräten – einem von METAS zertifizierten Scanning Mobility Particle Sizer Spectrometer (SMPS) von TSI Inc. und einer Tapered Element Oscillating Microbalance (TEOM) der Firma Thermo Fisher Scientific Inc. – in einem Laborversuch mit frischem Zigarettenrauch betrieben. Eine allfällige Drift oder Fehlfunktion der Aerocet Messgeräte konnte so erkannt und nachträglich korrigiert werden. Vor und nach jedem Messeinsatz wurden auch die Flussraten der Geräte überprüft und bei Bedarf justiert.

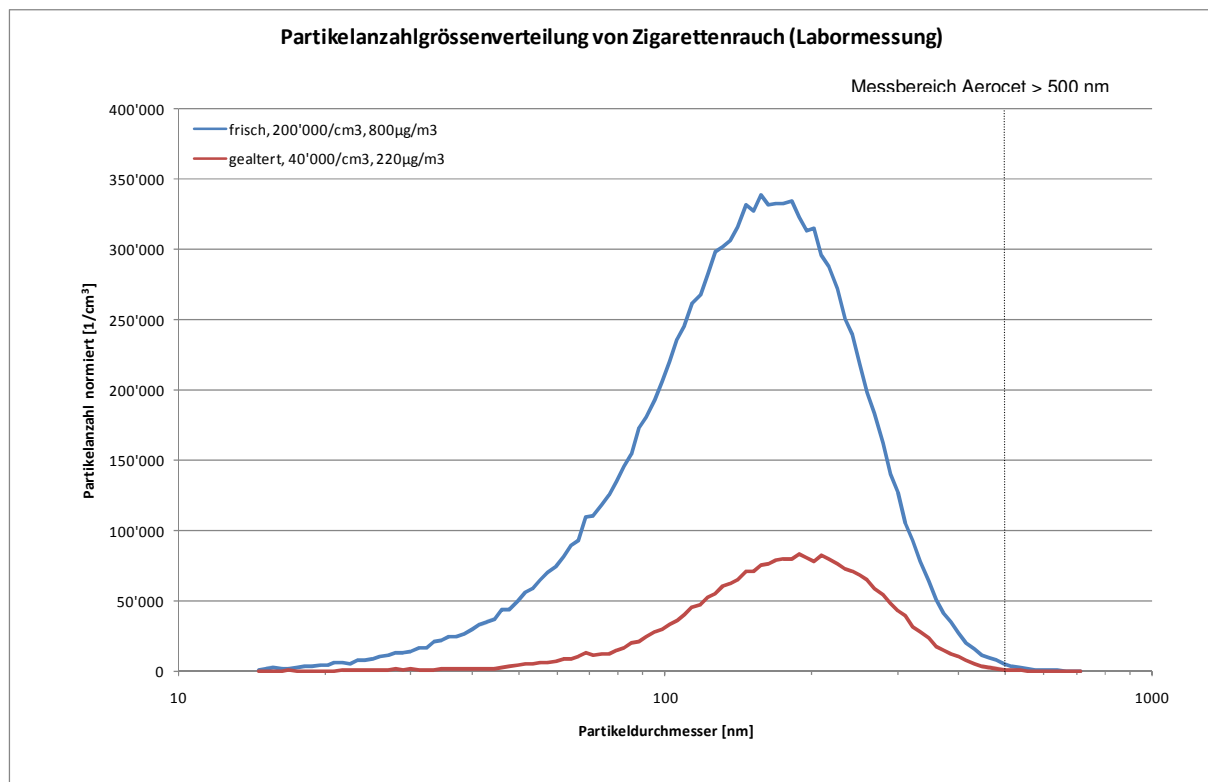
Abbildung 1: Referenzgeräte und Prüflinge im Kalibrierraum



2.1.3 Messdatenkorrektur

Da das Maximum der Anzahlgrößenverteilung von frischem Zigarettenrauch bei einem Durchmesser zwischen 0.1 und 0.15 Mikrometer liegt, erfassen die Aerocet Messgeräte nur einen kleinen Bereich dieser Partikel (Abbildung 2). Bei sehr hoher Luftbelastung (über 106'000 Partikel pro Liter) tritt zusätzlich ein Koinzidenzfehler auf, durch welchen die Partikelanzahl zu tief und der Partikeldurchmesser und damit auch die Partikelmassenkonzentration zu hoch bestimmt wird (mehrere kleine Partikel werden als ein Grosses detektiert).

Abbildung 2: Grössenverteilung von frischem und gealtertem Zigarettenrauch



Um den resultierenden Fehler korrigieren zu können, wurde anhand der Labormessungen eine Korrekturvorschrift erarbeitet und unter realen Bedingungen in einem Raucherlokal überprüft (siehe Kapitel 3.2.2).

Partikelanzahlkonzentration

Die Übereinstimmung der Partikelanzahlkonzentration im Bereich von 0.5 – 0.8 Mikrometer, welcher mit Aerocet und SMPS parallel gemessen werden kann, ist mehrheitlich gut, wird aber teilweise durch Koinzidenzeffekte des Aerocet beeinträchtigt (siehe Kapitel 2.1.3). Die Reproduzierbarkeit der SMPS-Messungen liegt bei $\pm 7\%$. Diese Messunsicherheit ist für die Beurteilung von Relativmessungen wie im vorliegenden Fall relevant. Die absoluten Messwerte für die Partikelanzahlkonzentration sind beim SMPS mit einer Messunsicherheit von $\pm 20\%$ bezüglich dem wahren Wert behaftet und können auch für die Aerocetmessungen im Bereich von 0.5 – 0.8 Mikrometer übernommen werden.

Gleichzeitig konnte mit dieser Vergleichsmessung die Partikelanzahlkonzentration im Grössenbereich zwischen 0.01 und 0.5 Mikrometer eruiert werden, welcher von den Aerocetgeräten nicht gemessen werden konnte.

Systematische Abweichungen zwischen den zwei eingesetzten Aerocet-Messgeräten für die Messung der Partikelanzahlkonzentration wurden rechnerisch korrigiert.

Eine Korrektur der Partikelanzahlkonzentration aufgrund der fehlenden Berücksichtigung der Partikel unterhalb 0.5 Mikrometer durch die Aerocet-Geräte wurde nicht durchgeführt. Eine Approximation der „wahren“ Gesamtpartikelanzahl basierend auf den Aerocet-Messresultaten entspräche einer Extrapolation in einen sehr ungünstigen Grössenbereich, da die Gesamtpartikelanzahl zum grössten Teil durch kleinste Partikel dominiert ist. Eine Korrekturfunktion für die Partikelanzahl wäre daher mit einer sehr grossen Unsicherheit behaftet. Deshalb wird die Partikelanzahlkonzentration für den Grössenbereich >0.5 Mikrome-

ter ohne weitere Korrektur angegeben. Dies im Wissen, dass die hier ausgewiesenen Partikelanzahlkonzentrationen nicht mit denjenigen anderer Studien⁵ zu Partikelanzahlmessungen in rauchbelasteten Innenräumen vergleichbar sind.

Partikelmassenkonzentration

Für die Massenkonzentration konnten die Werte der Aerocet-Messgeräte direkt mit den Werten des TEOM verglichen werden. Die Gleichwertigkeit des TEOM zur Referenzmethode nach EN12341 konnte bei inNET Monitoring AG und in anderen Institutionen mehrfach nachgewiesen werden. Die Unsicherheit der mit TEOM FDMS gemessenen Massenkonzentration liegt bei $\pm 10\%$.

Aus dem Vergleich von Aerocet, TEOM und SMPS in den Labormessungen liess sich eine Korrekturfunktion für PM₁ herleiten. Damit ist der unsicherste Bereich des Aerocet-Messprinzips (Partikel < 0.5 Mikrometer) kalibrierbar und mit einer einfachen Differenzbildung können die übrigen Massenfraktionen berechnet werden.

Für die Berechnung der Massenkonzentration der Fraktionen PM_{2.5} bis TSP wurde in erster Näherung angenommen, dass die Gründe für die Abweichung der Aerocet-Messwerte von jenen des TEOM ausschliesslich durch den nach unten begrenzten Messbereich des Aerocet und durch das Auftreten von Koinzidenz bei hohen Partikelanzahlkonzentrationen verursacht wird. Die damit hergeleitete Umrechnungsformel für PM_{2.5} lautet:

$$PM_{2.5corr} = PM_{2.5Aerocet} + 16.9 * PM_{1.0Aerocet} + 9.5 \quad [\mu g/m^3]$$

Bei der Anwendung der obigen Formel muss beachtet werden, dass die Bedingungen in den Gastronomielokalen erheblich von den Laborbedingungen mit reinem Zigarettenrauch abweichen können. Gründe dafür sind (lokale) Fremdquellen, unterschiedliche Hintergrundsbelastungen sowie die Alterung des Aerosols in Abhängigkeit der Umgebungsbedingungen (Feuchte, andere Stoffe, Ionisierung etc.)

Um die Frage der Übertragbarkeit der im Labor gewonnenen Kalibrierfunktionen auf reale Situationen zu beantworten, wurde mit einem SMPS und einem TEOM FDMS und den Aerocet-Geräten eine Intensivmessung in einem gut besuchten Raucherlokal während unterschiedlichen Belastungssituationen durchgeführt. Mit Hilfe dieser Daten konnte gezeigt werden, dass die im Labor gewonnenen Korrekturfunktionen auch für reale Bedingungen angewendet werden dürfen.

Die gesamte Messunsicherheit für die Massenapproximation basierend auf der Partikelanzahlmessung beträgt aufgrund dieser Messungen bezogen auf den wahren Wert $\pm 30\%$.

Zwischen den beiden Aerocet-Messgeräten, mit welchen die Massenkonzentration gemessen wurde, zeigten sich keine systematischen Abweichungen.

2.2 Statistische Analyse

Die Datenanalyse dient dazu, die durch die Messungen und die Protokolle gewonnenen Daten so aufzubereiten und zu analysieren, dass sie zur Beantwortung der in dieser Studie thematisierten Fragen beitragen können.

⁵ Vgl. Studie vom SECO. 2007. Tabakrauchbelastung im Gastgewerbe. Fachbereich Arbeit und Gesundheit, Zürich.

2.2.1 Fragestellungen

Die Studie versteht sich als Beitrag zur Beantwortung einer ganzen Reihe von Fragen, die für den Nichtraucherschutz in der Praxis relevant sind. Deshalb ist zu bestimmen, wie stark die Feinstaubbelastung in schweizerischen Gastronomiebetrieben durch Zigarettenrauch tatsächlich ist. Zu ermitteln sind:

- Unterschiede in der PM2.5-Belastung in Abhängigkeit von der Rauchregelung und vom Lokaltyp.
- Unterschiede in der Anzahl der gemessenen Feinstaubpartikel in Abhängigkeit von der Rauchregelung.
- Der Einfluss der räumlichen Trennung von Raucher- und Nichtraucherbereichen innerhalb eines Lokals auf die Feinstaubbelastung.
- Der Zusammenhang zwischen der Anzahl der Rauchenden und der Feinstaubbelastung.

2.2.2 Datenaufbereitung

In einem ersten Schritt mussten die Partikelmessreihen und die dazugehörenden Messprotokolle über die weiteren Messbedingungen miteinander kombiniert werden, was durch die zeitliche Zuordnung und die handschriftlichen Protokolle der die Messung durchführenden Teams möglich war. Zwei von 131 Messreihen konnten nicht zugeordnet werden, weshalb sie ignoriert werden mussten. Letztlich standen so 129 Messreihen aus 99 Gastronomiebetrieben für die Untersuchung zur Verfügung (Details siehe Anhang 1).

Für die Datenanalyse wurde zwischen vier Rauchregelungen unterschieden:

1. Gänzlich rauchfreies Lokal: Nichtraucherlokal (NR-Lokal)
2. Nichtraucherbereich in einem Lokal, in dem auch geraucht wird (NR-Bereich)
3. Raucherbereich in einem Lokal, das auch über einen Nichtraucherbereich verfügt (R-Bereich)
4. Lokal ohne Raucheinschränkungen: Raucherlokal (R-Lokal)

Die resultierende Verteilung der Rauchregelungen ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

Tabelle 1: Verteilung der Messreihen nach Rauchregelung. Nichtraucher- und Raucherbereiche umfassen sowohl abgetrennte Räume wie auch räumlich nicht abgetrennte Zonen

Rauchregelung	Anzahl
Nichtraucherlokale	19
Nichtraucherbereich	37
Raucherbereich	42
Raucherlokal	31
Total	129

Um untersuchen zu können, ob signifikante Unterschiede in der Feinstaubbelastung zwischen verschiedenen Arten von Gastronomiebetrieben festzustellen sind, wurden neben der Rauchregelung auch noch die Lokaltypen unterschieden. Die Kategorien lauteten hier: Bar, Cafe, Restaurant und Diskothek.

2.2.3 Deskriptive Analyse

Für alle 129 Messreihen wurden jeweils die gleichen Kennzahlen für die Verteilung von PM_{2.5}, PM₁₀, die Anzahl der Partikel grösser als 0,5 Mikrometer (im folgenden Partikelanzahl>0.5 genannt) und Partikel grösser als 5 Mikrometer (im folgenden Partikelanzahl>5.0 genannt) errechnet. Namentlich wurden für jede der genannten Messgrössen und jeden Messstandort der Durchschnittswert und die 95%-Perzentile aus der Messreihe ermittelt. Die so erhaltenen Kennzahlen für jede Messreihe bilden die Grundlage der deskriptiven Analyse.

In einem ersten Schritt wurde die Verteilung der jeweils mittleren Konzentration aller Messgrössen (PM_{2.5}, PM₁₀, Partikelanzahl>0.5 Partikelanzahl>5.0) in den vier Rauchregelungen (NR-Lokal, NR-Bereich, R-Bereich und R-Lokal) graphisch dargestellt und tabelliert. Dasselbe wurde für die Verteilung der 95%-Perzentile gemacht, um einen Eindruck über die auftretenden Spitzenbelastungen zu bekommen. Zusätzlich wurden diese Messgrössen für den NR- und R-Bereich in Lokalen mit räumlicher Trennung und jenem in Lokalen ohne räumliche Trennung verglichen.

In einem zweiten Schritt wurde dann der mögliche Einfluss von weiteren Faktoren (z.B. Feinstaubquellen wie Kerzen, offene Küchen, etc.) deskriptiv untersucht. Hierzu wurden die oben beschriebenen Verteilungen in den vier Rauchregelungen separat für Lokale mit einer oder mehreren Feinstaubquellen und für die Lokale ohne die entsprechenden Quellen tabelliert.

2.2.4 Regressionsanalyse

Während die deskriptive Analyse lediglich Anhaltspunkte für den Einfluss unterschiedlicher Faktoren auf die Feinstaubbelastung liefern kann, ist die multiple Regressionsanalyse geeignet, den Einfluss der einzelnen Faktoren unter Berücksichtigung von allen anderen relevanten Faktoren zu untersuchen. Die Qualität der Analyse mit derartigen Regressionsmodellen hängt wesentlich davon ab, inwieweit bestimmte theoretische Bedingungen erfüllt sind. Aufgrund der Residuenanalyse wurden die zu erklärenden Variablen (PM_{2.5} und Partikelanzahl>0.5) logarithmiert. Die Resultate sind entsprechend zu interpretieren, worauf in den Abschnitten 3.1.1 und 3.1.2 näher eingegangen wird.

Mit Hilfe von Regressionsanalysen wurde für eine Vielzahl von Einflussfaktoren untersucht, ob sie einen signifikanten Einfluss auf die Feinstaubbelastung haben. So wurde z.B. die Rauchregelung, aber auch der Lokaltyp als möglicher Erklärungsfaktor für die Feinstaubbelastung aufgenommen. Weitere untersuchte Einflussfaktoren waren die Zahl der Rauchenden, das Vorhandensein weiterer Feinstaubquellen, der Bodenbelag, die Art und der Betrieb der Lüftung, die Aussenlufttemperatur und die Wetterbedingungen.

3 Resultate

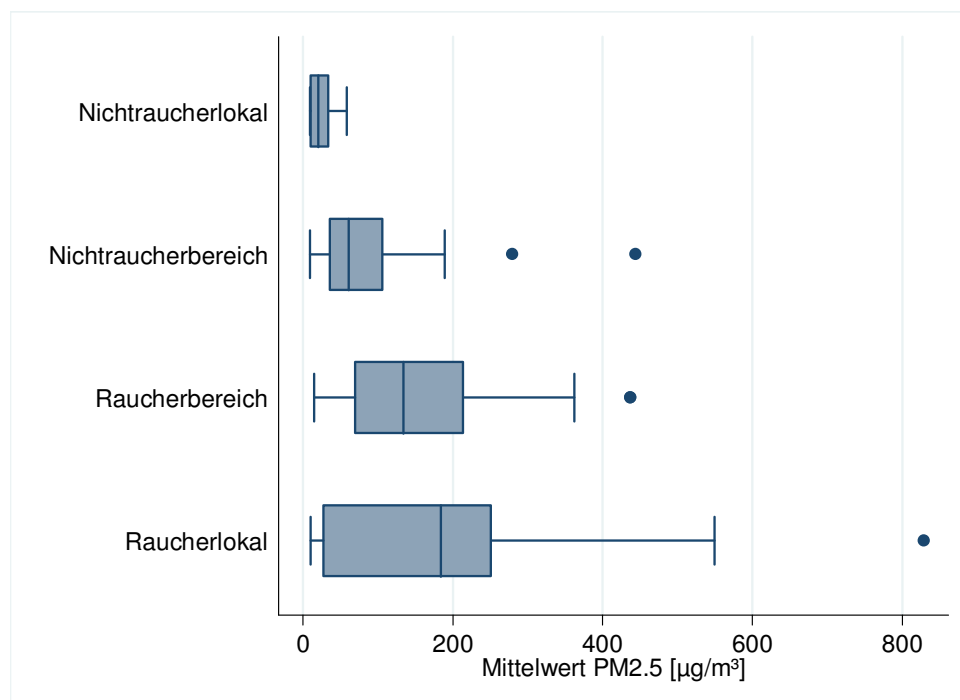
3.1 Vergleich der Feinstaubbelastung unter verschiedenen Rauchregelungen

3.1.1 Durchschnittliche PM2.5 Belastung

Grundsätzlich zeigen die Ergebnisse, dass die Feinstaubbelastung in Raucherlokalen und in Raucherbereichen sehr viel höher ausfällt als in Bereichen mit einer klaren Nichtraucherregelung, d.h. in Nichtraucherlokalen und Nichtraucherbereichen. Die durchschnittliche PM2.5-Konzentration in NR-Lokalen betrug $24.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, in NR-Bereichen $86.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$, in R-Bereichen $154.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, und in R-Lokalen $194.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Für eine Übersicht über die Messresultate wird die Verteilung der Mittelwerte der einzelnen Messreihen (in den Abbildungen kurz „Mittelwert“ genannt) für PM2.5 für jede Rauchregelung in Boxplots dargestellt. Boxplots zeigen die so genannten Schachteln, die so genannten Zäune und ggf. noch Extremwerte. Die Grenzen der Schachteln repräsentieren das 25%-, bzw. das 75%-Quartil. Folglich stellt die Länge der Schachtel den Interquartilsabstand dar. Die Linie in einer Schachtel repräsentiert den Median. Um auch Informationen über die Enden der Verteilung zu erhalten, werden zusätzlich die Ränder der Verteilung abgebildet. Die Linien an beiden Enden bilden hierzu entweder den Minimal- und Maximalwert der Verteilung oder ihre Zäune ab. Der untere Zaun wird als das 25%-Quartil minus dem 1.5-fachen des Quartilsabstandes berechnet; der obere Zaun wird durch das 0.75-Quartil plus dem 1.5-fachen Quartilsabstand definiert. Wenn die minimalen bzw. maximalen Werte der Verteilung innerhalb der Zäune liegen, geben die äusseren Linien diese Minimal- bzw. Maximalwerte wieder, ansonsten repräsentieren sie die Zäune. In diesem Fall werden allfällige Werte ausserhalb der Zäune zusätzlich dargestellt. Die diesem und den folgenden Boxplots zugrunde liegenden Zahlen sind im Anhang 2 in Tabellenform aufgeführt.

Abbildung 3: Verteilung der PM 2.5-Mittelwerte in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ nach Raucherregelung (durchschnittliche Belastung) (Zahlen zu dieser Abbildung in Tabelle 5, Anhang 2).



Für grössere Partikel sind die Unterschiede in der Belastung zwischen den Rauchbereichen deutlich weniger ausgeprägt, wie Abbildung 14 im Anhang 3 für die Masse der Partikel P10 – PM2.5 zeigt. Dies kann erwartet werden, weil solche grossen Partikel in erster Linie mechanisch generiert werden und nicht das Produkt von Verbrennungsprozessen sind.

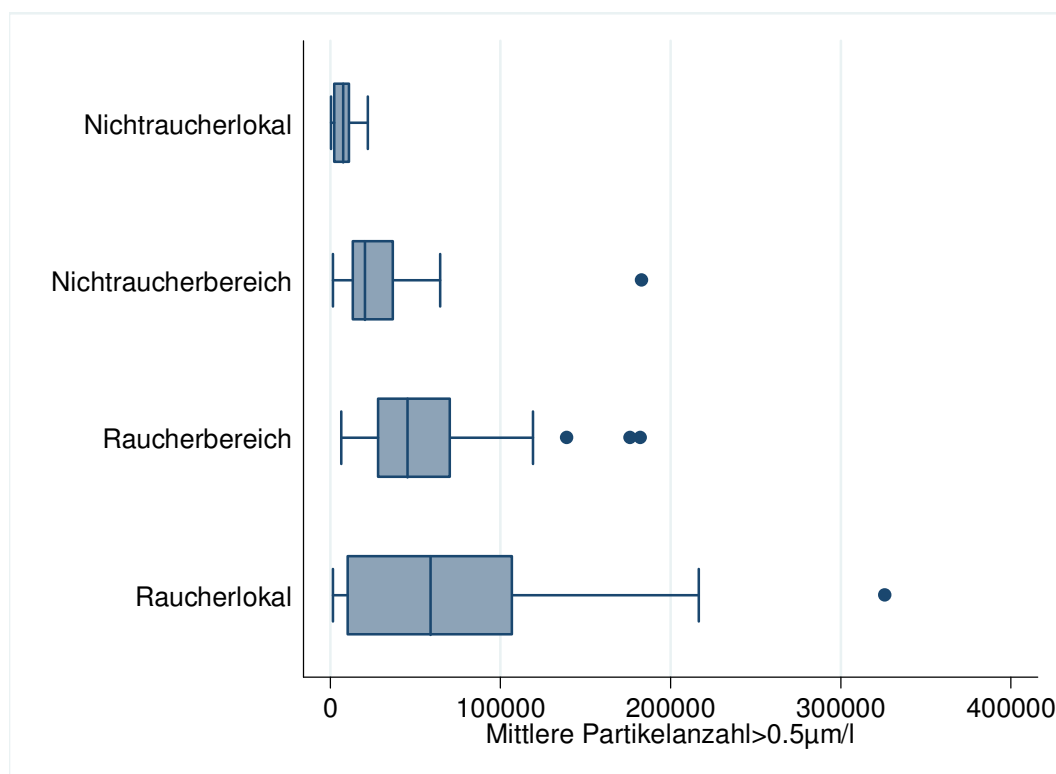
Die in der deskriptiven Analyse offenkundig erscheinenden Zusammenhänge zwischen der Rauchregelung und der Belastung mit PM2.5 wurden durch eine Regressionsanalyse bestätigt. Für diese wurde zunächst der Einfluss der Rauchregelung isoliert von anderen möglichen Erklärungsvariablen modelliert. Als Referenzregime wurde das Nichtraucherlokal gewählt. Es zeigte sich, dass alle anderen Rauchregelungen signifikant zu einer deutlichen Mehrbelastung der Luft mit PM2.5 führen. Als weiterer Einflussfaktor war der Lokaltyp mit der PM2.5-Belastung assoziiert. Durch die Aufnahme dieses zusätzlichen Erklärungsfaktors haben sich die Unterschiede zwischen den Rauchregelungen jedoch nicht mehr bedeutsam verändert. Es zeigt sich, dass die Belastung mit PM2.5 im Durchschnitt um 3.3-fache (Vertrauensintervall von 1.93 bis 5.73) zunimmt, wenn man sich in einem Nichtraucherbereich statt in einem Nichtraucherlokal des gleich Lokaltyps befindet. Wenn man sich stattdessen in einem Raucherbereich befindet, muss man im Durchschnitt mit einer mehr als 6-fach höheren PM2.5-Belastung als in einem Nichtraucherlokal rechnen (Vertrauensintervall von 3.59 bis 10.43). Schliesslich ist der PM2.5-Wert in einem Raucherlokal ca. 4.6-fach höher als in einem Nichtraucherlokal (Vertrauensintervall von 2.64 bis 8.15). Alle Werte sind statistisch hochsignifikant (siehe Anhang 3). Die Faktoren sind ähnlich hoch wie jene in der deskriptiven Analyse. Daraus kann geschlossen werden, dass die beobachteten Unterschiede tatsächlich eine Folge der Rauchregelung sind und nicht auf die unterschiedlichen Lokaltypen zurückzuführen sind.

Im Vergleich zu einer Bar beträgt der durchschnittliche Wert für PM2.5 in Restaurants mit einer identischen Raucherregelung nur das ca. 0.5-fache der Belastung (Vertrauensintervall von 0.32 bis 0.72) (siehe Anhang 3).

3.1.2 Durchschnittliche Anzahl Partikel

Ähnliche deutliche Unterschiede zwischen den Rauchregelungen zeigen sich, wenn man die Anzahl der kleinen Partikel ($>0.5\ \mu\text{m}$) misst. Die durchschnittliche Partikelanzahl >0.5 in NR-Lokalen betrug 7'800, in NR-Bereichen 29'700, in R-Bereichen 57'100, und in R-Lokalen 74'100. Abbildung 4 gibt die Datenverteilung in den verschiedenen Lokaltypen wieder. Es ist allerdings zu beachten ist, dass die Partikelanzahl (für alle Rauchregelungen) effektiv um Grössenordnungen höher liegen sollte. Die Unterschätzung liegt darin, dass das Aerocet 531 Messgerät nur Partikel grösser als 0.5 Mikrometer detektiert (siehe Abbildung 2).

Abbildung 4: Anzahl der Partikel grösser als 0.5 Mikrometer (durchschnittliche Belastung) für verschiedene Rauchregelungen (Zahlen zu dieser Abbildung in Tabelle 6, Anhang 2).



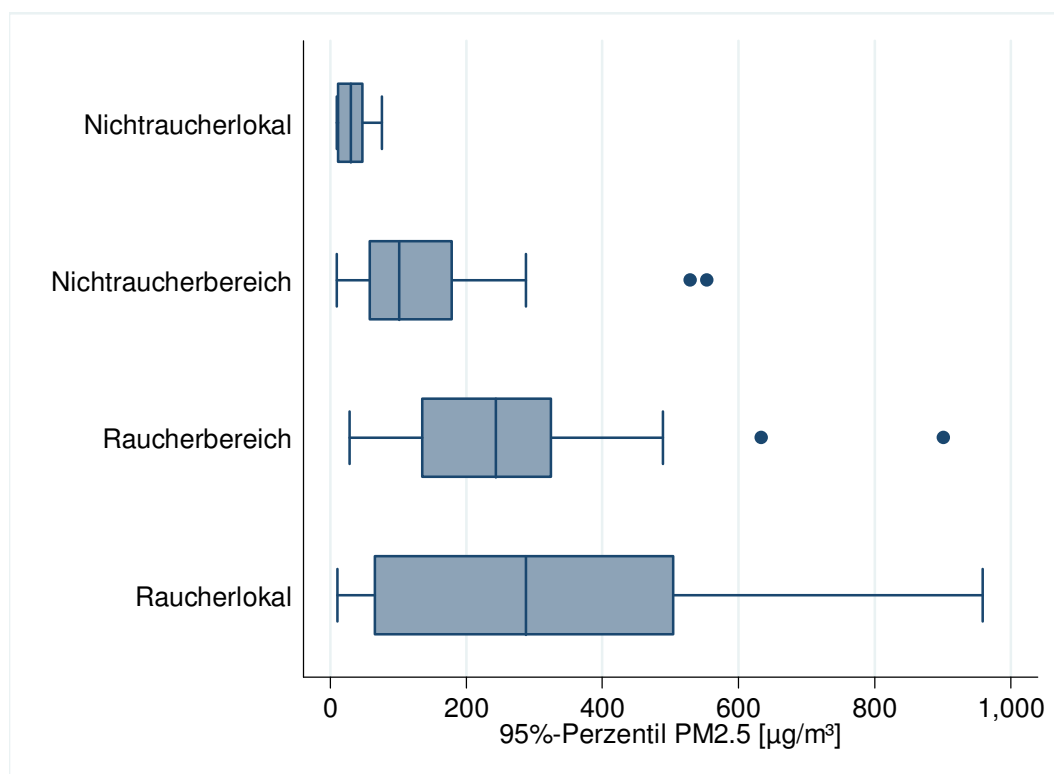
Wie bei der Belastung mit PM_{2.5} bestätigt ein Regressionsmodell auch hier die Ergebnisse der deskriptiven Analyse. Hierzu wurde wieder ein Model A und ein Model B mit den gleichen erklärenden Variablen wie für die Belastung mit PM_{2.5} geschätzt. Wieder erwiesen sich die Rauchregelung vor Ort und der Lokaltyp als signifikant. Es zeigt sich, dass die durchschnittliche Belastung im Vergleich zu einem Nichtraucherlokal im Nichtraucherbereich um das ca. 4.38-fache zunimmt (Vertrauensintervall von 2.40 bis 8.00). Die anderen Werte Tabelle 20 in Anhang 3 sind analog zu interpretieren.

Der Lokaltyp „Restaurant“ führt zu einer nur 0.43-fachen Partikelanzahl_{>0.5} im Vergleich zu einer Bar mit gleicher Raucherregelung. Das Vertrauensintervall beträgt 0.27 bis 0.69.

3.1.3 Spitzenbelastung mit PM_{2.5}

Für die Beurteilung der jeweiligen Spitzenbelastungen ist es sinnvoll, zusätzlich die 95%-Perzentile der Lokalmessungen miteinander zu vergleichen. In den Spitzenbelastungen zeigt sich noch ausgeprägter, wie gross die Unterschiede zwischen den Raucherlokalen und allen anderen Rauchregelungen sind. Die folgende Abbildung stellt 95%-Perzentile für die Belastung mit PM_{2.5} dar.

Abbildung 5: Verteilung der 95%-Perzentile der Messungen von PM 2.5 in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ für verschiedene Rauchregelungen. (Zahlen zu dieser Abbildung in Tabelle 7, Anhang 2)

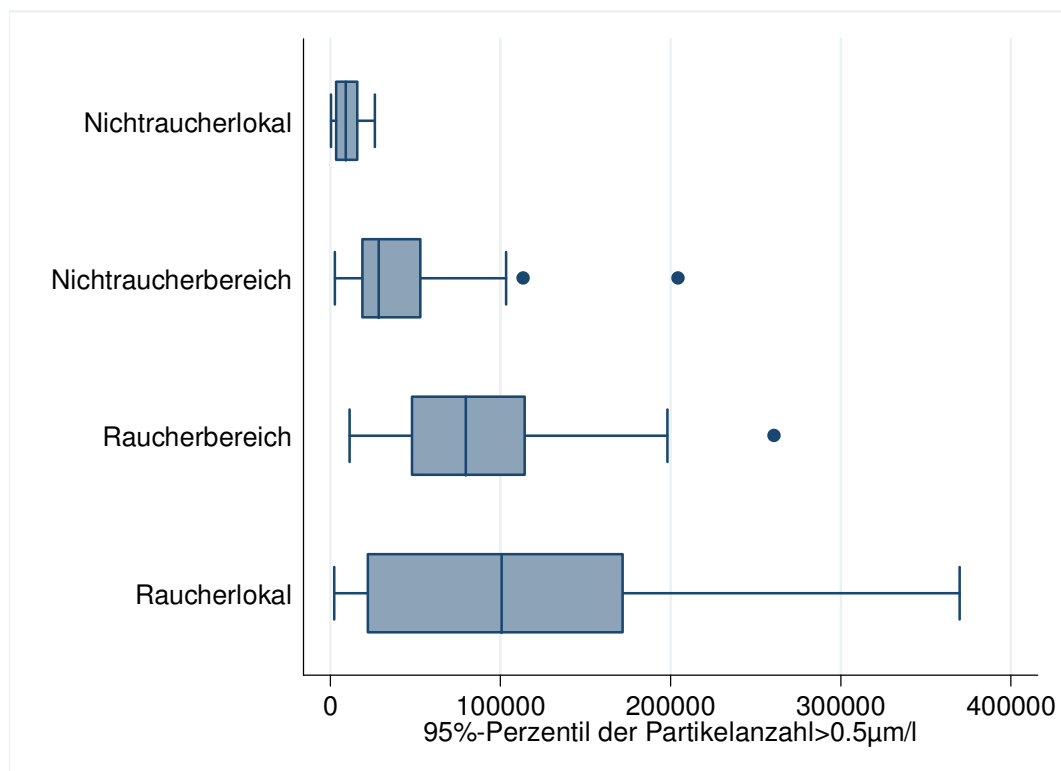


3.1.4 Spitzenbelastung in der Partikelanzahl

Dass die Spitzenbelastungen zwischen den verschiedenen Rauchregelungen auch im Bezug auf die Anzahl der Partikel >0.5 grosse Unterschiede aufweisen können, zeigt schon die Tatsache, dass die höchste gemessene mittlere Partikelanzahl >0.5 in einem Nichtraucherlokal 22'200 Partikel/l betrug, während in Raucherlokalen in 8 von 31 Lokalen (26%) die mittlere Partikelanzahl $>0.5\mu\text{m}$ 100'000 Partikel/l überschritt. Um ein umfassenderes Bild von der Spitzenbelastung mit kleinen Partikeln zu erhalten, werden in der folgenden Abbildung die 95%-Perzentile für die Partikelanzahl >0.5 Mikrometer dargestellt.

Es ist darauf hinzuweisen, dass die Unterschiede in der Spitzenbelastung gerade für die kleinen Partikel besonders ausgeprägt sind, während für grössere Partikel (>5.0 Mikrometer) keine grossen Unterschiede zwischen den verschiedenen Rauchregelungen bestehen (siehe Abbildung 13 im Anhang 3).

Abbildung 6: Verteilung der 95%-Perzentile der Messungen der Anzahl der Partikel grösser als 0.5 Mikrometer für verschiedene Rauchregelungen (Zahlen zu dieser Abbildung in Tabelle 8, Anhang 2).



3.2 Einflussfaktoren auf die Feinstaubbelastung in Raucherlokalen

3.2.1 Der Einfluss der räumlichen Trennung von Raucher- und Nichtraucherbereichen

Um der Frage nachzugehen, inwieweit eine räumliche Trennung der Raucher- und Nichtraucherbereiche einen Einfluss auf die Feinstaubbelastung hat, wurden die Werte für PM_{2.5} und Partikelanzahl>0.5 für Lokale mit getrennten Messreihen im Raucher- und Nichtraucherbereich zusammengestellt. Die vollständige Tabelle mit den Einzelergebnissen ist im Anhang 2 dargestellt. Sie zeigt für jedes Lokal die Durchschnittswerte zweier zeitlich unmittelbar aufeinander folgenden Messreihen, von denen eine im Raucher- und die andere im Nichtraucherbereich durchgeführt wurde. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse findet sich in den folgenden Tabellen.

Tabelle 2: Mittelwerte und Standardabweichungen für PM_{2.5} in µg/m³ im Raucher- und Nichtraucherbereich gleicher Lokale

Räumliche Trennung	Nichtraucherzone			Raucherzone	
	Anzahl	Mittelwert	Std.-Abw.	Mittelwert	Std.-Abw.
Ja	14	79.5	49.7	181.2	107.3
Nein	13	130.8	121.5	172.7	122.8
Total	1	104.2	93.4	177.1	112.8

Tabelle 3: Mittelwerte und Standardabweichungen für Partikelanzahl >0.5/l im Raucher- und Nichtraucherbereich gleicher Lokale.

Räumliche Trennung	Mittelwert		Std-Abw.	
	Anzahl	NR-Zone	NR-Zone	R-Zone
Ja	28'724	19'507	68'094	45'112
Nein	43'146	47'028	59'851	47'499
Total	28'724	19'507	68'094	45'112

Die Tabellen zeigen deutlich, dass die räumliche Unterteilung in einem Lokal eine Rolle spielt: sind der Nichtraucherbereich und der Raucherbereich räumlich nicht abgetrennt (d.h. Nichtraucher- und Raucherbereich befinden sich de facto im selben Raum), finden sich im Nichtraucherbereich meist annähernd gleich hohe Feinstaubkonzentrationen wie im Raucherbereich. In einem räumlich abgetrennten Nichtraucherbereich sind die Werte tiefer, liegen im Durchschnitt aber immer noch dreimal höher als in einem Nichtraucherlokal.

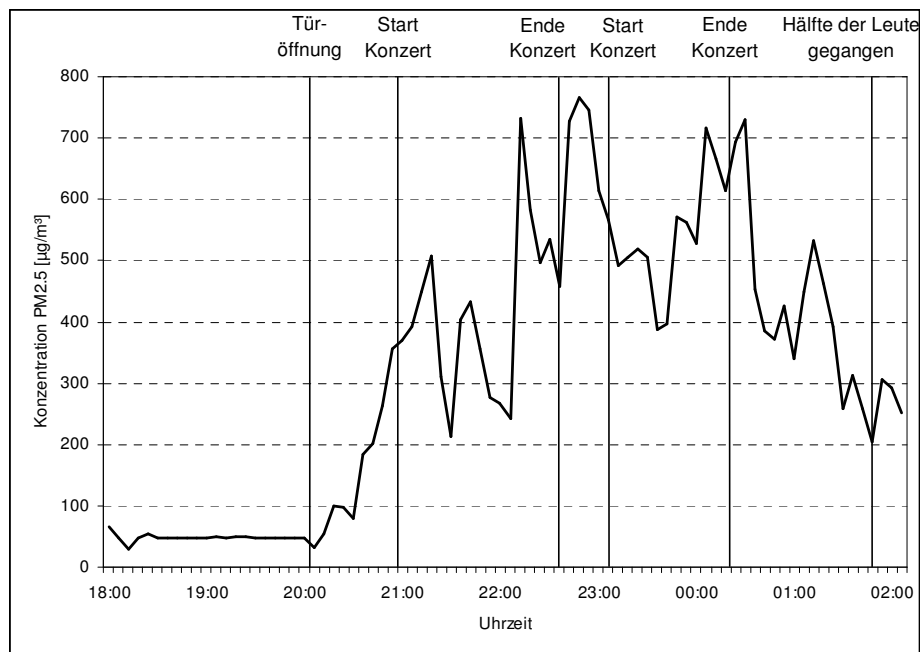
Es zeigt sich aber auch, dass die Unterschiede zwischen den einzelnen Lokalen sehr gross ausfallen können. Einige Extremwerte können durch Besonderheiten vor Ort plausibel erklärt werden. Beispielsweise bestand das Lokal Nr. 17 aus einem grossen Raum auf zwei Ebenen, die durch eine Treppe miteinander verbunden sind. Zwar darf nur auf der einen Ebene geraucht werden, doch führte die sehr hohe Zahl von Rauchenden (ca. 50 Personen) zu einer hohen Feinstaubbelastung, die sich im offenen Raum offenbar gut verteilte (siehe Tabelle 18 im Anhang 3). Ein Lokal mit extrem niedriger Feinstaubbelastung sowohl im Raucher- als auch im Nichtraucherbereich ist das Lokal Nr. 6, in dem zunächst ein Konzert stattfand und in dem erst gegen Ende des Messzeitraums überhaupt geraucht wurde. Lokal Nr. 8 profitierte offenbar von einer sehr leistungsfähigen Belüftungsanlage im gesamten Gebäude. In Lokal Nr. 15 scheint die Frischluftzufuhr (die während der Messung auf der höchsten Stufe lief) den Nichtraucherbereich gut zu schützen. Interessant ist auch die Messung in Lokal Nr. 3 (siehe Tabelle 18 im Anhang 3). Dort wird die Frischluft im Raucherbereich ins Lokal geführt und die Abluft im Nichtraucherbereich abgesogen. Damit resultiert im Nichtraucherbereich ($280 \mu\text{g}/\text{m}^3$) eine höhere PM_{2.5} Konzentration als im Raucherbereich ($229 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Auch wenn im Einzelfall eine gute Lüftung offenbar wesentlich zum Schutz der Nichtraucher beitragen kann, scheinen die in der Praxis eingesetzten Um- und Belüftungssysteme nicht generell geeignet zu sein, die Feinstaubbelastung in den Nichtraucherbereichen gering zu halten, was sich auch in den Regressionsanalysen bestätigt.

3.2.2 Zusammenhang zwischen Anzahl Rauchenden und der Feinstaubbelastung

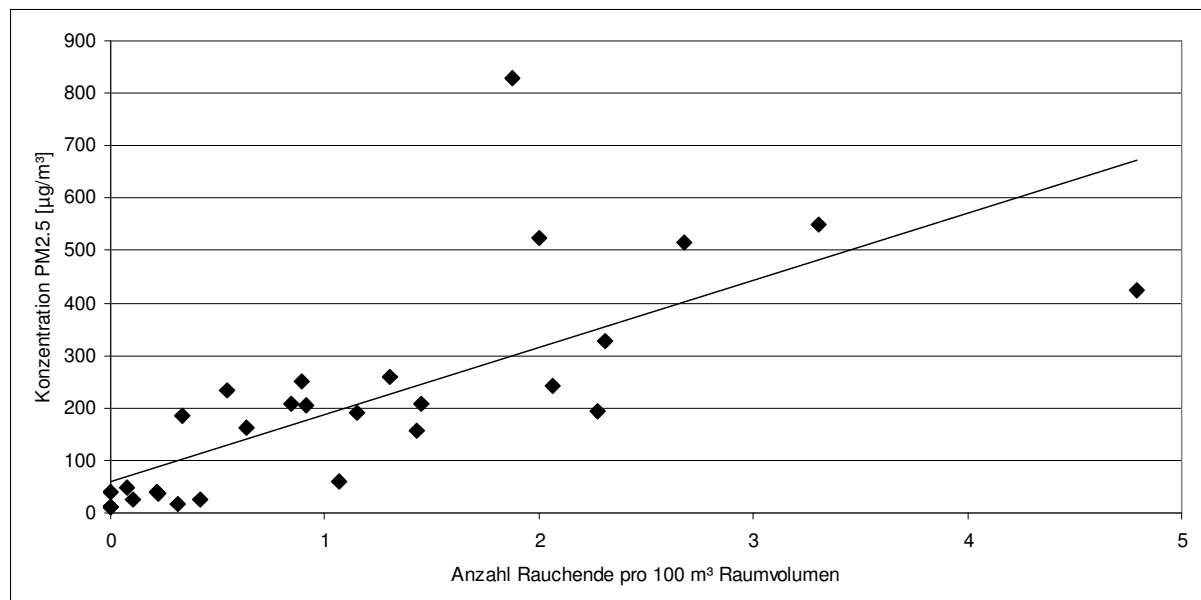
Auch die Anzahl der Rauchenden in einem Lokal hat einen grossen Einfluss auf die Belastung mit Feinstaub – insbesondere auf die Belastung mit kleinen Partikeln. Dies zeigt eine Langzeitmessung über 8 Stunden im Foyer eines Konzertlokals. Zwischen 18 Uhr und 20 Uhr war das Lokal geschlossen und es hielten sich keine rauchenden Personen im Foyer auf. Nach Türöffnung (20 Uhr) befanden sich 14 Personen im Foyer, wovon 3 geraucht haben um 22 Uhr waren es ca. 70 Gäste, davon ca. 20 rauchende Personen.

Abbildung 7: Verlauf der PM2.5 Konzentration während 8 Stunden im Foyer eines Konzertlokals



Die Langzeitmessung bestätigt das Bild, das sich auch durch eine Regressionsanalyse aus den Daten der vorliegenden Studie ergibt. In Abbildung 8 ist ein klarer Zusammenhang zwischen der PM2.5-Belastung und der Raucherichte in einem Lokal ersichtlich. Die PM2.5 Belastung erhöht sich um ca. $170 \mu\text{g}/\text{m}^3$ bei einem Anstieg der Raucherichte um eine Person pro 100 m^3 .

Abbildung 8: Zusammenhang zwischen der Feinstaubbelastung (PM2.5) und der mittleren Anzahl Rauchenden pro 100 m^3 Raumvolumen



3.3 Weitere Einflussfaktoren

Als Gründe für die unterschiedlich hohe Feinstaubbelastung in den Lokalen müssen auch andere Faktoren als die Rauchregelung in Betracht gezogen werden. Hierzu wurden erstens potentielle zusätzliche Feinstaubquellen (zusätzlich zum Tabakrauch) erfasst. Zweitens wurde die Art der Lüftung in den untersuchten Betrieben erfasst und analysiert.

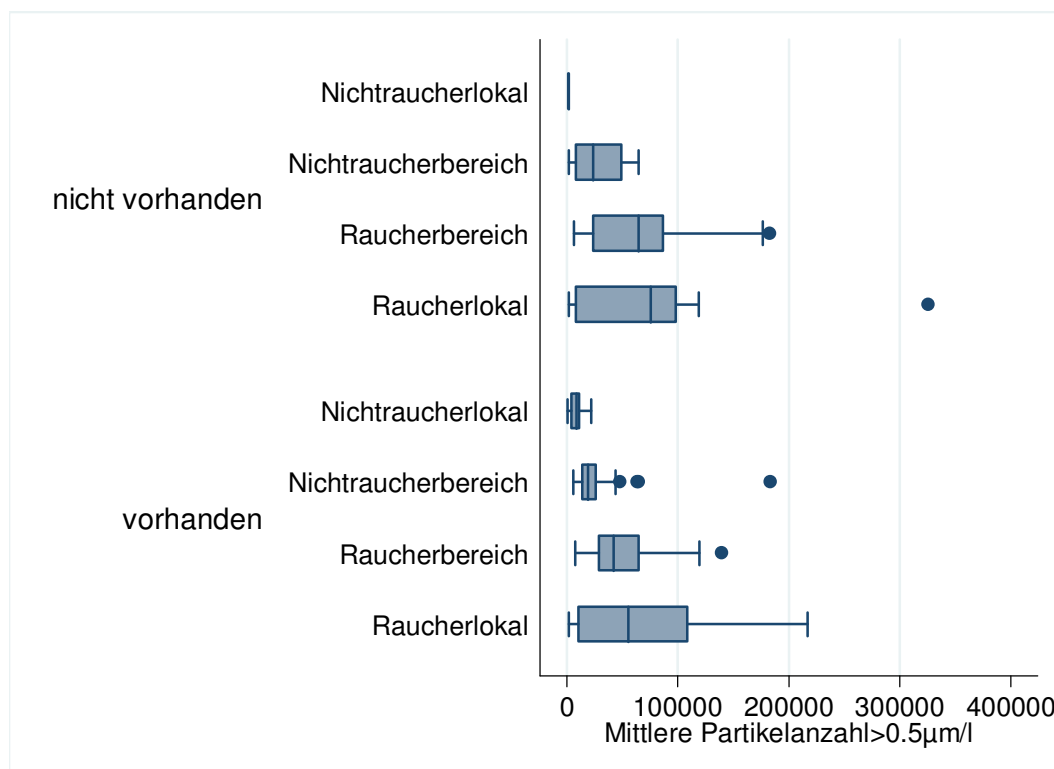
3.3.1 Andere Feinstaubquellen

Häufig fanden sich in den untersuchten Gaststätten offene Küchen und Kerzen als zusätzliche Feinstaubquellen. In einer kleinen Zahl von Lokalen wurden aber auch andere Feinstaubquellen (z.B. offene Pizzaöfen) angetroffen. Die folgende Tabelle differenziert die Gaststätten neben ihrem Raucherregime danach, ob weitere Feinstaubquellen vorhanden waren oder nicht.

Tabelle 4: Raucherregime vor Ort und andere Feinstaubquellen (vorhanden: mind. eine zusätzliche Quelle)

Raucherregime vor Ort	<i>beliebige Feinstaubquelle</i>		
	nicht vorhanden	vorhanden	Total
	Anzahl	Anzahl	Anzahl
Nichtraucherlokal	2	17	19
Nichtrauchbereich	12	25	37
Raucherbereich	12	30	42
Raucherlokal	11	20	31
Total	37	92	129

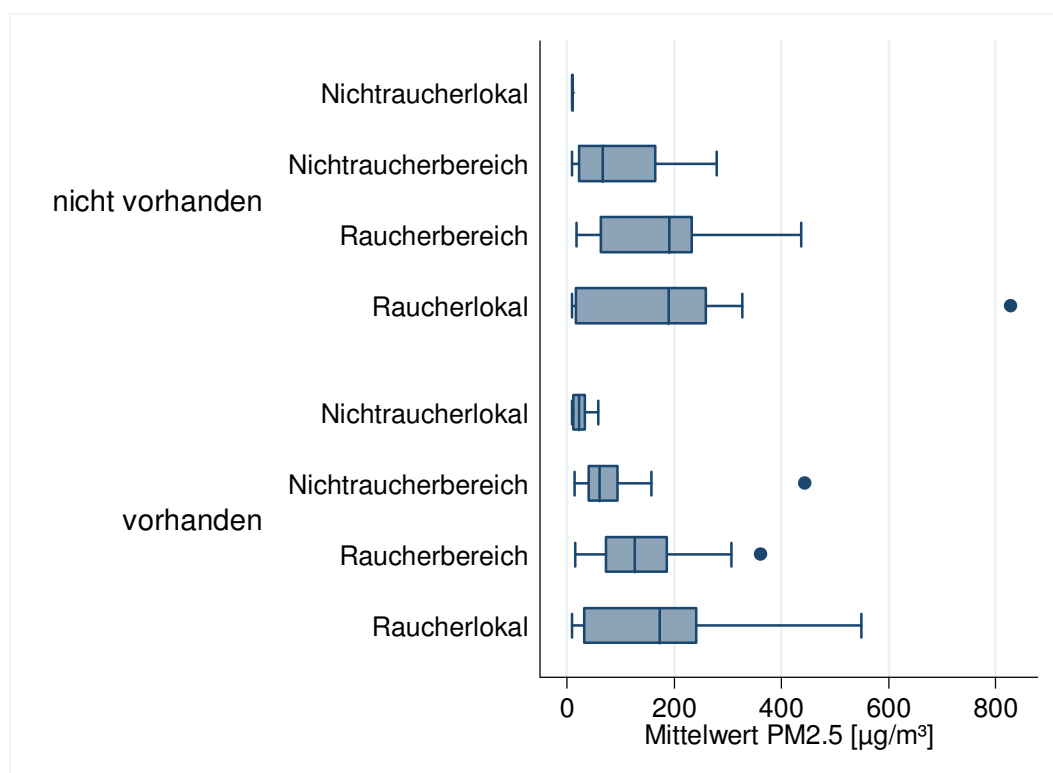
Abbildung 9: Anzahl der Partikel > 0.5 Mikrometer pro Liter und andere Feinstaubquellen (durchschnittliche Belastung; Zahlen siehe Tabelle 9 in Anhang 2)



Die Messergebnisse legen jedoch die Vermutung nahe, dass die Feinstaubbelastung durch das Rauchen die Gesamtbelastung im betrachteten Grössenbereich ganz klar dominiert. Die Belastung durch weitere Quellen fällt deutlich weniger stark ins Gewicht.

Es zeigt sich, dass die Zusatzbelastung einzig für Nichtraucherlokale relevant sein kann. Während die durchschnittliche Partikelanzahl >0.5 in Nichtraucherlokalen ohne zusätzliche Feinstaubquelle ca. 1500 betrug, stieg sie in Nichtraucherlokalen mit zusätzlicher Feinstaubquelle um mehr als 550% auf 8500. Für die durchschnittliche Belastung mit $PM_{2.5}$ in Nichtraucherlokalen ergibt sich ein ähnliches Bild: Ohne zusätzliche Feinstaubquellen beträgt sie $10.4 \mu g/m^3$ und mit zusätzlichen Feinstaubquellen $26.5 \mu g/m^3$. Bei diesen Ergebnissen ist allerdings einschränkend zu erwähnen, dass sich in der Stichprobe nur 2 NR-Lokale mit Feinstaubquellen befanden.

Abbildung 10: Masse der Partikel $PM_{2.5}$ in $\mu g/m^3$ und andere Feinstaubquellen (durchschnittliche Belastung; Zahlen siehe in Tabelle 10 Anhang 2)



3.3.2 Lüftung

In einem weiteren Untersuchungsschritt wurde untersucht, ob und inwieweit die Lüftung zur Reduktion der Feinstaubbelastung beiträgt. Hierzu wurden die Gaststätten danach aufgeteilt, ob eine konventionelle Lüftung vorhanden war oder nicht. Als konventionelle Lüftung wurde definiert, wenn entweder aktiv Frischluft zugeführt wurde oder alte Luft abgesogen wurde (Be- oder Entlüftungsanlagen). Alternative Lüftungssysteme waren passive Systeme (z.B. Fenster oder Türen) oder Ventilationssysteme (Umlüftung). Tabelle 17 im Anhang 3 gibt einen Überblick über die Zahl der Gaststätten, die den entsprechenden Kategorien zuzuordnen sind.

Abbildung 11: Anzahl der Partikel grösser als 0.5 Mikrometer pro Liter und konventionelle Lüftung
(durchschnittliche Belastung, Zahlen siehe Tabelle 11 in Anhang 2)

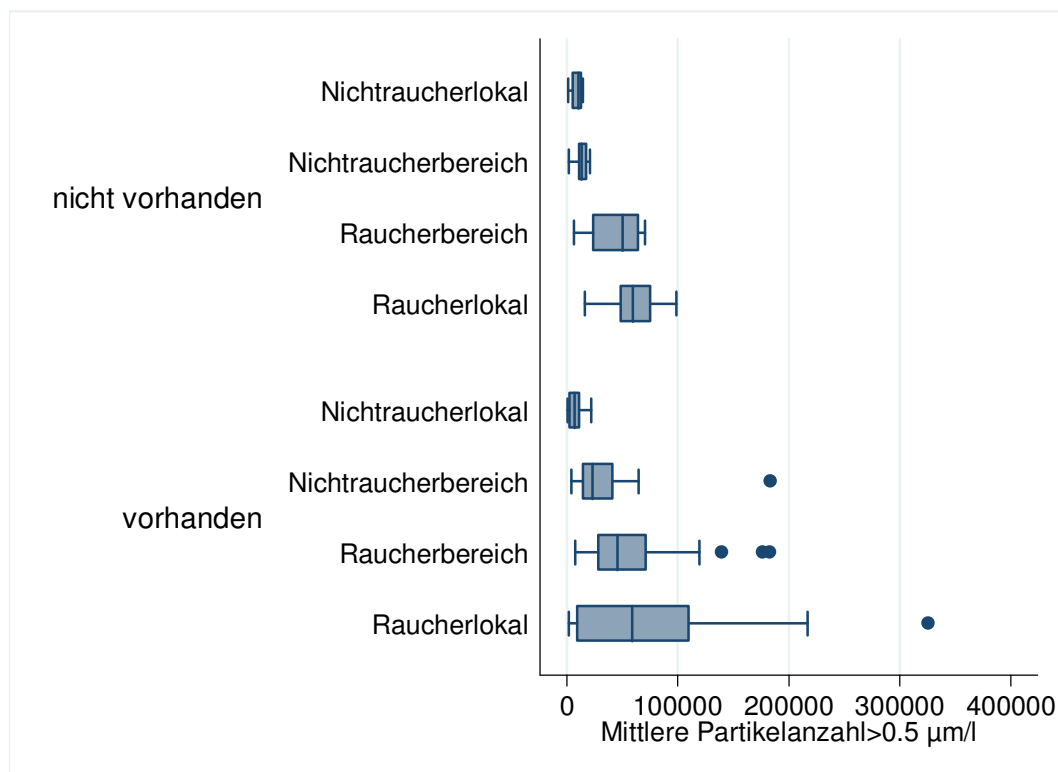
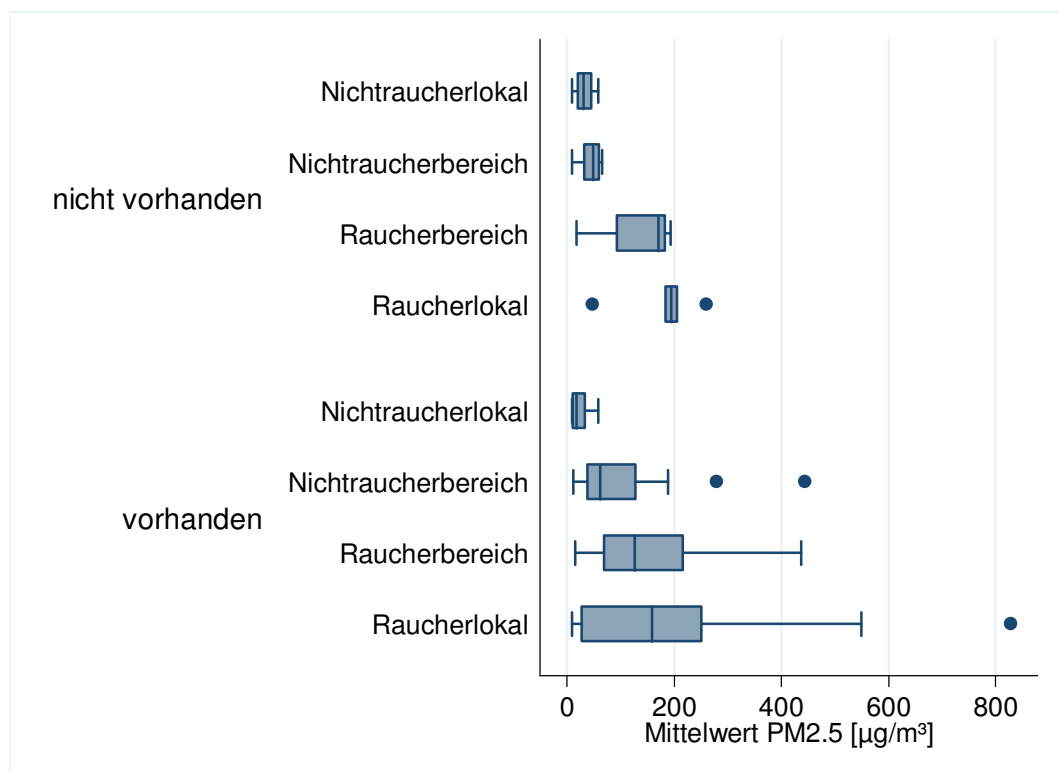


Abbildung 12: Masse der Partikel PM 2.5 in µg/m³ und konventionelle Lüftung
(durchschnittliche Belastung, Zahlen siehe Tabelle 12 in Anhang 2)



Allerdings scheint sich zu zeigen, dass der Effekt der Lüftung auf die Feinstaubbelastung (insbesondere mit kleinen Partikeln) eher gering ist. Möglicherweise trägt eine konventionelle Lüftung eher zu einer Verwirbelung der feinen Partikel bei als zu deren Reduktion. So ist beispielsweise die Partikelbelastung in Nichtraucherabteilen höher, wenn die Gaststätte eine Lüftung aufweist (s. auch Tabelle 14 im Anhang 2). Nicht auszuschliessen ist auch, dass der geringe Effekt der Lüftung darauf zurückzuführen ist, dass diese insbesondere dort zum Einsatz kommt, wo viel geraucht wird („Reversed Causality“), wodurch es insgesamt zu einer Nivellierung der gemessenen Luftbelastung kommt.

3.3.3 Weitere Faktoren

Es wurden weitere Regressionsmodelle für die Belastung mit PM_{2.5} getestet, in denen auch für andere mögliche Erklärungsvariablen, welche z.B. die Wetterbedingungen oder die Raumgrösse erfassten, kontrolliert wurde (siehe Parameterliste in Anhang 4). Keiner dieser Parameter war signifikant mit der Feinstaubbelastung assoziiert.

4 Diskussion

Die Analyse ergab, dass die Feinstaubbelastung durch Tabakrauch erheblich ist und sehr stark von der Rauchregelung abhängt:

- In Lokalen, in denen geraucht wird, finden sich sehr hohe Konzentrationen an lungengängigem, gesundheitsschädigendem Feinstaub (PM_{2.5}).
- Die Feinstaubkonzentrationen in Raucherlokalen liegen ein Mehrfaches über den gemessenen Konzentrationen in Nichtraucherlokalen.
- Die hohen Belastungen sind auf den Tabakrauch zurückzuführen.
- Auch in abgetrennten Nichtraucherräumen wird der Schutz für Gäste und Servicepersonal nicht ausreichend gewährleistet. Die Feinstaubbelastung ist in einem abgetrennten Nichtraucherabteil dreimal so hoch wie in einem Nichtraucherlokal. Ein umfassender und wirksamer Schutz vor Passivrauchen ist daher nur in vollständigen Nichtraucherlokalen garantiert.

Es zeigt sich sehr deutlich, dass die Gäste und das Servicepersonal in Lokalen, die keine strikte Nichtraucherpolitik fahren, mit einer deutlich höheren Feinstaubbelastung gerade mit feinen und ultrafeinen Partikeln zu rechnen haben. Der direkte Vergleich zwischen Raucher- und Nichtraucherbereichen innerhalb eines Lokals legt zwar die Vermutung nahe, dass in einigen Lokalen sehr effektive Lüftungsanlagen massgeblich zum Schutz der Nichtraucher beitragen, er zeigt aber auch die grosse Varianz zwischen den Lokalen auf. Die Regressionsanalysen weisen darauf hin, dass die Mehrzahl der derzeitigen Lüftungsanlagen diesen Schutz kaum gewährleistet und vielleicht sogar eher zur Verwirbelung der Partikel beiträgt. Ferner konnte nachgewiesen werden, dass zusätzliche rauchende Personen in einem Lokal zu einer signifikanten Erhöhung der Luftbelastung mit feinen und ultrafeinen Partikeln führen. Diese Ergebnisse sind äusserst robust.

Dennoch verbleibt zwischen den Messwerten verschiedener Lokale eine grosse Varianz, die im Rahmen der vorliegenden Studie nicht erklärt werden kann. Weitere Studien könnten dazu beitragen, genauere Einsichten zu generieren. Hierzu gehört im Wesentlichen eine verbesserte Erfassung von Rahmendaten vor und während der Messung. Diese werden im nächsten Abschnitt aufgezählt.

Verbesserungspotential für Zusatzmessungen oder zukünftige Projekte

Der Messzeitraum muss zusammen mit dem Betreiber des Lokals festgelegt werden, um die Messungen dann durchzuführen, wenn das Lokal gut besucht ist. Der genaue Messstandort der Geräte muss auch im Vorherein vereinbart werden, was jedoch einen vorgängigen Augenschein durch geschultes Personal bedingt. Es geschah mehrmals, dass die Messteams von den Wirten auf sehr ungünstige Messpunkte, z.B. in einer Ecke des Raumes, verwiesen wurden. Obwohl den Wirten vorab Fragen zur Lüftung gestellt wurden, war die Erfassung der genauen Art und Effektivität der Lüftung letztlich selten möglich, was im Wesentlichen darauf zurückzuführen ist, dass die Wirte keine vollständigen Angaben zu den Daten der Lüftung machen konnten. So konnte häufig nicht bestimmt werden, ob sich das Messgerät im Zuluft- oder Abluftstrom befand.

Die direkte Gegenüberstellung der Messwerte zwischen den Raucher- und Nichtraucherbereichen gleicher Lokale wies eine grosse Varianz zwischen den Lokalen aus. Die Raucherdichte erklärt einen wesentlichen Anteil dieser Varianz. Vermutlich spielt aber auch die Effektivität der Lüftung eine Rolle. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Nichtsignifikanz des Einflusses der Lüftung in den Regressionen (siehe Kapitel 3.3.2) der mangelhaften Erfassung der Lüftungssituation zuzuschreiben ist.

Während der Messung wurden von den Messteams alle zehn Minuten die Anzahl der rauchenden Personen und der Abstand des Messgerätes zur nächsten rauchenden Person notiert (nebst weiteren Angaben wie z.B. dem Prozentsatz der Zigarren). Diese Frequenz ist möglicherweise zu niedrig, weil es z.B. vorkam, dass nach einem Essen innerhalb eines Zehn-Minuten-Intervalls eine ganze Personengruppe zum Rauchen überging, die Zigaretten aber zum nächsten Erfassungszeitpunkt wieder verloschen waren. Eine Erhöhung der Erhebungsfrequenz bedingt jedoch eine noch höhere personelle Dotierung der Messteams (für die vorliegenden Messungen wurden Zweierteams eingesetzt, welche mit den zu erhebenden Informationen schon ausgelastet waren). Nichtsdestotrotz zeigen die erhobenen Daten zum Rauchen eine klare Assoziation mit der Feinstaubbelastung.

Ferner wäre ein feineres Raster zur Erfassung der räumlichen Gegebenheiten wünschenswert gewesen, insbesondere im Hinblick auf die Trennung zwischen Raucher- und Nichtraucherbereichen. Im Idealfall gehören dazu z.B. auch Angaben, wie oft eine ev. vorhandene Türe zwischen den beiden Bereichen auf- und zugeht. Optimal wäre auch, wenn in solchen Situationen die Messungen gleichzeitig in beiden Bereichen durchgeführt werden könnten.

In dieser Studie wurden keine Aussenluftmessungen durchgeführt. Gemäss der PM10-Messung an der NABEL-Station in Bern, als Proxy für das Schweizer Mittelland, war die Aussenluftbelastung an den vier Messwochenenden unterschiedlich. Am 1. und 3. Messwochenende war die Belastung eher hoch; am 2. tief und am letzten durchschnittlich. Wahrscheinlich herrschte am 1. und 3. Messwochenende eine Inversionslage, die im gesamten Mittelland zu erhöhten Feinstaubbelastungen führte. Es ist zu erwarten, dass die gemessene Feinstaubbelastung in Nichtraucherlokalen hauptsächlich durch die Aussenluftbelastung determiniert ist. Bei den anderen Rauchregelungen dürfte der Einfluss der Aussenluftbelastung im Allgemeinen jedoch eher klein, wenn nicht sogar vernachlässigbar sein.

Die in den Gastronomiebetrieben eingesetzten Partikelmessgeräte haben den Vorteil, dass sie durch ihre geringe Baugrösse und den niedrigen Geräuschpegel kaum auffallen und deshalb keine Störung des Betriebes und der Gäste darstellen. Nachteilig ist, dass die untere Erfassungsgrenze mit 0.5 Mikrometern sehr hoch liegt, und ein beachtlicher Teil der relevanten Partikel damit nicht erfasst wird, da das Maximum der Anzahlgrössenverteilung von frischem Zigarettenrauch bei einem Durchmesser zwischen 0.1 und 0.15 Mikrometer liegt. Bei sehr hoher Luftbelastung (über 106'000 Partikel pro Liter) tritt zusätzlich ein Koinzidenzfehler auf, durch welchen die Partikelanzahl zu tief und der Partikeldurchmesser und damit auch die Partikelmassenkonzentration zu hoch bestimmt wird (mehrere kleine Partikel werden als ein Grosses detektiert). Diesen negativen Effekten könnte mit dem Einsatz von Messgeräten, welche bis in den unteren Nanometerbereich messen, begegnet werden. Allerdings sind solche Geräte relativ gross und nur bedingt oder gar nicht portabel, weshalb sich der Aufwand für die Messungen beträchtlich erhöhen würde und der Betrieb im Lokal gestört würde.

Die absoluten Werte für die Partikelanzahlkonzentration >0.5 Mikrometer sind mit einer Messunsicherheit von $\pm 20\%$ behaftet, jene für die Partikelmassenkonzentration (Massenapproximation basierend auf der Partikelanzahlmessung) mit $\pm 30\%$. Da es sich beim vorliegenden Projekt nicht um einen Absolutvergleich der Messwerte mit Grenzwerten handelt, sondern um Relativvergleiche, sind die ausgewiesenen Messunsicherheiten unkritisch. Dies vor allem, da sie durch die flankierende Qualitätssicherung über die ganze Projektdauer erfasst wurden und somit für alle Messungen gleichermassen gelten.

Anhang 1: Rauchregelungen in Gastronomielokalen

Für die Kennzeichnung der Rauchsituation wurden zwei Variablen erfasst. Zum einen wurde die generelle Rauchregelung im betreffenden Betrieb protokolliert. Hierzu wurde nach Lokalen mit getrennten Raucher- und Nichtraucherbereichen, Nichtraucherlokalen, Raucherlokalen und Lokalen mit einer zeitlichen Rauchregelung unterschieden. Um die Rauchsituation in dem jeweiligen Raum, in dem Messungen durchgeführt wurden, exakter beschreiben zu können, wurde die Rauchsituation am Messstandort mit einer weiteren Variablen erfasst. Die folgende Tabelle zeigt die Kombinationen von genereller Raucherreglung im jeweiligen Betrieb und Rauchsituation am Messstandort.

Kombinationen von Rauchregelung im Betrieb und Rauchsituation am Messstandort

Generelle Rauchregelung	Rauchsituation am Messstandort						Total
	NR-Abteil	NR-Lounge	NR-Zimmer	R-Abteil	R-Lounge	R-Zimmer	
	Anzahl	Anzahl	Anzahl	Anzahl	Anzahl	Anzahl	
Nichtraucherlokal	2	17	0	0	0	0	19
Getrennte R-NR-Bereiche	34	0	0	42	0	0	76
Raucherlokal	0	1	0	2	26	0	29
zeitliche Rauchregelung	0	0	1	1	0	3	5
Total	36	18	1	45	26	3	129

Für die statistische Analyse wurde eine neue Variable konstruiert, welche einerseits die relevanten Aspekte der Rauchregelung vor Ort adäquat erfasst und andererseits in jeder Kategorie eine genügend hohe Fallzahl aufweist. Hierzu wurden die beiden Variablen „Rauchregelung im Betrieb“ und „Rauchsituation am Messstandort“ zu der neuen Variablen „*Rauchregelung*“ zusammengefasst, die allen weiteren Analysen zugrunde liegt.

Bei der Zuordnung der einzelnen Fälle zu einer Rauchregelung wurde wie folgt vorgegangen: Zum einen wurde für alle Lokale, die über ein Nichtraucherabteil verfügen, ermittelt, ob die Messung im Raucher- oder Nichtraucherabteil stattfand. Die Messwerte wurden entsprechend der Rauchregelung „Raucherabteil“ und „Nichtraucherabteil“ zugeordnet. Die Nichtraucherlounge in einem Raucherlokal wurde gleichfalls wie ein Nichtraucherabteil behandelt. Die verbleibenden Fälle betreffen die zeitliche Raucherreglung. Um hier zu sinnvollen Zuordnungen zu kommen, wurde im Detail angeschaut, ob zum Messzeitpunkt geraucht wurde und ob zusätzlich getrennte Bereiche für Raucher und Nichtraucher vorgesehen waren. Auf diese Weise kam man zu folgenden vier Rauchregelungen, die für die Datenanalyse unterschieden wurden:

1. Gänzlich rauchfreies Lokal: Nichtraucherlokal
2. Nichtraucherbereich in einem Lokal, in dem geraucht wird
3. Raucherbereich in einem Lokal, das auch über einen Nichtraucherbereich verfügt
4. Lokal ohne Raucheinschränkungen: Raucherlokal

Anhang 2: Tabellen zu den Abbildungen im Text

Tabelle 5: Tabelle zu Abbildung 3: Verteilung der PM2.5-Mittelwerte vs. Raucherregelung.

mean pm25	Nichtraucherlokal	Nichtraucherbereich	Raucherbereich	Raucherlokal	Total
Mean*	24.76	86.65	154.89	194.43	125.65
Sd*	16.09	84.90	105.19	199.00	135.15
Min*	9.50	9.50	15.01	10.00	9.50
p25*	10.59	35.86	69.65	27.29	33.31
p50*	20.39	60.97	134.38	184.18	68.80
p75*	34.74	106.74	214.01	251.74	184.23
Max*	58.73	443.81	437.17	828.55	828.55

* Legende: Mean=Mittelwert; Sd=Standardabweichung; Min=Minimum; p25=1. Quartil; p50=Median; p75=3. Quartil; Max=Maximum

Tabelle 6: Tabelle zu Abbildung 4: Verteilung der Mittelwerte der Partikelanzahl>0.5 vs. Raucherregelung.

mean g 0.5	Nichtraucherlokal	Nichtraucherbereich	Raucherbereich	Raucherlokal	Total
Mean	7'770	29'672	57'109	74'095	46'054
Sd	5'992	31'903	41'849	79'293	53'400
Min	416	1'452	6'373	1'640	416
p25	2'541	13'382	28'231	10'442	11'272
p50	7'787	20'488	45'552	59'255	24'359
p75	11'374	37'278	70'751	107'188	64'351
Max	22'178	183'045	182'565	325'871	325'871

Tabelle 7: Tabelle zu Abbildung 5: Verteilung der 95%-Perzentile PM2.5-Konzentration vs. Raucherregelung.

p95 pm25	Nichtraucherlokal	Nichtraucherbereich	Raucherbereich	Raucherlokal	Total
mean	31.83	140.47	255.08	316.89	204.18
sd	22.63	124.53	164.38	264.63	197.51
min	9.50	9.50	28.40	10.50	9.50
p25	11.50	58.30	135.90	66.20	58.30
p50	30.40	102.00	243.25	288.10	121.90
p75	48.30	179.60	325.80	504.80	288.00
max	76.20	553.70	901.70	958.80	958.80

Tabelle 8: Tabelle zu Abbildung 6: Verteilung der -95%-Perzentile der Partikelanzahl>0.5 vs. Raucherregelung.

p95 g 0.5	Nichtraucherlokal	Nichtraucherbereich	Raucherbereich	Raucherlokal	Total
Mean	9'817	41'870	89'794	112'066	69'621
sd	7'235	40'305	55'179	100'617	71'663
min	586	2'764	11'546	2'413	586
p25	3'685	18'906	48'243	22'164	18'547
p50	9'183	28'522	79'685	101'001	40'153
p75	16'177	53'341	114'678	172'156	102'265
max	26'335	204'463	260'801	369'951	369'951

Tabelle 9: Tabelle zu Abbildung 9: Verteilung der Mittelwerte der Partikelanzahl>0.5 vs. Raucherregelung stratifiziert für das Vorhandensein einer Feinstaubquelle.

keine Feinstaubquelle					
g 0.5	Nichtraucherlokal	Nichtraucherbereich	Raucherbereich	Raucherlokal	Total
mean	1'470	29'356	69'829	76'187	54'898
sd	549	23'623	58'113	93'484	64'953
min	1'082	1'452	6'373	1'640	1'082
p25	1'082	8'098	23'673	8'234	10'799
p50	1'470	23'796	64'745	75'387	32'032
p75	1'858	49'582	86'978	98'694	75'387
max	1'858	64'811	182'565	325'871	325'871
Feinstaubquelle vorhanden					
g 0.5	Nichtraucherlokal	Nichtraucherbereich	Raucherbereich	Raucherlokal	Total
mean	8'512	29'824	52'021	72'944	42'498
sd	5'902	35'649	33'186	72'965	47'931
min	416	5'706	7'664	1'779	416
p25	3'916	14'059	28'545	10'619	11'323
p50	8'509	18'941	42'350	55'576	22'138
p75	11'374	26'387	64'992	108'731	60'086
max	22'178	183'045	139'245	216'594	216'594

Tabelle 10: Tabelle zu Abbildung 10: Verteilung der PM2.5-Mittelwerte vs. Raucherregelung stratifiziert für das Vorhandensein einer Feinstaubquelle.

keine Feinstaubquelle					
PM2.5	Nichtraucherlokal	Nichtraucherbereich	Raucherbereich	Raucherlokal	Total
mean	10.37	96.37	187.92	199.46	152.06
sd	0.31	86.37	139.56	238.05	165.04
min	10.15	9.50	17.53	10.00	9.50
p25	10.15	22.63	63.22	17.10	32.02
p50	10.37	67.35	191.23	190.09	106.74
p75	10.59	166.24	234.27	260.06	216.91
max	10.59	279.83	437.17	828.55	828.55
Feinstaubquelle vorhanden					
PM2.5	Nichtraucherlokal	Nichtraucherbereich	Raucherbereich	Raucherlokal	Total
mean	26.45	81.99	141.68	191.66	115.03
sd	16.20	85.57	87.31	180.78	120.50
min	9.50	13.96	15.01	10.18	9.50
p25	11.50	41.13	72.83	31.96	34.02
p50	22.79	60.84	127.15	173.39	61.37
p75	34.74	95.83	187.08	242.88	163.40
max	58.73	443.81	362.06	549.42	549.42

Tabelle 11: Tabelle zu Abbildung 11: Verteilung der Mittelwerte der Partikelanzahl>0.5 vs. Raucherregelung stratifiziert für das Vorhandensein einer konventionellen Lüftung.

keine Lüftung					
g 0.5	Nichtraucherlokal	Nichtraucherbereich	Raucherbereich	Raucherlokal	Total
mean	9'054	12'759	44'167	59'597	31'926
sd	5'760	7'349	27'965	30'830	29'527
min	1'082	1'452	6'373	15'947	1'082
p25	5'128	10'799	23'695	48'702	10'799
p50	10'274	13'382	49'878	59'255	16'809
p75	12'980	17'671	64'638	75'387	58'738
max	14'585	20'492	70'539	98'694	98'694
konventionelle Lüftung					
g 0.5	Nichtraucherlokal	Nichtraucherbereich	Raucherbereich	Raucherlokal	Total
mean	7'428	32'315	58'471	76'883	48'346
sd	6'202	33'491	43'096	85'690	56'085
min	416	4'219	7'664	9'190	416
p25	2'541	14'129	28'231	9'190	11'272
p50	6'807	22'827	45'552	58'751	26'387
p75	11'272	41'402	71'498	110'273	64'811
max	22'178	183'045	182'565	325'871	325'871

Tabelle 12: Tabelle zu Abbildung 12: Verteilung der PM2.5-Mittelwerte vs. Raucherregelung stratifiziert für das Vorhandensein einer konventionellen Lüftung.

keine Lüftung					
PM2.5	Nichtraucherlokal	Nichtraucherbereich	Raucherbereich	Raucherlokal	Total
mean	32.87	43.37	138.40	178.73	99.75
sd	19.98	23.00	81.32	78.72	83.63
min	10.15	9.50	17.53	184.18	9.50
p25	19.73	32.02	92.99	184.18	32.02
p50	31.31	48.59	171.06	194.93	59.78
p75	46.02	60.84	183.81	206.52	184.18
max	58.73	65.91	193.94	260.06	260.06
konventionelle Lüftung					
PM2.5	Nichtraucherlokal	Nichtraucherbereich	Raucherbereich	Raucherlokal	Total
mean	22.59	93.42	156.63	197.44	129.85
sd	14.95	89.18	108.13	215.57	141.59
min	9.50	11.50	15.01	10.00	9.50
p25	10.59	38.50	69.65	27.01	34.74
p50	17.63	62.46	127.15	159.01	71.01
p75	34.74	128.58	216.91	251.74	187.08
max	58.23	443.81	437.17	828.55	828.55

Tabelle 13: Tabelle zu Abbildung 13 in Anhang 3: Verteilung der 95%-Perzentile der Partikelanzahl>5.0 vs. Raucherregelung

p95 g 5.0	Nichtraucherlokal	Nichtraucherbereich	Raucherbereich	Raucherlokal	Total
mean	133.05	136.27	113.36	154.21	132.65
sd	101.61	169.95	69.73	119.02	121.21
min	26.00	18.00	42.00	21.00	18.00
p25	78.00	47.00	65.00	63.00	63.00
p50	98.00	91.00	95.00	120.00	98.00
p75	172.00	141.00	131.00	219.00	150.00
max	469.00	979.00	396.00	485.00	979.00

Tabelle 14: Tabelle zu Abbildung 14 in Anhang 3: Verteilung der 95%-Perzentile der Differenz PM10-PM2.5 vs. Raucherregelung

p95 pmdiff	Nichtraucherlokal	Nichtraucherbereich	Raucherbereich	Raucherlokal	Total
mean	22.37	27.78	24.33	26.69	25.60
sd	16.36	33.38	20.95	18.89	24.06
min	6.00	5.00	7.00	3.00	3.00
p25	11.00	12.00	12.00	12.00	12.00
p50	20.00	19.00	18.50	20.00	19.00
p75	26.00	28.50	27.00	38.00	29.00
max	66.00	190.00	110.00	74.00	190.00

Anhang 3: Zusätzliche Abbildungen und Tabellen zur deskriptiven Analyse

Abbildung 13: Anzahl der Partikel grösser als 5.0 Mikrometer pro Liter (95%-Perzentil)

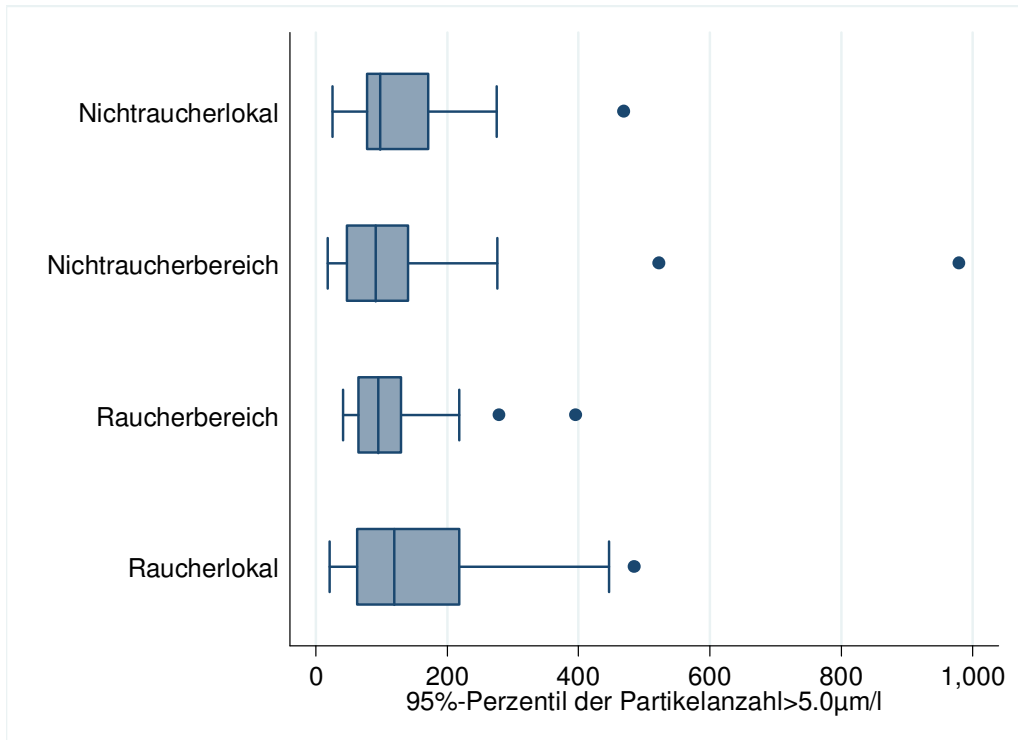


Abbildung 14: Masse der Partikel PM10 - PM2.5 in µg/m³ (95%-Perzentil)

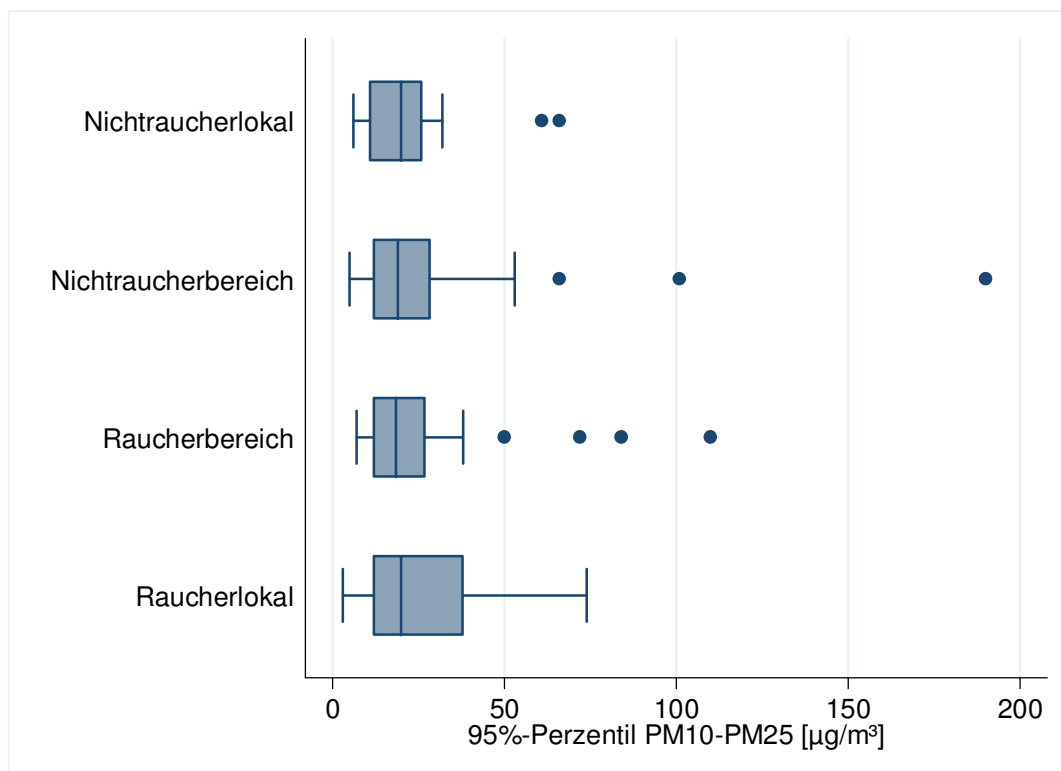


Tabelle 15: Masse der Partikel PM1 in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (durchschnittliche Belastung)

mean pm10	Nichtraucherlokal	Nichtraucherbereich	Raucherbereich	Raucherlokal	Total
mean	21.66	80.83	146.28	182.94	117.96
sd	14.06	79.88	99.62	185.26	126.91
min	9.50	9.50	13.08	9.50	9.50
p25	9.50	34.11	63.20	25.29	28.45
p50	18.16	54.78	126.90	164.83	63.20
p75	27.93	101.24	204.01	237.58	177.16
max	52.23	412.25	416.43	757.84	757.84

Tabelle 16: Masse der Partikel PM1 in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (95%-Perzentil)

p95 pm10	Nichtraucherlokal	Nichtraucherbereich	Raucherbereich	Raucherlokal	Total
mean	26.46	131.66	241.56	295.90	191.41
sd	18.37	117.53	156.85	243.55	185.09
min	9.50	9.50	27.40	9.50	9.50
p25	9.50	45.30	116.90	63.20	45.30
p50	27.40	99.00	224.30	278.00	116.90
p75	45.30	170.60	295.90	492.80	278.00
max	63.20	510.70	868.70	850.80	868.70

Tabelle 17: Raucherregime und konventionelle Lüftung

Raucherregime vor Ort	<i>Konv. Lüftung</i>		
	nicht vorhanden	vorhanden	Total
	No.	No.	No.
Nichtraucherlokal	4	15	19
Nichtraucherbereich	5	32	37
Raucherbereich	4	38	42
Raucherlokal	5	26	31
Total	18	111	129

Tabelle 18: Belastungsunterschiede im Raucher- und Nichtraucherbereich gleicher Lokale

PM2.5		Partikelanzahl>0.5		räumliche Trennung	Bemerkungen
Nr.	Nichtraucher	Raucher	Nichtraucher	Raucher	
1	189.07	239.82	59'971	88'627	nein
2	142.35	260.41	47'817	95'961	ja
3	279.83	228.71	64'811	70'751	nein
4	114.82	187.08	43'610	65'194	ja
5	171.02	118.80	37'278	32'032	nein
6	9.50	17.53	1'452	6'373	nein
7	65.91	168.45	20'492	58'738	ja
8	30.28	41.19	7'696	18'133	ja
9	18.57	53.62	6'360	17'059	nein
10	60.84	173.68	17'671	41'018	nein
11	101.07	121.19	24'366	41'513	nein
12	95.83	234.82	24'359	39'614	ja
13	63.26	176.84	18'941	60'916	ja
14	60.97	135.66	22'098	43'186	nein
15	11.50	216.91	5'398	71'498	ja
16	71.01	82.26	26'387	36'381	ja
17	443.81	437.17	183'045	176'235	nein
18	154.65	362.06	64'602	119'174	nein
19	61.66	110.57	23'556	47'918	ja
20	82.36	104.09	31'233	53'053	ja
21	157.84	306.61	63'595	139'245	ja
22	106.74	214.01	39'194	85'330	nein
23	47.87	92.64	17'458	37'639	unklar
24	161.45	436.83	64'351	182'565	ja
25	68.79	69.65	27'100	28'231	nein
26	13.23	50.35	4'219	19'115	ja
27	41.13	160.86	20'488	64'992	ja
28	35.86	72.83	12'959	28'545	nein

Tabelle 19: Veränderung der Belastung mit PM2.5 zwischen verschiedenen Rauchregelungen gemäss Regressionsmodell

	Veränderungs-	95%-Vertrauensintervall	
faktor		von	bis
Nichtraucherlokal	1.00	-	-
Nichtraucherbereich	3.32	1.93	5.73
Raucherbereich	6.12	3.59	10.43
Raucherlokal	4.64	2.64	8.15
Bar	1.00	-	-
Cafe	0.66	0.41	1.05
Disko	1.89	0.28	12.96
Restaurant	0.48	0.32	0.72
Beobachtungen	129		

Tabelle 20: Veränderung der Belastung mit der Anzahl Partikel>0.5 Mikrometer zwischen verschiedenen Rauchregelungen gemäss Regressionsmodell

	Veränderungs-	95%-Vertrauensintervall	
faktor		von	bis
Nichtraucherlokal	1.00	-	-
Nichtraucherbereich	4.38	2.40	8.00
Raucherbereich	8.78	4.87	15.80
Raucherlokal	6.14	3.29	11.45
Bar	1.00	-	-
Cafe	0.61	0.36	1.02
Disko	1.71	0.20	14.35
Restaurant	0.43	0.27	0.69
Beobachtungen	129		

Anhang 4: Parameterliste

ID Lokal
Messnummer
Namen MesstechnikerInnen
Name Lokal
Adresse Lokal: Strassenname
Adresse Lokal: Strassennummer
Adresse Lokal: PLZ
Ortschaft
Kanton
Lokaltyp
Raucherregime generell
Distanz zur nächsten Hauptstrasse
Standortcharakterisierung
Messgerät Masse
Messgerät Anzahl
Datum
Aussenlufttemperatur
Wetterbedingungen
Wind
Bodenbelag Lokal
Raumfläche (+ Skizze mit Messort)
Raumhöhe
Anzahl Sitzplätze
Lüftungstyp
ausgetauschtes Luftvolumen
Lüftung in Betrieb
Messstandort
Raucherregime Messstandort
Messhöhe ab Boden
Feinstaubquelle1
Feinstaubquelle2
Feinstaubquelle3
Feinstaubquelle4
Feinstaubquelle5
Raumtemperatur
Startzeit Messung
Anzahl Personen
Anzahl Rauchende
Proz. Anteil Zigaretten
Distanz nächster Rauchender
Gerätefunktion Masse
Gerätefunktion Anzahl
Sicht
fühlbarer Luftzug
Zeit t+10
Anzahl Personen [t+10]
Anzahl Rauchende [t+10]
Proz. Anteil Zigaretten
Distanz nächster Rauchende [t+10]
Gerätefunktion Masse
Gerätefunktion Anzahl

Sicht
Zugerscheinung
Zeit t+20
Anzahl Personen [t+20]
Anzahl Rauchende [t+20]
Proz. Anteil Zigaretten
Distanz nächster Rauchende [t+20]
Gerätefunktion Masse
Gerätefunktion Anzahl
Sicht
Zugerscheinung
Zeit t+30
Anzahl Personen [t+30]
Anzahl Rauchende [t+30]
Proz. Anteil Zigaretten
Distanz nächster Rauchende [t+30]
Gerätefunktion Masse
Gerätefunktion Anzahl
Sicht
Zugerscheinung
Zeit t+40
Anzahl Personen [t+40]
Anzahl Rauchende [t+40]
Proz. Anteil Zigaretten
Distanz nächster Rauchende [t+40]
Gerätefunktion Masse
Gerätefunktion Anzahl
Sicht
Zugerscheinung
Zeit t+50
Anzahl Personen [t+50]
Anzahl Rauchende [t+50]
Proz. Anteil Zigaretten
Distanz nächster Rauchende [t+50]
Gerätefunktion Masse
Gerätefunktion Anzahl
Sicht
Zugerscheinung
Zeit Messende
Anzahl Personen [Ende]
Anzahl Rauchende [Ende]
Proz. Anteil Zigaretten
Distanz nächster Rauchende [Ende]
Gerätefunktion Masse
Gerätefunktion Anzahl
Sicht
Zugerscheinung
Besonderheiten