

Umweltforschungsplan des
Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit

Forschungskennzahl: 371162205

Effekte von Partikeln aus Innenraum-Aktivitäten (EPIA)

(Untersuchungen zur Freisetzung feiner und ultrafeiner Partikel aus Quellen im Innenraum: chemisch-physikalische Charakterisierung der Partikel und Studien zur gesundheitlichen Wirkung)

von

Bryan Hellack
Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V., Duisburg

Vanessa Soppa
Leibniz Institut für umweltmedizinische Forschung gGmbH, Düsseldorf

Ulrich Quass
Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V., Duisburg

Heinz Kaminski
Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V., Duisburg

Andrea Neumeyer-Sickinger
Leibniz Institut für umweltmedizinische Forschung gGmbH, Düsseldorf

Anna Buschka
Leibniz Institut für umweltmedizinische Forschung gGmbH, Düsseldorf

Catrin Albrecht
Leibniz Institut für umweltmedizinische Forschung gGmbH, Düsseldorf

Gudrun Weinmayer
Leibniz Institut für umweltmedizinische Forschung gGmbH, Düsseldorf

Roel Schins
Leibniz Institut für umweltmedizinische Forschung gGmbH, Düsseldorf

Barbara Hoffmann
Leibniz Institut für umweltmedizinische Forschung gGmbH, Düsseldorf

Thomas Kuhlbusch
Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V., Duisburg

Institut für Energie- und Umwelttechnik e. V. (IUTA) - Bereich: Luftreinhaltung &

Nachhaltige Nanotechnologie; Bliersheimer Straße 58-60, 47229 Duisburg

Leibniz-Institut für umweltmedizinische Forschung gGmbH - AG Partikel, Entzündung
und Genomintegrität, Auf'm Hennekamp 50, 40225 Düsseldorf

Leibniz-Institut für umweltmedizinische Forschung gGmbH - AG Umweltepidemiolo-
gie kardiovaskulärer Alterung und Allergien, Auf'm Hennekamp 50, 40225 Düsseldorf

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Februar 2015

Berichtskennblatt

Berichtsnummer	
Titel des Berichts	Effekte von Partikeln aus Innenraum-Aktivitäten (EPIA) - (Untersuchungen zur Freisetzung feiner und ultrafeiner Partikel aus Quellen im Innenraum: chemisch-physikalische Charakterisierung der Partikel und Studien zur gesundheitlichen Wirkung)
Autor(en) (Name, Vorname)	¹ Hellack, Bryan; ² Soppa, Vanessa, ¹ Quass, Ulrich; ¹ Kaminski, Heinz; ² Neumeyer-Sickinger, Andrea; ² Buschka, Anna; ² Albrecht, Catrin; ² Weinmayer, Gudrun; ² Schins, Roel; ² Hoffmann, Barbara; ¹ Kuhlbusch Thomas
Durchführende Institution (Name, Anschrift)	¹ Institut für Energie- und Umwelttechnik e. V. (IUTA) - Bereich: Luftreinhaltung & Nachhaltige Nanotechnologie; Bliersheimer Straße 58-60, 47229 Duisburg; ² Leibniz-Institut für umweltmedizinische Forschung gGmbH, Auf'm Hennekamp 50, 40225 Düsseldorf
Fördernde Institution	Umweltbundesamt Postfach 14 06 06813 Dessau-Roßlau
Abschlussjahr	
Forschungskennzahl (FKZ)	371162205
Seitenzahl des Berichts	364
Zusätzliche Angaben	
Schlagwörter	Innenraum Partikel, Ultrafeinpartikel, Partikelanzahlkonzentration, Gesundheitseffekte, Braten, Kerzenabbrand, Toasten, Oxidativer Stress, Probandenstudie, kardiovaskuläre Effekte, Lungenfunktionsänderung, akute Gesundheitseffekte, Entzündungsmarker

Report Cover Sheet

Report No.	
Report Title	Effects of particles from indoor activities (EPIA) - (Investigations of fine and ultrafine particle release from indoor sources: chemical – physical characterization of the particles and study of their health effects)
Author(s) (Family Name, First Name)	¹ Hellack, Bryan; ² Soppa, Vanessa, ¹ Quass, Ulrich; ¹ Kaminski, Heinz; ² Neumeyer-Sickinger, Andrea; ² Buschka, Anna; ² Albrecht, Catrin; ² Weinmayer, Gudrun; ² Schins, Roel; ² Hoffmann, Barbara; ¹ Kuhlbusch Thomas
Performing Organisation (Name, Address)	¹ Institut für Energie- und Umwelttechnik e. V. (IUTA) - Bereich: Luft- reinhaltung & Nachhaltige Nanotechnologie; Bliersheimer Straße 58-60, 47229 Duisburg; ² Leibniz-Institut für umweltmedizinische Forschung gGmbH, Auf'm Hen- nekamp 50, 40225 Düsseldorf
Funding Agency	Umweltbundesamt Postfach 14 06 06813 Dessau-Roßlau
Report Date (Year)	
Project No. (FKZ)	371162205
No. of Pages	364
Supplementary Notes	
Keywords	Indoor particles, particle number concentration, ultrafine particles, lung deposit surface area, health effects, burning candles, toasting bread, frying sausages, controlled exposure study, lung function, inflammation, oxida- tive stress

Kurzbeschreibung

Im Vergleich zur intensiven öffentlichen Diskussion bezüglich anthropogener Feinstaubemissionen in der Außenluft (z.B. Diskussion um Straßenverkehrsemissionen und Umweltzonen) werden Partikelemissionen in Innenräumen derzeit noch wenig wahrgenommen. Die Folge ist trotz offensichtlicher alltäglicher partikulärer Innenraumemissionen und –belastung ein geringer Kenntnisstand über das Emissionsverhalten und die gesundheitliche Relevanz. Entsprechend war das Ziel dieser Studie, potentiell wichtige Innenraumquellen für Fein- und Ultrafeinstäube bezüglich ihrer Emissionen zu charakterisieren und mögliche akute gesundheitliche Wirkungen zu untersuchen. Als potentiell wichtige Quellen für Innenraumpartikel wurden das Braten (von Würstchen ohne Fettzugabe), das Abbrennen von Kerzen sowie das Toasten (von Toastbrot) identifiziert und in der Folge charakterisiert. Hierbei wurden neben den chemischen Eigenschaften der Partikel auch verschiedene Massenfraktionen sowie weitere für Feinstaub als „relevant“ geltende Metriken wie die Partikelanzahlkonzentration oder lungendeponierbare Oberfläche der Partikel betrachtet. Es zeigte sich im Vergleich zu anderen Innenraumquellen aus z.B. Gasbrenner oder Staubsauger u.a. eine erhöhte Partikelanzahlkonzentration submikroner Partikel für die Quellen Braten, Toasten und Kerzenabbrand. In Kombination mit der Partikelcharakterisierung und –sammlung wurden in-vitro-Experimente an Lungenepithelzellen durchgeführt, die insbesondere oxidativem Stress als potentiellen Wirkungsmechanismus untersuchten. Es konnte gezeigt werden, dass die Innenluftpartikel in Abhängigkeit von der Quelle ein toxisches Potential auf Lungenepithelzellen haben. Die Quelle Toasten generierte dabei die reaktivsten Partikel bezüglich der Freisetzung von Zytokinen und DNA-Schäden. Der zugrunde liegende molekulare Mechanismus konnte im Rahmen dieser Studie nicht aufgeklärt werden. Kerzenabbrand-Partikel zeigten lediglich DNA-Schädigung allerdings keine Zytokinfreisetzung. Insgesamt konnte die Studie auch zeigen, dass die getesteten Innenluftpartikel ein eher geringes toxisches Potential aufwiesen. Im Rahmen einer kontrollierten Expositionsstudie wurden akute Effekte der drei Expositionsquellen auf das Herz-Kreislaufsystem, die Lunge und auf lokale sowie systemische Entzündungsreaktionen und oxidativen Stress beim Menschen untersucht. Hierzu wurden insgesamt 56 Probanden kurzzeitig (2 h) einer erhöhten Partikelkonzentration durch Toasten, Braten, Kerzenabbrand auf zwei unterschiedlichen Expositionsniveaus oder einer Kontrollbelastung mit Raumluft in randomisierter Reihenfolge ausgesetzt. Medizinische Untersuchungen wurden während, direkt nach der Belastung und nach 24 h durchgeführt. Es zeigten sich Zusammenhänge mit akuten kardiovaskulären, respiratorischen und lokalen sowie systemischen inflammatorischen Effekten. Für Kerzenabbrand-Partikel wurde bei erhöhter Partikelmassenkonzentration eine leicht verschlechterte Lungenfunktion, ein Anstieg des Entzündungsmarkers IL-8 im Blut, eine Blutdruckerhöhung und ein Anstieg der Herzfrequenzvariabilität festgestellt. Bei der Belastung durch Toast-Partikel waren erhöhte Massenkonzentrationen von PM_{2.5} und PM₁₀ mit einer kurzzeitigen (bis 2 h) erhöhten arteriellen Steifigkeit und einer erhöhten Vagusaktivität nach 24 h verbunden. Erhöhte PM₁- und Oberflächenkonzentrationen waren assoziiert mit einer erhöhten antioxidativen Kapazität und mit einer lokalen entzündlichen Reaktion. Die Belastung mit Partikeln aus Bratvorgängen war mit einer erniedrigten Lungenfunktion und einer Erhöhung des Entzündungsmarkers IL-8 in der Nasalavagelflüssigkeit assoziiert. Zudem kam es zu einem leichten Blutdruckabfall nach der Exposition. Die beobachteten biologischen Effekte waren in aller Regel schwach und transient. Eine Aussage zu gesundheitlichen Auswirkungen einer sich häufig wiederholenden oder langandauernden Exposition gegenüber den untersuchten Stäuben kann auf Basis dieser Studie nicht gemacht werden.

Zusammenfassend zeigt diese Studie, dass feine und ultrafeine Partikel aus Innenraumquellen sich in ihren chemisch-physikalischen Eigenschaften, sowie hinsichtlich ihres Emissionsmusters zum Teil deutlich unterscheiden. Hierdurch ergeben sich auch unterschiedliche Auswirkungen auf Entzündungen und DNA-Schäden in vitro. Bei gesunden Teilnehmern kann eine kurzfristige Exposition gegenüber diesen feinen und ultrafeinen Partikeln aus Innenraumquellen zu Änderungen im Herz-Kreislauf- und Lungensystem führen, sowie Entzündungsprozesse auslösen.

Abstract

While anthropogenic emissions of ambient outdoor particulate matter (PM) are under intensive discussion (e.g. traffic emissions and environmental zoning) particulate indoor emissions are by far less investigated. In consequence, despite the obvious everyday PM indoor emissions and exposures, a lack of knowledge about the emission behaviour and their relevance to health exists. Accordingly, the aim of this study was to characterize potentially relevant indoor sources of fine and ultrafine particles with respect to their emission levels, composition and their potential acute health effects. Frying sausages burning of candles and toasting bread were selected as relevant PM indoor sources and subsequently characterised. This includes the determination of the chemical properties of the particles, various mass fractions and further, possibly more health "relevant" characterisation metrics for ultrafine particles like particle number concentration or lung deposited surface area. Other indoor sources such as butane burner, vacuuming cleaner or electrical heat convention radiator by comparison, had substantially less particle emission indicated by lower particle number concentration than the sources investigated in detail.

Collected material from indoor sources was used to conduct in vitro experiments on lung epithelial cells. We investigated whether the particles that were generated from three elected different indoor sources showed relevant toxic effects focusing on the induction of oxidative stress as a key mechanism. It was demonstrated that the emitted indoor PM depending on the source differ in their toxic potency towards lung epithelial cells. Overall the particles from toasting led to a significant release of the inflammatory cytokine interleukin-8 (IL-8) and induction of DNA strand breaks. The underlying molecular mechanism of these effects could not be elucidated in this study. The PM from candle burning showed DNA damage depending on the type of candle, but no cytokine release.

Ambient PM has been linked to acute health effects in many studies (e.g. increase in blood pressure, pulmonary and systemic inflammation). In a cross-over sham-controlled chamber exposure study, we investigated acute effects on the cardiovascular and respiratory system, on local and systemic inflammatory responses, and oxidative stress for the three indoor sources. Healthy participants were exposed for 2 h to increased concentrations of PM from frying, toasting, candle burning at two different exposure levels. Clinical examinations were carried out before, during and after the controlled exposure at defined time intervals. In mixed linear regression analyses controlling for individual level risk factors, season, temperature, outdoor air pollution, duration and mode of transportation, we found associations between exposure and several acute cardiovascular, respiratory and local and systemic inflammatory changes. In particular, PM mass concentration from burning candles was associated with a slight impairment of lung function, increased inflammatory marker (IL-8) in the blood, an increase in blood pressure and an increase of heart rate variability. Increased exposures to PM_{2.5} and PM₁₀ mass concentrations of toast particles were associated with a short-term (up to 2 h) increase of arterial stiffness and increased vagal activity after 24 h. Increased PM₁ concentrations and particle surface area concentrations from toasting were associated with increased antioxidant capacity and local inflammation. Exposure to particles from frying showed an association with reduced lung function and an increase of the inflammatory marker IL-8 in the nasal lavage fluid. In addition, a slight decrease in blood pressure was observed after the exposure. All detected biological effects were mild and transient. This study however does not allow an evaluation of health effects after frequently repeated, prolonged or chronic exposure to the here tested indoor particles.

In general, this study demonstrates that fine and ultrafine particles from indoor sources differ considerably regarding chemical and physical characteristics as well their emissions pattern. Consequently, these particles are also able to exert differential effects on inflammation and DNA damage in vitro. In healthy participants, a single short-term exposure to these fine and ultrafine particles from indoor sources may lead to changes in the cardiovascular and lung system as well as possibly induce inflammation.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	11
Tabellenverzeichnis	21
Abkürzungsverzeichnis	25
Zusammenfassung	27
Summary	38
1 Einleitung	47
1.1 Ziel	48
2 Konzept	48
3 Charakterisierung der Quellen	49
3.1 Grundlagen zur Durchführung der Charakterisierungsmessungen	50
3.1.1 Prüfraum	50
3.1.2 Versuchsraum	51
3.1.3 Methoden	52
3.1.3.1 Beschreibung der verwendeten Analysegeräte	54
3.2 Ergebnisse der Charakterisierungsmessungen	57
3.2.1 Überblick	57
3.2.2 Kerzenabbrand	59
3.2.2.1 Geräte, Materialien, Vorgehensweise	59
3.2.2.2 Messergebnisse	60
3.2.2.3 Zusammenfassung Kerzen	83
3.2.2.4 Fazit	83
3.2.3 Toasten	83
3.2.3.1 Geräte, Materialien, Vorgehensweise	83
3.2.3.2 Messergebnisse	85
3.2.3.3 Zusammenfassung Tosten	94
3.2.3.4 Fazit	95
3.2.4 Backen (Fertigpizza)	95
3.2.4.1 Geräte, Materialien, Vorgehensweise	95
3.2.4.2 Messergebnisse	95
3.2.4.3 Zusammenfassung Pizzabacken	98
3.2.4.4 Fazit	99
3.2.5 Braten (Würstchen)	99
3.2.5.1 Geräte, Materialien, Vorgehensweise	99
3.2.5.2 Messergebnisse	100

3.2.6	Zusatzuntersuchung Partikelsammlung bei Expositionsquelle Braten (PM2.5) und Raumluft/Blank (PM2.5 und PM1)	108
3.2.6.1	Zusammenfassung Braten	109
3.2.6.2	Fazit	109
3.2.7	Kaminofenbetrieb	109
3.2.7.1	Geräte, Materialien, Vorgehensweise	109
3.2.7.2	Zusammenfassung Kamin	117
3.2.7.3	Fazit	118
3.2.8	Staubsaugen	118
3.2.8.1	Geräte, Materialien, Vorgehensweise	118
3.2.8.2	Messergebnisse	120
3.2.8.3	Zusammenfassung Staubsaugen	124
3.2.8.4	Fazit	124
3.2.9	Zusatzuntersuchung (Staubsauger – Motoremissionen)	124
3.2.9.1	Geräte, Materialien, Vorgehensweise	125
3.2.9.2	Messergebnisse	126
3.2.9.3	Zusammenfassung Staubsauger - Motoremissionen	133
3.2.9.4	Fazit	134
3.2.10	Zusatzuntersuchungen	134
3.2.10.1	Propangas- und Spiritusbrenner	134
3.2.10.2	Messergebnisse	134
3.2.10.3	Zusammenfassung Gas- und Spiritusbrenner	139
3.2.10.4	Fazit	139
3.2.10.5	Heißluftstrahlradiator	139
3.2.10.6	Messergebnisse	139
3.2.10.7	Zusammenfassung Heißluftstrahlradiator	142
3.2.10.8	Fazit	142
3.2.11	Schleifversuche	142
3.2.11.1	Schleifen, Geräte, Vorgehensweise	142
3.2.11.2	Messergebnisse	142
3.2.11.3	Zusammenfassung Schleifen	150
3.2.11.4	Fazit	150
3.2.12	Zusammenfassung Charakterisierungsmessungen	150
3.2.13	Quellen und Expositions-niveaus für die Probandenstudie	153
3.2.14	Charakterisierungsparameter der Exposition	154
3.2.15	Vergleich der NSAM und miniDiSC Daten	154
3.2.15.1	Ergebnisse	155
3.2.16	Zusammenfassung Vergleich NSAM - miniDiSC	158

4	Toxikologische Untersuchungen	159
4.1	Angewendete Methoden.....	159
4.1.1	Probenaufbereitung – Extraktion und Gefriertrocknung	159
4.1.1.1	Extraktionseffizienz	159
4.1.1.2	Ergebnisse	160
4.1.1.3	Zusammenfassung und Fazit	165
5	Medizinische Untersuchungen.....	166
5.1	Angewendete Methoden.....	166
5.1.1	Studiendesign.....	166
5.1.2	Probandenrekrutierung und Ablaufplanung.....	166
5.1.3	Übersicht medizinische Untersuchungen.....	168
5.1.3.1	Blutdruckmessung	169
5.1.3.2	Pulswellenanalyse, Pulswellengeschwindigkeit und Herzratenvariabilität	169
5.1.3.3	FeNO Test	171
5.1.3.4	Lungenfunktionsmessung	171
5.1.3.5	Nasallavage	173
5.1.3.6	Blutabnahme	174
5.1.3.7	Neurokognition	174
5.1.3.8	Befindlichkeits-Tagebuch	174
5.1.4	Qualitätssicherung	174
5.1.5	Statistische Auswertung.....	174
5.1.5.1	Deskriptionen	174
5.1.5.2	Vergleich der Mittelwerte	175
5.1.5.3	Analyse mit linearen Regressionsmodellen	175
5.2	Ergebnisse	175
5.2.1	Studienpopulation, Studientage und Exposition.....	175
5.2.2	Zusammenhangsanalysen	178
5.2.2.1	Nasallavage – lokale Entzündung	179
5.2.2.2	FeNO und Lungenfunktion – pulmonale Entzündung und lokale Organwirkung	190
5.2.2.3	Blutwerte – systemische Entzündung und Hämatologie	201
5.2.2.4	Blutdruck	215
5.2.2.5	Arterielle Steifigkeit	219
5.2.2.6	Herzratenvariabilität (HRV): SDNN und RMSSD (Vagusindex)	225
5.2.3	Zusammenfassung nach Exposition.....	230
5.2.3.1	Kerzen	230
5.2.3.2	Toasten	231
5.2.3.3	Braten	231

5.2.3.4	Effekte der Partikelmetriken	232
5.3	Diskussion	232
6	Fazit	235
7	Publikationen	236
7.1	Veröffentlichte Publikationen/Poster	236
7.1.1	Manuskripte in Vorbereitung	236
7.1.2	Abgeschlossene Qualifizierungsarbeiten	236
7.1.3	Qualifizierungsarbeiten in Vorbereitung	236
8	Quellenverzeichnis	237
9	Anhang I	240
10	Anhang II	293
10.1	Deskriptionstabellen	293
11	Anhang III	305
11.1	Ergebnisse der statistischen Auswertung	305
11.1.1	Basophile in Nasallavage	305
11.1.2	Eosinophile in Nasallavage	308
11.1.3	Monozyten in Nasallavage	311
11.1.4	Lymphozyten in Nasallavage	314
11.1.5	FeNO	317
11.1.6	Leukozyten im Blut	320
11.1.7	Thrombozyten im Blut	322
11.1.8	Neutophile im Blut	324
11.1.9	Eosinophile im Blut	326
11.1.10	Basophile im Blut	328
11.1.11	Monozyten im Blut	330
11.1.12	Hämoglobin im Blut	332
11.1.13	Hämatokrit im Blut	334
11.1.14	Diastolischer Blutdruck	336
11.1.15	Augmentationsindex	339
11.2	Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen	343
11.2.1	Lungenfunktion	343
11.2.2	Blutdruck	352

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Prüfraum ohne Einhausung (Ausbaustufe A), links; Eingehauster Prüfraum in Ausbaustufe B, rechts.....	51
Abbildung 2:	Versuchsraum	52
Abbildung 3:	Messgeräte-Aufstellung innerhalb der Prüfkammer (Ausbaustufe A)	54
Abbildung 4:	Messgeräte-Aufstellung außerhalb der Prüfkammer (Ausbaustufe B).....	54
Abbildung 5:	Anordnung der Kerzen während der Abbrandversuche.....	59
Abbildung 6:	Vergleich der berechneten Kerzen-Abbrandraten als Boxplot	61
Abbildung 7:	Zeitverlauf der Anzahlkonzentration (CPC bzw. FMPS) und Temperatur für den Kerzenabbrand der Kerzensorte A.....	64
Abbildung 8:	Zeitverlauf der Anzahl- (APS, 0,5-20 µm) und Oberflächenkonzentration (NSAM) für den Kerzenabbrand der Kerzensorte A	64
Abbildung 9:	Effekt der Klimatisierung auf die Anzahlgrößenverteilung für den Kerzenabbrand der Kerzensorte A.....	65
Abbildung 10:	Partikelanzahlgrößenverteilung für Kerzenabbrand der Kerzensorte B; ohne Klimatisierung, ohne Belüftung.....	66
Abbildung 11:	Partikelanzahlgrößenverteilung für Kerzenabbrand der Kerzensorte A; mit Klimatisierung	66
Abbildung 12:	Zeitverläufe der Messdaten bei Kerzenabbrand: Klimadaten und CO ₂ oben während Kerzensorte A; unten während Kerzensorte B	68
Abbildung 13:	Zeitverläufe der Partikelanzahlkonzentrationen bei Kerzenabbrand für die Kerzensorte A, oben; für Kerzensorte B, unten	69
Abbildung 14:	Zeitverläufe Partikelanzahl- und Oberflächenkonzentration bei Kerzenabbrand für die Kerzensorte A, oben; für Kerzensorte B, unten.....	70
Abbildung 15:	Zeitverläufe der Massenkonzentrationen bei Kerzenabbrand Sorte A oben B unten; Dichte =1,4 g/cm ³ berechnet	71
Abbildung 16:	Anzahlgrößenverteilungen während der Kerzen-Abbrennphasen (SMPS) für die Kerzensorte A; ohne Klimatisierung	72
Abbildung 17:	Anzahlgrößenverteilungen während der Kerzen-Abbrennphasen (SMPS) für die Kerzensorte A mit Klimatisierung	73
Abbildung 18:	OH-Radikal Generierungspotential der Kerzenabbrand-Partikelsuspensionen bei unterschiedlichen Versuchsbedingungen; Fehlerbalken = SD, n = 3; NWG = Nachweisgrenze.....	74
Abbildung 19:	Intrinsische Oberflächenreaktivität der Kerzenabbrand-Partikelsuspensionen bei unterschiedlichen Versuchsbedingungen; Fehlerbalken = SD, n = 3; NWG = Nachweisgrenze.....	75
Abbildung 20:	Zeitreihen der PTR_MS Messungen bei Kerzenabbrand; oben Kerzensorte A, unten Kerzensorte B	76
Abbildung 21:	Zeitverlauf der vom AMS ausgegebenen Werte bei Kerzenabbrand für die fünf Haupt-Stoffgruppen (Kerzensorte A).....	78

Abbildung 22:	Partikelgrößenverteilung der Stoffgruppen bei Kerzenabbrand zu Beginn der Messung (oben) und nach ca. 1,5 h (unten) (Kerzensorte A).....	79
Abbildung 23:	EC-OC Konzentrationen und EC/TC-Verhältnisse (Filterproben) für Kerzenabbrand.....	80
Abbildung 24:	Vergleich der EC-OC Konzentrationen mit der PM-Gesamtkonzentration für Kerzenabbrand.....	80
Abbildung 25:	TXRF-Spektren von emittierten Kerzenabbrand-Partikeln (oben: Kerzensorte A; unten Kerzensorte B).....	81
Abbildung 26:	Kerzenabbrand - REM-Aufnahmen eines langkettigen Partikels mit nanoskaligen Primärpartikeln (vermutlich Ruß) in zwei Vergrößerungsstufen.....	82
Abbildung 27:	Kerzenabbrand - REM-Aufnahmen von aggregierten unregelmäßigen Partikeln (links, vermutlich Wachs) bzw. eines Mineralpartikels (rechts, vermutlich Natriumchlorid).....	82
Abbildung 28:	Aufbau der Toastgeräte im Prüfraum.....	84
Abbildung 29:	Klimabedingungen im Prüfraum während des Toastens.....	84
Abbildung 30:	Zeitverlauf der Partikelanzahlkonzentration während der Filterprobenahme- Toasten.....	85
Abbildung 31:	Partikelanzahlkonzentrationen während der sechs Toast-Messzyklen.....	86
Abbildung 32:	Mittlere Partikelgrößenverteilungen der sechs Toast-Messzyklen.....	86
Abbildung 33:	Partikelanzahl und lungendeponierbare Oberfläche während des Toastens.....	87
Abbildung 34:	Partikelgrößenverteilungen (SMPS) während des vierten Toast-Messzyklus.....	87
Abbildung 35:	OH-Radikalbildungspotential der Toastpartikelsuspensionen, Fehlerbalken = SD, n = 3.....	88
Abbildung 36:	Verhältnis der Oberflächenreaktivität der Toastpartikelsuspensionen zu deionisiertem Wasser (dH ₂ O) als Blindwert; Fehlerbalken = SD, n = 3.....	88
Abbildung 37:	Ergebnis der PTR-MS Massenscans während des Toastens als Quotient Messung Toasten/Referenzluft der Halle.....	89
Abbildung 38:	Zeitverlauf der ausgewählten Massenzahlen während des Toastens.....	90
Abbildung 39:	Zeitverlauf der AMS-Signale während des Toastens.....	91
Abbildung 40:	Partikelgrößenverteilung der AMS-Hauptstoffe/gruppen während des Toastens.....	92
Abbildung 41:	Ergebnisse der EC-OC-Analysen für Toasten.....	92
Abbildung 42:	TXRF Spektrum der mit NAS auf Glaskohlenstoffträger abgeschiedenen Partikel während des Toastens.....	93
Abbildung 43:	REM-Aufnahmen der Toastproben.....	94
Abbildung 44:	Klimabedingungen im Prüfraum während des Pizzabackens.....	95

Abbildung 45:	Zeitverlauf der Partikelanzahlkonzentrationen während des Pizzabackens.....	96
Abbildung 46:	Zeitverlauf der Partikelanzahl- und Oberflächenkonzentrationen für das Pizzabacken.....	97
Abbildung 47:	Mittlere Anzahlgrößenverteilung der sechs Zyklen des Pizzabackens.....	97
Abbildung 48:	Abschätzung der Massenkonzentration für das Pizzabacken errechnet aus den Anzahlgrößenverteilungen.....	98
Abbildung 49:	Klimabedingungen im Prüfraum während der Messzyklen des Bratens.....	100
Abbildung 50:	Zeitverlauf der Anzahl- und berechnete Massenkonzentration während der Filterbelegung - Braten.....	101
Abbildung 51:	Anzahlgrößenverteilung (sub-mikron) für das Braten.....	102
Abbildung 52:	Partikelanzahlkonzentrationen für die sechs Messzyklen des Bratens.....	102
Abbildung 53:	Partikelanzahl- und -oberflächenkonzentrationen für die sechs Messzyklen des Bratens.....	103
Abbildung 54:	Massenkonzentrationen berechnet aus Anzahlgrößenverteilungen für das Braten.....	103
Abbildung 55:	Mittlere Anzahlgrößenverteilungen im sub-mikronen Bereich während der sechs Messzyklen des Bratens.....	104
Abbildung 56:	OH-Radikal Generierungspotential der Braten-Partikelsuspensionen; Fehlerbalken = Standardabweichung, n = 3.....	104
Abbildung 57:	Verhältnis der Oberflächenreaktivität der Braten-Suspensionen zu deionisiertem Wasser als Blindwert; Fehlerbalken = Standardabweichung, n = 3.....	105
Abbildung 58:	Verlauf der AMS-Signale während des Bratens.....	106
Abbildung 59:	AMS-Signale der Komponenten mit geringerer Konzentration während des Bratens.....	106
Abbildung 60:	REM-Aufnahmen der während des Bratens gesammelten Probe.....	107
Abbildung 61:	Beispiel einer EDX Analyse der während des Braten gesammelten Probe.....	107
Abbildung 62:	Fotos des Ofens, des Kamins und der Einhausung.....	110
Abbildung 63:	Klimabedingungen im Prüfraum während der Kaminofenmessungen (Untersuchungsabschnitt 1).....	111
Abbildung 64:	Zeitverlauf der Partikelanzahlkonzentrationen während der Kaminofenmessungen.....	112
Abbildung 65:	Anzahlgrößenverteilung (sub-mikron) der Kaminofenmessungen.....	112
Abbildung 66:	Partikelanzahl- und -oberflächenkonzentrationen der Kaminofenmessungen.....	113
Abbildung 67:	Konzentrationszeitreihen während der Kaminofenversuche von Organik (grün), Nitrat (blau), Sulfat (rot), Ammonium (orange) und Chlorid (pink) berechnet mit der AMS Auswertesoftware.....	114

Abbildung 68:	Zeitverlauf der errechneten Massenkonzentrationen während der Filterbelegung Kaminofen, zusätzlich ist der Temperaturverlauf eingezeichnet	115
Abbildung 69:	Massengrößenverteilungen bei den Kaminofenversuchen der APS-Scans vor eines durch Nachlegen von Holz erzeugten Konzentrationsanstieges	116
Abbildung 70:	Anzahlgrößenverteilungen der Kaminofen-APS-Scans vor eines durch Nachlegen von Holz erzeugten Konzentrationsanstieges	116
Abbildung 71:	Kaminofen: REM-Aufnahmen eines mineralischen Partikels (links) bzw. Ruß-Agglomerats (rechts).....	117
Abbildung 72:	Fotos Expositionsraum, Messgeräte und Staubsauger.....	118
Abbildung 73:	Klimabedingungen im Prüfraum während der Staubsaugermessungen	119
Abbildung 74:	Berechnete Massenkonzentrationen für die Messzyklen des Staubsaugens	120
Abbildung 75:	Verlauf der Partikelanzahlkonzentration während der verschiedenen Staubsaugermessungen	121
Abbildung 76:	Mittlere Größenverteilungen (SMPS und FMPS) während der verschiedenen Staubsaugermessungen	121
Abbildung 77:	Verlauf der Partikelanzahl und Oberflächenkonzentrationen während der verschiedenen Staubsaugermessungen	122
Abbildung 78:	Verlauf der mit dem AMS bestimmten Hauptstoff-Konzentrationen während der Staubsaugermessungen	123
Abbildung 79:	Partikelgrößenverteilung der mit dem AMS bestimmten Hauptstoff-Konzentrationen während der Staubsaugermessungen.....	123
Abbildung 80:	Untersuchungsraum für die Staubsauger-Motoremissionserfassung.....	125
Abbildung 81:	Untersuchungsaufbau für die Staubsauger-Motoremissionserfassung	125
Abbildung 82:	Anzahlgrößenverteilung mittels APS für die Staubsauger-Motoremissionserfassung	126
Abbildung 83:	Anzahlgrößenverteilung mittels SMPS mit NanoDMA für die StaubsaugerMotoremissionserfassung.....	127
Abbildung 84:	Anzahlgrößenverteilung mittels FMPS für die Staubsauger-Motoremissionserfassung	127
Abbildung 85:	LDSA mittels NSAM für die Staubsauger-Motoremissionserfassung	128
Abbildung 86:	Anzahlgrößenverteilung mittels APS für die Staubsauger-Motoremissionserfassung	128
Abbildung 87:	Anzahlgrößenverteilung mittels SMPS mit NanoDMA für die Staubsauger-Motoremissionserfassung	129
Abbildung 88:	Anzahlgrößenverteilung mittels FMPS für die Staubsauger-Motoremissionserfassung	130
Abbildung 89:	Lungendeponierte Oberfläche während der Staubsauger-Motoremissionserfassung	130

Abbildung 90:	OH-Radikal Generierungspotential der Staubsaugeremissionen; Fehlerbalken = Standardabweichung, n = 3; NWG = Nachweisgrenze, deionisiertes Wasser = dH ₂ O	131
Abbildung 91:	Verhältnis der Oberflächenreaktivität der Staubsaugeremission-Suspensionen zu deionisiertem Wasser als Blindwert.....	132
Abbildung 92:	Beispiel zweier REM-Aufnahmen der gezogenen NAS Proben der Staubsaugeremissionen (oben geringe Vergrößerung; unten Kohlenstoff- und Kupferpartikel)	133
Abbildung 93:	Foto des Propan- (links) und Spiritusbrenners (rechts)	134
Abbildung 94:	Partikelanzahl- und –oberflächenkonzentrationen während der Propangasbrennerversuche	135
Abbildung 95:	Anzahlgrößenverteilung (sub-mikron) der Propangasbrennerversuche	136
Abbildung 96:	Errechnete Partikelmassenkonzentration für die Propangasbrennerversuche (errechnet aus Partikelanzahlkonzentration - Dichte 1,6 g/m ³).....	136
Abbildung 97:	Partikelanzahl- und –oberflächenkonzentrationen der Spiritusbrennerversuche	137
Abbildung 98:	Anzahlgrößenverteilung (sub-mikron) der Spiritusbrennerversuche.....	138
Abbildung 99:	Über die Partikelanzahlgrößenverteilung errechnete Massenkonzentration (Dichte 1,6 g/cm ³) der Spiritusbrennerversuche.....	138
Abbildung 100:	Foto des verwendeten Heißluftstrahlradiator	139
Abbildung 101:	Partikelanzahl- und –oberflächenkonzentrationen der Heißluftstrahlradiatorversuche	140
Abbildung 102:	Anzahlgrößenverteilung (sub-mikron) der Heißluftstrahlradiatorversuche	141
Abbildung 103:	Über die Anzahlkonzentration errechnete Massenkonzentration während der Heißluftstrahlradiatormessungen	141
Abbildung 104:	Mittlere Partikelgrößenverteilung während des Schleifens, n = 3; Holzrohling links, Grundierung rechts (FMPS)	143
Abbildung 105:	Mittlere Partikelgrößenverteilung während des Schleifens, n = 3; Nanolack 1. Lauf links, 2. Lauf rechts (FMPS).....	143
Abbildung 106:	Mittlere Partikelgrößenverteilung während des Schleifens, Nanolack + Additiv 3600; 1. Lauf links, 2. Lauf rechts (FMPS).....	144
Abbildung 107:	Mittlere Partikelgrößenverteilung während des Schleifens, Nanolack + Additiv 3821; 1. Lauf links, Lauf 2. rechts (FMPS).....	144
Abbildung 108:	Verlauf der LDSA (NSAM) während des Schleifens; Holzrohling links, Grundierung rechts.....	144
Abbildung 109:	Verlauf der LDSA (NSAM) während des Schleifens; Nanolack 1. Lauf links, 2. Lauf rechts.....	144
Abbildung 110:	Verlauf der LDSA (NSAM) während des Schleifens; Nanolack + Additiv 3600; 1. Lauf links, 2. Lauf rechts.....	145
Abbildung 111:	Verlauf der LDSA (NSAM) während des Schleifens; Nanolack + Additiv 3821; 1. Lauf links, 2. Lauf rechts.....	145

Abbildung 112:	Verlauf der Anzahlkonzentration (FMPS) während des Schleifens; Holzrohling links, Grundierung rechts	145
Abbildung 113:	Verlauf der Anzahlkonzentration (FMPS) während des Schleifens; Nanolack 1. Lauf links, 2. Lauf rechts.....	145
Abbildung 114:	Verlauf der Anzahlkonzentration (FMPS) während des Schleifens; Nanolack + Additiv 3600 1. Lauf links, 2. Lauf rechts	146
Abbildung 115:	Verlauf der Anzahlkonzentration (FMPS) während des Schleifens; Nanolack + Additiv 3821 1. Lauf links, 2. Lauf rechts	146
Abbildung 116:	OH-Radikal Generierungspotential der Schleifemission-Suspensionen; Fehlerbalken = Standardabweichung, n = 3; rote gestrichelte Linie = Nachweisgrenze, deionisiertes Wasser = dH ₂ O	147
Abbildung 117:	Verhältnis der Oberflächenreaktivität der Schleifemission- Suspensionen zu deionisiertem Wasser als Blindwert.....	147
Abbildung 118:	Beispiel zweier Übersichts-REM-Aufnahmen der gezogenen NAS Proben der Schleifemissionen (links Holz, rechts Nanolack).....	148
Abbildung 119:	REM-Aufnahme (links) eine größeren Partikels mit dazugehöriger EDX Analyse (rechts) des in rot eingekreisten Partikel von Grundierungsemissionen	148
Abbildung 120:	REM-Aufnahme (links) eine größeren Partikels mit dazugehöriger EDX Analyse (rechts) des in rot eingekreisten Partikels von Nanolackemissionen	149
Abbildung 121:	REM-Aufnahme (links) eine größeren Partikels mit dazugehöriger EDX Analyse (rechts) des in rot eingekreisten Partikels von Emissionen des Nanolack + 3600.....	149
Abbildung 122:	REM-Aufnahme (links) eine größeren Partikels mit dazugehöriger EDX Analyse (rechts) des in rot eingekreisten Partikels von Emissionen des Nanolack + 3821	149
Abbildung 123:	Übersicht der mittleren Partikelanzahlkonzentrationen während der Charakterisierungsmessungen ± Standardabweichung.....	151
Abbildung 124:	Übersicht der mittleren Oberflächenkonzentration während der Charakterisierungsmessungen ± Standardabweichung.....	152
Abbildung 125:	Übersicht der mittleren Massenkonzentration (errechnet aus SMPS- Daten) während der Charakterisierungsmessungen ± Standardabweichung.....	152
Abbildung 126:	Mittlere NSAM und miniDiSC (stationär) Daten während der Expositionsphase 1	155
Abbildung 127:	Mittlere NSAM und miniDiSC (stationär) Daten während der Expositionsphase 2	155
Abbildung 128:	Zeitlicher Verlauf der miniDiSC LDSA-Werte für die Expositionsquelle Kerzen vom 23.10.2012	156
Abbildung 129:	Zeitlicher Verlauf der miniDiSC LDSA-Werte für die Expositionsquelle Braten vom 21.11.2012	157

Abbildung 130:	Zeitlicher Verlauf der miniDiSC Messdaten für die Expositionsquelle Toasten vom 09.10.2012.....	157
Abbildung 131:	Zeitlicher Verlauf der miniDiSC LDSA-Werte für die Expositionsquelle Blind vom 22.11.2012.....	157
Abbildung 132:	DNA-Strangbrüche in humanen A549 Lungeneithelzellen nach der Behandlung mit den Innenluftpartikeln der verschiedenen Expositionsquellen, 50 µg/ml (n = 3); *p < 0.05, **p < 0.01, ***p < 0.001	160
Abbildung 133:	Oxidative DNA-Schäden in humanen A549 Lungeneithelzellen nach der Behandlung mit Innenluftpartikeln der verschiedenen Expositionsquellen, 50 µg/ml (n = 3)	161
Abbildung 134:	Einfluss von Surfactant und Serum auf einen möglichen DNA-schädigenden Effekt von PM = Kerzenabbrandpartikel (Typ B) in humanen A549 Lungeneithelzellen	162
Abbildung 135:	IL-8 Freisetzung aus humanen A549 Lungeneithelzellen nach Behandlung mit Innenraumluftpartikeln aus verschiedenen Expositionsquellen, 50 µg/ml (n = 3, *p < 0,05).....	162
Abbildung 136:	NF-κB Aktivierung in A549 Zellen mittels Referenzpartikel und TNF-alpha.....	163
Abbildung 137:	DNA-Strangbrüche in humanen A549 Lungeneithelzellen nach Behandlung mit „Braten“-Innenluftpartikeln. Die Partikeln wurden mittels Wasser bzw. mittels Methanol vom Filter extrahiert, 50 µg/ml (n = 3).	164
Abbildung 138:	Oxidative DNA-Schäden in humanen A549 Lungeneithelzellen nach Behandlung mit „Braten“-Innenluftpartikeln. Die Partikeln wurden mittels Wasser bzw. Mittels Methanol vom Filter extrahiert, 50 µg/ml (n = 3).	164
Abbildung 139:	Übersicht Rekrutierungsverlauf Feldphase 1	167
Abbildung 140:	Übersicht Rekrutierungsverlauf Feldphase 2.....	168
Abbildung 141:	Durchführung der Pulswellengeschwindigkeit mit Ableitung an der Arteria Carotis mit dem Gerät SphygmoCor	170
Abbildung 142:	Auswertungsbogen der Messungen mit dem SphygmoCor.....	170
Abbildung 143:	Beispiel einer abgeleiteten Blutdruckkurve zur Erfassung der Kenngrößen	171
Abbildung 144:	Durchführung der Lungenfunktionsmessung mit dem Gerät NDD.....	172
Abbildung 145:	Auswertungsbogen eine Lungenfunktionstests	172
Abbildung 146:	Differenz der Differenz der Nasallavage-Zellanzahl [10 ³ /ml] zu 2 Messzeitpunkten zu unterschiedlichen Innenraumbelastungen und unterschiedlichen Belastungsniveaus im Vergleich zur Raumluft	180
Abbildung 147:	Differenz der Differenz der Epithelzellen in der Nasallavage [%] zu 2 Messzeitpunkten zu unterschiedlichen Innenraumbelastungen und unterschiedlichen Belastungsniveaus im Vergleich zur Raumluft	181

Abbildung 148:	Differenz der Differenz der neutrophilen Granulozyten in der Nasallavage [%] zu 2 Messzeitpunkten zu unterschiedlichen Innenraumbelastungen und unterschiedlichen Belastungsniveaus im Vergleich zur Raumluft	181
Abbildung 149:	Differenz der Differenz der Interleukin-8-Bestimmung aus der Nasallavage [pg/ml] zu 2 Messzeitpunkten zu unterschiedlichen Innenraumbelastungen und unterschiedlichen Belastungsniveaus im Vergleich zur Raumluft	182
Abbildung 150:	Differenz der Differenz des FEV ₁ [l] zu 2 Messzeitpunkten zu unterschiedlichen Innenraumbelastungen und unterschiedlichen Belastungsniveaus im Vergleich zur Raumluft	191
Abbildung 151:	Differenz der Differenz des FVC [l] zu 2 Messzeitpunkten zu unterschiedlichen Innenraumbelastungen und unterschiedlichen Belastungsniveaus im Vergleich zur Raumluft	192
Abbildung 152:	Differenz der Differenz des Verhältnisses von FEV ₁ zu FVC zu 2 Messzeitpunkten zu unterschiedlichen Innenraumbelastungen und unterschiedlichen Belastungsniveaus im Vergleich zur Raumluft	192
Abbildung 153:	Differenz der Differenz des MEF ₂₅₋₇₅ [l/s] zu 2 Messzeitpunkten zu unterschiedlichen Innenraumbelastungen und unterschiedlichen Belastungsniveaus im Vergleich zur Raumluft	193
Abbildung 154:	Differenz der Differenz der Lymphozyten [tsd/ μ l] zur post-24-Stunden- Messung zu unterschiedlichen Innenraumbelastungen und unterschiedlichen Belastungsniveaus im Vergleich zur Raumluft	202
Abbildung 155:	Differenz der Differenz der Erythrozyten [mill/ μ l] zur post-24-Stunden- Messung zu unterschiedlichen Innenraumbelastungen und unterschiedlichen Belastungsniveaus im Vergleich zur Raumluft	202
Abbildung 156:	Differenz der Differenz der Interleukin-8-Bestimmung im Plasma [pg/ml] zu 2 Messzeitpunkten zu unterschiedlichen Innenraumbelastungen und unterschiedlichen Belastungsniveaus im Vergleich zur Raumluft	206
Abbildung 157:	Differenz der Differenz der TEAC [μ M] zu 2 Messzeitpunkten zu unterschiedlichen Innenraumbelastungen und unterschiedlichen Belastungsniveaus im Vergleich zur Raumluft	206
Abbildung 158:	Differenz der Differenz der Harnsäure (UrAc) [μ M] zu 2 Messzeitpunkten zu unterschiedlichen Innenraumbelastungen und unterschiedlichen Belastungsniveaus im Vergleich zur Raumluft	207
Abbildung 159:	Differenz der Differenz für TEAC minus Harnsäure (UrAc) [μ M] zu 2 Messzeitpunkten zu unterschiedlichen Innenraumbelastungen und unterschiedlichen Belastungsniveaus im Vergleich zur Raumluft	207
Abbildung 160:	Differenz der Differenz des systolischen Blutdrucks [mmHg] zu allen 5 Messzeitpunkten zu unterschiedlichen Innenraumbelastungen und unterschiedlichen Belastungsniveaus im Vergleich zur Raumluft	216
Abbildung 161:	Differenz der Differenz des zur Herzfrequenz korrigierten Augmentationsdrucks [%] zu 4 Messzeitpunkten zu unterschiedlichen	

	Innenraumbelastungen und unterschiedlichen Belastungsniveaus im Vergleich zur Raumluft	220
Abbildung 162:	Differenz der Differenz der PWV [m/s] zu 2 Messzeitpunkten zu unterschiedlichen Innenraumbelastungen und unterschiedlichen Belastungsniveaus im Vergleich zur Raumluft	220
Abbildung 163:	Differenz der Differenz des SDNN [ms] zu 2 Messzeitpunkten zu unterschiedlichen Innenraumbelastungen und unterschiedlichen Belastungsniveaus im Vergleich zur Raumluft	226
Abbildung 164:	Differenz der Differenz des RMSSD (Vagusindex) [ms] zu 2 Messzeitpunkten zu unterschiedlichen Innenraumbelastungen und unterschiedlichen Belastungsniveaus im Vergleich zur Raumluft	226
Abbildung 165:	Differenz der Differenz der basophilen Granulozyten in der Nasallavage [%] zu 2 Messzeitpunkten zu unterschiedlichen Innenraumbelastungen und unterschiedlichen Belastungsniveaus im Vergleich zur Raumluft	305
Abbildung 166:	Differenz der Differenz der eosinophilen Granulozyten in der Nasallavage [%] zu 2 Messzeitpunkten zu unterschiedlichen Innenraumbelastungen und unterschiedlichen Belastungsniveaus im Vergleich zur Raumluft	308
Abbildung 167:	Differenz der Differenz der Monozyten/Makrophagen in der Nasallavage [%] zu 2 Messzeitpunkten zu unterschiedlichen Innenraumbelastungen und unterschiedlichen Belastungsniveaus im Vergleich zur Raumluft	311
Abbildung 168:	Differenz der Differenz der Lymphozyten in der Nasallavage [%] zu 2 Messzeitpunkten zu unterschiedlichen Innenraumbelastungen und unterschiedlichen Belastungsniveaus im Vergleich zur Raumluft	314
Abbildung 169:	Differenz der Differenz vom FeNO- Messwert [ppb] zu 2 Messzeitpunkten zu unterschiedlichen Innenraumbelastungen und unterschiedlichen Belastungsniveaus im Vergleich zur Raumluft	317
Abbildung 170:	Differenz der Differenz der Leukozyten [tsd/ μ l] zur post-24-Stunden-Messung zu unterschiedlichen Innenraumbelastungen und unterschiedlichen Belastungsniveaus im Vergleich zur Raumluft	320
Abbildung 171:	Differenz der Differenz der Thrombozyten [tsd/ μ l] zur post-24-Stunden- Messung zu unterschiedlichen Innenraumbelastungen und unterschiedlichen Belastungsniveaus im Vergleich zur Raumluft	322
Abbildung 172:	Differenz der Differenz der Neutrophile [tsd/ μ l] zur post-24-Stunden-Messung zu unterschiedlichen Innenraumbelastungen und unterschiedlichen Belastungsniveaus im Vergleich zur Raumluft	324
Abbildung 173:	Differenz der Differenz der Eosinophile [tsd/ μ l] zur post-24-Stunden-Messung zu unterschiedlichen Innenraumbelastungen und unterschiedlichen Belastungsniveaus im Vergleich zur Raumluft	326
Abbildung 174:	Differenz der Differenz der Basophile [tsd/ μ l] zur post-24-Stunden-Messung zu unterschiedlichen Innenraumbelastungen und unterschiedlichen Belastungsniveaus im Vergleich zur Raumluft	328

Abbildung 175:	Differenz der Differenz der Monozyten [tsd/ μ l] zur post-24-Stunden-Messung zu unterschiedlichen Innenraumbelastungen und unterschiedlichen Belastungsniveaus im Vergleich zur Raumluft	330
Abbildung 176:	Differenz der Differenz der Hämoglobin- Werte [g/dl] zur post-24-Stunden- Messung zu unterschiedlichen Innenraumbelastungen und unterschiedlichen Belastungsniveaus im Vergleich zur Raumluft	332
Abbildung 177:	Differenz der Differenz der Hämatokrit- Werte [%] zur post-24-Stunden- Messung zu unterschiedlichen Innenraumbelastungen und unterschiedlichen Belastungsniveaus im Vergleich zur Raumluft	334
Abbildung 178:	Differenz der Differenz des diastolischen Blutdrucks [mmHg] zu allen 5 Messzeitpunkten zu unterschiedlichen Innenraumbelastungen und unterschiedlichen Belastungsniveaus im Vergleich zur Raumluft	336
Abbildung 179:	Differenz der Differenz des zur Herzfrequenz korrigierten Augmentationsindex [%] zu 4 Messzeitpunkten zu unterschiedlichen Innenraumbelastungen und unterschiedlichen Belastungsniveaus im Vergleich zur Raumluft	339

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Untersuchte Quellen bzw. Expositionsszenarien.....	49
Tabelle 2:	Für die Partikelcharakterisierung verwendete Messverfahren, Messparameter und Spezifikationen.....	53
Tabelle 3:	Tabellarische Übersicht der durchgeführten Messungen/Analysen	58
Tabelle 4:	Übersicht der Messungen zur Charakterisierung von Kerzenabbrand	60
Tabelle 5:	Grundeigenschaften der untersuchten Baumkerzen; Maße/Gewicht als Mittelwert von jeweils 10 Kerzen.....	60
Tabelle 6:	Ergebnisse der gravimetrischen Analysen für PM1 und PM2.5 bei Kerzenabbrand.....	62
Tabelle 7:	Gravimetrisch ermittelte Massenkonzentrationen für das Toasten.....	85
Tabelle 8:	Übersicht der Partikelsammlung pro Filter mittels LVS für die Exposition Braten und Raumluft/Blank.....	108
Tabelle 9:	Übersicht der mittleren Anzahl-, Oberflächen- und Massenkonzentration (letzte berechnet) während der Propangasbrennermessungen.....	136
Tabelle 10:	Übersicht der mittleren Anzahl-, Oberflächen- und Massenkonzentration (letzte errechnet) während der Spiritusbrennermessungen.....	138
Tabelle 11:	Übersicht der mittleren Anzahl-, Oberflächen- und Massenkonzentration (letzte errechnet) der Heißluftstrahlerradiatormessungen.....	142
Tabelle 12:	Übersicht der erfassten mittleren Temperatur und rel. Feuchte Daten; I = Expositionslevel 1, II = Expositionslevel 2; SD = Standardabweichung.....	153
Tabelle 13:	Übersicht der erfassten mittleren Anzahlkonzentrationen; SD = Standardabweichung.....	153
Tabelle 14:	Übersicht der erfassten mittleren Expositionsparameter Oberflächen- und Massenkonzentrationen; SD = Standardabweichung	153
Tabelle 15:	Ausschnitt aus der erstellten Probanden-Expositionstabelle	154
Tabelle 16:	Übersicht der NSAM und miniDiSC (stationär) Daten (in $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$).....	156
Tabelle 17:	Effizienz der Partikelextraktion für PM2.5 und PM1 Proben.....	159
Tabelle 18:	Gesundheitsuntersuchungen	169
Tabelle 19:	Kriterien für technisch zufrieden stellende und reproduzierbare Manöver der Pulswellenanalyse	170
Tabelle 20:	Kriterien für technisch zufrieden stellende und reproduzierbare Manöver der Lungenfunktion	173
Tabelle 21:	Übersicht der Expositionstage für mittlere und hohe Exposition	176
Tabelle 22:	Eigenschaften des Probandenkollektivs (n = 56) der EPIA Studie; mean = Mittelwert, SD = Standardabweichung.....	176

Tabelle 23:	Übersicht der Temperatur und relativen Luftfeuchtigkeit während der Kammermessung	177
Tabelle 24:	Übersicht der Partikelmassenkonzentration [pro 10 µg/m ³] während der Kammermessung	177
Tabelle 25:	Übersicht der Partikeloberflächenkonzentration und Partikelanzahl während der Kammermessung	177
Tabelle 26:	Veränderung der Nasallavage Zellanzahl [10 ³ /ml]: Mittelwert (mean) und 95%- Konfidenzintervall (95%- CI)	183
Tabelle 27:	Veränderung der Zellanzahl der Epithelzellen aus der Nasallavage [%]: Mittelwert (mean) und 95%- Konfidenzintervall (95%- CI)	185
Tabelle 28:	Veränderung der neutrophilen Granulozyten aus der Nasallavage [%]: Mittelwert (mean) und 95%- Konfidenzintervall (95%- CI)	187
Tabelle 29:	Veränderung der Interleukin 8 aus Nasallavage [pg/ml]: Mittelwert (mean) und 95%- Konfidenzintervall (95%- CI)	189
Tabelle 30:	Veränderung der FEV ₁ [ml]: Mittelwert (Mean) und 95%- Konfidenzintervall (95%- CI)	194
Tabelle 31:	Veränderung des FVC [ml]: Mittelwert (Mean) und 95%- Konfidenzintervall (95%- CI)	196
Tabelle 32:	Veränderung des Quotienten von FEV ₁ /FVC: Mittelwert (Mean) und 95%- Konfidenzintervall (95%- CI)	198
Tabelle 33:	Veränderung des Quotienten von MEF _{25 - 75} [l/s]: Mittelwert (Mean) und 95%- Konfidenzintervall (95%- CI)	200
Tabelle 34:	Veränderung der Lymphozyten[tsd/µl]: Mittelwert (Mean) und 95%- Konfidenzintervall (95%- CI)	203
Tabelle 35:	Veränderung der Erythrozyten [mill/µl]: Mittelwert (Mean) und 95%- Konfidenzintervall (95%- CI)	204
Tabelle 36:	Veränderung der Interleukin 8 aus Plasma [pg/ml]: Mittelwert (Mean) und 95%- Konfidenzintervall (95%- CI)	208
Tabelle 37:	Veränderung der TEAC im Plasma [µM]: Mittelwert (Mean) und 95%- Konfidenzintervall (95%- CI)	210
Tabelle 38:	Veränderung der Harnsäure im Plasma [µM]: Mittelwert (Mean) und 95%- Konfidenzintervall (95%- CI)	212
Tabelle 39:	Veränderung der TEAC minus Harnsäure [µM]: Mittelwert (Mean) und 95%- Konfidenzintervall (95%- CI)	214
Tabelle 40:	Veränderung des Blutdrucks (Systole): Mittelwert (Mean) und 95%- Konfidenzintervall (95%- CI)	217
Tabelle 41:	Veränderung des zur Herzfrequenz korrigierten Augmentationsdrucks [mmHg]: Mittelwert (mean) und 95%- Konfidenzintervall (95%- CI)	221
Tabelle 42:	Veränderung der Pulswellengeschwindigkeit [m/s]: Mittelwert (mean) und 95%- Konfidenzintervall (95%- CI)	224
Tabelle 43:	Veränderung des SDNN [ms]: Mittelwert (mean) und 95%- Konfidenzintervall (95%- CI)	227

Tabelle 44:	Veränderung des RMSSD [ms]: Mittelwert (mean) und 95%-Konfidenzintervall (95%- CI).....	229
Tabelle 45:	Übersicht der probandenspezifischen Exposition; Expo. = Exposition, SD = Standardabweichung, MW = Mittelwert.....	240
Tabelle 46:	Mittelwert (mean) und Standardabweichung (SD) der Nasallavage für alle Probanden und Expositionen zu den jeweiligen Messzeitpunkten.....	293
Tabelle 47:	Mittelwert (mean) und Standardabweichung (SD) des NO-Anteils der Ausatemluft (FeNO) für alle Probanden und Expositionen zu den jeweiligen Messzeitpunkten.....	295
Tabelle 48:	Mittelwert (mean) und Standardabweichung (SD) der Lungenfunktionsvariablen für alle Probanden und Expositionen zu den jeweiligen Messzeitpunkten.....	295
Tabelle 49:	Mittelwert (mean) und Standardabweichung (SD) der Variablen des Differenzialblutbildes für alle Probanden und Expositionen zu den jeweiligen Messzeitpunkten.....	296
Tabelle 50:	Mittelwert (mean) und Standardabweichung (SD) von Markern für oxidativen Stress und Entzündungen für alle Probanden und Expositionen zu den jeweiligen Messzeitpunkten.....	298
Tabelle 51:	Mittelwert (mean) und Standardabweichung (SD) des Blutdrucks für alle Probanden und Expositionen zu den jeweiligen Messzeitpunkten.....	299
Tabelle 52:	Mittelwert (mean) und Standardabweichung (SD) der PWA für alle Probanden und Expositionen zu den jeweiligen Messzeitpunkten.....	300
Tabelle 53:	Mittelwert (mean) und Standardabweichung (SD) der Pulswellengeschwindigkeit für alle Probanden und Expositionen zu den jeweiligen Messzeitpunkten.....	301
Tabelle 54:	Mittelwert (mean) und Standardabweichung (SD) der Herzfrequenzvariabilität für alle Probanden und Expositionen zu den jeweiligen Messzeitpunkten.....	301
Tabelle 55:	Deskription der Gesundheitsendpunkte für die gesamte Studienpopulation über alle Zeitpunkte. EPIA Studie, 56 Teilnehmer; mean = Mittelwert, SD = Standardabweichung, median = Median, IQR = Interquartilsspanne.....	302
Tabelle 56:	Veränderung der basophilen Granulozyten aus der Nasallavage [%]: Mittelwert (mean) und 95%- Konfidenzintervall (95%- CI).....	306
Tabelle 57:	Veränderung der eosinophilen Granulozyten aus der Nasallavage [%]: Mittelwert (mean) und 95%- Konfidenzintervall (95%- CI).....	309
Tabelle 58:	Veränderung der Monozyten/Makrophagen aus der Nasallavage [%]: Mittelwert (mean) und 95%- Konfidenzintervall (95%- CI).....	312
Tabelle 59:	Veränderung der Lymphozyten aus der Nasallavage [%]: Mittelwert (mean) und 95%- Konfidenzintervall (95%- CI).....	315
Tabelle 60:	Veränderung des FeNO- Messwertes [ppb]: Mittelwert (mean) und 95%- Konfidenzintervall (95%- CI).....	318

Tabelle 61:	Veränderung der Leukozyten [tsd/ μ l]: Mittelwert (mean) und 95%-Konfidenzintervall (95%- CI).....	321
Tabelle 62:	Veränderung der Thrombozyten [tsd/ μ l]: Mittelwert (mean) und 95%-Konfidenzintervall (95%- CI).....	323
Tabelle 63:	Veränderung der Neutrophile [tsd/ μ l]: Mittelwert (mean) und 95%-Konfidenzintervall (95%- CI).....	324
Tabelle 64:	Veränderung der Eosinophile [tsd/ μ l]: Mittelwert (mean) und 95%-Konfidenzintervall (95%- CI).....	326
Tabelle 65:	Veränderung der Basophile[tsd/ μ l]: Mittelwert (mean) und 95%-Konfidenzintervall (95%- CI).....	329
Tabelle 66:	Veränderung der Monozyten[tsd/ μ l]: Mittelwert (mean) und 95%-Konfidenzintervall (95%- CI).....	330
Tabelle 67:	Veränderung des Hämoglobin [g/dl]: Mittelwert (mean) und 95%-Konfidenzintervall (95%- CI).....	332
Tabelle 68:	Veränderung des Hämatokrit [%]: Mittelwert (mean) und 95%-Konfidenzintervall (95%- CI).....	334
Tabelle 69:	Veränderung des Blutdrucks (Diastole): Mittelwert (mean) und 95%-Konfidenzintervall (95%- CI).....	337
Tabelle 70:	Veränderung des zur Herzfrequenz korrigierten Augmentationsindex [%]: Mittelwert (mean) und 95%- Konfidenzintervall (95%- CI).....	340
Tabelle 71:	Veränderung der FEV ₁ [l] nach Senitivitätsanalyse: Mittelwert (mean) und 95%- Konfidenzintervall (95%- CI).....	343
Tabelle 72:	Veränderung der FVC [ml] nach Senitivitätsanalyse: Mittelwert (mean) und 95%- Konfidenzintervall (95%- CI).....	346
Tabelle 73:	Veränderung der FEV ₁ /FVCnach Senitivitätsanalyse: Mittelwert (mean) und 95%- Konfidenzintervall (95%- CI).....	348
Tabelle 74:	Veränderung der MEF ₂₅₋₇₅ [ml] nach Senitivitätsanalyse: Mittelwert (mean) und 95%- Konfidenzintervall (95%- CI).....	350
Tabelle 75:	Veränderung des Blutdrucks (Systole)nach Senitivitätsanalyse: Mittelwert (mean) und 95%- Konfidenzintervall (95%- CI).....	352
Tabelle 76:	Veränderung des Blutdrucks (Diastole)nach Senitivitätsanalyse: Mittelwert (mean) und 95%- Konfidenzintervall (95%- CI).....	355

Abkürzungsverzeichnis

AGPH_HR75	Augmentationsindex, korrigiert auf eine Herzfrequenz von 75
AMS	Aerosol Massenspektrometer
AP_HR75	Augmentationsdruck, korrigiert auf eine Herzfrequenz von 75
APS	Aerodynamic Particle Sizer
Aug/PH%	Augmentationsindex
BEV	Back extrapolated volume
CB	Abbrennen von Kerzen (candle burning)
CPC	Condensation Particle Counter
CPH	1-hydroxy-3-carboxy-pyrrolidine
DiSCMini	Diffusion Size Classifier
DMPO	5,5-dimethyl-1-pyrrolin-N-oxid
EDTA	Ethylene diamine tetraacetic acid
EOTV	End of test value
ESP	Elektrostatischer Präzipitator
ESR	Elektronen Spin Resonanzspektrometrie
FeNO	Fractional exhaled NO
FET	Forcierte Expirationszeit (forced expiratory time)
FEV1	Forcierte expiratorische Einsekundenkapazität (forced expiratory pressure in 1 second)
FMPS	Fast Scanning Mobility Sizer
FPG	Formamido-pyrimidin-DNA-glykosylase
FS	Braten von Würstchen (frying sausages)
FVC	Forcierte expiratorische Vitalkapazität (forced vital capacity)
HRV	Herzratenvariabilität (heart rate variability)
IL-8	Interleukin-8
LVS	Low Volume Sampler
MEF25-75	Expiratorischer Fluss bei 25-75 % der forcierten Vitalkapazität (mean forced expiratory flow)
NAS	Nanometer Aerosol Sampler
NF-kappaB	Nuclear factor kappa-light-chain-enhancer
NN	Abstand zweier Herzschläge (normal to normal)
PEFT	Peak flow and time
PILS	Particle-into-liquid-sampler
PM	Feinstaub (particulate matter)
PMC	Partikelmassenkonzentration (particulate matter mass concentration)
PNC	Partikelanzahlkonzentration (particulate matter number concentration)

PSC	lungendeponierbare Oberflächenkonzentration (particle surface area concentration)
PTR-MS	Proton Transfer Reaction Mass Spectrometry
PWA	Pulswellenanalyse (pulse wave analysis)
PWV	Pulswellengeschwindigkeit (pulse wave velocity)
REM	Rasterelektronenmikroskopie
RMSSD	Root mean square of the successive differences
ROS	Reactive oxygen species
SDNN	Standardabweichung aller NN- Intervalle (standard deviation of NN intervals)
SMPS	Scanning Mobility Particle Sizer
SOP	Standard operating procedure
TB	Toasten von Brot (toasting bread)
TEAC	Trolox equivalent antioxidative capacity
TNF-alpha	Tumor Nekrose Faktor-alpha
TXRF	Totalreflexions-Röntgenfluoreszenzspektrometrie
UrAc	Harnsäure (uric acid)
WHO	Weltgesundheitsorganisation (World Health Organization)

Zusammenfassung

Partikelemissionen in Innenräumen und deren gesundheitliche Auswirkungen werden zurzeit im Vergleich zu Partikeln - „Feinstaub“ - der Außenluft in der öffentlichen Wahrnehmung noch eher stiefmütterlich behandelt. Entsprechend besteht auch ein nur begrenzter Kenntnisstand über das Emissionsverhalten von Innenraumquellen und deren gesundheitliche Relevanz. Abgesehen von der Reinraumtechnik oder des Zigarettenrauches bestehen dabei für Innenräume keine verbindlichen Vorgaben hinsichtlich erlaubter Partikelkonzentrationen. Dabei stellt für Innenräume einerseits die Außenluft eine bedeutende Quelle dar und auf der anderen Seite sind Haushalts- / Innenraumaktivitäten wie Kochen, Staubsaugen etc. mögliche Partikelquellen. Hinsichtlich des Expositionsmusters ist entsprechend solcher typischen kurzzeitigen Innenraumaktivitäten insbesondere für die submikrone Fraktion eine hohe räumliche und zeitliche Variabilität der Expositionsparameter Partikelanzahl und –größe wie auch für die chemische Zusammensetzung zu erwarten. Einige Studien zeigen, dass Innenraumaktivitäten beispielsweise zu einem episodischen Anstieg der ultrafeinen (< 100 nm) Partikelkonzentration führt und dabei in spezifischen Situationen die WHO-Empfehlungen für die Innenraumluft überschritten wird. Für die Charakterisierung von Innenraumemissionen gilt es folglich diese hohe Variabilität zu berücksichtigen und dabei auf die ultrafeine Partikelfraktion verstärkt zu achten.

Aus toxikologisch-medizinischer Sicht wird wiederum insbesondere den ultrafeinen Partikeln (UFP) eine große Bedeutung für die Auslösung möglicher Gesundheitseffekte zugesprochen. Aufgrund ihrer geringen Größe können UFP zum Teil bis in den Alveolarraum vordringen und die große Gesamtoberfläche kann zur vermehrten Bindung von Schadstoffen und zu einer hohen Reaktivität führen. Zudem vermögen UFP möglicherweise in die systemische Zirkulation überzutreten und auch entlang des Nervus olfactorius in das zentrale Nervensystem zu gelangen. Aus Außenluftstudien ist dabei bekannt, dass ein akuter Anstieg der Feinstaubkonzentration in der Umgebungsluft zu einer erhöhten kardiovaskulären Morbidität und Mortalität führt. Die Wirkmechanismen sind dabei noch im Einzelnen unklar, es wird jedoch vermutet, dass die Partikelinhalation zu einer Aktivierung pulmonaler Reflexe mit nachfolgender Dysbalance des autonomen Nervensystems führt. Ferner wird vermutet, dass die Stäube oxidativen Stress auslösen und es zu einer lokalen subklinischen Entzündung im Respirationstrakt sowie einer systemischen Entzündungsreaktion kommt. Diese Entzündungsreaktionen werden in Verbindung mit verschiedenen weiteren Endorganmanifestationen gebracht, wie z. B. Beeinträchtigung der Lungenfunktion, endotheliale Dysfunktion und Blutdruckanstieg oder aber erhöhte Koagulationsneigung des Blutes. Basierend auf diesen Befunden und ersten toxikologisch-medizinischen Quelleneffektstudien die ein Auslösen systemischer Entzündungsprozesse vor allem durch Verbrennungsprozesse (Kerzenabbrand) im Innenraum zeigen, wurde in dieser Studie untersucht inwieweit eine akute Exposition in Innenräumen durch spezifische Innenraumpartikel zu ähnlichen Effekten führen können. Von Bedeutung ist eine solche systematische Evaluierung der gesundheitlichen Wirkungen von Innenraumpartikeln insbesondere auch aufgrund der hohen Aufenthaltsdauer von durchschnittlich 16 h pro Tag (Westeuropäer) und der damit einhergehenden hohen Expositionszeit. Entsprechend wurde in diesem Projekt eine Probandenstudie in einem Versuchsraum mit einem kontrollierten Expositionsdesign durchgeführt. Als zentrale Wirkungshypothese wurde die Auslösung von oxidativem Stress verbunden mit einer subklinischen lokalen respiratorischen und systemischen Entzündungsreaktion erörtert. Hierzu wurden spezifische Innenraumquellen zunächst chemisch-physikalisch charakterisiert und sowohl das oxidative Potential als auch der hypothetische Wirkungspfad in vivo über die Untersuchung von Markern des oxidativen Stresses und von Entzündungsmediatoren untersucht. Ergänzend wurden diese möglichen Effekte auf zellulärer Ebene erfasst. Es wurden somit akute Auswirkungen auf die Endorgane und hierbei insbesondere der Respirationstrakt als bedeutendstes Zielorgan von Partikeln betrachtet. Zytotoxische und inflammatorische Wirkungen auf die Nasenschleimhaut wurden dabei in vivo mittels Nasallavage untersucht wobei ein Influx von neutrophilen Granulozyten, wie in einigen Studien mit Umweltstäuben schon gezeigt, als klar zu bestimmender Effekt erfasst wurde. Neben lokalen inflammatorischen Wirkungen im Respirationstrakt wurde auch die systemische Wirkung von Partikeln untersucht und hier insbesondere die Lipidperoxidation als Maß für den von den Partikeln ausgelösten oxidativen Stress erfasst. In Kombination wurden so in vivo Zielorganwirkungen wie beispielsweise Lungenfunktion oder ein Anstieg des arteriellen Blutdrucks untersucht und parallel

inflammatorische Wirkungen über beispielsweise Marker im Blut untersucht, um eine Abschätzung möglicher Gesundheitseffekte durch spezifische Innenraumpartikel zu ermöglichen.

Diese Studie stellt somit eine Kombination aus physikalisch-chemischer Charakterisierung und toxikologisch-medizinischer Wirkungserfassung von Innenraumpartikeln dar. Hierzu wurden in einem ersten Schritt potentiell wichtige Innenraumquellen für Fein- und Ultrafeinstäube identifiziert und diese physikalisch-chemisch charakterisiert. Basierend auf den dabei gewonnenen Erkenntnissen wurden diejenigen Prozesse ausgewählt, die im Hinblick auf mögliche Gesundheitseffekte relevante Partikelemissionen aufwiesen, um sie anschließend in einer kontrollierten Expositionsstudie näher zu untersuchen.

Zunächst aber wurden die Szenarien bzw. Prozesse 1. Abbrand von Kerzen (zwei Typen A und B), 2. Toasten von Butters toast, 3. Backen von Fertigpizza, 4. Braten von Würstchen, 5. Betrieb eines Kaminofens (sachgerecht und mit typischen Fehlbedienungen), 6. Betrieb eines Staubsaugers, 7. Betrieb eines Heißluftstrahlradiator, 8. Betrieb eines mit Butan- oder Spirituscampingskochers, 9. Motoremissionen des Staubsaugers und das 10. Schleifen von Nanopartikel-haltigem Lack untersucht. Hierzu wurden in einem Versuchsraum (jeweils angepasst an das Szenario, z.B. Schleifen an einem Schleifstand) die jeweiligen Prozesse durchgeführt. Die Charakterisierung umfasste hierbei (Umfang des Geräteinsatzes ebenfalls an das Szenario angepasst) die Partikelmassenkonzentration (PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁), Partikelanzahlgrößenverteilung (inklusive UFP Anzahlkonzentration), lungendeponierbare Partikeloberflächenkonzentration, Konzentration von organischem und elementarem Kohlenstoff (OC/EC), Konzentration von spezifischen organischen Verbindungen, Konzentration von anorganischen Elementen, Partikelreaktivität (Bildungspotential von reaktiven Sauerstoffspezies, ROS) und Partikelmorphologie. Eine Übersicht der durchgeführten Untersuchungen sowie die eingesetzten Analysegeräte gibt die folgende tabellarische Übersicht der durchgeführten Messungen / Analysen wieder.

	Klima	CPC	SMPS	FMPS	APS	NSAM	NAS	PILS	LVS	AMS	EC/OC	REM	TXRF	PTR-MS
Kerzen- sorte A	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Kerzen- sorte B	X	X	X	X	X	X	X	X	X	n. a.	X	X	X	X
Toaster	X	X	X	X	X	X	X	X	X	n. a.	n. a.	X	X	X
Back- ofen	X	X	X	X	X	X	n. a.							
Braten	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Staub- sauger	X	X	X	X	X	X	n.a.	x						
Staub- sauger (Motor Emiss- ionen)	n.a.	X	X	X	X	X	X	X	X	n.a.	n.a.	X	X	n.a.
Kamin- ofen	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Gas- und Spirit- us brenner	X	n. a.	X	X	X	X	n. a.							
Heißluft- radiator	X	n. a.	X	X	X	X	n. a.							
Schlei- fen	n.a.	X	n.a.	X	X	X	X	n.a.						

Anmerkung: n. a. = nicht angewandt, Klima = Temperatur, abs. und rel. Feuchte, CO (nur bei Kerzen); X = Analyse durchgeführt; CPC = Condensation Particle Counter, (F)SMPS = (Fast) Scanning Mobility Particle Sizer, APS = Aerosol Particle Sizer, NSAM = Nanoparticle Surface Areas Monitor; NAS = Nanometer Aerosol Sampler, PILS = Particle Into Liquid Sampler für ROS Analyse, LVS = Low Volume Sampler, AMS = Aerosol Mass Spectrometer, EC/OC = Elementarer/Organischer Kohlenstoff, REM = Rasterelektronenmikroskop, TXRF = Totalröntgenfluoreszenz und PTR-MS = Proton Transfer Reaction Mass Spectrometry

Unter Verwendung der aufgeführten Analysegeräte ergab sich beim Abbrand von Kerzen eine erhöhte PM_{2.5} Konzentration (270 µg/m³) im Vergleich zu mittleren urbanen Außenluftkonzentrationen (ca. 15-20 µg/m³). Dabei erwiesen sich diese Partikel überwiegend (> 90 %) im submikronen Bereich bei im Versuchsraum erreichten Partikelanzahlkonzentrationen von mehreren Millionen Partikeln pro cm³. Die lungen-deponierbare Partikeloberfläche war ebenfalls mit 1.000 und 6.000 µm²/cm³ ca. 20- bis 100-fach höher als in der urbanen Außenluft. Ein signifikantes OH-Radikalbildungspotential konnte nicht gezeigt werden, jedoch eine schwache Oberflächenreaktivität. Ebenso wurden keine deutlich erhöhten gasförmigen Stoffe gemessen. Partikel gebundene Inhaltsstoffe waren von organischen Verbindungen und Nitrat dominiert. Die Analyse mittels REM ergab unterschiedlichste Partikelgrößen und -formen.

Für das Toasten wurden unter den gegebenen Bedingungen ebenfalls eine erhöhte Anzahl von ultrafeinen Partikeln von 1,0 bis 1,5 x 10⁶ Partikeln je cm³ gemessen. Die Masse erreichte Spitzenwerte bei einem 30-Minuten Toast-Zyklus von 250 bis 300 µg/m³. Die lungen-deponierbare Partikeloberfläche war mit 800 bis 2.300 µm²/cm³ ebenfalls deutlich erhöht. Ein signifikantes OH-Radikalbildungspotential bzw. eine Oberflächenreaktivität konnte nicht gezeigt werden. Ebenso wurden keine deutlich erhöhten gasförmigen Stoffe gemessen. Partikel-gebundene Inhaltsstoffe waren von organischen Verbindungen dominiert mit nachweisbaren Mengen von anorganischem Eisen (Heizdrahtemissionen). Die Analyse mittels REM ergab unterschiedlichste Partikelgrößen und -formen wie z.B. organische Verbindungen aber ebenso Salze (NaCl).

Beim Braten (ohne Zugabe von Fett oder Öl) wurden intensive Partikelemissionen ($1,0 \times 10^6$ Partikel/cm³) im Versuchsraum festgestellt. Die Befunde der chemischen, gravimetrischen und REM Analysen deuten dabei darauf hin, dass es sich überwiegend um sub-mikrone Fettpartikel handelt. Dabei wurden etwa $560 \mu\text{g}/\text{m}^3$ an Partikelmasse gesammelt. Die lungendeponierbare Partikeloberfläche war mit 3.000 bis $4.000 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ ebenfalls deutlich erhöht. Ein signifikantes OH-Radikalbildungspotential bzw. eine Oberflächenreaktivität konnte nicht gezeigt werden. Die Analyse mittels Aerosolmassenspektrometer und Rasterelektronenmikroskop (REM) ergab unterschiedlichste Partikelgrößen und -formen dominiert von organischen Kohlenstoffpartikeln aber auch Salzen wie NaCl oder Nitrat.

Für die weiteren Emissionsszenarien Pizzabacken, Kaminofen, Gas- und Spiritusbrenner, Heißluftstrahlradiator, Staubsauger und Schleifen ergaben sich nur vergleichsweise geringe Emissionen sub-mikroner Partikel etwa im Bereich von 10.000 bis 200.000 Partikel pro cm³. Die lungendeponierbare Oberfläche lag je nach Quelle leicht erhöht (im Vergleich zu Außenluft) bei 150 bis $1.000 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$. Die Massenanalysen (PM_{2.5}) ergaben 10 bis $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (entspricht etwa der PM_{2.5} Außenluft). Die durchgeführten ROS Analysen konnten zumeist keine signifikanten Reaktivitäten bzw. Hydroxylradikalbildung zeigen (Ausnahme Schleifpartikel mit metallischem Additiv). Ebenso wurden keine signifikant erhöhten Konzentrationen von gasförmigen Komponenten erfasst. Die chemischen Analysen und REM-Aufnahmen konnten jeweils durchaus zu erwartende Elemente, wenn auch in sehr geringer Menge, nachweisen.

Es sei darauf hingewiesen, dass diese Ergebnisse alle unter den jeweils eingestellten Versuchsbedingungen erfasst wurden und auch hinsichtlich der später zu erfolgenden Expositionsstudie durchgeführt und interpretiert wurden. Einzelne Spitzenwerte beispielsweise lagen durchaus in höheren Bereichen und abgeänderte Szenarien werden vermutlich deutlich abweichende Ergebnisse zur Folge haben.

Hinsichtlich der Partikelemissionen für Innenräume wurde letzten Endes basierend auf den Ergebnissen als potentiell wichtige Quelle das Braten (von Würstchen ohne extra Fettzugabe), das Abbrennen von Kerzen sowie das Toasten identifiziert. Zusammengefasst zeigte sich, dass im Vergleich zu anderen Innenraumquellen eine erhöhte Partikelanzahl- und Massenkonzentration insbesondere submikroner Partikel emittiert wird. In der Folge wurden diese Quellen weiter charakterisiert bzw. für die Probandenstudie verwendet. Hierzu erfolgte zunächst eine Sammlung der Partikel auf Filter mit sich anschließenden in-vitro-Experimenten an Lungenepithelzellen (s. späteren Abschnitt). Darüber hinaus wurden diese drei Quellen plus Blind-/Raumlufprobe als Expositionsszenario in der Probandenstudie eingesetzt.

	Anzahlkonzentration (APS) in #/cm ³			Anzahlkonzentration (FMPS) in 1000#/cm ³			Anzahlkonzentration (SMPS) in 1000#/cm ³		
	N	Mittelwert	SD	N	Mittelwert	SD	N	Mittelwert	SD
Kerzen	7	8,0	5,9	7	2.005	238	6	1.552	843
Toasten	7	23,4	40,6	10	934	124	7	685	337
Braten	8	23,4	23,3	9	328	85,6	8	269	136
Blank	11	3,5	4,8	12	4,6	2,5	12	2,7	1,6
Kerzen II	9	2,5	2,1	9	2.767	149	8	1.780	271
Toasten II	10	3,9	3,6	10	1.485	252	10	1.076	269
Braten II	10	73,3	54,6	10	711	151	10	506	122

Um mögliche konzentrationsabhängige Effekte erfassen zu können, erfolgte die Exposition mit den ausgewählten Quellen auf zwei verschiedenen hohen, möglichst konstanten Partikel-Konzentrationsniveaus. Eine Übersicht der im Versuchsraum vorhandenen mittleren Partikelanzahlkonzentrationen ist in der nachfolgenden Tabelle zur Veranschaulichung der Expositionsniveaus für die Probanden dargestellt. Darüber hinaus wurden ebenfalls die verschiedenen Partikelmassen und die lungendeponierbare Oberfläche ermittelt.

Mit den zuvor charakterisierten und gesammelten Partikeln wurden in der Folge toxikologische Studien unter Nutzung etablierter Zellkulturmodelle durchgeführt. Diese sogenannten *in vitro*-Tests unterstützen die Identifikation potentieller molekularer und zellulärer Mechanismen, denen die Entwicklung und/oder die Progression von Krankheiten, die mit der Langzeitinhalation solcher Außenluftpartikel verbunden sind, unterliegen. Frühere Untersuchungen mit feinen oder ultrafeinen Partikeln zeigten eine Induktion von oxidativem Stress in Lungenepithelzellen. Eine Hauptantwort ist dabei die Ausschüttung proinflammatorischer Zytokine, wie z.B. Interleukin-8 (IL-8). Signaltransduktionsstudien haben gezeigt, dass die Partikel-induzierte Hochregulierung von IL-8 über eine Aktivierung des redox-sensitiven Transkriptionsfaktors NF-kappaB (nuclear factor kappa B) mediiert wird.

Partikel-bedingter oxidativer Stress in Epithelzellen kann auch zu einer Induktion von DNA-Schädigungen führen und wurde z.B. als DNA-Strangbrüche oder Oxidation spezifischer DNA-Basen nachgewiesen. Diese Eigenschaft von PM zur Induktion von oxidativem Stress nach Inhalation und die nachfolgende Interaktion mit Lungenepithelzellen wird als hauptsächlich verantwortlicher Mechanismus für die Entstehung und Progression adverser pulmonaler und kardiovaskulärer Erkrankungen angesehen. Das Ausmaß der Effekte von Außenluft-PM in Zellkultur Assays ist stark von den Sammelpätzen und damit von den physiko-chemischen Eigenschaften der Partikel abhängig. Damit können toxikologische *in vitro*-Untersuchungen von PM auch zur Identifikation des Gefährdungspotentials und einer Einstufung bezüglich Herkunft und spezifischer Quellen der PM beitragen. In Übereinstimmung mit diesem Konzept wurden in diesem Projekt *in vitro*-Untersuchungen mit Partikeln unterschiedlicher Innenraumquellen durchgeführt. Dies beinhaltete das Toasten, Braten von Würstchen und Kerzenabbrand. Die PM wurden auf PFTE-Filter gesammelt und nachfolgend mittels einer im IUF entwickelten Methode über Schütteln und Ultraschallbehandlung der Filter in destilliertes Wasser extrahiert. Die Partikelsuspensionen wurden dann gefriertrocknet, um eine standardisierte, kontrollierte Lagerung bis zur Durchführung der toxikologischen Untersuchungen zu gewährleisten. Aufgrund der deutlich unterschiedlichen Natur der Partikel aus dem Bratprozess und Problemen bzgl. einer adäquaten Wasser-basierten Extraktion wurde für diese Partikel zusätzlich ein modifiziertes Methanol-basiertes Extraktionsprotokoll genutzt.

Die toxikologischen Untersuchungen wurden unter Nutzung der humanen Lungenepithelzelllinie A549 durchgeführt. Die Zellen wurden unmittelbar nach Resuspension der Partikel in Zellkulturmedium belastet. In jedem Experiment wurde eine PM-Referenzprobe (Außenluft-TSP, engl. total suspended particles) mitgeführt, um die Reproduzierbarkeit der experimentellen Bedingungen sicherzustellen. Die Ausschüttung von IL-8 in den Zellkulturüberstand wurde mittels ELISA (engl. Enzyme-linked Immunosorbent Assay) und die

Induktion von DNA-Strangbrüchen mittels alkalischem Komet-Assay nachgewiesen. Eine spezifische Modifikation des letzteren Assays schließt die Nutzung des DNA-Reparaturenzyms Formamido-Pyrimidine-DNA-Glycosylase (Fpg) zum Nachweis oxidierter DNA ein. Bei der Belastung der Zellen wurden die Partikel alle mit gleicher Massenkonzentration (50 µg/ml) eingesetzt, um einen direkten Vergleich der toxischen Wirkung zu ermöglichen. Ausgewählte Experimente wurden unter Zusatz von kommerziell verfügbarem Surfactant oder in An- bzw. Abwesenheit von Serum durchgeführt. Für den Nachweis der NF-kappaB-Aktivierung durch die Innenraumpartikel in den A549-Zellen wurde eine immunhistochemische Methode eingesetzt.

Ein signifikanter Anstieg von DNA-Strangbrüchen wurde mit dem Referenzmaterial, mit Kerzenabbrand-Partikeln (Kerzentyp A) sowie mit Partikeln, die aus dem Toasten resultierten, beobachtet. Dagegen wurden mit keinem der Partikel, auch nicht mit dem Referenzmaterial, unter den gleichen Belastungsbedingungen oxidative DNA-Läsionen nachgewiesen. Durch die Anwesenheit von Surfactant oder auch Serum wurden in weiteren Experimenten einige der Effekte modifiziert, jedoch ohne statistische Signifikanz zu erreichen. Die über die Methanolmethode extrahierten Partikel aus dem Würstchenbratprozess zeigten, wie auch die mittels Wasser extrahierten Partikel, keine signifikanten DNA-schädigenden Eigenschaften.

Untersuchungen der Partikel-induzierten Produktion von IL-8 ergaben nur für das Referenzmaterial sowie die Partikel aus dem Toastprozess signifikante Effekte. Auch hier zeigte das Referenzmaterial die deutlichsten Effekte. In weiteren Untersuchungen zur Aufdeckung der Mechanismen der IL-8-Aktivierung wurde mittels immunhistochemischer Untersuchungen eine Aktivierung des NF-kappaB-Signaltransduktionsweges durch das Referenzmaterial gezeigt. Mit allen anderen Innenraumpartikeln waren dagegen keine klaren Anzeichen einer Aktivierung des Transkriptionsfaktors nachweisbar.

Zusammenfassend verursachen Partikel verschiedener Quellen unterschiedliche toxische Effekte in humanen A549 Lungeneithelzellen. Dabei zeigten die Partikel, die während des Toastens generiert wurden, die stärksten Effekte unter den Innenraumpartikeln hinsichtlich IL-8-Ausschüttung und DNA-Strangbrüchen. DNA-Strangbrüche wurden auch signifikant durch Kerzenabbrandpartikel (lediglich Kerzensorte A) induziert. Nicht nachweisbare Effekte bei den Partikeln der Bratenquelle können nicht allein mit der hohen Lipophilie der Partikel erklärt werden, da auch nach Methanolextraktion keine Effekte nachweisbar waren. Weitere Modifikationen der Testbedingungen in An- und Abwesenheit von Serum bzw. durch den Zusatz von Surfactant ergaben keine signifikanten Änderungen der Effekte der Innenraumpartikel. Da oxidative DNA-Schäden mittels Fpg-modifiziertem Komet-Assay im getesteten Konzentrationsbereich nicht nachweisbar waren, scheinen die evaluierten Partikel keinen oder nur minimalen oxidativen Stress in Lungeneithelzellen zu generieren. Dies würde auch die Befunde über das Fehlen einer Aktivierung des NF-kappaB-Signaltransduktionsweges erklären. Weitere Forschungsaktivitäten sind deshalb erforderlich, um potentielle Mechanismen der Induktion von DNA-Strangbrüchen und der IL-8-Produktion durch diese untersuchten Innenraumpartikel aufzuklären.

Im Einklang mit den humanen Expositionsstudien unterstreichen die *in vitro*-Untersuchungen, dass die Effekte von Innenraumpartikeln stark von ihrer Quelle, und den damit verbundenen Unterschieden in physikochemischen Eigenschaften bzw. Bestandteilen abhängen. Das weist auf eine variable Gefährdung durch Innenraumpartikel hin und erfordert damit eine Einschätzung möglicher Gesundheitsrisiken durch Innenraumpartikel von Fall-zu Fall bzw. Quellen-abhängig.

Zur Untersuchung der akuten Wirkungen auf den Menschen wurde wie erwähnt schließlich eine kontrollierte Expositionsstudie im Zeitraum von Oktober 2012 bis Juni 2013 in den Räumen des IUTA durchgeführt. Eine Convenience-Stichprobe von 56 Teilnehmern wurde über lokale Aushänge und persönliche Ansprache rekrutiert. Mittels eines eigens für diese Studie entwickelten Screeningfragebogens wurden Ein- und Ausschlusskriterien abgefragt. Im Rahmen einer Screeninguntersuchung wurde festgestellt, ob die geplanten klinischen Untersuchungen an den potentiellen Probanden problemlos durchgeführt werden können. Mit einem ausführlichen Basis-Fragebogen wurden chronische gesundheitliche Störungen, Soziodemographie, Lebensstil, Erkrankungen, Medikation, berufliche und private Expositionen erfasst. Die Studie wurde genehmigt von der

Ethikkommission der Heinrich-Heine Universität Düsseldorf. Alle Probanden wurden aufgeklärt und haben eine schriftliche Einwilligung erteilt.

Wegen relativ hoher Probandenverluste während der Feldphase mussten insgesamt 8 Probanden während der laufenden Feldphase nachrekrutiert werden. Insgesamt wurden 56 Probanden mindestens einmal untersucht. Die Expositionen wurden in Gruppen von 4 Probanden jeweils im Abstand von zwei Wochen, immer am gleichen Wochentag und zur gleichen Uhrzeit in randomisierter Reihenfolge durchgeführt. Lagten akute gesundheitliche Probleme am Tag der geplanten Exposition vor (Infekte, Einnahme von Bedarfsmedikation), wurde ein neuer Termin vergeben. Die 2-stündigen Expositionen fanden statt in der eigens gebauten Expositions-kammer am IUTA statt. Während der Exposition saßen die Probanden an einem Tisch und konnten ruhigen Tätigkeiten (Lesen, Computerarbeit, etc.) nachgehen.

Die Auswahl der Untersuchungen der Probanden hatte zum Ziel, lokale entzündliche Veränderungen in den Schleimhäuten des Respirationstraktes zu erfassen (Nasallavage und FeNO), lokale Auswirkungen auf den Respirationstrakt (Lungenfunktionsuntersuchung mittels Spirometrie) zu messen, eine systemische Entzündungsreaktion zu erkennen (serologische Untersuchungen), sowie Organwirkungen auf das Herz-Kreislaufsystem zu untersuchen (Blutdruck, Pulswellenanalyse und Herzfrequenzvariabilität). Die Untersuchungen wurden nach dem folgenden Zeitschema vor, während und nach der Exposition durchgeführt. Die Auswahl der Zeitpunkte erfolgte primär nach vermuteter Latenzzeit der Wirkung sowie unter praktischen Gesichtspunkten:

	vor Exposition	während Exposition	post Exposition	post 2 h Exposition	post 4 h Exposition	post 24 h Exposition
Blutdruck	x	x	x	x	X	x
PWA	x		x	x	X	x
PWV & HRV	x		x			x
Lungenfunktion	x				X	x
FeNO- Test	x			x		x
Nasallavage	x			x		x
Blutabnahme	x			x		x

Alle Untersuchungen wurden gemäß Operationshandbuch durchgeführt. Die Untersucher wurden vorher intensiv geschult und während der Feldphase regelmäßig supervisiert. Darüber hinaus fanden visuelle Kontrollen aller Lungenfunktionstests statt. Die Analyse der Daten erfolgte mittels einer Berechnung der Änderungen der Endpunkte zwischen der baseline Untersuchung t0 und den jeweiligen Zeitpunkten t1 bis t5. Diese Änderungen wurden verglichen mit den entsprechenden Änderungen bei Raumluftexposition nach folgender Gleichung (hier für das Beispiel der Exposition Toast): $MW = ([x_{it1} \text{ Toast} - x_{it0} \text{ Toast}] - [x_{it1} \text{ RL} - x_{it0} \text{ RL}])$, wobei x die zu beobachtende Messvariable und i die Probanden mit Messungen zum jeweiligen Zeitpunkt t darstellen. In diese Auswertung gingen nur diejenigen Probanden ein, die sowohl Daten aus der Experimental-Exposition sowie aus der Raumluftexposition vorliegen hatten (verbundene Analyse).

Zur Berücksichtigung von Änderungen in den Umgebungsbedingungen und zur Darstellung der Effekte pro Partikelmetrik wurden adjustierte gemischte lineare Regressionsanalysen mit einem sogenannten „random participant intercept“ durchgeführt. Als abhängige Variable wurde die intra-individuelle Differenz zwischen baseline t0 und dem jeweiligen Zeitpunkt t1-t5 untersucht. Für jede Expositionsart wurden separate lineare Regressionen durchgeführt und die verschiedenen Zeitpunkte mit einem Interaktionsterm, der eine Indikatorvariable für den Messzeitpunkt beinhaltet, modelliert. Adjustierungsvariablen waren Alter, Größe, Geschlecht, Temperatur, Feuchtigkeit, Anreisetransportmittel (Auto, öffentliche Verkehrsmittel, zu Fuß) und Reisezeit. In einer zusätzlichen Sensitivitätsanalyse für Blutdruck und Lungenfunktion wurden die PM10 Massenkonzentrationen des Vortages an der dem Abreiseort des Probanden nächstgelegenen Messstation bzw. an einer festen Messstation (Messstation Mülheim/Styrum) berücksichtigt. Insgesamt gingen 527 Untersuchungstage (Expositionstage plus Tage für die 24 h Nachuntersuchung) von insgesamt 56 Probanden (28 Männer, 28 Frauen) in die Auswertung mit ein. Bei 41 Teilnehmern wurden mindestens eine experimen-

telle Exposition und die Kontrollexposition durchgeführt, so dass sie in die Zusammenhangsanalysen eingehen konnten. Das Durchschnittsalter der Probanden betrug 33 Jahre, Gewicht und Größe lagen überwiegend im Normbereich. Die meisten waren nicht erwerbstätig (Rentner, Studenten, Arbeitslose).

In der Zusammenhangsanalyse fanden sich Zeichen einer lokalen entzündlichen Reaktion in den Schleimhäuten des Respirationstraktes vor allem nach Toastvorgängen, aber auch, in geringerem Maße, für Kerzenbrand. Es wurde generell, vermutlich aufgrund eines Auswascheffektes, eine Verringerung der Gesamtzellanzahl nach der ersten Nasallavage beobachtet. In der Regressionsanalyse sah man nach Kerzenbrandexposition eine statistisch signifikante Erhöhung der Gesamtzellzahl in Zusammenhang mit der Partikeloberflächenkonzentration bei den 24 h-Messung, sowie eine Tendenz zu höheren Werten bei den 2 h-Messungen. Nach der Exposition gegenüber Toastvorgängen waren die Epithelzellen 2 h und 24 h verringert, wobei dies auf die Feinstaubmetriken Oberfläche, Anzahl und PM1 beschränkt war. Eine Erhöhung der Anzahl der Neutrophilen fand sich jeweils 2 h und 24 h nach Toastexposition, ebenfalls für die Metriken Oberfläche, Anzahl und PM1. Diese Metriken sind insbesondere geeignet, um ultrafeine Stäube zu beschreiben. Es ist also zu vermuten, dass insbesondere ultrafeine Stäube aus Toastvorgängen die Zellzusammensetzung in der Nasallavage hin zu einer entzündlichen Reaktion beeinflussen. Es fanden sich keine klaren Zusammenhänge mit dem Level des Entzündungsmarkers IL-8. Auch auf die NO-Konzentration in der Expirationsluft (FeNO) hatten die experimentellen Expositionen keinen klaren Effekt. Lediglich nach der Exposition Braten kam es zu einer Erhöhung in Zusammenhang mit der Partikelanzahlkonzentration. Da es sich hierbei um einen einzelnen Befund handelt, kann nicht sicher zwischen einem Zufallsbefund und einem tatsächlichen Zusammenhang unterschieden werden.

Die Lungenfunktionsuntersuchung mittels Spirometrie misst akute Auswirkungen an den Bronchien, die durch Entzündung und nachfolgender Konstriktion der Bronchialmuskulatur entstehen können. Nach Exposition gegenüber Kerzenbrand konnte ein Abfall der Lungenfunktion in Zusammenhang mit einem Anstieg in der Partikeloberflächenkonzentration und der Partikelmassenkonzentrationen beobachtet werden. Für Braten sah man in Zusammenhang mit steigenden Partikelmassenkonzentrationen einen deutlichen Abfall des MEF25-75% und etwas weniger klar auch bei dem FEV1. Dies spricht für eine Beeinträchtigung vor allem der kleinen Atemwege. Für die anderen Lungenfunktionsparameter und Partikelmetriken waren die Zusammenhänge eher undeutlich oder sporadisch. Für Toasten ergaben sich keine nennenswerten Effekte.

Weiterhin fanden wir schwache Hinweise für eine subklinische systemische Entzündungsreaktion und auf systemischen oxidativen Stress. So zeigte sich in der Regressionsanalyse bei den Expositionen Kerzen und Braten ein Anstieg der IL-8 Konzentrationen jeweils 2 h und 24 h nach Exposition. Bei den IL-8 Anstiegen durch Kerzenstäube spielte vor allem die Partikelmasse eine Rolle, während für den Anstieg beim Braten die Partikelanzahl die entscheidende Metrik war. Für Toasten waren keine Veränderungen zu beobachten. Die Analyse der Marker für systemischen oxidativen Stress zeigte nach Toastexposition sowohl für TEAC als auch für die Harnsäure einen Anstieg, der in aller Regel nach 24 h deutlicher war als nach 2 h. Für die anderen beiden Expositionen waren keine signifikanten Effekte im adjustierten Modell zu beobachten.

Wir konnten mehrere Assoziationen der Expositionen mit kardiovaskulären Endpunkten beobachten. Die klarsten Veränderungen fanden sich für den arteriellen Blutdruck. Nach Exposition gegenüber Kerzenbrand kam es zu einem deutlichen Anstieg des Blutdrucks zu allen Zeitpunkten, insbesondere 2 h und 4 h nach der Exposition. Dieser Blutdruckanstieg war vor allem mit der Partikelmasse assoziiert. Beim Braten hingegen war ein Abfall des Blutdrucks mit steigender Partikelmasse und –oberfläche zu sehen, der jedoch kleiner war als der Anstieg, der bei Kerzen beobachtet wurde. Toasten hatte keinen Einfluss auf den arteriellen Blutdruck.

Die arterielle Steifigkeit wurde als Frühmanifestation einer gestörten endothelialen Funktion der Gefäße untersucht. Als Maß hierfür wurde der Augmentationsdruck gemessen. Die Wirkungen auf die endotheliale Funktion waren stark von der Quelle und der untersuchten Partikelmetrik abhängig. So führte Kerzenbrand zu einem Anstieg des zentralen Augmentationsdrucks in Abhängigkeit von der Partikeloberflächenkonzentration. Es zeigten sich jedoch entgegengesetzte Ergebnisse (erniedrigte Steifigkeit) für einen Anstieg der

Partikelmassenkonzentration. Für Toasten dagegen beobachtete man eine erhöhte Steifigkeit in Abhängigkeit von der Partikelmassenkonzentration. Nach der Exposition gegenüber Braten kam es zu einer statistisch signifikanten Erhöhung bei Anstieg der Partikelanzahlkonzentration nach 24 h und einem statistisch signifikanten Abfall für die 2 h und 4 h Messungen für PM10. Die beiden anderen Maße für die arterielle Steifigkeit, der Augmentationsindex und die Pulswellengeschwindigkeit, zeigten keine klaren Auswirkungen nach den experimentellen Expositionen.

Die Herzratenvariabilität wurde direkt nach und 24 h nach der Exposition bestimmt. Eine Verringerung der Herzratenvariabilität bedeutet eine verschlechterte Regulierung durch das autonome Nervensystem. Ähnlich wie bei den anderen Endpunkten zeigten sich auch bei der Analyse der Herzratenvariabilität unterschiedliche Effekte für die einzelnen Expositionen. Während für Kerzen direkt nach der Exposition ein statistisch signifikanter Anstieg der Variabilität (SDNN als auch RMSSD) zu sehen war, ergab sich für Toasten ein statistisch signifikanter Abfall nach 24 h. Für Braten waren keine Veränderungen im Vergleich zur Raumluft zu beobachten.

Insgesamt konnten wir nach der Exposition gegenüber Kerzenbrand keinen klaren Hinweis auf eine Auslösung von Entzündungsprozessen in den Schleimhäuten des Respirationstraktes sehen. Jedoch war eine leichte, statistisch signifikante Verschlechterung der Lungenfunktion zu beobachten. Im systemischen Kompartiment (Blutuntersuchung) gab es Zeichen einer leichten entzündlichen Reaktion, jedoch keinen messbaren Anstieg der Marker für oxidativen Stress. Bezüglich des kardiovaskulären Systems zeigten sich deutliche und kohärente Anstiege im Blutdruck, jedoch inkonsistente Ergebnisse für die arterielle Steifigkeit, die sich nach Partikelmetrik unterschieden. Die Herzfrequenzvariabilität zeigte einen Anstieg, was als Zunahme der Vagusaktivität gewertet werden kann.

Nach Exposition gegenüber Toastvorgängen kam es zu einer Verschiebung der Zellanteile in der Nasallavage, die mit einer leichten, lokalen entzündlichen Reaktion zu vereinbaren sind. Auswirkungen auf die Lungenfunktion zeigten sich nicht. Auch im Blut konnten keine Anzeichen einer systemischen Entzündungsreaktion gesehen werden, allerdings sah man einen Anstieg der Marker für oxidativen Stress. Im kardiovaskulären System waren eine Erhöhung der arteriellen Steifigkeit und eine Abnahme der Herzfrequenzvariabilität zu beobachten, was mit einem gestiegenen Sympathikotonus zu vereinbaren ist. Beim Blutdruck zeigten sich im Gegensatz zu den anderen beiden Expositionen keine Effekte.

Nach der Exposition gegenüber Braten deutet ein Anstieg in der FeNO-Konzentration auf eine leichte Entzündungsreaktion in der Lunge hin. Dies wurde allerdings nicht bekräftigt durch die Veränderungen der Entzündungsmarker in der Nasallavage. Es kam zu einer Einschränkung der Lungenfunktion und hier vor allem zu einer Verengung im Bereich der kleinen Atemwege. Der Anstieg von IL-8 im Serum deutet auf eine systemische entzündliche Reaktion hin. Der Blutdruck zeigte einen Abfall mit steigender Oberflächen- und Massenkonzentration. Die Gefäßreaktivität wurde nicht konsistent beeinflusst - je nach Partikelmetrik unterschieden sich die Wirkungen in Richtung erhöhte oder erniedrigte arterielle Steifigkeit. Keinerlei Veränderungen wurden bezüglich der Herzfrequenzvariabilität beobachtet.

Das Hauptergebnis dieser Studie zeigt, dass kurzfristige Belastungen gegenüber Fein- und Ultrafeinstäuben aus typischen Quellen im Innenraum bei gesunden Probanden akute gesundheitsbezogene Wirkungen haben können. Dabei zeigten sich Effekte auf den systolischen Blutdruck, das autonome Nervensystem, auf die lokale und systemische Entzündungsantwort/oxidativen Stress und auf die Lungenfunktion. Die beobachteten Wirkungen unterschieden sich zwischen den experimentellen Expositionen. Dies konnte am deutlichsten beim Blutdruck beobachtet werden, der nach Kerzenbrandexposition anstieg und nach Braten abfiel. Mögliche Erklärungsansätze liefern die unterschiedlichen chemischen Zusammensetzungen der generierten Stäube. So besteht der Staub, der durch Kerzenbrand generiert wird, überwiegend aus nicht-fettlöslichen Wachspartikeln und Ruß, während die Stäube, die beim Bratvorgang generiert werden, überwiegend aus fettlöslichen Partikeln wie Cholesterin sowie anderen Fetten und Ölen bestehen. Beim Toasten finden sich ebenfalls kohlenstoffhaltige Partikel und u.a. auch Eisen (vermutlich Heizdrahtemissionen). Auch die Ladung und die

Größenverteilung der Stäube sind unterschiedlich, was zu unterschiedlichen Depositionseffizienzen im oberen und unteren Respirationstrakt führen und damit auch die physiologischen Wirkungen bestimmen kann.

Darüber hinaus konnten innerhalb einer Quelle unterschiedliche Effekte je nach Partikelmetrik beobachtet werden. Es zeigten sich zumeist qualitativ ähnliche Effekte für PSC, PNC und PM₁, die vor allem die Konzentration von ultrafeinen Stäuben widerspiegeln. PM₁₀ und PM_{2.5} zeigten ebenfalls zumeist sehr ähnliche Zusammenhänge – diese spiegeln eher die größeren Partikel wider, die bei den hier untersuchten Quellen am ehesten durch Agglomerationsprozesse entstanden sind. Je nach Größenfraktion kommt es zu unterschiedlicher Deposition. Auch die chemischen Inhaltsstoffe können sich je nach Größenfraktion unterscheiden und so zu unterschiedlichen Auswirkungen führen.

Die hier beobachteten physiologischen Effekte sind von Bedeutung, weil sie auf Wirkmechanismen und potentielle Risikoerhöhungen für gesundheitliche Folgen hinweisen. Lokale und vor allem systemische Entzündungsreaktionen können relevante gesundheitliche Folgen nach sich ziehen. So können durch eine Entzündungsreaktion des Körpers und nachfolgendem Anstieg der Koagulationsbereitschaft akute kardiovaskuläre Ereignisse ausgelöst („getriggert“) werden. Ebenfalls kann eine Erhöhung des Blutdruckes bei vorgeschädigtem Herz-Kreislaufsystem akute kardiovaskuläre Ereignisse auslösen. Beispielsweise wurde gezeigt, dass eine kurzfristige Steigerungen der Außenluftbelastung mit Feinstäuben innerhalb von Stunden bis Tagen zu vermehrten Herzinfarkten (Rich et al. 2010) und zu einer erhöhten kardiovaskulären Mortalität (Brook et al. 2010) führt, möglicherweise vermittelt durch eine systemische Entzündung (Rückerl et al. 2007). Auf Grund der in dieser Studie beobachteten Ergebnisse lässt sich vermuten, dass diese Mechanismen in ähnlicher Weise auch bei Partikeln aus Innenraumquellen eine Rolle spielen können.

Bei der Studie wurden akute Auswirkungen einer einmaligen, zweistündigen Exposition untersucht. Aus diesem Grund kann die Studie keine Aussage machen über die kumulative Wirkung von regelmäßig wiederkehrenden Expositionen und auch nicht zur Wirkung von langandauernden Expositionen. Auch war die Expositionshöhe innerhalb der 2 h höher, als man es unter Alltagsbedingungen antrifft. Die maximalen PM-Konzentrationen, die in dieser Studie erreicht wurden, bleiben allerdings außer bei Braten auf Stufe 2 deutlich unter den Konzentrationen, die typischerweise in kontrollierten Expositionsstudien für Außenluftschadstoffe angewandt werden.

Es handelte sich um eine bevölkerungsbezogene Studie, die durchgeführt wurde in klinisch gesunden Probanden, bei denen keine erhöhte Empfindlichkeit gegenüber Feinstäuben, basierend auf Vorergebnissen epidemiologischer Studien, zu vermuten war. Weiterführende Untersuchungen sind notwendig, um besonders empfindliche Gruppen zu identifizieren und um Wechselwirkungen mit anderen persönlichen oder umweltbedingten Faktoren, die die Wirkung der Innenraumfeinstäube verstärken können, zu erkennen.

Zusammengefasst zeigt diese Studie, dass (ultra-)feine Partikel aus Innenraumquellen sich in ihren chemischen und physikalischen Eigenschaften, sowie hinsichtlich ihres Emissionsmusters teils deutlich unterscheiden. Hierdurch ergeben sich auch mögliche unterschiedliche Auswirkungen auf Entzündungen und DNA-Schäden in vitro. Bei gesunden Teilnehmern kann dabei eine kurzfristige Exposition gegenüber diesen (ultra-)feinen Partikeln aus Innenraumquellen zu Änderungen im Herz-Kreislauf- und Lungensystem führen, sowie möglicherweise Entzündungen auslösen. Eine vereinfachte Übersicht der Ergebnisse ist nochmal in der folgenden Tabelle dargestellt:

Quelle	Charakterisierung	Toxikologie	Humanstudie
Kerzen	Partikelanzahlkonzentration (0,6 µm- 20 µm)	DNA – Schäden ↓	Lokale Entzündung ↑ -
	Partikelanzahlkonzentration (5,6 nm - 560 nm)	Entzündung ↑ -	Lungenfunktion ↓
	Lungendeponierbare Oberfläche	↑	Systemische Entzündung ↑
	Massenkonzentration (5,6 nm - 20 µm)	-	Systemischer oxidativer Stress -
			Blutdruck ↑↑
	Auffällige Inhaltsstoffe	↓	Arterielle Steifigkeit ↑↓ Herzratenvariabilität ↑
Toasten	Partikelanzahlkonzentration (0,6 µm - 20 µm)	DNA – Schäden ↑	Lokale Entzündung ↑
	Partikelanzahlkonzentration (5,6 nm - 560 nm)	Entzündung - ↑	Lungenfunktion -
	Lungendeponierbare Oberfläche	-	Systemische Entzündung -
	Massenkonzentration (5,6 nm - 20 µm)	↓	Systemischer oxidativer Stress ↑
			Blutdruck -
	Auffällige Inhaltsstoffe	↓	Arterielle Steifigkeit ↑ Herzratenvariabilität ↓
Braten	Partikelanzahlkonzentration (0,6 µm - 20 µm)	DNA – Schäden -	Lokale Entzündung (↑)
	Partikelanzahlkonzentration (5,6 nm - 560 nm)	Entzündung ↓ -	Lungenfunktion ↓
	Lungendeponierbare Oberfläche	↓	Systemische Entzündung ↑
	Massenkonzentration (5,6 nm - 20 µm)	↑	Systemischer oxidativer Stress -
			Blutdruck ↓↓
	Auffällige Inhaltsstoffe	↓	Arterielle Steifigkeit ↑↓ Herzratenvariabilität -

↓↓ = sehr gering oder sehr schwach, ↑↑ = sehr stark oder sehr hoch, ↓ = schwach oder gering, ↑ = stark oder hoch, - = mittel oder kein Effekt

Summary

Particulate indoor emissions and their possible health effects are currently, compared to ambient outdoor particulate matters, scant attended in the public perception. Consequently, there is also only a limited knowledge on the emission behavior of indoor sources and their relevance to health. Apart from clean rooms or cigarette smoke no binding requirements exist for allowed particle concentrations indoor. For indoor on the one hand outside air is a major source and on the other hand household / indoor activities such as cooking, vacuuming etc. are possible particle sources. The exposure pattern is consequently expected to be highly variable in accordance with such typical episodic indoor activities. This is expected especially for the submicron particles and parameters like the particle number concentration, size and chemical composition. Previous studies shown that indoor activities could for example, lead to an episodic increase in the ultrafine (<100 nm) particle concentration, while in specific situations the current WHO recommendations for the indoor air were exceeded. For the characterization of such indoor sources this high variability has to be considered with focus on ultrafine particle analysis.

From a toxicological-medical point of view ultrafine particles (UFP) are suggested to have great importance for the initiation of possible health effects. Due to their small size UFP can penetrate partially into the alveolar space and might lead, due to the great surface area, to increased binding of pollutants and to a high reactivity. In addition, UFP may pass into the systemic circulation and also along the olfactory nerve enter the central nervous system. From outdoor studies it is known that an acute increase of particle concentration leads to increased cardiovascular morbidity and mortality. The biological mechanisms are however in detail still unclear, but it is assumed that the particle inhalation leads to activation of pulmonary reflexes with subsequent imbalance of the autonomic nervous system. Furthermore, it is assumed that the particles cause oxidative stress, which leads to a local subclinical inflammation in the respiratory tract and systemic inflammatory response. This local and systemic inflammatory response is associated with various other target organ responses such as impaired lung function, endothelial dysfunction, and increase in blood pressure or higher coagulation in the blood. Based on these findings and on the fact that the first toxicological-medical studies shown a systemic inflammation due to indoor combustion particles (candle burning) we were interested to investigate to which extent acute indoor particle exposure might lead to similar effects. Such a systematic evaluation of the health effects of indoor particles is of high importance, considering that in Western Europe people spend ~ 16 h per day indoor and are mainly exposed to indoor particles.

Accordingly, a controlled sham exposure study using specific indoor particle emissions sources was conducted. As main hypothesis it was assumed that adverse health effects are induced by oxidative stress and subclinical respiratory local and systemic inflammation. The specific indoor sources were physico-chemically characterized and further examined *in vitro* and *in vivo* to their potential to induce oxidative stress by e.g. investigation of markers of oxidative stress as well as inflammatory mediators. In addition, these potential effects were investigated *in vitro*. We investigated acute effects on target organs and here in particular the respiratory tract was considered as the most important target for particles. Cytotoxic and inflammatory effects were examined by nasal lavage and the influx of neutrophil granulocytes. In addition to local inflammation in the respiratory tract the systemic effect of particles was examined by measuring the lipid peroxidation caused by oxidative stress. In combination, the lung function or an increase in arterial blood pressure were investigated *in vivo* as target organ effects and parallel effects on inflammatory markers detected in the blood, for example, allowed us to assess the possible health effects from specific indoor particles.

This study is thus a combination of physico-chemical characterization and evaluation of toxicological as well as medical effects induced by indoor particles. In a first step we identified and characterized the potentially important indoor sources of fine and ultrafine particles by their physico-chemical parameters. Based on this preliminary evaluation the processes that revealed in view of possible health effects relevant particle emissions were selected and further examined in a more controlled sham exposure study. In a first step the following scenarios or processes were characterized: 1. burning candles, 2. toasting bread, 3. baking pizza, 4.

frying sausages, 5. operating a chimney (properly, and with typical operator errors), 6. vacuum cleaning, 7. hot air radiator, 8. butane and spirit burner, 9. engine emissions of the vacuum cleaner, 10. grinding of nano-particle containing paint. These processes were performed in a test room (each adapted to the scenario, e.g. grinding was done in a special grinding box). The characterization included (extent of analysis also on the scenario adapted) the particle mass concentration (PM10, PM2.5, PM1), particle number size distribution (including UFP number concentration), lung deposit surface area, concentration of organic and elemental carbon (OC / EC), concentration of specific organic compounds, the concentration of inorganic elements, the particle reactivity (Oxidative Potential), and particle morphology determination. An overview of the studied processes and applied analytical instruments is given in the following table.

	Room Climate	CPC	SMPS	FMPS	APS	NSAM	NAS	PILS	LVS	AMS	EC/OC	SEM	TXRF	PTR-MS
Candle Type A	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Candle Type B	X	X	X	X	X	X	X	X	X	n. a.	X	X	X	X
Toasting	X	X	X	X	X	X	X	X	X	n. a.	n. a.	X	X	X
Oven	X	X	X	X	X	X	n. a.							
Frying	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Vacuum Cleaner	X	X	X	X	X	X	n.a.	x						
Vacuum Cleaner (Engine emission)	n.a.	X	X	X	X	X	X	X	X	n.a.	n.a.	X	X	n.a.
Chimney	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Butane- and Spirit-burner	X	n. a.	X	X	X	X	n. a.							
Hot air radiator	X	n. a.	X	X	X	X	n. a.							
Grinding	n.a.	X	n.a.	X	X	X	X	n.a.						

Comment: n. a. = not applied, Room Climate = Temperature, abs. and rel. humidity, CO (only for candle burning); X = Analysis performed; CPC = Condensation Particle Counter, (F)SMPS = (Fast) Scanning Mobility Particle Sizer, APS = Aerosol Particle Sizer, NSAM = Nanoparticle Surface Areas Monitor; NAS = Nanometer Aerosol Sampler, PILS = Particle Into Liquid Sampler for analysis of oxidative potential, LVS = Low Volume Sampler, AMS = Aerosol Mass Spectrometer, EC/OC = Elemental / Organic Carbon, SEM = Scanning electron microscopy, TXRF = Total X-ray fluorescence and PTR-MS = Proton Transfer Reaction Mass Spectrometry

When burning candles, compared to mean urban air particle concentrations (15-20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), increased PM2.5 concentrations (270 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) were detected. The emitted particles were found to be predominantly (> 90%) in the sub-micron range and particle number concentrations of several million particles per cubic centimeter were measured in the test room. The lung deposited surface area was also increased to 1,000 and 6,000 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$, corresponding to approximately 20 to 100-fold higher values than in the urban outdoor air. A significant hydroxyl radical generation has not been detected. However, using another analysis approach a surface reactivity was shown. Similar to the OH radical detection, no significant increase in gaseous substances was measured. The particle-bound content was dominated by organic compounds and nitrate. Analysis by SEM revealed a wide variety of particle sizes and shapes.

For toasting an increased number of ultrafine particles from 1.0 to 1.5 $\times 10^6$ particles per cm^3 were measured under the given conditions. The particle mass reached peak values of 250-300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ during a 30-minute toasting cycle. The lung deposited surface area was significantly increased to 800-2,300 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$. A significant oxidative potential was not detected and similarly no significant increase in gaseous substances was measured. Particle-bound components were dominated by organic compounds in addition to inorganic com-

pounds like iron (heating filament emissions). Analysis by SEM revealed a wide variety of particle sizes and shapes such as organic compounds, but also salt (NaCl).

When frying (without additional fat or oil) also increased particle emissions (1.0×10^6 particles/cm³) were detected in the test room. The findings of the chemical, gravimetric and SEM analysis indicate that the emissions are mainly fat particles in the sub-micron range. About 560 µg/m³ were collected during the frying period. The lung deposited surface area was significantly increased to 3,000-4,000 µm²/cm³. A significant oxidative potential was not detected and the analysis by AMS and SEM revealed a wide variety of shapes and particle sizes dominated by organic carbon particles but also salts such as NaCl or nitrate.

For all the other emission scenarios, e. g. pizza baking, chimney, butane and spirit burner, hot air radiator, vacuum cleaner and grinding, only comparatively low emissions of sub-micron particles were detected, resulting in approximately 10,000-200,000 particles/cm³. The lung deposited surface area was slightly increased depending on the source (compared to outside air) to 150-1,000 µm²/cm³ indicating at least a low number of sub-micron particles emitted. The mass analysis (PM_{2.5}) resulted in 10 - 30 µg/m³ (comparable to PM_{2.5} ambient air mass concentration). The performed analyzes of oxidative potential were mostly not significant (except abrasive particles with metallic additive). Similarly, no significant increase in the concentrations of gaseous components was recorded. The chemical analyzes and SEM images revealed single expectable elements, albeit in very small quantities.

It should be noted that these results were all recorded under the here applied experimental conditions and were conducted and quantified in terms of the later on planned sham exposure study. Single, short high peak values were sometimes detected and in consequence modified performed scenarios would likely provide significantly different results.

To sum up, as potentially relevant particulate indoor emissions sources frying (sausages without fat), burning of candles and toasting were identified. These sources revealed in comparison to the other indoor sources significant increased particle number and mass concentrations of submicron particles. Subsequently, these sources were further characterized and used for the sham exposure study. For this purpose, the particles were collected on filters and subsequently tested in vitro on lung epithelial cells (see text later on). Furthermore, these three sources were used as controlled exposure to study subjects. In order to detect possible concentration-dependent effects, the exposure was performed at two different particle concentration levels. An overview of the available average particle number concentrations in the test room is shown in the following table to illustrate the levels of exposure for the subjects. Also the different particle masses and the lung deposited surface area determined during the exposure processes are included in the following table.

	Number concentration (APS) in #/cm ³			Number concentration (FMPS) in 1000#/cm ³			Number concentration (SMPS) in 1000#/cm ³		
	N	Mean	SD	N	Mean	SD	N	Mean	SD
Candle	7	8	5.9	7	2,005	238	6	1,552	843
Toast	7	23.4	40.6	10	934	124	7	685	337
Frying	8	23.4	23.3	9	328	85.6	8	269	136
Blank	11	3.5	4.8	12	4.6	2.5	12	2.7	1.6
Candle II	9	2.5	2.1	9	2,767	149	8	1,780	271
Toast II	10	3.9	3.6	10	1,485	252	10	1,076	269
Frying II	10	73.3	54.6	10	711	151	10	506	122

After the PM characterization we sampled PM from the specific sources for toxicological investigations using well established cell culture models. These so-called in vitro toxicity investigations have helped to identify potential molecular and cellular mechanisms that may underlie the development and or progression of the diseases that are associated with their long term inhalation. Specific studies performed with outdoor fine or ultrafine particles could demonstrate that these materials can trigger oxidative stress in lung epithelial cells. A major response to this oxidative stress involves the generation and release of pro-inflammatory cytokines such as interleukin-8 (IL-8). Cell signaling studies have shown that the particle-elicited IL-8 gene activation is mediated by an oxidative stress dependent activation of the transcription factor NF-kappaB.

Particle induced oxidative stress in epithelial cells can also result in the induction of DNA damage and has for instance been detected as DNA strand breakage or oxidation of specific DNA bases. The ability of PM to cause oxidative stress upon their inhalation and subsequent interaction with lung epithelial cells is considered as major responsible mechanism for the development and progression of adverse pulmonary and cardiovascular diseases. The strength of effects of outdoor PM in cell culture assays has been demonstrated to depend strongly on the sampling location and hence the physico-chemical properties of the collected samples. Thus, in vitro toxicity testing with PM also can contribute to hazard identification and ranking of different potencies of location and possibly source specific outdoor particles.

In line with this concept, in the present project in vitro investigations were performed with the particles that were collected from the different indoor source settings. These included toasting, frying sausages, and burning candles. The particulate matter was collected on PFTE-filters and subsequently extracted according to an in-house developed method. This method involves shaking and subsequent ultrasonication treatment of the filter after its submerging in distilled water. The particle suspensions were subsequently freeze-dried to allow controlled storage until toxicological testing. Because of the highly differing nature of the collected matter from the frying process, and problems with regard to an appropriate water-based extraction, for this type of particles also a modified methanol based extraction protocol was used.

The toxicological investigations were performed with the use of the human lung epithelial cell line A549. The cells were treated with all particles immediately following their resuspension in culture medium. In each experiment a reference PM sample (i.e. outdoor total suspended particles) was included to evaluate the reproducibility of the experimental repeat conditions. The release of IL-8 into the cell culture supernatants was determined by Enzyme-linked Immunosorbent Assay, the induction of DNA strand breaks was evaluated by the alkaline comet assay. A specific modification of the assay involved the inclusion of the DNA repair enzyme Formamido-pyrimidine-DNA-glycosylase (Fpg) to detect oxidative DNA. The particles were all subjected to the cell cultures at the same mass concentrations (50 µg/ml) to enable direct comparison of their toxic potencies. In selected experiments, particles were subjected to the cell cultures in the presence of a commercially available surfactant as well as in comparative experiments with our without the presence of serum in the cell culture medium. For the assessment of activation of the NF-kappaB pathway by the indoor source particles in the A549 cells an immunohistochemical method was developed.

Significantly increased DNA strand breakage was observed with the reference sample as well as with the candle burning (type A) and the particles that were generated by the toasting procedure. Remarkably, oxidative DNA lesions were not significantly induced by any of the particle treatments including the reference sample. In further experiments some modification of effects could be observed in association with the addition of the surfactant or due to the presence of serum in the medium. However, these effects did not reach statistical significance. For the particles that were collected from the frying, the methanol based extractions did not reveal a significant enhancement of its DNA damaging properties.

Investigations on the particle induced production of IL-8 only revealed significant effects for the reference material and the particles from the toasting process. Again, the reference material showed the most pronounced increase. In further investigation to unravel the mechanism of IL-8 activation it could be shown by immunohistochemistry that the reference particles activated the NF-kappaB transcription factor pathway. However, no clear signs of activation of this transcription factor could be observed for any of the indoor source particle type.

Taken together, the particles from the different sources caused different toxicity effects in the A549 human lung epithelial cells. The particles that were generated during the toasting processes were found to be most potent among the indoor particles, as they caused both IL-8 release and DNA strand breaks. DNA strand breakage was also significantly induced with particles derived from candle burning, although only for one out of the two tested types of candles. The absence of effects for the frying source could not solely be explained by the high lipophilicity of the generated particles, as effects remained also absent after methanol extraction. Further modifications of the testing conditions involving the modification of the serum presence in the cell culture medium and the addition of a surfactant also did not modify the toxic potency of the indoor samples. The overall absence of the detection of oxidative DNA damage lesions by the fpg-modified comet assay protocol suggests that the evaluated particles may cause no, or only minor oxidative stress in the lung epithelial cells. This would also explain for the absence of a significant activation of the NF-kappaB pathway. Further research is therefore required to unravel the potential mechanism whereby specific types of indoor PM can induce DNA strand breakage and IL-8 production.

In line with the human exposure studies, the *in vitro* investigations highlight that the effects of indoor PM can vary depending on their source, likely as a result of their contrasting physico-chemical composition and properties. This clearly points towards a variable hazard of indoor PM and the need to address and interpret the potential adverse health risks of indoor PM on a case-by-case (i.e. a source-by-source) basis.

To investigate acute health effects on humans, a controlled exposure study was carried out at the IUTA from October 2012 to June 2013. A convenience sample of 56 participants was recruited by personal contactor public advertisement. A screening questionnaire developed especially for this study asked for specific inclusion and exclusion criteria. A screening examination was conducted to ensure whether the planned clinical investigations could be performed on the potential participants. A detailed base questionnaire gathered information about chronic health disorders, socio-demography, lifestyle, diseases, medication, occupational and private exposures. The study was approved by the ethics committee of the Heinrich-Heine-University Düsseldorf. All participants gave written informed consent.

Eight participants were recruited during the ongoing field phase because of high losses during the field phase. Altogether, 56 participants were investigated at least one time. The exposure was arranged for groups of four test persons two weeks apart, on the same weekday and at the same daytime in randomized sequence. A new appointment was scheduled if acute health problems (infections, acute medication) occurred at or before the planned day of exposure. The two-hour exposure was performed in an exposure chamber at the IUTA. During the exposure the participants sat at a table and could perform light activities like reading or computer work.

The aim of the examinations was to determine local inflammatory changes in the mucosa of the respiratory tract (nasal lavage and FeNO), to measure local effects on respiratory tract (lung function measurement by spirometry), to investigate systemic inflammatory reactions (serological investigations) and effects on the cardiovascular system (blood pressure, pulse wave analysis and variability of heart frequency). Examinations

were done before, during and after the exposure as shown in the following scheme. Time points for examinations were chosen primarily according to suspected latency time and according to practicability:

	before exposure	during exposure	post exposure	post 2 h exposure	post 4 h exposure	post 24 h exposure
Blood pressure	x	x	x	x	x	x
PWA	x		x	x	x	x
PWV & HRV	x		x			x
Lung function	x				x	x
FeNO- Test	x			x		x
Nasallavage	x			x		x
Blood letting	x			x		x

All examinations were conducted according to standard operation procedures. Investigators were intensively trained before and supervised during the field phase. All lung function tests were visually controlled.

Data were analysed by as changes between the baseline investigation t0 and the investigations at the timepoints t1 to t5, respectively. These changes were compared with the corresponding changes of the control exposure according to the equation (here example for the exposure toasting given): $MW = ([x_{it1Toast} - x_{it0Toast}] - [x_{it1RL} - x_{it0RL}])$, where x is the observed measurement and i the test person with measurement at time t. In these analyses only participants with data on both, at least one experimental exposure and the control exposure were included.

To take account of changes in environmental conditions and estimate effects per particle metric, adjusted mixed linear regression analyses were performed with a so-called "random participant intercept". As a dependent variable, the intra-individual difference between the base line t0 and the timepoints t1-t5, respectively, was examined. For each type of exposure separate mixed linear regression analyses were performed. The different timepoints were included with an interaction term that consisted of an indicator variable for the time of measurement and the exposure. Adjustment variables were age, height, sex, temperature, humidity, mode of transportation (car, public transport, walking) and time in transport. In an additional sensitivity analysis for blood pressure and lung function, the PM10 mass concentrations of the previous day were considered at the air quality monitoring site that was nearest to the location of departure on the morning of the exposure day and at a fixed air quality monitoring station (station Mülheim/Styrum).

A total of 527 study days (exposure days plus days for the 24-hour follow-up) and 56 subjects (28 men, 28 women) were finally evaluated. For 41 participants at least one experimental exposure and the control exposure were performed, so that they could be included in the main analysis. The average age of the subjects was 33 years. The weight and height were mostly within the normal range. Most participants were non-employed (pensioners, students, unemployed).

The analysis revealed signs of local inflammation in the respiratory tract, especially after the exposure with toast, but also, to a lesser extent, for candle burning particles. In general, presumably due to a wash-out effect, a reduction in the total number of cells was observed after the first nasal lavage. In the regression analysis, we observed a statistically significant increase in total number of cells related to particle surface concentration after 24 h and slightly increased values after 2 hours. After exposure to toasting, the number of epithelial cells was reduced at 2 h and 24 h related to the particle metrics surface area, number concentration and PM1 mass concentration. For toasting, an increase of neutrophils was detected at 2 h and 24 h, which was also related to the surface area and PM1 mass concentration. These metrics are suggested to describe ultrafine particles most properly. In consequence we are suggesting that particularly ultrafine particles from toasting lead to changes in the respiratory tract mucous membranes consistent with a low grade inflammation. However, we did not find clear associations with the level of the inflammatory marker interleukin-8 (IL-8). The NO concentrations in exhaled air (FeNO) were also not clearly affected by any of the exposure

scenarios. Only after frying, a slight increase of FeNO was observed in relation to particle number concentration. Since this is a single finding we are not able to decide if it was an incidental or reliable finding.

The lung function test using spirometry measures acute effects on the bronchi potentially caused by inflammation and subsequent constriction of the bronchial muscles. After exposure to candle burning a decrease of forced volumes (FEV1, mid expiratory flows) was related to increases in particle surface area and particle mass concentrations. Increasing particle-mass concentrations from frying led to a significant drop in MEF25-75% and a mild decrease in the FEV1. This suggests an impairment of the small airways. For toasting, no significant effects were observed.

Furthermore, we found weak evidence for subclinical systemic inflammation and systemic oxidative stress. The regression analysis for the exposures candle burning and frying revealed an increase of IL-8 after 2 h and 24 h. The related particle metric for candle burning was particle mass, while particle number concentration was the relevant particle metric for frying. For toasting, no changes in systemic IL-8 were observed. In contrast, toasting was associated with markers for systemic oxidative stress (both TEAC and uric acid) after 2 h and even more evident after 24 h. For the other two exposures scenarios no significant effects in the adjusted model were observed.

We observed several associations of exposures with cardiovascular effects. The clearest changes were seen in arterial blood pressure. After candle exposure there was a significant increase in blood pressure at all timepoints, especially after 2 h and 4 h. This increase in blood pressure was associated particularly with particle mass. For frying, on the other hand, a decrease of the blood pressure was detected within increasing particle mass and surface area concentrations. However, this increase was smaller than that observed after candle exposure scenario. Toasting had no effect on arterial blood pressure.

Arterial stiffness was examined as an early indicator of endothelial dysfunction of the vessels. The effects on endothelial function were found to be strongly dependent on the type of exposure / particles as well on the different particle metrics. For candle burning, particle surface area concentration was related to an increase of the central augmentation pressure. However, contrasting results were found (decreased stiffness) for particle mass concentrations. For toasting we observed an increased stiffness associated with increased particle mass concentrations. After exposure to frying, there was a statistically significant increase of arterial stiffness related to increased particle number concentrations after 24 h and a decrease of the arterial stiffness after 2 h and 4 h associated with PM10 mass concentration. The other two metrics for arterial stiffness, augmentation index and pulse wave velocity, showed no clear effects.

Heart rate variability was determined immediately after the exposure and 24 h after exposure. A decrease of the heart rate variability is caused by an impaired regulation by the autonomic nervous system. Similar to the other endpoints, different or even contrasting effects were found, with increases or decreases depending on the exposure scenario and the particle metric. While for candles immediately after exposure, a statistically significant increase in variability (SDNN and RMSSD) was seen, for toasting a statistically significant decrease after 24 h was detected. For frying no effect was measured.

Overall, after candle burning no clear indication for an induction of inflammation in the mucous membranes of the respiratory tract was observed. However, a slight, statistically significant impairment of lung function was detected. In the systemic compartment (blood tests) a mild inflammatory reaction was indicated but no increase in markers for oxidative stress was observed. For the cardiovascular system significant and consistent increases in blood pressure but inconsistent results for arterial stiffness, differing by particle metric was seen. Heart rate variability increased, which was interpreted as an increase in vagal activity.

After exposure to toasting, we observed slight changes in number and type of cells in the nasal lavage fluid, consistent with a subclinical local inflammatory reaction. No effects on lung function or systemic inflammatory markers were seen. However, we did observe a small increase in the concentration of systemic markers of oxidative stress. We also observed an increase in arterial stiffness and a decrease in heart rate variability, consistent with an increased sympathetic activity. There was however no effect on arterial blood pressure.

After exposure to frying, we observed an increase in FeNO, which could be a sign of an inflammatory reaction of the lower airways. However, we did not see any inflammatory changes in the nasal lavage fluid. Lung function was slightly decreased, specifically the mid-expiratory flows, which indicates a constriction of the small airways. The increase in IL-8 in serum could indicate a systemic inflammatory reaction. Blood pressure decreased with increasing surface and mass concentrations. There was no consistent effect on arterial stiffness – it increased or decreased depending on the particle metric. No changes in HRV were observed. A simplified overview of the results is shown again in the table at the end of this chapter.

Discussion - The main result of this study is that a short-term exposure of 2 h to fine and ultrafine particles from indoor sources can lead to physiological changes in healthy participants. We could observe effects on arterial blood pressure, the autonomic nervous system, on lung function and on local and systemic inflammation and oxidative stress. Effects differed according to exposure and particle metric. Potential explanations are differing chemical components and physical characteristics such as particle size distribution and deposition efficiency.

The observed effects are relevant, because they point to potential biological pathways of particle action and resulting potential risk increases for health-related outcomes. Local and systemic inflammation can enhance coagulation, which can trigger acute cardiovascular events. Acute changes in blood pressure can potentially lead to changes in oxygen supply to the coronary arteries in already susceptible individuals. The observed biologic effects are overall very similar to what has been shown for acute increases in ambient particles, for which a link to cardiovascular events has already firmly been established (Brook et al. 2010).

This study investigated physiological effects after a one-time short-term exposure. It therefore cannot make inferences on the effect of cumulative or repeated exposures or on long-term exposures. The particle mass concentrations were higher than usually observed under everyday conditions. However, they were mostly lower than what has been applied in many controlled exposure studies on ambient exposures.

This is a population-based study in healthy participants, which were not expected to be specifically susceptible to air pollution. Further studies should be conducted to identify susceptible groups and to investigate interactions of personal and environmental factors, which could modify the effect of indoor particles.

Source	Characterisation	Toxicology	Human study
Candle	Particle number concentration (0.6 µm - 20 µm)	DNA – damage	Local inflammation
	Particle number concentration (5.6 µm - 560 nm)	Inflammation	Lung function
	Lung deposit surface area		Systemic inflammation
	Mass concentration (5.6 nm - 20 µm)		Systemic oxidative stress
			Blood pressure
			Arteriell stiffness
Toast	Particle number concentration (0.6 µm - 20 µm)	DNA – damage	Local inflammation
	Particle number concentration (5.6 nm - 560 nm)	Inflammation	Lung function
	Lung deposit surface area		Systemic inflammation
	Mass concentration (5.6 nm - 20 µm)		Systemic oxidative stress
			Blood pressure
			Arteriell stiffness
Frying	Particle number concentration (0.6 µm - 20 µm)	DNA – damage	Local inflammation (↑)
	Particle number concentration (5.6 nm - 560 nm)	Inflammation	Lung function
	Lung deposit surface area		Systemic inflammation
	Mass concentration (5.6 nm - 20 µm)		Systemic oxidative stress
	Conspicuous components		Blood pressure

		Arteriell stiffness	↑↓
		Heart rate variability	-

↓↓ = very low or strong decrease, ↑↑ = very high or strong increase, ↓ = low or decrease, ↑ = high or increase, - = middle or no effect

1 Einleitung

Im Vergleich zur öffentlichen Diskussion bezüglich anthropogener Feinstaubemissionen in der Außenluft (z.B. Umweltzonen) werden Partikelemissionen in Innenräumen derzeit noch wenig wahrgenommen. Die Folge ist trotz offensichtlicher alltäglicher partikulärer Innenraumemissionen ein geringer Kenntnisstand über das Emissionsverhalten dieser Prozesse und deren gesundheitliche Relevanz. Dieser Sachverhalt zeigt sich auch in den wenigen Normen für Innenraummessungen von Partikelkonzentrationen (z.B. DIN ISO 16000, VDI 4300). Einzig im Bereich der Reinraumtechnik sind Klassifizierungen vorhanden (DIN EN ISO 14644), wobei hier der Produktschutz im Vordergrund steht. Eine Ausnahme bezüglich legislativer Regulierung partikulärer Innenraumemissionen bilden lediglich biogene Aerosole und das Zigarettenrauchen. Beides ist jedoch nicht Gegenstand der vorliegenden Studie. Außerdem ist die Außenluft eine bedeutsame Quelle der Innenraumbelastung (Samet et al. 1987; Wallace 1996; Sørensen et al. 2005; Ward et al. 2008; Bhangar et al. 2011; Buonanno et al. 2009). Hinsichtlich des Expositionsmusters, ist dabei für Innenräume, insbesondere für die submikrone Fraktion, eine hohe räumliche und zeitliche Variabilität der Expositionsparameter Partikelanzahl und –größe als auch für die chemische Zusammensetzung zu erwarten (Fromme et al. 2007). Wie diese Studien zeigten, kommt es durch diverse kurzzeitige Innenraumaktivitäten insbesondere zu episodischen Anstiegen der ultrafeinen (< 100 nm) Partikelkonzentration. Dabei zeigen diese Studien auch, dass die Innenraumkonzentrationen in spezifischen Situationen die gültigen WHO Empfehlungen zur PM Massenkonzentration für Innenraumluft zum Teil deutlich überschreiten können (IRK 2008).

Aus toxikologischer und medizinischer Sicht wird insbesondere für ultrafeine Partikel eine große Bedeutung für die Auslösung möglicher Gesundheitseffekte vermutet. Aufgrund ihrer geringen Größe können UFP zum Teil bis in den Alveolarraum vordringen und die große Gesamtoberfläche zur vermehrten Bindung von Schadstoffen und zu einer hohen Reaktivität führen (Oberdörster 2001). Biopersistente ultrafeine Partikel können darüber hinaus in die systemische Zirkulation übertreten und entlang des Nervus olfactorius in das zentrale Nervensystem übertreten (Oberdörster et al. 2004). Es ist zudem bekannt, dass ein Anstieg der Feinstaubkonzentration in der Umgebungsluft zu einer erhöhten kardiovaskulären Mortalität und Gesamtmortalität führt (Brook et al. 2010). Mehrere Studien konnten auch eine akute Erhöhung des Herzinfarkttrisikos nach kurzzeitigem Anstieg der Feinstaubkonzentration aufzeigen (Peters et al. 2001; Rich et al. 2010). Die Wirkungsmechanismen des Feinstaubes sind im Einzelnen noch unklar, es wird jedoch vermutet, dass die Partikelinhalation zu einer Aktivierung pulmonaler Reflexe mit nachfolgender Dysbalance des autonomen Nervensystems führt (Luttmann-Gibson et al. 2010). Ferner wird vermutet, dass die Stäube oxidativen Stress auslösen (Bräuner et al. 2007; Vinzents et al. 2005; Sørensen et al. 2003) und zu einer lokalen subklinischen Entzündung im Respirationstrakt sowie einer systemischen Entzündungsreaktion führen (Frampton, 2006; Chuang et al. 2007; Calderon-Garciduenas et al. 2008; Ruckerl et al. 2007; Delfino et al. 2008). Diese lokale und systemische Entzündungsreaktion wird in Verbindung mit verschiedenen weiteren Endorganmanifestationen gebracht, wie z. B. einer Beeinträchtigung der Lungenfunktion, einer endothelialen Dysfunktion und einem Blutdruckanstieg - beides Risikofaktoren für die Entwicklung einer Arteriosklerose - sowie einer vermehrten Koagulationsneigung des Blutes (Brook et al. 2010). In wie weit akute Expositionen in Innenräumen zu ähnlichen Effekten führen können ist dagegen kaum untersucht. Erste toxikologisch-medizinische Quelleneffektstudien zeigen jedoch ein Auslösen systemischer Entzündungsprozesse (Sørensen et al. 2005; Ward et al. 2008; Ghio et al. 2011) vor allem durch Verbrennungsprozesse im Innenraum, wie das Abbrennen von Kerzen und der Betrieb offener Kamine und Kaminöfen. Ein weiterer Grund für die Notwendigkeit einer systematischen Evaluierung der gesundheitlichen Wirkungen von Innenraumpartikeln ist die hohe Aufenthaltsdauer in Innenräumen und damit die möglicherweise lange Expositionszeit. Ähnlich wie in anderen Studien aus westlichen Industrieländern gehen aktuelle Studien für Deutschland von einer durchschnittlichen Aufenthaltsdauer in Innenräumen von fast 16 h pro Tag aus (Brasche et al. 2005). Zur Isolierung von akuten gesundheitlichen Effekten aus spezifischen Innenraumquellen eignen sich Studien in einem Versuchsraum mit einem kontrollierten Expositionsdesign wie sie in der vorliegenden Studie durchgeführt wurden.

Eine zentrale Wirkungshypothese ist die Auslösung von oxidativem Stress und die Auslösung einer subklinischen lokalen respiratorischen und systemischen Entzündungsreaktion. Bei der Untersuchung von akuten gesundheitlichen Veränderungen nach Partikelexposition ist es daher sinnvoll das oxidative Potential des jeweiligen Staubgemisches aus einer spezifischen Quelle zu untersuchen, in-vitro das spezifische toxikologische Potential zu bestimmen und auch den hypothetisierten Wirkungspfad in vivo über die Untersuchung von Markern des oxidativen Stresses (im respiratorischen Trakt als auch systemisch) und von Entzündungsmediatoren abzubilden.

Bei den hier durchgeführten in-vivo Studien wurden u.a. auch die akuten Auswirkungen auf die Endorgane untersucht. Der Respirationstrakt und insbesondere dessen oberer Teil ist ein wichtiges Kompartiment für Partikelwirkungen. Zum einen deponieren ultrafeine Partikel auch zu einem großen Teil auf der Schleimhaut des oberen Respirationstraktes, die damit ein wichtiges potentiell Ziel für zytotoxische und inflammatorische Effekte darstellt. Zum anderen ist die Nase entlang des Nervus olfactorius eine mögliche Eintrittspforte für Partikel in das zentrale Nervensystem (Oberdörster et al. 2000). Die zytotoxischen und inflammatorischen Wirkungen auf die Nasenschleimhaut als Modellorgan für den oberen Respirationstrakt können in vivo mittels der wenig invasiven Methode der Nasallavage untersucht werden. Dabei handelt es sich um eine gut validierte und hochsensible Methode, die bereits in vielen Studien erfolgreich eingesetzt wurde (Graham und Koren 1990). Es konnten bereits Assoziationen zwischen verkehrsbedingten Partikeln und dem Vorhandensein bzw. der Schwere von Entzündungen in einer Kohorte von Schulkindern festgestellt werden (Steerenberg et al. 2001). In einer Gruppe von jungen, gesunden Männern, die gerade nach Mexiko Stadt eingereist waren, konnte mittels wiederholter Nasallavagen ein klarer Effekt auf den Influx von neutrophilen Granulozyten gezeigt werden (Calderon-Garciduenas et al. 1994). Auch nach kurzfristiger Exposition in experimentellen Studien mit Verkehrspartikeln oder berufsbezogenen Partikeln waren die Entzündungswerte erhöht (Diaz-Sanchez et al. 1996; Hauser et al. 1995; Woodin et al. 1999). Neben lokalen inflammatorischen Wirkungen im Respirationstrakt ist die systemische Wirkung von Partikeln von zentraler Bedeutung für eine Vielzahl der in epidemiologischen Studien beobachteten Endorganwirkungen. Erst wenig untersucht wurde bisher der systemische Effekt auf die Lipidperoxidation als Maß für den von den Partikeln ausgelösten oxidativen Stress, wie z. B. in einer kontrollierten Expositionsstudie mit Dieselpartikeln (Allen et al. 2009). Im Gegensatz hierzu wurden bereits in mehreren Studien, vornehmlich an stark selektierten Probanden, Effekte auf die Konzentration von Zytokinen und Akute Phase Proteinen untersucht (Rückerl et al. 2006; Delfino et al. 2008). In diesen Studien konnten bereits einige Zusammenhänge gezeigt werden. Studien in großen, weniger selektierten Bevölkerungen weisen jedoch kontroverse Ergebnisse auf, so dass bisher keine Klarheit über die genaue Wirkungsweise der inhalierten Partikel besteht (Hoffmann et al. 2009; Panasevich et al. 2009; Forbes et al. 2009). Zu den Endorganwirkungen gehört zunächst die Untersuchung der Lungenfunktion, die bei suszeptiblen Individuen bereits nach kurzfristiger Exposition gegen über Partikeln beeinträchtigt sein kann (Mc Creanor 2009). Eine zunehmende Anzahl von Studien hat die akute Wirkung von ambienten Stäuben auf den arteriellen Blutdruck untersucht (Brook et al. 2010). Es finden sich deutliche Hinweise, dass es bereits innerhalb weniger Stunden nach erhöhter Partikelbelastung zu einem Anstieg des Blutdruckes kommt. Allerdings sind die Untersuchungen bisher überwiegend auf die Untersuchung von Effekten der Umgebungsluft beschränkt, so dass über die Wirkungsweise unterschiedlicher Innenraumquellen bisher wenig Aussagen getroffen werden können. Ebenfalls in Untersuchungen im Zusammenhang mit der Umgebungsluft oder gezielt mit Verkehrspartikeln wurden Wirkungen auf die endotheliale Funktion gezeigt, deren Beeinträchtigung allerdings weiterhin einer kontroversen Diskussion unterliegt (Schneider et al. 2008; Peretz et al. 2008). Studien zur Langzeitexposition mit Außenluftpartikeln haben darüber hinaus Wirkungen auf das zentrale Nervensystem aufgezeigt. Auch hier spielen wahrscheinlich partikelbedingter oxidativer Stress sowie eine partikelbedingte Störung der Blut-Hirn-Schranke eine wichtige Rolle, so dass möglicherweise auch akute Beeinträchtigungen der kognitiven Leistung resultieren können (Calderon-Garciduenas et al. 2002).

Unter diesen Ausgangshypothesen wurden in der hier vorliegenden Studie Innenraumpartikelemissionen, welche potentiell wichtige Quellen sowohl bezüglich der Belastung auf Bevölkerungsebene als auch bezüglich vermuteter Gesundheitsrisiken, untersucht.

1.1 Ziel

Ziel der Studie war es, potentiell wichtige Innenraumquellen für Fein- und Ultrafeinstäube bezüglich ihrer Emissionen zu charakterisieren und ihre akuten gesundheitlichen Wirkungen in einer kontrollierten cross-over Expositionsstudie zu untersuchen. Dabei wurden sowohl vermutete Wirkungswege als auch die Auswirkungen auf Endorgane untersucht.

2 Konzept

Die Untersuchung wurde in zwei aufeinander aufbauenden Phasen durchgeführt. Zunächst wurde eine umfassende physikalisch-chemische Charakterisierung der Partikelemissionen potentieller Innenraumquellen vorgenommen. Basierend auf den dabei gewonnenen Erkenntnissen wurden diejenigen Prozesse identifiziert,

die relevante Partikelemissionen aufweisen, die auch mögliche Gesundheitseffekte auszulösen vermögen. Diese ausgewählten Quellen bzw. deren Emissionen wurden dann näher charakterisiert.

Im Anschluss wurden die zuvor als relevant eingestuft Emissionsquellen für eine kontrollierte Exposition von Probanden in einem Realraum (im Folgenden bezeichnet als Versuchsraum) eingesetzt. Um mögliche konzentrationsabhängige Effekte erfassen zu können, erfolgte die Exposition mit den ausgewählten Quellen auf zwei verschieden hohen Partikel-Konzentrationsniveaus, sowie in einem Negativkontrollversuch, d.h. Exposition gegenüber Raumluft. Zusammengefasst wurde somit eine messtechnische Charakterisierung der Partikelfreisetzung bei folgenden Aktivitäten durchgeführt:

- ▶ Abbrand zweier Sorten ungefärbter Christbaumkerzen, eine davon mit RAL-Prüfsiegel (im Prüfraum)
- ▶ Toasten von handelsüblichem Buttertoast mit fabrikneuen Geräten (im Prüfraum)
- ▶ Backen von Fertigpizza (im Prüfraum)
- ▶ Braten von Würstchen (im Prüfraum)
- ▶ Betrieb eines Kaminofens (sachgerecht, und mit typischen Fehlbedienungen) (in einem separaten Untersuchungsraum)
- ▶ Betrieb eines Staubsaugers (Versuchsraum)

Zusatzuntersuchungen:

- ▶ Betrieb eines Heißluftstradiators (Versuchsraum)
- ▶ Betrieb eines mit Butan oder Spiritus betriebenen Campingkochers (Versuchsraum)
- ▶ Motoremissionen des Staubsaugers (separater Aufbau im Versuchsraum)
- ▶ Schleifen von Nanopartikel-haltigem Lack (Schleifstand)

Für die Untersuchungen möglicher Gesundheitseffekte wurden die Expositionsszenarien Toasten, Braten, Kerzenabbrand und Raumluft verwendet und sowohl toxikologische in vitro Versuche als auch in vivo Untersuchungen an Probanden auf z.B. folgende Endpunkte hin durchgeführt:

- ▶ DNA-Schädigung
- ▶ Lungenfunktionsänderung
- ▶ Herzrhythmusvariabilität
- ▶ Entzündungsmarker im Blut
- ▶ Blutdruckveränderung

3 Charakterisierung der Quellen

Die Charakterisierung der Quellemissionen wurde mit Ausnahme des Kaminofens und des Schleifens in den unten beschriebenen Prüf- bzw. Versuchsräumen durchgeführt. Bei der Durchführung wurde eine möglichst umfangreiche Charakterisierung der luftgetragenen Partikel angestrebt, wobei in Bezug auf die später folgende Probandenstudie „ungünstige“ Szenarien wie z.B. ein ungelüftetes, geschlossenes Zimmer, betrachtet wurden. Eine Übersicht der untersuchten Quellen sowie der implizierten realen Expositionssituation gibt die folgende Tabelle 1 wieder.

Tabelle 1: Untersuchte Quellen bzw. Expositionsszenarien

Quelle	Expositionsszenario	Anmerkungen
Kerzen	Weihnachten, Kerzen an einem Weihnachtsbaum, ein kompletter Abbrand	Eine Messperiode umfasst das komplette Abbrennen aller Kerzen sowie einen angemessenen Zeitraum davor und danach.

Toasten	Frühstück in einem Frühstücksraum einer kleinen Pension	Es wird ein starker Bräunungsgrad gewählt. Erschwerend wird eine altersbedingte Verschmutzung des Gerätes berücksichtigt.
Kochen	Braten von Würstchen ohne Fett	Elektroherd, kein Dunstabzug
Kamin	Kaminabend	Vergleich sachgerechter/unsachgerechter Betrieb; nur zugelassenes Brennmaterial (trockenes Holz)
Staubsaugen	Hausreinigung	Betrieb mit oder ohne HEPA Filter im Abluftstrom, allerdings nicht Gegenstand ist die Aufwirbelung durch mechanische Einwirkung auf den Untergrund
Schleifen	Abschleifen eines Parkettbodens	Holzplatten mit dem (Nanopartikel enthaltenden) Lack den Herstellerangaben folgend mehrfach behandelt und anschließend abgeschliffen

Die Charakterisierung von Innenraumquellen umfasste die Ermittlung der Partikelmassenkonzentration (PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁), Partikelanzahlgrößenverteilung (inklusive UFP Anzahlkonzentration), lungendeponierbare Partikeloberflächenkonzentration, Konzentration von organischem und elementarem Kohlenstoff (OC/EC), Konzentration von spezifischen organischen Verbindungen, Konzentration von anorganischen Elementen, Partikelreaktivität (Bildungspotential von reaktiven Sauerstoffspezies, ROS), und Partikelmorphologie.

3.1 Grundlagen zur Durchführung der Charakterisierungsmessungen

3.1.1 Prüfraum

Der verwendete Prüfraum folgt einem Raum-in-Raum Konzept. Der innere Raum mit einer variablen Grundfläche von ca. 2,40 m x 3,46 m (8,3 m²; 20,8 m³) bzw. 3,40 m x 3,46 m (11,8 m²; 29,4 m³) stellt die eigentliche Prüfkammer dar. Mit dem über der Tür angebrachten Gebläse einer Split-Klimaanlage mit Kühl- und Heizfunktion wurde die Prüfkammer auf 24 °C temperiert. Die Prüfkammer befand sich in einer Einhausung, die es gestattet, Messgeräte außerhalb der Prüfkammer aufzustellen. Die Probenahme erfolgte durch Wanddurchführungen und die Belüftung zwecks (Zwischen-)Reinigung mittels eines Hochleistungs-Ventilators über die geöffnete Kammertür.

Die Charakterisierungsmessungen erfolgten in zwei unterschiedlichen Ausbaustufen des Prüfraumes:

- ▶ Ausbaustufe A (Abbildung 1 links): Prüfkammer ohne Einhausung, kein Probenahmezugang von außen, daher Aufstellung der Messgeräte innerhalb der Prüfkammer. Die Messungen erfolgten teilweise ohne, teilweise mit Betrieb der Klimaanlage, um deren Einfluss auf die erzeugten Aerosole zu ermitteln.
- ▶ Ausbaustufe B (Abbildung 1 rechts): Mit Einhausung der Prüfkammer wie zuvor beschrieben, Aufstellung der Messgeräte außerhalb der Kammer und Probenahme mittels Sonden; Luftzufuhr aus Halle bzw. aus Umgebung via Zu- oder Abluftrohr.

Für die nachträglich beauftragten Untersuchungen zu Staubsauger-Emissionen sowie die Zusatzuntersuchungen der Butan- und Spiritusbrenner sowie des Heisslufradiators stand dieser Prüfraum aufgrund anderweitiger Nutzung nicht mehr zur Verfügung; die Messungen wurden daher im weiter unten beschriebenen Versuchsraum durchgeführt.

Abbildung 1: Prüfraum ohne Einhausung (Ausbaustufe A), links; Eingehauster Prüfraum in Ausbaustufe B, rechts



3.1.2 Versuchsraum

Für die Expositionsuntersuchungen wurde ein anderer, neu errichteter und zuvor noch nicht anderweitig benutzter Raum eingesetzt. Dieser „Versuchsraum“ befindet sich in derselben IUTA-Werkhalle, wie auch der Prüfraum, und ist aus gleichen Wandmaterialien (kunststoffbeschichtetem Metall bzw. Glasscheiben) konstruiert. Seine Fläche beträgt ca. 16 m², das umbaute Volumen liegt bei ca. 48 m³. Er ist mit einer Arbeitsfläche und einem während der Untersuchungen abgeschalteten Digestorium versehen (Abbildung 2, links oben). In zwei Außenwände wurden analog zum Prüfraum Probnahmeverrichtungen eingesetzt, die einen Betrieb von Messgeräten außerhalb des Expositionsraumes ermöglichen (Abbildung 2, rechts oben). Die Sitzgelegenheit für die Probanden ist in Abbildung 2, links unten dargestellt. Der Expositionsraum ist weiterhin mit einer Zu-/Abluftanlage mit Filter und einer geregelten Umluft-Klimaanlage mit Heizregister ausgerüstet (Abbildung 2, rechts unten). Die Zu-/Abluft wurde soweit nicht anders beschrieben bei Stufe 1 (je nach Druckverlust der Filter 90-240 m³/h) betrieben. Während der Untersuchungen wurde die Decke des Raumes, die aus porösen Kunststoffplatten besteht, mit einer antistatischen Folie (Verhinderung von Partikeladsorption an den Wandoberflächen) abgeklebt.

Abbildung 2: Versuchsraum



3.1.3 Methoden

Für die Untersuchungen wurde ein breites Spektrum an Detektions- und Sammelgeräten verwendet, um eine möglichst umfangreiche chemische-physikalische Charakterisierung zu gewährleisten. Eine Übersicht der eingesetzten Messgeräte bzw. verwendeten Analysemethoden zur Quellencharakterisierung sowie Expositionsüberwachung (Versuchsraum / Probandenexposition) gibt die folgende Tabelle 2 wieder. Eine kurze Beschreibung der Analysegeräte folgt im Anschluss.

Tabelle 2: Für die Partikelcharakterisierung verwendete Messverfahren, Messparameter und Spezifikationen

Nr.	Gerät	Messparameter	Spezifikation
1	CPC	Gesamtanzahlkonzentration	ca. 2,5 nm - 3 µm; 10 s MW
2	SMPS	Anzahlgrößenverteilung (elektr. Mobilität)	Langer DMA: 14 nm - 750 nm Nano-DMA: 6,5 nm - 255 nm 120 s bzw. 240 s je Scan
3	FMPS	Anzahlgrößenverteilung (elektr. Mobilität)	5,6 nm - 560 nm 1 s je Scan
4	APS	Anzahlgrößenverteilung (aerodynamisch)	0,6 nm - 20 µm 120 s bzw. 240 s MW
5	NSAM	Lungendeponierbare Oberflächenkonzentration	20 nm - 1000 nm 10 s MW
6 ²	PILS/ROS	Gesamtaerosol; Sammlung von Aerosolpartikeln und wasserlöslichen Gasen in wässriger Suspension, 1 m ³ /h Messung von ROS mittels ESR-Methode	Eine Probe je Messtag
7 ²	LVS	PM10, PM2.5, PM1, je 2,3 m ³ /h Partikelsammlung auf Filtern (Pall PTFE bzw. Whatman QMA Quarzfilter)	Jeweils eine Probe je Messtag
8 ²	AMS	Chemische Zusammensetzung submikroner Partikel	~ 60 nm - 600 nm; Massenspektren im Sekundentakt
9 ²	PTR-MS	Gasförmige Stoffe	Molekülmassen bis 200 amu, Sekundenauflösung
10 ²	NAS	Partikelsammlung auf Trägern für REM und TXRF	Jeweils angepasste Probenahmezeiten
11	HygroSens	Temperatur, Feuchte	
12 ²	SunSet	Offline Messgerät zur Analyse von elementarem und organischem Kohlenstoff aus Filterproben	Quarz-Filternotwendig; EUSAAR2 –Temperaturprotokoll
13 ³	DiSCMini	Tragbares Handgerät zur Messung von Partikelanzahl, -oberfläche, -durchmesser (Mittel)	10 nm - 400 nm, Zeitauflösung 1 s
15 ³	Partector	Tragbares Handgerät zur Messung mittlerer lungendeponierter Partikeloberfläche	10 nm - 400 nm, Zeitauflösung 1 s
16 ^{1,3}	Dräger X-AM 7000	Tragbares Multigas-Warngerät, unter anderem für CO und CO ₂	Arbeitsbereich 0 ppm - 500 ppm

¹ Nur während Kerzenexpositionen und Kaminofenuntersuchungen; ² Nur während Kaminofenuntersuchungen; ³ Nur während der Probandenexpositionen

Die Anordnung der Messgeräte für die Charakterisierungsmessungen ist in Abbildung 3 (Aufstellung der Geräte in der Prüfkammer, Ausbaustufe A) bzw. Abbildung 4 (Aufstellung der Geräte außerhalb der Prüfkammer, Ausbaustufe B) gezeigt (vgl. 3.1.1). Die Proben wurden über (antistatische) Schläuche angesaugt, deren Ansaugöffnungen gebündelt wurden, um einen möglichen Einfluss unterschiedlicher räumlicher Verteilungen der Partikel im Prüfraum auszuschließen. Da die LVS-Filterisammler mit insgesamt 4,6 m³/h einen erheblichen Anteil des Raumvolumens umsetzen und dabei die Luft aufreinigen, erfolgten die Filterprobenahmen nicht parallel zu den übrigen Messungen, sondern an separaten Messtagen.

Abbildung 3: Messgeräte-Aufstellung innerhalb der Prüfkammer (Ausbaustufe A)

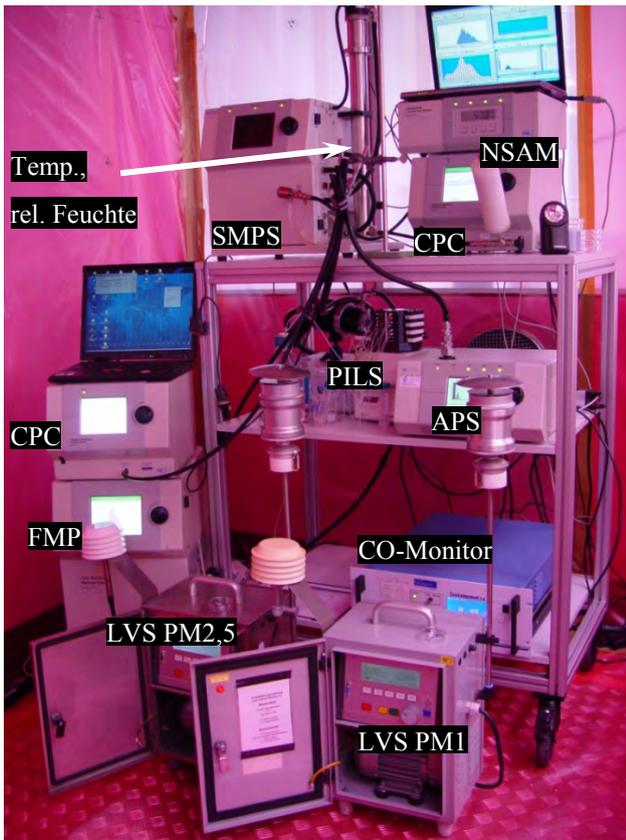


Abbildung 4: Messgeräte-Aufstellung außerhalb der Prüfkammer (Ausbaustufe B)



3.1.3.1 Beschreibung der verwendeten Analysegeräte

CPC (Condensation Particle Counter) - Bei den CPC Modellen 3776 und 3786, TSI Inc. werden die eingesaugten Partikel durch eine mit Butanol (3776) bzw. Wasser (3786) gesättigte Umgebung geleitet. In der daran anschließenden Kühlstrecke dienen die Partikel als Kondensationskerne und kondensierendes Butanol bzw. Wasser lässt die Partikel anwachsen. Die angewachsenen Partikel können somit in der anschließenden

Optikeinheit erfasst und gezählt werden. Der CPC bestimmt die Gesamtpartikelanzahl im Größenbereich von 2,5 nm bis 3.000 nm in einem Konzentrationsbereich von bis zu $3,5 \cdot 10^5$ Partikeln/cm³ (Modell 3776 im Einzelpartikelmodus, danach Streulichtmodus) bzw. $1 \cdot 10^5$ Partikeln/cm³ (Modell 3786 im Einzelpartikelmodus, kein Streulichtmodus) mit einer zeitlichen Auflösung von einer Sekunde. Der CPC wurde zur Bestimmung der Gesamtpartikelanzahlkonzentration verwendet.

SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer) - Mit dem SMPS-Spektrometer (Model 3936 mit Electrostatic Classifier Model 3080, DMA Model 3081 oder 3085, Neutralisator Model 3077 und UWCPC Model 3776, TSI Inc.) besteht die Möglichkeit, die Anzahlgrößenverteilung submikroner Partikel unter Annahme kugelförmiger Partikel zu bestimmen. Für nicht kugelförmige Partikel basiert die Messung auf Äquivalenzgrößen. Die Partikel in einem Aerosol werden dazu hinsichtlich ihrer Größe klassiert und anschließend mithilfe eines CPC (Condensation Particle Counter) gezählt. Dazu werden die Partikel zuvor definiert elektrisch aufgeladen und anhand ihrer elektrischen Mobilität im DMA (Differential Mobility Analyzer) fraktioniert. Durch eine kontinuierliche Veränderung der angelegten Spannung im DMA (0 bis -10.000 V) kann je nach verwendetem DMA, CPC und in Abhängigkeit der eingestellten Volumenströme der Größenbereich von 2,5 nm bis 1.000 nm (elektrischer Mobilitätsdurchmesser) abgescannt werden. Aufgrund dieser Fraktionierung der Partikel wird mithilfe der bekannten und definierten Ladungsverteilung der Partikel sowie deren mechanischer Mobilität die Größenverteilung der Partikel im Aerosol bestimmt. Die elektrische Mobilitätsanalyse ist seit einigen Jahrzehnten bekannt und gilt als Standardverfahren zur Bestimmung der Anzahlgrößenverteilung submikroner Partikel. Das verwendete SMPS liefert eine Größenauflösung von bis zu 64 Kanälen pro Dekade. Verwendet wird der LongDMA (Model 3081) mit einem Aerosolvolumenstrom von 0,3 l/min und Schleierluftstrom von 3,0 l/min. Dies ergibt bei Scanzeiten von 240 s den Partikelgrößenbereich 13,8 - 750 nm sowie bei Scanzeiten von 120 s den Partikelgrößenbereich 14,3 - 673 nm. Bei Verwendung des NanoDMAs (Model 3085) ergibt sich bei gleichen Volumenströmen der Partikelgrößenbereich von 6,5 nm bis 255 nm.

FMPS (Fast Mobility Particle Sizer) - Mit dem FMPS Spektrometer (Model 3091, TSI Inc.) wird die Anzahlgrößenverteilung unter Annahme kugelförmiger Partikel im Größenbereich von 5,6 nm bis 560 nm (elektrischer Mobilitätsdurchmesser) mit einer Auflösung von 16 Kanälen pro Dekade vermessen. Die zeitliche Auflösung beträgt dabei eine Sekunde. Diese zeitliche Auflösung wird dadurch erreicht, dass die zuvor aufgeladenen Partikel im DMA mit fest eingestellter Spannung aufgrund ihrer elektrischen Mobilität abgelenkt werden und auf die an der Außenelektrode des Klassierers angeordneten Elektrometer auftreffen. Somit werden die Größenfraktionen des Aerosols parallel vermessen. Im FMPS sind 22 Elektrometer angeordnet, von denen jedes einen gewissen Mobilitätsbereich abdeckt. Wenn die Partikel auf die Elektrometer treffen, fließt deren Ladung ab und der generierte Strom wird anschließend verstärkt, das Signal digitalisiert und durch einen Mikrocontroller ausgelesen. Durch die bekannte Ladungsverteilung werden die gemessenen Ströme über einen in der Gerätesoftware implementierten Berechnungsalgorithmus in Partikelgrößenverteilung umgerechnet.

APS (Aerodynamic Particle Sizer) - Mit dem APS Spektrometer (Modell 3321, TSI Inc.) werden luftgetragene Partikel im Größenbereich von 0,6 µm bis 20 µm mit einer Auflösung von 32 Kanälen pro Dekade detektiert und klassiert. Die Partikelgrößenklassifizierung erfolgt anhand des aerodynamischen Durchmessers. In einer Düse werden die Aerosolpartikel auf eine Geschwindigkeit beschleunigt, die abhängig von der Trägheit der Partikel ist. Das bedeutet, dass kleine Partikel aufgrund der geringeren Trägheit eine höhere Endgeschwindigkeit haben als große Partikel. Anschließend wird die Flugzeit der Partikel zwischen zwei Punkten mittels Laserstrahl ermittelt. Diese Flugzeit ist direkt proportional zum aerodynamischen Durchmesser der Partikel.

NSAM (Nanoparticle Surface Area Monitor) - Das Funktionsprinzip des NSAM (Model 3550, TSI Inc.) basiert auf der unipolaren Diffusionsaufladung der zugeführten Partikel mit Ionen mit anschließender Detektion in einem sehr empfindlichen Elektrometer. In einer einstellbaren Ionenfalle werden dabei Ionen und ein kleiner Teil der aufgeladenen Partikel größenabhängig vor dem Elektrometer entfernt. Mithilfe von Kalibrierfaktoren wird der gemessene Strom in eine Oberflächenkonzentration inhalierter Partikel umgerechnet,

die in den tracheobronchialen (TB) und alveolaren (A) Bereichen der Lunge abgeschieden würden. Zur Bestimmung der Kalibrierfaktoren wurden die Abscheidkurven des tracheobronchialen und alveolaren Bereichs der Lunge eines Standardarbeiters bei leichter Tätigkeit herangezogen.

CO-Monitor - Die Konzentration von Kohlenstoffmonoxid wurden mit einem auf der Absorption von Infrarotstrahlung basierenden Analysator (Environment S. A CO 11 M) überwacht. Er dient in erster Linie dazu, sicherzustellen, dass keine kritischen CO-Konzentrationen in der Prüfkammer aufgebaut werden. Während der Expositionsuntersuchungen wird zusätzlich ein Gaswarngerät (X-am 7000, Dräger GmbH) verwendet. Dieses üblicherweise für Arbeitsplatzüberwachung eingesetzte Gerät enthält mehrere elektrochemische Sensoren für die Messung unterschiedlicher Gase, darunter CO₂ und CO. Für CO hat es einen Arbeitsbereich von 0 - 500 ppm.

PILS/ROS (Particle-into-liquid-sampler/reactive oxygen species) - Mittels eines so genannten Particle-into-liquid-samplers (PILS, Metrohm AG) können luftgetragene Partikel kontinuierlich in eine wässrige Suspension überführt werden. Diese Art der Probenahme umgeht somit die sonst notwendigen Filterprobenahme mit nachfolgender Extraktion. Üblich ist eine Anwendung dieser Methode zur Analyse von wasserlöslichen Kationen und Anionen mittels nachgeschalteter Ionenchromatographie. Im vorliegenden Projekt wurden die Suspensionen mittels spezieller, auf der Nutzung von Elektronenspinresonanzspektrometrie basierender Assays auf ihre Oberflächenreaktivität (Radikalfänger: CPH 1-hydroxy-3-carboxy-pyrrolidine) und ihr OH-Radikalbildungspotential (Radikalfänger: DMPO 5,5-dimethyl-1-pyrroline-N-oxide) untersucht. Zur Kontrolle wurden im Falle des DMPO-Assays Kupfersulfatlösungen (Hellack et al. 2014), im Falle des CPH-Assays ein spezielles Nanopartikelmaterial (NM-300K, JRC – Nanosilver) verwendet.

LVS (Low Volume Sampler) - Bei den Messungen kamen zwei Low Volume Sampler (LVS 3, Derenda) zum Einsatz. Die LVS-KleinfILTERGERÄTE werden mit einem Volumenstrom von 2,3 m³/h betrieben. Als Vorabscheider wurden PM1 und PM2.5 Probenahmeköpfe verwendet, die jeweils als 1-Stufen-Impaktor aufgebaut sind und dem Probenstrom Partikel größer als 1 bzw. 2,5 µm entnehmen. Anschließend wurden die verbleibenden Partikel auf QMA Quarzfiltern (Whatman) und Teflonfiltern (Pall) mit einem Durchmesser von 47 mm gesammelt.

AMS (Aerosol Massen Spektrometer) - Mit dem hochauflösenden Partikel-Flugzeit-Aerosolmassenspektrometer (AERODYNE HR-TOF-AMS) können Partikel im Größenbereich von ca. 60 - 600 nm umfassend chemisch und physikalisch charakterisiert werden. So sind beispielsweise Sulfat-, Nitrat- und organische Partikelfractionen leicht zu unterscheiden. Mit der hoch aufgelösten Massenspektrometrie ($\Delta m/m \sim 4000$) ist eine genaue Identifikation einzelner partikelgetragener organischer Substanzen möglich. Die Messintervalle können flexibel von Stunden- bis zu Sekundenmittelungen gewählt werden.

PTR-MS (Proton Transfer Reaction Mass Spectrometry) - Gasförmige organische Schadstoffe (VOC) wurden online und zeitaufgelöst mit einem Compact-Protonentransfer-Reaktions-Massenspektrometer (Compact PTR-MS) der Firma Ionicon untersucht. Das PTR-MS ionisiert die im Probenvolumen vorliegenden Stoffe mit H₃O⁺ als Primärion (Protonentransferreaktion, funktioniert für alle Moleküle mit einer höheren Protonenaffinität als 166,5 kcal/mol). Die untere Nachweisgrenze des Gerätes liegt bei 5 ppb und die obere Nachweisgrenze bei 10 ppm. Der Quadrupol besitzt einen Massenfilter bis 300 m/z.

NAS (Nanometer Aerosol Sampler) - Mit dem NAS (Model 3089, TSI Inc.) steht ein elektrostatischer Präzipitator (ESP) zur Verfügung, der speziell zur Abscheidung von Partikeln im Nanometerbereich entwickelt wurde. Die Abscheidung auf einem Substrat oder Probenträger erfolgt mithilfe eines elektrischen Feldes. Dieser Präzipitator sammelt die Probe auf speziellen Probennahmeträgern (Glaskohlenstoff oder Si-Wafer), die dann weiter untersucht werden können. Einsatzmöglichkeiten sind beispielsweise die Charakterisierung der Probe durch die Rasterelektronenmikroskopie (REM) oder die chemische Analyse mithilfe der Totalreflexions-Röntgenfluoreszenzspektrometrie (TXRF). In der kommerziellen Version werden die Partikel nicht zusätzlich aufgeladen, sodass nur die Partikel abgeschieden werden, deren natürliche Polarität der im NAS gesammelten Polarität entspricht. Da die Ladungsverteilung luftgetragener Partikel in der Regel einer Boltzmann-Verteilung entspricht, würden somit immer weniger als 50 % der eingesaugten Partikel auch tatsäch-

lich abgeschieden. Um die Sammeleffizienz des NAS zu erhöhen, wurde das Gerät daher mit einem vorge-schalteten, am IUTA entwickelten unipolaren Auflader betrieben.

Sunset EC-OC-Analysator - Die EC-/OC-Analysen wurden mit Hilfe eines Lab OC-EC Aerosol Analyser (Sunset Laboratory Inc., USA) durchgeführt. Dabei handelt es sich um ein Gerät zur thermo-optischen Bestimmung von elementarem Kohlenstoff (EC) und organischem Kohlenstoff (OC). Dazu wird eine Filterprobe thermisch zuerst in Helium und danach in einem Helium/Sauerstoff-Gemisch (98%/2% -Vol) entsprechend einem vorgegebenen Temperaturprogramm analysiert. Der bei einer bestimmten Temperatur und Gaszusammensetzung jeweils freigesetzte Kohlenstoff wird katalytisch zu CO₂ oxidiert, anschließend zu Methan reduziert und in einem FID (Flammenionisationsdetektor) detektiert. Je nachdem, zu welchem Zeitpunkt der Analysenschritte der Kohlenstoff gemessen wird, unterscheidet man zwischen organischem und elementarem Kohlenstoff. Da bei einer rein thermischen Methode aber Artefakte entstehen können, die eine korrekte Separation zwischen OC und EC ("Split") verhindern, wird bei der thermo-optischen Methode eine Korrektur mit Hilfe der Transmissionsmessung eines Laserstrahls vorgenommen. Zurzeit existiert kein allgemein anerkanntes Analyseprotokoll. In Absprache mit dem UBA wurde das in Europa für Außenluftmessungen entwickelte EUSAAR-Protokoll verwendet.

DiSCMini (Diffusion Size Classifier) - Um die Exposition auch außerhalb des Versuchsraumes einschätzen zu können wurden für die Expositionsmessungen ergänzend und stichprobenartig personengetragene Partikelmessgeräte vom Typ DiSCMini (Matter Aerosol, Schweiz) eingesetzt. Diese Geräte erlauben eine kontinuierliche Bestimmung der Partikelanzahlkonzentration, des mittleren Partikeldurchmessers und der mittleren Partikeloberfläche. Der Messbereich liegt bei ca. 10 nm bis 400 nm Partikeldurchmessern.

3.2 Ergebnisse der Charakterisierungsmessungen

3.2.1 Überblick

Ein Überblick der durchgeführten Messungen und welche Messsysteme bei den verschiedenen Charakterisierungsmessungen jeweils zum Einsatz gekommen sind, ist in Tabelle 3 dargestellt. Wie zu erkennen, ist nicht bei allen Messungen die gesamte Palette der Messgeräte eingesetzt worden. Vielmehr wurde der jeweiligen Quelle angepasst eine Auswahl an Messverfahren genutzt. So wurden beispielsweise CO-Messungen nur bei Quellen mit einer potentiellen CO-Emission (Kerzen und Kaminofen) durchgeführt. Bei den Untersuchungen mit dem Backofen, Staubsauger oder den beiden Brennertypen ergaben sich beispielsweise so geringe Partikelemissionen, dass Offline-Probenahmen bzw. die Anwendung der Online-Massenspektrometer (AMS, PTR-MS) nicht sinnvoll waren.

Tabelle 3: Tabellarische Übersicht der durchgeführten Messungen/Analysen

	Klima	CPC	SMPS	FMPS	APS	NSAM	NAS	PILS	LVS	AMS	EC/OC	REM	TXRF	PTR-MS
Kerzensorte A	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Kerzensorte B	X	X	X	X	X	X	X	X	X	n. a.	X	X	X	X
Toaster	X	X	X	X	X	X	X	X	X	n. a.	n. a.	X	X	X
Backofen	X	X	X	X	X	X	n. a.							
Bratpfanne	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Staubsauger	X	X	X	X	X	X	n.a.	x						
Staubsauger (Motoremissionen)	n.a.	X	X	X	X	X	X	X	X	n.a.	n.a.	X	X	n.a.
Kaminofen	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Gas- und Spiritusbrenner	X	n. a.	X	X	X	X	n. a.							
Heißluftstrahlradiator	X	n. a.	X	X	X	X	n. a.							
Schleifen	n.a.	X	n.a.	X	X	X	X	n.a.						

Anmerkung: n. a. = nicht angewandt, Klima = Temperatur, abs. und rel. Feuchte, CO (nur bei Kerzen); X = Analyse durchgeführt

3.2.2 Kerzenabbrand

3.2.2.1 Geräte, Materialien, Vorgehensweise

Es wurden zwei unterschiedliche Kerzensorten gleichen Typs (ungefärbte Christbaumkerzen) untersucht, wobei eine der beiden Sorten das RAL-Prüfzeichen besitzt. Es sei darauf hingewiesen, dass die Prüfung gemäß RAL-Kriterien und Führung des RAL-Prüfsiegels eine freiwillige Maßnahme der Kerzenhersteller darstellt. Das Fehlen des Prüfzeichens ist also kein Hinweis darauf, dass die Kerzen die RAL-Kriterien nicht erfüllen, sondern kann lediglich bedeuten, dass der Hersteller sich nicht um Zuteilung dieses Prüfzeichens bemüht hat. Um einer Überinterpretation des Kriteriums „Prüfsiegel“ vorzubeugen, werden die beiden Kerzensorten im Folgenden mit „Sorte A“ (RAL-geprüfte Kerzen) bzw. „Sorte B“ (nicht RAL-geprüfte Kerzen) bezeichnet. Zur Charakterisierungsmessung wurden jeweils 20 Baumkerzen in handelsüblichem Haltern an einem mit Aluminiumfolie überzogenen Sperrholzbrett befestigt, welches wiederum auf einem Labortisch arretiert wurde, so dass der Abbrand in ca. 1,20 m Höhe erfolgte (Abbildung 5). Der Abstand zwischen den Kerzen betrug ca. 15 cm, um so eine gegenseitige Beeinflussung des Abbrandes zu minimieren. Ebenso wurde darauf geachtet (geringe Verwirbelung / Luftzug), ein möglichst homogenes Abbrennen zu erreichen und somit das Rußen der Kerzen minimieren.

Abbildung 5: Anordnung der Kerzen während der Abbrandversuche



Bedingt durch den unterschiedlich schnellen Abbrand konnten an einem Messtag mit Filterprobenahme vier komplette Durchgänge mit der Sorte A, aber nur drei Durchgänge mit Sorte B durchgeführt werden. Bei der Aufnahme der online-Daten wurden jeweils einzelne Abbrandzyklen mit dazwischen liegenden Abkühlungsphasen untersucht. Tabelle 4 zeigt eine Übersicht der Messungen und der variierten Messbedingungen.

Tabelle 4: Übersicht der Messungen zur Charakterisierung von Kerzenabbrand

Kerzen, Messungen	Messbedingungen (Klimatisierung, Zu-Abluft)
Sorte B	z.T. mit Klimaanlage; Zuluft geschlossen
Sorte B, online-Daten	z.T. mit Klimaanlage; Zuluft geschlossen
Sorte B, Filterprobenahme 60 Kerzen	PM1 auf PTFE, PM2.5 auf Quarz; Abluft offen; Zuluft geschlossen
Sorte B, Filterprobenahme 60 Kerzen	PM2.5 auf PTFE, PM1 auf Quarz; Abluft offen; Zuluft geschlossen
Sorte A, Filterprobenahme 80 Kerzen	PM2.5 auf PTFE, PM1 auf Quarz; Abluft offen; Zuluft geschlossen
Sorte A, online-Daten	z. T. mit Klimaanlage
Leerraum und Sorte A, online-Daten	mit Klimaanlage; Abluft offen; Zuluft geschlossen
Sorte A, online-Daten; Jeweils ca. 20 im Wechsel, insges. 6 Zyklen je 1 h	Ohne bzw. mit Klimaanlage; Zu-/Abluft verschlossen; Messung nicht verwertbar
Sorte A, online-Daten; Jeweils ca. 20 im Wechsel, insges. 6 Zyklen je 1 h	Ohne bzw. mit Klimaanlage; Abluft geschlossen; Zuluft offen
Sorte B, online-Daten; Jeweils ca. 20 im Wechsel, insges. 6 Zyklen je 1 h	Ohne bzw. mit Klimaanlage; Abluft geschlossen; Zuluft offen
Sorte B, Filterbelegung, PILS/ROS, AMS, PTR-MS; Insgesamt 4 Zyklen a 20 Kerzen bis Abbrand	Ohne bzw. mit Klimaanlage; Abluft geschlossen; Zuluft offen
Sorte A, Filterbelegung, PILS/ROS, PTR-MS; Insgesamt 4 Zyklen a 20 Kerzen bis Abbrand	Ohne bzw. mit Klimaanlage; Abluft geschlossen; Zuluft offen

3.2.2.2 Messergebnisse

Physikalische Daten und Abbrandverhalten der Kerzen

Zunächst wurden die Grundeigenschaften der zwei unterschiedlichen Kerzensorten untersucht. Hierbei zeigte sich das diese in ihren grundlegenden Maßen und in ihrem Gewicht, somit auch hinsichtlich der Materialdichte, nahezu identisch sind (Tabelle 5).

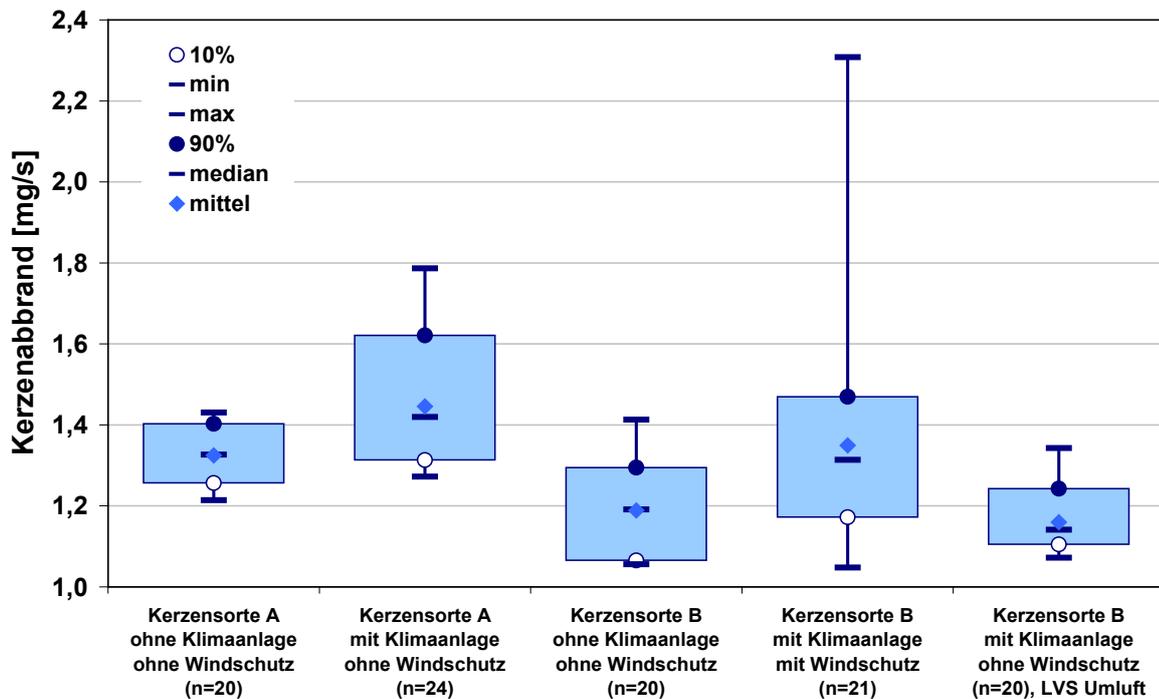
Tabelle 5: Grundeigenschaften der untersuchten Baumkerzen; Maße/Gewicht als Mittelwert von jeweils 10 Kerzen

	Sorte A	Sorte B
Durchmesser auf halber Länge (mm)	12,31 ± 0,03 (n = 10)	12,29 ± 0,04 (n = 10)
Länge (bis Dochtansatz) (mm)	106,1 ± 0,30 (n = 10)	105,4 ± 0,31 (n = 10)
Gewicht (g)	10,41 (n = 44)	10,77 (n = 42)
Rechnerische Dichte (g/cm ³)	0,82	0,86
Brenndauer (typisch ohne Luftbewegungen) in min	120 - 135	135 - 180

Bei den Untersuchungen im Prüfraum bei gleichen Randbedingungen zeigten sie jedoch deutliche Unterschiede im Abbrandverhalten: die Kerzen der Sorte A brannten (bei Abwesenheit störender Luftströmungen) insgesamt gleichmäßiger, aber signifikant schneller ab als die Kerzen der Sorte B. Wegen der gleichen Maße bzw. Dichte können diese Abweichungen demnach nur auf Unterschiede des Wachs- bzw. Dochtmaterials beruhen. Das Abbrandverhalten wurde weiterhin von den Strömungsbedingungen im Prüfraum beeinflusst. Dies

kam insbesondere zum Tragen, als die Messgeräte außerhalb des Prüfraums bei zugeschalteter Klimaanlage betrieben wurden. Es wurden daher Abbrandversuche unter verschiedenen Randbedingungen durchgeführt und die Abbrandrate durch Auswiegen der Kerzenstummel und ggf. Wachsreste aus dem Teller des Kerzenhalters nach einer definierten Zeit ermittelt. Die entsprechenden Boxplots der Abbrandraten sind in Abbildung 6 wiedergegeben. Darin bedeutet eine Abweichung von $n = 20$ Kerzen, dass einige Kerzen durch erhöhten Abbrand oder Wachstropfen frühzeitig ausgetauscht werden mussten.

Abbildung 6: Vergleich der berechneten Kerzen-Abbrandraten als Boxplot



Massenkonzentration (gravimetrisch)

Bei den Probenahmen auf Filtern wurden ausschließlich die LVS-Filterisammler im Prüfraum aufgestellt. Um eine möglichst hohe Beladung der Filter für die nachfolgenden toxikologischen Analysen zu erzielen, erfolgte die Filterbelegung akkumulierend über einen Messtag, wobei mehrmals nacheinander jeweils 20 Kerzen derselben Sorte abgebrannt wurden. Wegen der unterschiedlichen Abbrandgeschwindigkeiten konnten von der Kerzensorte A vier Serien (80 Kerzen) und von der Kerzensorte B jedoch nur drei Serien (60 Kerzen) beprobt werden. Die Sammelgeräte messen und regeln kontinuierlich das Probenahmenvolumen auf $2,3 \text{ m}^3/\text{h}$. Entsprechend der tatsächlichen Probenahmezeit ergaben sich damit unterschiedliche Gesamtvolumina, die für die Berechnung der mittleren Massenkonzentrationen herangezogen wurden. Die Probenahme erfolgte unter Verwendung von Whatman QMA Quarzfaserfilter (für nachfolgende EC-OC-Analysen) und PALL TEFLO RP047 PTFE-Filter mit einer Porenweite von $2 \mu\text{m}$ (für nachfolgende toxikologische Analysen). Die PTFE-Filter wurden mit $\text{PM}_{2.5}$ und die Quarz-Filter mit PM_1 Proben belegt, da für die späteren toxikologischen Untersuchungen möglichst viel Partikelmasse gesammelt werden musste. Orientierend wurden zusätzlich auch Proben von $\text{PM}_{2.5}$ auf Quarz- und PM_1 auf PTFE-Filtern gezogen. Die Filter wurden vor und nach den Probenahmen jeweils mindestens 48 h im klimatisierten Wägeraum konditioniert und zweimal gewogen. Vor der eigentlichen Wägung wurden die PTFE-Filter mittels eines Ionengebläses elektrisch neutralisiert, um einen Einfluss statischer Aufladung auf das Wägergebnis auszuschließen. Tabelle 6 zeigt die Grunddaten der jeweiligen Probenahmen sowie die Wägergebnisse und die daraus resultierenden Massenkonzentrationen.

Tabelle 6: Ergebnisse der gravimetrischen Analysen für PM1 und PM2.5 bei Kerzenabbrand

Kerzensorte	N	Volumen (m ³)	PM1-Filter			PM2.5-Filter			PM1/PM2.5
			Material	µg/Filter	µg/m ³	Material	µg/Filter	µg/m ³	
B	60	19,2	PTFE	1.068	55,8	Quarz	1.361	71,0	0,78
B	60	19,0	Quarz	1.315	69,2	PTFE	1.272	66,9	1,03
A	80	20,4	Quarz	5.889	289	PTFE	5.643	277	1,04
Leerraum	-	16,7	Quarz	316	18,9	PTFE	523	31,3	0,50
B	40	9,9	PTFE	1.142	115	Quarz	1.256	127	0,91
B	40	10,6	Quarz	994	93,9	PTFE	1.118	106	0,89
A	40	9,6	Quarz	3.886	403	PTFE	4.189	435	0,93
A	40	9,9	PTFE	4.078	413	Quarz	4.690	477	0,87

Aus den Ergebnissen lassen sich folgende vorläufige Schlussfolgerungen ziehen:

- ▶ Die durch Abbrand der Kerzensorte A erzeugten Partikelmassenkonzentrationen sind um ein Vielfaches höher als die von Sorte B hervorgerufenen; diese hohen Unterschiede sind nicht allein auf die um ca. 1/3 höhere Abbrandrate zurückzuführen.
- ▶ Mit beiden Kerzensorten sind hohe Konzentrationen (bis ca. 300 µg/m³ PM2.5) im Prüfraum erreichbar, die bei den Expositionsversuchen mit Probanden messbare Effekte erwarten lassen.
- ▶ Der Unterschied zwischen den PM2.5 und PM1 Massenkonzentrationen ist relativ gering; Insgesamt sind im Durchschnitt mehr als 90 % der Partikelmasse dem sub-mikronen Bereich zuzuordnen.

Die Resultate der Leerraummessung zeigen eine deutlich höhere Differenz zwischen PM2.5 und PM1, also den Einfluss von größeren Staubpartikeln. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Prüfkammer zuvor der ungefilterten Hallenluft ausgesetzt war, in der zum Zeitpunkt der Leerraum-Messung ständig Montagearbeiten durchgeführt wurden. Insofern ist dieser Leerraumwert nicht unbedingt repräsentativ für die Tage, an denen Kerzenabbrand erfolgt.

Anzahlkonzentration und –größenverteilung

Die Partikelanzahlkonzentration wurde während der Messungen einerseits größenintegriert mit einem Kondensationskernzähler (CPC), andererseits größen aufgelöst mit SMPS, FMPS und APS durchgeführt. Die Gesamtpartikelkonzentration überstieg allerdings den Arbeitsbereich des CPCs, so dass ein Rotationsverdünner vorgeschaltet wurde. Der Verdünnungsfaktor wurde entsprechend des Arbeitsbereichs des CPC eingestellt (Faktor 12 bei Verwendung des CPC 3776 und Faktor 59 bei Verwendung des CPC 3786) und in den nachstehend dargestellten Ergebnissen berücksichtigt. Zunächst wurden Messungen ohne Klimatisierung durchgeführt, da zu erwarten war, dass die im Umluftbetrieb arbeitende Klimaanlage zu Partikelverlusten und Änderung des Partikelspektrums führt. Die Aufstellung der Messgeräte innerhalb der nicht-klimatisierten Prüfkammer erwies sich allerdings wegen der Temperaturentwicklung als problematisch, da einige Geräte oberhalb von 35-40 °C nicht mehr einwandfrei funktionieren. Dieses Problem wird bei der Aufstellung der Messgeräte außerhalb der Prüfkammer vermieden. Da derartige Temperaturen aber auch bei den in Phase 2 geplanten Probandenexpositionen nicht toleriert werden konnten, wurde die Klimaanlage zugeschaltet.

Der Einfluss der Klimaanlage wird in den gezeigten Zeitverläufen der mit CPC bzw. FMPS gemessenen Gesamtanzahlkonzentrationen deutlich Abbildung 7. Wiedergegeben sind zwei Messzyklen mit jeweils 20 Kerzen der Sorte A, wobei der erste Zyklus aufgrund einer temperaturbedingten Warnung vor vollständigem Abbrand der Kerzen abgebrochen wurde. Bei erneutem Auftreten der Temperaturwarnung während des 2. Zyklus, wurde die Klimatisierung zugeschaltet. Ohne Klimatisierung (Messzyklus 1 und Anfang Messzyklus 2) waren die vom CPC und FMPS ausgegebenen Partikelanzahlkonzentrationen sehr unterschiedlich, wobei

das FMPS erheblich geringere Werte ausgab als der CPC. Mit Anschalten der Klimaanlage sanken die Konzentrationen des CPC ab, und die Messwerte des FMPS stiegen gleichzeitig an, so dass nach einigen Minuten beide Geräte vergleichbare Konzentrationen bei akzeptablem Gleichlauf anzeigten. Der Einfluss der Klimaanlage auf die Partikelanzahlkonzentration (CPC) fiel mit einem Rückgang von ca. 30 % moderat aus (ein Effekt, der bei späteren Messungen aber nicht reproduziert werden konnte). Abbildung 8 zeigt analog zu Abbildung 7 die Verläufe für die Oberflächenkonzentration (NSAM) und die mit dem APS gemessene Anzahl mikroner Partikel. Während das NSAM-Signal zunächst ähnlich wie die CPC-Werte aus Abbildung 7 mit einem Signalabfall auf die Zuschaltung der Klimaanlage reagierte, zeigte sich im weiteren Verlauf dann aber ein Anstieg. Hierin spiegelt sich vermutlich eine durch den Temperaturrückgang verstärkte Kondensation verdampften Wachses bzw. Agglomeration kleinerer Partikel wider.

Nicht ohne weiteres verständlich ist der Verlauf der Partikelanzahlkonzentration im mikronen Bereich (APS-Daten). Mit Anzünden der Kerzen begann diese kontinuierlich abzusinken und erreichte dabei sogar Werte unterhalb des Niveaus, das vor und zwischen den Messzyklen vorlag. Nach Zuschalten der Klimaanlage ist zunächst ein leichter, sich im weiteren Verlauf verstärkender Anstieg der Partikelanzahl zu verzeichnen. Daher sieht es so aus, als würde der Abbrand der Kerzen zu einer starken Abreicherung größerer Partikel in der Prüfraumlufte führen. Denkbare Prozesse dafür könnten die Anlagerung von Ionen an die Partikel und darauffolgende verstärkte Abscheidung an Oberflächen und auch eine Verdampfung semivolatiler Substanzen durch die allmähliche Temperaturerhöhung sein.

Die Anzahlgrößenverteilung vor und nach Zuschalten der Klimatisierung (jeweils bei Kerzenabbrand) ist in Abbildung 9 gezeigt (Aerodynamische Durchmesser wurden dazu in Mobilitätsdurchmesser mit der Dichte $1,4 \text{ g/cm}^3$ umgerechnet). Die Anzahlkonzentration im Bereich unterhalb ca. 50 nm nimmt ab, wobei der Modalwert bei ca. 15 nm erhalten bleibt, und gleichzeitig erhöht sich die Partikelanzahl für größere Durchmesser. Mit Abkühlung der Raumlufte verstärkten sich augenscheinlich Kondensations- und Agglomerationseffekte und führten zu einer Verlagerung des Spektrums zu größeren Partikeldurchmessern. Dies korrespondiert mit dem bereits beschriebenen Anstieg der Oberflächenkonzentration.

Abbildung 7: Zeitverlauf der Anzahlkonzentration (CPC bzw. FMPS) und Temperatur für den Kerzenabbrand der Kerzensorte A

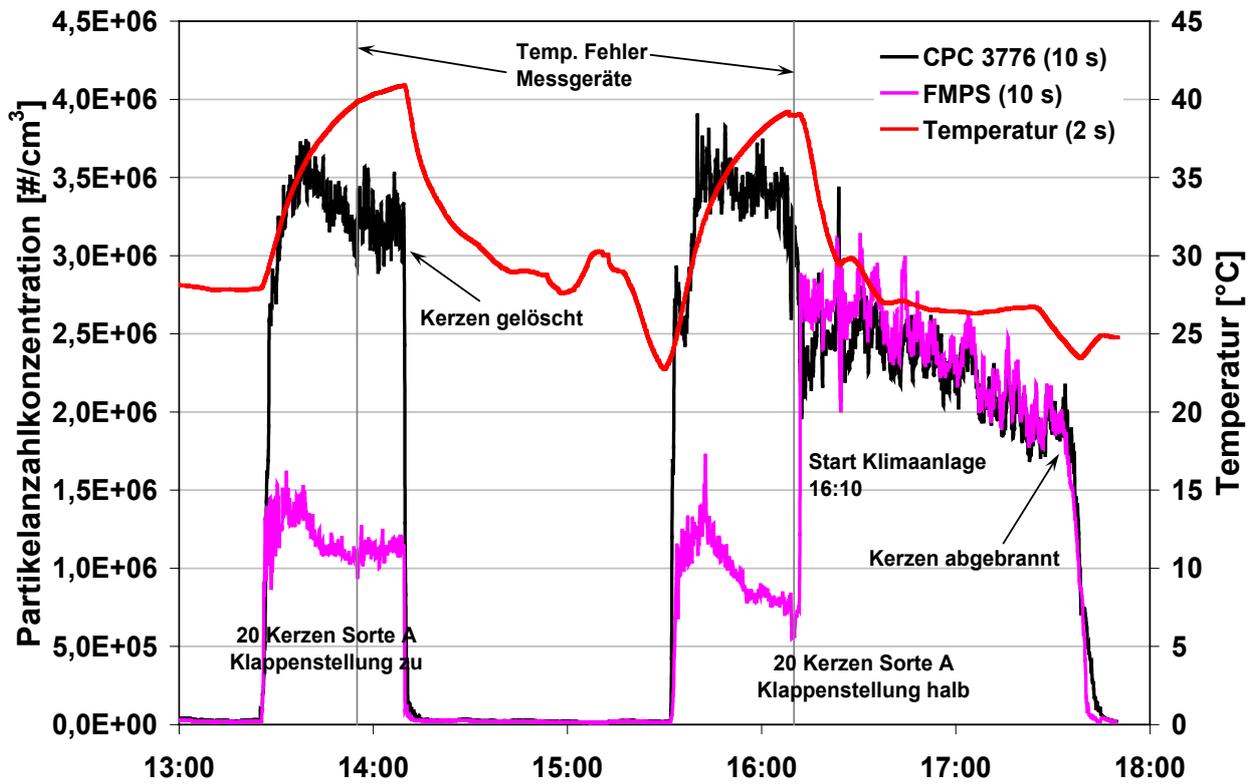


Abbildung 8: Zeitverlauf der Anzahl- (APS, 0,5-20 µm) und Oberflächenkonzentration (NSAM) für den Kerzenabbrand der Kerzensorte A

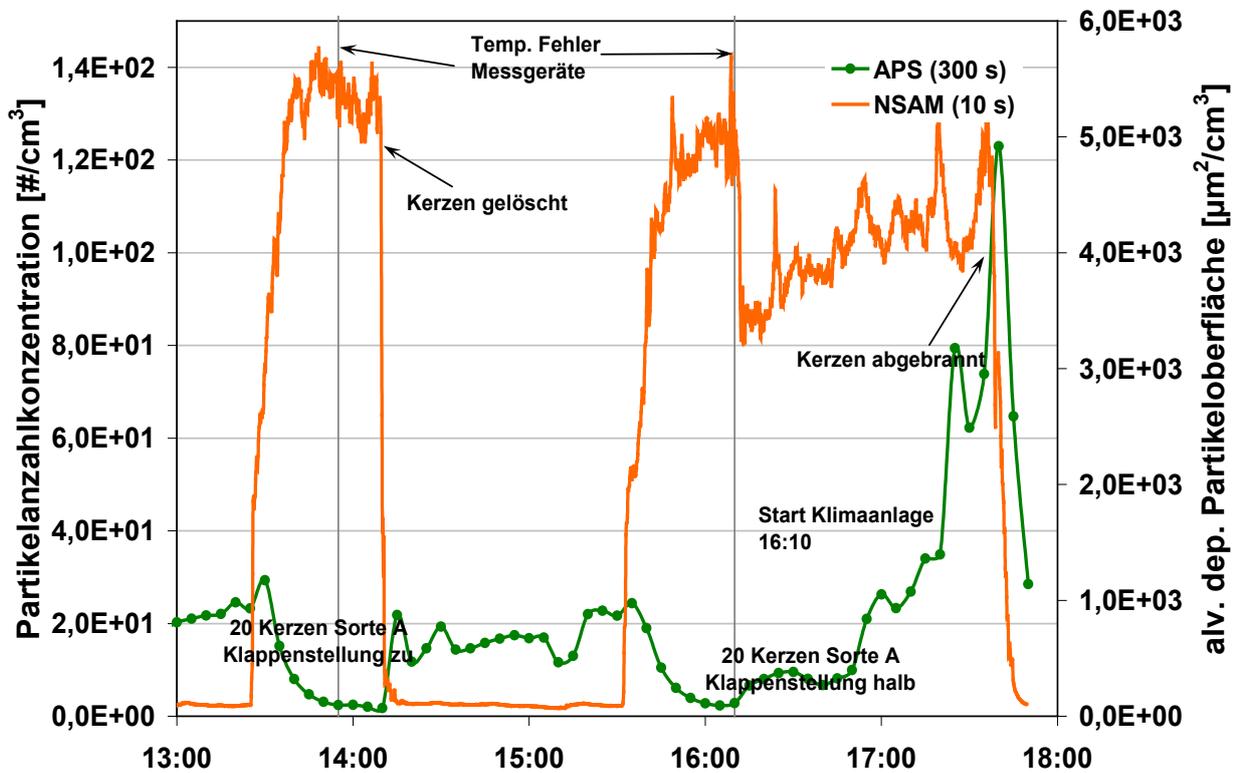
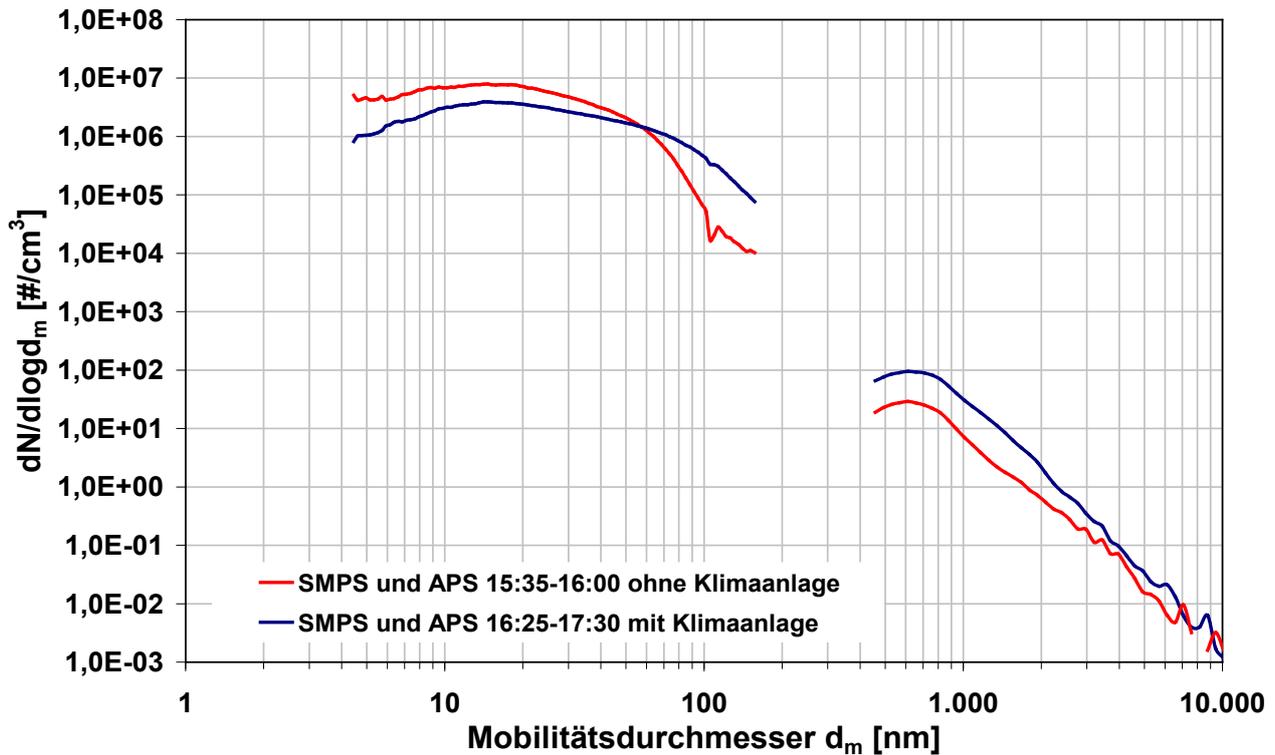


Abbildung 9: Effekt der Klimatisierung auf die Anzahlgrößenverteilung für den Kerzenabbrand der Kerzensorte A



Die mit den unterschiedlichen Spektrometern erhaltenen Größenverteilungen lassen sich mathematisch durch Kombination von mehreren unimodalen Verteilungen zu einer Verteilung zusammenführen. Diese kann dann zur Abschätzung der Partikelmassenkonzentration herangezogen werden, indem zunächst die Anzahlverteilung bei Annahme kugelförmiger Partikel in eine Volumenverteilung umgerechnet wird, aus der dann mittels bekannter oder vermuteter Dichte die Massengrößenverteilung resultiert. Das Integral (Kanalsummen) dieser Massenverteilung über den entsprechenden Partikeldurchmesserbereich liefert schließlich die Gesamtpartikelmassenkonzentration für eine Größenfraktion (z.B. PM1 bzw. PM2.5). In Abbildung 10 bzw. Abbildung 11 sind die zusammengeführten Anzahlverteilungen sowie die Ergebnisse der Massenberechnung mit der Annahme einer Partikeldichte von 1,4 g/cm³ dargestellt. Mit ca. 65 µg/m³ (Sorte B) bzw. ca. 235 µg/m³ (Sorte A) stimmen die so ermittelten Massenkonzentrationen gut mit den gravimetrisch bestimmten Werten überein.

Abbildung 10: Partikelanzahlgrößenverteilung für Kerzenabbrand der Kerzensorte B; ohne Klimatisierung, ohne Belüftung

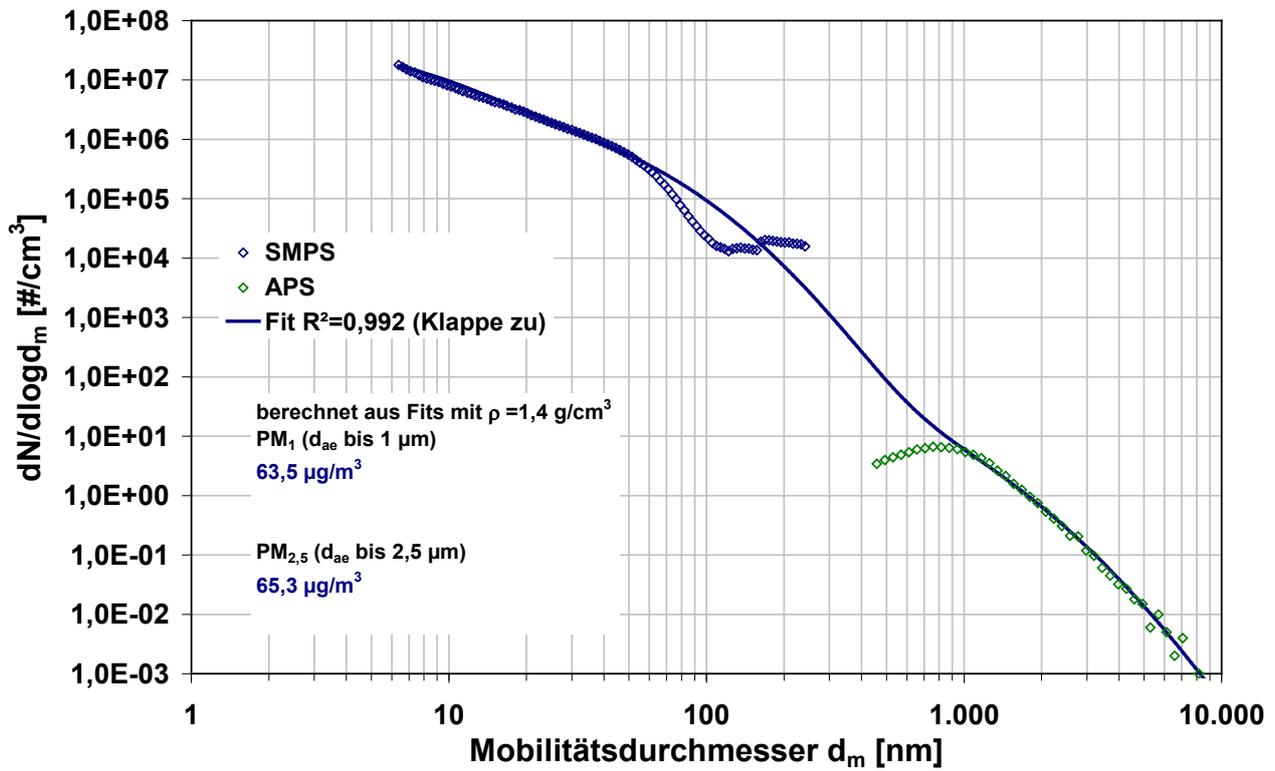
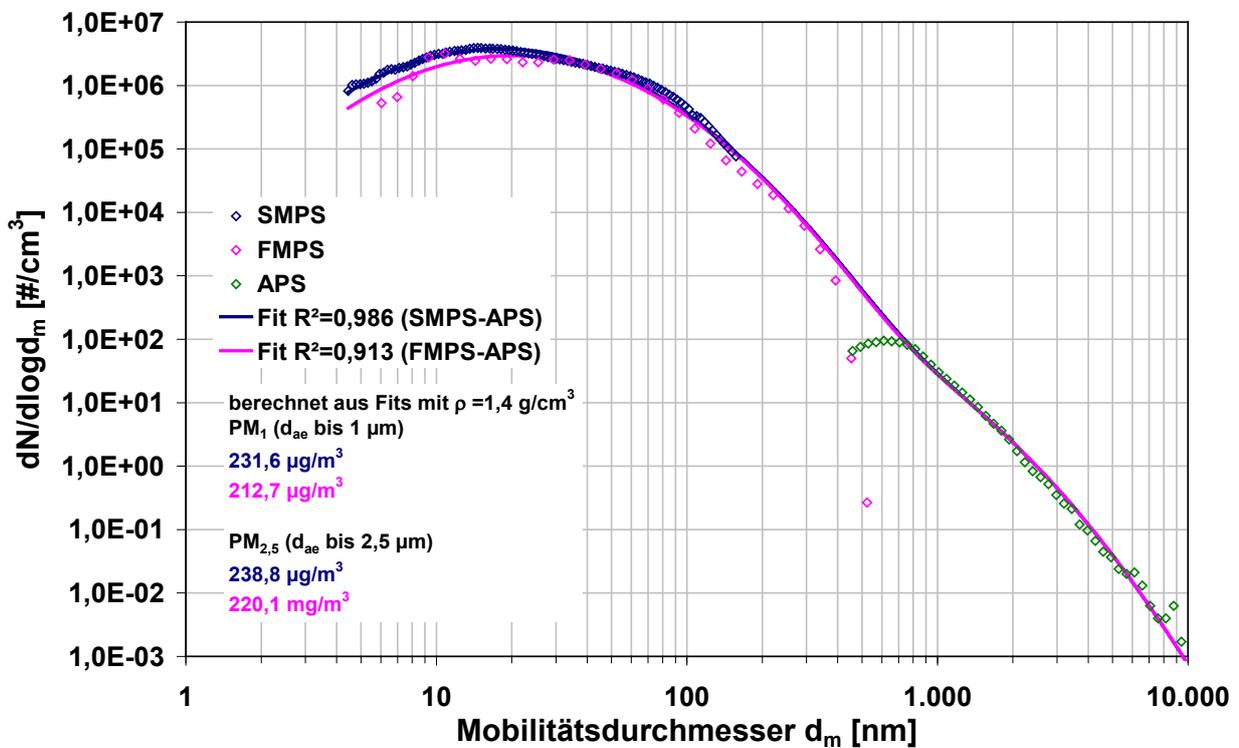


Abbildung 11: Partikelanzahlgrößenverteilung für Kerzenabbrand der Kerzensorte A; mit Klimatisierung



Erweiterte Charakterisierungsmessungen

Auf der Basis der orientierenden Ergebnisse wurden für die weiteren Messungen der Kerzen-Emissionen folgende Untersuchungsbedingungen festgelegt:

Prüfraum

- ▶ Zuluftklappe geöffnet, Abluftklappe geschlossen
- ▶ Ohne Klimaanlage: Kühlung aus, Gebläse auf Stufe 1
- ▶ Mit Klimaanlage: Kühlung auf 21 °C, Gebläse auf Stufe 1

Zyklus

- ▶ 20 Kerzen gleichzeitig abbrennen
- ▶ Kerzenlöschen nach 60 min
- ▶ Nach jedem Zyklus Prüfraum mittels Ventilator (Stufe 3) lüften

Während der Messungen zeigte sich ein teilweise sehr ungleichmäßiger Abbrand der Kerzen, bedingt durch die von der Klimaanlage ausgehenden Turbulenzen. Daher wurden im Durchgang 6 mit Kerzensorte A und für alle Durchgänge mit Sorte B eine Folie vor dem Auslass der Klimaanlage angebracht, die die Luftströmung direkt nach unten lenkte und so die Turbulenz im Raum vermindern sollte. Die Ergebnisse der Messungen sind in Abbildung 12, Abbildung 13, Abbildung 14, Abbildung 15, Abbildung 16, Abbildung 17 dargestellt.

Aus den Daten lassen sich zusammenfassend folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- ▶ Durch den Betrieb der Klimaanlage können die Temperaturen und Feuchten in einem auch für spätere Probandenexperimente akzeptablen Bereich gehalten werden
- ▶ Der Betrieb der Klimaanlage hat keinen signifikant nachweisbaren Einfluss auf die sich einstellende Partikelanzahlkonzentration; der im 6. Durchgang (bei Sorte A) verwendete Windschutz könnte im Fall der Kerzensorte A die gemessene Erhöhung mit verursacht haben. Bei Sorte B sind die Konzentrationen aber mit und ohne Klimaanlage (hier mit Windschutz = offenes Schutzrohr, 15 cm hoch, Ø 8 cm über die Kerzen gestülpt) immer ähnlich hoch, so dass diese Schlussfolgerung nicht sicher ist.
- ▶ Durch die Kerzen werden auch erhöhte CO-Konzentrationen erzeugt, die den Außenluft-Grenzwert von 10 mg/m³ erreichen können.
- ▶ Kerzensorte A führt zu deutlich höheren Anzahl-, Oberflächen- und Massenkonzentrationen als Kerzensorte B. Dies ist konsistent mit den unterschiedlichen Abbrandraten. Die berechnete Partikelmassenkonzentration wird fast ausschließlich durch die submikronen Partikel bestimmt; die mit dem APS messbare Partikelfraktion (> ca. 500 nm) trägt dazu nur marginal bei.
- ▶ Während die Anzahlkonzentrationen relativ schnell auf konstante Werte einschwingen, steigen Oberflächen- und die aus den Partikelanzahlen berechnete Massenkonzentration während des gesamten Brennzyklus kontinuierlich an. Gleichzeitig sind auch Verschiebungen in den Partikelgrößenverteilungen mit Zunahme der Konzentration größerer Partikel zu beobachten. Es kommt offensichtlich zu einem Anwachsen der Partikel durch Koagulation und Kondensation.

Abbildung 12: Zeitverläufe der Messdaten bei Kerzenabbrand: Klimadaten und CO, oben während Kerzensorte A; unten während Kerzensorte B

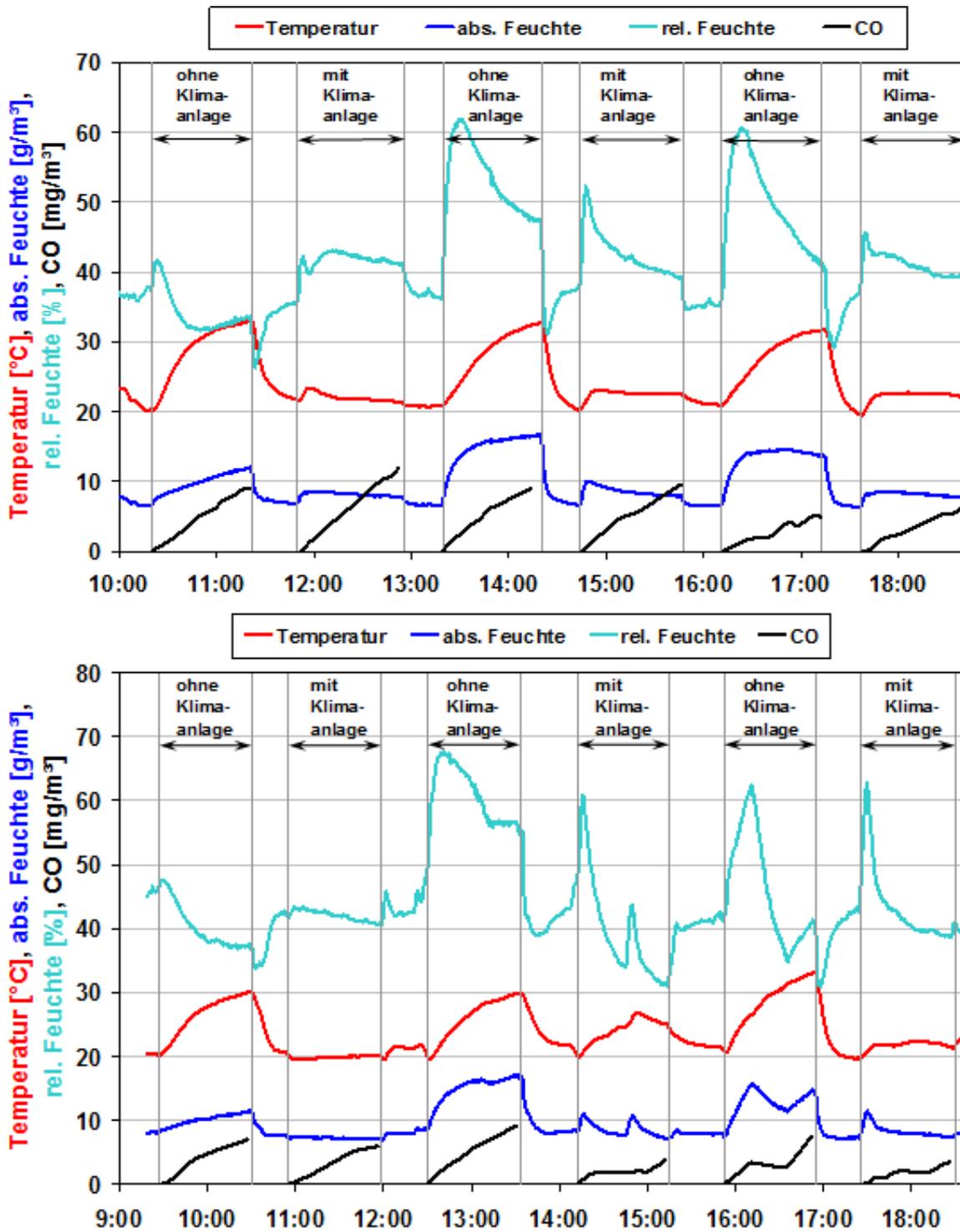


Abbildung 13: Zeitverläufe der Partikelanzahlkonzentrationen bei Kerzenabbrand für die Kerzensorte A, oben; für Kerzensorte B, unten

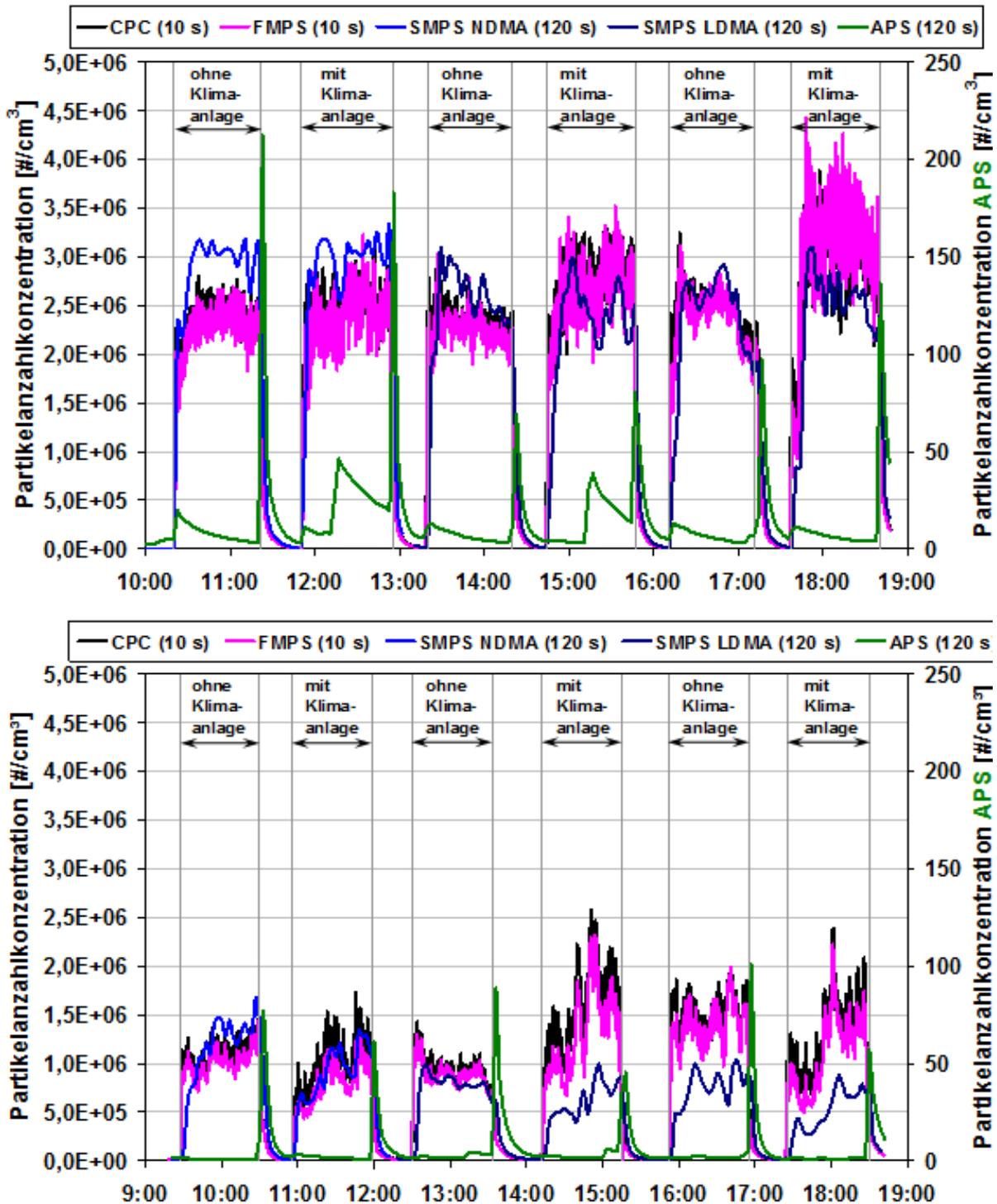


Abbildung 14: Zeitverläufe Partikelanzahl- und Oberflächenkonzentration bei Kerzenabbrand für die Kerzensorte A, oben; für Kerzensorte B, unten

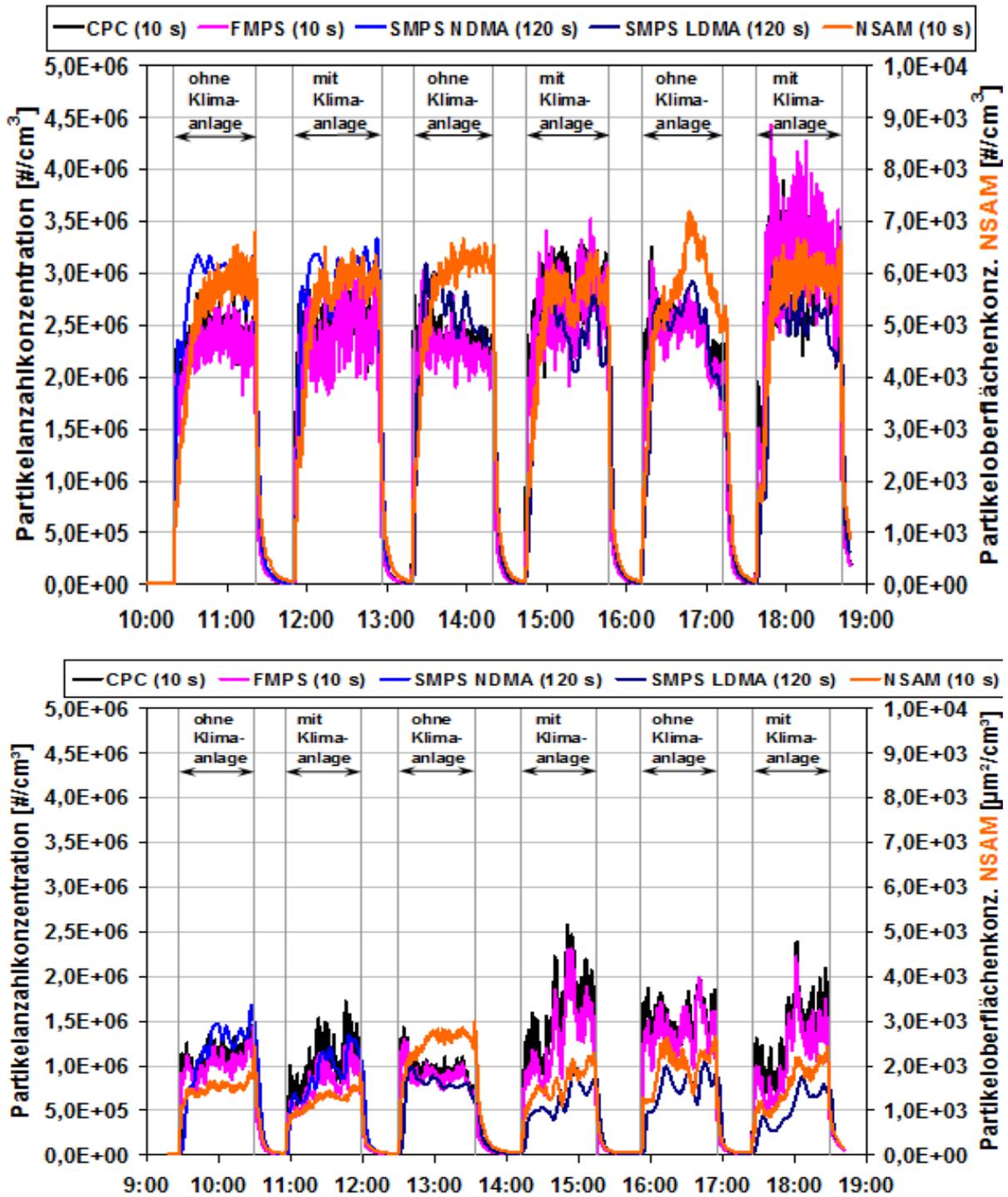


Abbildung 15: Zeitverläufe der Massenkonzentrationen bei Kerzenabbrand Sorte A oben B unten; Dichte = 1,4 g/cm³ berechnet

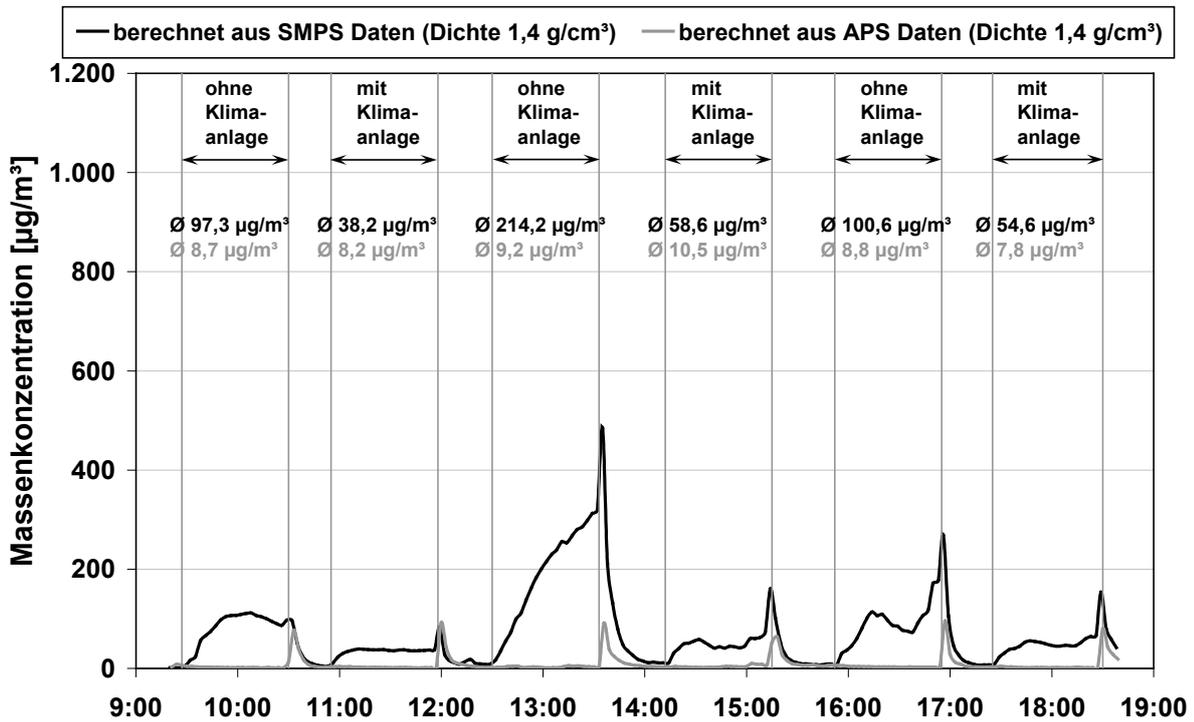
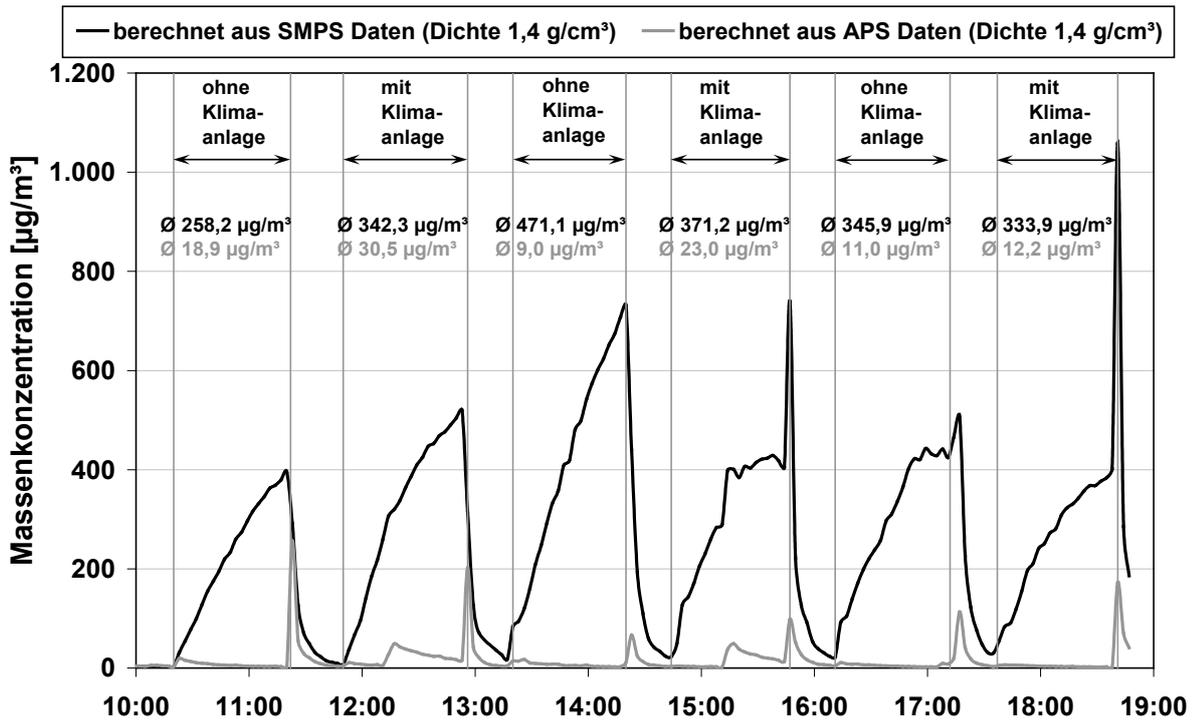


Abbildung 16: Anzahlgrößenverteilungen während der Kerzen-Abbrennphasen (SMPS) für die Kerzenorte A; ohne Klimatisierung

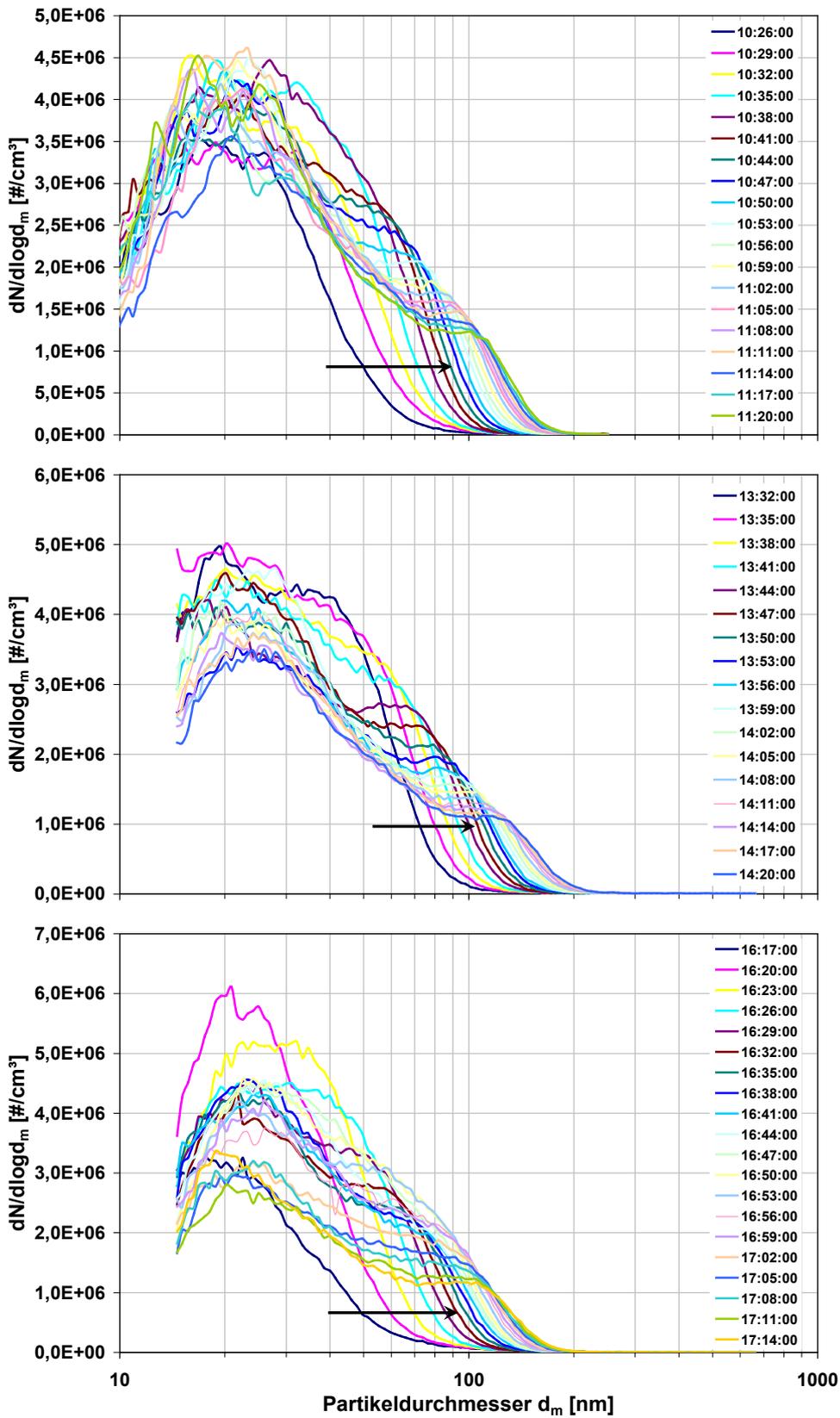
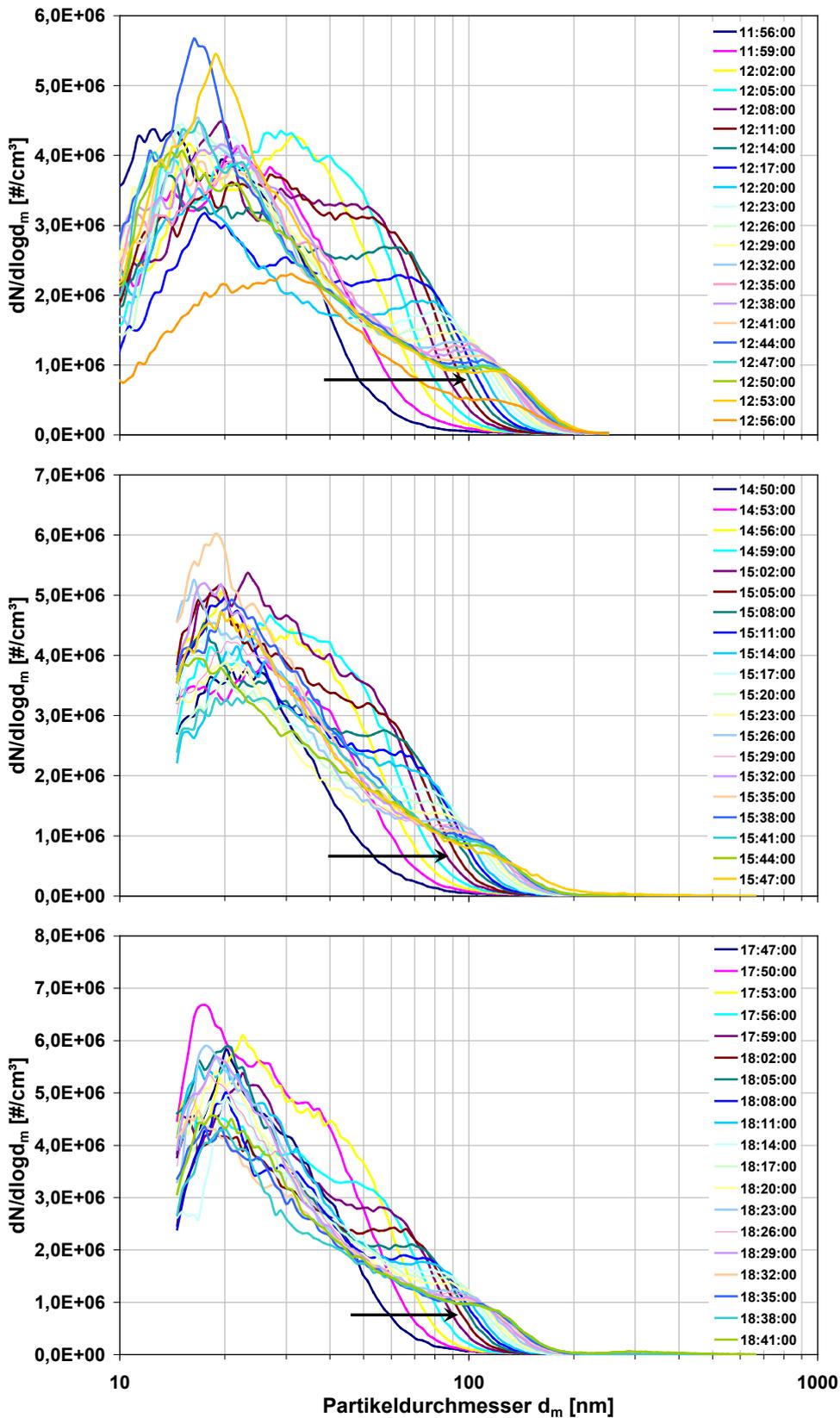


Abbildung 17: Anzahlgrößenverteilungen während der Kerzen-Abbrennphasen (SMPS) für die Kerzenorte A mit Klimatisierung



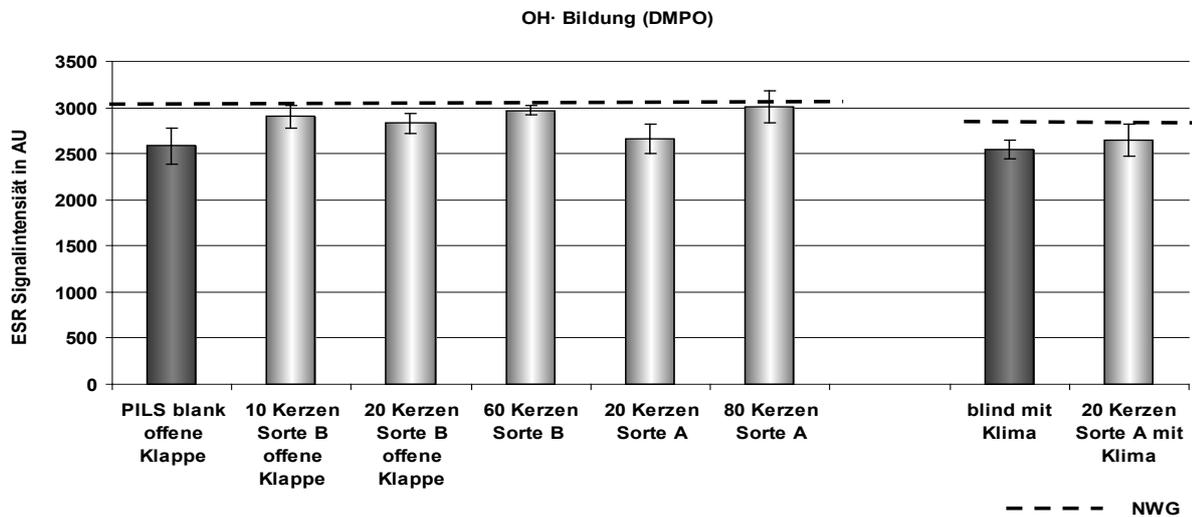
Lungendeponierbare Oberflächenkonzentration

Mit dem Nanoparticle Surface Area Monitor (NSAM, TSI) wurde die alveolar deponierbare Partikeloberflächenkonzentration (LDSA) zeitaufgelöst gemessen. Ein typischer Zeitverlauf ist bereits im vorigen Abschnitt (Abbildung 8) im Zusammenhang mit der Diskussion des Klimaanlage-Effektes dargestellt. Im Vergleich zwischen den Kerzensorten zeigte sich, dass – korrespondierend mit den unterschiedlichen Abbrandraten und daraus resultierenden Anzahlkonzentrationen – auch die LDSA bei Sorte A mit 5.000-6.000 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ deutlich höher ausfiel als bei Kerzensorte B (500-2.000 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$). Ähnliche Werte wurden auch bei den detaillierteren Messungen erhalten.

ROS-Generierungspotential

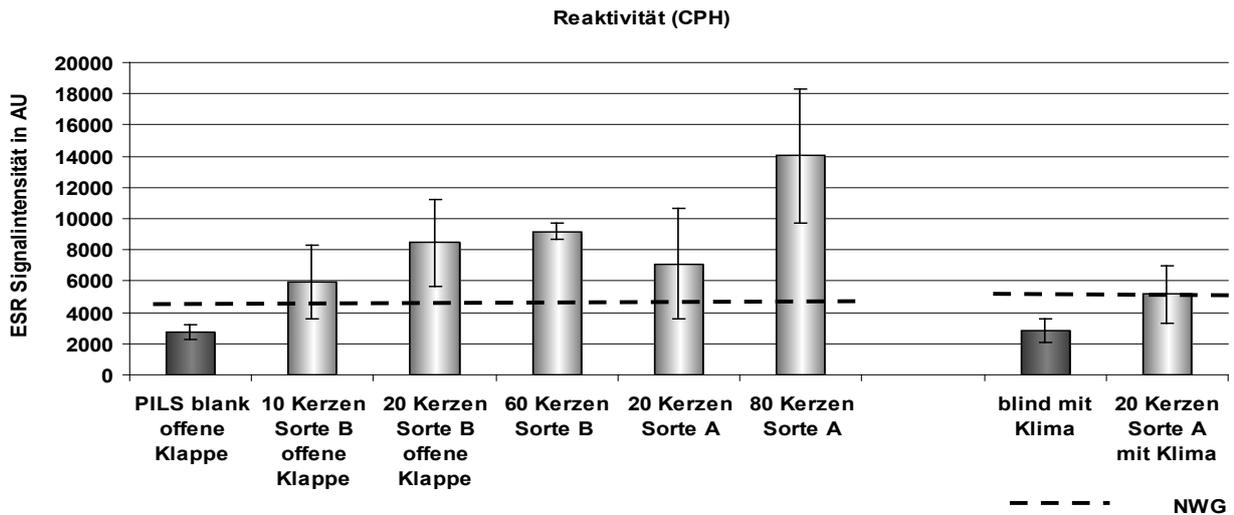
Während der Messungen wurden im Prüfraum bei verschiedenen Lüftungseinstellungen (Lüftungsklappe auf, ohne weitere Bezeichnung = Lüftungsklappe zu und mit und ohne Betrieb der Klimaanlage) die beiden Kerzentypen in unterschiedlicher Stückzahl vollständig abgebrannt. Zugleich erfolgte eine Sammlung und Überführung der Partikel mittels eines Particle Into Liquid Samplers (PILS) direkt in die wässrige Phase (destilliertes H_2O). Im Anschluss wurden die gesammelten Proben auf ihr ROS (engl. ROS - Reactive Oxygen Species) Bildungspotential mittels spin trap (DMPO assay) basierter Elektronen Spin Resonanzspektroskopie hin untersucht. Die Ergebnisse zeigen weder bei Berücksichtigung der Nachweisgrenze (= Mittelwert der Blindwerte + 3 x STABW) noch im direkten Vergleich zu der einfachen mittleren Blindprobe (n = 3) signifikant unterschiedliche (erhöhte) OH \cdot -Bildungsintensitäten (Abbildung 18).

Abbildung 18: OH-Radikal Generierungspotential der Kerzenabbrand-Partikelsuspensionen bei unterschiedlichen Versuchsbedingungen; Fehlerbalken = SD, n = 3; NWG = Nachweisgrenze



Die Erfassung der Oberflächenreaktivität (CPH assay) hingegen zeigt teilweise Unterschiede in Abhängigkeit der Kerzenanzahl sowie der Belüftungseinstellungen (Abbildung 19). Für den Versuchslauf mit 60 Kerzen Sorte B und 80 Kerzen Sorte A (Lüftungsklappe geschlossen) sind unter Berücksichtigung der Nachweisgrenze und der Standardabweichung signifikant erhöhte Probenreaktivitäten gegenüber der Blindprobe festzustellen ($p < 0,05$; t-Test). Ebenfalls deuten die übrigen Versuchsläufe (ausgenommen mit Klimaanlage) erhöhte Reaktivitäten an, erweisen sich allerdings aufgrund Ihrer hohen Standardabweichung nicht als signifikant ($p < 0,05$; t-Test) unterschiedlich gegenüber der Blindprobe.

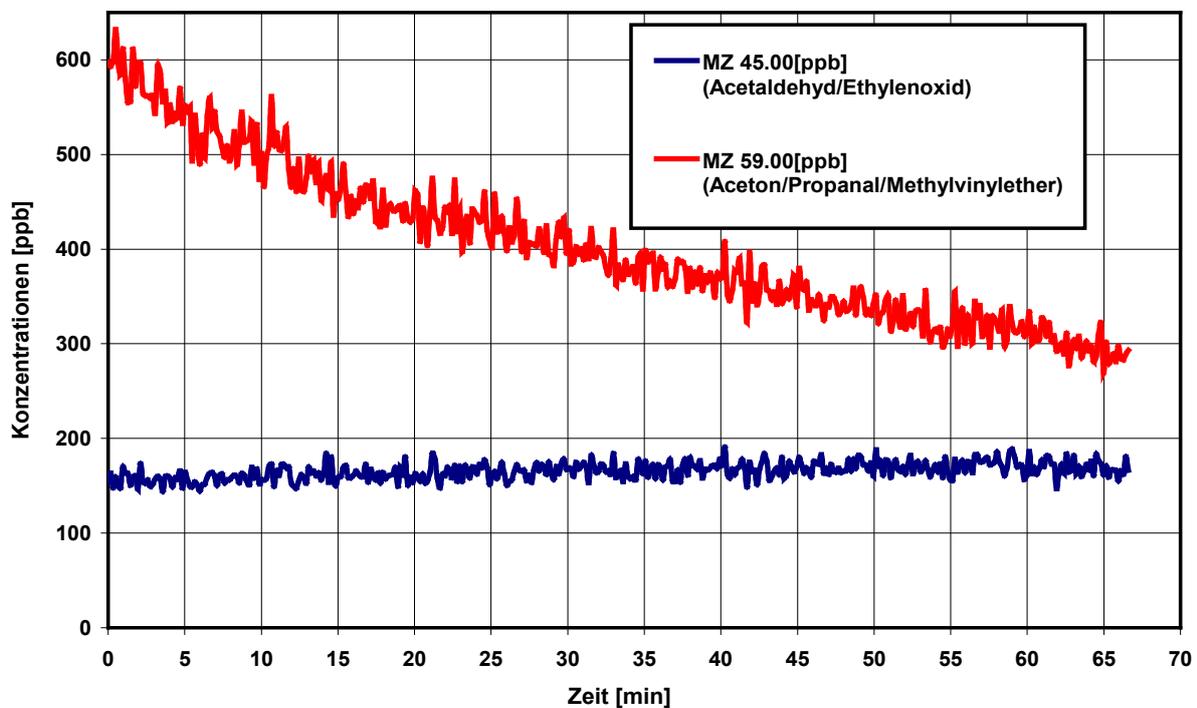
Abbildung 19: Intrinsische Oberflächenreaktivität der Kerzenabbrand-Partikelsuspensionen bei unterschiedlichen Versuchsbedingungen; Fehlerbalken = SD, n = 3; NWG = Nachweisgrenze

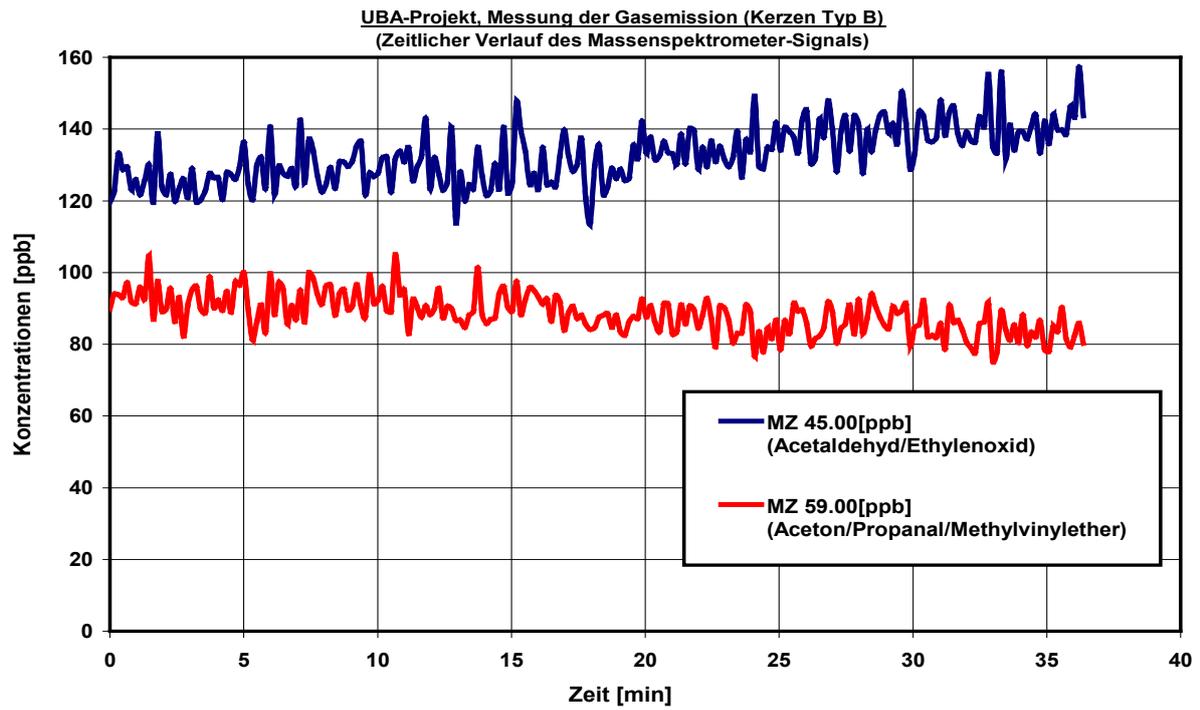


Gasförmige organische Komponenten

Mit dem online Protonen-Transfer-Massenspektrometer (PTR-MS) wurde bei Abbrand beider Kerzensorten zunächst ein Scan über alle verfügbaren Massenzahlen (MZ) durchgeführt, um diejenigen MZ-Werte zu ermitteln, die durch die Kerzenemission gegenüber dem Hintergrund (Hallenluft) erhöht werden. Dies traf für die Massenzahlen 45 und 59 zu, denen jeweils die Stoffe Acetaldehyd/Ethylenoxid bzw. Aceton /Propanal/-Methylvinylether zugeschrieben werden können. Die ausgewählten Massenzahlen wurden anschließend für einen längeren Zeitraum beim Kerzenabbrand verfolgt. Die zeitlichen Verläufe der Messungen sind in Abbildung 20 oben für Kerzensorte A und unten für Kerzensorte B gezeigt. Beide Kerzen emittieren Stoffe die den ausgewählten Massenzahlen entsprechen, wobei die Emissionen der Sorte B geringer sind als die der Sorte A. Weiterhin ist die relative Emissionsstärke für die beiden Massenzahlen jeweils umgekehrt, Sorte A führt zu höheren Konzentrationen für MZ 59, Sorte B erzielt höhere Werte (auf geringerem Niveau als Sorte A) für MZ 45 (Abbildung 20). Insgesamt liegen die erreichten Konzentrationen im sub-ppm Bereich. In beiden Fällen ist ein zeitlicher Trend zu erkennen, der im Verlauf der Messung zu einer Verringerung der Konzentrationen für MZ 59 und zu einer Erhöhung für MZ 45 führt.

Abbildung 20: Zeitreihen der PTR_MS Messungen bei Kerzenabbrand; oben Kerzensorte A, unten Kerzensorte B

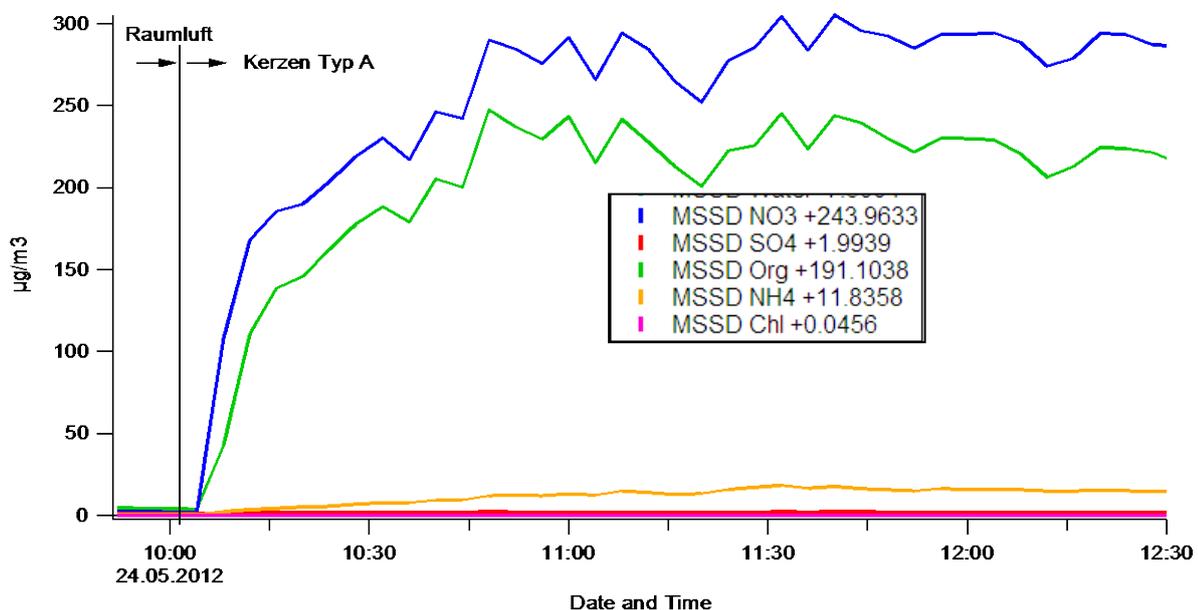




Partikelgebundene chemische Inhaltsstoffe

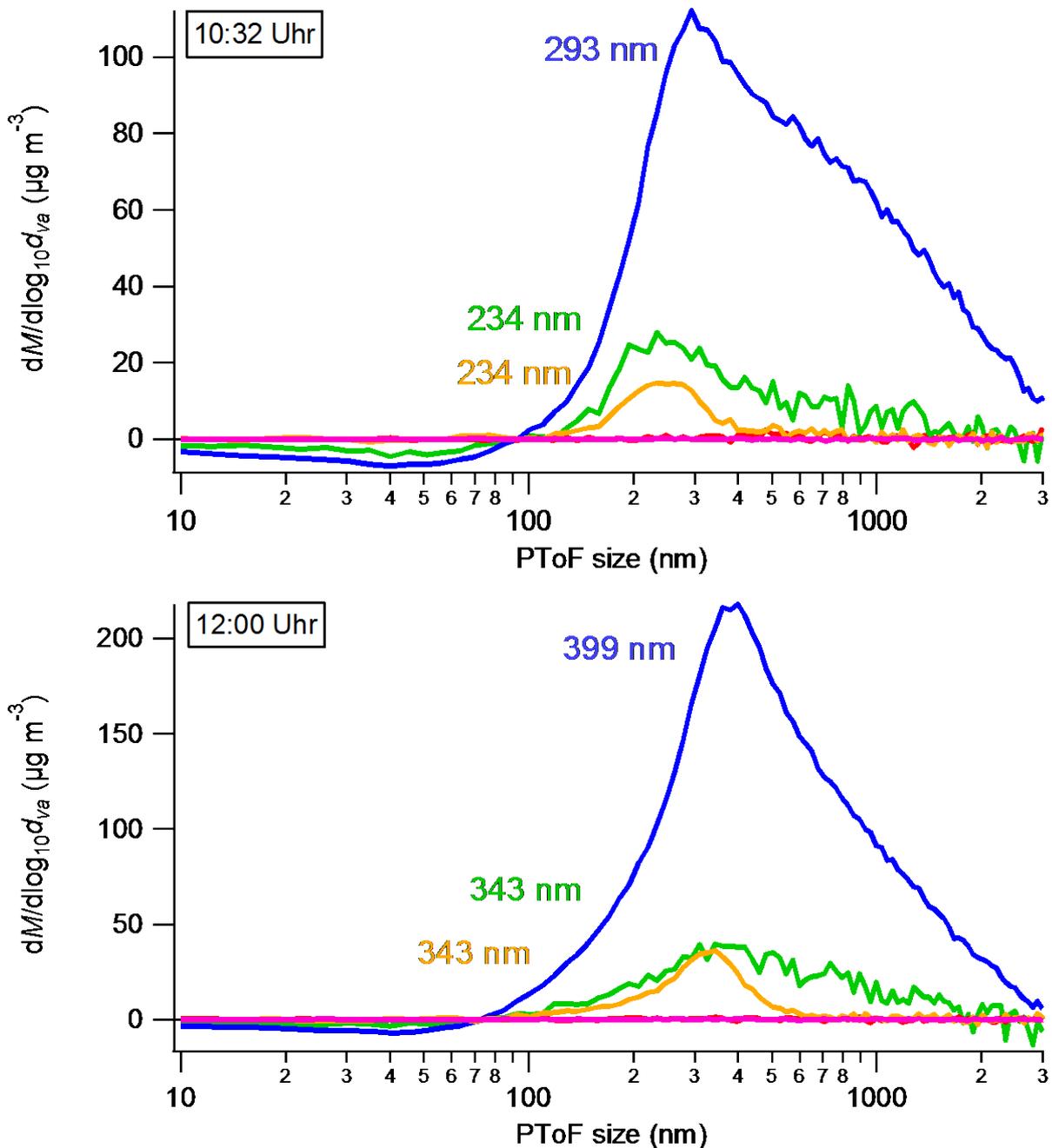
Mit dem Aerosolmassenspektrometer (AMS) wurden Messungen durchgeführt, um Aufschlüsse über partikelgebundene chemische Inhaltsstoffe zu erhalten. Dabei werden submikrone Partikel im Bereich zwischen ca. 60 nm und ca. 600 nm (aerodynamischer Durchmesser) erfasst. Die Messungen erfolgten nicht zeitgleich mit den physikalischen Charakterisierungen, sondern an einem separaten Messtag mit über mehrere Stunden durchlaufendem Kerzenabbrand, ansonsten aber unter gleichen Randbedingungen. Prinzipiell unterscheidet das MS die fünf Stoffe/Stoffgruppen Organische Kohlenwasserstoffe (Org), Sulfat (SO₄), Nitrat (NO₃), Ammonium (NH₄) und Chlorid (Chl) (Ladungssymbole wurden weggelassen). Die Messungen mit Kerzentyp A (Abbildung 21) zeigte sich ein steiler Anstieg sowohl der Org- als auch der Nitrat-Konzentrationen. Ebenfalls merkbar erhöht sind die Ammonium-Konzentrationen. Die Werte im Kasten in der Zeitreihengrafik geben die mittlere Konzentration der jeweiligen Spezies über den Messzeitraum in µg/m³ an.

Abbildung 21: Zeitverlauf der vom AMS ausgegebenen Werte bei Kerzenabbrand für die fünf Hauptstoffgruppen (Kerzensorte A)



Die Analyse erfolgt im AMS weiterhin getrennt nach Partikeldurchmessern. Dadurch wurde erkennbar, dass sich neben dem Konzentrationsanstieg auch eine Peakverschiebung zu größeren Partikeldurchmessern ergab (Abbildung 22), was konsistent mit den vom SMPS gelieferten Daten ist.

Abbildung 22: Partikelgrößenverteilung der Stoffgruppen bei Kerzenabbrand zu Beginn der Messung (oben) und nach ca. 1,5 h (unten) (Kerzensorte A)



Elementarer und organischer Kohlenstoff (Filterproben)

Die auf Quarzfilter gezogenen Partikelproben wurden mittels des Sunset-Analysators auf ihren Gehalt an elementarem und organischem Kohlenstoff (EC/OC) analysiert. Es wurde überwiegend organischer Kohlenstoff gefunden, die Anteile an elementarem Kohlenstoff lagen zwischen ca. 3 % und knapp 9 % des Gesamtkohlenstoffgehaltes (Abbildung 23). Eine systematische Beziehung zur gesammelten Partikelfraktion (PM1 bzw. PM2.5) konnte nicht festgestellt werden. Wie Abbildung 24 zeigt, erklären die Kohlenstoff-Anteile jedoch nur einen relativ geringen Anteil der insgesamt auf den Filtern abgeschiedenen Partikelmasse. Hier ist wiederum ein deutlicher Unterschied zwischen Kerzensorte A und B zu erkennen. Der Kohlenstoff-Anteil beträgt bei Sorte A im Mittel nur ca. 15 %, bei Sorte B ca. 31 % der jeweiligen PM-Masse. Die AMS-Ergebnisse geben einen Hinweis darauf, woraus der Nicht-Kohlenstoffanteil der gesammelten Kerzenpartikel bestehen könnte, nämlich Nitrat und Ammonium. Es ist bekannt, dass Kerzendochte mit flammhemmenden

Salzen imprägniert werden, um eine zu starke Dochtverbrennung zu vermeiden. Dazu zählen, neben Natrium- und Kaliumsalzen, insbesondere auch Ammoniumsalze. Es erscheint daher plausibel anzunehmen, dass bei der Verbrennung ein großer Teil des Ammoniums zu Nitrat aufoxidiert wird.

Abbildung 23: EC-OC Konzentrationen und EC/TC-Verhältnisse (Filterproben) für Kerzenabbrand

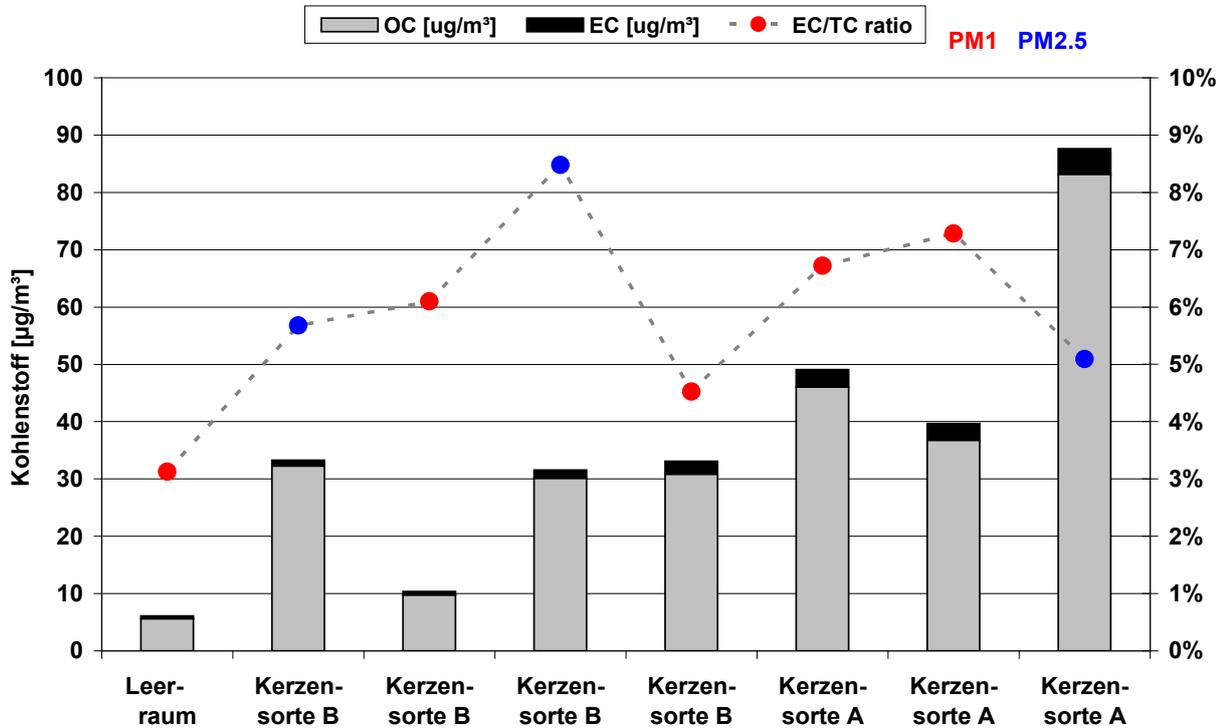
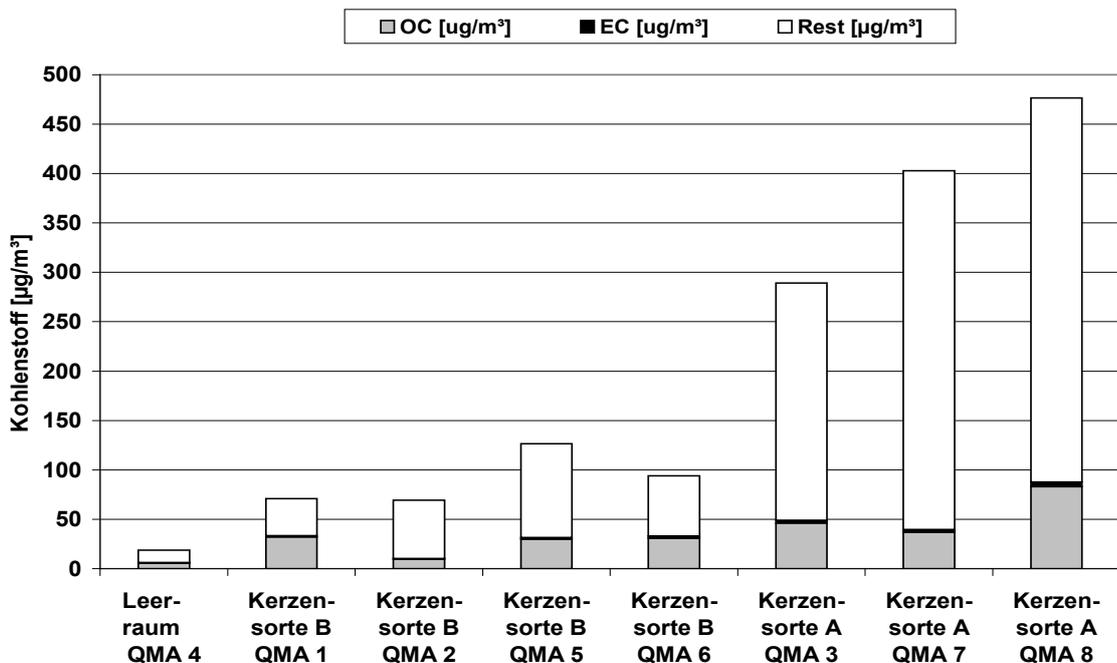


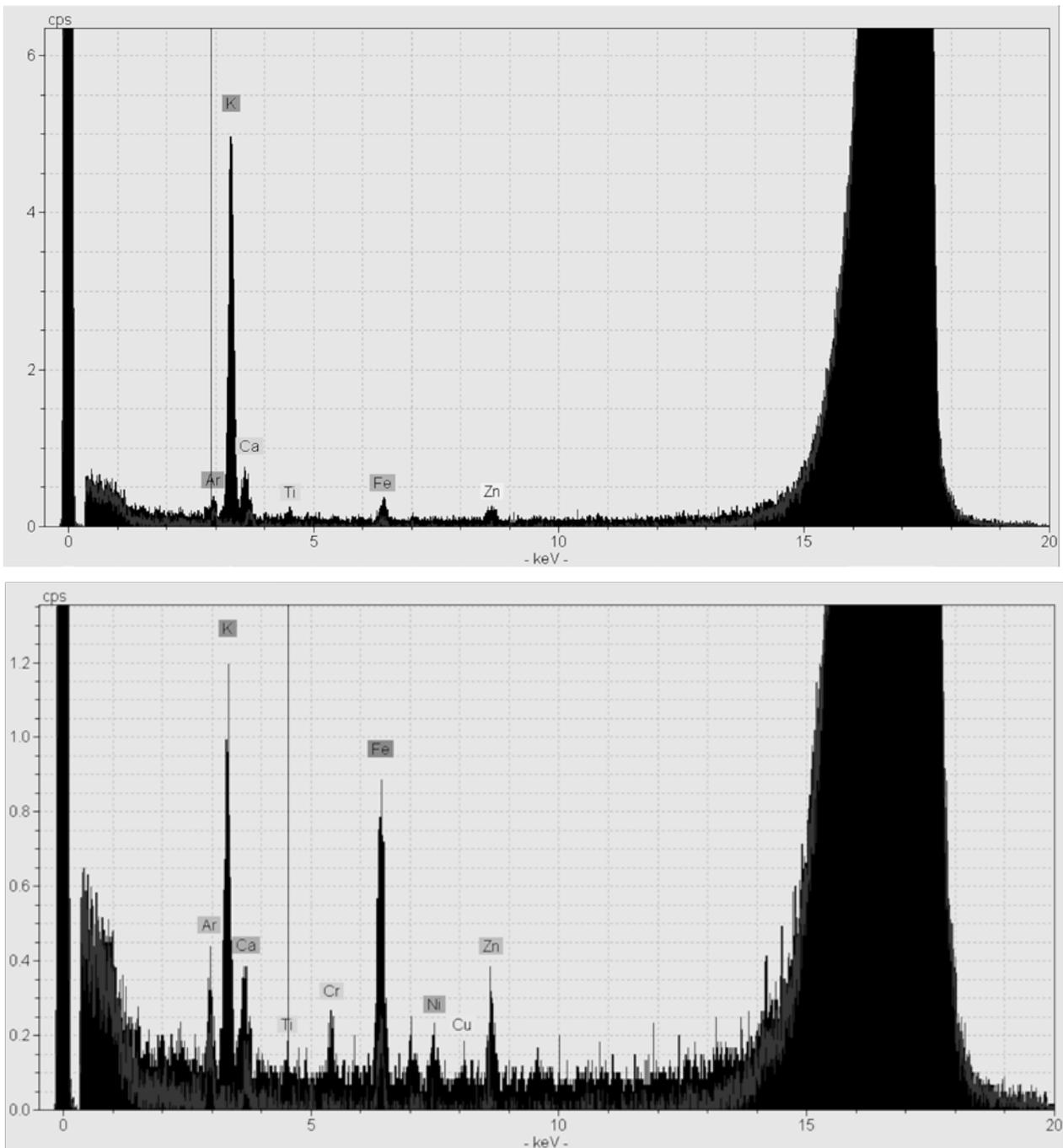
Abbildung 24: Vergleich der EC-OC Konzentrationen mit der PM-Gesamtkonzentration für Kerzenabbrand



Elemente in Partikeln (NAS-Proben/TXRF)

Mit dem NAS wurden REM- bzw. TXRF-Proben-träger durch elektrostatische Abscheidung mit Partikeln belegt. Die Probenahmezeiten betragen dabei jeweils 30 min. für REM- und TXRF-Proben-träger bei einer Ansaugrate von 2,5l/min. Wie in den TXRF Spektren deutlich wird (Abbildung 25) ist in beiden Kerzensorten deutlich Kalium erhalten. Weitere messbare Elemente sind Calcium, Eisen, Zink, Titan, sowie bei Kerzensorte B Spuren von Chrom und Nickel. Analog den PM-Massenkonzentrationen liefert auch hier die Probe für Kerzensorte A höhere Kalium-Werte als Kerzensorte B (ca. Faktor 5). Auch dies ist vermutlich mit Emissionen aus dem Dochtmaterial zu erklären. Für die übrigen Elemente kommt in erster Linie die der Kammer aus der Halle zugeführte Luft als Quelle in Frage.

Abbildung 25: TXRF-Spektren von emittierten Kerzenabbrand-Partikeln (oben: Kerzensorte A; unten Kerzensorte B)



Partikelmorphologie (NAS-Proben/REM)

Trotz der während der Messung online erfassten hohen Partikelanzahlkonzentration zeigten sich die REM-Probenträger im Mikroskop nicht als besonders dicht belegt. Es ist anzunehmen, dass unter dem abgeschiedenen Material ein Großteil (z. B. die mit dem AMS nachgewiesenen Anteile an Kohlenwasserstoffen und Ammoniumnitrat) im Hochvakuum verdampft und nur Partikel mit geringen Dampfdrücken zurückbleiben. Die REM Aufnahmen zeigen eine große Vielfalt an Formen und Größen im mikronen und sub-mikronen Bereich, darunter auch langkettige Partikel, die aus nanoskaligen Primärpartikeln bestanden (Abbildung 26 und Abbildung 27).

Abbildung 26: Kerzenabbrand - REM-Aufnahmen eines langkettigen Partikels mit nanoskaligen Primärpartikeln (vermutlich Ruß) in zwei Vergrößerungsstufen

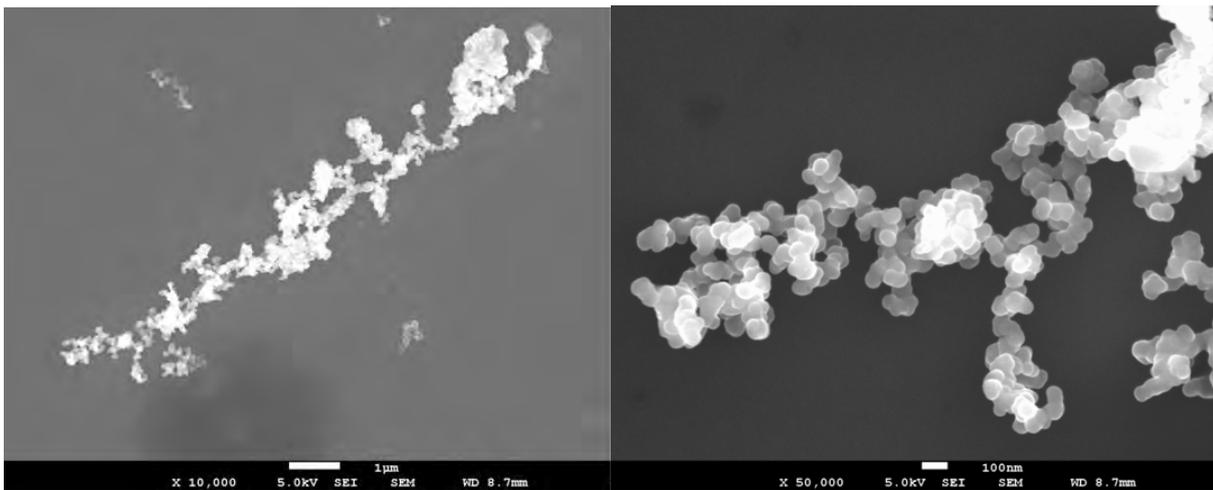
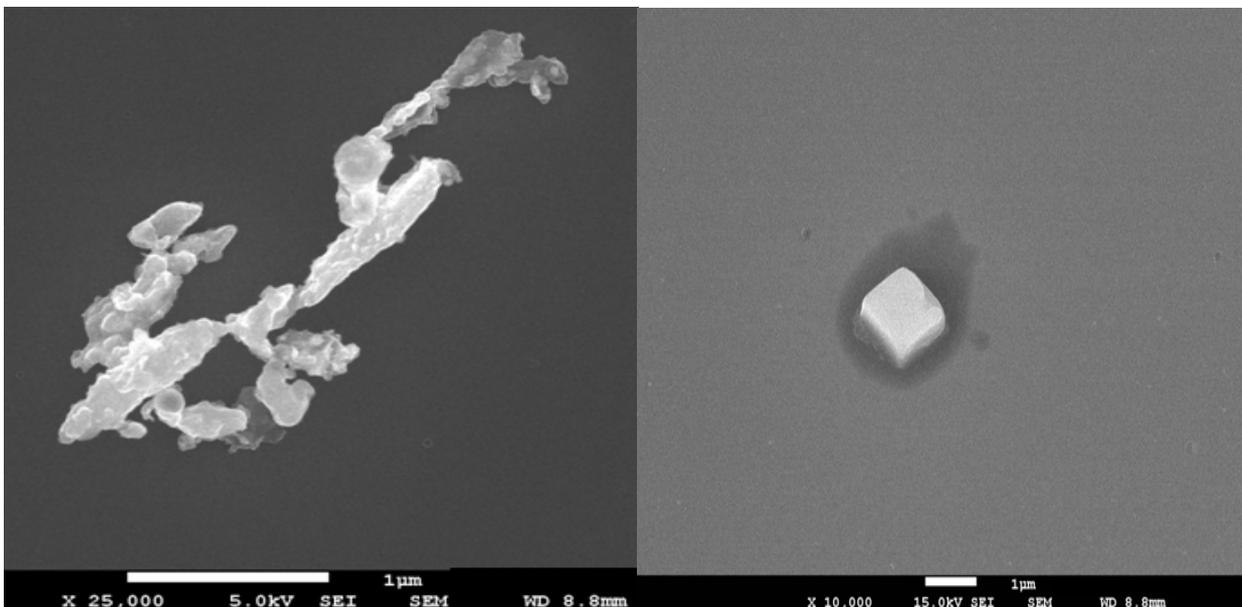


Abbildung 27: Kerzenabbrand - REM-Aufnahmen von aggregierten unregelmäßigen Partikeln (links, vermutlich Wachs) bzw. eines Mineralpartikels (rechts, vermutlich Natriumchlorid)



3.2.2.3 Zusammenfassung Kerzen

Die Messungen zur Charakterisierung von Partikeln aus Kerzenabbrand zeigen, dass

- ▶ sich die zwei untersuchten Baumkerzensorten in ihrer jeweiligen Abbrandrate deutlich unterscheiden.
- ▶ unterschiedlich hohe Partikel-Massenkonzentrationen im Prüfraum erreicht werden, die mit ca. $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Sorte B) bzw. $270 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Sorte A) für PM_{2.5} als signifikant erhöht im Vergleich zu mittleren urbanen Außenluftkonzentrationen (ca. $15\text{-}20 \mu\text{g}/\text{m}^3$) eingestuft werden können.
- ▶ diese Emissionen (bezogen auf die Partikelmasse) überwiegend durch Partikel mit submikronen Durchmessern erfolgen.
- ▶ die Partikelanzahlkonzentrationen im Bereich von mehreren Millionen Partikeln pro cm^3 liegen und von ultrafeinen Partikeln dominiert werden (typische urbane Außenluftkonzentration ca. $15.000 \text{ P}/\text{cm}^3$).
- ▶ die lungendeponierbare Partikeloberfläche zwischen ca. 1.000 und $6.000 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ beträgt und damit ca. 20 bis 100-fach über dem mittleren urbanen Außenluftwert liegt.
- ▶ kein signifikantes OH-Radikalbildungspotential, aber z. T. eine messbare Oberflächenreaktivität der Kerzenpartikel existiert.
- ▶ zwei gasförmige Stoffe mit den Massenzahlen 59 und 45 (vermutlich Acetaldehyd und Aceton) in detektierbaren Mengen freigesetzt werden, die Konzentrationen dabei aber unterhalb von 1 ppm verbleiben (MAK-Werte 50 bzw. 500 ppm).
- ▶ partikelgebundene Inhaltsstoffe von organischen Verbindungen und Nitrat dominiert sind, wobei letzteres aus oxidierten Ammoniumsalzen der Dochtimprägnierung stammen dürfte;
- ▶ analog ebenfalls in Filterproben überwiegend organischer Kohlenstoff und nur einige Prozent elementarer Kohlenstoff (= Ruß) gefunden wurde.
- ▶ mit der TXRF nachweisbare Mengen an Kalium gefunden wurde, das ebenfalls vermutlich aus dem Dochtmaterial (pflanzliche Fasern) stammt.
- ▶ mit dem REM unterschiedlichste Partikelgrößen und -formen, insgesamt aber weniger Partikel als angesichts der hohen Anzahlkonzentration erwartet, auf dem Träger gefunden wurden.

3.2.2.4 Fazit

Für das Szenario Kerzenabbrand ist von Seiten der Exposition ein deutlicher Unterschied zum urbanen Hintergrund und zwischen den einzelnen Kerzensorten während der Messungen ermittelt worden. Hinsichtlich der weiteren Probandenuntersuchungen ist entsprechend eine Induzierung möglicher gesundheitlicher Effekte anzunehmen, so dass der Kerzenabbrand als eine der für die Probandenexposition verwendete Quelle ausgewählt wurde.

3.2.3 Toasten

3.2.3.1 Geräte, Materialien, Vorgehensweise

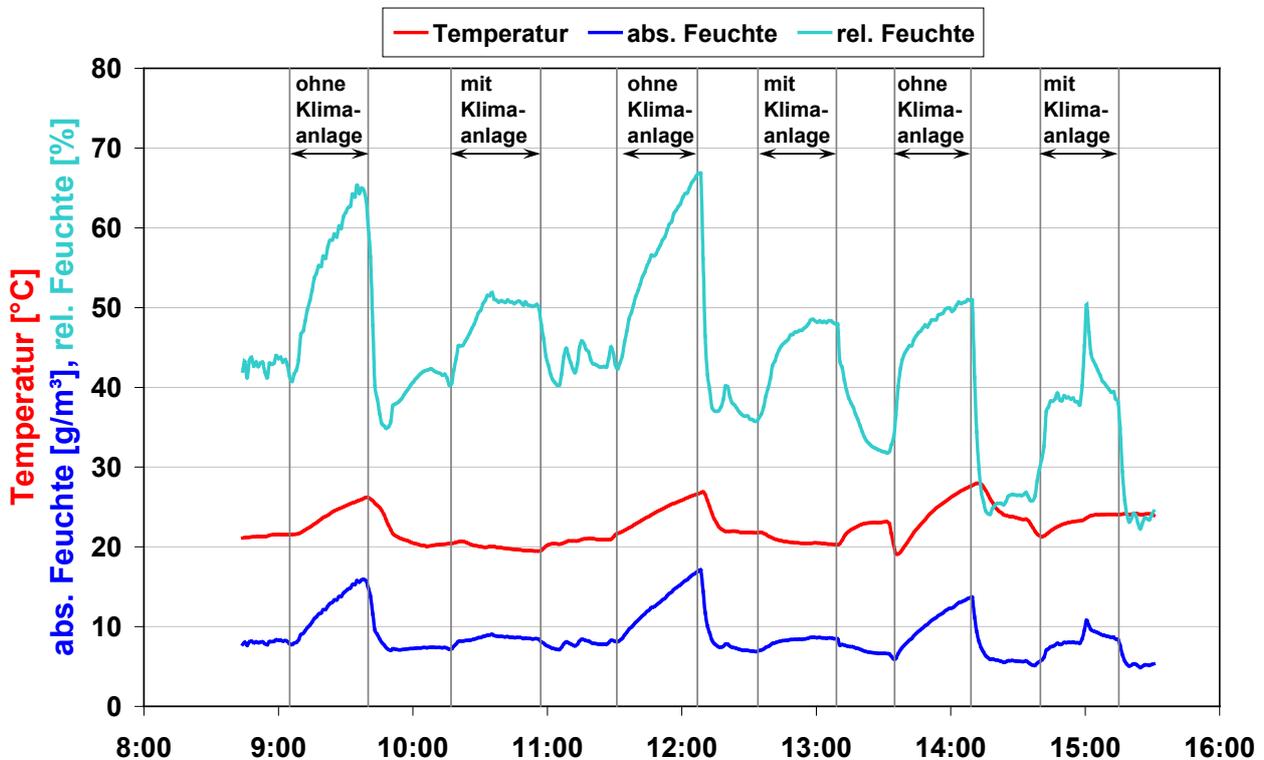
Für die Charakterisierung des Toastprozesses wurden drei „Standardtoaster“ gleichen Typs eines Markenherstellers beschafft (Kapazität für jeweils 2 Toastscheiben) (Abbildung 28). Als „Prüfobjekt“ wurde handelsüblicher Butters toast von einem lokalen Discounter verwendet. Dieser Butters toast hat folgende deklarierte Inhaltsstoffe: Weizenmehl, Wasser, Butterreinfett 3 %, Natursauerteig (Weizenmehl, Wasser), Hefe, Salz, Traubenzucker, Säureregulator: Natriumdiacetat.

Abbildung 28: Aufbau der Toastgeräte im Prüfraum



Die Toaster wurden zunächst „eingefahren“, um mögliche Emissionen aus Produktionsrückständen zu vermeiden. Während der anschließenden Messungen wurden die Toaster jeweils nacheinander betrieben, so dass für 30 min. eine kontinuierliche Emission gegeben war (insgesamt je fünf Durchgänge je Toaster = 30 Scheiben). Danach wurde der Prüfraum belüftet, bis die Partikelanzahlkonzentration wieder auf Hintergrundniveau abgesunken war. Anschließend wurde der Messzyklus wiederholt (insgesamt sechs Durchgänge). Die Zyklen wurden abwechselnd mit und ohne Klimatisierung (Solltemperatur 21 °C, Ventilator auf Stufe 1) durchgeführt. Abbildung 29 zeigt die Temperatur- und Feuchtedaten im Prüfraum während der sechs Messzyklen. Eine CO-Emission wurde erwartungsgemäß nicht festgestellt.

Abbildung 29: Klimabedingungen im Prüfraum während des Toastens

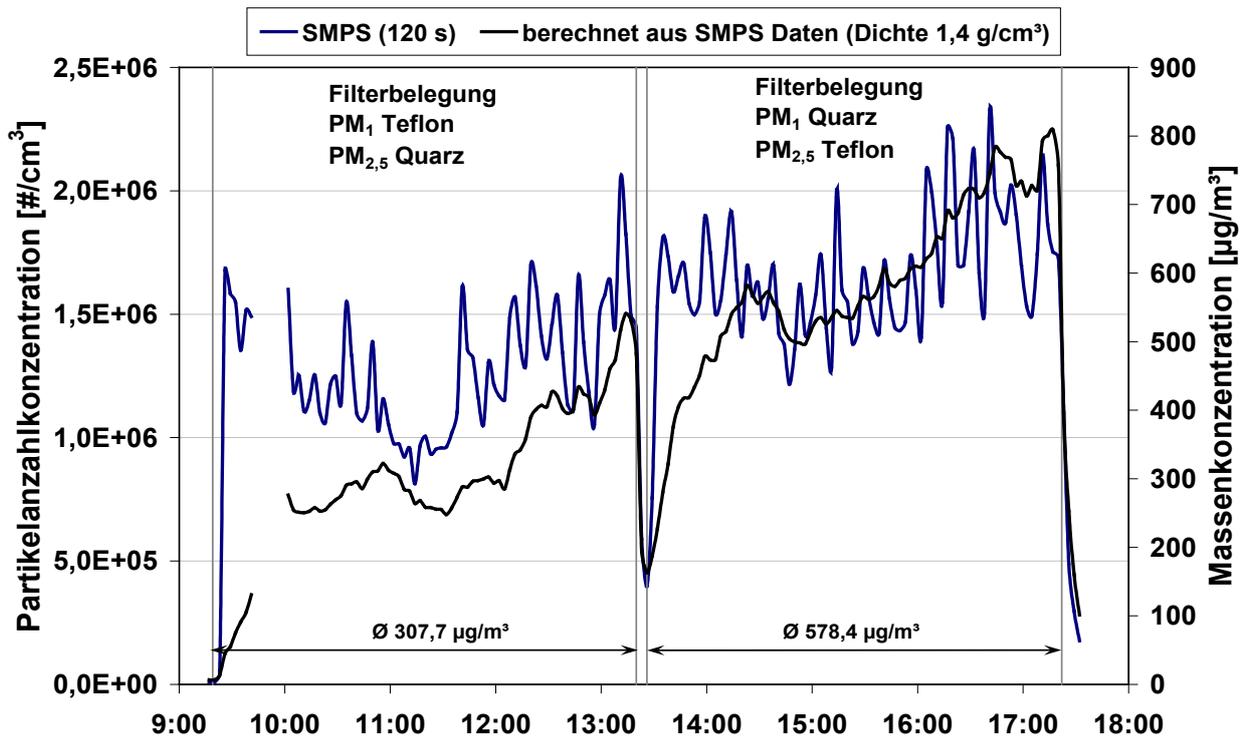


3.2.3.2 Messergebnisse

Massenkonzentrationen (gravimetrisch)

Zur Ermittlung der erzielbaren Massenkonzentrationen und Gewinnung von Filterproben für die verschiedenen weitergehenden Analysen wurde abweichend von den zuvor beschriebenen Messbedingungen kontinuierlich ohne längere Zwischenlüftung dauerhaft getoastet. Eine kurze Unterbrechung erfolgte lediglich anlässlich des Filterwechsels (Abbildung 30). Aus den SMPS-Spektren, die begleitend zur Filterprobenahme aufgenommen worden waren, wurde wiederum unter der Annahme sphärischer Partikel der Dichte 1,4 g/cm³ die durchschnittliche in etwa PM1-äquivalente Massenkonzentration während der Filterbelegungsphasen ermittelt.

Abbildung 30: Zeitverlauf der Partikelanzahlkonzentration während der Filterprobenahme- Toasten



Die gravimetrisch bestimmten Massenkonzentrationen sind in Tabelle 7 aufgeführt. Im Vergleich zu den aus den SMPS-Messungen berechneten Massenkonzentrationen ergeben sich Verhältnisse (SMPS/gravimetrisch) von 1,40 bzw. 1,33. Es ist somit davon auszugehen, dass die emittierten Partikel eine Dichte nahe 1 aufweisen. Die maximal im Prüfraum erzielten Konzentrationen errechnen sich damit zu ca. 500 g/m³. Etwa 90 % der Partikelmasse ist dabei dem submikronen Größenbereich zuzuordnen.

Tabelle 7: Gravimetrisch ermittelte Massenkonzentrationen für das Toasten

N	Filter	PM1 (µg/m ³)	PM2.5 (µg/m ³)	PM1 / PM2.5
200	PTFE	219,7		0,87
	Quarz		252,2	
	PTFE		481,5	0,90
	Quarz	433,8		

Anzahlkonzentration und –größenverteilung

Die Messdaten zur Anzahlgrößenverteilung sind in (Abbildung 31) wiedergegeben. Die Messzyklen wiesen eine befriedigende Reproduzierbarkeit auf. Die Ursache für die geringeren Konzentrationen im 2. Zyklus war

ein elektrischer Leistungsabfall, der durch Wechsel des Stromkreises behoben wurde. Ein signifikanter Einfluss der Klimatisierung auf die Anzahlkonzentrationen oder die mittlere Größenverteilung (Abbildung 32) war nicht gegeben.

Abbildung 31: Partikelanzahlkonzentrationen während der sechs Toast-Messzyklen

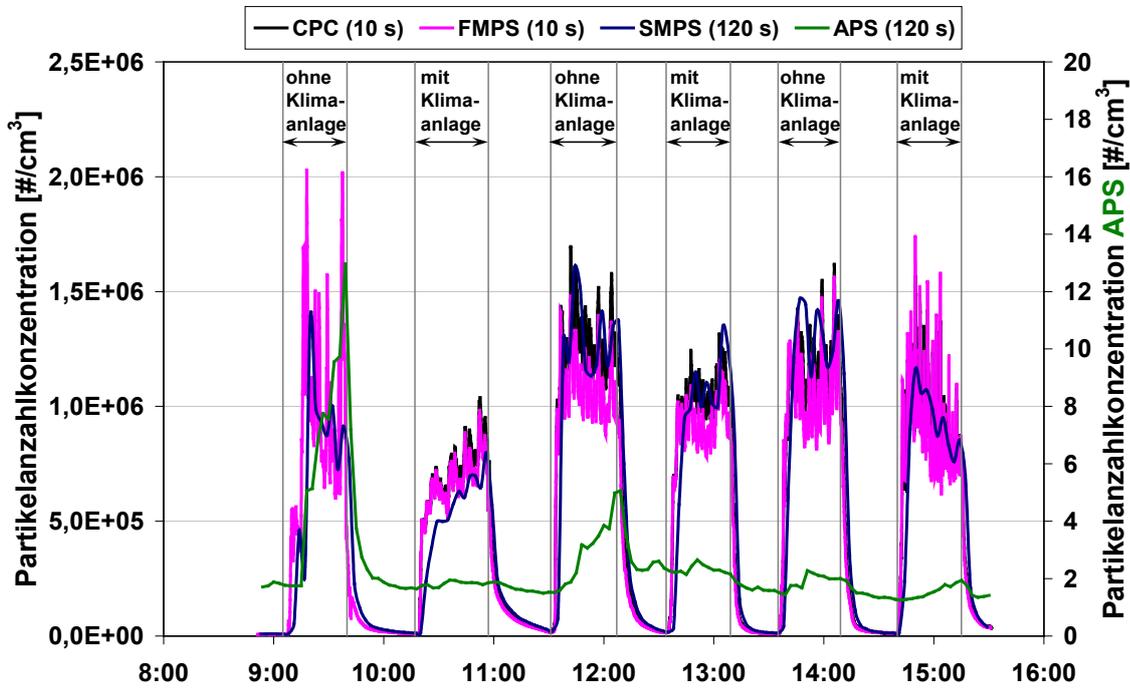
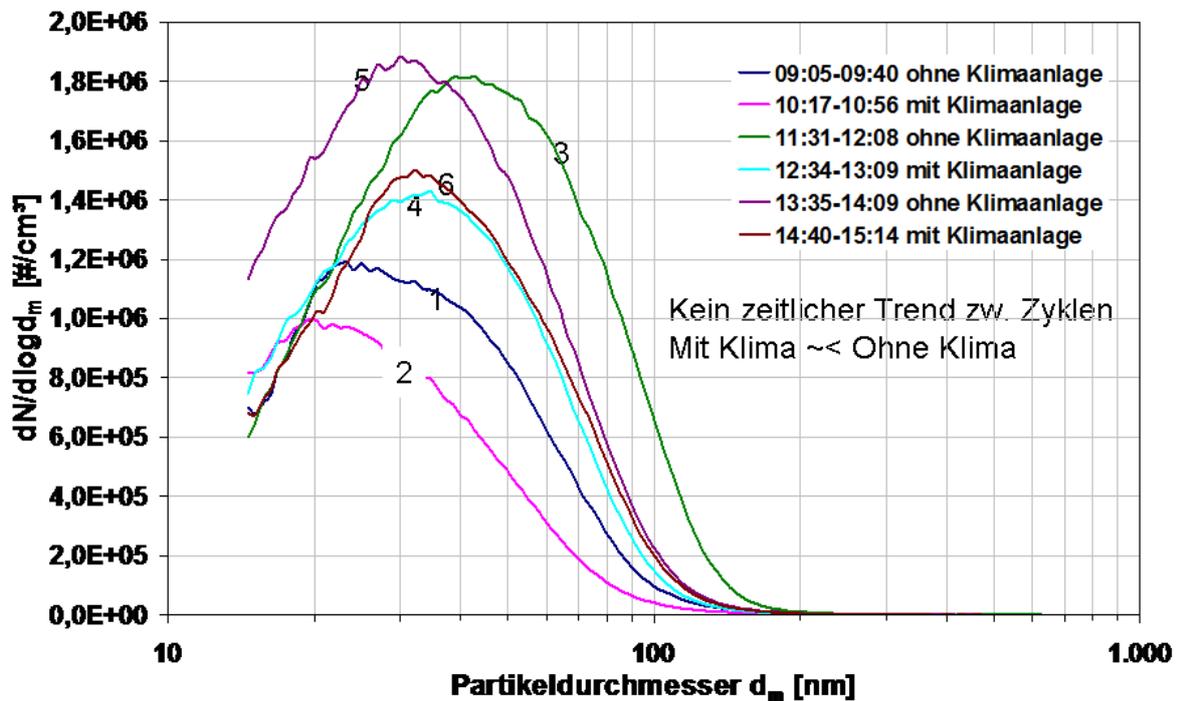


Abbildung 32: Mittlere Partikelgrößenverteilungen der sechs Toast-Messzyklen



Lungendeponierbare Oberflächenkonzentration

Die lungendeponierbare Partikeloberfläche stieg während aller Messzyklen kontinuierlich an (Abbildung 33). Dies korrespondiert mit einer in den SMPS-Spektren beobachtbaren Verschiebung zu größeren Durch-

messern innerhalb des Messzyklus, wie exemplarisch für den vierten Zyklus in (Abbildung 34) gezeigt ist. Durch die zunehmende Konzentration im Raum ist zugleich eine zunehmende Agglomeration der Partikel und somit Größen- und Oberflächenzunahme anzunehmen. Die jeweils erreichten Durchschnittskonzentrationen lagen zwischen ca. 800 und 2300 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ und damit mindestens einen Faktor 10 höher als an einer typischen urbanen Hintergrundstation.

Abbildung 33: Partikelanzahl und lungendeponierbare Oberfläche während des Toastens

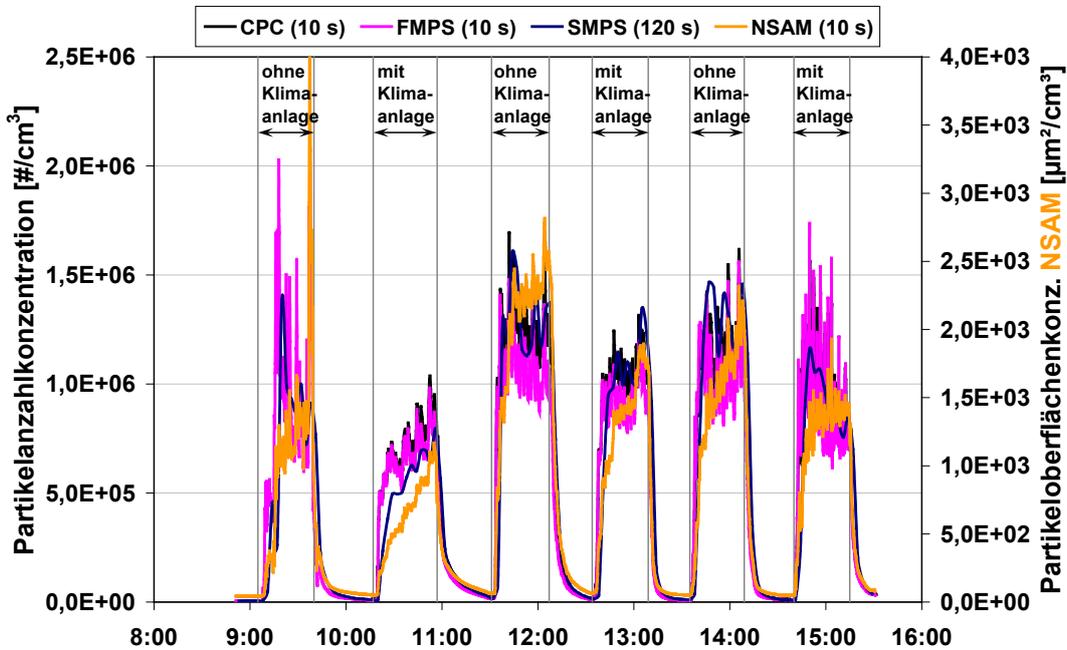
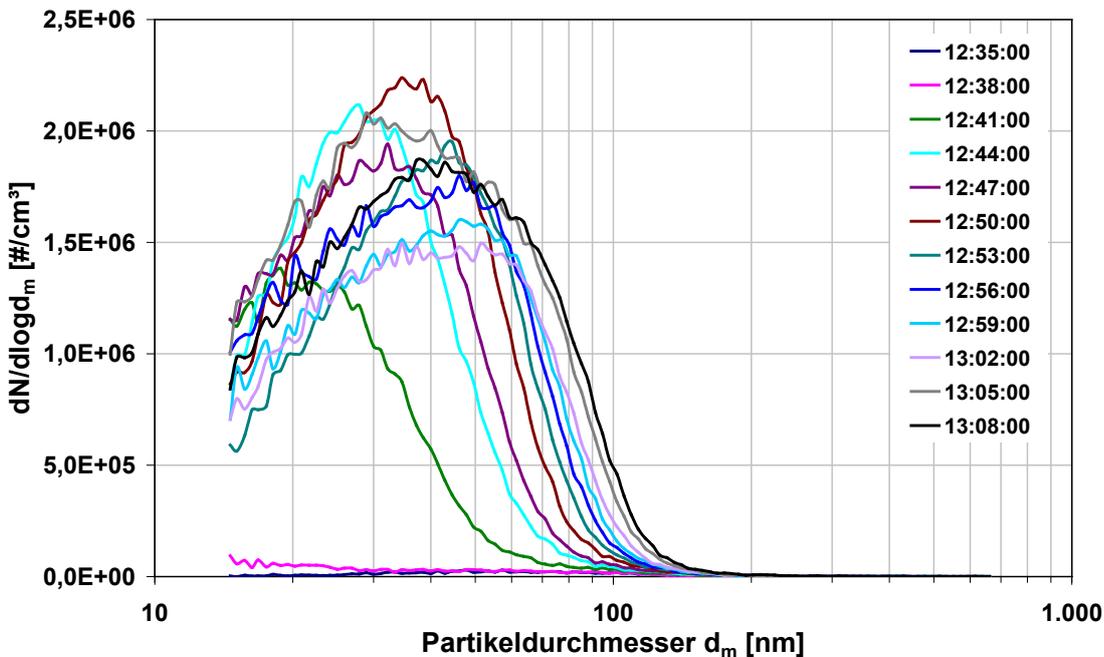


Abbildung 34: Partikelgrößenverteilungen (SMPS) während des vierten Toast-Messzyklus



ROS-Generierungspotential

Parallel zu den Filterbelegungen wurde über einen Zeitraum von 2 h mit dem PILS-System eine Partikelsuspension gesammelt und auf ihr ROS-Bildungspotential hin untersucht (DMPO und CPH assay). Zum

Vergleich wurden analog gewonnene Raumluftproben (Prüfraumlufte ohne Toastaktivität) herangezogen. In Abbildung 35 ist das OH-Bildungspotential (DMPO assay) dargestellt. Die Probe welche während dem Toasten gesammelt wurde, zeigt gegenüber dem Blindwert leicht erhöhte Werte und liegt geringfügig über der aus der dreifachen Blindwert-Standardabweichung errechneten Methoden-Nachweisgrenze (2587 AU). Die Messungen zur Oberflächenreaktivität mittels CPH assay ergaben keine signifikanten Unterschiede zwischen der Raumluft und dem Toasten (Abbildung 36).

Abbildung 35: OH-Radikalbildungspotential der Toastpartikelsuspensionen, Fehlerbalken = SD, n = 3

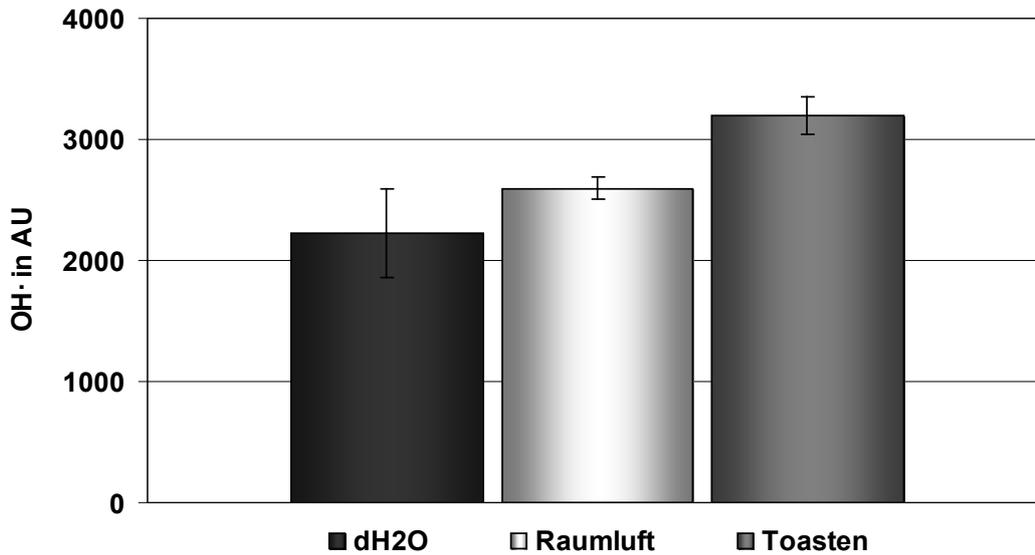
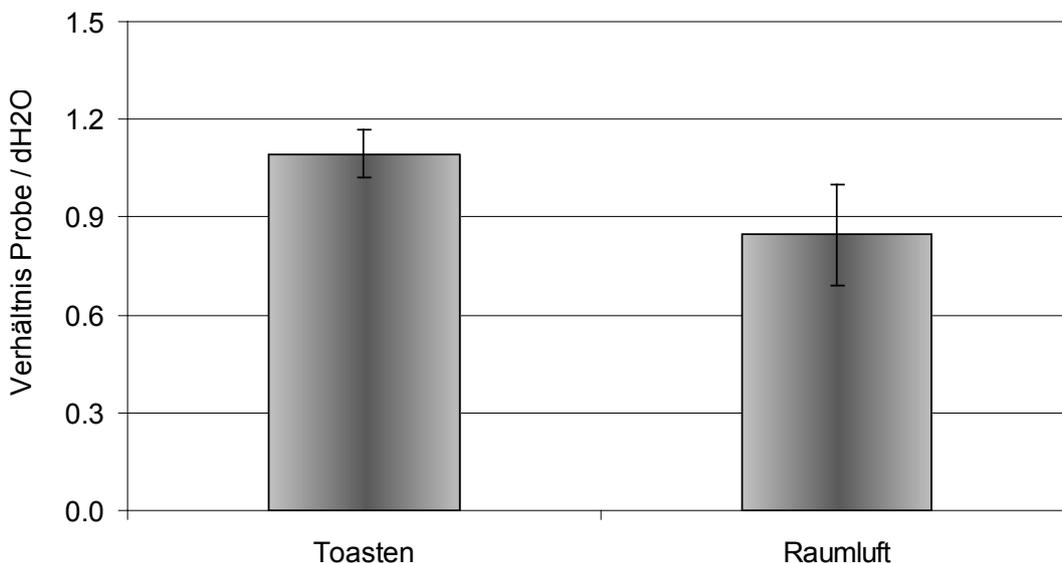


Abbildung 36: Verhältnis der Oberflächenreaktivität der Toastpartikelsuspensionen zu deionisiertem Wasser (dH2O) als Blindwert; Fehlerbalken = SD, n = 3



Gasförmige organische Komponenten

Zur Identifizierung möglicher durch das Toasten erhöhten Konzentrationen organischer Gase wurden mit dem PTR-MS Scans Massenzahlen bei Ansaugen der unbelasteten Hallenluft und der mit Toastdämpfen belasteten Prüfraumlufte durchgeführt. Für alle Massenzahlen, deren Konzentration oberhalb von 20 ppb lag wurde der Quotient „Toast/Halle“ gebildet (Abbildung 37). Daraus gingen insgesamt 5 Massenzahlen her-

vor, die bei einer Dauermessung während des Toastens verfolgt wurden (Abbildung 38):

- ▶ MZ 43: Isopropanol, Propen, Cyclopropan, Cyanamid, Diazomethan
- ▶ MZ 45: Acetaldehyd, Ethylenoxid, Schwefelkohlenstoff
- ▶ MZ 47: Ameisensäure, Ethanol, Dimethylether, Methylhydrazin, Thioformaldehyd
- ▶ MZ 59: Aceton, Propanal, Oxethan, Propylenoxid
- ▶ MZ 61: Essigsäure, Methylformamid, 1-Propanol

Abbildung 37: Ergebnis der PTR-MS Massenscans während des Toastens als Quotient Messung Toaster/Referenzluft der Halle

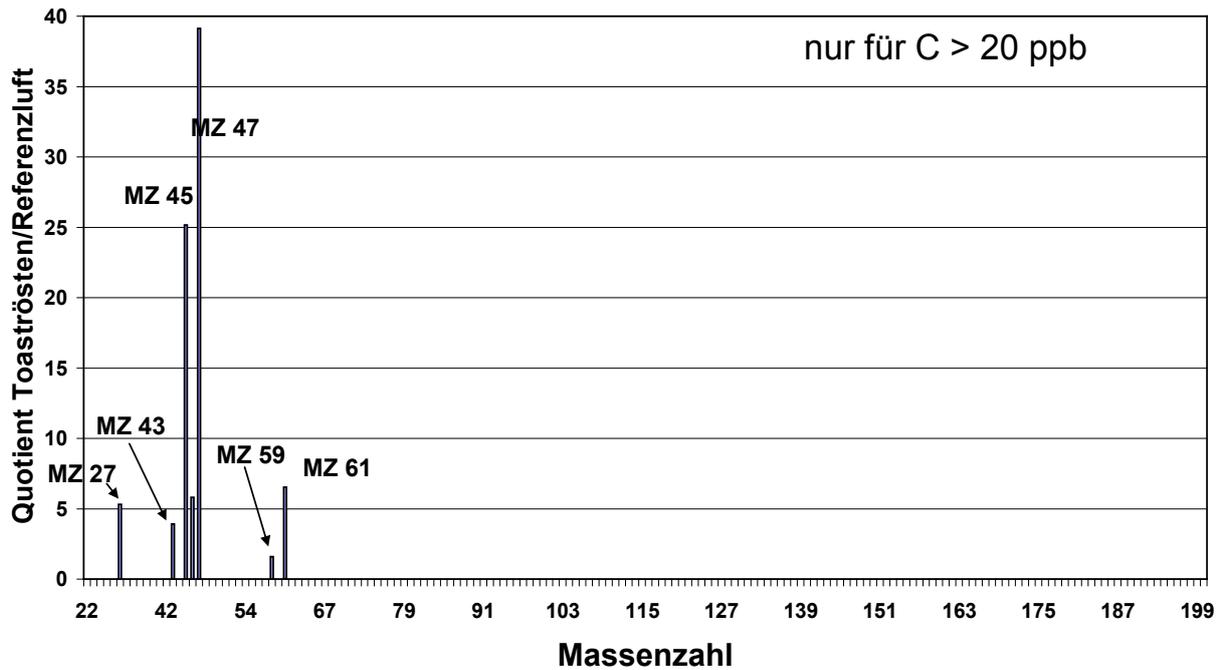
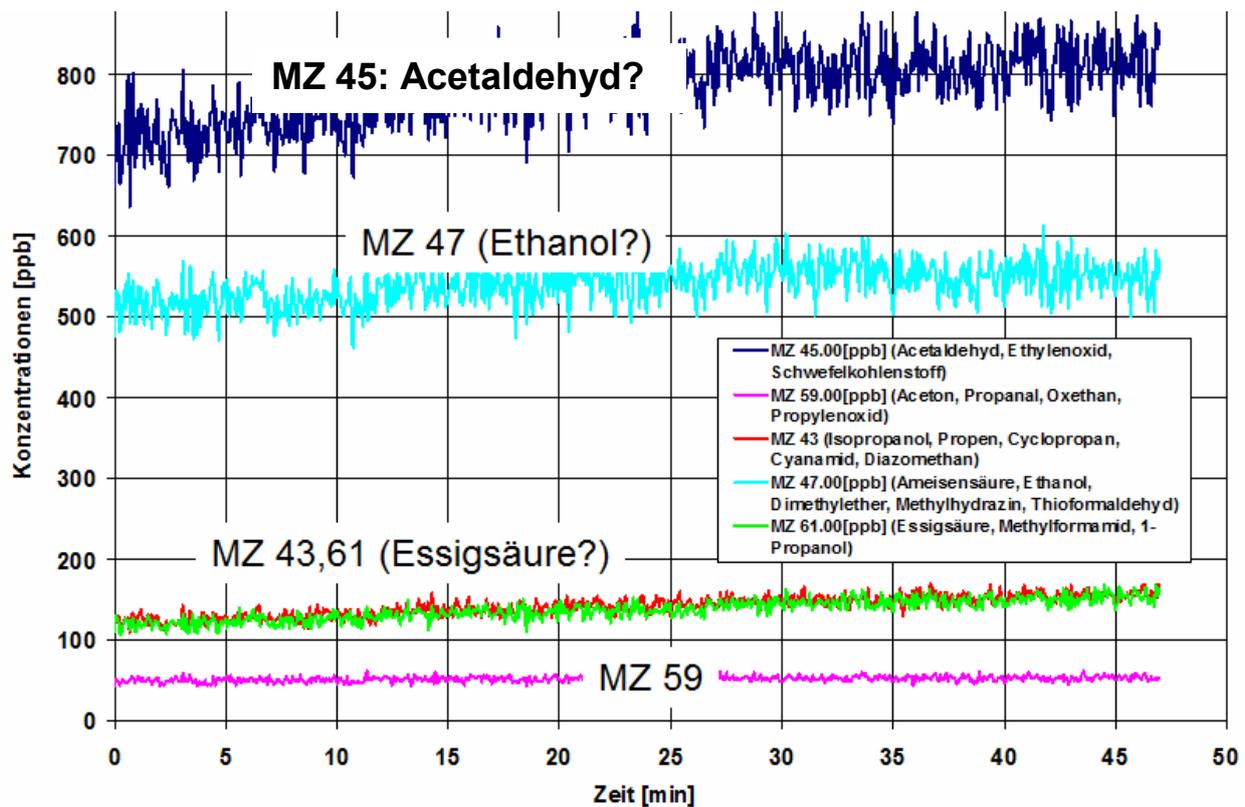


Abbildung 38: Zeitverlauf der ausgewählten Massenzahlen während des Toastens



Mit Ethanol, Acetaldehyd und Essigsäure enthält die Liste der wahrscheinlichen Substanzen eine Oxidationsreihe. Es ist somit anzunehmen, dass im Toastbrot Ethanol vorhanden ist, welches stufenweise zu Acetaldehyd und Essigsäure aufoxidiert wird. Die Essigsäure kann aber auch direkt vom Säureregulator Natriumdiacetat stammen, oder aus dem Sauerteigzusatz (letzterer kann auch Ethanol enthalten). Die in der Prüfkammer erreichten Konzentrationen der nachverfolgten Stoffe liegen im sub-ppm Bereich, und damit deutlich unter Arbeitsplatzgrenzwerten.

Partikelgebundene chemische Inhaltsstoffe

Beim Toasten zeigte sich in der AMS-Messung erwartungsgemäß ein deutlicher Anstieg der "Organics"-Konzentrationen (Abbildung 39). Massenmäßig nicht relevant, aber ebenfalls deutlich ist der synchrone Anstieg der Chlorid-Konzentration (Inlet), resultierend vermutlich aus dem zugesetzten Kochsalz. Gemeinsamkeiten zwischen "Organics" und Chlorid finden sich auch im Partikelgrößenspektrum. Bei beiden Substanzen ist das Maximum bei 100 nm zu finden, wohingegen das Maximum von Nitrat, Sulfat und Ammonium bei ca. 380 nm lag (Abbildung 40).

Abbildung 39: Zeitverlauf der AMS-Signale während des Toasten

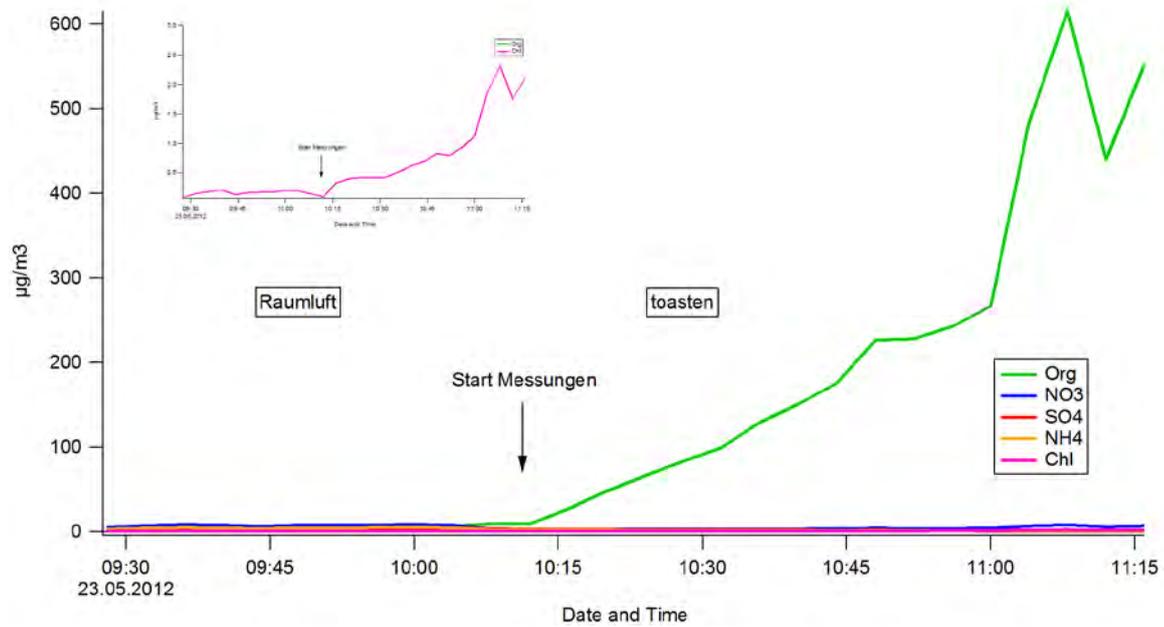
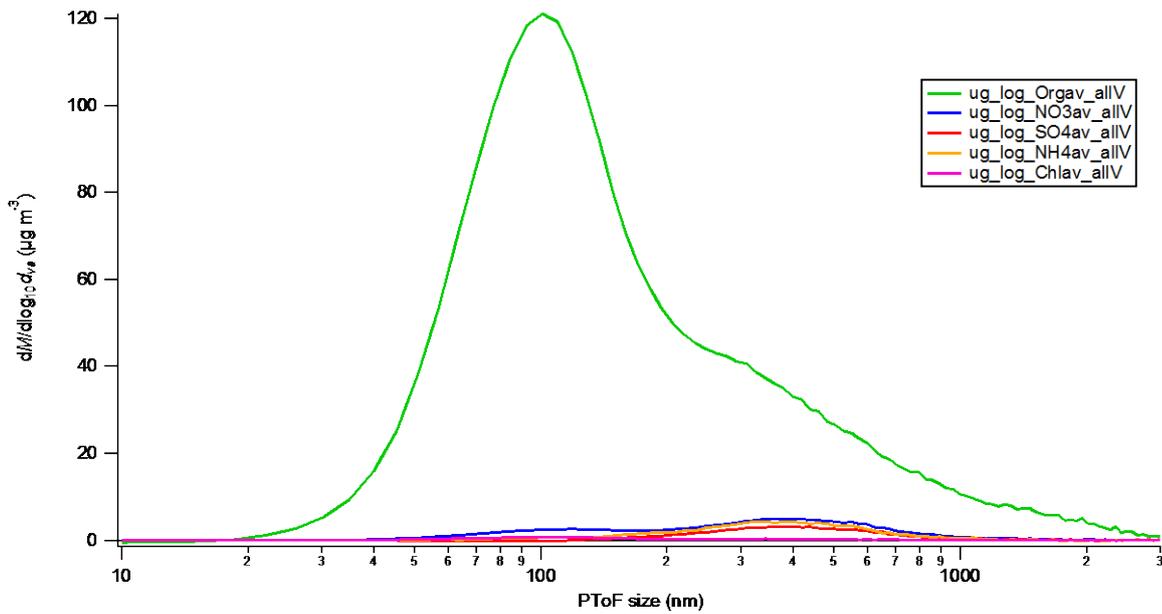


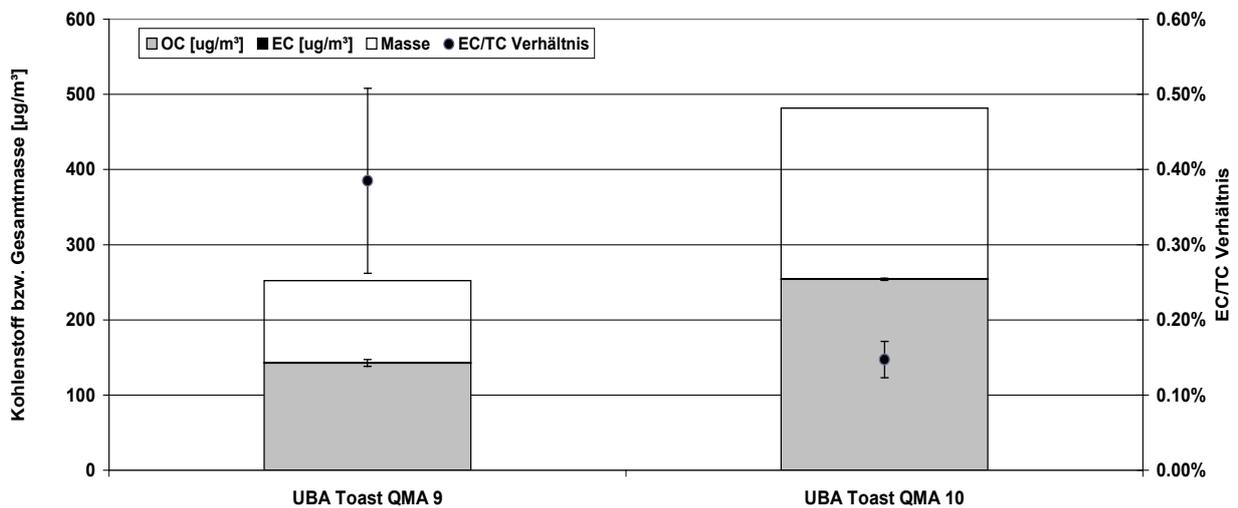
Abbildung 40: Partikelgrößenverteilung der AMS-Hauptstoffe/gruppen während des Toastens



Elementarer und organischer Kohlenstoff (Filterproben)

Die bei den Probenahmen erhaltenen Quarzfilter wurden mit dem thermooptischen Verfahren auf ihren Gehalt an organischem und elementarem Kohlenstoff analysiert. Es wurde dabei nahezu ausschließlich organischer Kohlenstoff gefunden (Anteile von EC an Gesamtkohlenstoff < 1 %). Bezogen auf die insgesamt auf dem Filter abgeschiedene Partikelmasse machte der Kohlenstoffgehalt 53 % bzw. 57 % aus (Abbildung 41). Die fehlende Masse ist mit hoher Wahrscheinlichkeit in oder an den Partikeln gebundenes Wasser.

Abbildung 41: Ergebnisse der EC-OC-Analysen für Toasten

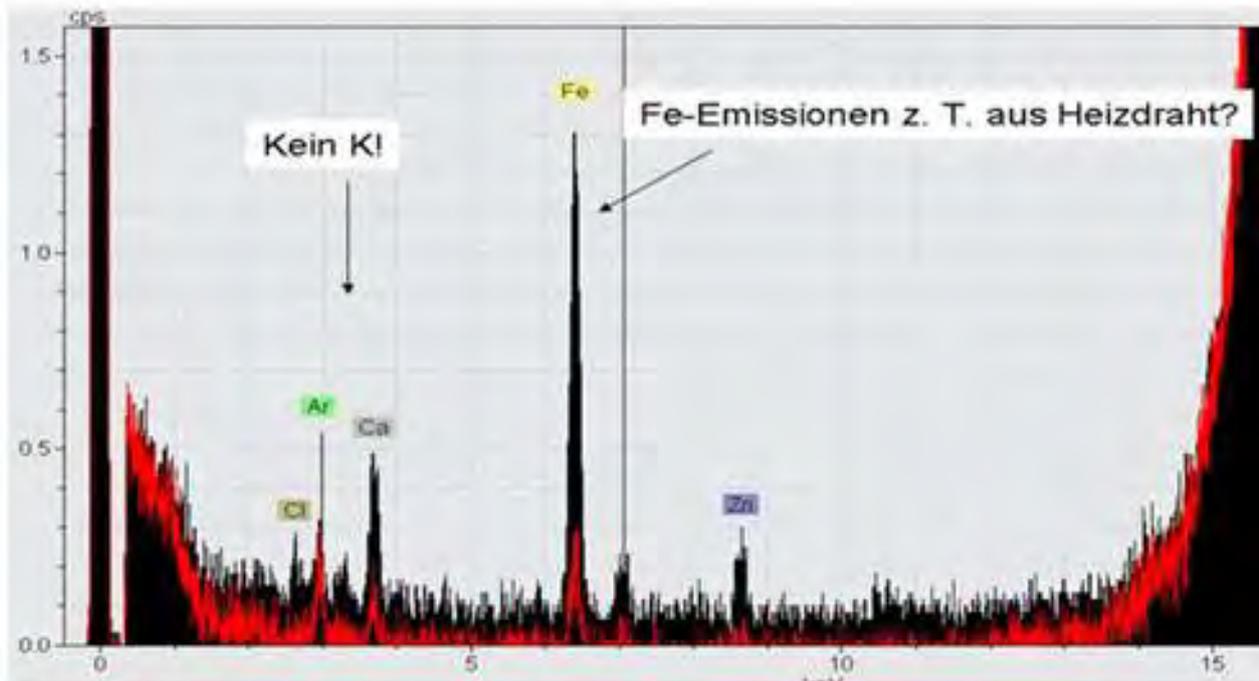


Elemente in Partikeln (NAS-Proben/TXRF)

Die Analyse eines mit dem NAS beaufschlagten Glaskohlenstoffträgers ergab keine Hinweise auf spezifische Elementemissionen. Insbesondere wurden, anders als bei den Kerzen, keine erhöhten Kaliumkonzentrationen gefunden (Abbildung 42). Unter Berücksichtigung der jeweiligen Elementempfindlichkeitsfaktoren wurde die höchste Konzentration auf dem Probenträger (14 ng) für Calcium gemessen. Ebenso wurde Eisen ca. 12 ng, Chlorid ~7 ng und Zink ~ 0,7 ng gemessen. Allenfalls Eisen und Chlorid könnten möglicherweise

zum Teil aus dem Röstprozess resultieren (Heizdrahtemissionen bzw. Kochsalz). Da Eisen aber ubiquitär ist und keine Referenzprobe aus der Hallenluft gezogen wurde, ist dies nicht abschließend zu beurteilen.

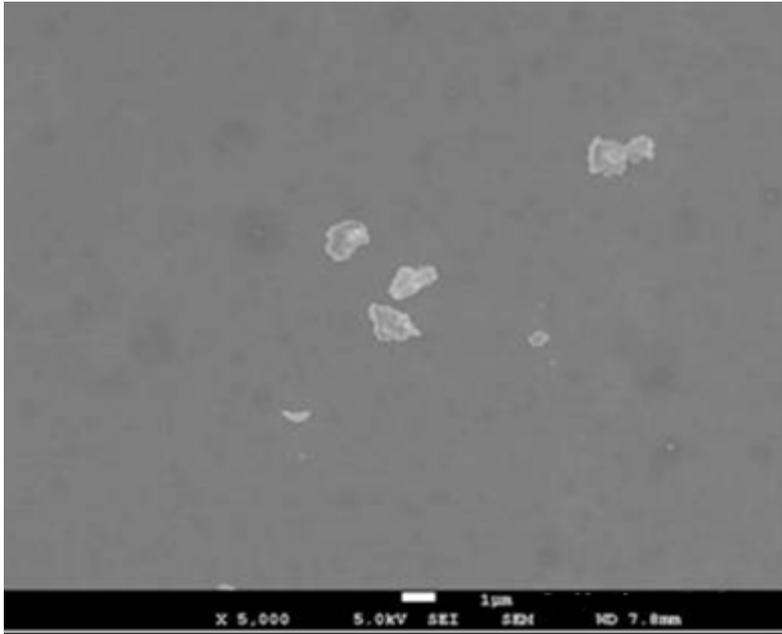
Abbildung 42: TXRF Spektrum der mit NAS auf Glaskohlenstoffträger abgeschiedenen Partikel während des Toasten



Partikelmorphologie (NAS-Proben/REM)

Im Rasterelektronenmikroskop war, trotz der relativ hohen gemessenen Partikelanzahlkonzentration insgesamt nur eine dünne Belegung mit Partikeln erkennbar. Abbildung 71 zeigt beispielhaft einige Partikel bzw. Agglomerate auf dem Träger, die aufgrund ihrer Morphologie und Größe als mineralische Partikel identifizierbar sind (vgl. TXRF-Ergebnisse).

Abbildung 43: REM-Aufnahmen der Toastproben



3.2.3.3 Zusammenfassung Tosten

Für die Innenraumquelle Toasten kann aufgrund der Charakterisierungsmessungen im Prüfraum unter den beschriebenen Bedingungen zusammenfassend festgestellt werden, dass

- ▶ eine hohe Anzahl ultrafeiner Partikel freigesetzt wird, die zu Anzahlkonzentrationen von 1 bis $1,5 \times 10^6$ Partikeln je cm^3 führen,
- ▶ diese Partikel eine Dichte nahe 1 g/cm^3 aufweisen,
- ▶ Spitzenwerte der Massenkonzentration bei einem 30-Minuten Zyklus von nahe $250\text{-}300 \mu\text{g/m}^3$, und bei vierstündigem Dauerrösten von ca. $500 \mu\text{g/m}^3$ erreicht werden,
- ▶ die Massenkonzentration im Zyklusverlauf kontinuierlich steigt (Verschiebung der Partikelgrößenverteilung zu höheren mittleren Durchmessern),
- ▶ die Partikel nur ein sehr schwaches OH-Radikalbildungspotential aufweisen,
- ▶ der Röstprozess mit Ausnahme von vermutlich durch die Heizdrähte emittiertem Eisen keine relevanten Mengen an (Schwer-)metallen freisetzt,
- ▶ Emissionen von Ethanol, Acetaldehyd und Essigsäure auftreten, wobei die letzteren vermutlich aus der Oxidation von durch Gärung gebildetem Ethanol entstehen,
- ▶ Aus der AMS-Messung ein Anstieg nur bei organischem Kohlenstoff und synchron dazu bei Chlorid zu verzeichnen ist (welches sich ebenfalls im Elementspektrum nachweisen lässt), wobei der Modalwert der Größenverteilung für beide Komponenten bei etwa 100 nm liegt,
- ▶ die emittierten Partikel zu etwas mehr als 50 % aus organischem Kohlenstoff bestehen und die Restmasse vermutlich durch eingelagertes Wasser gebildet wird. Eine Rußemission (elementarer Kohlenstoff) ist nur mit Werten knapp über der Nachweisgrenze anzutreffen.

3.2.3.4 Fazit

Aus den Ergebnissen für das Szenario Toasten wurde dieser Prozess als ein Quellprozess für die später folgenden Expositionsversuche ausgewählt, da unter den Prüfbedingungen ähnlich hohe Belastungen hinsichtlich Partikelanzahl, -oberfläche und -masse eingestellt werden können wie beim Kerzenabbrand.

3.2.4 Backen (Fertigpizza)

3.2.4.1 Geräte, Materialien, Vorgehensweise

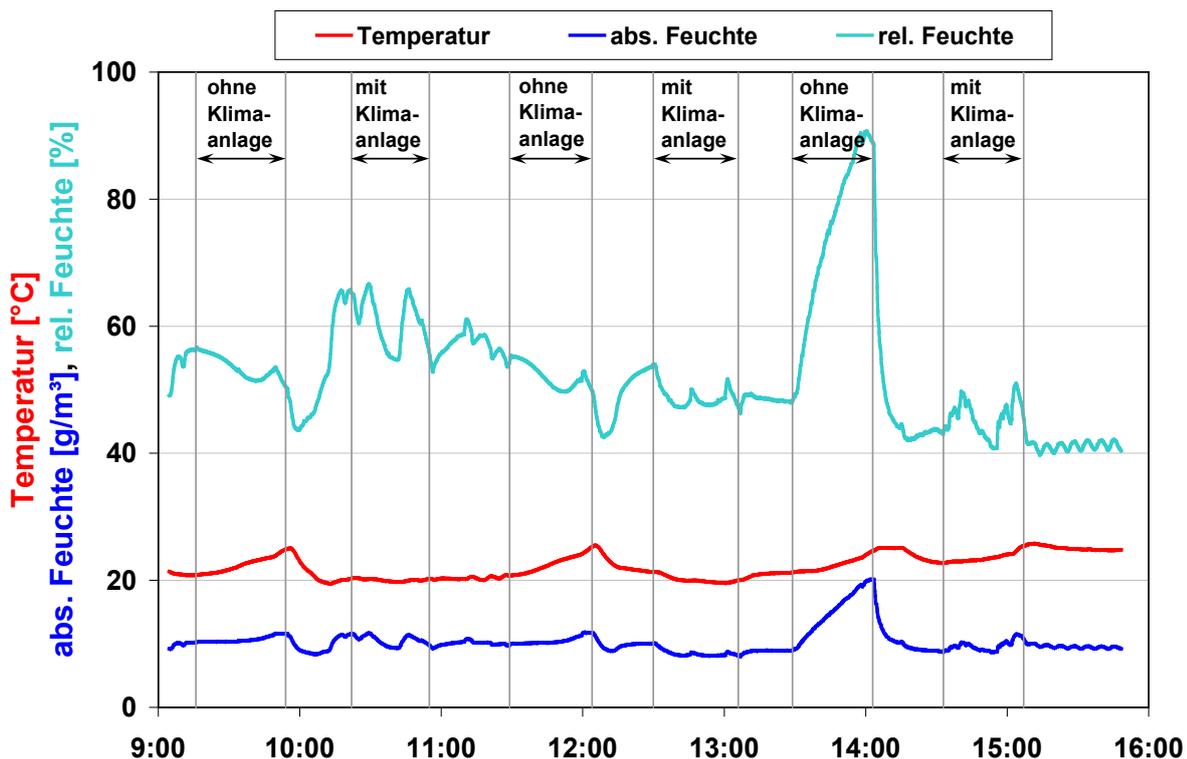
Als ein weiteres Quellszenario wurde das Backen einer Fertigpizza im Backofen untersucht. Hierfür wurde ein handelsüblicher Kleinbackofen verwendet. Als Prüfgut wurden Fertigpizzen beim lokalen Discounter bezogen. Für die Messung wurde folgender Ablauf festgelegt:

- ▶ Backofen für 15 Minuten vorheizen bei 200 °C
- ▶ 14 Minuten Pizza backen
- ▶ Ofen abschalten, Pizza herausnehmen, Ofentür offen lassen
- ▶ weitere fünf Minuten Messen der Emissionen

Die Messungen erfolgten im Prüfraum jeweils abwechselnd mit und ohne Klimaanlage (21 °C).

Abbildung 44 zeigt die Klimabedingungen im Prüfraum während der Messungen mit den online-Geräten. Ohne Klimatisierung stieg die Temperatur im Prüfraum um ca. 2 °C an; größere Fluktuationen waren bei der relativen Feuchte durch die Wasserdampf-Freisetzung während des Backprozesses zu beobachten.

Abbildung 44: Klimabedingungen im Prüfraum während des Pizzabackens



3.2.4.2 Messergebnisse

Massenkonzentrationen (gravimetrisch)

Angesichts der bei den kontinuierlichen Direktmessungen beobachteten geringen Emissionen von Partikeln wurde eine Probenahme auf Filtern nicht durchgeführt, da in zumutbaren Zeiträumen keine Sammlung auswertbarer Mengen möglich war. Daher sind keine Daten zu gravimetrisch bestimmten Massenkonzentrationen vorhanden. Eine Abschätzung erfolgte jedoch aus den Partikelgrößenverteilungen (SMPS- bzw. APS-Aufzeichnungen, siehe folgenden Abschnitt).

Anzahlkonzentration und –größenverteilung

Im Vergleich zu Kerzenabbrand und Toasten zeigte sich die Partikelfreisetzung beim Pizzabacken um ca. eine halbe bis eine Größenordnung geringer. Insgesamt waren die Messdaten der Backzyklen weniger gut reproduzierbar als bei den anderen Quellen. Auffällig war insbesondere der scheinbar starke Anstieg von mikronen Partikeln (APS-Daten) im letzten Zyklus (Abbildung 45), der jedoch auf sehr geringem absolutem Niveau ($< 5 \text{ Partikel/cm}^3$) erfolgte. Die Partikeloberfläche nahm innerhalb der Zyklen jeweils stark zu, was konsistent mit der Zunahme der Modalwerte auch in den Partikelgrößenverteilungen war (Abbildung 46). Auf der Basis der Anzahlgrößenverteilungen (Abbildung 47) lassen sich unter Annahme kugelförmiger Partikel und einer festgelegten Dichte (hier $D = 1,4 \text{ g/cm}^3$) der Zeitverlauf und der Zyklusmittelwert der Massenkonzentrationen abschätzen. Letztere ergaben sich zu Werten von ca. $5 \text{ bis } 25 \text{ }\mu\text{g/m}^3$ bei Maximalkonzentrationen von ca. $80 \text{ }\mu\text{g/m}^3$ (Abbildung 48).

Abbildung 45: Zeitverlauf der Partikelanzahlkonzentrationen während des Pizzabackens

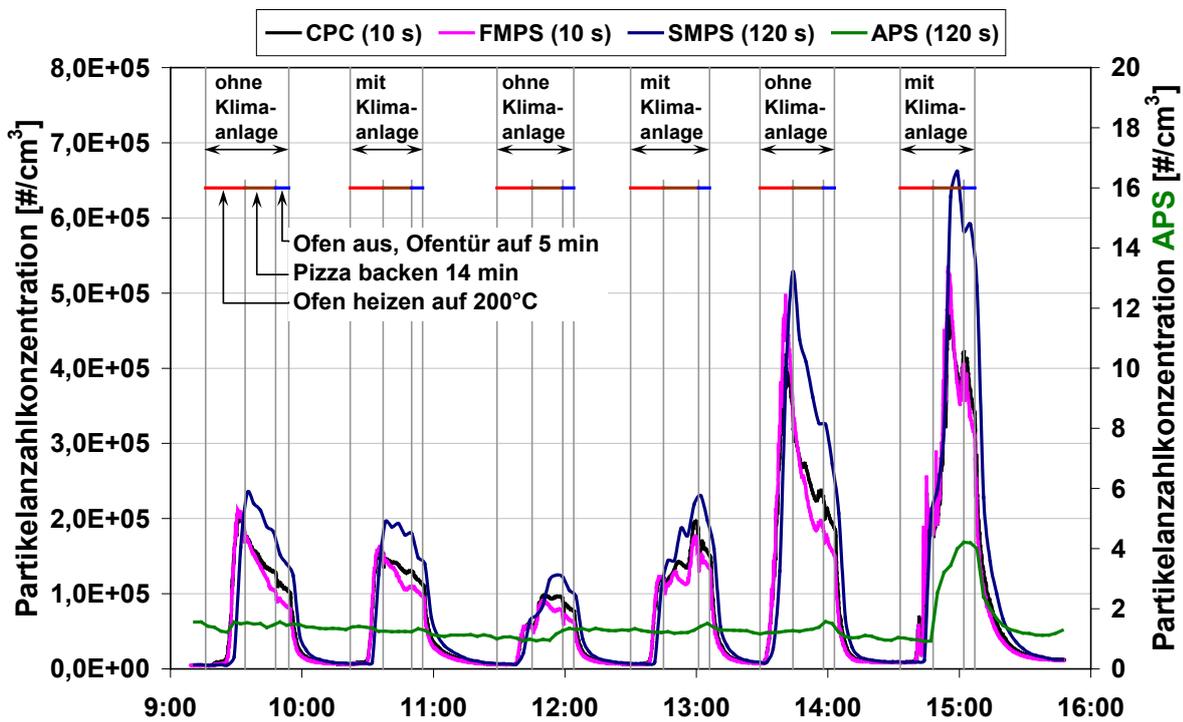


Abbildung 46: Zeitverlauf der Partikelanzahl- und Oberflächenkonzentrationen für das Pizzabacken

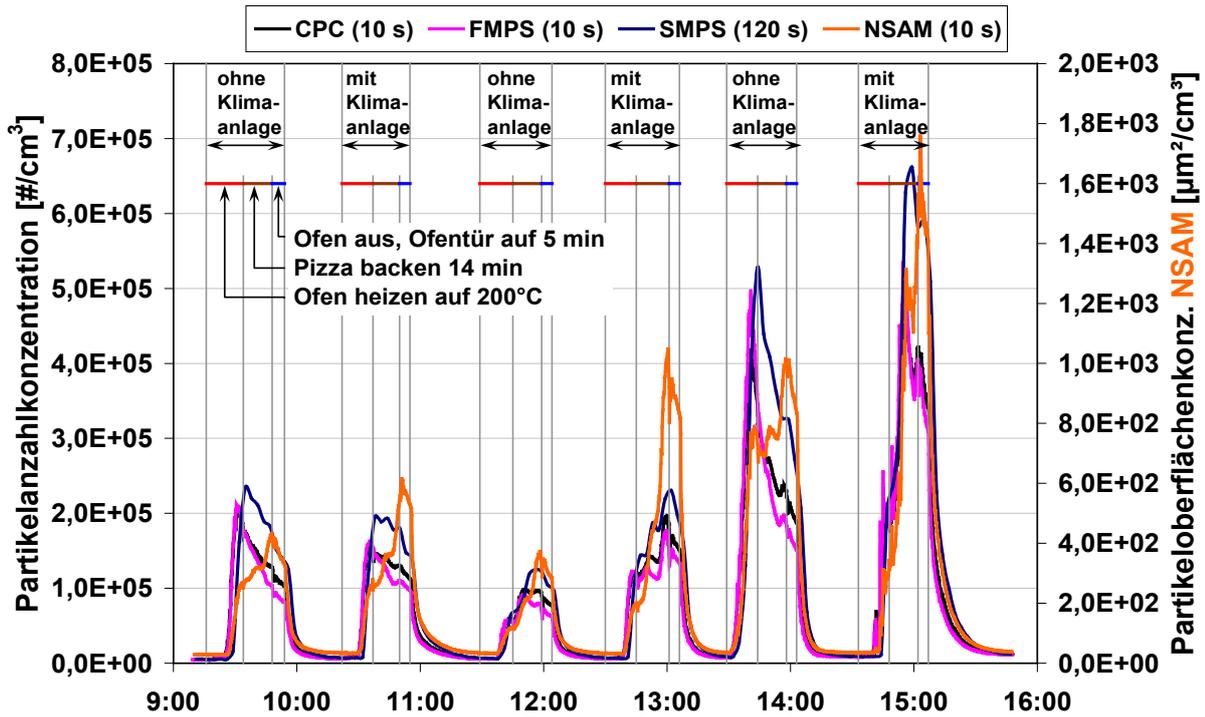


Abbildung 47: Mittlere Anzahlgrößenverteilung der sechs Zyklen des Pizzabackens

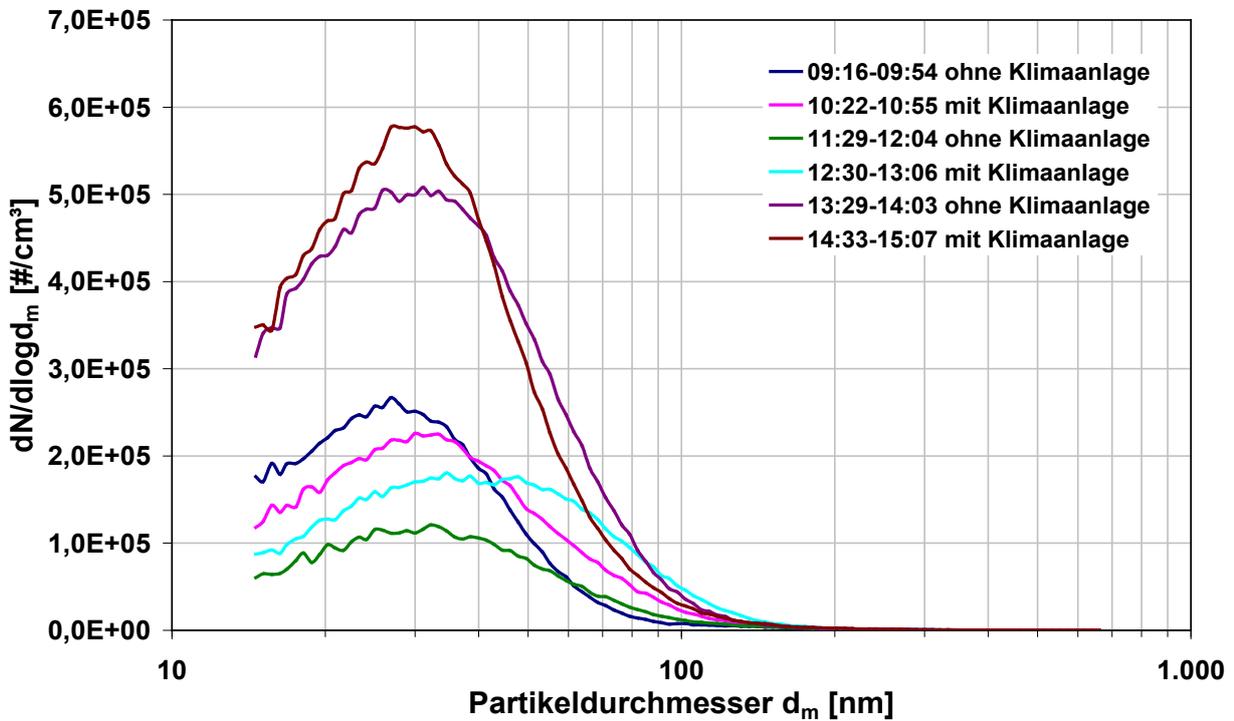
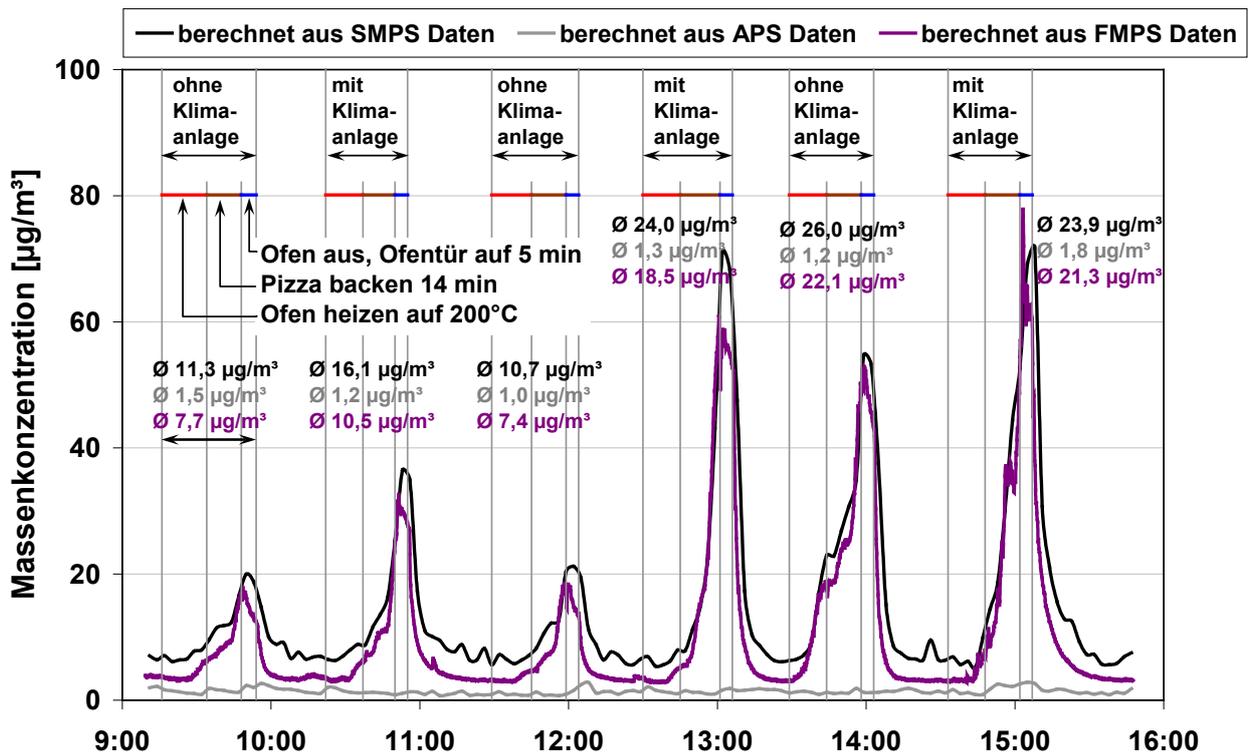


Abbildung 48: Abschätzung der Massenkonzentration für das Pizzabacken errechnet aus den Anzahlgrößenverteilungen



Lungendeponierbare Oberflächenkonzentration

Die Konzentration der lungendeponierbaren Oberfläche lag mit Werten zwischen ca. 500 und 1600 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ zwar deutlich oberhalb typischer Außenluftniveaus im urbanen Hintergrund, aber signifikant niedriger als beispielsweise bei den Quellprozessen Kerzenabbrand und Toasten.

Übrige Analysen

Bereits während der online Messungen zeigte sich, dass mit dieser Quelle keine für die sich anschließende Expositionsstudie ausreichende Partikelanzahl- und Massenkonzentrationen in reproduzierbarer Weise erzeugt werden konnte. Entsprechend wurden weitere Untersuchungen nicht durchgeführt und es liegen keine Daten für ROS-Generierungspotential, gasförmige organische Komponenten, partikelgebundene chemische Inhaltsstoffe, elementarer und organischer Kohlenstoff (Filterproben), Elemente in Partikeln (NAS-Proben/TXRF), Partikelmorphologie (NAS-Proben/REM) vor.

3.2.4.3 Zusammenfassung Pizzabacken

Zusammenfassend lässt sich hinsichtlich des Vorgangs „Pizzabacken“ festhalten, dass

- ▶ nur vergleichsweise geringe Emissionen sub-mikroner Partikel auftreten, die im Prüfraum zu Anzahlkonzentrationen zwischen 10.000 und 60.000 Partikel pro cm^3 führten,
- ▶ auch diese Partikel im Verlauf des Mess-Zyklus zu größeren Durchmessern anwachsen (Agglomeration),
- ▶ und dadurch bedingt ein Anstieg der Oberflächenkonzentration auf das Doppelte bis Dreifache des Ausgangswertes erfolgte (bei einem typischen Konzentrationsbereich von 400 bis 1.000 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$, mit Maximum von 1.600 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$),
- ▶ die aus der Größenverteilung unter Annahme einer Dichte von 1,4 g/cm^3 kalkulierte mittlere Massenkonzentration zwischen ca. 10 und ca. 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ resultierte (Spitzenwerte bis ca. 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

3.2.4.4 Fazit

Im Vergleich zu Kerzenabbrand und Toasten zeigten sich beim Pizzabacken im geschlossenen Ofen nur geringe Partikelemissionen. Als Emissionsquelle für die spätere Probandenstudie wurde das Pizzabacken entsprechend ausgeschlossen.

3.2.5 Braten (Würstchen)

3.2.5.1 Geräte, Materialien, Vorgehensweise

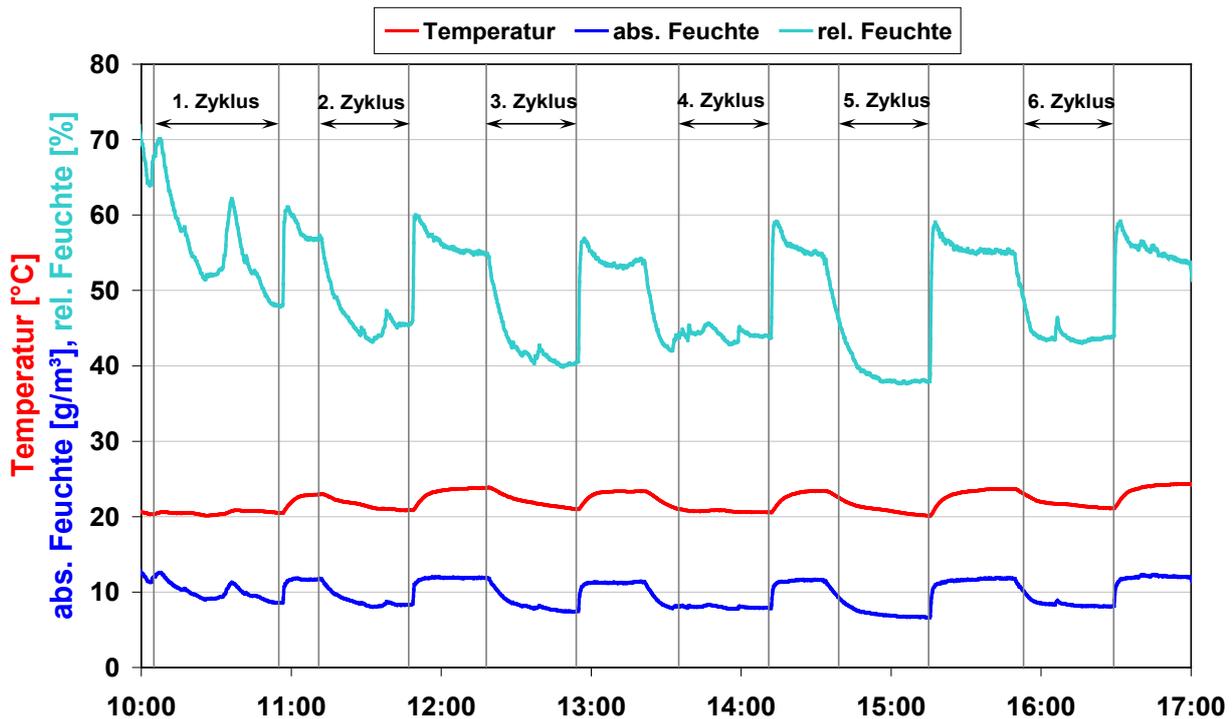
Für die Durchführung der Untersuchungen zur Partikelfreisetzung aus Bratvorgängen wurde eine Einplatten-Kochstelle mit stufenlos einstellbarer Heizleistung eingesetzt. Als Pfanne wurde eine Markenpfanne mit Temperaturindikatorfeld verwendet. Vor der ersten Verwendung wurde die Pfanne trocken ausgeheizt. Als Bratgut dienten Thüringer Rostbratwürste vom lokalen Discounter. Die Durchführung der Versuche erfolgte im Prüfraum nach folgendem Schema:

1. Anheizen der Pfanne bis zum Erreichen der durch das Indikatorfeld angezeigten optimalen Temperatur
2. Zugabe von drei Rostbratwürstchen (ohne Fett)
3. 10 Min. braten unter mehrmaligem Wenden (~alle 150 sec.) der Würstchen
4. Herausnahme der Würstchen
5. zweimalige Wiederholung der Schritte 3 und 4
6. Abschalten der Kochplatte, Lüften des Prüfraumes

Beim ersten Zyklus wurde das Anheizen auf 15 Minuten verlängert, um die auch nach Einbrennen der Pfanne noch vorhandenen Restemissionen des Materials mit zu erfassen. Je Zyklus wurden somit 9 Würstchen innerhalb von ca. 30 Minuten verarbeitet. Auf eine Fettzugabe wurde verzichtet, da bereits das Bratfett selbst in erheblichem Umfang Partikel freisetzt. Durch Zugabe des Bratgutes wird diese Emission jedoch nicht reproduzierbar verändert. Die Klimabedingungen im Prüfraum sind in Abbildung 49 wiedergegeben.

Die Filterbelegung wurde an einem separaten Messtag über einen Zeitraum von ca. 4 h durchgeführt. Hierzu wurden kontinuierlich Würstchen entsprechend den Schritten 3 und 4 der Zyklusbeschreibung zubereitet.

Abbildung 49: Klimabedingungen im Prüfraum während der Messzyklen des Bratens



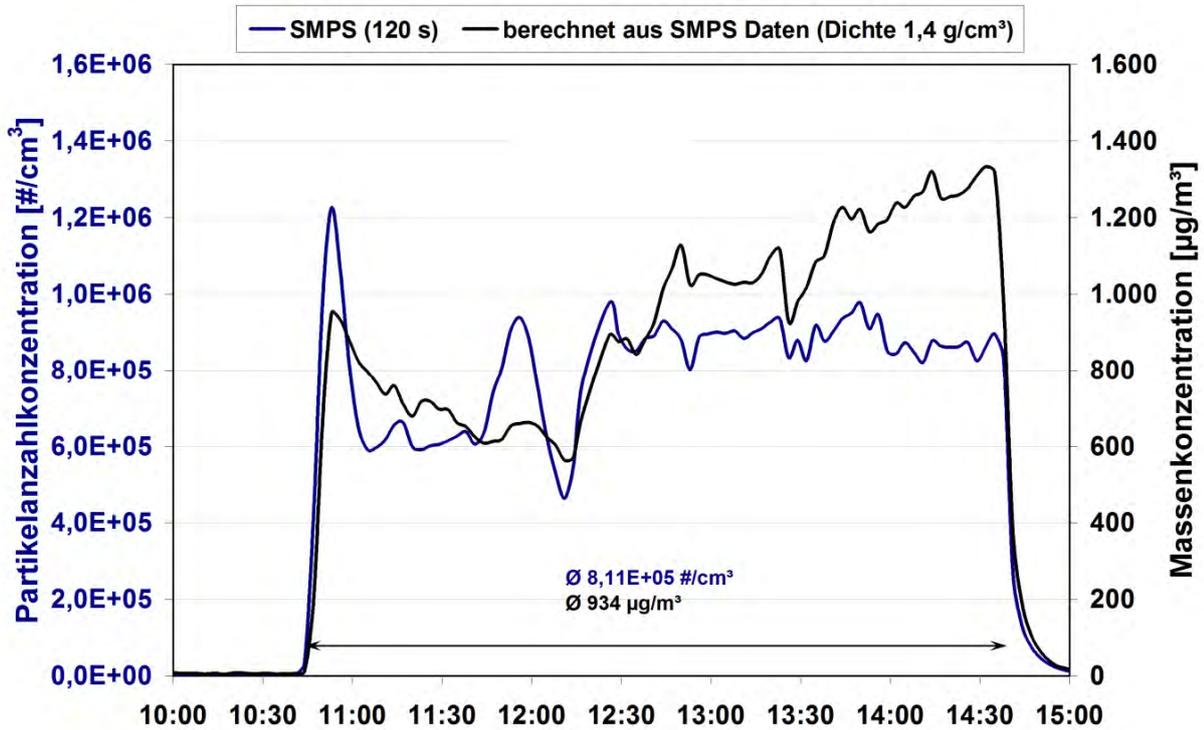
3.2.5.2 Messergebnisse

Massenkonzentrationen (gravimetrisch)

Die Auswertung der Filterproben ergab gravimetrisch durchschnittliche Massenkonzentrationen von $561,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (PM1-Fraktion auf Quarz Filter) und $591,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (PM2.5-Fraktion auf PTFE-Filter). Das PM1 zu PM2.5-Verhältnis von 0,95 zeigt somit, dass überwiegend sub-mikrone Partikel emittiert werden. zeigt den während der Filterbelegung aufgezeichneten Verlauf der Partikelkonzentration und der aus der Größenverteilung hochgerechneten Massenkonzentration. Mit der angenommenen Dichte von $1,4 \text{ g}/\text{cm}^3$ ergab sich eine durchschnittliche Massenkonzentration von $934 \mu\text{g}/\text{m}^3$ für PM1. Dies liegt um einen Faktor 1,66 höher als die gravimetrisch bestimmte PM1-Masse. Somit ist anzunehmen, dass die tatsächliche mittlere Partikeldichte entsprechend geringer anzusetzen ist und ca. $1,4/1,66 = 0,84$ beträgt, ein Wert, der plausibel mit dem Dichtebereich von Tierfett übereinstimmt¹.

¹ http://www.3a-wassertechnik.de/web/fileadmin/daten_downloads/Abscheideranlagen_fuer_fette/Bemessung%20Fette_Dichtetabelle.pdf

Abbildung 50: Zeitverlauf der Anzahl- und berechnete Massenkonzentration während der Filterbelegung - Braten



Anzahlkonzentration und –größenverteilung

Die Anzahlkonzentration im sub-mikronen Größenbereich lag im Mittel bei ca. 600.000 P/cm³, mit Spitzenwerten um 1,06 P/cm³. Der Modalwert der Größenverteilung lag bei ca. 50 nm und es traten auch Anteile von Partikeln > 100 nm auf wie die APS Messungen belegen (Abbildung 51, Abbildung 52, Abbildung 53, Abbildung 54). Lediglich der erste Zyklus zeigte höhere Emissionen kleinerer Partikel, die aus der leeren Pfanne austraten.

Lungendeponierbare Oberflächenkonzentration

Zusammen mit einer im Vergleich zu bis dato beschriebenen Quellen höheren Zahl an sub-mikronen Partikeln > 100 nm wurde entsprechend auch eine erhöhte Partikeloberfläche (3.000 bis 4.000 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$) festgestellt (Abbildung 53).

Abbildung 51: Anzahlgrößenverteilung (sub-mikron) für das Braten

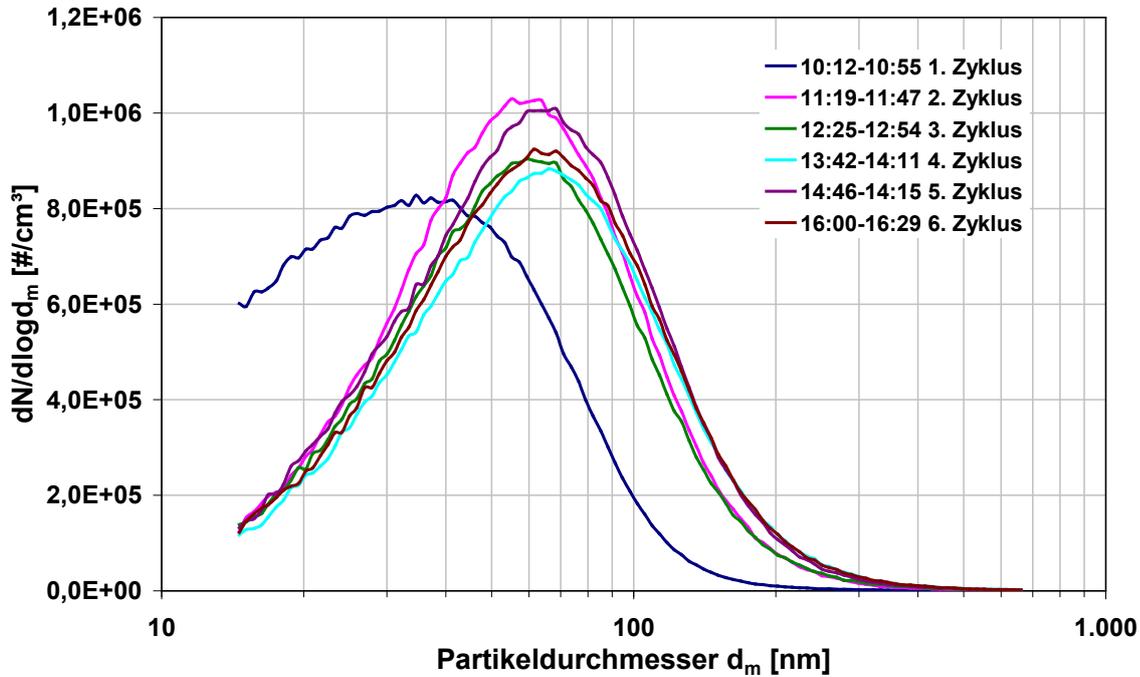


Abbildung 52: Partikelanzahlkonzentrationen für die sechs Messzyklen des Bratens

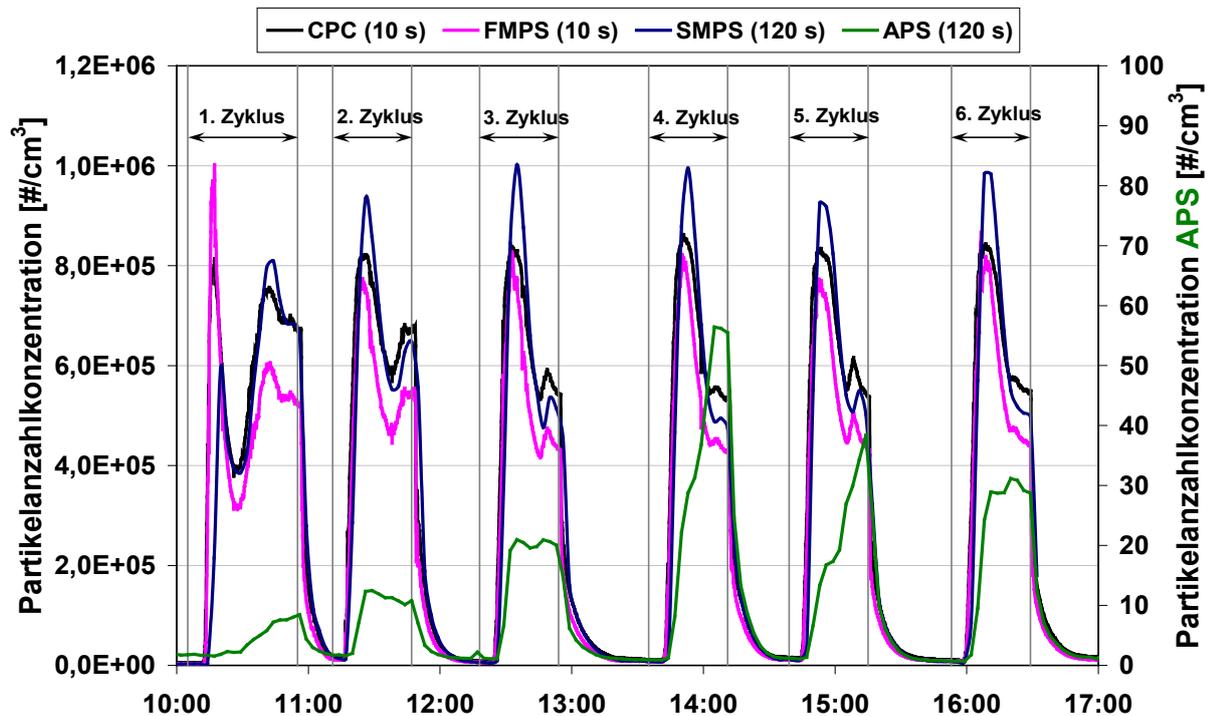


Abbildung 53: Partikelanzahl- und -oberflächenkonzentrationen für die sechs Messzyklen des Bratens

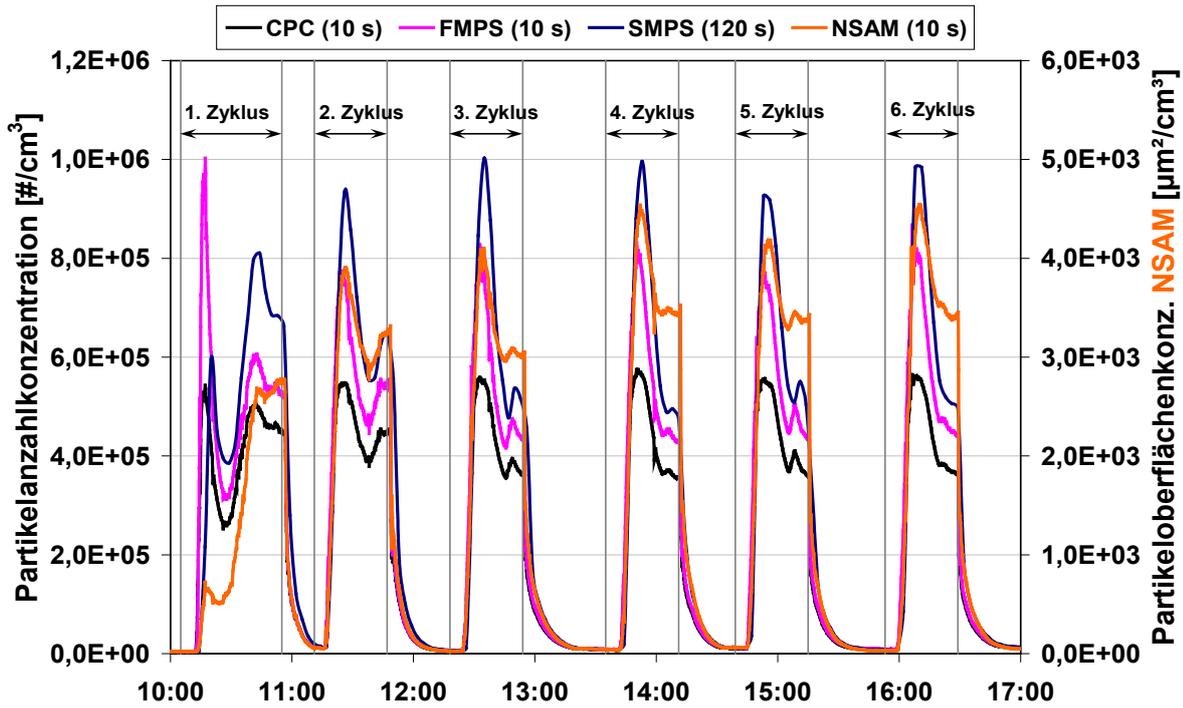


Abbildung 54: Massenkonzentrationen berechnet aus Anzahlgrößenverteilungen für das Braten

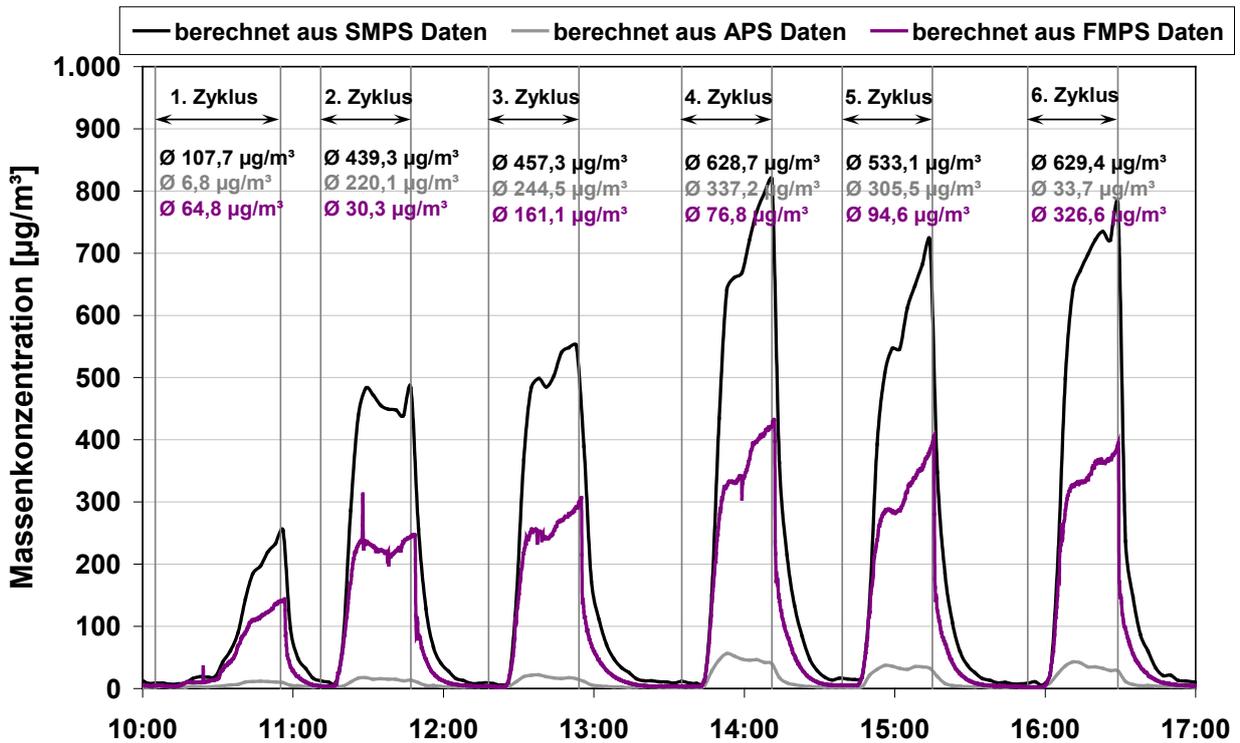
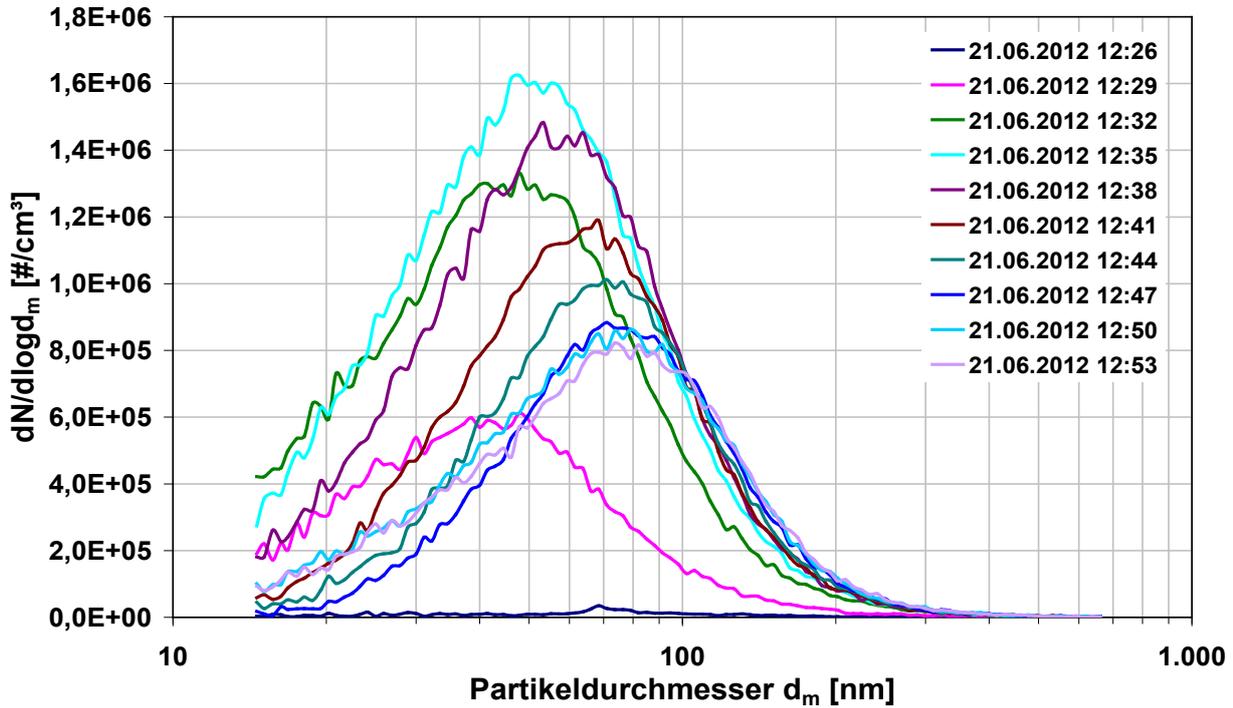


Abbildung 55: Mittlere Anzahlgrößenverteilungen im sub-mikronen Bereich während der sechs Messzyklen des Bratens



ROS-Generierungspotential

Die während der Filterprobenahme simultan gesammelten Partikel-Suspensionsproben wurden mit der ESR-Methode auf ihr OH-Radikalgenerierungspotential untersucht. Im Vergleich zu Blindwerten (reines Wasser bzw. PILS-Sammelproben mit „unbelasteter“ Raumluft) ergaben sich keine signifikanten Unterschiede (Abbildung 56). Die Messungen zur Oberflächenreaktivität mittels CPH assay ergaben ebenfalls keine signifikanten Unterschiede zwischen der Raumluft und dem Braten (Abbildung 57).

Abbildung 56: OH-Radikal Generierungspotential der Braten-Partikelsuspensionen; Fehlerbalken = Standardabweichung, n = 3

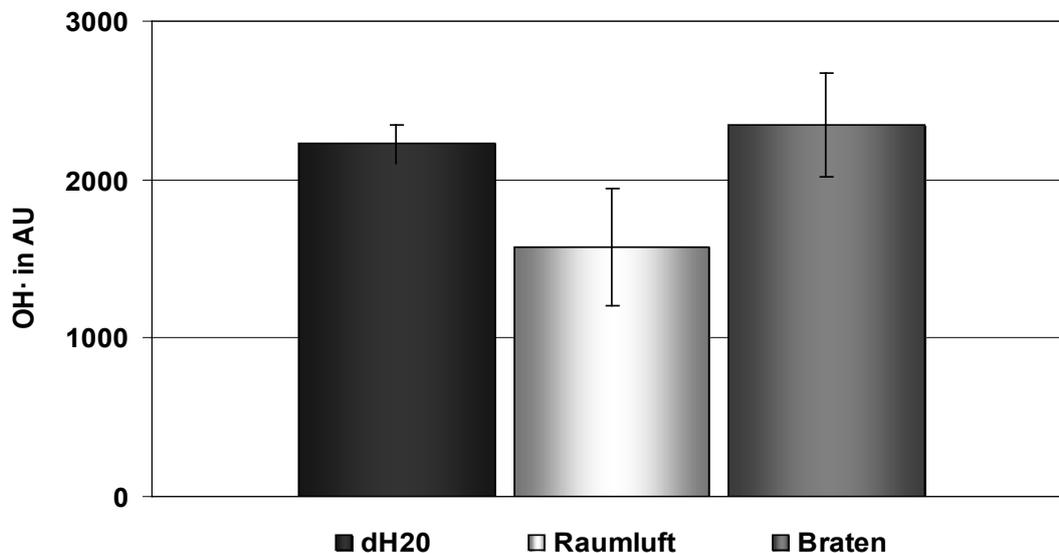
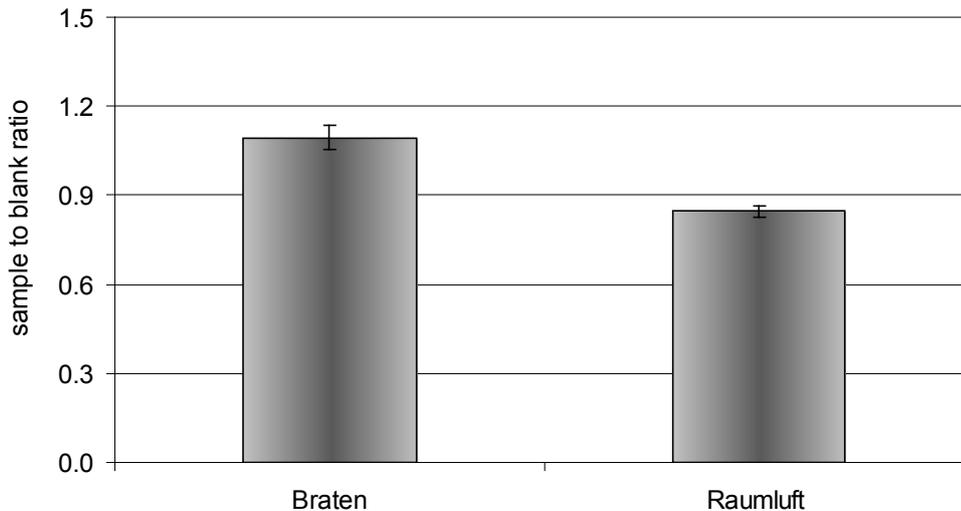


Abbildung 57: Verhältnis der Oberflächenreaktivität der Braten-Suspensionen zu deionisiertem Wasser als Blindwert; Fehlerbalken = Standardabweichung, n = 3



Gasförmige organische Komponenten

Mit dem PTR-MS- Detektor wurde zunächst bei „unbelasteter“ Raumluft, dann während des Bratvorgangs ein Scan über die Massenzahlen 21-200 durchgeführt. Dabei zeigten sich nur zwei Massenzahlen, MZ 59 und MZ 75 gegenüber der Raumluft erhöht. Die Konzentration der beiden Stoffe nahm im Verlauf der 30-minütigen Messung von 37 auf 25 ppb (MZ 59) bzw. von 27 auf 22 ppb (MZ 75) ab. Den Massenzahlen können folgende Verbindungen zugeordnet werden (wahrscheinlichste fett und unterstrichen):

MZ 59: Aceton, Propanal, Oxethan, Propylenoxid; MZ 75: 1-Butanol (C₄h₁₀O), 1-Propanol, 2-methyl- (C₄h₁₀O), Propanoic acid (C₃H₆O₂), Formic acid, ethyl ester (C₃H₆O₂), Ethanol, 1,1-dimethyl- (C₄h₁₀O), 2-Butanol (C₄h₁₀O), Methyl propyl ether (C₄h₁₀O), Acetic acid, methyl ester (C₃H₆O₂), Propane, 2-methoxy- (C₄h₁₀O), Ethoxy ethane (C₄h₁₀O), Thietane (C₃H₆S), Thiirane, methyl- (C₃H₆S), Methyl vinyl sulfide (C₃H₆S), 1,6-Dicarbahexaborane(6) (C₂H₆B₄), 1.3-Propanediamine (C₃H₁₀N₂), Acetonitrile, chloro- (C₂H₂ClN)

Aceton ist in ppb-Konzentrationen immer in menschlicher Ausatemluft vorhanden, so dass die MZ 59 möglicherweise auf Emissionen durch den „Koch“ zurückgehen kann. Von den Verbindungen, die mit einer MZ von 75 detektiert werden ist Propionsäure (ein oft in Lebensmitteln eingesetztes Konservierungsmittel) am wahrscheinlichsten. Dagegen spräche, dass sein Hauptanwendungsgebiet Backwaren sind, und dass es nicht auf der Wurstverpackung deklariert ist (dies ist allerdings nicht verpflichtend, wenn mit konservierten Zutaten eingetragen²).

Partikelgebundene chemische Inhaltsstoffe

Für die Messungen wurde zuerst nur die Raumluft als Nullpunkt vermessen, anschließend wurde die Kochplatte alleine in Betrieb genommen und dann zusammen mit der Pfanne. Von dem Würstchenbraten wurden zwei der insgesamt drei Bratzyklen mit dem AMS vermessen.

Ähnlich wie bei den anderen Innenraumquellen zeigt sich beim Würstchenbraten ein starker Anstieg der "organics"-Fraktion bis auf ca. 400 µg/m³ (Abbildung 58). Von den übrigen gemessenen Komponenten folgen Nitrat und Chlorid diesem zeitlichen Muster, wenn auch um 2-3 Größenordnungen geringer. Da auf der Zutatenliste der Bratwürstchen kein Nitritpökelsalz aufgeführt ist, stammt das gemessene Nitrat möglicherweise aus dem enthaltenen Eiweiß. Interessant ist, dass beim Toasten mehr Chlorid gemessen wurde als beim Würstchen braten, obwohl von den üblicherweise verwendeten Kochsalzmengen ähnliche Konzentrationen zu erwarten wären. Dies würde bedeuten, dass beim Würstchenbraten entweder weniger Partikel freigesetzt

²<http://www.zusatzstoffmuseum.de/lexikon-der-zusatzstoffe/kategorie/konservierungsstoffe.html>

werden, die Kochsalz enthalten, oder dass es sich hierbei um relativ große Partikel handelt ($> 1 \mu\text{m}$), die vom AMS nicht gemessen werden. Die Vergrößerung der "Organics"-Konzentrationen (Abbildung 59) zeigt, dass der Betrieb der Kochplatte alleine bzw. zusammen mit der Pfanne gegenüber dem Würstchenbraten als Emissionsquelle zwar vernachlässigbar sind, dass sich gegenüber der Raumluft aber doch ein Anstieg der Konzentrationen feststellen lässt.

Abbildung 58: Verlauf der AMS-Signale während des Bratens

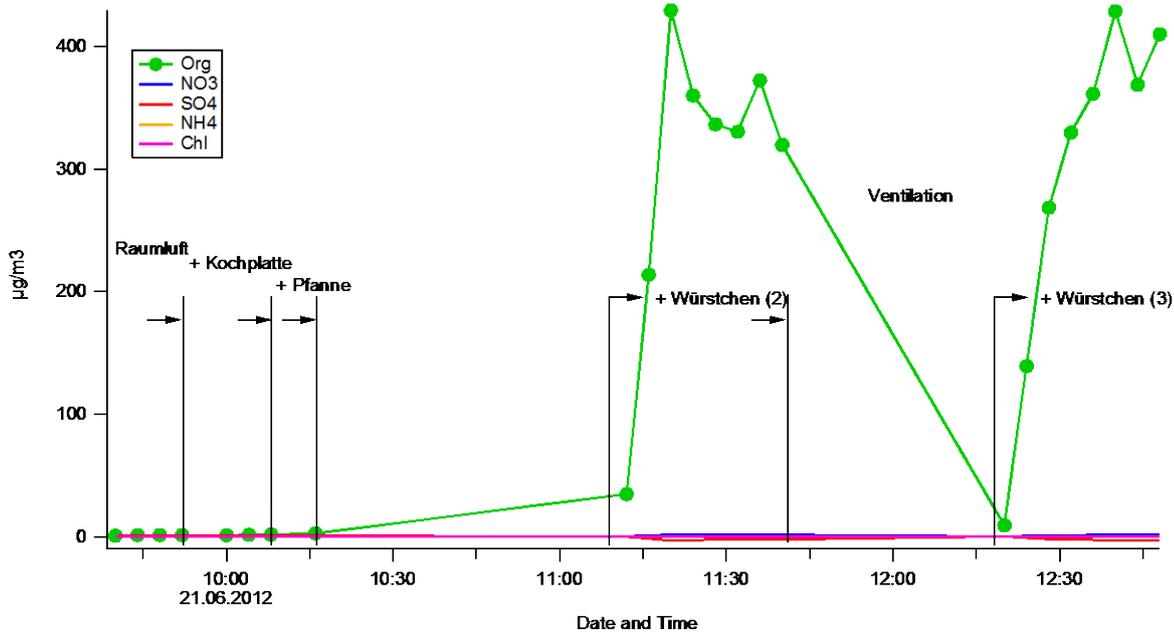
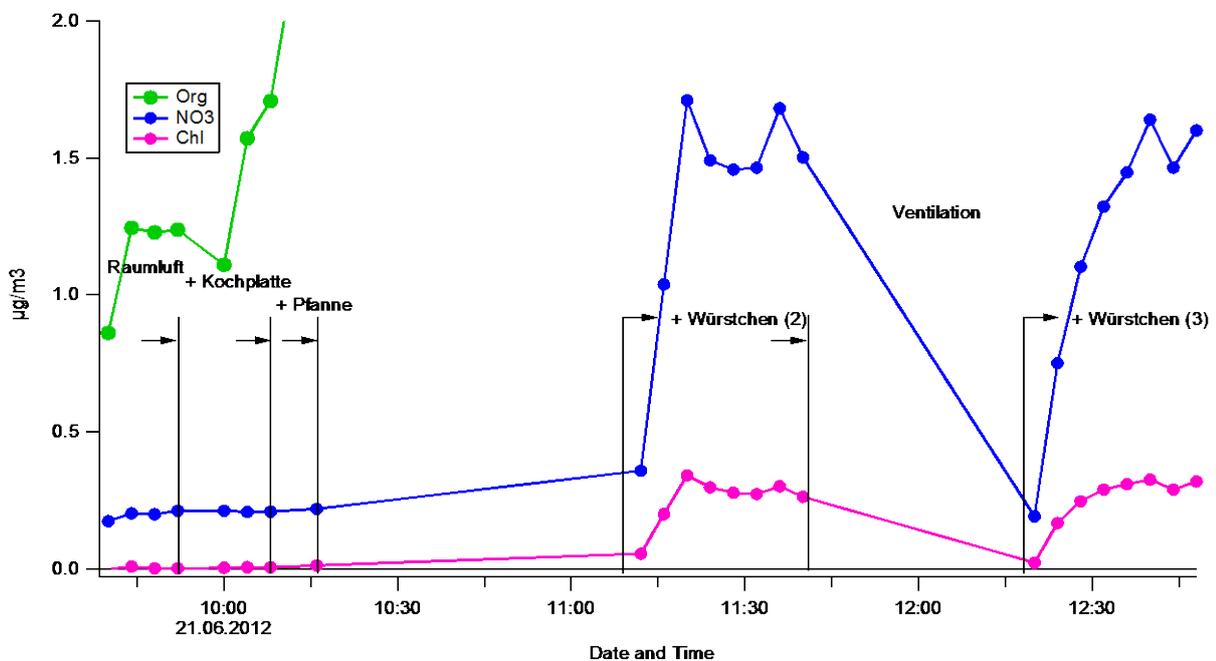


Abbildung 59: AMS-Signale der Komponenten mit geringerer Konzentration während des Bratens



Elementarer und organischer Kohlenstoff (Filterproben)

Die EC-OC Analytik des Quarz-Filters (PM1-Fraktion) ergab eine Durchschnittskonzentration an Gesamtkohlenstoff von $376,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, davon $375,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ organischer Kohlenstoff. Somit war elementarer Kohlenstoff nicht signifikant nachweisbar. Zur gravimetrisch bestimmten Massenkonzentration ($561 \mu\text{g}/\text{m}^3$) bestand

eine Differenz von nahezu $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$, deren Zusammensetzung nur durch weiter gehende Analysen erklärbar wäre.

Elemente in Partikeln (NAS-Proben/TXRF)

Die Elementanalyse der auf TXRF-Träger abgeschiedenen Partikel ergab keine besonderen Auffälligkeiten. Die gemessenen Spuren an Eisen (ca. 9 ng), Calcium (ca. 12 ng) und Zink (ca. 1 ng) dürften aus der Hintergrundbelastung stammen.

Partikelmorphologie (NAS-Proben/REM)

Die REM-Probenträger zeigen sich im Mikroskop als durchaus dicht belegt wobei sich agglomerierte, kristalline Strukturen erkennen lassen. Hierbei handelt es sich vermutlich um Salze (z.B. NaCl laut Inhaltsstoffangabe) (Abbildung 60). Eine EDX Analyse bestätigte diese Vermutung, vor allem Na und Cl aber auch K wurden mittels EDX nachgewiesen. (Abbildung 61).

Abbildung 60: REM-Aufnahmen der während des Bratens gesammelten Probe

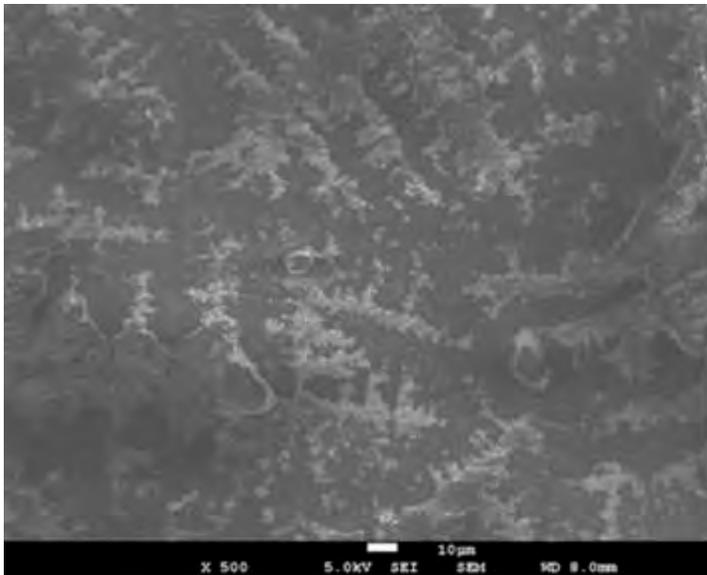
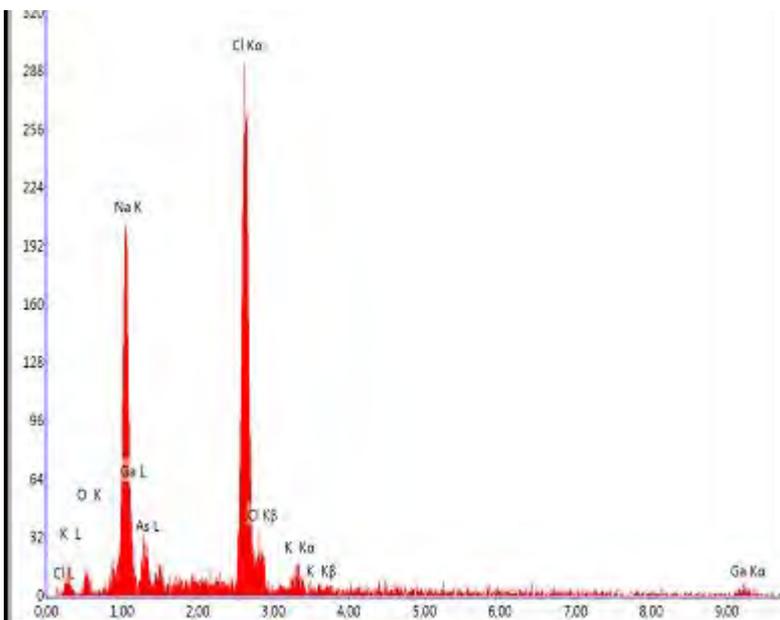


Abbildung 61: Beispiel einer EDX Analyse der während des Braten gesammelten Probe



3.2.6 Zusatzuntersuchung Partikelsammlung bei Expositionsquelle Braten (PM2.5) und Raumluft/Blank (PM2.5 und PM1)

Für die Emissionsquelle Braten wurden zusätzlich Proben gesammelt, da durch die geringe Resuspensionseffizienz von dem PTFE Filter nur ein Bruchteil der gesammelten Partikel in toxikologische Folgeuntersuchungen überführt werden konnte. Bei den ursprünglich beprobten Filtern ergaben sich damit zu geringe Probenmengen. Um größere Mengen bereitzustellen, wurde zunächst jeweils im Anschluss an den Expositionsdurchgang mit der Quelle „Braten“ auf Niveau II die mit den freigesetzten Partikeln belastete Raumluft kumulativ auf einen Filter gesammelt (PM2.5). Zudem wurden zwei gesonderte Probenahme für die Exposition Braten (Szenario Expositionsniveau II, jedoch ohne Lüftungsbetrieb) durchgeführt. Hierzu wurde jeweils ein LVS Gerät (2,3 m³/h) verwendet und auf PTFE Filtern PM2.5 und PM1 gesammelt. Die Probenahme bei den Bratproben erfolgte bis zu dem Zeitpunkt an dem die Probensammler aufgrund der hohen Filterbelastung und damit verbundenen hohen Druckverlust abschalteten. An gesonderten Tagen wurden auch mittels LVS Raumluft/Blankproben gezogen, um diese für toxikologische Untersuchungen als mögliche Referenzprobe zu verwenden.

Eine Übersicht der Ergebnisse der Filterproben gesammelt mit einem Low-Volume-Sampler (LVS; 2.3 m³/h) auf PTFE-Filtern (PALL; Ø 47 mm) gibt die folgende Tabelle 8.

Tabelle 8: Übersicht der Partikelsammlung pro Filter mittels LVS für die Exposition Braten und Raumluft/Blank

	PM1	Sammelzeit	Sammelvolumen	PM2.5	Sammelzeit	Sammelvolumen
	mg	Min.	m ³	mg	Min.	m ³
Braten kumulativ	---	---	---	8,5	715	27
Braten	2,2	104	3,8	9,4	165	5,7
Braten	1,4	65	2,3	7,4	122	4,7
Raumluft/ Blank	0,57	1398	54	0,60	1388	55

Es zeigt sich, dass während der kumulativen Sammlung für die Exposition Braten über einen sehr langen Zeitraum hinweg eine „rel. hohe“ Masse gesammelt wurde. Es kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass diese auch durch Raumluft geprägt sein kann. Folglich wurde die bereits beschriebene gesonderte Probenahme/Exposition wiederholt und für toxikologische Untersuchungen ausreichende Massen auf Filtern gesammelt. Die Raumluft/Blank hingegen zeigt eine lediglich geringe partikuläre Belastung mit ~10 µg/m³ PM2.5 und PM1.

3.2.6.1 Zusammenfassung Braten

Für die Emissionsquelle „Würstchen braten“ lässt sich folgendes zusammenfassen:

- ▶ Eine Fettzugabe führt zu deutlichen nicht reproduzierbaren Partikelemissionen. Der Bratvorgang wurde somit lediglich unter Nutzung des aus dem Bratgut (Würstchen) austretenden Fettes durchgeführt.
- ▶ Die Partikelfreisetzung führte unter den Prüfraumbedingungen zu mittleren/maximalen Anzahlkonzentrationen von 5×10^5 (1×10^6) Partikeln/cm³.
- ▶ Bedingt durch im Vergleich zu anderen Quellen größeren Partikelgrößen (Modalwert sub-mikron 50 nm) ergaben sich hohe Oberflächenkonzentrationen zwischen 3.000 und 4.000 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$.
- ▶ Berechnungen der Massenkonzentration aus den Anzahlgrößenverteilungen zeigten, dass die Partikelmasse überwiegend (> 80 %) durch sub-mikrone Partikel erzeugt wird. Dies ist auch aus den gravimetrisch bestimmten PM1 zu PM2.5-Verhältnis von 0,95 zu schließen.
- ▶ Aus dem Vergleich der gravimetrisch bestimmten mit der aus Anzahlkonzentrationsmessungen berechneten Massenkonzentration folgt eine wahrscheinliche mittlere Dichte der Partikel von 0.84 g/cm³. Dies stimmt plausibel mit typischen Dichten tierischer Fette überein.
- ▶ Mittels Kohlenstoffanalytik konnten nur etwa 60 % der auf Filtern abgeschiedenen Massenkonzentration von 561 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ wiedergefunden werden. Übrige Masse ist nicht eindeutig zu klären jedoch ist den AMS Daten (nächster Punkt) u.a. Chlorid und Nitrat anzunehmen.
- ▶ Die Kohlenstoffanalytik wie auch die Daten des Aerosolmassenspektrometers zeigen die Dominanz von organischen Kohlenstoffpartikeln. Mit dem AMS wurden weiterhin Nitrat und Chloridkonzentrationen gefunden, die im Bereich von 0,1 bis 1 % des organischen Kohlenstoffs liegen.
- ▶ Signifikante Reaktivitäten (ROS-Bildungspotential) wurde nicht festgestellt.

3.2.6.2 Fazit

Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass beim Braten mit modernen Pfannen, die eine Antihafbeschichtung haben, bei korrekter Einhaltung der Temperaturen nur geringe Emissionen aus der Pfannenbeschichtung zu erwarten sind. Nach Zugabe des Bratgutes werden diese von den erheblich intensiveren Emissionen ($1,0 \times 10^6$ Partikeln/cm³) beim Bratvorgang überdeckt. Die Befunde der Messungen deuten darauf hin, dass die emittierten sub-mikronen Partikel überwiegend aus Fetttröpfchen bestehen, die durch direktes Verspritzen oder durch Kondensation von verdampften Fettbestandteilen gebildet werden. Für das Projekt wurde Braten als eine mögliche relevante Quelle für die Belastung von Innenräumen eingestuft.

3.2.7 Kaminofenbetrieb

3.2.7.1 Geräte, Materialien, Vorgehensweise

Für die Kaminofenmessungen wurde ein Dauerbrandofen moderner Bauart verwendet (Abbildung 62, oben links), der gemäß Herstellerangaben den Anforderungen der 1. Bundesimmissionsschutzverordnung (Stufe 1 und Stufe 2) genügt. Der Ofen wurde in einer Werkhalle aufgestellt und mit einem an der Außenwand der Werkhalle angebrachten Edelstahlkamin (Abbildung 62, oben rechts) verbunden. Um die Untersuchungen analog zu den anderen Quellen durchführen zu können, wurde der Ofen mit einem Metallgerätehaus (Abbildung 62, unten) umgeben. Dieses wurde mit Probenahmevorrichtungen ausgestattet und Messungen bei Normalbetrieb und mit Fehlanwendung durchgeführt. Hierbei zeigten sich bereits bei den ersten Versuchen erhöhte Raumlufttemperaturen > 40 °C, so dass eine Klimaanlage installiert und weitere Messungen sowohl mit als auch ohne laufender Klimaanlage durchgeführt wurden. Dabei wurde der Ofen wie folgt betrieben:

- ▶ Ofen anfeuern
- ▶ jeweils ein Holzsplit vor Abbrand nachlegen
- ▶ zwischendurch (etwa alle fünf Minuten) für etwa 30 Sekunden in der Glut stochern („unsachgemäßer“ Betrieb)

Die Klimaanlage ist ein mobiles Gerät der Firma EURO TOOLS mit einer Kühlleistung von 9.000 BTU/h – ca. 2.600 W) für Raumgrößen bis ca. 20 m². Für die Versuche wurde die Klimaanlage stets mit maximaler Kühlleistung im Abluftbetrieb betrieben.

Die Partikelemissionen wurden dabei entsprechend der in Tabelle 3 für Kamin aufgeführten Methoden erfasst. Die Untersuchungen beim Kaminofenbetrieb fanden in zwei Untersuchungsabschnitten statt, zum einen zur Aufnahme der Messdaten aller online-Geräte, und zum anderen für die Filter- und TXRF-Trägerbelegung sowie Sammlung von Partikelsuspension.

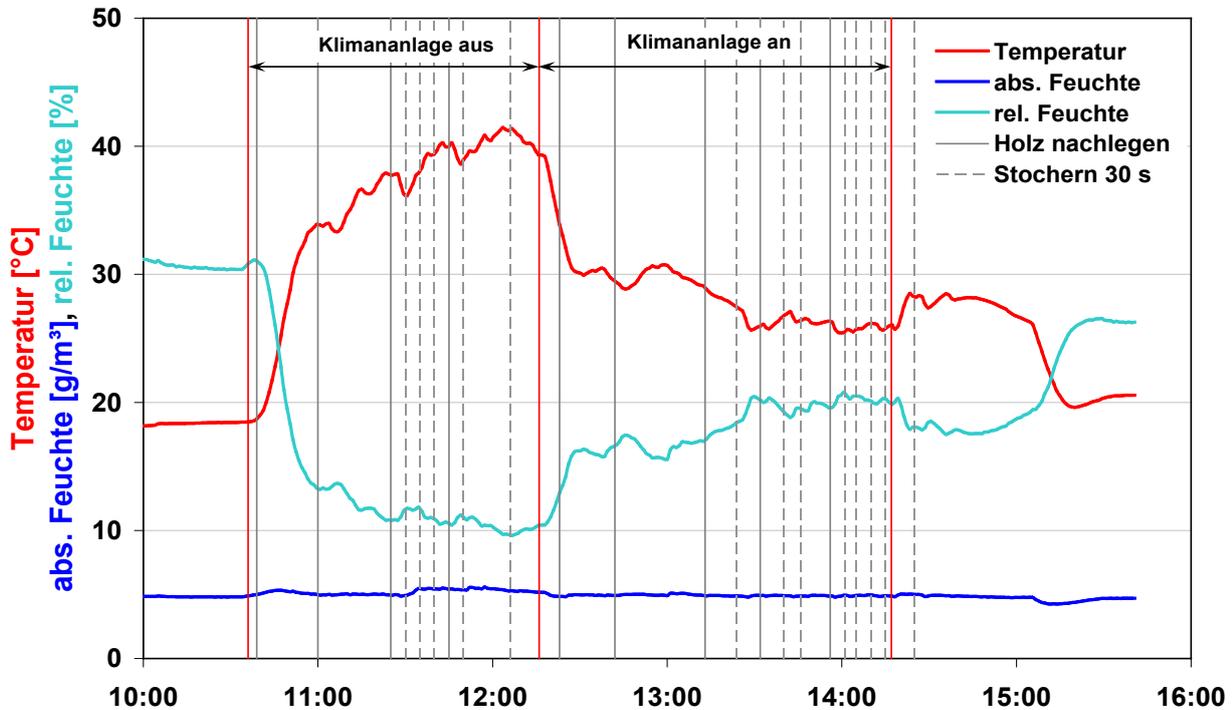
Abbildung 62: Fotos des Ofens, des Kamins und der Einhausung



Messergebnisse Kaminofenuntersuchungen

Die Klimabedingungen im Raum während der Kaminofen-Partikelfreisetzung sind für die Untersuchungen im ersten Teil in Abbildung 63 dargestellt.

Abbildung 63: Klimabedingungen im Prüfraum während der Kaminofenmessungen (Untersuchungsabschnitt 1)



Es wird deutlich, dass sich ohne Betrieb der Klimaanlage hohe Temperaturen (rote Linie) bis max. 41,5 °C einstellen ($\bar{\Delta} 35,2 \pm 6,4$ °C), welche für eine Probandenexposition nicht zuträglich wäre. Mit Betrieb der Klimaanlage (maximale Kühlleistung) wird eine Reduzierung der Temperatur auf $\bar{\Delta} 28,5 \pm 2,7$ °C (gesamter Zeitraum mit einer konstanten Temperatur ab etwa 13:30 Uhr von $\bar{\Delta} 26,1 \pm 0,4$ °C) erreicht. Auch dieses Temperaturniveau wäre für eine Probandenexposition ggf. noch zu hoch. Die Feuchtigkeitswerte zeigen keinerlei Auffälligkeiten. Das Nachlegen von Holz (durchgezogene vertikale graue Linie) oder Stochern (gestrichelte vertikale graue Linie) zeigten keine deutlichen Effekte auf die Temperatur oder Feuchte im Prüfraum.

Anzahlkonzentration, –größenverteilung und lungendeponierbare Oberfläche

Die Anzahlkonzentration im sub-mikronen Größenbereich lag im Mittel bei 116.000 #/cm³ (FMPS) bzw. 88.000 #/cm³ (SMPS), mit Spitzenwerten um 350.000 #/cm³ direkt nach dem Anfeuern ohne Betrieb der Klimaanlage. Mit Betrieb der Klimaanlage ergaben sich Konzentrationen von etwa 40.000 #/cm³ für FMPS bzw. 34.000 #/cm³ für SMPS. Die unterschiedlichen Konzentrationen zwischen FMPS und SMPS ergeben sich aus der unterschiedlichen Zeitauflösung und des nicht vergleichbaren erfassten Partikelgrößenbereich der Messgeräte. Der Maximalwert lag bei 120.000 #/cm³. Die Spitzenwerte beziehen sich nur auf FMPS-Werte, da hier die zeitliche Auflösung wesentlich größer ist als beim SMPS. Der Modalwert der Größenverteilung lag bei ca. 20 nm mit sehr geringen Anteilen von Partikeln > 100 nm (Abbildung 64, Abbildung 65). Durch die Kühlung der Raumluft mit der Klimaanlage ergeben sich leichte Verschiebungen im Größenspektrum (vermutlich Kondensationseffekte) der sub-mikronen Partikel zu höheren Durchmessern bei gleichzeitig deutlich verringerter Gesamtzahl (Verdünnungseffekt durch Ansaugen von Umgebungsluft) (Abbildung 64, Abbildung 65, Abbildung 66).

Im Größenbereich des APS fanden sich ohne Betrieb der Klimaanlage lediglich einige leicht erhöhte Werte für die Anzahlkonzentration wieder. Somit liegen die Partikelemissionen überwiegend im sub-mikronen Bereich, bei geringer Anzahlkonzentration und schließlich entsprechend auch geringen (im Vergleich zu den

Quellen Toaster, Braten, Kerzen) Partikeloberflächenkonzentrationen von \varnothing 183 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ ohne Klimaanlage und \varnothing 114 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ mit Klimaanlage, der Maximalwert liegt bei 450 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ (Abbildung 66).

Abbildung 64: Zeitverlauf der Partikelanzahlkonzentrationen während der Kaminofenmessungen

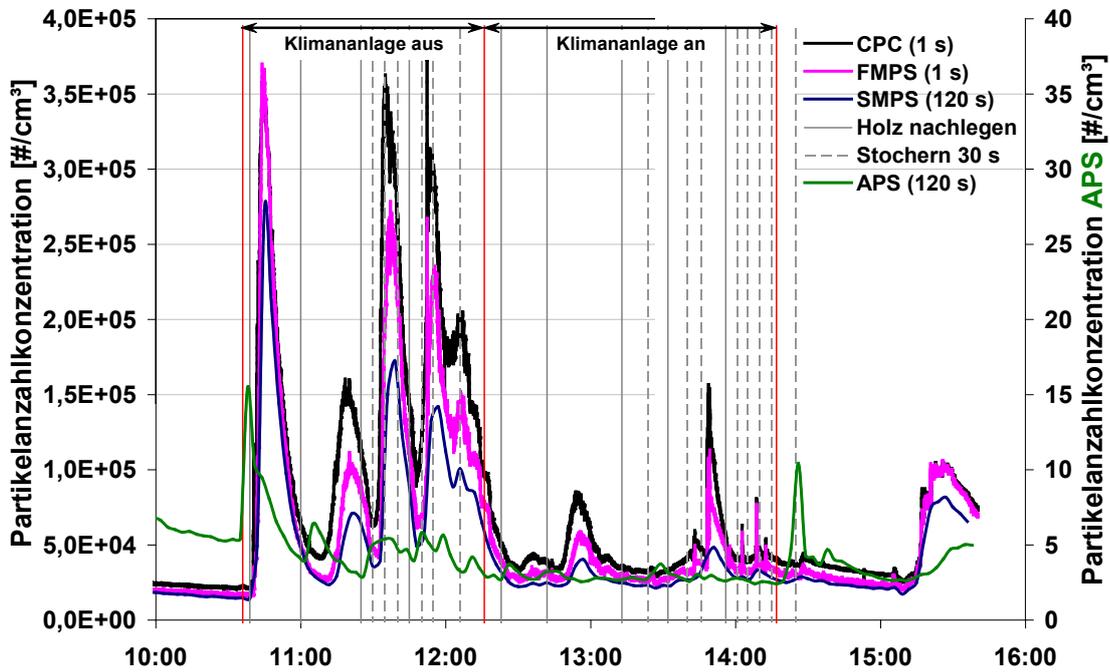


Abbildung 65: Anzahlgrößenverteilung (sub-mikron) der Kaminofenmessungen

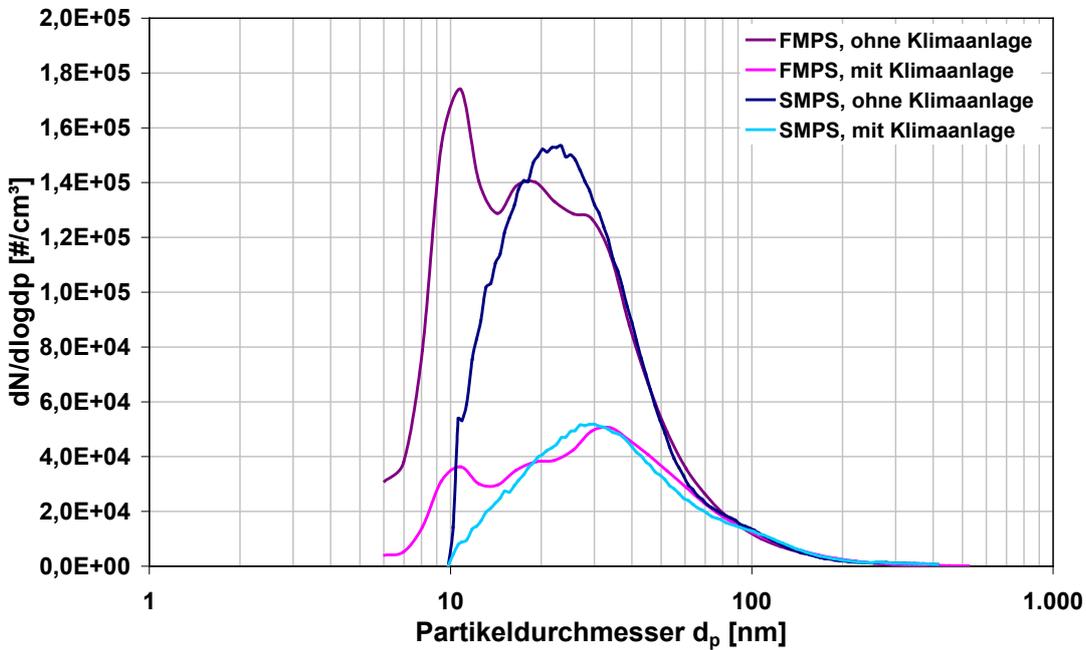
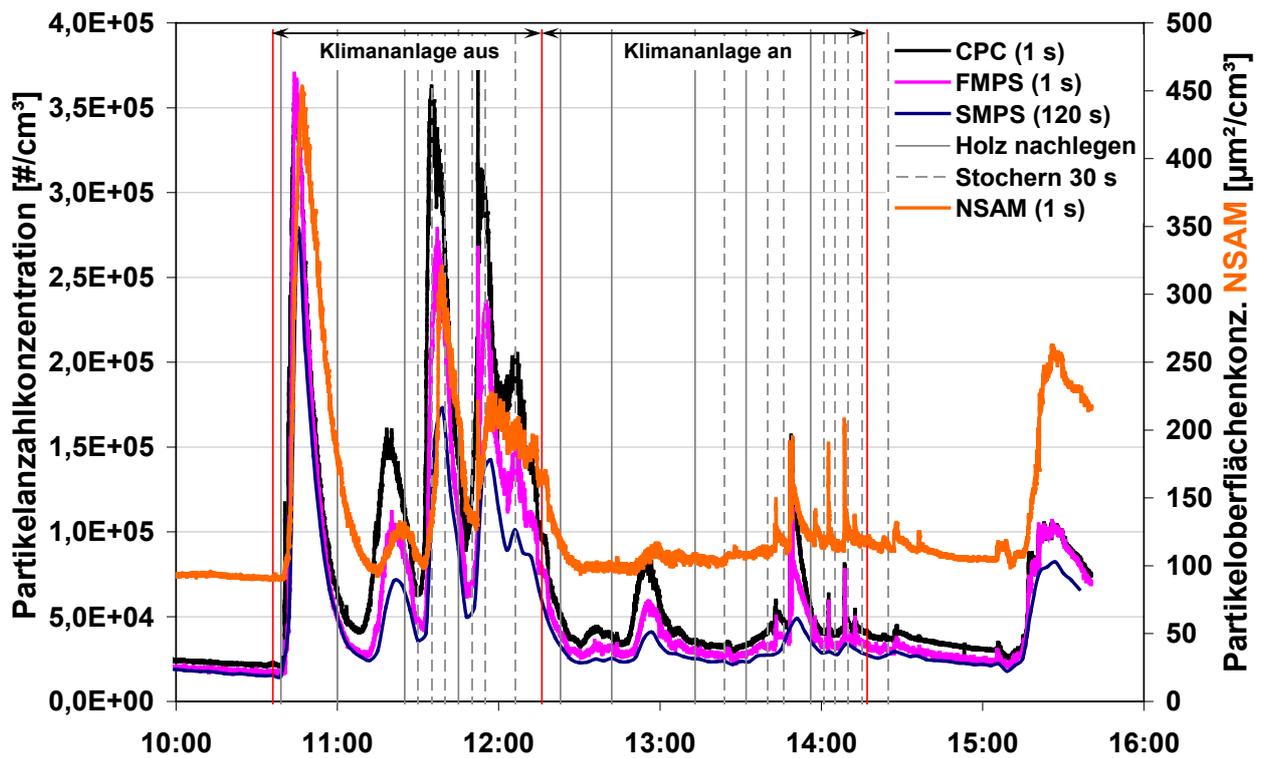


Abbildung 66: Partikelanzahl- und -oberflächenkonzentrationen der Kaminofenmessungen



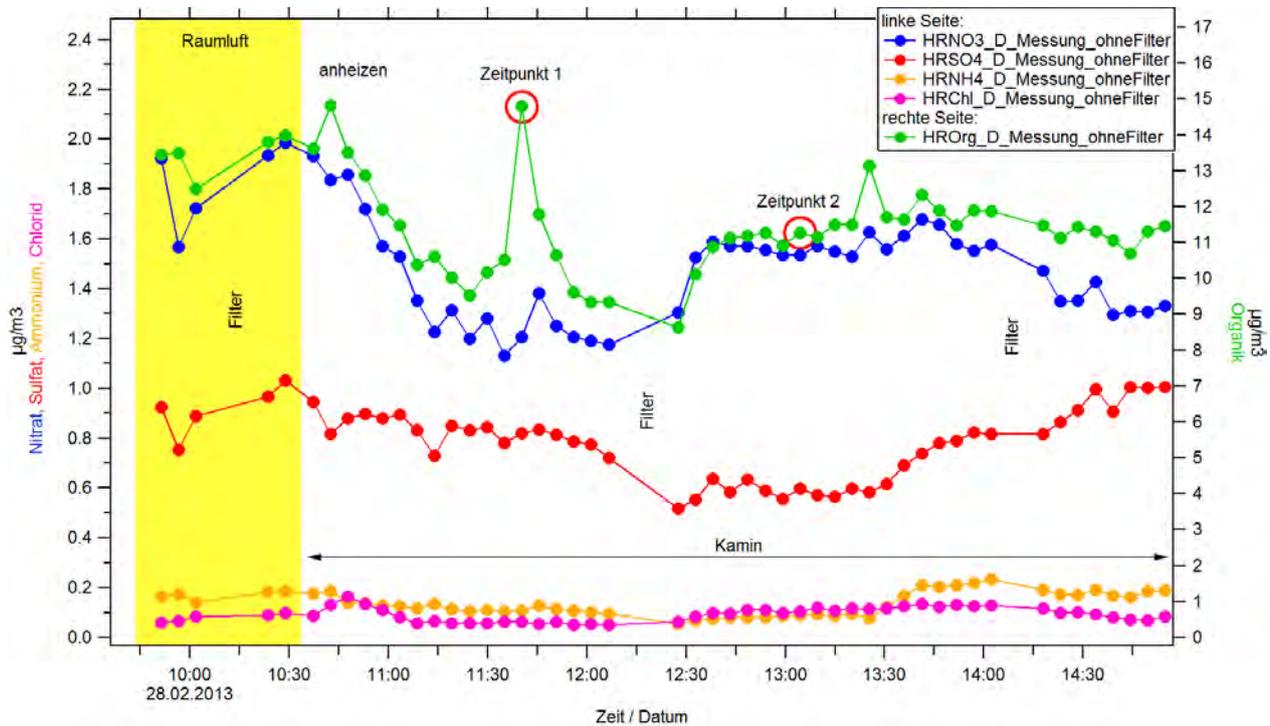
Gasförmige organische Komponenten

Mit dem PTR-MS- Detektor wurde zunächst bei „unbelasteter“ Hallenluft und dann während des Kaminofenbetriebes mit und ohne Klimaanlage sowie jeweils mit und ohne Stochern ein Scan über die Massenzahlen 21-200 durchgeführt. Im Anschluss an diesen Vergleich wurde erneut ein Scan gezielt über die gegebenenfalls gegenüber der Hallenluft mindestens 4-fach erhöhten Massen durchgeführt. Für die Messungen wurde jeweils nach 15 Minuten während eines Brennzykluses (= Abbrand eines mittelgroßen Holzscheites etwa 30 Minuten) eine Probe in einen Nalophanbeutel gezogen und direkt im Anschluss am PTRMS vermessen. Dabei zeigten sich bei der Versuchsanordnung mit Stochern und ohne Stochern sowie mit Klimaanlagebetrieb ohne Stochern drei Massenzahlen, MZ 39 (\emptyset Hallenluft / Probe = 12 ppb / 38 ppb), MZ 41 (\emptyset Hallenluft / Probe = 16 ppb / 47 ppb) und MZ 43 (\emptyset Hallenluft / Probe = 13 ppb zu 26 ppb) gegenüber der Hallenluft leicht erhöht. Die erfassten Konzentrationen liegen jedoch in sehr niedrigen Konzentrationen vor. Die Auswertung dieser Massenzahlen mit der MS-Datenbank ergab keine plausiblen Verbindungen, welche im Zusammenhang mit dem Abbrennen von Holz entstehen könnten.

Partikelgebundene chemische Inhaltsstoffe

In Abbildung 67 ist der zeitliche Verlauf der Konzentrationen von Organik, Nitrat, Sulfat, Ammonium und Chlorid abgebildet. Diese Zeitreihen wurden aus den W-Modus-Daten der PIKA-Ergebnisse berechnet.

Abbildung 67: Konzentrationszeitreihen während der Kaminofenversuche von Organik (grün), Nitrat (blau), Sulfat (rot), Ammonium (orange) und Chlorid (pink) berechnet mit der AMS Auswertesoftware.

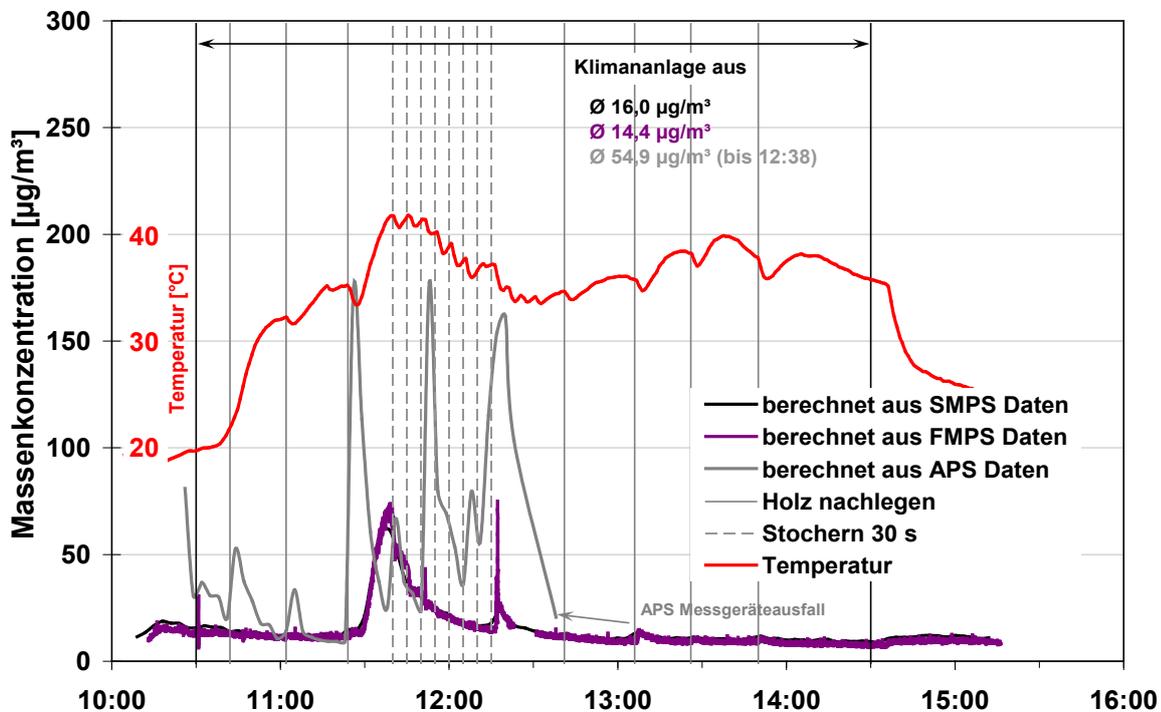


Es wurden folgende unterschiedliche Zeiträume getrennt betrachtet (Raumluft, Kamin, Probenahme auf Filter). Die als Zeitpunkt 1 und 2 markierten Punkte wurden exemplarisch als Einzeluntersuchungspunkt herausgegriffen. Es zeigt sich, dass die Konzentrationen während des Versuches insgesamt abnehmen. Die erhöhten Konzentrationen vor dem Anheizen des Kamins (10:36 h) sind durch die Vorbereitungsaktivitäten (Probenahmesondenplatzierung im Raum etc.) verursacht. Insgesamt zeigt sich während der Kaminmessungen erwartungsgemäß der geringen Anzahlkonzentration nur wenig Variation der fünf Hauptelementgruppen. Auch lassen sich die unterschiedlichen Szenarien wie Stochern bzw. Tür öffnen und Nachlegen von Feuerholz vermutlich aufgrund der Sogwirkung des Kamins nicht eindeutig zeigen.

Massenkonzentrationen (gravimetrisch)

Für die Filterbelegung wurden die Probenahmen an einem separaten Messtag über einen Zeitraum von ca. 4 h ohne Betrieb der Klimaanlage durchgeführt. Die Auswertung der Filterprobe ergab gravimetrisch eine durchschnittliche Massenkonzentration von $59 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (PM_{2.5}-Fraktion auf PTFE-Filter). Die Wägung der PM₁-Fraktion auf Quarz-Filter ergab keine erfassbare Massenkonzentration, vermutlich wegen Quarzfaserverlusten während der Filter-Handhabung. Bezug nehmend auf die SMPS-, FMPS- und APS-Daten und einer angenommenen Dichte von $1,6 \text{ g}/\text{cm}^3$ wurden aus der Partikelanzahlkonzentration und –größenverteilung während der Filterbelegung die Massenkonzentrationen berechnet. Dabei ergab sich eine durchschnittliche Massenkonzentration von $16,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (SMPS-Daten) bzw. $14,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (FMPS-Daten) für den jeweils erfassten Anteil der sub-mikronen Partikel (Abbildung 68). Mit diesen Geräten wurde lediglich einmal ein markanter Anstieg der Massenkonzentration nach Holzzuführung gemessen, ansonsten konnten lediglich leichte Zunahmen beobachtet werden.

Abbildung 68: Zeitverlauf der errechneten Massenkonzentrationen während der Filterbelegung Kaminofen, zusätzlich ist der Temperaturverlauf eingezeichnet



Im Gegensatz dazu zeigten sich mit dem APS mehrfach, aber in nicht reproduzierbarer Weise, deutliche Zunahmen der Massenkonzentration. Vergleicht man die mittels APS gemessenen Anzahl- bzw. Massengrößenverteilungen vor und nachdem Holz nachgelegt wurde, ist erkennbar, dass eine kurzzeitige Konzentrationsspitze im Prüfraum von über $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ vor allem durch Partikel mit aerodynamischem Durchmesser $> 2,5 \mu\text{m}$ hervorgerufen wurde (Abbildung 69, Abbildung 70). Die erhöhte Massenkonzentration im mikronen Bereich ist somit vermutlich mit Ascheaufwirbelung zu erklären.

Abbildung 69: Massengrößenverteilungen bei den Kaminofenversuchen der APS-Scans vor eines durch Nachlegen von Holz erzeugten Konzentrationsanstieges

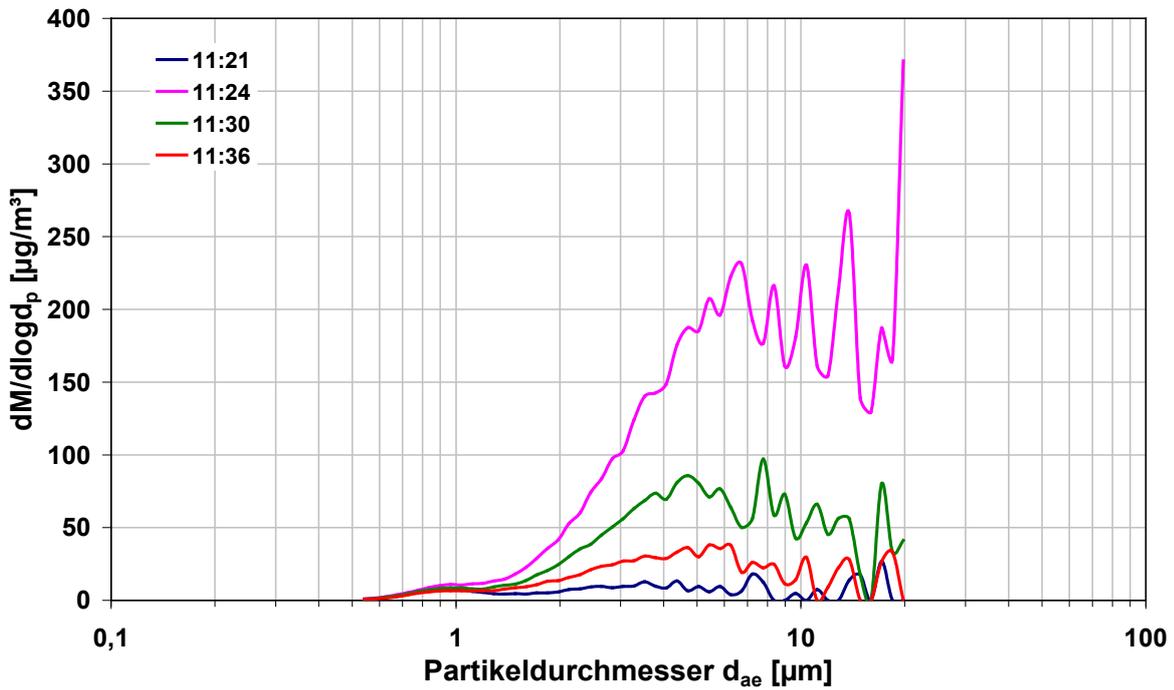
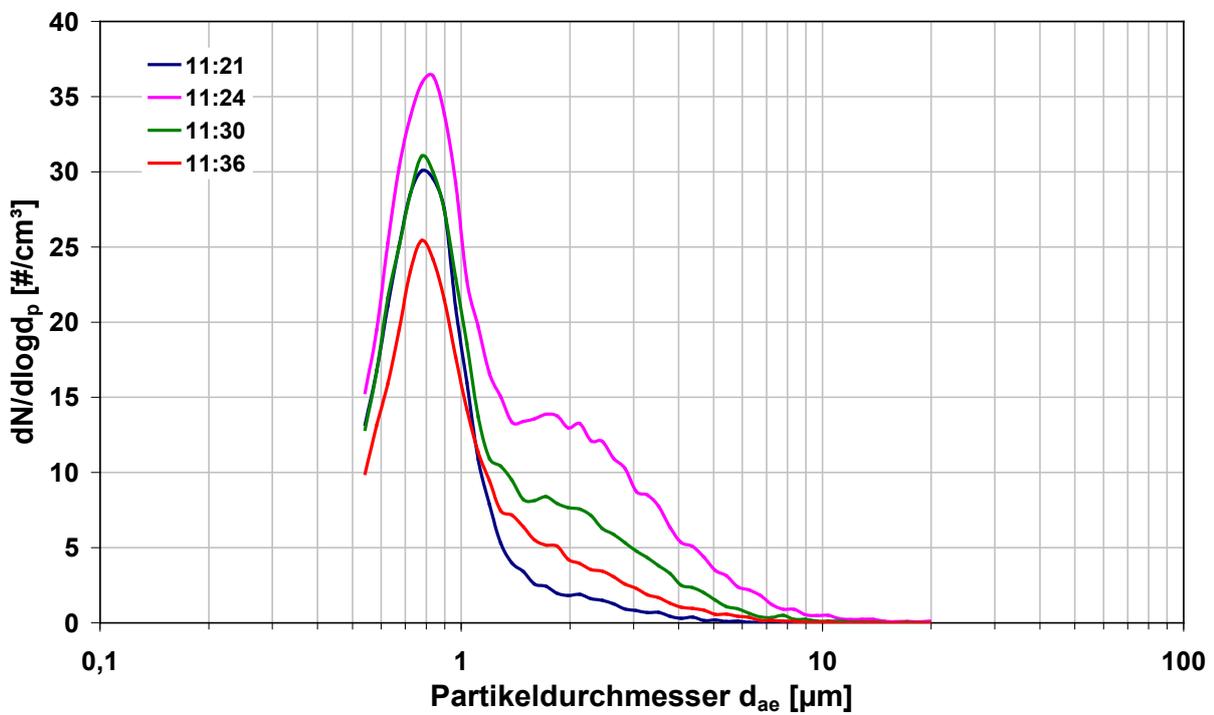


Abbildung 70: Anzahlgrößenverteilungen der Kaminofen-APS-Scans vor eines durch Nachlegen von Holz erzeugten Konzentrationsanstieges



ROS-Bildungspotential

Die während der Filterprobenahme simultan mittels Particle Into Liquid sampler (PILS) gesammelten Partikel-Suspensionsproben wurden mit der ESR-Methode auf ihr Radikalgenerierungspotential untersucht. Es ergab sich weder ein signifikantes Hydroxylradikalbildungspotential noch eine Oberflächenreaktivität.

Elementarer und organischer Kohlenstoff (Filterproben)

Obwohl die gravimetrische Massenbestimmung des Quarz-Filters nicht möglich war, konnte aufgrund der Verfärbung des Filters darauf geschlossen werden, dass die Probenahme ordnungsgemäß durchgeführt wurde. Daher wurde der Filter auf den Gehalt an elementarem und organischem Kohlenstoff untersucht. Mit dem beprobten Volumen von 9,3 m³ ergaben sich Konzentrationen von 16,6 (OC) bzw. 2,2 (EC) µg/m³. Unter Heranziehung der aus den APS-Spektren ermittelten „PM2.5“-Massenkonzentration von 54,9 µg/m³ ergeben sich somit Kohlenstoffanteile von 30 % (EC) bzw. 4 % (OC).

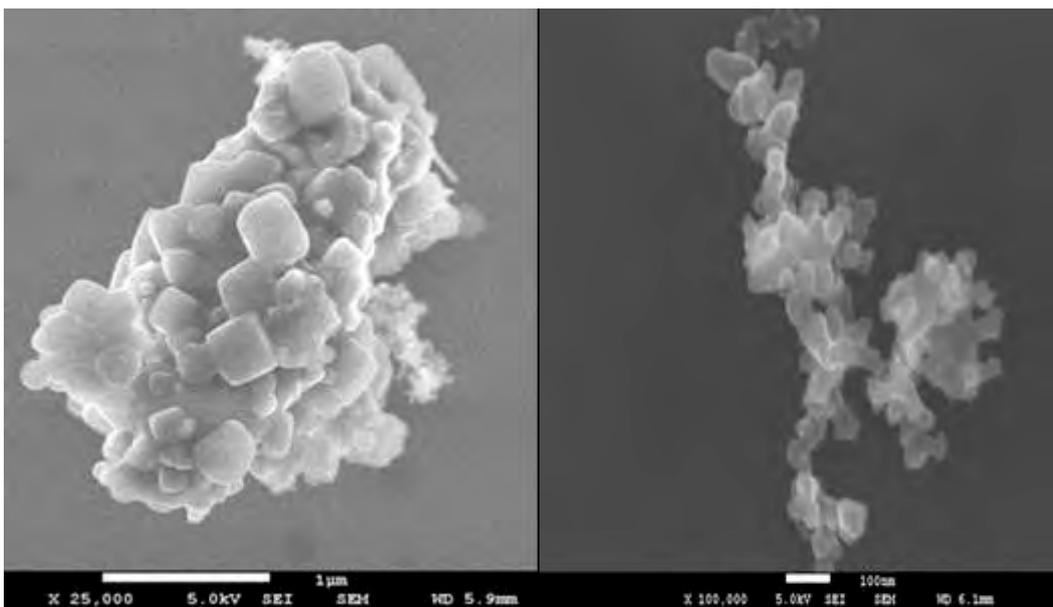
Elemente in Partikeln (NAS-Proben/TXRF)

Während der Filterprobenahme wurden mit dem Nanoaerosol-Sammler (NAS) Proben auf Glaskohlenstoffträgern für die Elementanalyse mittels TXRF und REM-Untersuchungen gezogen. Im TXRF-Spektrum waren im Vergleich zu dem zuvor vermessenen unbelegten Träger lediglich geringfügige Erhöhungen bei den ubiquitär vorhandenen Elementen Eisen, Zink und Kalzium zu erkennen. Die für die Verbrennung von Biomasse zu erwartende Freisetzung von Kalium war nicht nachweisbar.

Partikelmorphologie (NAS-Proben/REM)

Im Rasterelektronenmikroskop war, wie aufgrund der relative geringen Massen- und Anzahlkonzentrationen zu erwarten, insgesamt nur eine dünne Belegung mit Partikeln erkennbar. Abbildung 71 zeigt zwei unterschiedliche Partikel, die aufgrund ihrer Morphologie und Größe zum einen als mineralisches, zum anderen als Ruß-Partikel identifizierbar sind.

Abbildung 71: Kaminofen: REM-Aufnahmen eines mineralischen Partikels (links) bzw. Ruß-Agglomerats (rechts).



3.2.7.2 Zusammenfassung Kamin

Die Ergebnisse zeigen eine im Vergleich zu den bisherigen Quellen relativ geringe Massen- und Anzahlkonzentration im Prüfraum. Während des regulären Abbrandes mit geschlossener Kamintür waren keine deutlich erhöhten Emissionen in dem Raum feststellbar. Bei regulärem Betrieb des Kaminofens ist unter den vorlie-

genden Randbedingungen (gut ziehender Kamin, ausreichend Frischluftzufuhr in den Raum aus der Umgebung) keine relevante Exposition der im beheizten Raum befindlichen Personen zu erwarten. Auch typische Eingriffe in den Brennablauf führen nur zu kurzzeitigen Erhöhungen der Partikelkonzentration. Extrem ungünstige Bedingungen, wie sie bei schlechtem Kaminzug, Fehlbefüllung des Brennraums und unzureichender Frischluftzufuhr auftreten können, sind nicht repräsentativ genug, um sinnvoll als Grundlage für die Beurteilung von möglichen Gesundheitseffekten herangezogen werden zu können.

3.2.7.3 Fazit

Lediglich bei Eingriffen in den Brennvorgang wie Holz nachlegen und Stochern treten im Vergleich zu den bereits für die Expositionsuntersuchung ausgewählten anderen Prozessen geringfügig erhöhte Partikelkonzentrationen in nicht reproduzierbarer Weise auf. Für die Probandenexposition im Rahmen des Projektes ist somit das Einstellen einer für alle Probandengruppen annähernd gleichen, genügend gegenüber der Raumluft erhöhten Partikelanzahl- bzw. Massenkonzentration nicht gewährleistet gewesen, so dass der Kamin als potentielle Quelle für die Probandenexposition ausgeschlossen wurde.

3.2.8 Staubsaugen

3.2.8.1 Geräte, Materialien, Vorgehensweise

Für die Untersuchung des Staubsaugens als potentieller Emissionsquelle wurde ein haushaltsüblicher „Flüster“-Staubsauger mit Zyklontechnologie, also ohne Staubauffangbeutel, verwendet. Bei den Untersuchungen war Ziel nicht die Aufwirbelung von Staub durch die mechanische Belastung des zu saugenden Untergrundes, sondern die Emissionen zu erfassen, die mit der Abluft des Saugers verbunden sind. Entsprechend wurden, um realitätsnahe, aber trotzdem reproduzierbare Prüfbedingungen zu gewährleisten, folgende Randbedingungen festgelegt:

- ▶ Es wurden sowohl die Eigen-Emissionen des Staubsaugers bei Betrieb ohne Staubbeladung als auch die Emissionen, die mit Staubbeladung auftreten, untersucht.
- ▶ Die bei den normalen Staubsaugen von Teppichen und Böden unvermeidbare Aufwirbelung von Staub wurde minimiert.

Daraus resultierte folgende Vorgehensweise:

- ▶ Der Saugprozess wurde mit dem sauberen Gerät einmal mit und einmal ohne eingesetzten HEPA-Filter untersucht.
- ▶ Für die Messung mit Staubbeladung wurde eine definierte Menge an Teststaub bzw. Hausstaub in den Zyklon gegeben. Dies vermied eine willkürliche Verteilung von Hausstaub durch unvollständiges Ansaugen. Während des Saugprozesses wurde zusätzlich mehrmals ein grobkörniger Staub über die Ansaugdüse in den Sauger eingebracht, um die übliche mechanische Belastung des Filtersystems zu simulieren. Auch diese Messung wird jeweils mit und ohne HEPA-Filter durchgeführt.

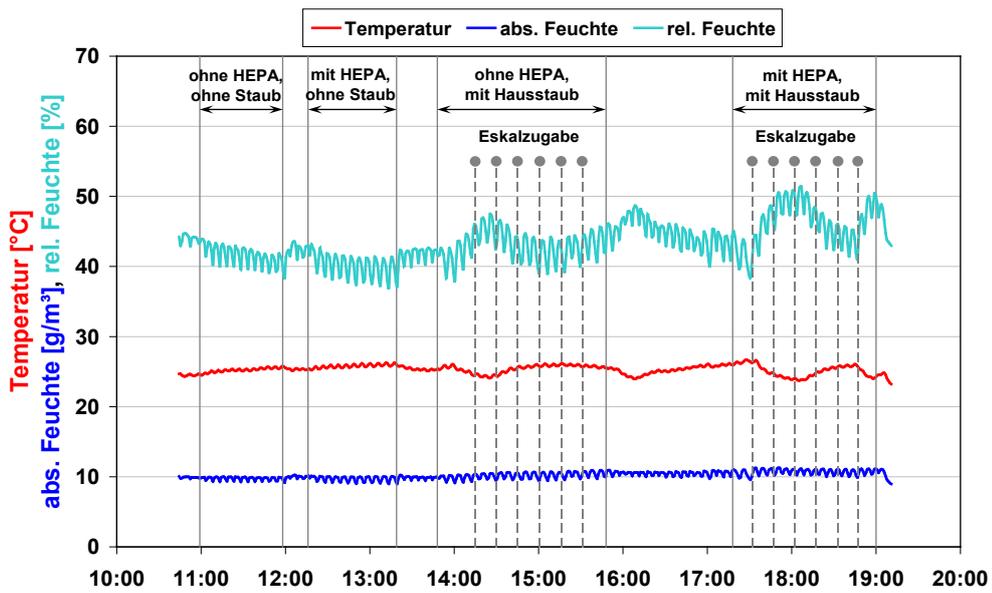
Der Hausstaub wurde einer Mischprobe von diversen, unterschiedlich belasteten und auf die Fraktion $< 63 \mu\text{m}$ gesiebten Hausstaubproben entnommen. Diese Mischprobe stand nur in einer Gesamtmenge von 250 g zur Verfügung; eine Kalkulation der benötigten Mengen unter Einbeziehung von Expositionsversuchen ergab, dass je Messzyklus ca. 20 g Hausstaub vorgelegt werden konnten. Für den zusätzlich anzusaugenden gröberen Staub wurde ein Kalziumkarbonat-Staub mit bekannter Partikelgrößenverteilung gewählt (ESKAL 300, Modalwert $3 \mu\text{m}$). Je Zyklus wurden sechs Chargen von jeweils 50 g dieses Staubes aus einem Becherglas heraus angesaugt.

Die Untersuchungen wurden nicht wie die übrigen Charakterisierungsmessungen im Prüfraum sondern im Expositionsraum durchgeführt (Abbildung 72). Abbildung 73 zeigt die während der Versuche herrschenden Klimabedingungen; die Klimatisierung erfolgte über die in der Decke angebrachte Klimaanlage bei einer Solltemperatur von $24 \text{ }^\circ\text{C}$ und minimaler Gebläseeinstellung. Weiterhin war die Zu-/Abluftanlage ebenfalls auf minimale Austauschrate eingestellt.

Abbildung 72: Fotos Expositionsraum, Messgeräte und Staubsauger



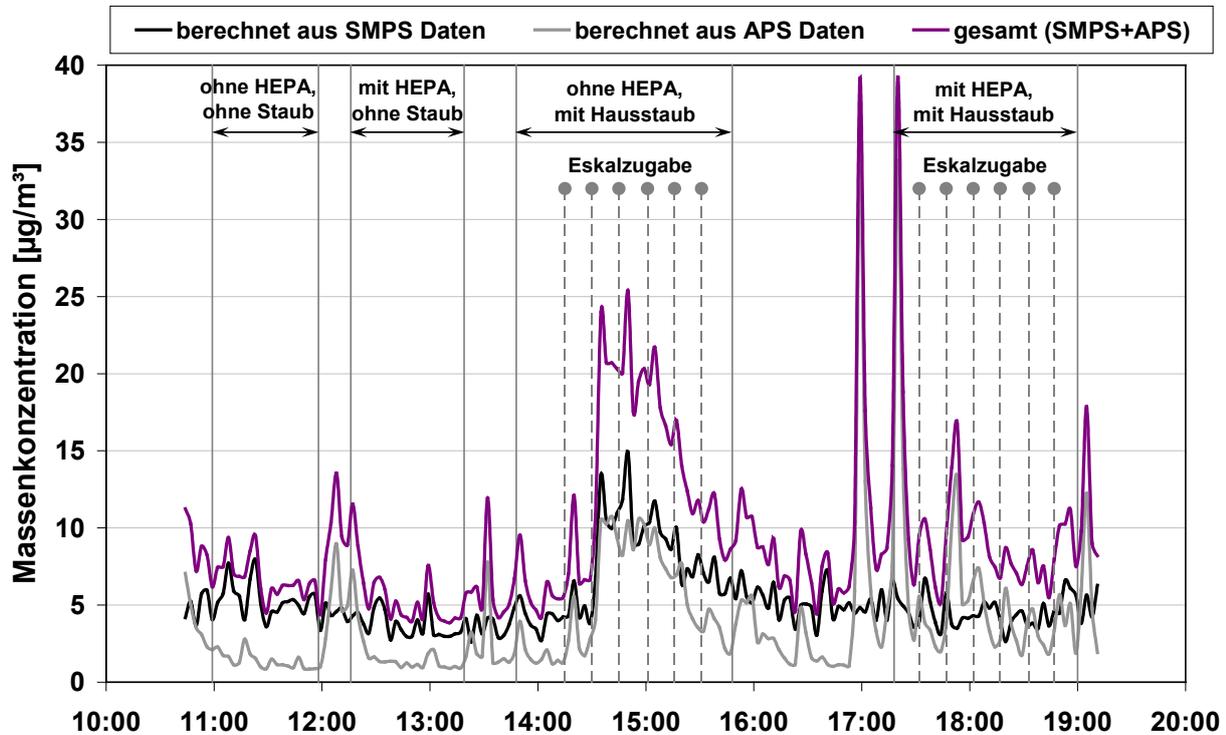
Abbildung 73: Klimabedingungen im Prüfraum während der Staubsaugermessungen



3.2.8.2 Messergebnisse

Bei den Messungen mit den online-Geräten zeigte sich eine insgesamt geringe Konzentrationserhöhung im Prüfraum. Die berechneten Massenkonzentrationen bewegten sich im Bereich der normalen Hintergrundbelastung ($< 25 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Einzelne Peak-Signale traten auf, wenn bei der Eskal-Dosierung ungewollt Staub aufgewirbelt wurde (Abbildung 74).

Abbildung 74: Berechnete Massenkonzentrationen für die Messzyklen des Staubsaugers



Massenkonzentrationen (gravimetrisch)

Aufgrund der Befunde der online-Messverfahren wurde auf eine Filter-Belegung bzw. PILS-Probenahme verzichtet, da eine sinnvolle Filterbeladung nicht mit angemessenen Probenahmezeiten realisierbar war.

Anzahlkonzentration und -größenverteilung

Abbildung 75 zeigt die Verläufe der Anzahlkonzentrationen für die durchgeführten Messungen. Auf den ersten Blick deutlich ist die Wirkung des HEPA Filters, der sowohl die Eigenemission des unbefüllten Saugers als auch die Emissionen von vordosiertem Hausstaub bzw. zudosiertem Eskal effektiv reduziert. Die höchsten Emissionen an sub-mikronen Partikeln wurden im Betrieb des unbefüllten Saugers ohne HEPA-Filter gemessen. Die Gesamtpartikelanzahl (gemessen mit CPC) lag dabei anfangs bei ca. $1,5 \times 10^5$ Partikel/ cm^3 und sank im Verlauf des Versuchs um ca. 20 % ab. Auch die mit dem FMPS (Bereich ab 5,6 nm) gemessene Partikelanzahl lag bei ca. $1,0 \times 10^5$ Partikel/ cm^3 . Mit dem SMPS dagegen (Bereich ab 14,3 nm) wurden deutlich weniger Partikel gefunden. Eine Kontrollrechnung mit den FMPS-Daten unter Ausschluss der Partikel $< 14,3$ nm bestätigte diesen Befund. Die Eigenemission des Saugers wurde somit von Nanopartikeln im Größenbereich um 10 nm dominiert. Dies geht auch aus den Größenverteilungen hervor (Abbildung 76). Beim staubbeladenen Sauger, ohne HEPA-Filter, wurden im Prinzip gleiche Verhältnisse auf etwas geringerem Konzentrationsniveau beobachtet. Zusätzlich erfolgte hier noch eine Erhöhung der Partikelanzahl im mikronen Größenbereich des APS, vornehmlich durch die Eskal-Dosierung.

Abbildung 75: Verlauf der Partikelanzahlkonzentration während der verschiedenen Staubsaugmessungen

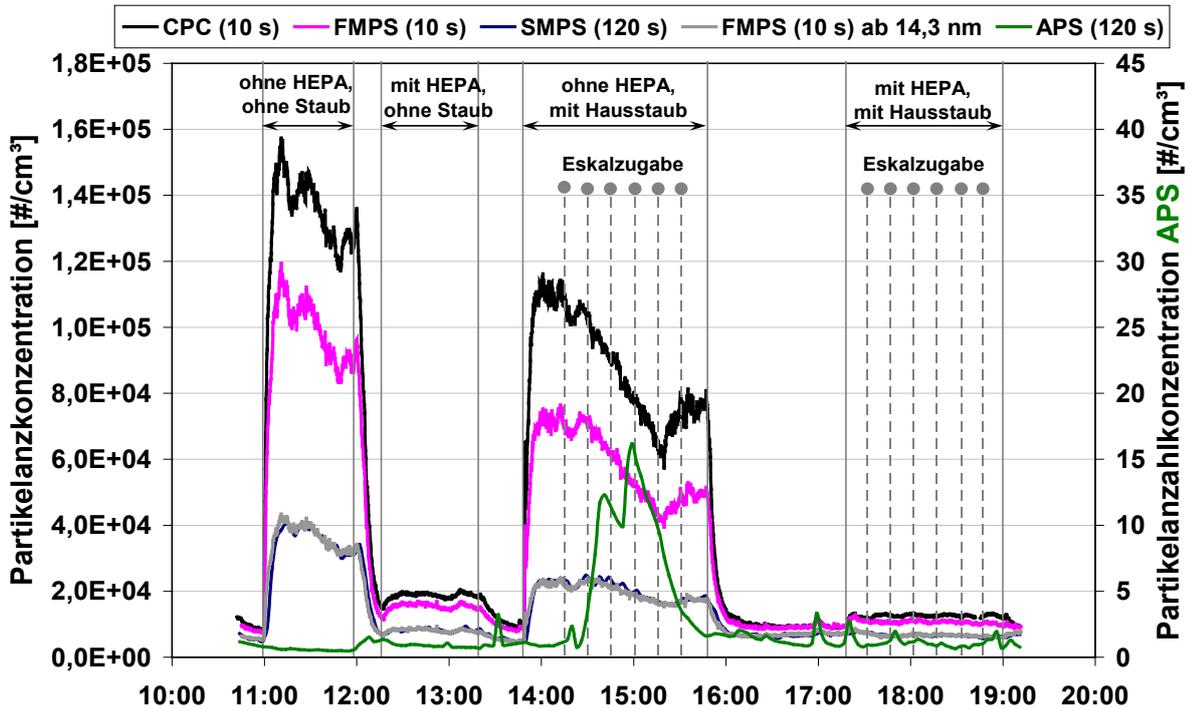
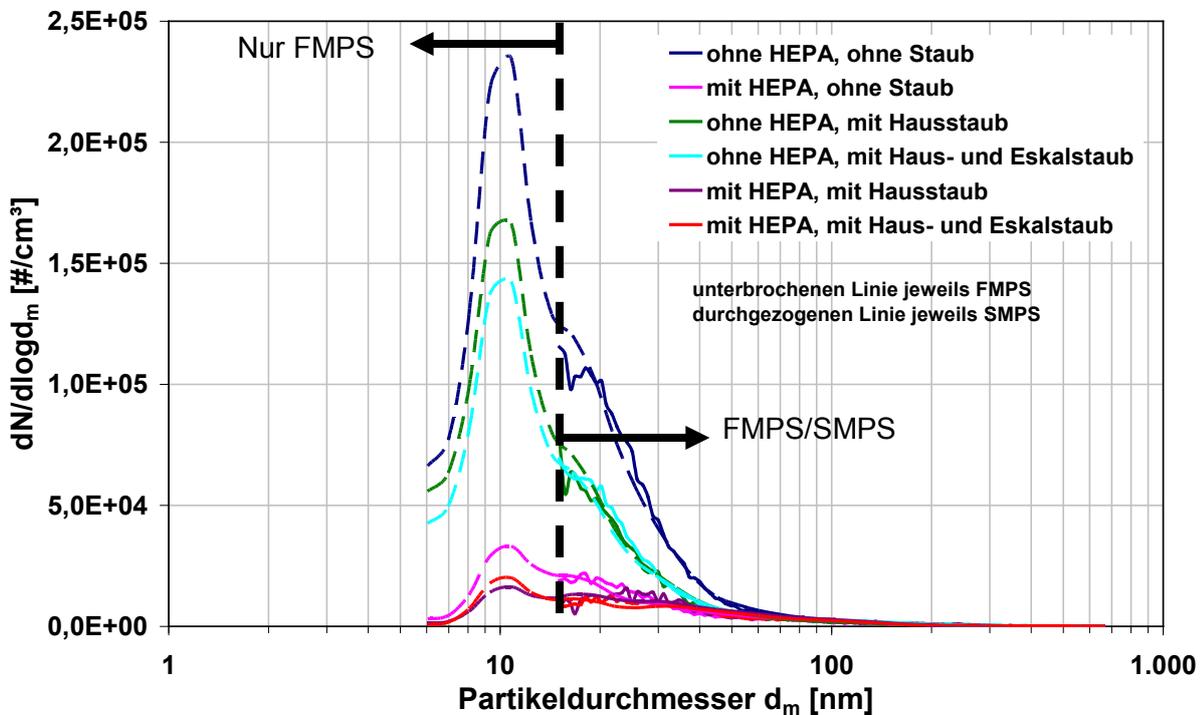


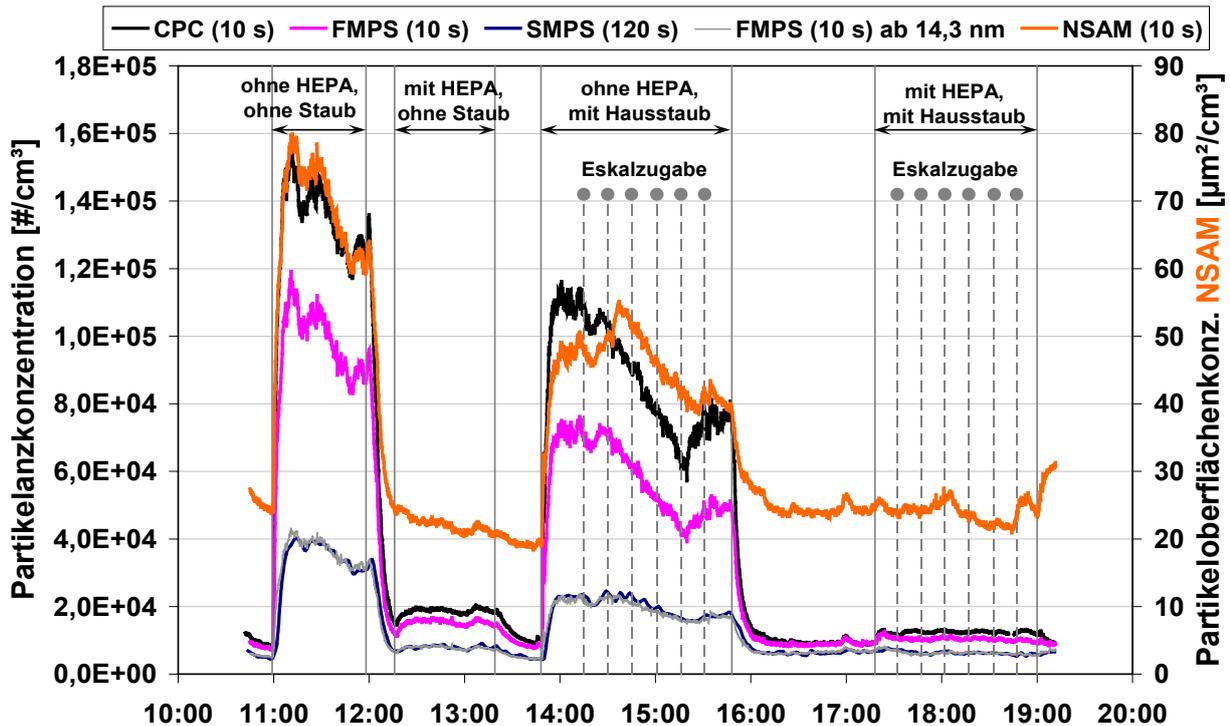
Abbildung 76: Mittlere Größenverteilungen (SMPS und FMPS) während der verschiedenen Staubsaugmessungen



Lungendeponierbare Oberflächenkonzentration

Die lungendeponierbare Oberfläche war mit Werten von maximal $80 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ im Vergleich zu den anderen untersuchten Quellen um einen Faktor von ca. 50 geringer. Mit HEPA-Filter wurden nur Werte entsprechend der Hintergrundbelastungen gefunden, ohne HEPA-Filter waren die Werte ca. zwei- bis dreifach erhöht (Abbildung 77).

Abbildung 77: Verlauf der Partikelanzahl und Oberflächenkonzentrationen während der verschiedenen Staubsaugermessungen



Partikelgebundene chemische Inhaltsstoffe

Zusammen mit den anderen online-Messgeräten zur Bestimmung der Partikelanzahlkonzentration und -größenverteilung wurde das AMS bei den Staubsauger-Versuchen eingesetzt. Nennenswerte Konzentrationen für die mit dem AMS gemessenen chemischen Verbindungen zeigen sich nur für die Fraktion "Organics". Während der Messungen mit Escal-Staub steigen die Konzentrationen zwischenzeitlich auf ca. $3,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ansonsten liegen die Werte recht konstant bei durchschnittlich $2,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Abbildung 78). Die Größenverteilung ergibt einen Peak bei ca. 300 nm. Neben den "organics" findet sich mit vergleichbarer Größenverteilung noch Sulfat. Auch bei der Größenverteilung gibt es über die Zeit kaum eine Veränderung (Abbildung 79).

Abbildung 78: Verlauf der mit dem AMS bestimmten Hauptstoff-Konzentrationen während der Staubsaugermessungen

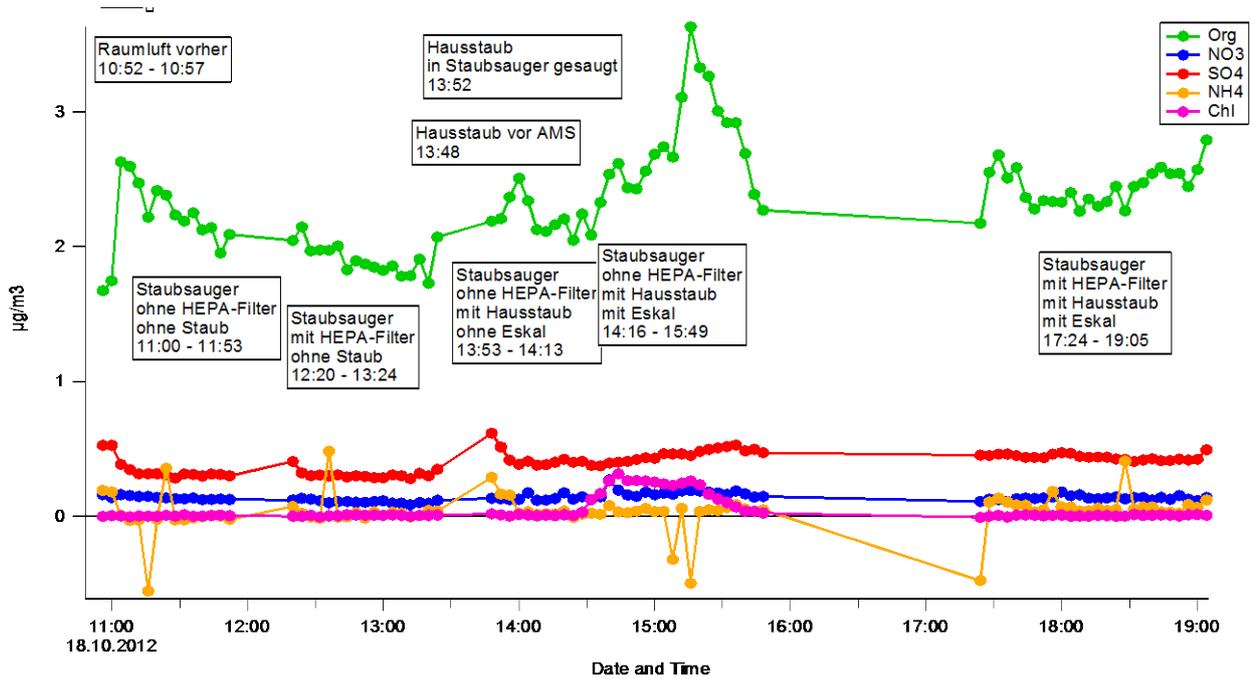
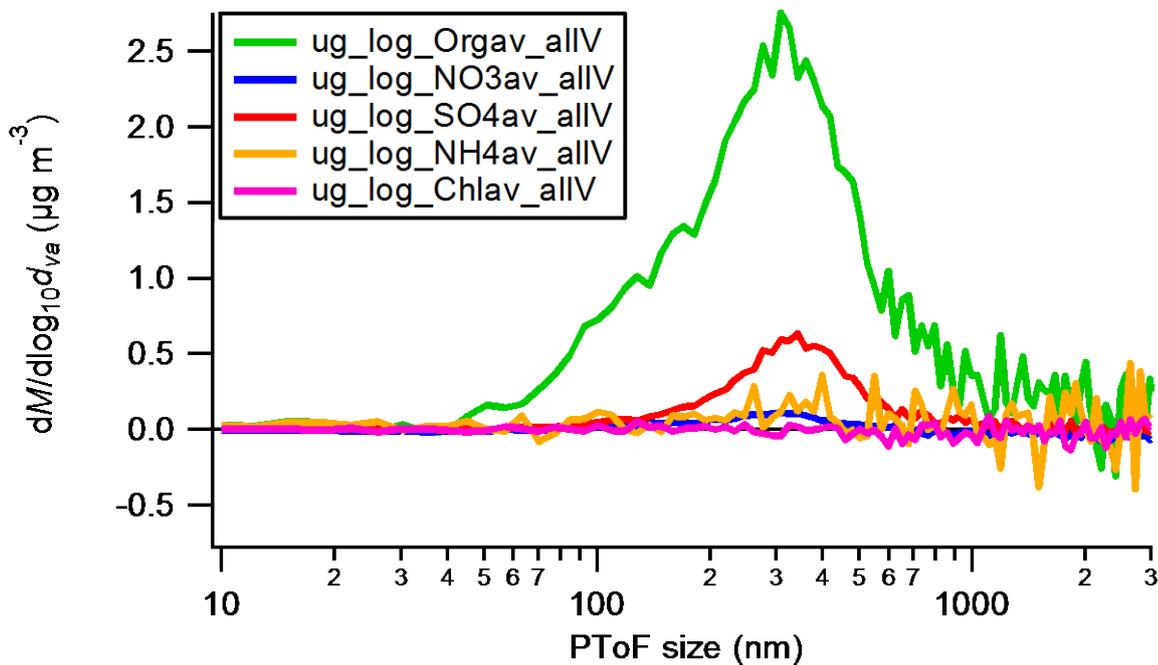


Abbildung 79: Partikelgrößenverteilung der mit dem AMS bestimmten Hauptstoff-Konzentrationen während der Staubsaugermessungen



Übrige Analysen

Bereits während der online Messungen zeigte sich, dass mit dieser Quelle und diesem Versuchsdesign keine für die sich anschließende Expositionsstudie ausreichende Partikelanzahl- und Massenkonzentrationen in reproduzierbarer Weise erzeugt werden konnte. Entsprechend wurden weitere Untersuchungen nicht durchgeführt und es liegen keine Daten für ROS-Generierungspotential, Gasförmige organische Komponenten, Elementarer und organischer Kohlenstoff (Filterproben), Elemente in Partikeln (NAS-Proben/TXRF), Partikelmorphologie (NAS-Proben/REM) vor.

3.2.8.3 Zusammenfassung Staubsaugen

Die Staubsaugermessung zeigten, dass

- ▶ im Vergleich zu den anderen untersuchten Quellen die Partikelemissionen ohne HEPA Filter mit maximal ca. 140.000 P/cm³ als moderat, mit HEPA Filter (ca. 20.000 P/cm³ entsprechend doppeltem Hintergrund-Niveau) als vernachlässigbar eingestuft werden können.
- ▶ die höchsten Partikelanzahlkonzentrationen im Betrieb ohne Staubbeladung aus der Eigenemission des Staubsaugers resultierten.
- ▶ die Eigenemission durch Partikel mit Durchmessern von 10 nm und kleiner dominiert waren (vermutlich durch Funkenerosion generierte Motoremissionen).
- ▶ sich auch die Partikeloberflächenkonzentration ohne HEPA-Filter nur geringfügig, mit HEPA-Filter nicht signifikant von typischen Hintergrundwerten unterscheidet.
- ▶ die Messungen mit dem Aerosolmassenspektrometer nur geringe Erhöhungen der Massenkonzentrationen ergaben, die vorwiegend der Gruppe „Organics“ zugeordnet wurden und ein Maximum bei ca. 300 nm aerodynamischem Durchmesser aufwiesen.

3.2.8.4 Fazit

Im Vergleich zu Kerzenabbrand, Toasten und Braten zeigten sich bei den Staubsaugen nur geringe Partikelemissionen. Als Emissionsquelle für die spätere Probandenstudie wurde dieser Prozess entsprechend ausgeschlossen. Bei bestimmungsgemäßem Gebrauch mit eingesetztem HEPA-Filter sind keine relevanten Emissionen nachweisbar, weder in Form von durchtretendem Hausstaub noch in Form von Motoremissionen. Ohne HEPA-Filter treten auch beim sauberen, nicht staubbeladenen Gerät deutliche Eigenemissionen von Partikeln auf, deren Mobilitätsdurchmesser bei ca. 10 nm liegt. Diese Emissionen sind vermutlich motorbedingt. Nicht Gegenstand der Untersuchungen und daher auch nicht berücksichtigt, wurden bei den Messungen eine Aufwirbelung von Hausstaub beim Absaugen von Böden oder Teppichen.

3.2.9 Zusatzuntersuchung (Staubsauger – Motoremissionen)

Wie in Abschnitt 3.2.8 (Staubsaugen) dargestellt, erwies sich die Quelle „Staubsaugen“ in den verschiedenen untersuchten Szenarien als nicht geeignet für eine Probandenexposition, da bei bestimmungsgemäßem Betrieb mit HEPA-Filter keine „relevante“ Partikelfreisetzung erfolgt. Ohne Filter wurden allerdings vornehmlich ultrafeine Partikel (< 20 nm) gemessen. Diese Partikel werden vermutlich durch Motoremissionen verursacht. Um dies zu bestätigen, wurden einige gezielte Untersuchungen durchgeführt, wobei möglichst auch eine Sammlung dieser Partikel auf Filtern erfolgen sollte, um damit toxikologische In-vitro-Untersuchungen durchzuführen. Um genügend Partikel sammeln zu können, muss die Partikelemission in ein möglichst kleines, aber für die Partikelsammler geeignetes Volumen hinein erfolgen. Hierfür wurde das außer Betrieb genommene Digestorium in der Probanden-Expositionskammer zur Aufkonzentrierung der Partikel genutzt. Das Volumen des Abzugs umfasst etwa ~1,4 m³. Die Öffnungen an den Glasschiebtüren wurden abgedichtet (Abbildung 80).

Abbildung 80: Untersuchungsraum für die Staubsauger-Motoremissionserfassung

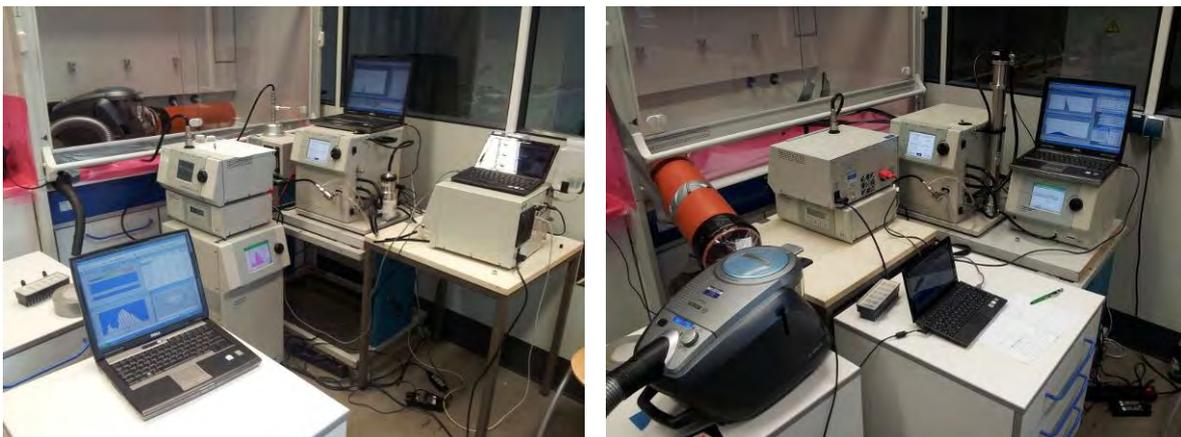


3.2.9.1 Geräte, Materialien, Vorgehensweise

Für die Durchführung der Untersuchungen zur Motorpartikelfreisetzung während des Betriebs eines Staubsaugers wurde die Abluft des Staubsaugers (Szenario 1 – Abbildung 81, rechts) in das Digestorium geleitet bzw. der komplette Staubsauger (Szenario 2 - Abbildung 81, links) darin platziert. Das im Digestorium vorliegende Aerosol wurde mittels Absaugsonden beprobt. Dabei wurde der Staubsauger jeweils ~60 min. auf maximaler Leistung unbeladen a) ohne und b) mit HEPA-Filter betrieben.

Auf eine zusätzliche Beladung mit Prüfstaub wurde verzichtet, da er zwar die Motorlast erhöht hätte, allerdings eine Kontamination der eigentlichen Motoremissionen durch die Beladung nicht auszuschließen war.

Abbildung 81: Untersuchungsaufbau für die Staubsauger-Motoremissionserfassung



links: Staubsauger im Abzug platziert, rechts: Staubsauger Abluffahne in den Abzug geleitet

Bei beiden Untersuchungszenarien wurden folgende Messungen zur Charakterisierung durchgeführt: Anzahlgrößenverteilung (FMPS, SMPS mit NanoDMA, APS), lungendeponierbare Oberflächenkonzentration (NSAM) und Morphologie (Sammlung per NAS/Auswertung mittels REM).

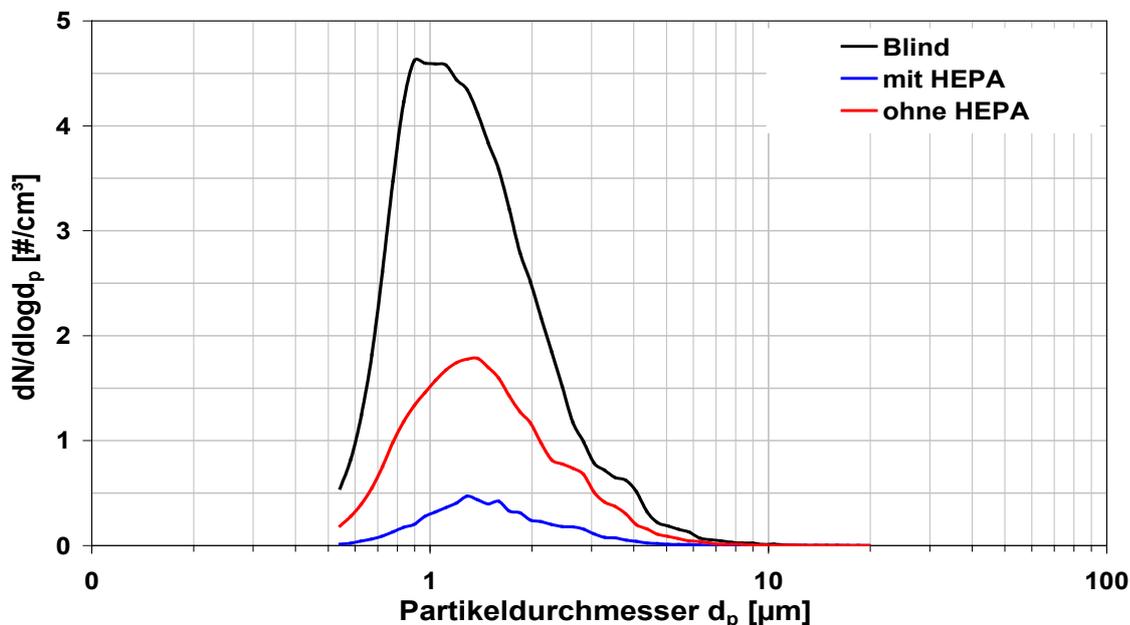
3.2.9.2 Messergebnisse

Die Durchführung fand in zwei Schritten statt. Zunächst wurden zeitaufgelöste Anzahlgrößenverteilungsmessungen (jeweils ~60 min.) entsprechend der beschriebenen Vorgehensweise durchgeführt. Auf der Basis dieser Ergebnisse erfolgte die Auswahl der geeigneten Vorgehensweise für die Sammlung der Partikel auf Filtern.

Anzahlkonzentration, –größenverteilung und lungendeponierbare Oberfläche (Szenario 1)

Die Ergebnisse der Messungen (Mittelwert über den jeweiligen Versuchszeitraum) sind in den folgenden Abbildungen dargestellt. Die Blindprobe besteht aus einer Mittelung der Messung vor und nach dem eigentlichen Versuchsablauf. Es zeigt sich anhand der APS Messungen, dass erwartungsgemäß keine nennenswerten mikronen Partikel vorhanden sind (Abbildung 82). Die Modalwerte liegen bei 1,04 μm (Blind), 1,36 μm (ohne HEPA) bzw. 1,32 μm (mit HEPA) alle sehr nah beieinander. Gegenüber dem Blindwert (Raumluft im Abzug ohne Zufuhr von Staubsauger-Abgas) verringert sich die Anzahlkonzentration der größeren Partikel (> 600 nm) durch den Betrieb des Staubsaugers.

Abbildung 82: Anzahlgrößenverteilung mittels APS für die Staubsauger-Motoremissionserfassung



Im Gegensatz dazu steigt die Partikelanzahlkonzentration im Größenbereich unterhalb von 20 nm sowohl bei Betrieb mit als auch ohne HEPA-Filter (Abbildung 83, Abbildung 84). Die Anzahlgrößenmessungen mit dem SMPS (NanoDMA) zeigen Maximalwerte beim Betrieb des Staubsaugers ohne HEPA-Filter bei einer Gesamtanzahlkonzentration von ~231.000 ($\#/\text{cm}^3$). Bei regulärem Betrieb des Staubsaugers mit HEPA-Filter werden erwartungsgemäß geringere Partikelanzahlen im Nanometerbereich beobachtet; die Gesamtanzahlkonzentration (~10.000 $\#/\text{cm}^3$) ist dabei mit der der Blindmessung vergleichbar. Die Modaldurchmesser sind allerdings zu kleineren Partikeldurchmessern verschoben; während der Modalwert bei der Blindmessung bei 23 nm liegt, wird er ohne HEPA zu 8,4 nm und mit HEPA zu 18 nm ermittelt. Dies weist auf eine verstärkte Emission sehr kleiner Partikel aus dem Staubsauger, insbesondere bei Betrieb ohne HEPA-Filter hin. Auch bei den vergleichenden FMPS Messungen (Abbildung 84) zeigt sich qualitativ diese Modaldurchmesser-verschiebung von 52 nm (Blind) zu jeweils 11 nm (ohne bzw. mit HEPA). Beim Durchmesser 11 nm erfolgt eine deutliche Erhöhung der Anzahlkonzentration durch den Staubsaugerbetrieb; Ohne HEPA ist auch die Gesamtanzahlkonzentration moderat erhöht (120.000 $\#/\text{cm}^3$), mit HEPA Filter liegt sie im gleichen Bereich wie die Hintergrundbelastung (~20.000 $\#/\text{cm}^3$).

Abbildung 83: Anzahlgrößenverteilung mittels SMPS mit NanoDMA für die Staubsauger-Motoremissionserfassung

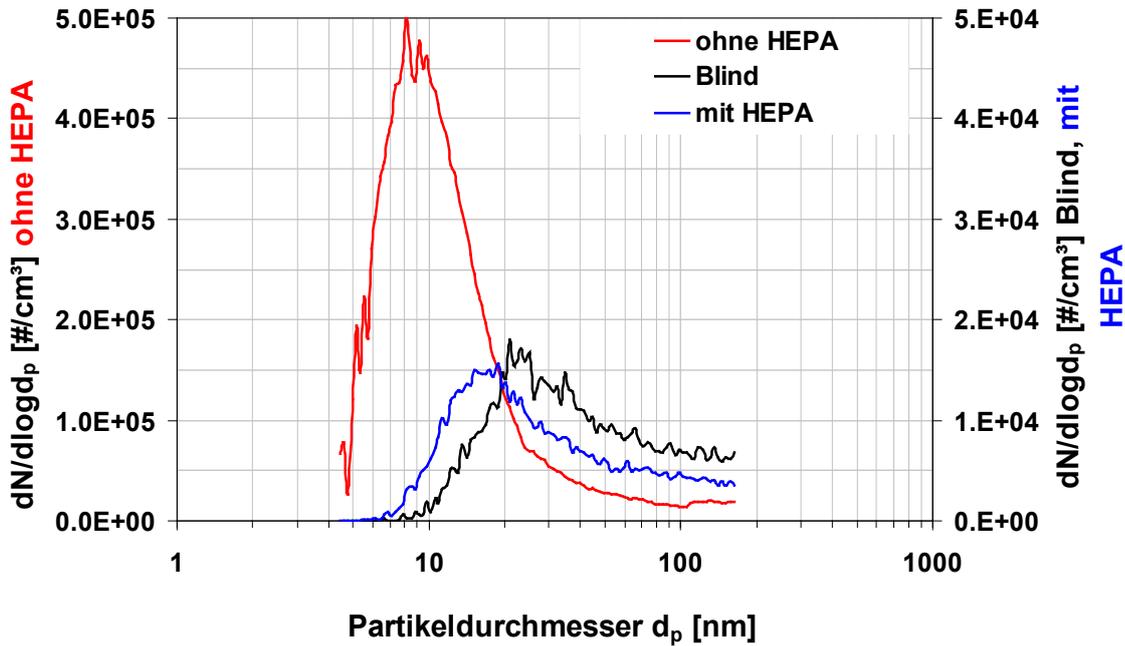
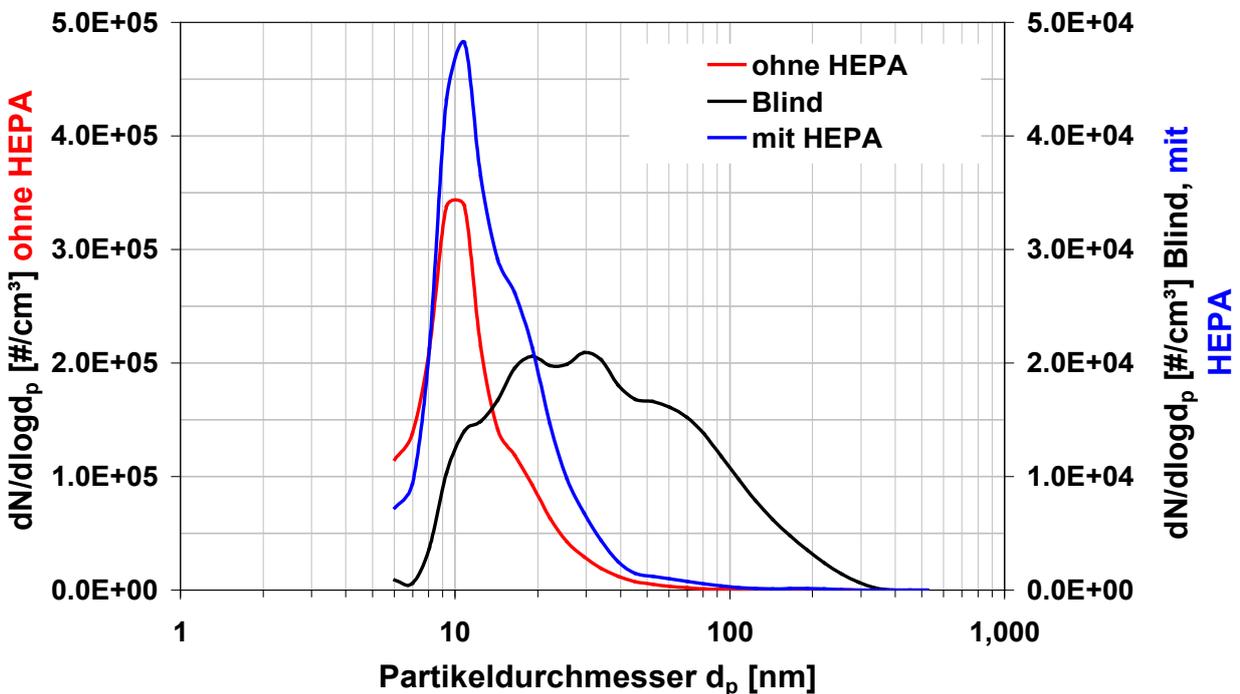
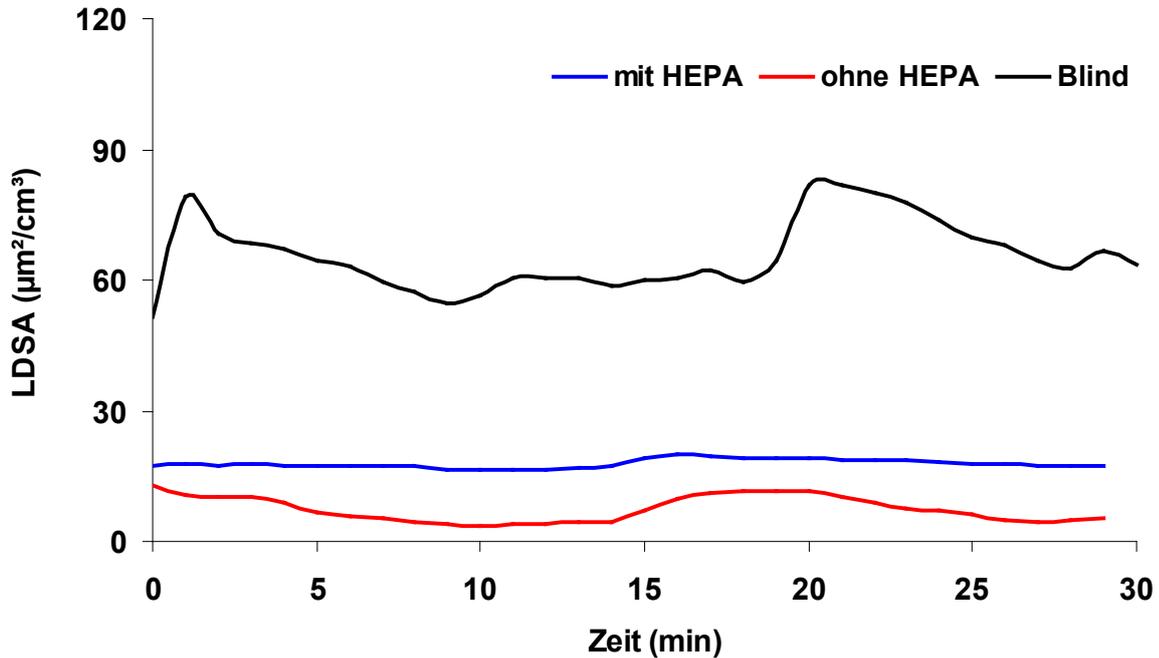


Abbildung 84: Anzahlgrößenverteilung mittels FMPS für die Staubsauger-Motoremissionserfassung



Da der NSAM im relevanten Partikelbereich < 20 nm nur geringe Empfindlichkeit aufweist, ist kein Anstieg der LDSA (lung deposited surface area - lungendeponierbare Oberfläche) durch den Staubsaugerbetrieb zu messen. Im Gegenteil ist auch hier, wie bei den APS-Messungen gegenüber der Blindbelastung eine Anreicherung zu erkennen (Abbildung 85). Dass die Werte mit HEPA etwas höher liegen als ohne HEPA-Filter dürfte an einer erhöhten Untergrundbelastung der Raumluft gelegen haben.

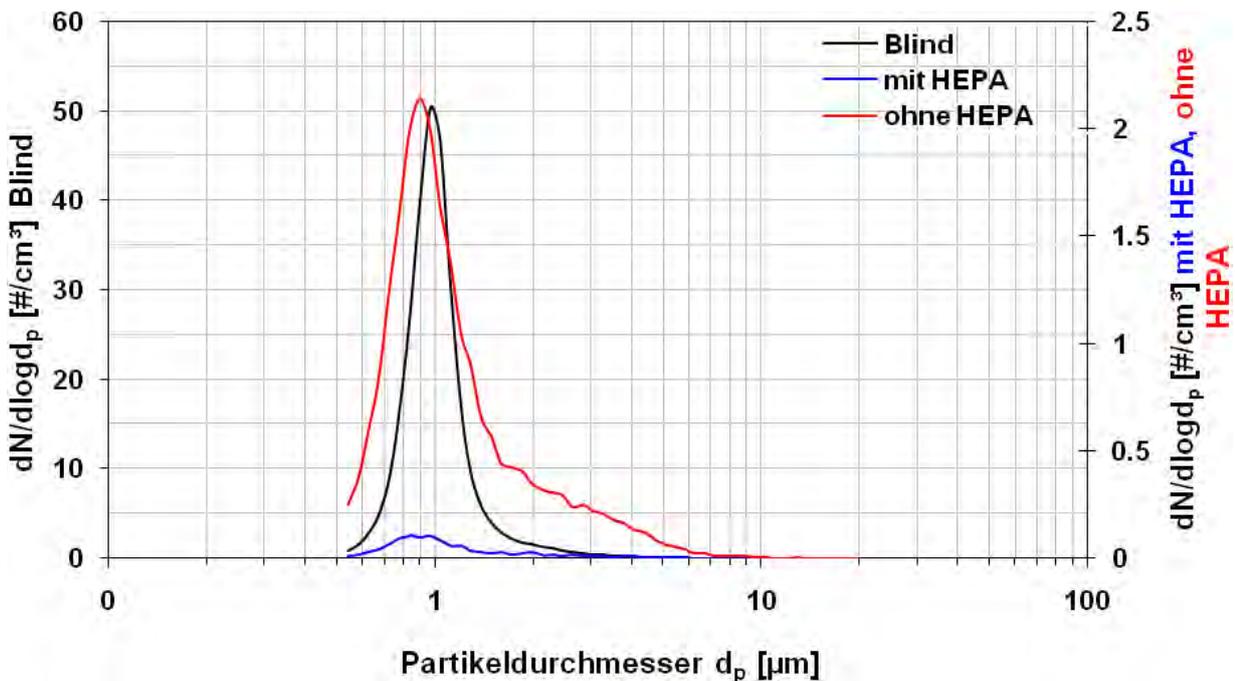
Abbildung 85: LDSA mittels NSAM für die Staubsauger-Motoremissionserfassung



Anzahlkonzentration, –größenverteilung und lungendeponierbare Oberfläche (Szenario 2)

Die Ergebnisse der Szenario 2 - Messungen sind in den folgenden Abbildungen dargestellt. Es zeigt sich auch hier anhand der APS Messungen, dass keine nennenswerten mikronen Partikel beim Betrieb des Staubsaugers vorhanden sind (Gesamtanzahlkonzentration: Blind 8,7, mit HEPA 0,04 und ohne HEPA 0,7 #/cm³) (Abbildung 86). Die Modalwerte liegen bei ähnlichen 0,96 µm (Blind), 0,89 µm (ohne HEPA) bzw. 0,86 µm (mit HEPA).

Abbildung 86: Anzahlgrößenverteilung mittels APS für die Staubsauger-Motoremissionserfassung



Die Anzahlgrößenmessungen mit dem SMPS (NanoDMA) zeigen Gesamtanzahlkonzentration beim Betrieb des Staubsaugers ohne HEPA-Filter bei $\sim 60.000 \text{ \#/cm}^3$. Bei regulärem Betrieb des Staubsaugers mit HEPA-Filter treten ähnlich wie auch bei Raumluft/Blind Messungen noch geringere Partikelanzahlen auf ($\sim 11.000 \text{ \#/cm}^3$) (Abbildung 87). Die Modalwerte sind leicht verschoben bei 23 nm (Blind), 12 nm (ohne HEPA) und 16 nm (mit HEPA) was auf eine verstärkte Emission sehr kleiner Partikel aus dem Staubsauger insbesondere bei Betrieb ohne HEPA-Filter hinweist. Die vergleichenden FMPS Messungen bestätigen dies mit Modalwerten von 9 nm (ohne HEPA) und 11 nm (mit HEPA). Die Blindmessung zeigt eine bimodale Verteilung mit einem Modalwert von 52 nm. Die Gesamtanzahlkonzentrationen zeigen ähnlich die der SMPS Messungen geringe Werte (Abbildung 88).

Abbildung 87: Anzahlgrößenverteilung mittels SMPS mit NanoDMA für die Staubsauger-Motor-emissionserfassung

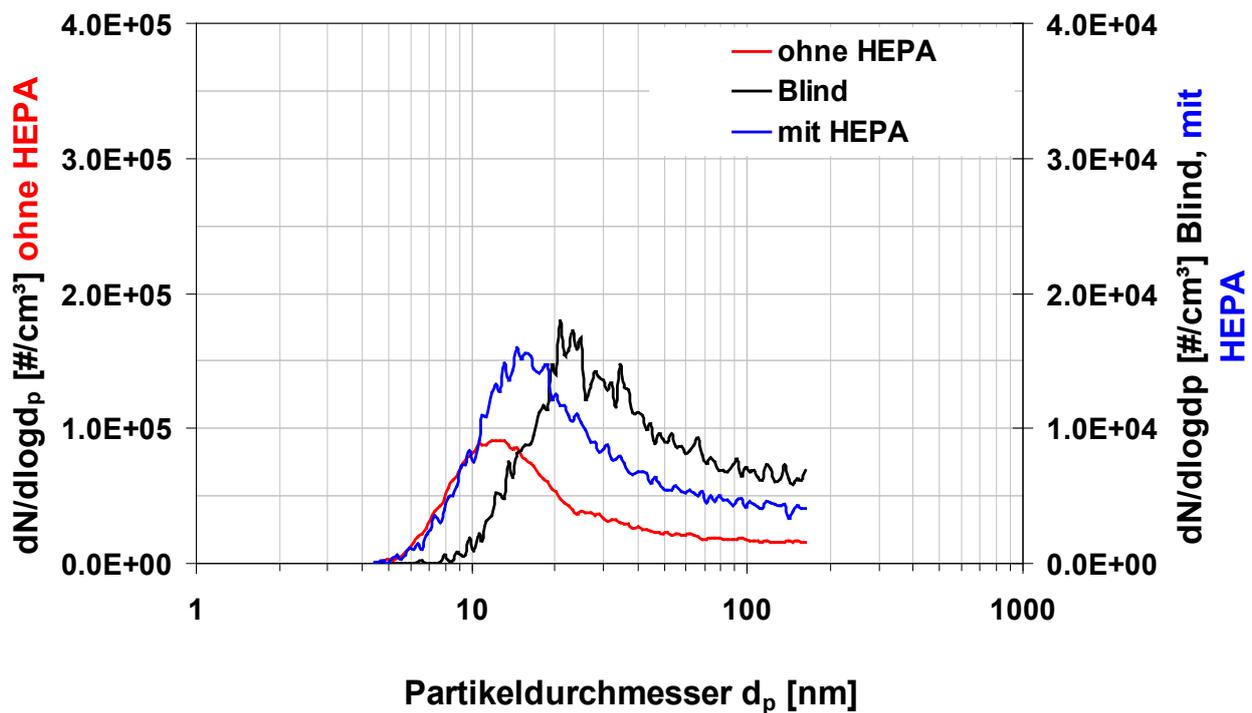
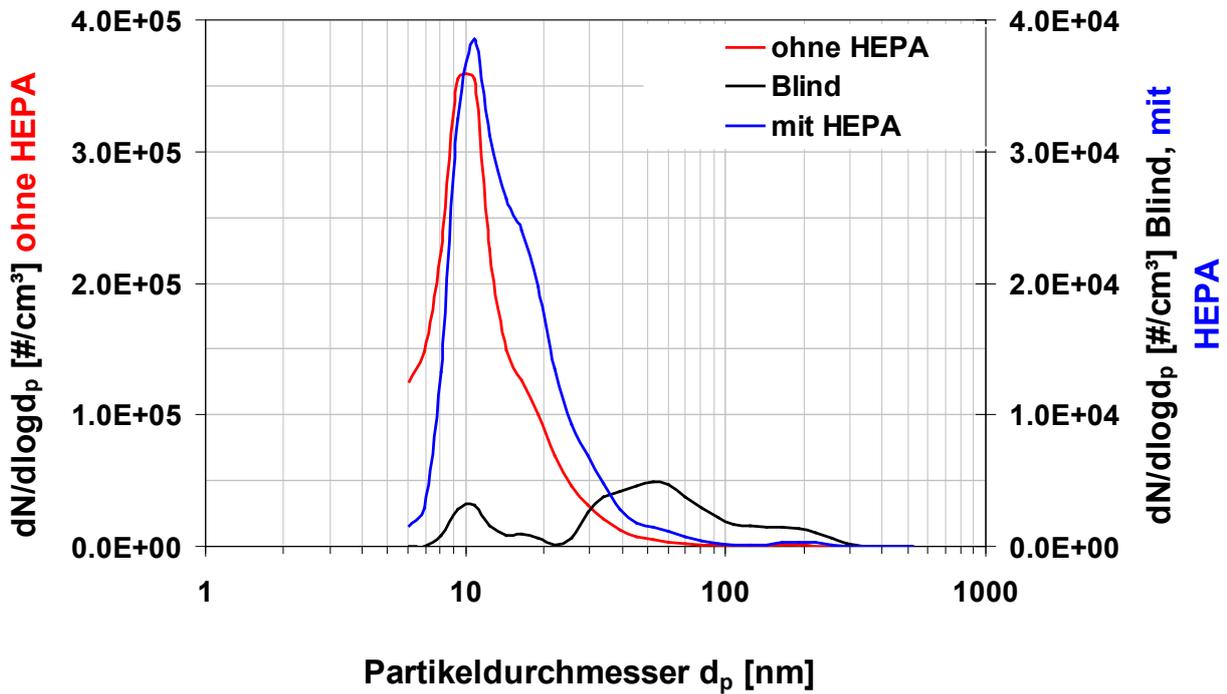
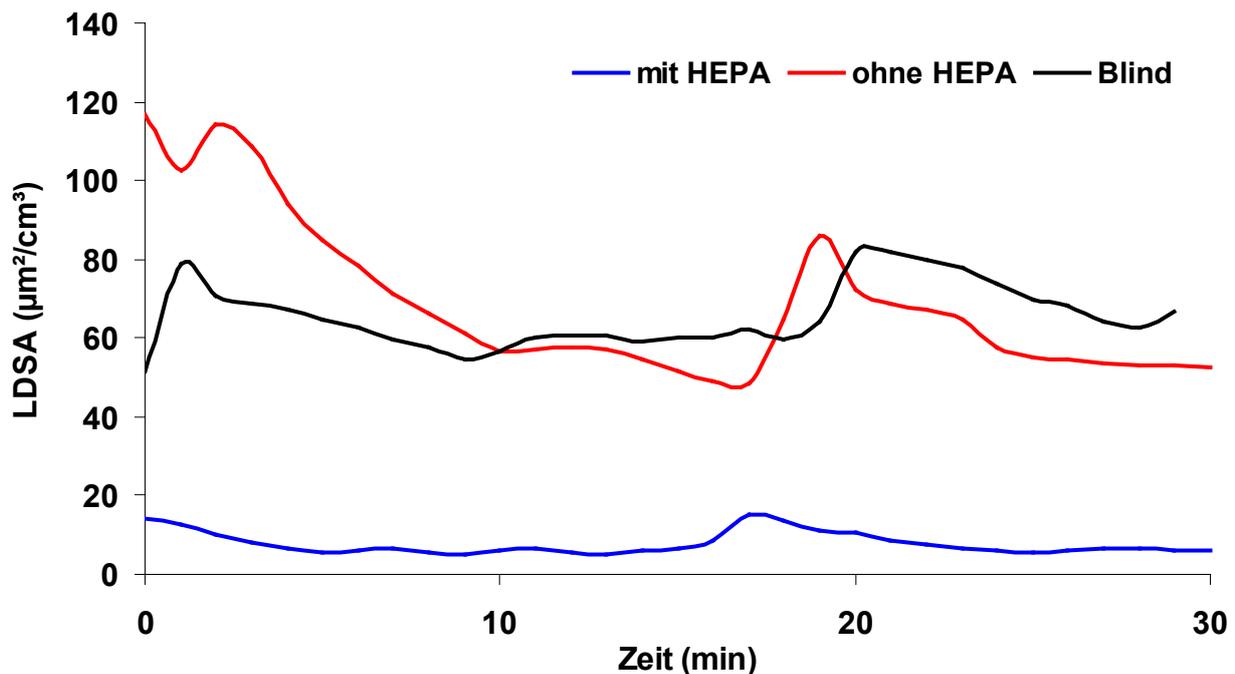


Abbildung 88: Anzahlgrößenverteilung mittels FMPS für die Staubsauger-Motoremissionserfassung



Die LDSA Messungen zeigen erwartungsgemäß bei vornehmlich sehr kleinen Partikeln mit HEPA-Filter im Vergleich zu der Raumluft sehr geringe LDSA Werte (Abbildung 89). Auffälliger Weise sind die zeigen sich hohe der Blindprobe ähnliche LDSA Werte beim Betrieb ohne HEPA-Filter. Dies erscheint wenig plausibel, da die zeitgleich laufenden SMPS und FMPS Messungen niedrige Partikelanzahlkonzentrationen anzeigen, als die bei den Blindmessungen. Insgesamt zeigen die zusätzlichen Staubsaugermessungen eine mögliche, wenn auch sehr geringe Partikelemission im Bereich um die 10 nm durch den Staubsaugerbetrieb.

Abbildung 89: Lungendeponierte Oberfläche während der Staubsauger-Motoremissionserfassung



Sammlung von Partikeln, Massenkonzentrationen (gravimetrisch)

Für die Filterbelegung wurden die Probenahmen an einem separaten Messtag über einen Zeitraum von ca. 7.30 h Stunden mit Szenario (1) - Abluft des Staubsaugers in den Abzug geleitet und Staubsauger außen stehend mit/ohne HEPA-Filter gesammelt. Aufgrund der Ergebnisse der Anzahlgrößenverteilungsmessungen wurde auf dieses Szenario zurückgegriffen, da es die höchste über SMPS errechnete Partikelemission zeigte und eine mögliche Überhitzung des Staubsaugers verringert. Im Zuge der Untersuchungen zeigte sich, dass insbesondere der Abgasstrom und somit auch die Luft im Abzug sich bei Dauerbetrieb stark erwärmen ($\sim 45\text{ }^{\circ}\text{C}$) und eine Außenplatzierung des Staubsaugers zur Kühlung und zum Schutz vor Überhitzung sinnvoll war. Um eine Beeinflussung des zu sammelnden Aerosols durch Partikelemissionen aus dem Motor des Kleinfiltergerätes auszuschließen, wurde dieses ebenfalls außerhalb des Abzuges aufgestellt. Damit war es allerdings notwendig, die angesaugte Luft über einen in den Abzug ragenden Schlauch zu führen. Somit war es nicht möglich, einen PM2.5 bzw. PM1 Vorabscheider einzusetzen, die gesammelte Partikelfraktion, die in etwa dem Gesamtschwebstaub (TSP) entspricht, enthält daher auch größere Partikel. Die Auswertung Filterprobe, die beim Staubsauger-Betrieb gesammelt wurde, ergab gravimetrisch eine durchschnittliche Massenkonzentration von $\sim 8\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ (TSP auf PTFE-Filter). Im Vergleich hierzu konnte für die „Blindproben“ (Filterproben der unbeeinflussten Raumluft im Abzug) eine durchschnittliche Massenkonzentration von $\sim 10\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ (PM2.5-Fraktion auf PTFE-Filtern) festgestellt werden. Es zeigt sich somit keine deutliche Zunahme der Massenkonzentration. Dies bedeutet, die zusätzlich vom Sauger emittierten ultrafeinen Partikel tragen zu wenig zur Masse bei, um gravimetrisch messbar zu sein.

ROS-Bildungspotenzial

Die während der Filterprobenahme simultan mittels Particle Into Liquid sampler (PILS) gesammelten Partikel-Suspensionsproben wurden mit der ESR-Methode auf ihr Radikalgenerierungspotential untersucht. Es ergaben sich keine signifikanten Hydroxylradikalbildungspotentiale noch Oberflächenreaktivitäten der Staubsaugerproben (Abbildung 90, Abbildung 91).

Abbildung 90: OH-Radikal Generierungspotential der Staubsaugeremissionen; Fehlerbalken = Standardabweichung, n = 3; NWG = Nachweisgrenze, deionisiertes Wasser = dH₂O

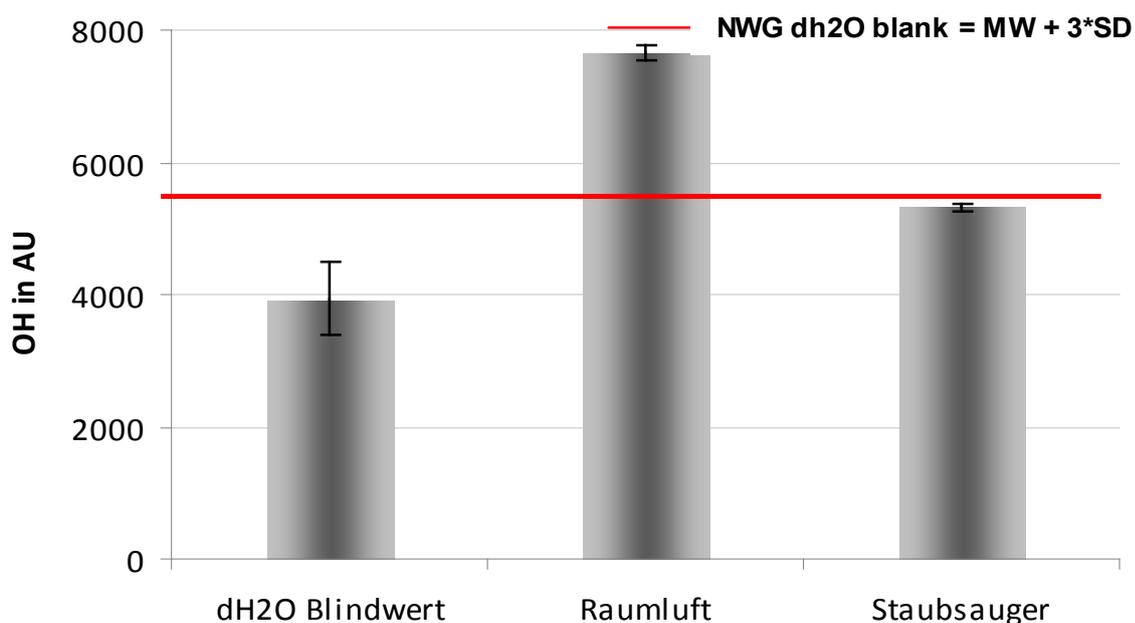
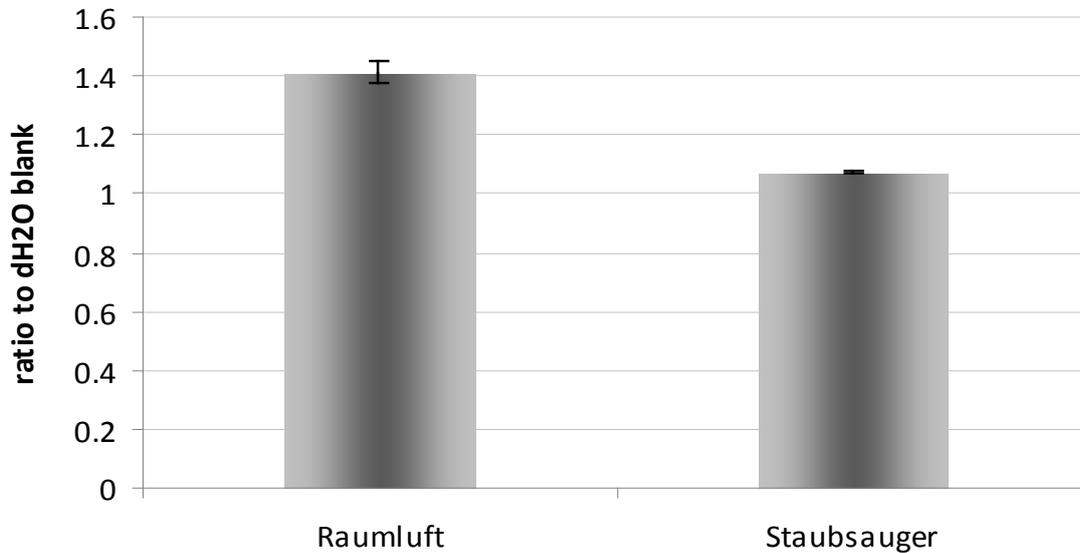


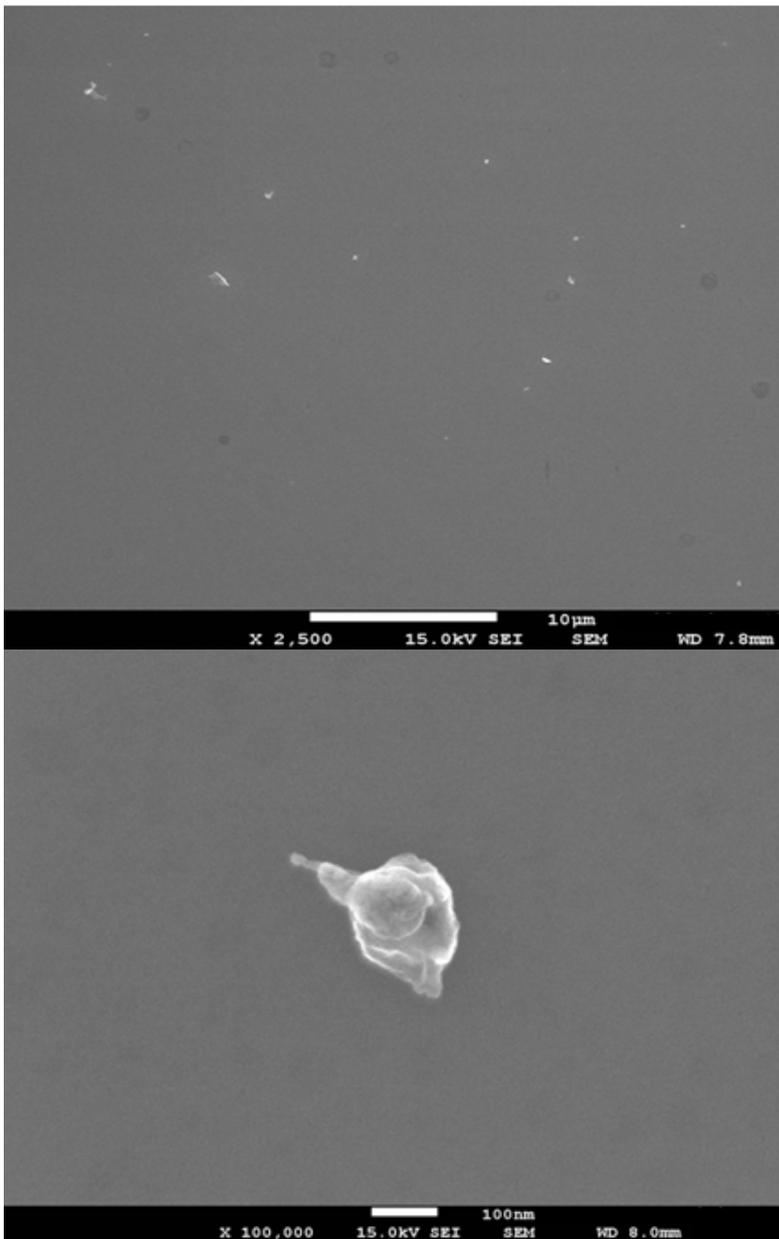
Abbildung 91: Verhältnis der Oberflächenreaktivität der Staubsaugeremission-Suspensionen zu deionisiertem Wasser als Blindwert



Partikelmorphologie und Elemente in Partikeln (NAS-Proben/REM-EDX)

Während der Filterprobenahme wurden mit dem Nanometer Aerosol-Sammler (NAS) Proben auf Ga-As-Trägern für die Analyse mittels REM-EDX gezogen. Im Rasterelektronenmikroskop war, wie aufgrund der relative geringen Massen- und Anzahlkonzentrationen zu erwarten, insgesamt nur eine sehr geringe Partikelbelegung erkennbar (Abbildung 92, oben). In Abbildung 92, unten ist ein Beispiel für einige wenige vorgefundene und mit REM-EDX identifizierte Kohlenstoff- und Kupferpartikel. Die Kupferpartikel insbesondere könnten den angenommen Motoremissionen entsprechen, allerdings war die Anzahl relativ gering und die Partikel wiesen Größen von um die 30-50 nm auf. Dahingegen waren die Partikel während den Anzahlgrößenverteilungsmessungen überwiegend < 20 nm groß. Bei den zum Vergleich ebenfalls gezogenen unbelasteten Raumluftproben konnten keine Kupferpartikel nachgewiesen werden.

Abbildung 92: Beispiel zweier REM-Aufnahmen der gezogenen NAS Proben der Staubsaugeremissionen (oben geringe Vergrößerung; unten Kohlenstoff- und Kupferpartikel)



3.2.9.3 Zusammenfassung Staubsauger - Motoremissionen

Bereits in den Charakterisierungsmessungen zu der Emissionsquelle Staubsauger hatte sich gezeigt, dass Staubsaugen keine relevante Quelle für Expositionsversuche an Probanden im Rahmen dieser Studie darstellt. Allerdings wurden bei den Messungen Emissionen von Partikeln mit Mobilitätswindmessern < 20 nm festgestellt. Es wurde vermutet, dass es sich um Motoremissionen handelt. Folglich wurde versucht, die Staubsauger-Motoremissionen aufzukonzentrieren, erneut explorativ zu charakterisieren und wenn möglich auf PTFE Filtern zu sammeln. Bei den Anzahlgrößenverteilungsmessungen zeigten sich leicht erhöhte Partikelanzahlkonzentrationen, vor allem bei Betrieb ohne HEPA Filter. Insbesondere sehr kleine Partikel ~ 10 nm wurden hierbei festgestellt, allerdings konnten diese mittels REM-EDX nicht nachgewiesen werden. Es ist daher zu vermuten, dass es sich bei den erfassten Partikeln der Anzahlgrößenverteilungsmessungen um semivolatile Partikel (organische flüchtige Stoffe aus dem erwärmten Kunststoff des Staubsaugers) handelt, welche sich unter dem Vakuum im REM verflüchtigen. Dies bestätigen auch die REM Aufnahmen, welche lediglich eine sehr geringe Belegung des Trägers zeigen, aber auch sehr vereinzelt Kupferpartikel um die 30-50 nm. Somit ist eine geringe partikuläre Motoremission nicht auszuschließen. Die analogen Filtersammlun-

gen untermauern dies, da sich keine Massenunterschiede zwischen der Raumluft/Blank und der den Staubsaugerproben ergaben. Unter der Annahme, dass alle zuvor bei den Anzahlgrößenverteilungsmessungen detektierten Partikel wirklich Cu oder andere Metallpartikel sind, würde sich basierend auf den SMPS Daten und der dann anzusetzenden Dichte von 8,9 rein rechnerisch ein auch gravimetrisch nachzuweisender Massenzuwachs ergeben.

3.2.9.4 Fazit

Somit ist abschließend festzuhalten, dass eine partikuläre Motoremission aus dem hier untersuchten Staubsaugermodell nur in geringem Maße festgestellt werden konnte.

3.2.10 Zusatzuntersuchungen

Nach Ausschluss des Kaminofenbetriebs als mögliche vierte Expositionsquelle wurden explorativ der Betrieb von Propangas- und Spiritusbrenner sowie ein Heißluftstrahlradiator untersucht. Die Messungen fanden im Versuchsraum statt.

3.2.10.1 Propangas- und Spiritusbrenner

Brennerbetrieb, Geräte, Materialien, Vorgehensweise

Die beiden Brenner wurden jeweils mittig im Expositionsraum platziert und sachgerecht betrieben. Der Propangasbrenner wurde dabei zunächst nur mit halber Brennstärke betrieben und nach einiger Zeit auf maximale Brennleistung hochgestellt. Der Spiritusbrenner ermöglicht eine solche Unterscheidung nicht (Abbildung 93). Der Propangasbrenner wurde zunächst für eine Stunde und der Spiritusbrenner für eine halbe Stunde (Spiritusvolumen in der Schale aufgebraucht) betrieben mit einer sich anschließenden etwa 15-minütigen Abkühlungsphase, bevor sie erneut gezündet wurden (= Flamme 1 und Flamme 2).

Abbildung 93: Foto des Propan- (links) und Spiritusbrenners (rechts)



Um eine Einschätzung über die Quellaktivität zu erlangen, wurden die Partikelanzahl- und Massenkonzentration sowie Partikeloberflächenkonzentration erfasst. Die Klimatisierung wurde auf 24 °C und minimale Lüftungs- und Gebläsestufe eingestellt.

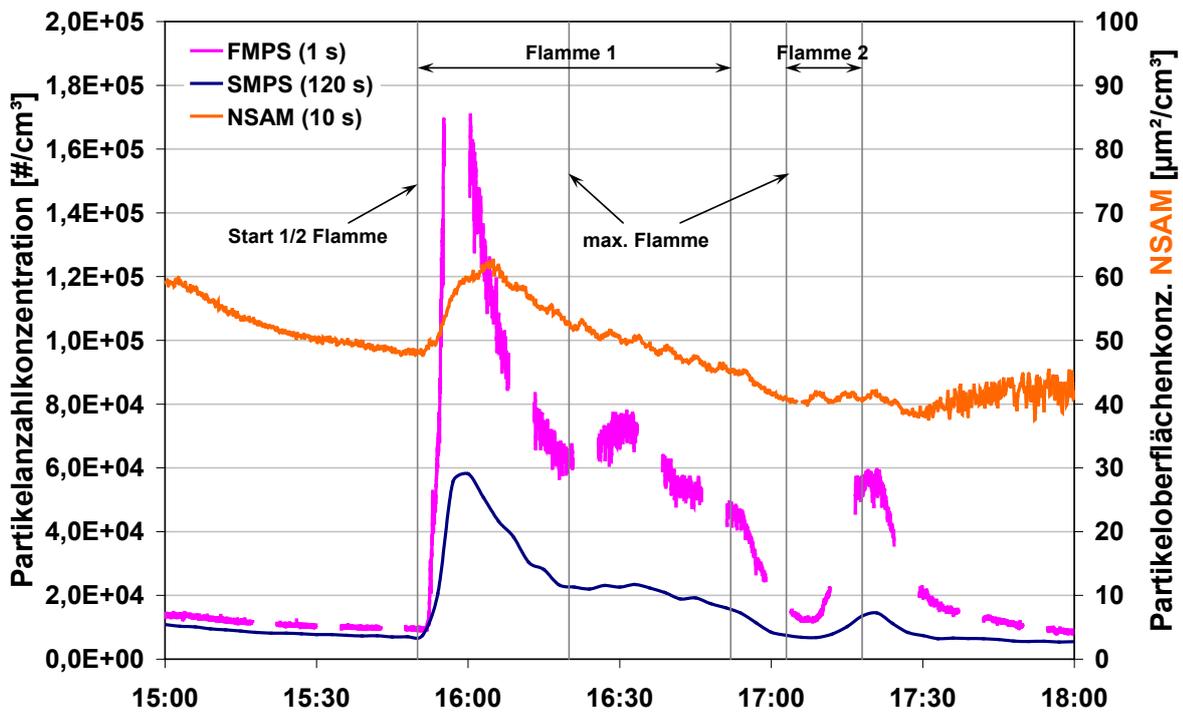
3.2.10.2 Messergebnisse

Propangasbrenner: Anzahlkonzentration, –größenverteilung und lungendeponierte Oberfläche

Die Ergebnisse zeigen zu Beginn des Brennvorganges einen schnellen Anstieg der Anzahlkonzentration auf maximal $\sim 190.000 \text{ \#/cm}^3$ (FMPS – magentafarbene Linie), anschließend fällt die Konzentration in den nächsten Minuten auf unter 80.000 \#/cm^3 ab. Einen parallelen Verlauf sieht man auch für mittels SMPS erfasste Partikelanzahlkonzentrationen sowie für die lungendeponierte Oberfläche. Der einmalige, kurze Anstieg ist vermutlich auf die Verbrennung von Staubpartikeln, anhaftend an dem umgebenden Windschutz

sowie der Erhitzung des Windschutzes (anzunehmen sind Metallpartikelemissionen) zurückzuführen (Abbildung 94). Der nur noch schwach ausgeprägte erneute, kurzzeitige Anstieg der Partikelanzahlkonzentration nach einer kurzen Abkühlphase und erneutem Zünden (Flamme 2) bekräftigt diese Vermutung. Die Größenverteilung zeigt einen Modalwert um etwa 10 nm sowie geringe Partikelanzahlkonzentrationen um die 40–50 nm. Größere Partikel konnten dahingegen nicht beobachtet werden (> 100 nm) (Abbildung 95). Somit sind auch keine höheren Massenkonzentrationen zu erwarten (Abbildung 96, Tabelle 9), die gemessenen Werte unterscheiden sich nicht von den ohne Emissionsquelle vorhandenen Konzentrationen.

Abbildung 94: Partikelanzahl- und -oberflächenkonzentrationen während der Propangasbrennerversuche



Anmerkung: Unterbrechungen der FMPS-Datenlinie sind bedingt durch Gerätekommunikationsfehler

Abbildung 95: Anzahlgrößenverteilung (sub-mikron) der Propangasbrennerversuche

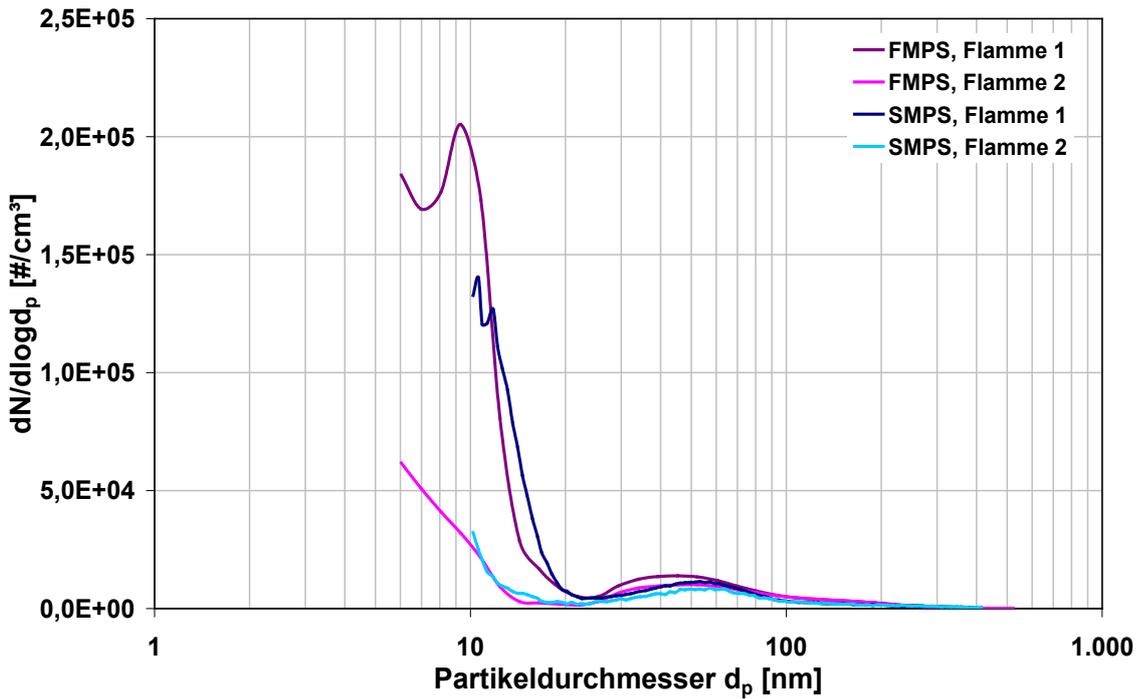


Abbildung 96: Errechnete Partikelmassenkonzentration für die Propangasbrennerversuche (errechnet aus Partikelanzahlkonzentration - Dichte 1,6 g/m³)

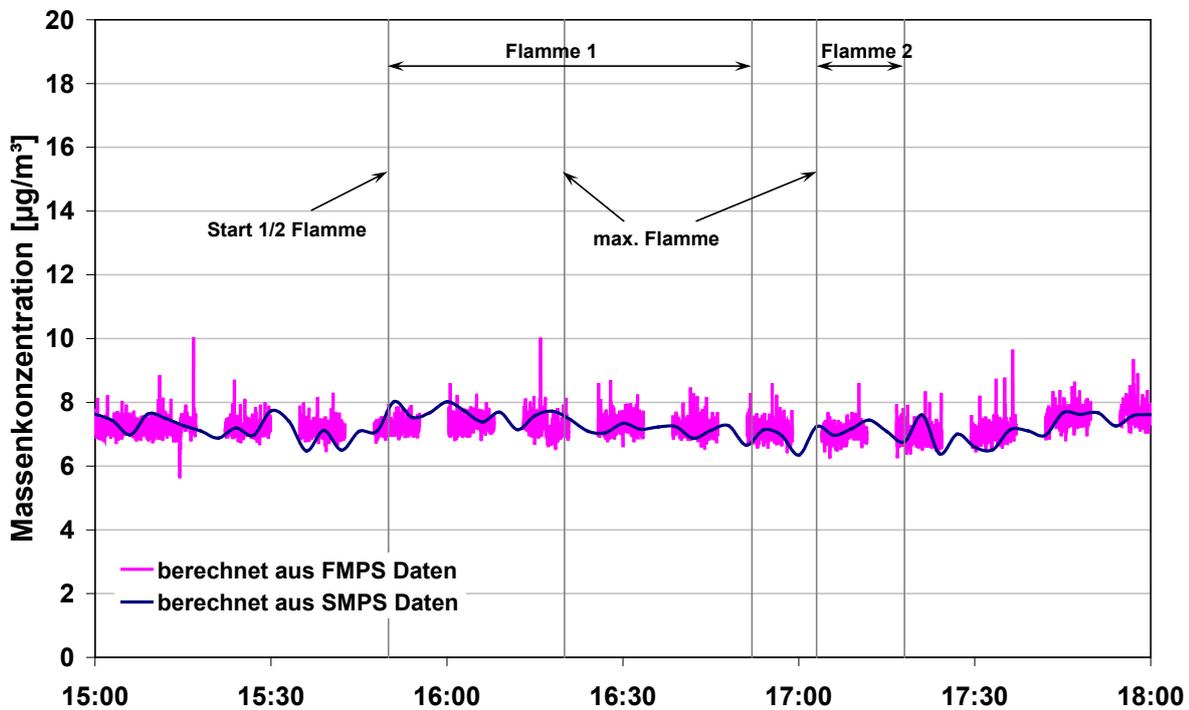


Tabelle 9: Übersicht der mittleren Anzahl-, Oberflächen- und Massenkonzentration (letztere berechnet) während der Propangasbrennerversuche

	Anzahl-		Oberflächen-	Massenkonzentration	
	FMPS	SMPS	NSAM	FMPS	SMPS

	#/cm ³		µm ² /cm ³	µg/m ³	
Flamme 1	73260	27126	52,5	7,2	7,4
Flamme 2	20268	7514	41,0	7,1	7,2

Spiritusbrenner: Anzahlkonzentration, –größenverteilung und lungendeponierte Oberfläche

Ähnlich wie für den Propangasbrenner zeigen die Ergebnisse für den Spiritusbrenner zu Beginn einen Anstieg der Anzahlkonzentration auf maximal ~200.000 #/cm³ (FMPS – magentafarbene Linie) bevor diese auf 100.000 #/cm³ abfällt. Einen parallelen Verlauf sieht man auch für mittels SMPS erfasste Partikelanzahlkonzentrationen sowie für die lungendeponierbare Oberfläche. Der einmalige, kurze Anstieg ist auch hier vermutlich auf die eigentliche Erhitzung und „Freibrennen“ des umgebenden Windschutzes zurückzuführen (Abbildung 97). Nach einer kurzen Abkühlphase und erneutem Zünden (Flamme 2) zeigt sich erneut ein (im Vergleich zu Flamme 1) schwächer ausgeprägter, kurzzeitiger Anstieg der Anzahlkonzentration (max. 80.000 #/cm³). Die Größenverteilung zeigt ebenfalls einen Modalwert um etwa 10 nm sowie geringe Partikelanzahlkonzentrationen um die 40–50 nm. Größere Partikel (> 100 nm) sind dahingegen nicht anzutreffen (> 100 nm) (Abbildung 98), somit sind auch keine höheren Massenkonzentrationen zu erwarten (Abbildung 99, Tabelle 10). Im Gegensatz zum Propangasbrenner sind aber Erhöhungen der Massenkonzentration im Vergleich zur unbelasteten Raumluft anzutreffen, auch die mittlere Partikeloberfläche ist beim Spiritusbrenner etwa doppelt so hoch.

Abbildung 97: Partikelanzahl- und –oberflächenkonzentrationen der Spiritusbrennerversuche

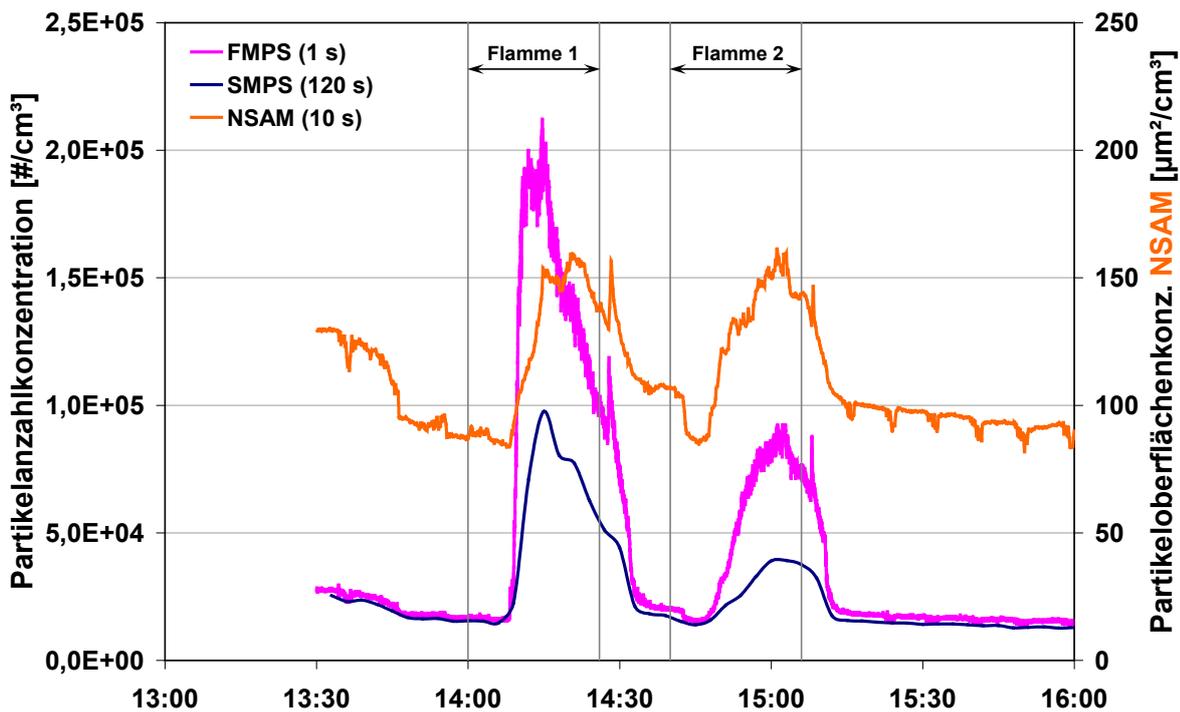


Abbildung 98: Anzahlgrößenverteilung (sub-mikron) der Spiritusbrennerversuche

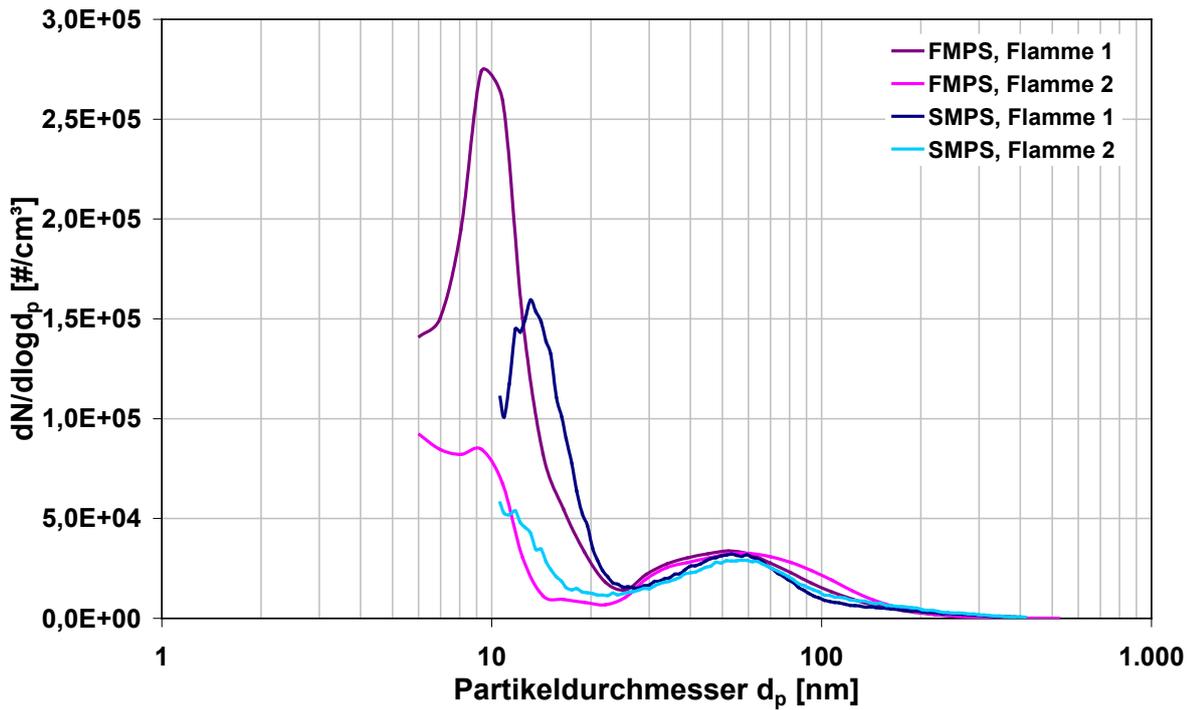


Abbildung 99: Über die Partikelanzahlgrößenverteilung errechnete Massenkonzentration (Dichte 1,6 g/cm³) der Spiritusbrennerversuche

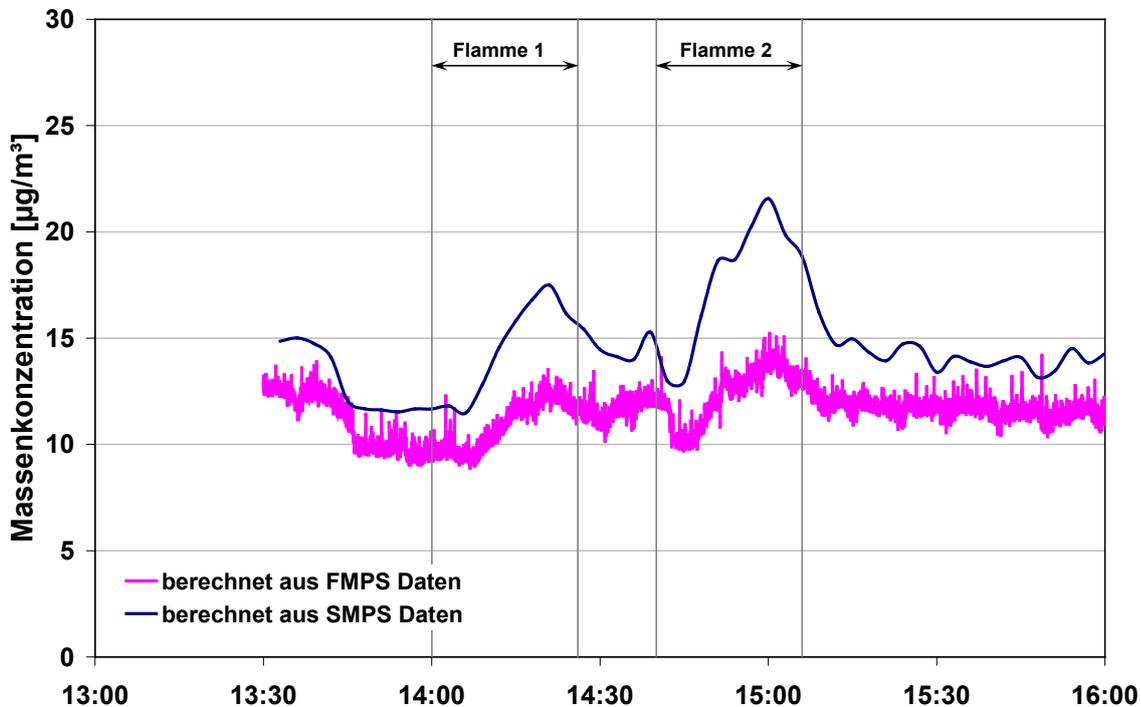


Tabelle 10: Übersicht der mittleren Anzahl-, Oberflächen- und Massenkonzentration (letztere errechnet) während der Spiritusbrennerversuche

	Anzahl-		Oberflächen-	Massenkonzentration	
	FMPS	SMPS	NSAM	FMPS	SMPS

	#/cm ³		µm ² /cm ³	µg/m ³	
Flamme 1	10376	50238	121	10,8	14,3
Flamme 2	49625	26429	124	12,3	17,7

3.2.10.3 Zusammenfassung Gas- und Spiritusbrenner

Zusammenfassend zeigt sich, dass Partikelemissionen ausschließlich im sub-mikronen Bereich vorliegen. Der Betrieb der beiden Brennerarten führt zu (im Vergleich zu den Quellen Toasten, Braten, Kerzen) geringerer Anzahlkonzentration und sehr geringen lungendeponierter Partikeloberflächen.

3.2.10.4 Fazit

Um höhere Konzentrationen für eine Probandenexposition einzustellen, müssten zugleich mehrere Brenner betrieben werden, was aus platz- und sicherheitstechnischen Gründen nicht möglich ist. Entsprechend wurden die Brenner als für diese Studie relevante Partikelinnenraumquelle ausgeschlossen.

3.2.10.5 Heißluftstrahlradiator

Aufgrund von Literaturdaten wurde als weitere potentiell geeignete Partikelquelle ein Heißluftstrahlradiator explorativ als mögliche Quelle für Innenräume untersucht (Abbildung 100).

Abbildung 100: Foto des verwendeten Heißluftstrahlradiators



Heißluftstrahlradiatorbetrieb, Gerät, Vorgehensweise

Bei dem verwendeten Heißluftstrahlradiator handelt es sich um ein bereits mehrere Jahre altes, bereits gebrauchtes und bei Nichtgebrauch im Keller gelagertes, handelsübliches Modell mit einer maximalen Leistung von 2.000 W. Neben der Heißfunktion kann zusätzlich eine Ventilation (zur besseren Durchmischung/ Raumerwärmung) zugeschaltet werden. Für die Untersuchungen wurde der Heißluftstrahlradiator mittig im Versuchsraum platziert und zunächst auf Stufe 5 bei minimaler Ventilation (Stufe 1) betrieben. Später erfolgte eine Erhöhung der Heizleistung auf die maximale Stufe 6. Die Messbedingungen (Temperatur, Ventilation etc.) entsprachen den Versuchen mit den Propangas- bzw. Spiritusbrenner.

3.2.10.6 Messergebnisse

Heißluftstrahlradiator: Anzahlkonzentration, –größenverteilung und lungendeponierte Oberfläche

Ähnlich wie für die Brennerversuche zeigen die Ergebnisse zu Beginn einen Anstieg der Anzahlkonzentration auf lediglich maximal ~60.000 #/cm³ (FMPS – magentafarbene Linie), bevor diese auf unter 20.000 #/cm³ abfällt. Einen parallelen Verlauf sieht man auch für mittels SMPS erfasste Partikelanzahlkonzentrationen sowie für die lungendeponierte Oberfläche. Der einmalige, kurze Anstieg ist auch hier vermutlich auf die eigentliche Erwärmung des Radiators (Emissionen aus dem Plastik) und des Heizdrahts als auch auf die Ver-

brennung von auf dem Heißdraht abgelagertem Staub zurückzuführen (Abbildung 101). Auch durch das Erhöhen der Heizleistung (Stufe 6) ist keine Anzahl- und Oberflächenkonzentrationsveränderung festzustellen, was diese Vermutung bekräftigt (Abbildung 101). Die Größenverteilung zeigt ebenfalls einen Modalwert um etwa 10 nm sowie geringe Partikelanzahlkonzentrationen um die 30–40 nm. Größere Partikel (> 100 nm) sind dahingegen nur in geringer Zahl anzutreffen (> 100 nm) (Abbildung 102). Somit sind auch keine höheren Massenkonzentrationen zu erwarten bzw. erfasst worden (Abbildung 103, Tabelle 11).

Abbildung 101: Partikelanzahl- und –oberflächenkonzentrationen der Heißluft radiatorversuche

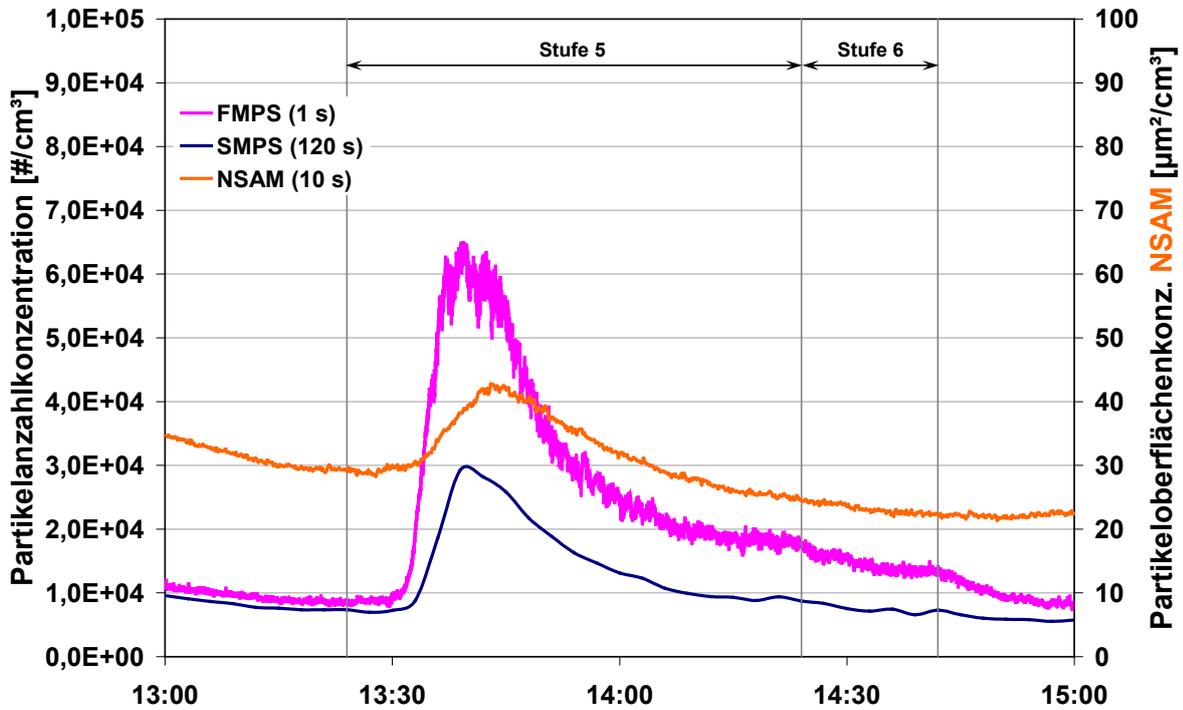


Abbildung 102: Anzahlgrößenverteilung (sub-mikron) der Heißluftstrahlradiatorversuche

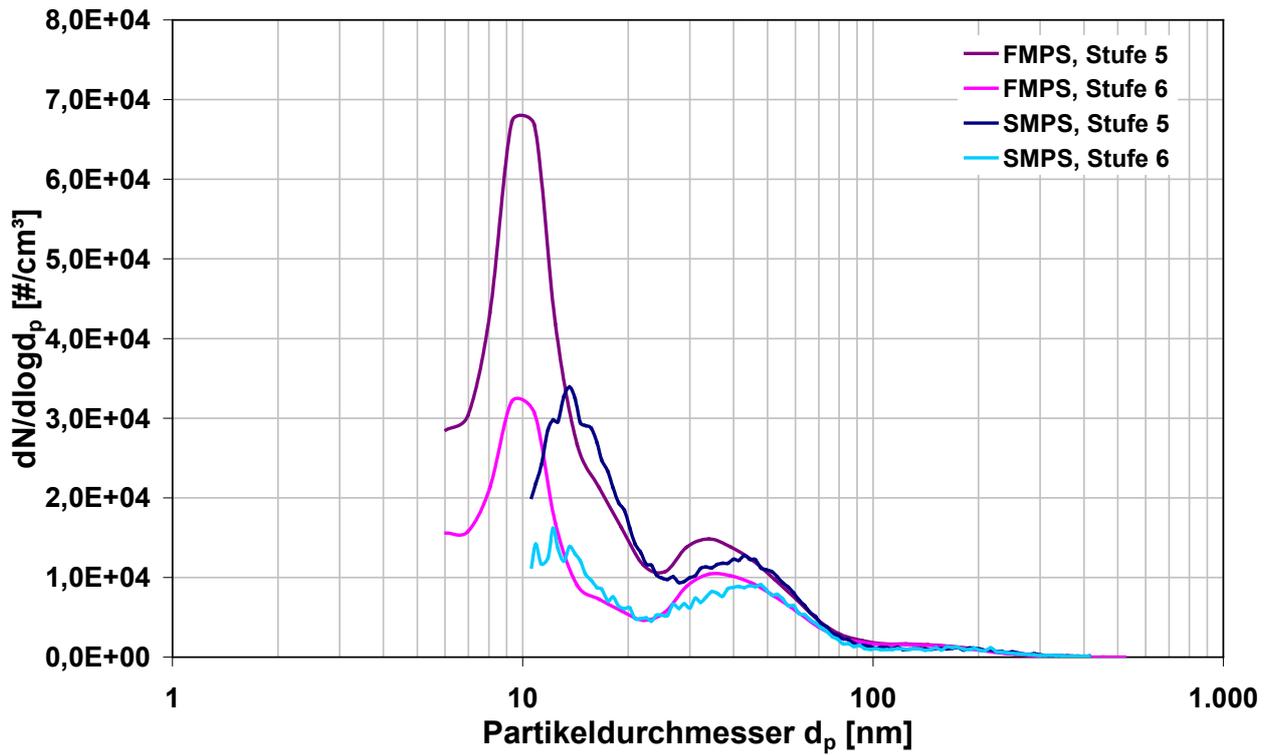


Abbildung 103: Über die Anzahlkonzentration errechnete Massenkonzentration während der Heißluftstrahlradiatormessungen

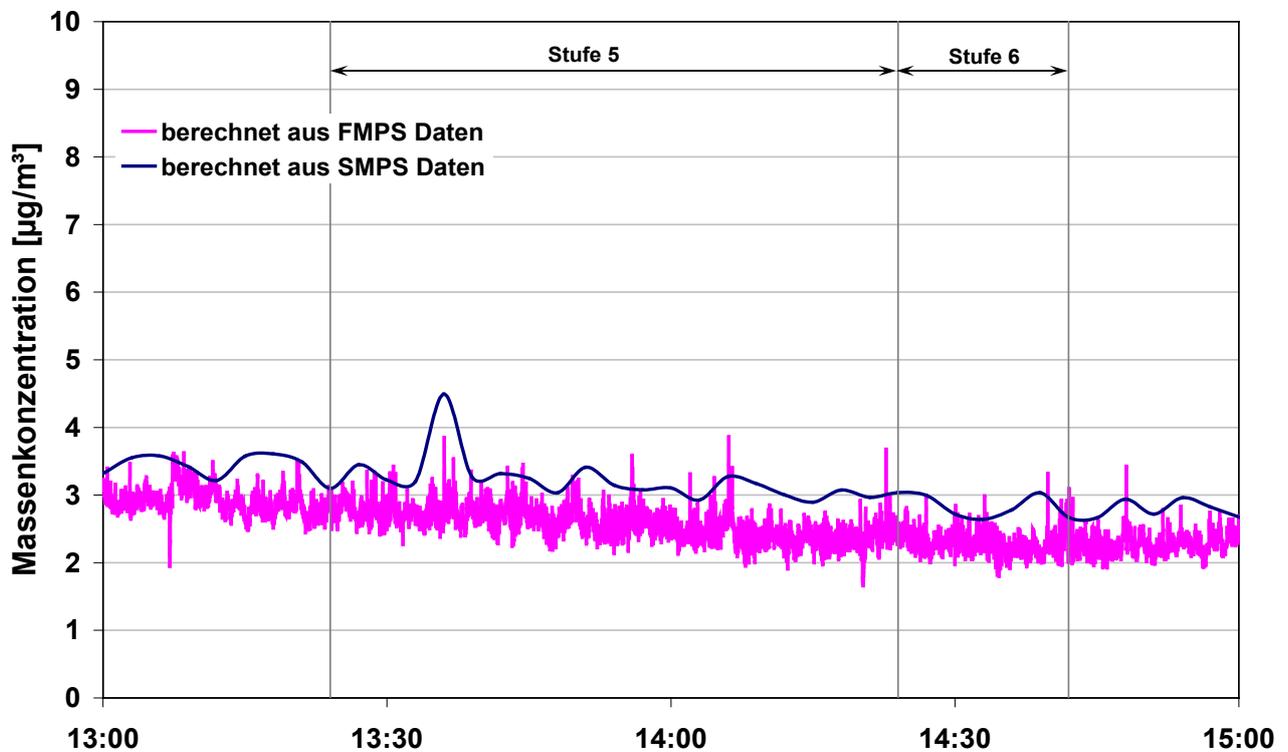


Tabelle 11: Übersicht der mittleren Anzahl-, Oberflächen- und Massenkonzentration (letztere errechnet) der Heißluftstrahlerradiationsmessungen

	Anzahl-		Oberflächen-	Massenkonzentration	
	FMPS #/cm ³	SMPS	NSAM µm ² /cm ³	FMPS µg/m ³	SMPS
Stufe 5	28392	14034	32	2,6	3,2
Stufe 6	14567	7517	23	2,3	2,9

Anmerkung: Messwerte enthalten den Anstieg bei Inbetriebnahme des Gerätes und sind somit nicht repräsentativ für den Dauerbetrieb auf Stufe 5, jedoch die höhere Stufe 6 ist für den Dauerbetrieb repräsentativ

3.2.10.7 Zusammenfassung Heißluftstrahlerradiator

Zusammenfassend zeigen sich sehr geringe Partikelemissionen überwiegend im ultrafeinen Bereich die sowohl bei der Anzahlkonzentration als auch lungendeponierter Partikeloberfläche im lediglich geringfügig erhöht gegenüber der Raumluft sind.

3.2.10.8 Fazit

Ebenso wie die Brenner wurde der Heißluftstrahlerradiator als nicht „relevante“ Innenraum-Partikelquelle eingeordnet.

3.2.11 Schleifversuche

Als eine mögliche weitere Quelle von Nanopartikeln im Innenraum wurde Schleifen untersucht. Hierzu wurden Schleifversuche in einem Schleifprüfstand durchgeführt, bei dem ein nanopartikelhaltiger Lack aufgetragen auf Holzrohlingen abgeschliffen und die Partikelfreisetzung bei diesem Prozess erfasst wurde.

3.2.11.1 Schleifen, Geräte, Vorgehensweise

Es wurde ein vom Hersteller als Nano-Lack bezeichneter Holzlack (PALLMANN X-Nano) mit entsprechender Grundierung (laut Herstellerangaben) verwendet. Zudem wurden zwei ready-to-use Nanopartikel Dispersionen (NANOBYK-3600 Aluminiumoxid und NANOBYK-3821 Zinkoxid) als Additive zugesetzt. Diese Additive wurden den Herstellerangaben entsprechend dem Nano-Lack (5% Anteil) beigemischt, um die Kratzfestigkeit zu erhöhen. Gleichzeitig wurde somit sichergestellt, dass auch Nanopartikel in dem verwendeten Lack vorhanden sind. Den Verarbeitungsangaben des Herstellers folgend wurden die Holzrohlinge einmalig abgeschliffen, grundiert, lackiert, erneut abgeschliffen und ein zweites Mal lackiert und abgeschliffen. Alle Abschleifvorgänge wurden im Schleifprüfstand durchgeführt und dabei eine mögliche Partikelfreisetzung beim Prozess des Schleifens mittels einer Reihe angeschlossener Partikelspektrometer (FMPS, NSAM, CPC und APS) erfasst. Es wurde jeweils 30 bzw. 60 Sekunden mit einem Belastungsdruck von 1kg geschliffen und sowohl vor, während und nach dem eigentlichen Schleifvorgang die Anzahlgrößenverteilung erfasst. Darüber hinaus wurde der sich sedimentierende Staub im Schleifstand gesammelt, gewogen und für eine spätere Ermittlung der ROS Aktivität verwendet. Es ergeben sich somit folgende Untersuchungsszenarien je 3x Holzrohling, Grundierung, Nanolack, Nanolack + Additiv 3600, Nanolack + Additiv 3821, wobei für die Nanolacke zweimal lackiert und geschliffen wurde (1. und 2. Lackschicht/Lauf).

3.2.11.2 Messergebnisse

Anzahlkonzentration, –größenverteilung und lungendeponierbare Oberfläche

Die Anzahlkonzentration sowie die –größenverteilung und lungendeponierbare Oberfläche ist in den folgenden Abbildung 104 - Abbildung 115 dargestellt. Hierbei ist stets lediglich die Schleifphase (je 3x, in zwei Fällen aufgrund eines Geräteausfalls n = 2) abgebildet. Es zeigt sich bei der Partikelgrößenverteilung eine leichte Verschiebung der mittleren Partikelgröße von ~80 nm (Holzrohling und Grundierung) hin zu größeren mittleren Partikeldurchmessern von ~ 150 nm sobald lackiert wurde. Ein Unterschied durch die Partikelzusätze (Additive) ist dabei nicht zu erkennen (Abbildung 104 - Abbildung 107). Betrachtet man die Maxima der Anzahlkonzentration für die Modalwerte ergeben sich für den Holzrohling und die Grundierung ähnliche Konzentrationen bis ~150.000 Partikel (#/cm³). Für Lacke mit oder ohne Additiv zeigen sich dahingegen

deutlich geringe Konzentrationen im Maximum um die 20.000 Partikel ($\#/cm^3$). Dies deutet auf die Härte und somit auch angedachte Schutzfunktion des Lackes hin. Auffallend jedoch ist die Varianz der Anzahlkonzentration innerhalb der Messungen ($n = 3$) die trotz normiertem Abschleiff auftritt. Ein Grund hierfür ergibt sich aus der nicht kontrollierbaren Zusetzung des Schleifpapiers mit Abriebspartikeln (Abnahme der Körnung). Dies wurde auch visuell durch einen mal mehr oder weniger homogenen Belag deutlich. Für die Gesamtanzahlkonzentration zeigt sich ein starker Anstieg zu Beginn und anschließendem Abfall der Konzentration, wobei analog zur Anzahlgrößenverteilung die Gesamtanzahlkonzentration bei der Holzscheibe und der Grundierung um etwa einen Faktor 10 höher liegt. Ähnliches zeigen auch die LDSA Werte im Bezug des zeitlichen Verlaufs. Die Holzscheiben und die Grundierung zeigen zu Beginn einen schnellen Anstieg der Werte, gleichzusetzen mit dem Freisetzen einer vergleichsweise hohen Anzahl von Partikeln ($< 100 \text{ nm}$ vgl. Abbildung 104) mit darauffolgender schnellen Abnahme auf ein Grundniveau $< 250 \mu m^2/cm^3$. Dahingegen zeigen die Nanolacke entsprechend der zuvor festgestellten geringen Partikelanzahlemissionen keinen solchen Verlauf. Vielmehr zeigen sich zumeist leicht erhöhte Werte ($> 1000 \mu m^2/cm^3$) über den Schleifprozess hinweg mit zusätzlich einzelnen Höchstwerten. Dies entspricht der leichten Verschiebung Modalwerte der freigesetzten Partikel hin zu leicht größeren Partikel, welche nach dem im NSAM hinterlegten Modell auch eine höhere Wahrscheinlichkeit der Deposition haben (Abbildung 108 - Abbildung 110).

Abbildung 104: Mittlere Partikelgrößenverteilung während des Schleifens, $n = 3$; Holzrohling links, Grundierung rechts (FMPS)

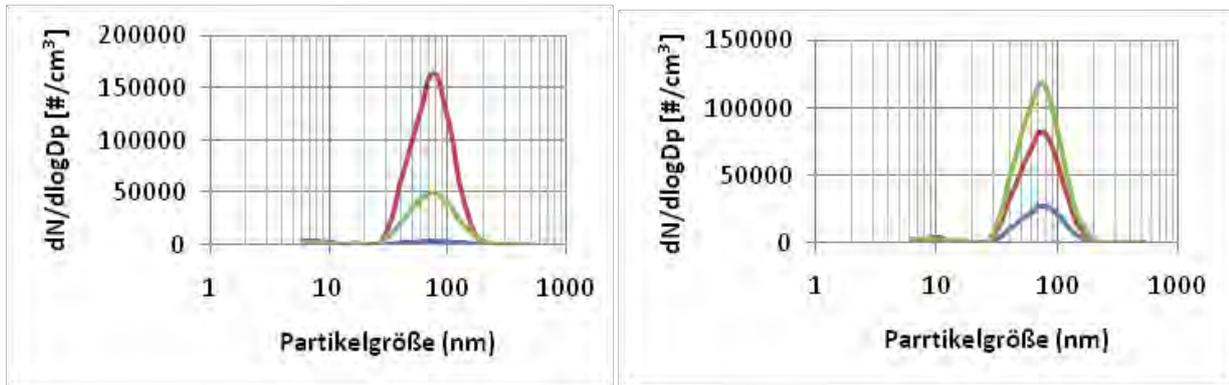


Abbildung 105: Mittlere Partikelgrößenverteilung während des Schleifens, $n = 3$; Nanolack 1. Lauf links, 2. Lauf rechts (FMPS)

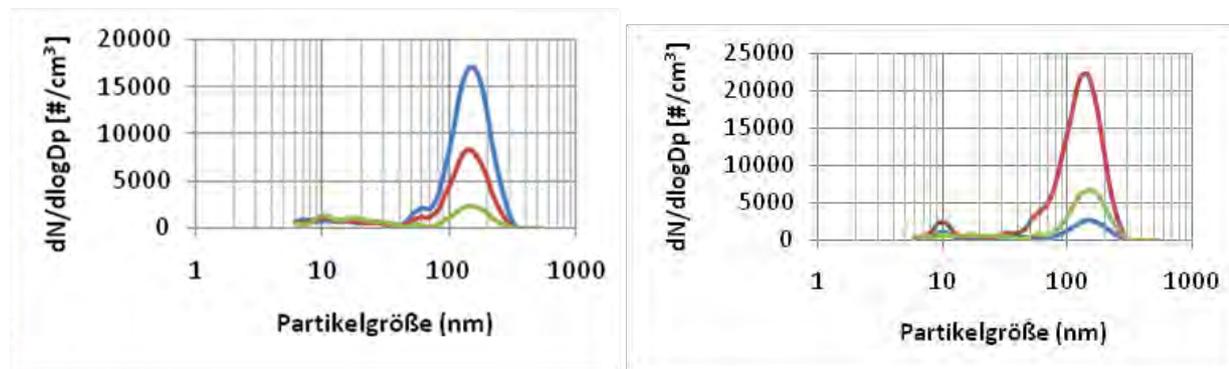


Abbildung 106: Mittlere Partikelgrößenverteilung während des Schleifens, Nanolack + Additiv 3600; 1. Lauf links, 2. Lauf rechts (FMPS)

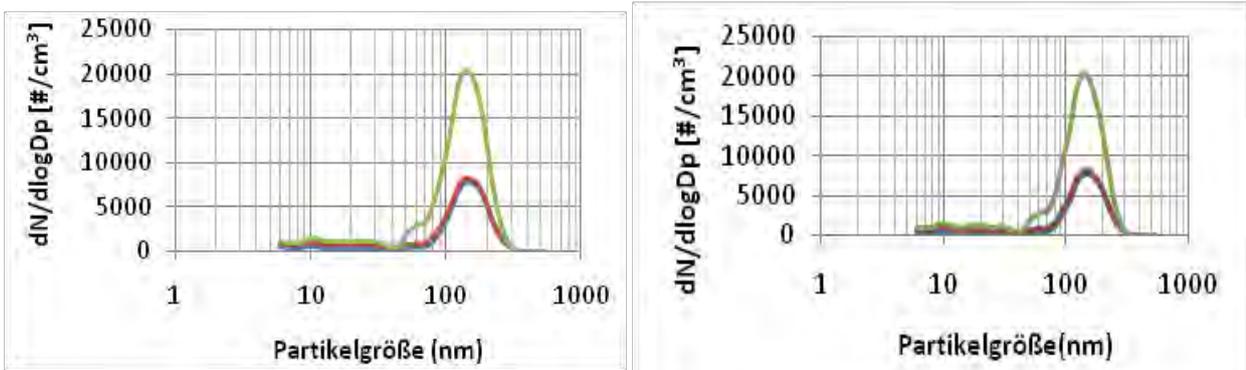


Abbildung 107: Mittlere Partikelgrößenverteilung während des Schleifens, Nanolack + Additiv 3821; 1. Lauf links, Lauf 2. rechts (FMPS)

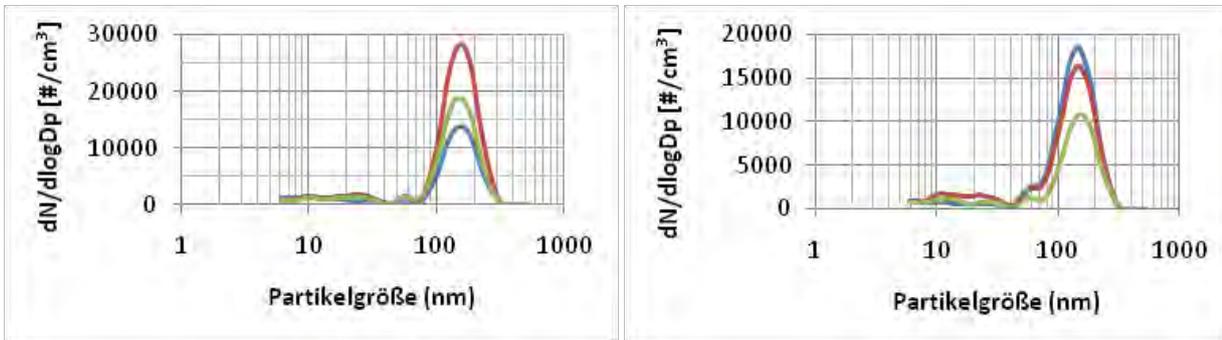


Abbildung 108: Verlauf der LDSA (NSAM) während des Schleifens; Holzrohling links, Grundierung rechts

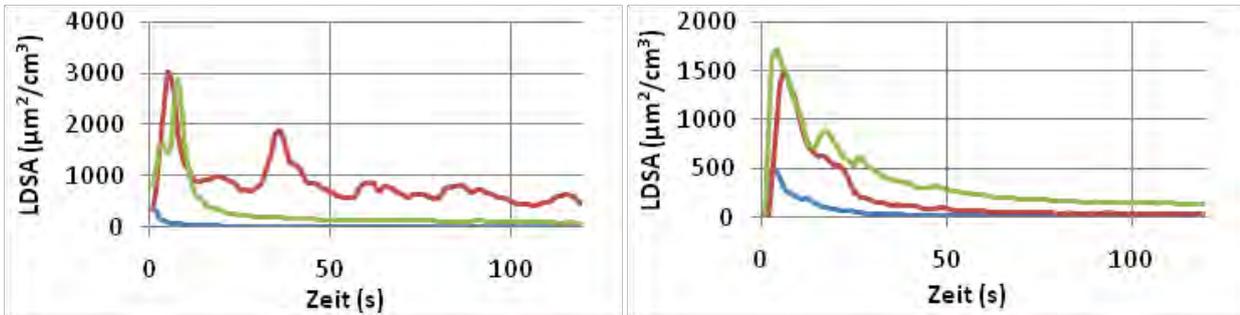


Abbildung 109: Verlauf der LDSA (NSAM) während des Schleifens; Nanolack 1. Lauf links, 2. Lauf rechts

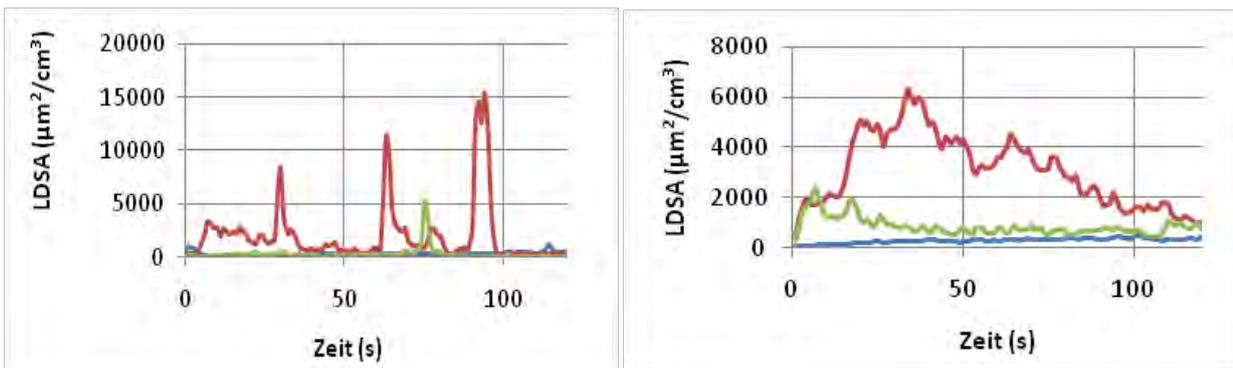


Abbildung 110: Verlauf der LDSA (NSAM) während des Schleifens; Nanolack + Additiv 3600; 1. Lauf links, 2. Lauf rechts

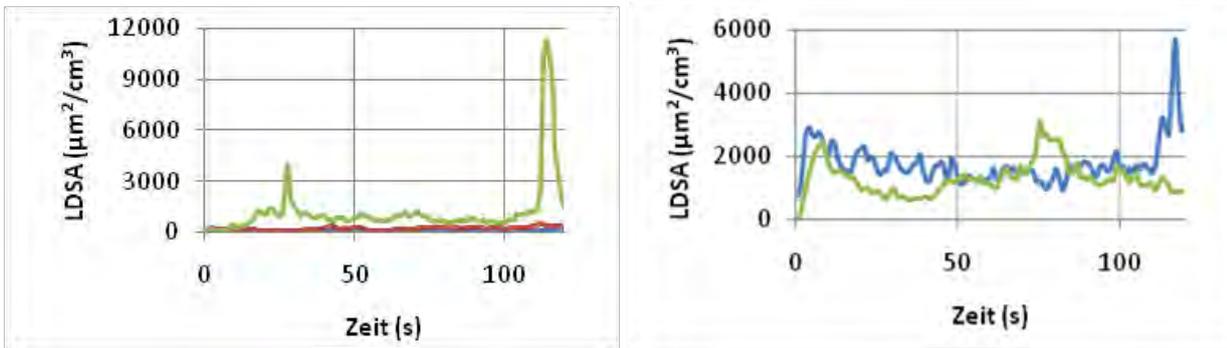


Abbildung 111: Verlauf der LDSA (NSAM) während des Schleifens; Nanolack + Additiv 3821; 1. Lauf links, 2. Lauf rechts

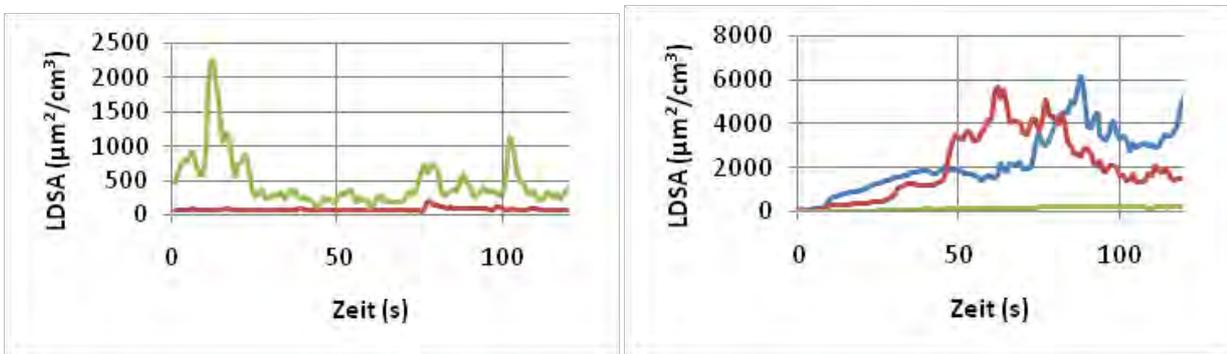


Abbildung 112: Verlauf der Anzahlkonzentration (FMPS) während des Schleifens; Holzrohling links, Grundierung rechts

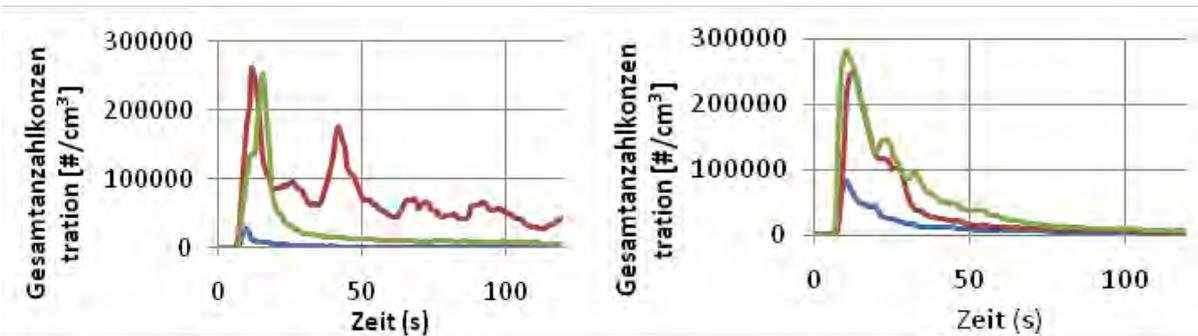


Abbildung 113: Verlauf der Anzahlkonzentration (FMPS) während des Schleifens; Nanolack 1. Lauf links, 2. Lauf rechts

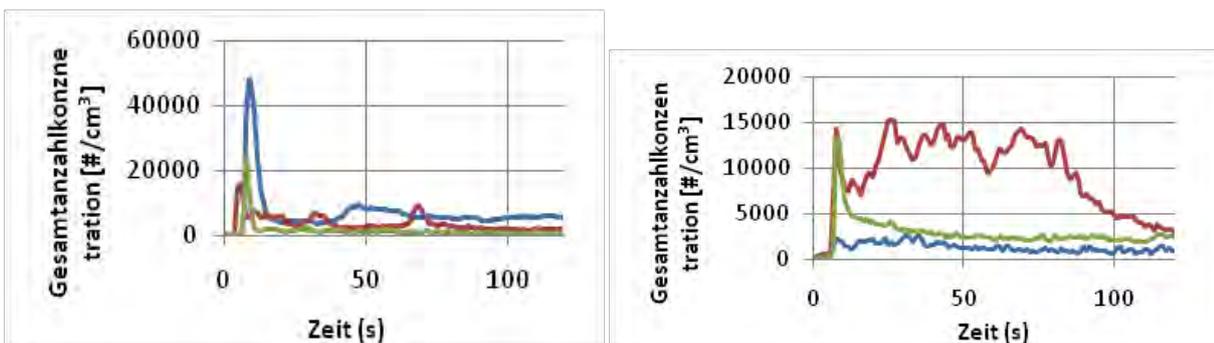


Abbildung 114: Verlauf der Anzahlkonzentration (FMPS) während des Schleifens; Nanolack + Additiv 3600 1. Lauf links, 2. Lauf rechts

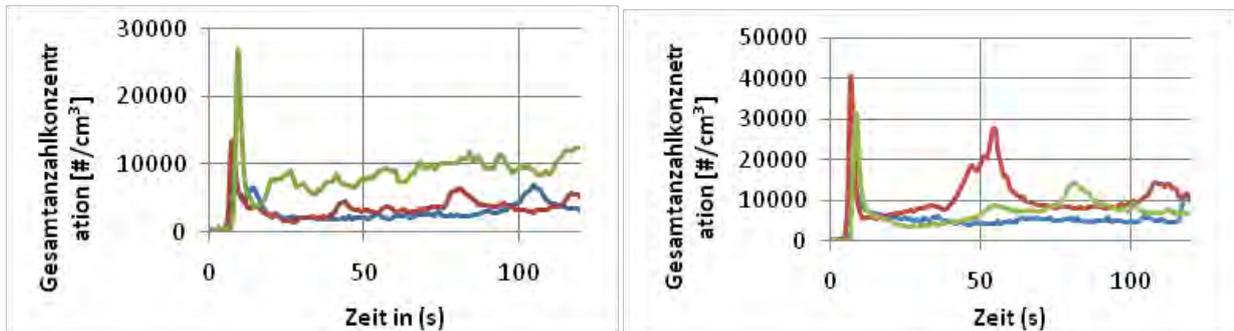
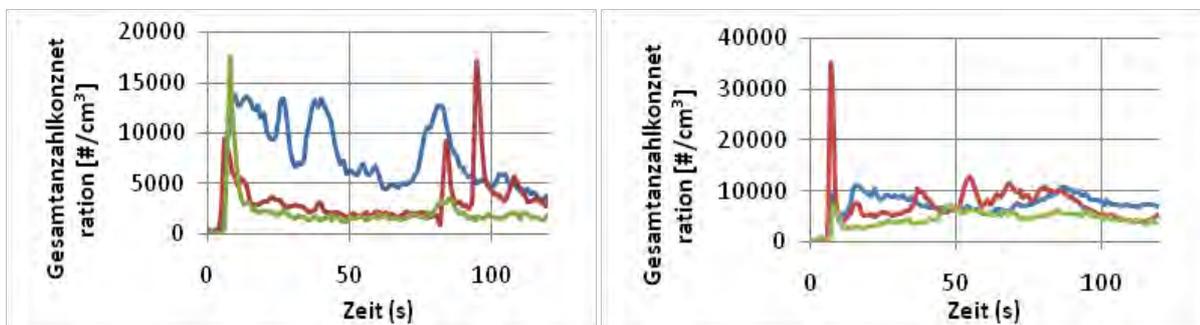


Abbildung 115: Verlauf der Anzahlkonzentration (FMPS) während des Schleifens; Nanolack + Additiv 3821 1. Lauf links, 2. Lauf rechts



ROS-Bildungspotenzial

Die während der Schleifversuche sedimentierten Partikel wurden anschließend in Suspension überführt und bei 0,5 mg/ml mit der ESR-Methode auf ihr Radikalgenerierungspotential untersucht. Von den Schleifproben ergab sich lediglich, im Vergleich zum Blindwert (deionisiertem Wasser = dH₂O) für den Nanolack + 3821 1. & 2. eine gegenüber der Nachweisgrenze erhöhte Hydroxylradikalbildungspotential (Abbildung 116). Für die Oberflächenreaktivitätsmessungen lässt sich ähnliches festhalten (Abbildung 117). Unter der Annahme, dass eine Reaktivität bei einem Verhältnis von > 1,3 gegeben ist, zeigt sich dies bei Berücksichtigung der Standardabweichung lediglich für den Nanolack + 3821.

Insgesamt lassen die Ergebnisse der ROS Messungen darauf schließen, dass das Additiv 3821 möglicherweise eine Reaktivität aufweist bzw. erzeugt. Dies wiederum ist, da es sich um ZnO (Übergangsmetall reagiert mit H₂O₂) handelt, zu erklären.

Abbildung 116: OH-Radikal Generierungspotential der Schleifemission-Suspensionen; Fehlerbalken = Standardabweichung, n = 3; rote gestrichelte Linie = Nachweisgrenze, deionisiertes Wasser = dH₂O

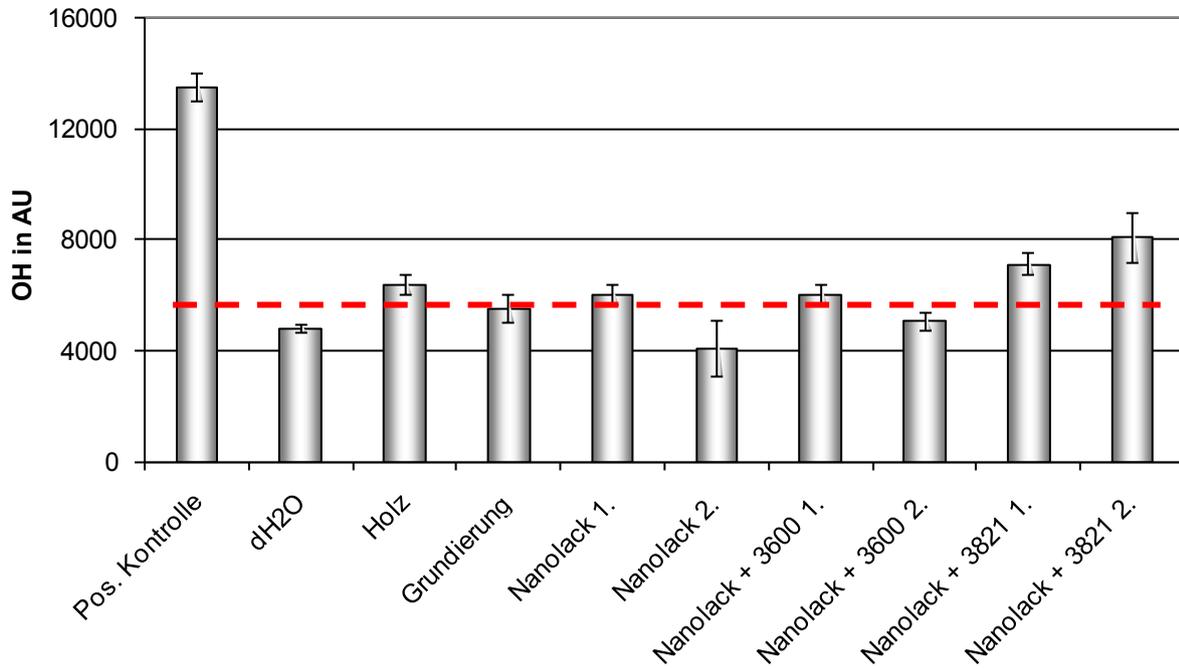
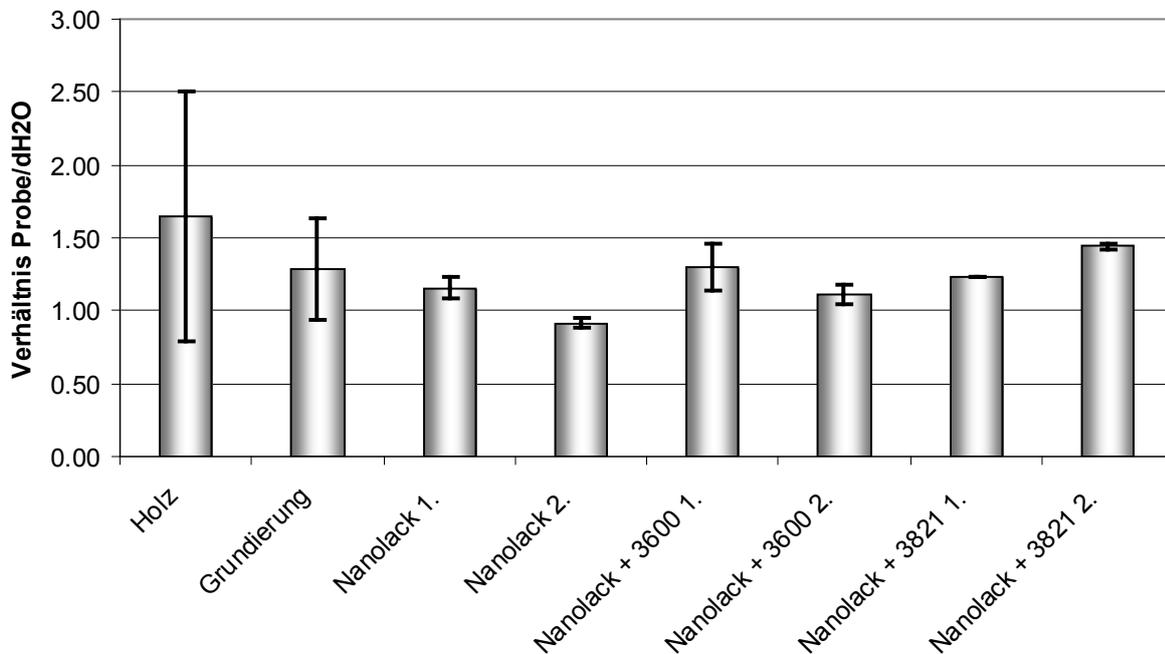


Abbildung 117: Verhältnis der Oberflächenreaktivität der Schleifemission-Suspensionen zu deionisiertem Wasser als Blindwert



Partikelmorphologie und Elemente in Partikeln (NAS-Proben/REM-EDX)

Während der Schleifversuche wurde jeweils auch mit dem Nanometer Aerosol-Sammler (NAS) Proben auf Ga-As-Trägern für die Analyse mittels REM-EDX gezogen. Es zeigten sich auf den Trägern stets mehrere größere aber auch vereinzelt kleine Partikel bei insgesamt geringer Belegung (Abbildung 118). An den größeren Partikeln wurden EDX Analysen zwecks chemischer Charakterisierung durchgeführt. Während für das Holz keine nennenswerten unerwarteten Elemente per EDX Analyse identifiziert wurden, zeigten die Analyse der Grundierungsprobe u.a. größere Anteile an Eisen, Kalium und Magnesium zusätzlich zu Aluminium, Kohlenstoff und Sauerstoff (Abbildung 119). Für den Nanolack wiederum konnten neben den zu erwartenden Elementen C, O und Silizium (Träger) keine weiteren auffälligen Elemente identifiziert werden (Abbildung 120). Die Nanomaterialzusätze (Al und Zn) hingegen lassen sich eingebunden in größere Partikel durchaus wiederfinden (Abbildung 121, Abbildung 122).

Abbildung 118: Beispiel zweier Übersichts-REM-Aufnahmen der gezogenen NAS Proben der Schleifemissionen (links Holz, rechts Nanolack)

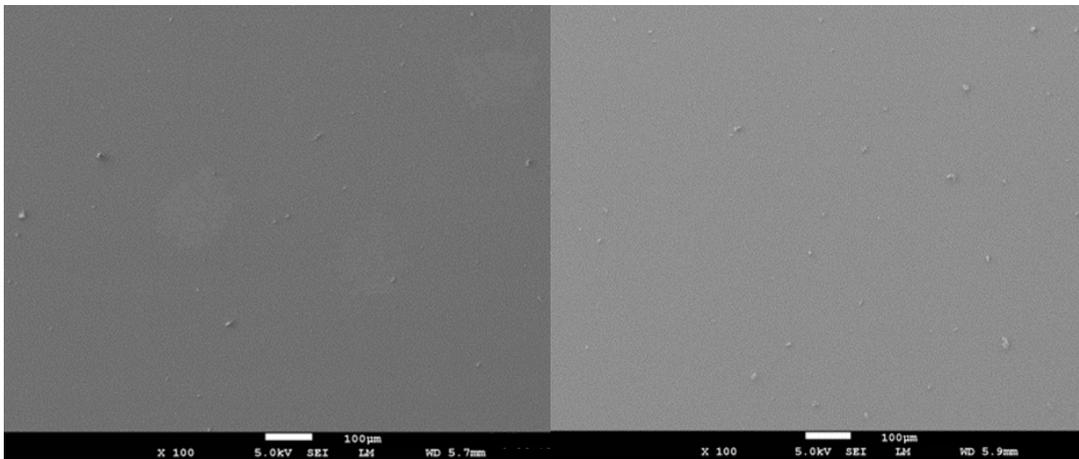


Abbildung 119: REM-Aufnahme (links) eine größeren Partikels mit dazugehöriger EDX Analyse (rechts) des in rot eingekreisten Partikel von Grundierungsemissionen

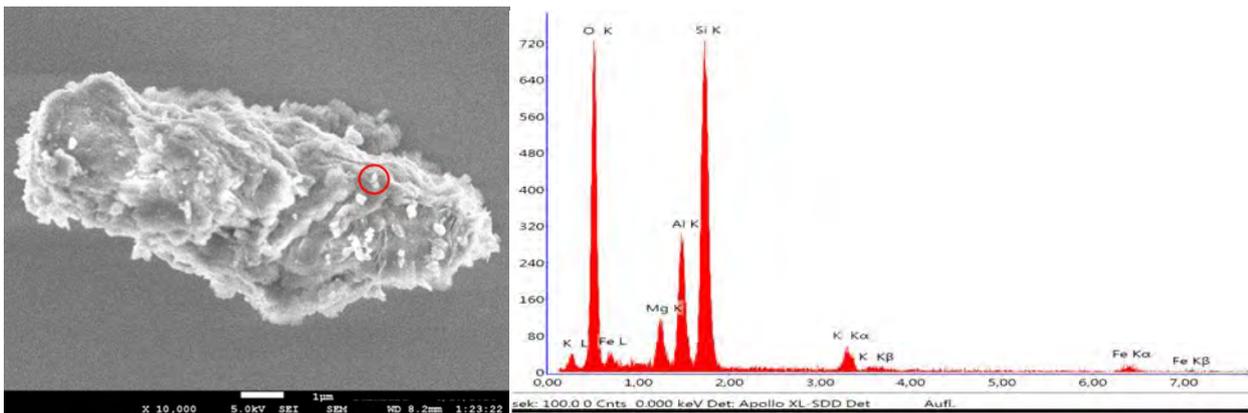


Abbildung 120: REM-Aufnahme (links) eine größeren Partikels mit dazugehöriger EDX Analyse (rechts) des in rot eingekreisten Partikels von Nanolackemissionen

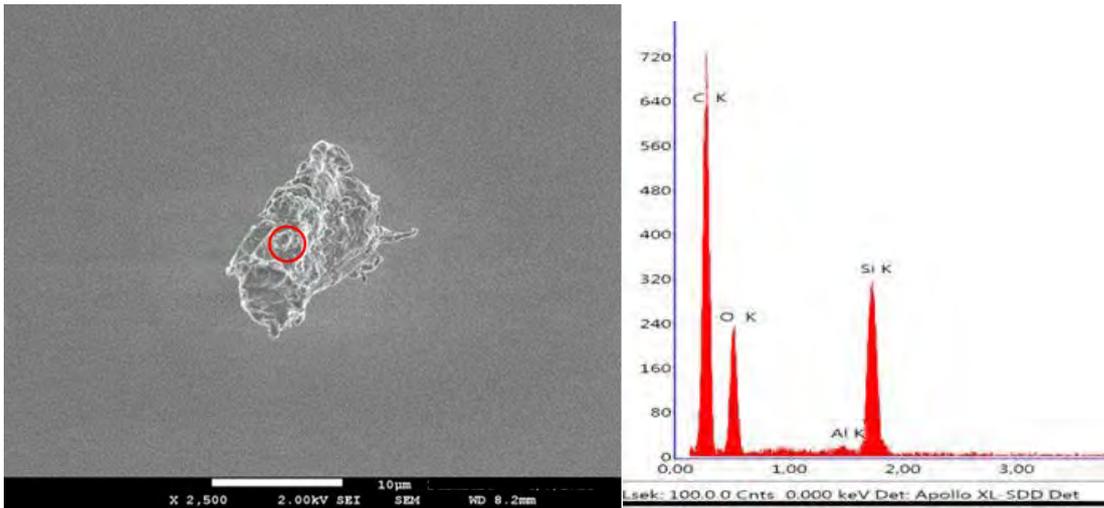


Abbildung 121: REM-Aufnahme (links) eine größeren Partikels mit dazugehöriger EDX Analyse (rechts) des in rot eingekreisten Partikels von Emissionen des Nanolack + 3600

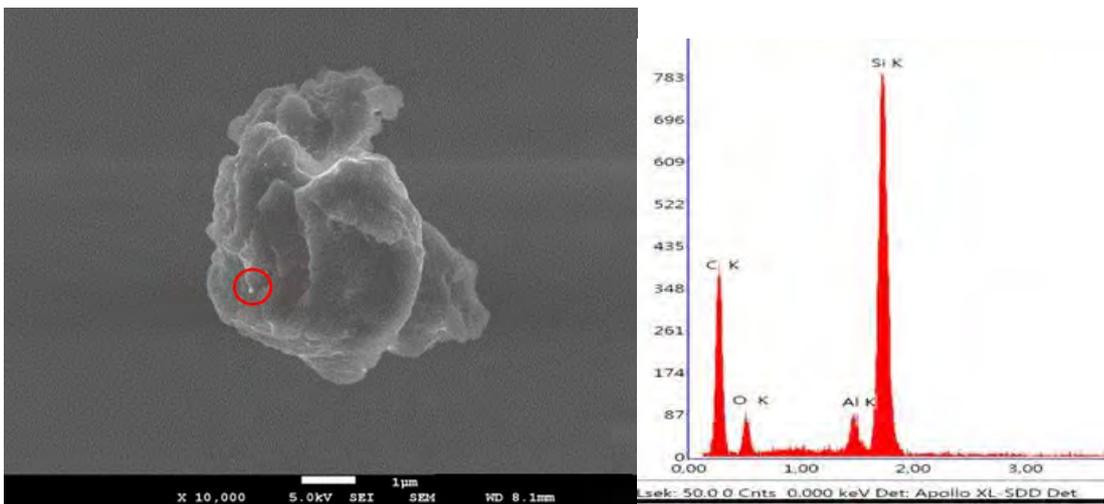
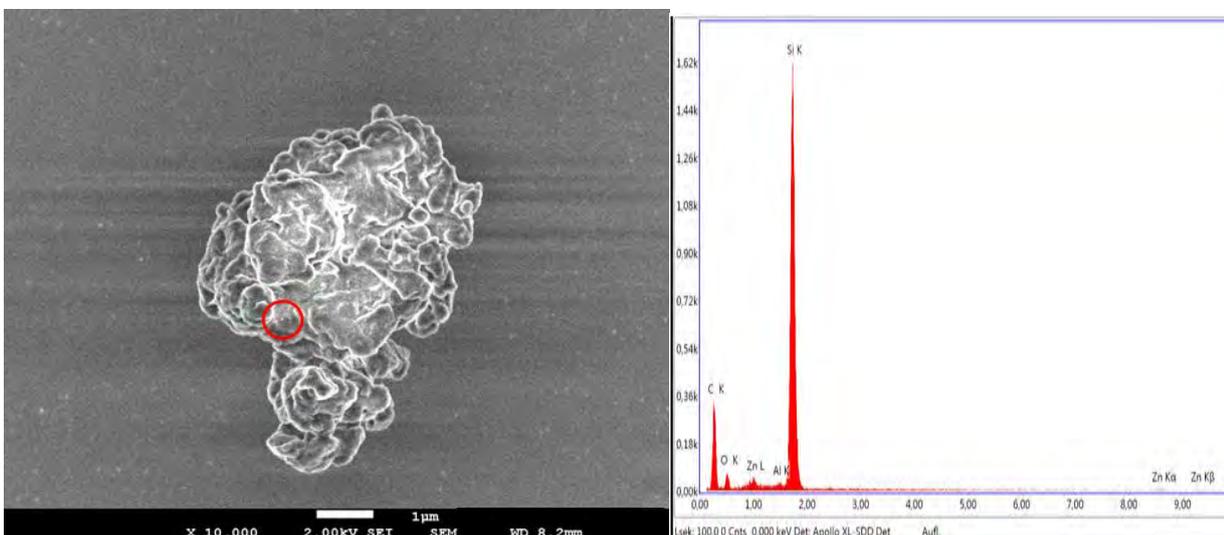


Abbildung 122: REM-Aufnahme (links) eine größeren Partikels mit dazugehöriger EDX Analyse (rechts) des in rot eingekreisten Partikels von Emissionen des Nanolack + 3821



3.2.11.3 Zusammenfassung Schleifen

Zusammenfassend zeigen sich durchaus „hohe“ peakartige Partikelemissionen (Beginn des Schleifprozesses), welche zu erhöhten Anzahlkonzentrationen als auch lungendeponierbarer Partikeloberfläche führen. Hierbei zeigt sich das Schleifen des Holzes und der Grundierung als am stärksten partikelemittierend mit mittleren Partikeldurchmessern < 100 nm. Beim Schleifen des Lackes mit oder ohne Zusatz von Nanopartikeln verringert sich entsprechend seiner Funktion als Schutz (ausgehärteter Lack) die emittierte Partikelanzahlkonzentration und die mittlere Größe wächst auf > 100 nm an. Die zu erwartenden Komponenten des Lackes bzw. die zugesetzten Nanopartikelelemente lassen sich darüber hinaus fast ausschließlich eingebettet in größere Agglomerate wiederfinden, einzelne Nanopartikel liegen kaum vor. Unter Berücksichtigung der Varianzen zeigten die Partikel keine signifikanten Reaktivitäten.

3.2.11.4 Fazit

Das Schleifen erweist sich als Prozess bei dem kurzzeitig erhöhte Partikelemissionen auftreten können, bei dem vor allem Lackagglomerate/Komponenten freigesetzt werden. Dabei stellt sich jedoch keine dauerhafte hohe Exposition ein, so dass Schleifen als eine für die Fragestellung dieses Projektes nicht „relevante“ Innenraum-Partikelquelle eingeordnet werden kann.

3.2.12 Zusammenfassung Charakterisierungsmessungen

Zusammenfassend wurden Messungen zur chemischen und physikalischen Charakterisierung von Innenraum-Partikelquellen anhand der folgenden Beispiele durchgeführt:

- ▶ Kerzenabbrand
- ▶ Toaströsten
- ▶ Pizzabacken
- ▶ Würstchen braten
- ▶ Staubsaugen
- ▶ Schleifen
- ▶ Zusatzuntersuchung (Gas- und Spiritusbrenner, Heissluftstrahlradiator)

Die Prozesse Kerzenabbrand, Braten und Toasten erwiesen sich dabei im Hinblick auf die Freisetzung sub-mikroner Partikel als sehr emissionsstark. Im Prüfraum konnten damit Anzahlkonzentrationen im Bereich zwischen ca. 0,5 und 3 Millionen Partikel/cm³ erreicht werden (zum Vergleich: typische Außenluft im städtischen Hintergrund liegt bei 15.000 bis 20.000 Partikel/cm³). Die sub-mikronen Partikel dominierten sowohl das Anzahl- als auch das Oberflächen- und Volumenspektrum, und damit auch die insgesamt emittierte Partikelmasse, die mehrere hundert $\mu\text{g}/\text{m}^3$ erreichen konnte. In allen drei Fällen wurden auch hohe lungendeponierbare Oberflächenkonzentrationen gemessen (zwischen ca. 1.500 bis 6.000 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$, städtischer Hintergrund typisch 50 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$), die aufgrund von anhaltenden Kondensations- und Agglomerationsprozessen im Verlauf der Experimente weiter zunahmen. Untersuchungen der chemischen Zusammensetzung auf elementaren und organischen Kohlenstoff (Filterproben) bzw. online mit dem AMS zeigten, dass in allen Fällen organische Kohlenstoffverbindungen große Anteile der Partikelmasse darstellen (Kerzenpartikel ca. 40 %, Toastpartikel ca. 50 % - 60 %, Bratpartikel ca. 60 %). Die restliche Masse lässt sich im Falle der Kerzenpartikel aus den AMS-Messungen durch Nitrat erklären, welches vermutlich aus den Dochtimpregnierungsmitteln (Ammoniumsalzen) oxidativ gebildet wird. Gasförmige organische Verbindungen, die mit dem PTR-MS erfassbar sind, lagen im sub-ppm Konzentrationsbereich vor. Interessant war die Oxidationsreihe Ethanol-Acetaldehyd-Essigsäure, die beim Toaströsten angetroffen wurde und auf Ethanol im Toastbrot (zugesetzt oder durch Gärung entstanden) hinweist.

Die Prozesse Pizza backen, Staubsaugen sowie die zusätzlich untersuchten Quellen (Gas/Spiritusbrenner, Radiator, Staubsauger) lieferten hingegen erheblich weniger Partikelemissionen (0,2 - 0,6 bzw. 0,02 - 0,14 MP/cm³). Spitzenwerte traten beim Pizzabacken auf, wenn Fett an der Ofenwand verkockte, beim Staubsaugen nur dann, wenn der dem Staubsammel-Zyklon nachgeschaltete HEPA-Filter nicht eingesetzt war. In diesem Fall wurde die Partikelanzahlkonzentration von den Eigenemissionen des Saugers dominiert, die besonders kleine Partikel mit Durchmessern von ca. 10 nm enthielten.

Das Schleifen von Lacken, gesondert in der Schleifkammer betrachtet, zeigte lediglich kurzzeitig erhöhte Partikelemissionen (bis 20.000 Partikel /cm³) bei dem vor allem Lackagglomerate/Komponenten freigesetzt werden. Allerdings stellt sich keine dauerhafte hohe Partikelexposition ein.

Eine Zusammenfassung der bei den Charakterisierungsmessungen gewonnenen Messdaten (ohne Schleifen, da in gesondertem Schleifstand erfasst) liefern die Abbildung 123, Abbildung 124 und Abbildung 125. Es wird deutlich, dass die höchsten Anzahl-, Oberflächen- und Massenkonzentrationen unter den jeweils verwendeten Bedingungen (Prüfraum, Temperatur etc.) bei den Aktivitäten Kerzenabbrand, Toasten und Braten erfasst und diese entsprechend als Expositionsquelle für die Probandenstudie ausgewählt wurden.

Abbildung 123: Übersicht der mittleren Partikelanzahlkonzentrationen während der Charakterisierungsmessungen ± Standardabweichung

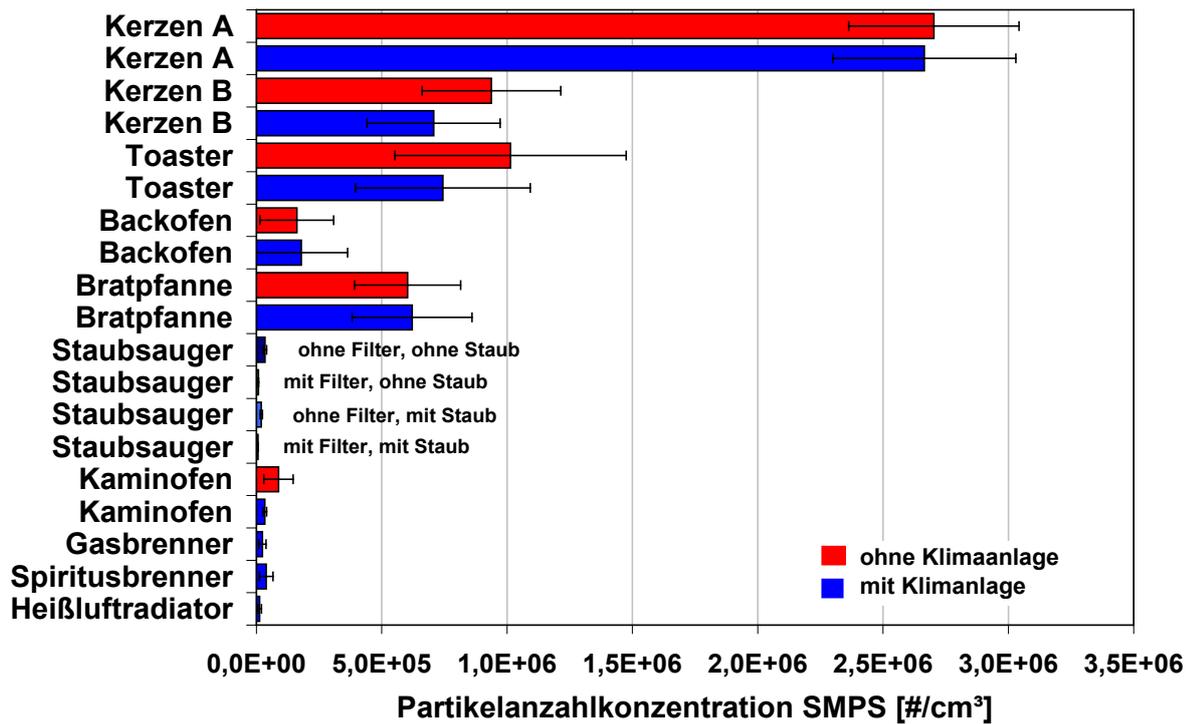


Abbildung 124: Übersicht der mittleren Oberflächenkonzentration während der Charakterisierungsmessungen ± Standardabweichung

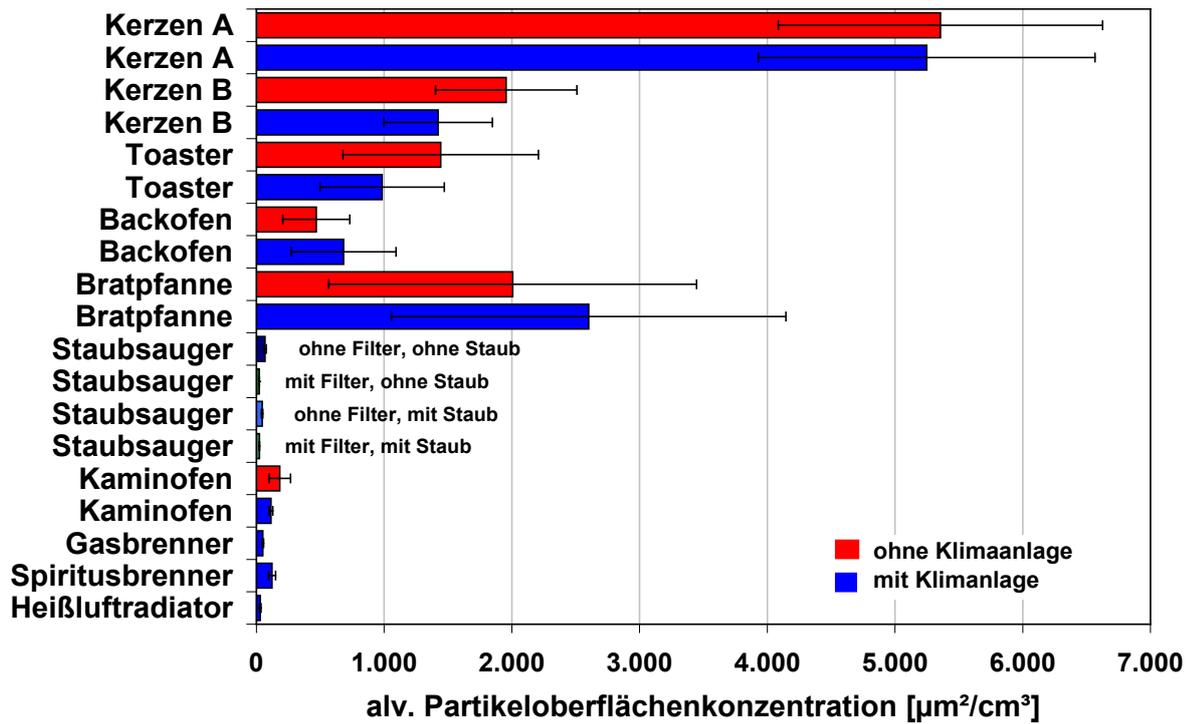
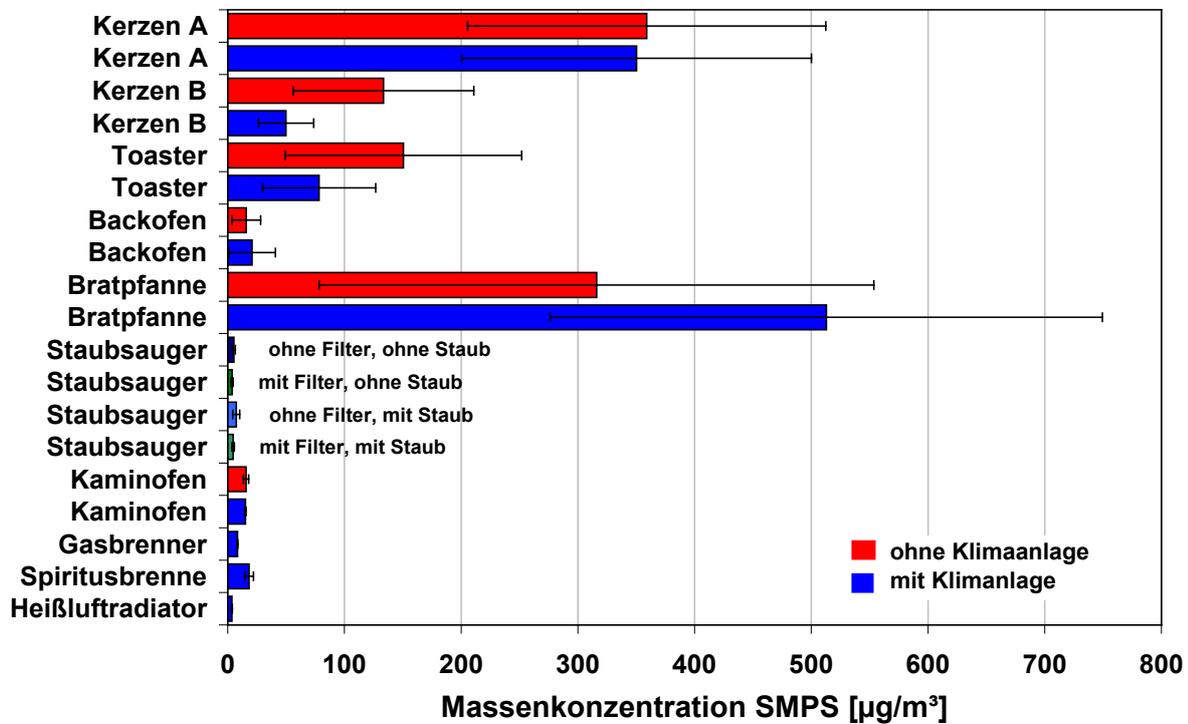


Abbildung 125: Übersicht der mittleren Massenkonzentration (errechnet aus SMPS-Daten) während der Charakterisierungsmessungen ± Standardabweichung



3.2.13 Quellen und Expositions-niveaus für die Probandenstudie

Basierend auf den durchgeführten Charakterisierungsuntersuchungen wurde festgestellt, dass keine der ausgewählten weiteren Innenraum-Partikelquellen für die Anwendung in der Expositionsstudie sinnvoll ist. Daher wurden die drei emissionsstärksten Expositionsquellen (Toasten, Braten, Kerzenabbrand) für die Probandenexposition ausgewählt und schließlich auf zwei Niveaus zur Exposition der Probanden verwendet. Dabei wurden aufgrund erster Ergebnisse der anfänglich gewählten Expositions-konzentration bei der 2. Expositionsstufe höhere Expositions-konzentrationen eingestellt, indem jeweils eine Verdoppelung der Emissionsquellen gegenüber den Charakterisierungsmessungen erfolgte (z.B. 40 anstatt 20 Kerzen). Während der Probandenstudie wurde stets online die Partikelanzahlkonzentration, Temperatur, Luftfeuchtigkeit, gegebenenfalls CO (mittels Warngerät) erfasst. Eine mittlere Übersicht der beiden erfassten Charakterisierungsparameter (mittlere Messdaten von 10:00 bis 13:00 Uhr) während der Expositionsphasen (I und II) findet sich nachfolgend in Tabelle 12, Tabelle 13, Tabelle 14. Die Messdaten zeigen eine gute Vergleichbarkeit sowohl für die Temperatur als auch für die Luftfeuchte zwischen den beiden Expositions-niveaus. Für die Oberflächen- und Massenkonzentration wurden der Erwartung entsprechend ca. 2-fach erhöhte Werte festgestellt, so dass annähernd analog der Erhöhung der Quellstärke, auch eine Verdoppelung der Exposition erreicht wurde.

Tabelle 12: Übersicht der erfassten mittleren Temperatur und rel. Feuchte Daten; I = Expositionslevel 1, II = Expositionslevel 2; SD = Standardabweichung

	N	Temperatur in °C		rel. Feuchte in %	
		Mittelwert	SD	Mittelwert	SD
Kerzen	10	24,0	1,2	36,7	8,3
Toasten	9	23,1	1,2	37,8	6,9
Braten	10	23,1	1,0	38,2	8,3
Blank	13	24,1	1,1	30,6	8,2
Kerzen II	9	24,6	1,2	30,7	8,5
Toasten II	9	23,6	0,7	42,0	7,7
Braten II	10	23,1	0,4	32,6	8,0

Tabelle 13: Übersicht der erfassten mittleren Anzahlkonzentrationen; SD = Standardabweichung

	Anzahlkonzentration (APS) in #/cm ³			Anzahlkonzentration (FMPS) in 1000#/cm ³			Anzahlkonzentration (SMPS) in 1000#/cm ³		
	N	Mittelwert	SD	N	Mittelwert	SD	N	Mittelwert	SD
Kerzen	7	8,0	5,9	7	2005	238	6	1552	843
Toasten	7	23,4	40,6	10	934	124	7	685	337
Braten	8	23,4	23,3	9	328	85,6	8	269	136
Blank	11	3,5	4,8	12	4,6	2,5	12	2,7	1,6
Kerzen II	9	2,5	2,1	9	2767	149	8	1780	271
Toasten II	10	3,9	3,6	10	1485	252	10	1076	269
Braten II	10	73,3	54,6	10	711	151	10	506	122

Tabelle 14: Übersicht der erfassten mittleren Expositionsparameter Oberflächen- und Massenkonzentrationen; SD = Standardabweichung

	Oberflächenkonzentration (NSAM) in µm ² /cm ³			Massenkonzentration (FMPS + APS) in µg/m ³			Massenkonzentration (SMPS + APS) in µg/m ³		
	N	Mittelwert	SD	N	Mittelwert	SD	N	Mittelwert	SD

Kerzen	8	2261	372	7	53,3	14,7	6	52,5	11,5
Toasten	10	1874	389	10	36,5	12,2	7	35,7	8,5
Braten	9	1286	623	9	86,0	88,8	9	113	99,4
Blank	14	23,8	18,8	12	36,5	5,7	12	5,8	5,6
Kerzen II	9	3800	421	9	85,6	12,1	9	135	27,6
Toasten II	10	3850	615	10	82,8	20,5	10	94,5	33,7
Braten II	9	3872	1025	10	320	126	10	387	171

3.2.14 Charakterisierungsparameter der Exposition

Nach Beendigung der Probandenexpositionsversuche erfolgte zunächst unter den Partnern eine Abstimmung über die für weitere Auswertungen zu verwendenden Charakterisierungsparameter. Die entsprechende Datenbearbeitung, u. a. die Berechnung persönlicher Probandenexposition, die Überprüfung der Datenplausibilität und Validität, wurde daraufhin durchgeführt. Die Auswahl der Größenklassen bei den Charakterisierungsparametern erfolgte hierbei vor allem basierend auf vorhanden Literaturdaten, um eine Vergleichbarkeit zu ermöglichen (Wichmann et al. 2000, Xia et al. 2013). Einen Auszug der bereitgestellten probandenspezifischen Charakterisierungsparameter der Exposition findet sich in Tabelle 15 (vollständige Tabelle s. Anhang 1).

Tabelle 15: Ausschnitt aus der erstellten Probanden-Expositionstabelle

Probanden ID	rel. Feuchte		FMPS Anzahl [# / cm ³]			
	%		< 10 nm		10 - 30 nm	
	MW	SD	MW	SD	MW	SD
1	48,67	0,98	77.646,33	7.440,11	55.9304,64	3.3300,3
1	30,43	0,39	3.911,43	1.939,07	64.288,36	2.4769,59
3	33,43	0,33	234,41	37,81	1.362,05	80,51
5	44,04	2,67	25.2873,15	26.297,83	1.019992,84	6.2547,94

3.2.15 Vergleich der NSAM und miniDiSC Daten

Im Rahmen der Probandenexpositionen wurden für Testzwecke über den vereinbarten Untersuchungsrahmen hinaus auch personengetragene Messgeräte eingesetzt. Diese sogenannten miniDiSC-Geräte liefern simultan Messwerte für die lungendeponierbare Partikeloberflächenkonzentration (LDSA), welche zu den stationären NSAM Messungen verglichen werden können. Insgesamt standen bis zu drei Geräte gleichzeitig zur Verfügung. Je nach Verfügbarkeit wurden zumeist ein oder zwei Geräte über die Dauer des Expositionstages an Probanden übergeben und ein drittes Gerät wurde in der Expositions-kammer stationiert. Hierdurch ist einerseits ein Vergleich der NSAM und miniDiSC Daten möglich, andererseits erlauben die den Probanden ausgehändigten Geräte eine Überwachung der Exposition außerhalb der Expositions-kammer.

3.2.15.1 Ergebnisse

Übersicht der stationären NSAM Daten während der Expositionsphase 1 und 2

Für die Expositionsphase 1 (Abbildung 126) und Expositionsphase 2 (Abbildung 127) wurde zunächst der Mittelwert der LDSA über alle Expositionsquellen errechnet.

Abbildung 126: Mittlere NSAM und miniDiSC (stationär) Daten während der Expositionsphase 1

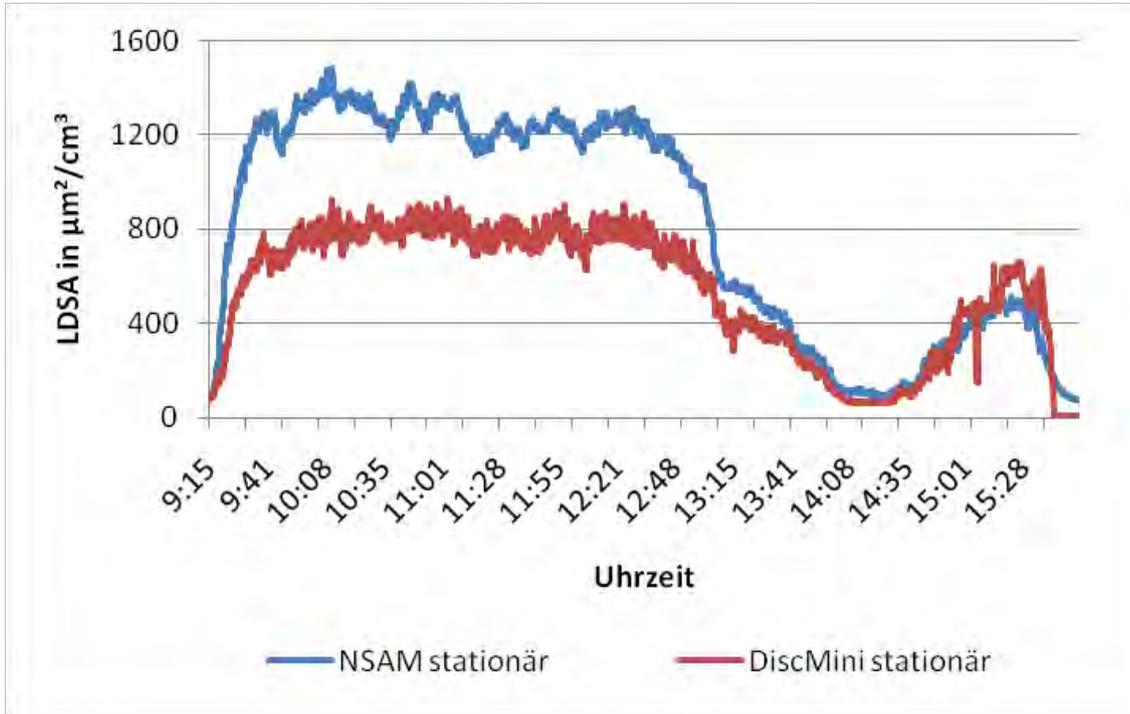
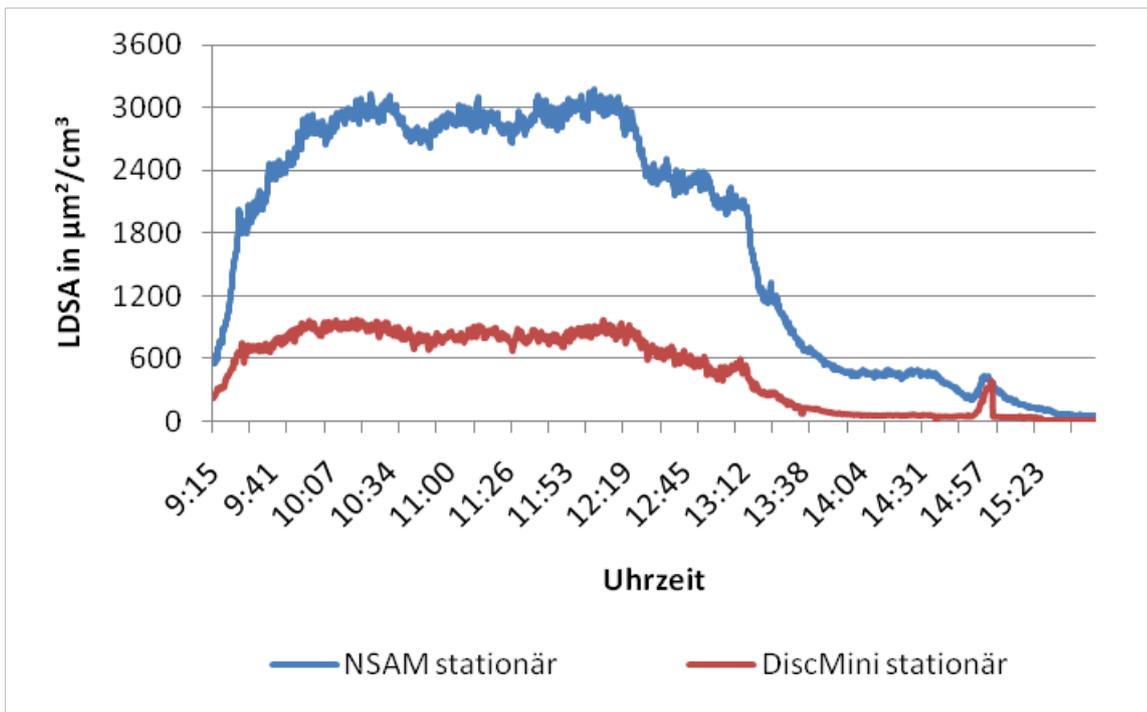


Abbildung 127: Mittlere NSAM und miniDiSC (stationär) Daten während der Expositionsphase 2



Es zeigt sich ein paralleler Verlauf der gemessenen Daten, bestätigt durch eine hohe Korrelation (miniDiSC zu NSAM) von $R = 0.95$ (Expositionslevel 1, Steigung = 0.54) und $R = 0.98$ (Expositionslevel 2, Steigung =

0.30). Zugleich zeigen sich stets höhere Messwerte für das NSAM im Vergleich zum stationären miniDiSC, insbesondere für die Expositionsphase 2. Auch ein expositionsquellen-spezifischer Vergleich zwischen NSAM und stationärem miniDiSC belegt anhand hoher Korrelationen (Tabelle 16) einen parallelen Verlauf der Messkurven und somit auch die Vergleichbarkeit der Messgeräte. Allerdings weisen die miniDiSC-Geräte im Vergleich zum NSAM zumeist Minderbefunde auf. Dies kann zum Teil an Inhomogenitäten im Expositionsraum liegen (Distanz der Ansaugstutzen NSAM und miniDiSC ca. 1 bis 1,5 m) aber auch insbesondere für Expositionslevel 2 an einem overload für den miniDiSC (Zusetzen der Partikeleinlassdüsen).

Tabelle 16 Übersicht der NSAM und miniDiSC (stationär) Daten (in $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$)

		Blind		Kerzen		Toasten		Braten	
		miniDiSC	NSAM	miniDiSC	NSAM	miniDiSC	NSAM	miniDiSC	NSAM
Expositionslevel I	MV	14,4	31,7	1203	1725	696	1734	389	726
	SD	5,2	4,3	623	893	327	566	301	566
	Median	17,0	31,1	1572	2325	806	924	484	924
	Min	0,1	25,5	8,5	36,8	21,3	16,5	8,3	16,5
	Max	24,7	41,6	2460	3232	1238	1663	1037	1663
	Korrelation	-0,59		0,93		0,93		0,99	
	Steigung	-0,72		0,65		0,45		0,52	
Expositionslevel 2	MV	0,8	19,0	598	2312	749	2210	466	2556
	SD	0,4	1,4	486	1339	497	1450	252	1443
	Median	0,9	18,7	639	2741	964	2989	568	3262
	Min	0,0	17,1	8,6	109	20,7	52,4	22,8	98,4
	Max	1,7	28,5	1507	4240	1664	4276	975	4378
	Korrelation	-0,72		0,95		0,96		0,95	
	Steigung	-0,18		0,35		0,33		0,16	

Vergleich des stationären zu den mobilen miniDiSC

Ein Vergleich des stationären zu den mobilen miniDiSC Daten verdeutlicht den Unterschied zwischen der Belastung in der Expositions-kammer und den medizinischen Untersuchungsräumen bzw. Aufenthaltsräumen der Probanden. Um den Unterschied zu verdeutlichen sind in den folgenden (Abbildung 128, Abbildung 129, Abbildung 130, Abbildung 131) beispielhaft für jede Quelle jeweils die Verläufe von miniDiSC Daten eines Expositionstages dargestellt.

Abbildung 128: Zeitlicher Verlauf der miniDiSC LDSA-Werte für die Expositionsquelle Kerzen vom 23.10.2012

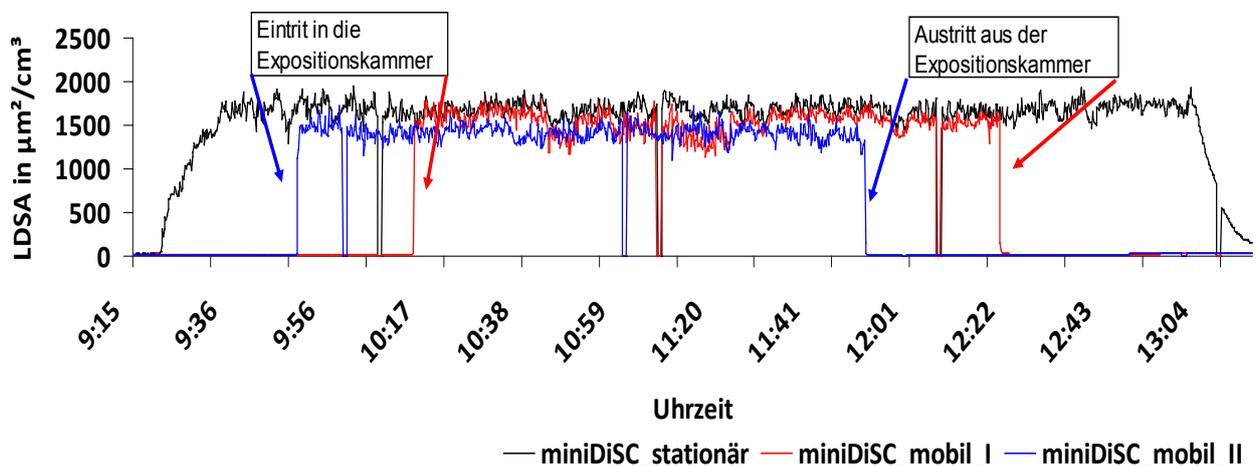


Abbildung 129: Zeitlicher Verlauf der miniDiSC LDSA-Werte für die Expositionsquelle Braten vom 21.11.2012

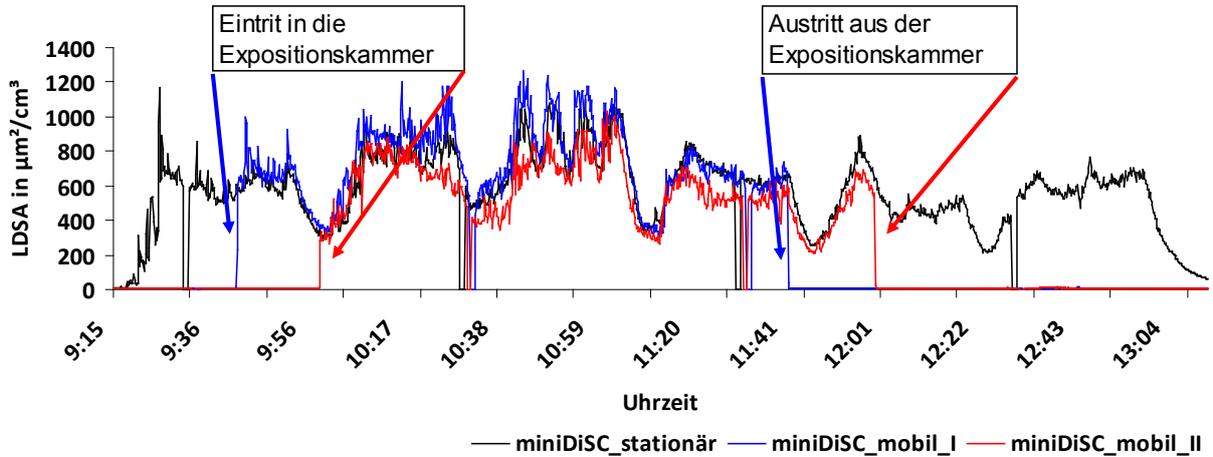


Abbildung 130: Zeitlicher Verlauf der miniDiSC Messdaten für die Expositionsquelle Toasten vom 09.10.2012

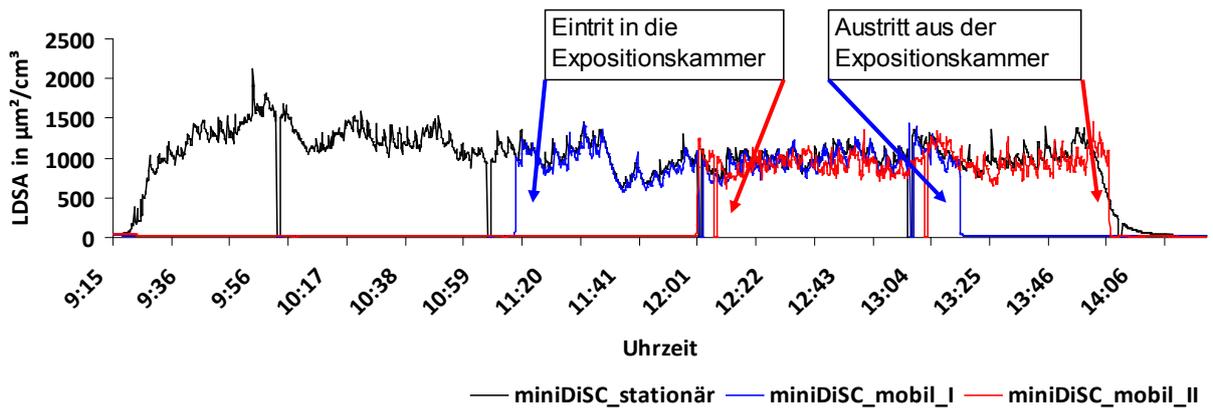
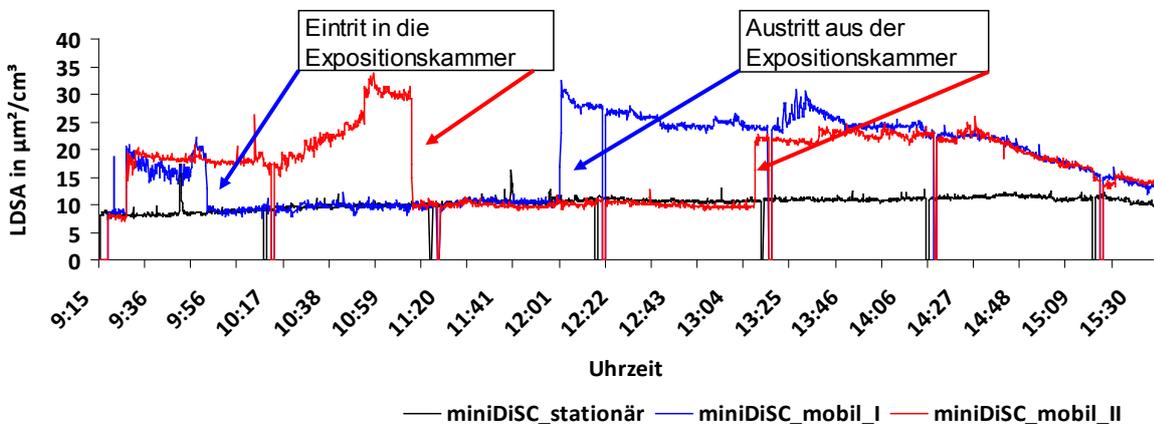


Abbildung 131: Zeitlicher Verlauf der miniDiSC LDSA-Werte für die Expositionsquelle Blind vom 22.11.2012



Der Eintritt der Probanden bzw. der mobilem miniDiSC (rot und blau) ist jeweils, mit Ausnahme für die Quelle Blind, deutlich an einem sprunghaften Anstieg der LDSA-Werte zu erkennen. Demgegenüber zeigen die mobilen Geräte während des Aufenthaltes außerhalb des Expositionsraumes (in den Untersuchungs-räumen) deutlich geringere, gegenüber den Expositions-kammerwerten zu vernachlässigende Werte. Dies bestä-

tigen auch die Messwerte der Blindquelle. Im Vergleich liegt hier die gemessene LDSA bei $\sim 10\text{-}30 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ (Abbildung 131), zu beispielsweise $\sim 1000 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ bei der Quelle Toasten (Abbildung 130). Auffällig, aber nicht unerwartet, drehen sich bei dem dargestellten Beispiel der Blind-Quelle die Verhältnisse um. Die mobilen Geräte zeigen bei Aufenthalt in den Untersuchungsräumen leicht höhere Werte im Vergleich zu den Werten in der Expositions-kammer. Was bedeutet, dass die Luft in der Expositions-kammer (bei Klimaanlagebetrieb) in diesem Fall weniger partikelbelastet war im Vergleich zu den Untersuchungsräumen. In letzteren könnte eine höhere (Arbeits-)Aktivität und möglicherweise auch ein Einfluss von Außenluft durch zeitweise offene Türen oder Fenster zu leicht höheren Messwerten geführt haben. Bei Eintritt in die Expositions-kammer zeigt sich entsprechend auch ein Abfall auf das Messniveau des stationären miniDiSC.

Insgesamt ergab sich im Mittel für die Aufenthaltszeiten außerhalb der Expositions-kammer ein Wert von $< 30 \mu\text{g}^2/\text{cm}^3$ wohingegen während des Aufenthaltes in der Expositions-kammer Werte $> 600 \mu\text{g}/\text{cm}^3$ erfasst wurden.

3.2.16 Zusammenfassung Vergleich NSAM - miniDiSC

Die Auswertung der miniDiSC und NSAM Daten zeigt eine gute Vergleichbarkeit des Signalmusters zwischen den Geräten mit absolut höheren Werten für das NSAM. Ebenso lässt sich die Bewegung der Probanden (Eintritt/Austritt) in die Expositions-kammer anhand der mobilen miniDiSCs sehr gut zeigen, wie auch eine im Vergleich zur Expositions-kammer zu vernachlässigende Exposition der Probanden vor und nach der Exposition.

4 Toxikologische Untersuchungen

Die toxikologischen Studien haben zum Ziel, das oxidative Potential von Innenraumluftpartikeln und daraus resultierende Zellantworten zu untersuchen. Die humane Lungeneptihelzelllinie A549 diente hierfür als in vitro-Model. Um zunächst eine potentielle DNA-Schädigung zu untersuchen, wurde in ersten Experimenten der Formamido-pyrimidin-DNA-glykosylase (Fpg) modifizierte Comet-Assay verwendet. Diese abgewandelte Form des Comet-Assays erlaubt durch die Verwendung des DNA-Reparaturenzyms Fpg die gleichzeitige Bewertung von DNA-Strangbrüchen und oxidativem Stress in der Zelle (Johansson et al., 2010; Wessels et al., 2010). In weiteren Experimenten wurde außerdem die zelluläre Freisetzung des pro-inflammatorischen Markers Interleukin-8 (IL-8) bestimmt. Verschiedene Publikationen konnten bereits zeigen, dass feine und ultrafeine Partikel sowie standardisierte Nanopartikel in der Lage sind, pro-inflammatorische Zytokine wie IL-8 freizusetzen (Schins et al., 2002; Monteiller et al., 2007; Wessels et al., 2010, Gerloff et al 2013). Zur Erhebung des chemotaktischen Zytokins Interleukin 8 wurden Enzyme-linked Immunosorbent Assays (ELISA) der Firma Sanquin (PeliKine compact™ ELISA kit) verwendet.

Für diese Untersuchungen wurden die bereitgestellten PTFE-Filterproben der Innenraumexpositionen wie in der Folge beschrieben extrahiert und die Extrakte bis zur Durchführung der Analysen gefriergetrocknet gelagert.

4.1 Angewendete Methoden

4.1.1 Probenaufbereitung – Extraktion und Gefrierdrocknung

Das Probenmaterial wurde auf PTFE-Filtern gesammelt und gemäß einer zuvor entwickelten Methode, welche verwendet wird um die Toxizität von Feinstäuben zu erfassen (Shi et al. 2003, Wessels et al. 2010), extrahiert und somit die Partikel zur weiteren Nutzung vorbereitet. Zusammengefasst werden durch diese Methode die auf dem Filter gesammelten Partikel mit deionisiertem Wasser durch Schütteln und Ultraschallbehandlung im Wasserbad (Sonorex TK52 60W/35KHz) extrahiert bzw. resuspendiert. Die so entstehende Suspension wird in der Folge gefriergetrocknet bis lediglich die festen Partikel zurückbleiben.

4.1.1.1 Extraktionseffizienz

Die Effizienz des Extraktionsverfahrens wurde durch zwei unabhängige Methoden erfasst. Zum einen durch die Wägung der Filter vor und nach der Extraktion und zum anderen über die Wägung bzw. Massenzunahme des Eppendorfgefäßes welches bei der Gefrierdrocknung verwendet wurde. Wie in der Tabelle 17 zu erkennen ergaben sich abhängig von der Partikelquelle erhebliche Unterschiede in der Effizienz der Partikelextraktion.

Tabelle 17: Effizienz der Partikelextraktion für PM2.5 und PM1 Proben

	PM Fraktion	% Masse extrahiert
Leerraum	2.5	0
Kerzen RAL	2.5	63 - 74
Kerzen nicht RAL	2.5	24 - 45
Kerzen RAL	1	68
Kerzen nicht RAL	1	28 - 45
Toast	2.5	36
Toast	1	31
Braten / Würstchen	2.5	7

Dies ist auf die unterschiedliche chemische Zusammensetzung und die physikalisch-chemischen Eigenschaften der Partikel bedingt zurückzuführen. Insbesondere die Extraktionseffizienz von der Filterprobe der Quellaktivität Braten war besonders gering. Vermutlich handelt es sich bei den emittierten Partikeln vorwiegend um mit einer Lipidschicht überzogene Partikel welche aufgrund ihrer hydrophoben Eigenschaften mit dem eingesetzten deionisiertem Wasser entsprechend schlecht resuspendiert werden können. Entsprechend ist zusätzlich die Verwendung einer Methanolextraktion zumindest für die Quellaktivität Braten durchgeführt worden. Hierzu wurden wie zuvor beschrieben erneut Proben der Quellaktivität Braten gesammelt (Abschnitt

3.2.6) und in weiteren toxikologischen Experimenten im Vergleich zum ursprünglichen Extraktionsverfahren untersucht.

4.1.1.2 Ergebnisse

DNA-Schädigung in A549 Lungeneithelzellen

DNA-Strangbrüche sowie oxidative DNA-Schäden wurden mittels des Fpg-modifizierten Comet-Assays untersucht. Hierfür wurden A549 Zellen mit Innenraumluftpartikeln der Expositionsquellen Kerzenabbrand, Toasten und Braten sowie einem Referenzstaub /Positivkontrolle behandelt. Für die Untersuchungen wurden alle Partikelsuspensionen mit der gleichen Konzentration von 50 µg/ml verwendet (vgl. 4.1.1, Wessels et al. 2010). Beim Kerzenabbrand sind zwei unterschiedliche Kerzentypen miteinander verglichen worden (nachfolgend bezeichnet als Typ A und B). Die Ergebnisse dieser Versuche sind in Abbildung 132 (DNA-Strangbrüche) und Abbildung 133 (oxidative DNA-Schäden) dargestellt. Bei Betrachtung der Abbildungen wird deutlich, dass die verwendeten Referenzpartikel/Positivkontrolle die höchsten DNA-Strangbrüche induzieren. Kerzenabbrand-Partikel (Kerzentyp A) und „Toast-Partikel“ zeigen zwar eine geringe, aber dennoch signifikante Erhöhung (t-Test, $p < 0.05$) von DNA-Strangbrüchen im Vergleich zur Kontrolle. Eine signifikante Erhöhung von oxidativen DNA-Schäden konnte für keine der hier untersuchten Partikel beobachtet werden.

Abbildung 132: DNA-Strangbrüche in humanen A549 Lungeneithelzellen nach der Behandlung mit den Innenluftpartikeln der verschiedenen Expositionsquellen, 50 µg/ml (n = 3); * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$

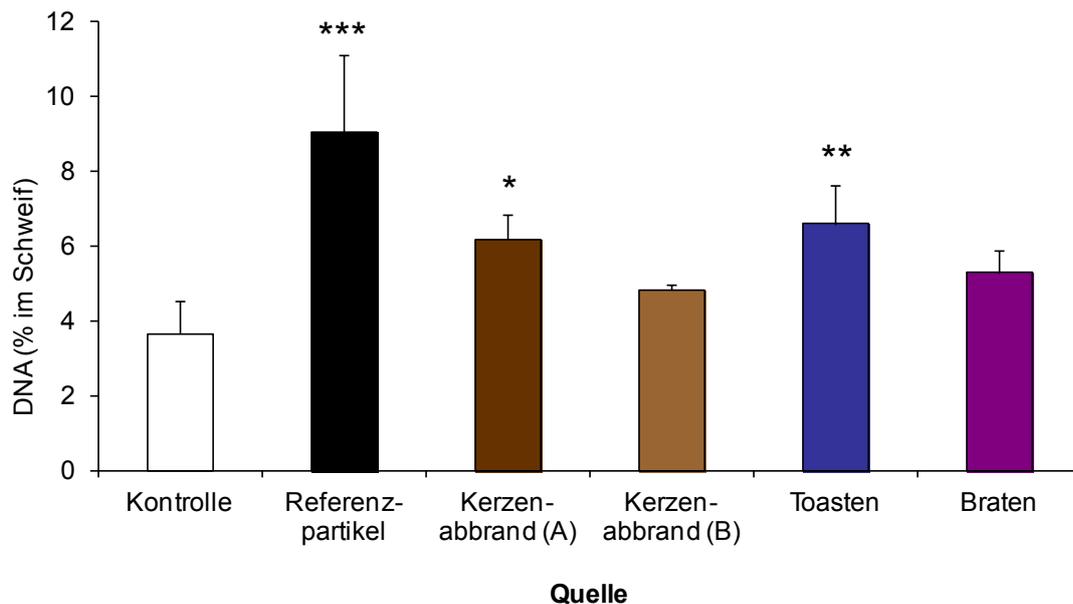
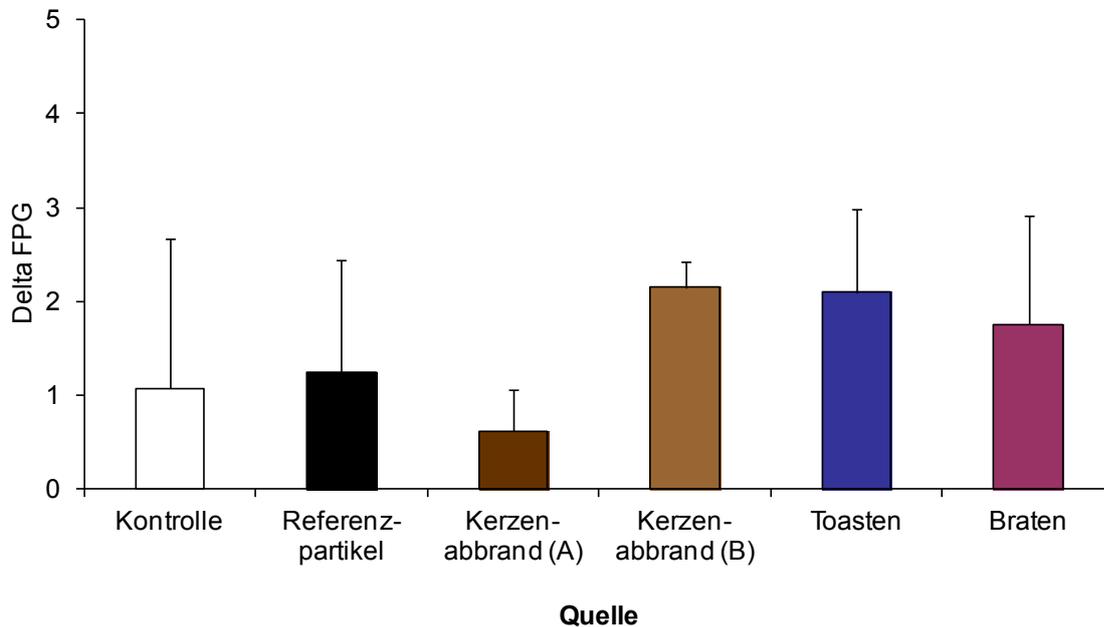
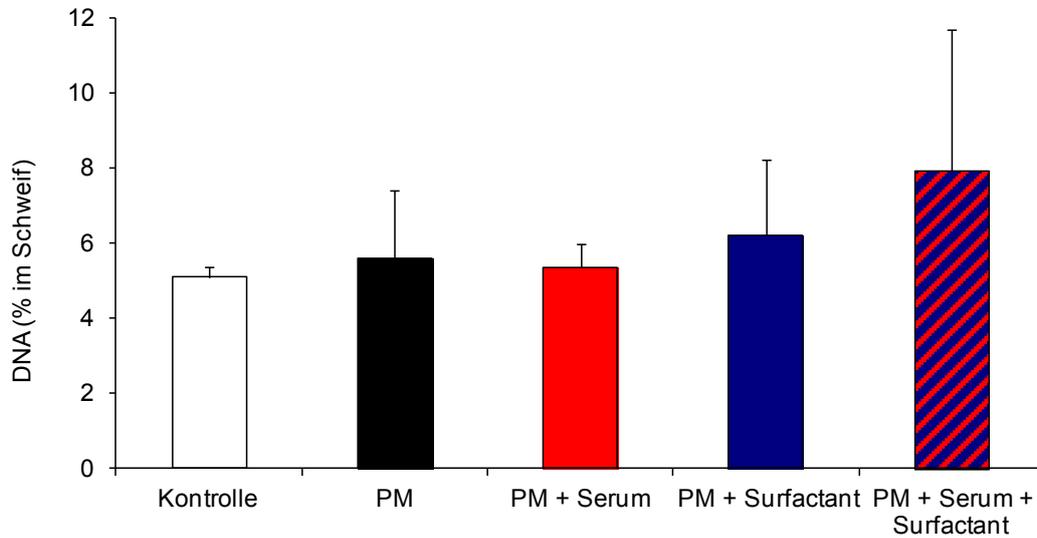


Abbildung 133: Oxidative DNA-Schäden in humanen A549 Lungenepithelzellen nach der Behandlung mit Innenluftpartikeln der verschiedenen Expositionsquellen, 50 µg/ml (n = 3)



Die durch Kerzenabbrandpartikel verursachten oxidativen DNA-Schäden fielen, im Vergleich zu den bereits publizierten Daten von Außenluftpartikeln, eher gering aus (Wessels et al., 2010). Dieses wurde anhand der hier vorliegenden Versuche mit den weiteren Quellen bestätigt. Noch unveröffentlichte Untersuchungen jedoch ergaben, dass DNA-schädigende oxidative Eigenschaften mineralischer Staubpartikel in A549-Zellen erhöht wurden, sobald die Partikel mit dem Lungen-Surfactant vor der Belastung mit den Zellen dispergiert wurden. Diese Sensitivitätserhöhung ist vermutlich bedingt durch eine verbesserte Dispergierung der Partikel und eine erhöhte Aufnahme der Partikel in die Zelle aufgrund des Lungen-Surfactant. Eine entsprechende zusätzliche Versuchsdurchführung wurde auch für diese Studie durchgeführt. Getestet wurden gezielt die Wirkung von Serum im Zellkulturmedium sowie der Einfluss von Surfactant bei Verwendung eines kommerziell verfügbaren Surfactant (Curosurf). Zunächst wurden A549 Zellen mit in serumfreien oder serumhaltigem (5 %) Medium dispergierten Kerzenabbrandpartikeln (Kerzentyp B) behandelt. Darüber hinaus wurde untersucht ob die Zugabe von Surfactant (0,35 %) den zu erwarteten Effekt weiter modifiziert. Diese Etablierungsversuche zeigten, dass die DNA-schädigenden Effekte durch Kerzenabbrandpartikel durch die Anwesenheit von Serum und Surfactant geringfügig deutlicher werden (Abbildung 134). Allerdings erweisen sich die Unterschiede als nicht signifikant ($p < 0.05$).

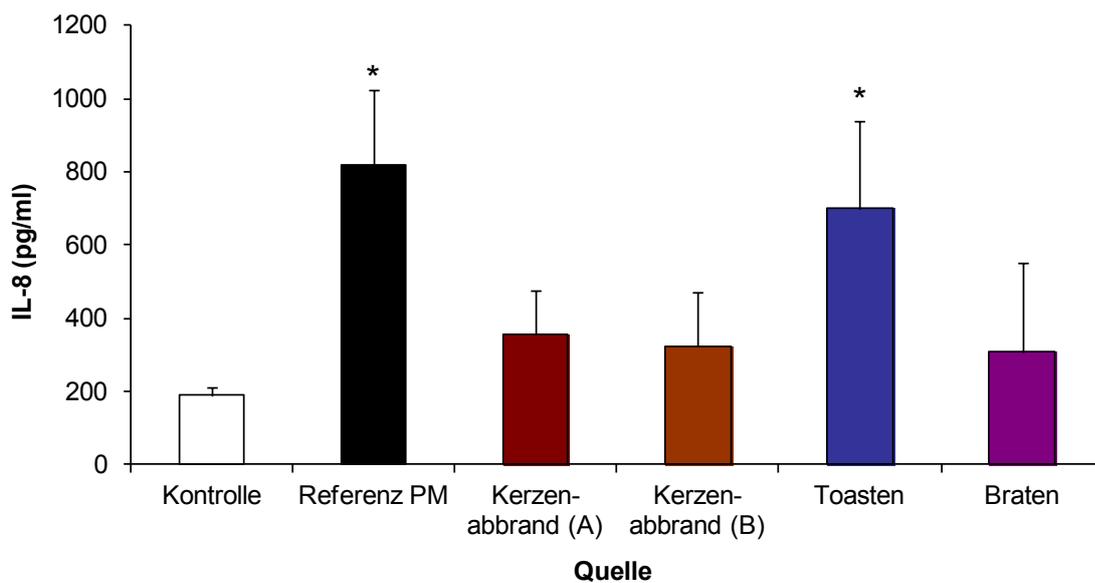
Abbildung 134: Einfluss von Surfactant und Serum auf einen möglichen DNA-schädigenden Effekt von PM = Kerzenabbrandpartikel (Typ B) in humanen A549 Lungeneithelzellen



Bewertung der Interleukin-8 Freisetzung aus A549 Zellen

Um die Freisetzung von Interleukin-8 (IL-8) aus A549 Zellen beurteilen zu können, wurden die Zellkulturüberstände nach Behandlung mit Partikeln gesammelt und mittels ELISA analysiert. Die IL-8 Freisetzung nach Behandlung mit verschiedenen Innenraumluftpartikeln ist in Abbildung 135 dokumentiert. Hier ist zu beobachten, dass die Referenzpartikel die höchsten IL-8 Expressionen verursachen. Aber auch Partikel der Quelle Toasten zeigten signifikante IL-8 Freisetzungen.

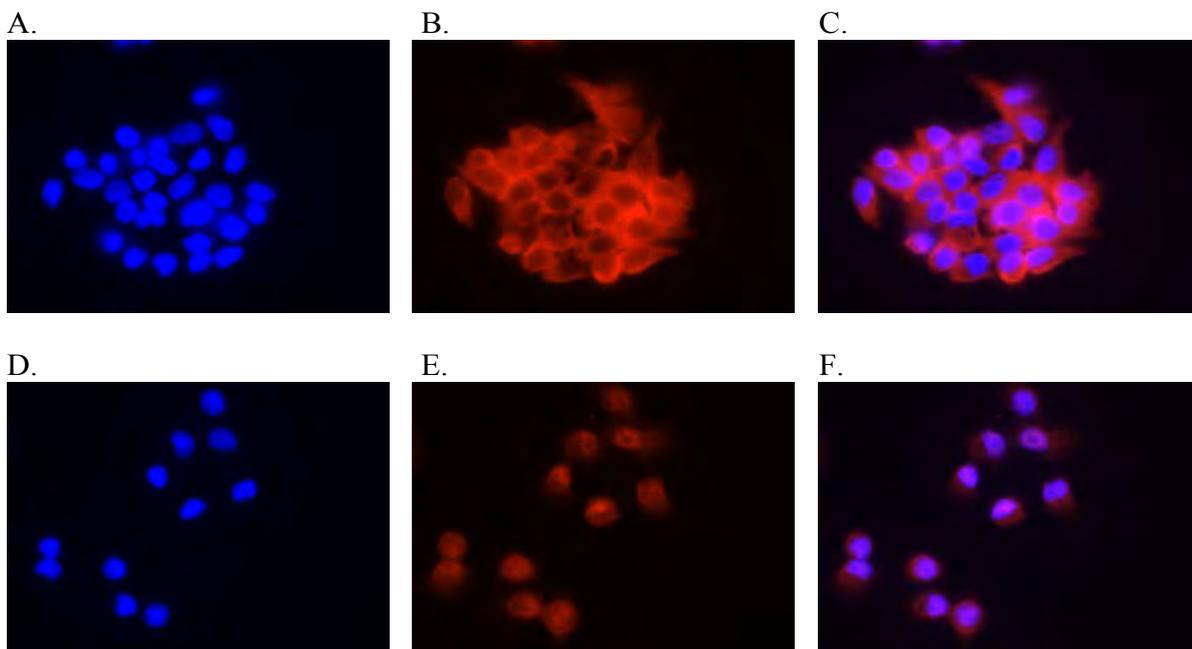
Abbildung 135: IL-8 Freisetzung aus humanen A549 Lungeneithelzellen nach Behandlung mit Innenraumluftpartikeln aus verschiedenen Expositionsquellen, 50 µg/ml (n = 3, *p < 0,05)



Aktivierung des NF- κ B Transkriptionssignalweges

Die zelluläre Freisetzung von IL-8 in Zellen nach Partikelexposition wird auf die Induzierung von oxidativem Stress und anschließender Aktivierung eines redox-sensitiven Transkriptionsfaktors NF- κ B (nuclear factor kappa-light-chain-enhancer) zurückgeführt (Schins et al. 2000, Donaldson et al. 2004). Aufgrund dessen wurde auch in diesem Projekt die Rolle und Aktivierung dieses Transkriptionsfaktors untersucht. Hierfür wurde ein, in der Arbeitsgruppe etabliertes, Protokoll für immunhistochemische Färbungen auf die neue Fragestellung adaptiert. Abbildung 136 zeigt repräsentative erste Ergebnisse mit den Referenzpartikeln. Hierbei wird deutlich, dass die zelluläre Behandlung mit diesen Partikeln in einigen Zellen eine Aktivierung von NF- κ B verursachte, was durch die Translokation von NF- κ B aus dem Zytoplasma in den Zellkern nachgewiesen werden konnte. Hierbei ist zu erwähnen, dass der Effekt durch Partikel weniger ausgeprägt ist als durch das Zytokin Tumornekrosefaktor-alpha (TNF- α) als NF- κ B Stimulus. In weiteren Experimenten wurde daraufhin untersucht, ob Innenraumpartikel den NF- κ B Pathway aktivieren können. Im Vergleich zu den Referenzpartikeln konnte keiner der Innenraumpartikel eine nukleare Translokation des Transkriptionsfaktors in humanen Lungenepithelzellen bewirken.

Abbildung 136: NF- κ B Aktivierung in A549 Zellen mittels Referenzpartikel und TNF- alpha



A549 Zellen wurden entweder mit Referenzpartikeln in einer Konzentration von 50 μ g/ml für 4 Stunden (A, B, C) oder mit TNF- α als Positivkontrolle in einer Konzentration von 10 ng/ml für 30 Minuten (D, E, F) inkubiert. Die blaue Färbung zeigt die Zellkerne (DAPI-Färbung, A, D), die rote Färbung zeigt die immunhistochemische Identifizierung der p65-Untereinheit des NF- κ B Transkriptionsfaktors (B, E) und die violette Färbung zeigt eine Überlagerung der beiden Färbungen (C, F) und somit die Translokation von NF- κ B in den Zellkern hinweisend auf seine Aktivierung.

Im weiteren Verlauf der Studie konnte gezeigt werden, dass die Extraktionseffizienz der Partikel vom Filter abhängig vom gesammelten Material bzw. der Emissionsquelle war. Die im Standardprotokoll beschriebene Extraktionsmethode mit deionisiertem Wasser war für die Bratenproben aufgrund der niedrigen Partikelausbeute nicht zufriedenstellend, was in der eher lipophilen Zusammensetzung des Materials begründet sein dürfte. Entsprechend wurden neue Proben mit einer auf Methanol basierenden Extraktionsmethode extrahiert und anschließend toxikologische Analysen durchgeführt. Hierfür wurde für die Quelle Braten, die durch Wasser-extrahierten Partikel mit den Methanol-extrahierten Partikeln in Hinblick auf DNA-Schädigungen in A549-Zellen verglichen. Hierbei wird deutlich, dass sowohl die Methanol-extrahierten Partikeln als auch die Wasser-extrahierten Partikel keine DNA-Strangbrüche und auch keine oxidativen DNA-Schäden verursachen (Abbildung 137, Abbildung 138).

Abbildung 137: DNA-Strangbrüche in humanen A549 Lungene­pithelzellen nach Behandlung mit „Braten“-Innenluftpartikeln. Die Partikeln wurden mittels Wasser bzw. mittels Methanol vom Filter extrahiert, 50 µg/ml (n = 3).

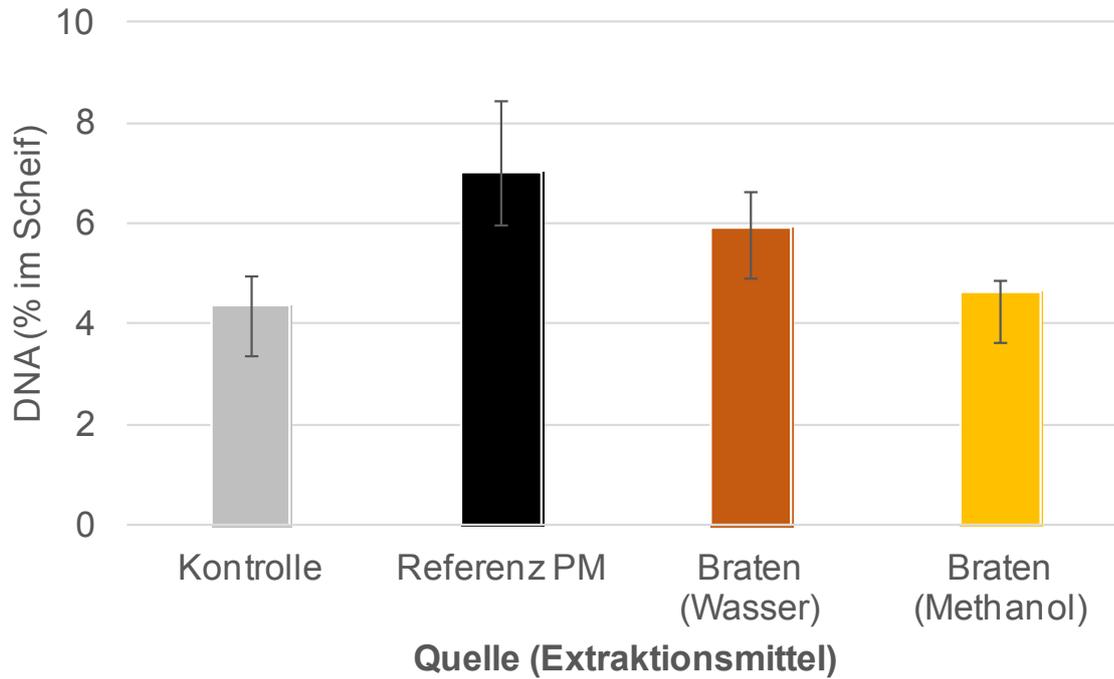
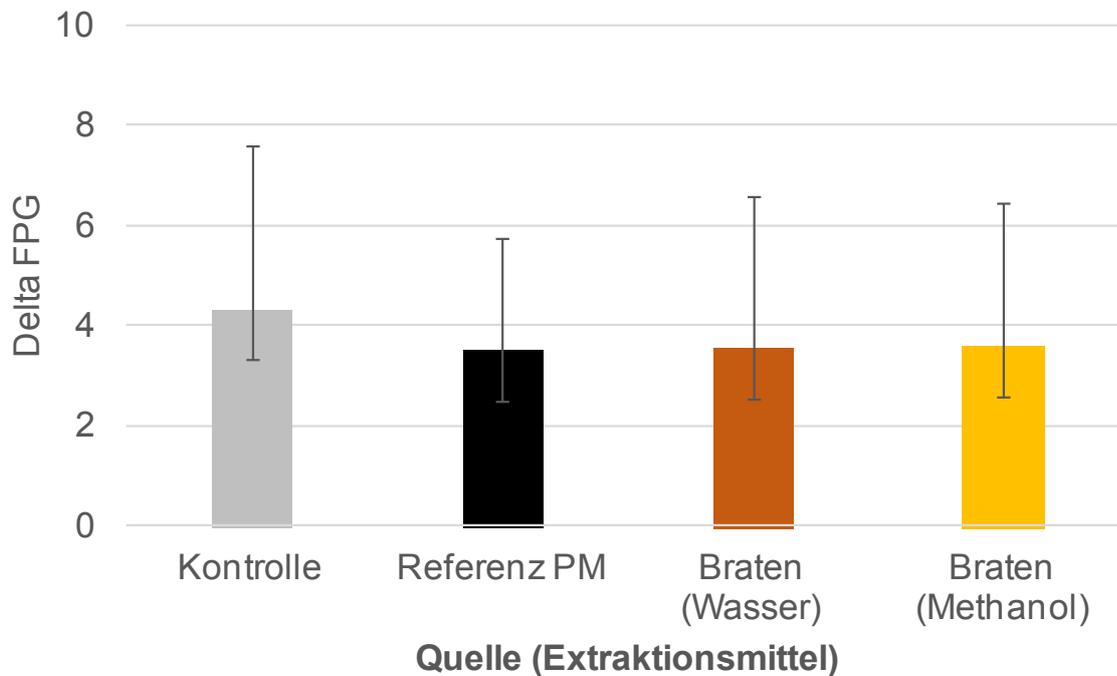


Abbildung 138: Oxidative DNA-Schäden in humanen A549 Lungene­pithelzellen nach Behandlung mit „Braten“-Innenluftpartikeln. Die Partikeln wurden mittels Wasser bzw. Mittels Methanol vom Filter extrahiert, 50 µg/ml (n = 3).



4.1.1.3 Zusammenfassung und Fazit

Bei zusammenfassender Betrachtung der Ergebnisse werden kontrastierende Effekte bezüglich der Induzierung von DNA-Schäden durch verschiedene Arten von Innenraumluftpartikeln deutlich. Der stärkste Effekt konnte hierbei nach Behandlung mit Referenzpartikeln sowie nach Exposition mit „Toast“-Partikeln verzeichnet werden. Hierbei zeigten die Ergebnisse des Fpg-modifizierten Comet-Assays, dass für die genannten Partikel zwar DNA-Strangbrüche zu verzeichnen waren, aber keine deutlichen oxidativen DNA-Schäden zu beobachten waren. Obwohl zunächst angenommen wurde, dass der Zusatz von Serum die Zellen schützt, zeigten Zellen ohne den Einfluss von Serum kein verändertes Verhalten in Bezug auf DNA-Schäden. Auch die Anwesenheit von Surfactant verursachte keine größeren Unterschiede. Aufgrund der niedrigen Extraktionseffizienz und einer daraus resultierenden geringen Partikelausbeute, insbesondere bei den „Braten“-Partikeln, wurde zudem eine auf Methanol-basierte Extraktion etabliert. Diese Methode zeigte allerdings keinen Einfluss auf DNA-Schädigungen in A549-Zellen. Neben DNA-Schäden wurde auch die Freisetzung von IL-8 nach Partikelexposition untersucht. Auch hier zeigten die Referenzpartikel sowie die „Toast“-Partikel die größten Effekte und somit die höchste IL-8 Ausschüttung. Um den grundlegenden Mechanismus dieses Phänomens zu verstehen, wurde ein Protokoll zur immunhistochemischen Färbung von NF- κ B etabliert. Im Gegensatz zu den Referenzpartikeln zeigte keiner der Innenluftpartikel eine Aktivierung des NF- κ B Pathways. Hierbei ist zu erwähnen, dass auch für „Toast“-Partikel, die bereits eine signifikante Ausschüttung von IL-8 zeigten, keine NF- κ B-Aktivierung zu verzeichnen war. Die Beteiligung von NF- κ B bei der Produktion von IL-8 konnte für Innenluftpartikel somit nicht bestätigt werden.

5 Medizinische Untersuchungen

5.1 Angewendete Methoden

5.1.1 Studiendesign

Bei der Studie handelt es sich um eine kontrollierte Expositionsstudie. Sie wurde durchgeführt im Zeitraum von Oktober 2012 bis Juni 2013 in den Räumen des IUTA. Hierfür wurde ein speziell dafür gestalteter Expositionsraum, der es ermöglicht, die Expositionsquellen durch einen technischen Mitarbeiter zu betreiben und gleichzeitig mehrere Probanden unterzubringen, eingerichtet. Im gleichen Gebäude und auf der gleichen Etage wurden zwei Untersuchungsräume eingerichtet, von denen derjenige Untersuchungsraum, in dem die kardiovaskulären Untersuchungen stattgefunden haben, leicht abgedunkelt war. Zwischen den beiden Untersuchungsräumen befand sich der Aufenthaltsraum für die Probanden.

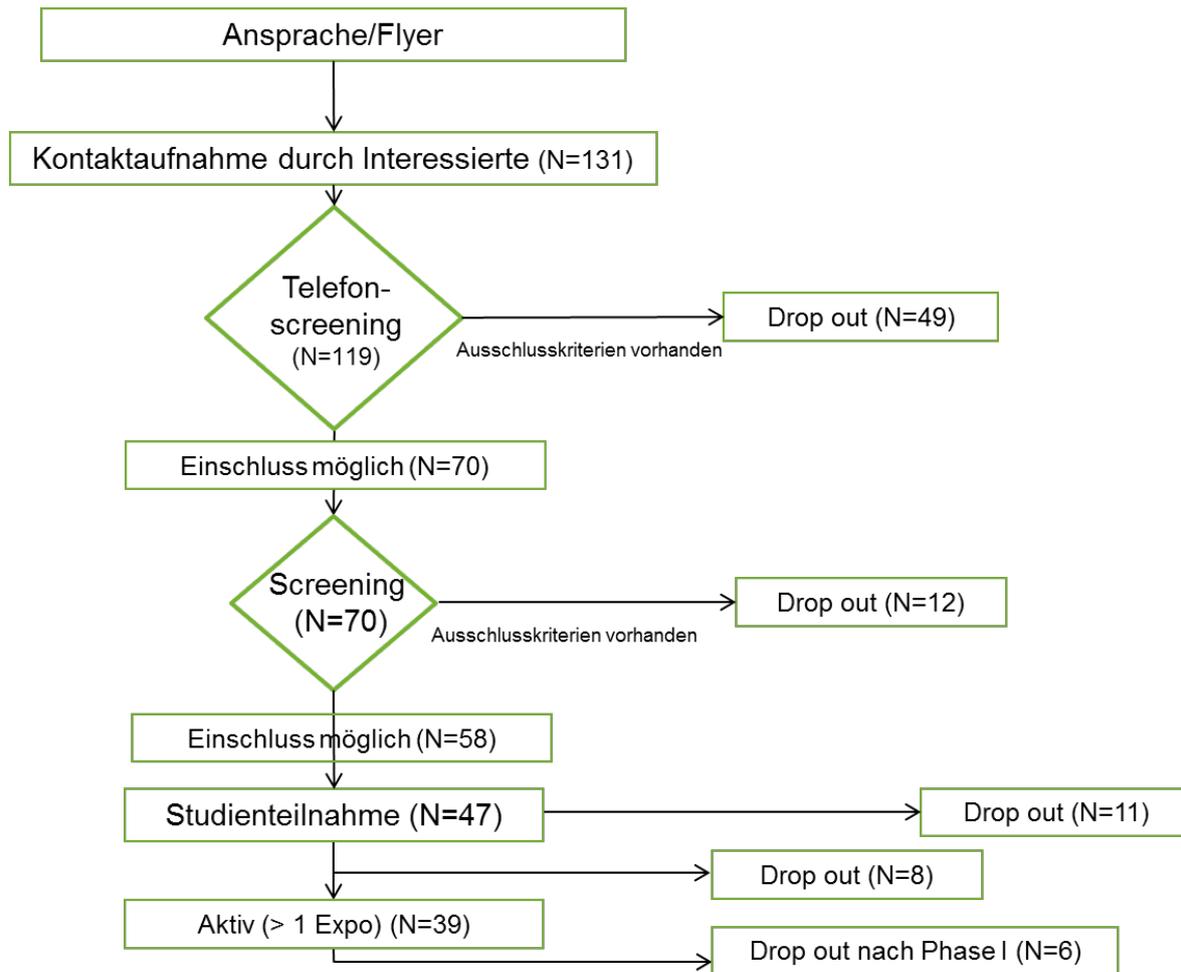
Sämtliche vorbereitenden Arbeiten wie die Erstellung des Ethikantrag, das Abschließen einer Probandenversicherung, SOP-Erstellung, Training und Zertifizierung der Untersucher wurden vor dem Beginn der Feldphase abgeschlossen. Die Studie wurde genehmigt von der Ethikkommission der Heinrich-Heine Universität Düsseldorf. Alle Probanden wurden aufgeklärt und haben eine schriftliche Einwilligung erteilt. Für alle Probanden wurden eine Wege-Unfallversicherung sowie eine Probanden-Haftpflichtversicherung abgeschlossen.

5.1.2 Probandenrekrutierung und Ablaufplanung

Zur Rekrutierung der Probanden wurde ein Flyer entworfen und an Universitäten und Innenstädten in Duisburg, Essen, Mülheim und Düsseldorf verteilt. Nach einer ersten Kontaktaufnahme per Mail oder Telefon durch Interessierte wurden die möglichen Probanden telefonisch über die Studie und den Studienablauf informiert. Bei anhaltendem Interesse wurde ein eigens für diese Studie entwickelter Screeningfragebogen mit Ein- und Ausschlusskriterien abgefragt. Falls bis zu diesem Zeitpunkt keine Ausschlusskriterien vorlagen, wurden die Interessenten zur Screeninguntersuchung in das IUF eingeladen. Die Screeninguntersuchungen wurden durchgeführt um festzustellen, ob die Gesundheitsuntersuchungen an den potentiellen Probanden problemlos durchgeführt werden können. Darüber hinaus sollten Untersuchungen, bei denen die Mitarbeit des Probanden wichtig ist, bereits im Screening eingeübt werden, um einen reibungslosen Ablauf an den Untersuchungstagen zu gewährleisten und Lerneffekte zu Beginn der Untersuchungsreihe zu vermeiden (z.B. Lungenfunktionsuntersuchung). Am Screeningtag wurde den weiterhin interessierten Teilnehmern neben der Einverständniserklärung zudem ein ausführlicher Basis-Fragebogen zu chronischen gesundheitlichen Störungen, Soziodemographie und Lebensstil, Erkrankungen, Medikation und zu beruflichen und privaten Expositionen mitgegeben.

Lagen auch nach der Screeninguntersuchung keine Einschränkungen und Bedenken bzgl. der Eignung der potentiellen Probanden für die Studie vor, konnte eine Aufnahme in die Teilnehmergruppe erfolgen. Bei Einschluss in die Studie erhielten die Probanden einen Merkzettel mit Verhaltensinformationen für den Tag vor der Exposition sowie für den Expositionstag und die Spätmessung am darauffolgenden Tag. Der Rekrutierungsverlauf des ersten Teils der Feldphase ist in Abbildung 139 dargestellt.

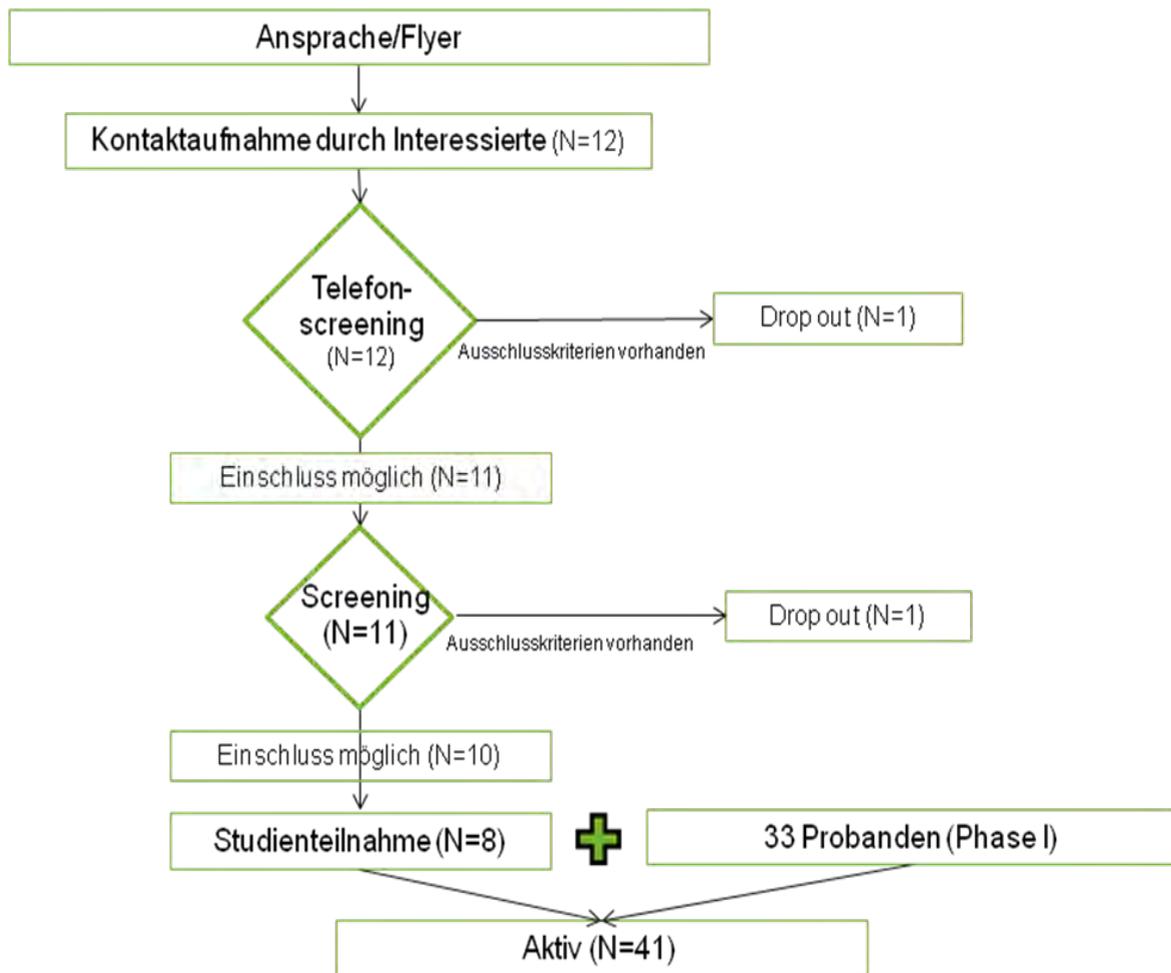
Abbildung 139: Übersicht Rekrutierungsverlauf Feldphase I



Wegen relativ hoher Probandenverluste während der Feldphase mussten Probanden nachrekrutiert werden. Der Rekrutierungsablauf erfolgte wie für den ersten Teil der Feldphase. Es konnten schlussendlich acht neue Probanden gewonnen werden (Abbildung 140). Insgesamt wurden 56 Probanden mindestens einmal untersucht. Bei 41 Teilnehmern wurden mindestens eine experimentelle Exposition und die Kontrollexposition durchgeführt, so dass sie in die Analysen eingehen konnten.

Die Teilnehmer wurden nach Absprache in zehn Gruppen eingeteilt. Jede Probandengruppe bestand aus vier Probanden. Zunächst durchliefen die Probandengruppen 1-5 jeweils in einem Abstand von zwei Wochen, immer am gleichen Wochentag, die drei mittleren Expositionsbelastungen und die Raumluftexposition in randomisierter Reihenfolge. Im Anschluss erfolgte die Exposition der Probandengruppen 6-10 in gleicher Weise. Nach einer Zwischenauswertung sollte eine vierte Expositionsquelle bestimmt werden. Nach Absprache mit dem Auftraggeber wurde jedoch auf eine vierte Expositionsquelle verzichtet und stattdessen alle drei Expositionsquellen auf einem zweiten, höheren Expositionsniveau, nochmals untersucht.

Abbildung 140: Übersicht Rekrutierungsverlauf Feldphase 2



5.1.3 Übersicht medizinische Untersuchungen

Zu Beginn des Studientages beantwortete der Proband einen kurzen Fragebogen zu akuten gesundheitlichen Störungen. Wenn keine gesundheitlichen Einschränkungen vorlagen, die einen Einfluss auf die Ergebnisse der medizinischen Untersuchungen haben könnten (z. B. akute Erkältungskrankheit, Einnahme von Bedarfsmedikation bei Schmerzen, etc.) wurde mit den weiteren Gesundheitsuntersuchungen fortgefahren. Kurzfristig auftretende gesundheitliche Veränderungen bei den Probanden, wie Infekte der Atemwege oder anderweitig entzündliche Erkrankungen, rheumatologische Schübe, Schwangerschaft, akuter Bluthochdruck führten zu einer Vertagung oder einem Abbruch der Expositionsreihe. In Tabelle 18 sind die Gesundheitsuntersuchungen und der Zeitpunkt der Durchführung dargestellt.

Tabelle 18: Gesundheitsuntersuchungen

	vor Exposition	während Exposition	post Exposition	post 2 h Exposition	post 4 h Exposition	post 24 h Exposition
Blutdruck	x	x	x	x	x	x
PWA	x		x	x	x	x
PWV & HRV	x		x			x
Lungenfunktion	x				x	x
FeNO- Test	x			x		x
Nasallavage	x			x		x
Blutabnahme	x			x		x

5.1.3.1 Blutdruckmessung

Bei der Blutdruckmessung handelt es sich um eine indirekte arterielle Druckmessung am Arm mittels eines digitalen Blutdruckmessgerätes. Die Blutdruckmessung wurde nach WHO-Standard durchgeführt. Nach einer Ruhezeit von mindestens 5 min wurde am rechten Arm in sitzender Position dreimal im Abstand von mindestens 2 min eine Messung mittels Oszillometrie durchgeführt. Für die Analysen wurde der Mittelwert der letzten beiden Messungen verwandt.

5.1.3.2 Pulswellenanalyse, Pulswellengeschwindigkeit und Herzratenvariabilität

Im Anschluss an die Blutdruckmessung erfolgt die Messung der Pulswellenanalyse, der Pulswellengeschwindigkeit und der Herzratenvariabilität. Diese Untersuchungen erfolgen mit dem Gerät SphygmoCor der Firma AtCor Medical. Hiermit können durch nicht-invasive Tonometrie an der Arteria radialis mittels einer Pulswellenanalyse u.a. der zentrale Blutdruck, der Augmentationsdruck und der Augmentationsindex als Maße der Gefäßsteifigkeit und die Pulswellengeschwindigkeit gemessen werden (Abbildung 141, Abbildung 142, Abbildung 143).

Mittels 3-Punkt-Elektrokardiographie wird darüber hinaus mit dem gleichen Gerät die Herzfrequenzvariabilität gemessen. Die *Herzfrequenzvariabilität* wird vom autonomen Nervensystem und demnach von der Aktivität des Sympathikus und Parasympathikus reguliert. Bei dieser Untersuchung werden die Abstände zwischen zwei Herzschlägen gemessen. Dies erfolgte ebenfalls mit dem SphygmoCor. Die Untersuchungen dienen zur Beurteilung von kardiovaskulären Risiken/ Auffälligkeiten.

Nach den Angaben des Herstellers und der gängigen Literatur wurden folgende Qualitätskriterien für die durchgeführten Messungen mit dem SphygmoCor definiert: Der Operator-Index muss auf jeden Fall mindestens 80 betragen und der Augmentationsindex darf nicht kleiner als 50 % sein, da dies physiologisch unplausibel ist. Falls die Größe „Inconclusive“ mit „yes“ angegeben wird, wird der Wert aus dem Datensatz ausgeschlossen, es sei denn der Wert für central T1 liegt zwischen 80 und 150 ms.

Tabelle 19: Kriterien für technisch zufrieden stellende und reproduzierbare Manöver der Pulswellenanalyse

Qualitätskriterien PWA	
Operator- Index	≥ 80
Augmentationsindex	$< 50 \%$
Inconclusive	= no
ODER	
Operator- Index	≥ 80
Augmentationsindex	$< 50 \%$
Inconclusive	= yes
central T1	$80 \text{ ms} < x < 150 \text{ ms}$

Abbildung 141: Durchführung der Pulswellengeschwindigkeit mit Ableitung an der Arteria Carotis mit dem Gerät SphygmoCor

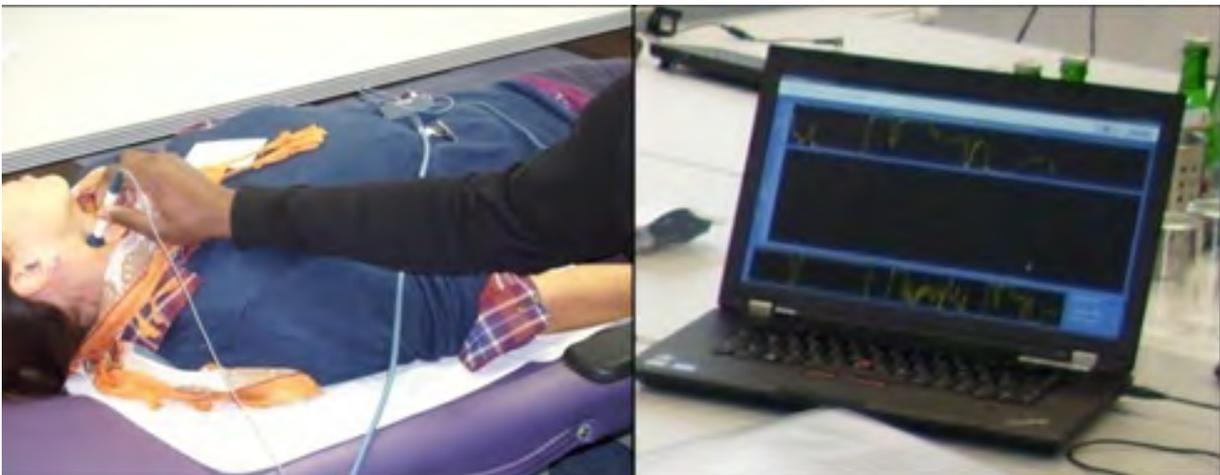
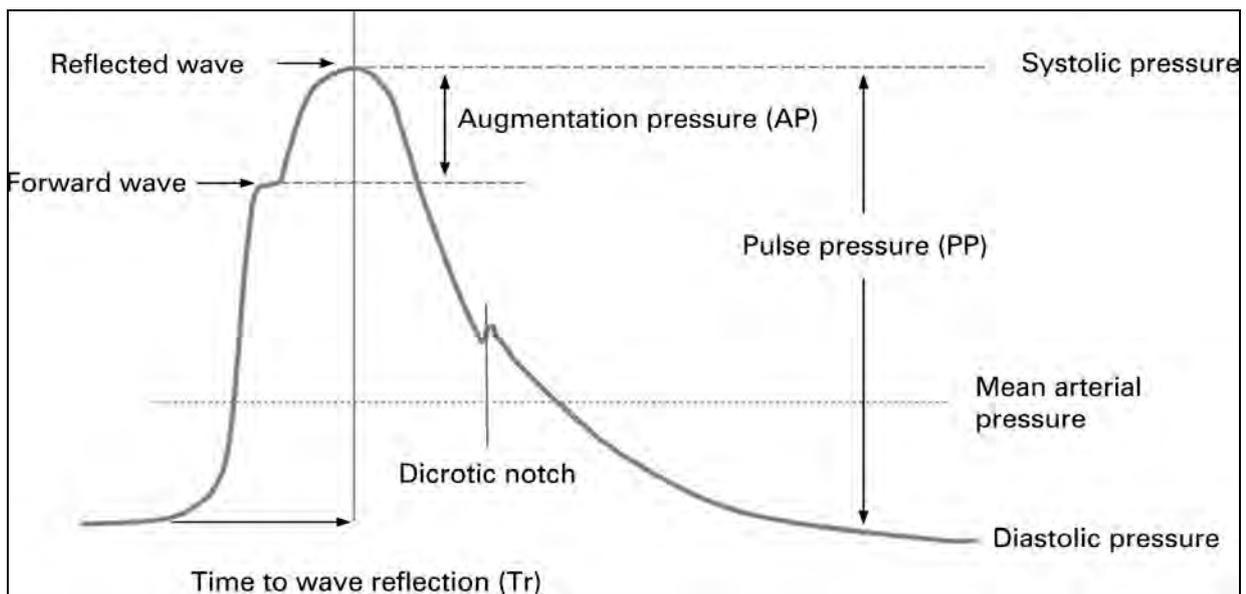


Abbildung 142: Auswertungsbogen der Messungen mit dem SphygmoCor



Abbildung 143: Beispiel einer abgeleiteten Blutdruckkurve zur Erfassung der Kenngrößen



5.1.3.3 FeNO Test

Bei dem FeNO-Test handelt es sich um einen nicht-invasiven Test, bei dem die Konzentration des Stickstoffmonoxids in der Ausatemluft gemessen wird. Die Konzentration von NO spiegelt das Entzündungsmaß in den Atemwegen wider. Diese Untersuchung wird zeitlich vor der Lungenfunktionsuntersuchung durchgeführt, um ein Abatmen des NO durch die forcierten Atemmanöver bei der Lungenfunktionsuntersuchung zu vermeiden.

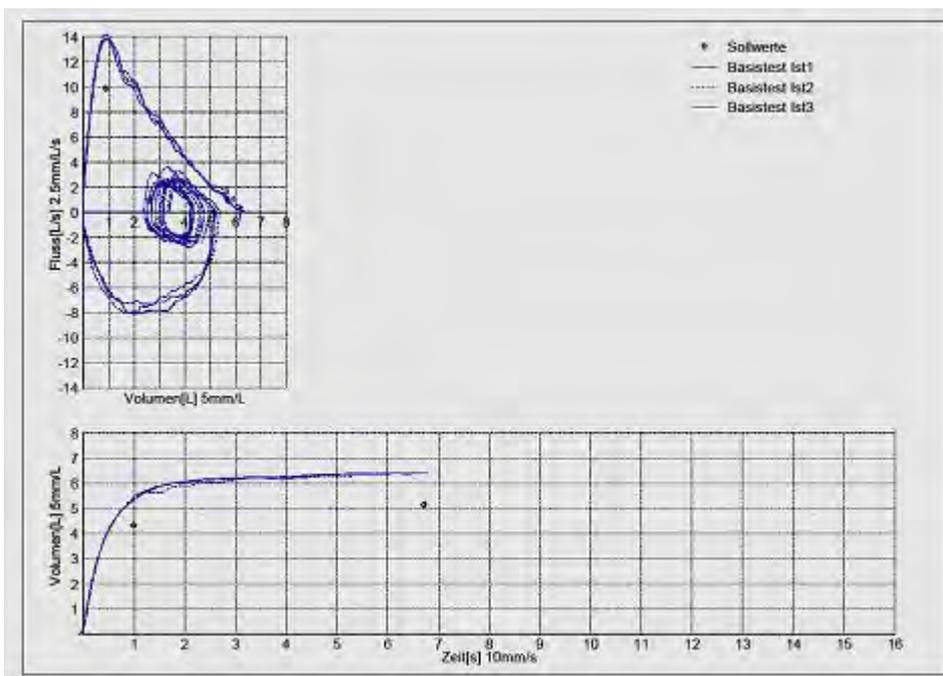
5.1.3.4 Lungenfunktionsmessung

Im Anschluss an den FeNO-Test erfolgt die Überprüfung der Lungenfunktion (Abbildung 144, Abbildung 145). Hierbei wird das Volumen gemessen, welches nach maximaler Inspiration maximal und forciert ausgeatmet werden kann (FVC), welches nach maximaler Inspiration innerhalb einer Sekunde maximal ausgeatmet werden kann (FEV1) und die maximale expiratorische Atemstromstärke bei 25/50/75 % im Thorax befindlicher Vitalkapazität. Die Lungenfunktionstests umfassen das forcierte Ausatmen in das Spirometer. Die Lungenfunktionstests erfolgen nach ATS/ERS Standardkriterien.

Abbildung 144: Durchführung der Lungenfunktionsmessung mit dem Gerät NDD



Abbildung 145: Auswertungsbogen eine Lungenfunktionstests



Während der Untersuchung wurde darauf geachtet, dass mindestens drei technisch zufrieden stellende und reproduzierbare Manöver erhalten wurden (Tabelle 20). Es wurde so lange mit der Untersuchung fortgefahren bis dies der Fall war oder die maximale Anzahl von acht Manövern pro Proband und Zeitpunkt erreicht war. Nach jedem Manöver erhielt der Proband eine Rückmeldung vom Untersucher, ob das Manöver gut war oder was er verbessern könnte. Für die Beurteilung von qualitativ guten Manövern wurden die ATS/ERS Kriterien angewandt, welche das rückextrapolierte Volumen (BEV), die Zeit bis zum Spitzenfluss (PEFT), die Zeit der forcierten Expiration (FET) und das Ausatemvolumen am Ende der Ausatmung (EOTV) zur Qualitätskontrolle verwenden. Zusätzlich erfolgte eine visuelle Bewertung anhand der Fluss-Volumenkurve und dem Verhalten des Probanden während des Manövers.

Für die Auswahl der Manöver, deren Werte bei der Auswertung verwendet werden, wurde folgendes Auswahlverfahren durchgeführt. Zuerst wurden die Manöver ausgeschlossen, bei denen Artefakte (z. B. durch Husten, Räuspern, Körperbewegungen) vorlagen. Anschließend wurde überprüft, ob die Kriterien für BEV, PEFT und FET bzw. EOTV erfüllt waren. Falls nicht, wurde das entsprechende Manöver von der Auswertung ausgeschlossen. Falls keine zwei Manöver pro Proband, Exposition und Zeitpunkt vorlagen, wurde dieser Zeitpunkt bei diesem Probanden und dieser Exposition ausgeschlossen. Andernfalls wurden aus den verbliebenen Manövern mindestens 2 reproduzierbare Manöver (ATS/ERS Kriterien, Tabelle 20) ermittelt. Hierzu musste die Differenz zwischen den Werten für FVC und zwischen den Werten für FEV₁ kleiner als 0,15 L betragen. Aus den akzeptablen und reproduzierbaren Manövern wurden das Manöver mit der maximalen Summe von FVC und FEV₁ ermittelt. Aus diesem Manöver wurden alle Lungenfunktionswerte entnommen. Dieses Vorgehen unterscheidet sich im letzten Schritt von dem Standardvorgehen nach ATS/ERS, bei dem die finalen Lungenfunktionswerte aus unterschiedlichen Manövern entstammen können. Diese methodische Abweichung wurde bewusst gewählt, da in dem hier gewählten Studiendesign kleine intra-individuelle Veränderungen über die Zeit untersucht werden sollen und nicht die maximal möglichen Volumina, die sich zum Teil gegenseitig beeinflussen. Es wird erwartet, dass mit dem gewählten Vorgehen kleine, subklinische Veränderungen der Lungenfunktion eher erkannt werden können.

Tabelle 20: Kriterien für technisch zufrieden stellende und reproduzierbare Manöver der Lungenfunktion

Numerische Kriterien	
BEV	< 0,15 L oder < 0,05 x FVC
PEFT	≤ 0,12 s
FET oder EOTV	≥ 6 s < 0,025 L
Differenz zwischen den zwei besten Werten für FEV ₁ und FVC	< 0,15 L
Visuelle Kriterien	
Keine Artefakte (beispielsweise Huster)	

5.1.3.5 Nasallavage

Die Nasallavage erfolgt zur Bestimmung von Zytokinen (IL-6, IL-8), zellulären Bestandteilen und spezifischer Entzündungsmarker wie CRP und MPO. Für die Nasallavage wird bei leicht nach hinten geneigtem Kopf 10 ml einer isotonischen Kochsalzlösung in den Nasenraum eingetroffen und für 10 Sekunden vom Probanden retiniert, indem die Glottis nach Anweisung geschlossen wird. Anschließend wird durch Kopfeigung nach vorne die Flüssigkeit passiv wieder entfernt und in einem Auffangröhrchen aufgefangen.

Die Gesamtanzahl der Zellen wurde im Anschluss an die Nasallavage mit Hilfe eines Hämocytometers bestimmt.

Zur Differenzierung und Zählung der zellulären Bestandteile wurde ein Mikroskopie Präparat angefertigt mittels einer Zytospin-Zentrifuge. Nach Romanowsky-Färbung der Objektträger wurden die einzelnen Zelltypen darin bestimmt. Falls weniger Zellen als 300 in dem Präparat enthalten waren wurden alle Zellen gezählt, ansonsten wurde die Zählung beendet sobald eine Gesamtzahl von 300 erreicht wurde. Aus den Ergebnissen wurde dann der prozentuale Anteil der einzelnen zellulären Bestandteile bestimmt.

Für die Bestimmung der Trolox-equivalent antioxidant capacity und der Harnsäure wurden die Methoden nach Boots et al. (2009) angewendet. Die Methode für die Zellzählung und Differentialanalyse nach Zelltypen aus den Zytospinpräparaten der Nasallavage mittels Mikroskopie folgte den in Borm et al. (2000) und Schins et al. (2000) angegebenen Methoden.

Zur Erhebung des chemotaktischen Zytokins Interleukin 8 wurden Enzyme-linked Immunosorbent Assays (ELISA) der Firma Sanquin (PeliKine compact™ ELISA kit) verwendet.

5.1.3.6 Blutabnahme

Die venöse Blutabnahme erfolgt zur Bestimmung von systemischen Entzündungsmarkern, Markern der Koagulation und Markern der endothelialen Funktion. Nach Desinfektion und Aufblasen einer Druckmanschette auf subsystolischen Druck am Oberarm wurde an der Vena cubitalis des nicht-dominanten Arms eine Venenpunktion durchgeführt. Falls dies nicht möglich war, wurde die andere Seite oder eine Handvene punktiert.

Alle Blutabnahmeröhrchen werden nach der Abnahme 8-10mal geschwenkt. Das Serum wurde mindestens eine Stunde bei Raumtemperatur aufrecht stehend gelagert, das EDTA wird bis zur Zentrifugation nach Abkühlung auf Raumtemperatur in Tücher eingeschlagen und auf Eis gestellt. Alle Blutproben werden bei 15 °C und 9000 rpm für zehn Minuten zentrifugiert. Danach werden Serum bzw. Plasma in Micronic System Tubes aliquotiert und bei -20 °C eingefroren. Nach der Überführung ins IUF werden die Proben bei -80 °C gelagert.

Aus dem EDTA Blut wurde am gleichen Tag ein kleines Blutbild und ein Differentialblutbild im benachbarten Krankenhaus (Bethanien, Moers) bestimmt.

5.1.3.7 Neurokognition

Hierzu wurde ein sogenannter Pegboard-Test durchgeführt. Dabei müssen die Probanden unter Zeitdruck jeweils mit der rechten, linken und dann beiden Händen gleichzeitig kleine Metallstifte in dafür vorgesehene Löcher in einem Holzbrett stecken. Die Anzahl der erfolgreich eingesteckten Stifte ist ein Maß für Auge-Hand-Koordination und die manuelle Geschicklichkeit.

5.1.3.8 Befindlichkeits-Tagebuch

Während des Untersuchungstages wurden die Probanden aufgefordert, ihre Befindlichkeiten zu festgelegten Zeiten zu notieren. Hierzu erhielten sie zu Beginn des Untersuchungstages einem sogenannten Befindlichkeitstagebuch. Dort wurden aktuelle Empfindungen wie Durst- und Hungerempfinden, Müdigkeit, Geräusch- und Geruchsbelästigung, Temperaturempfinden etc. notiert.

5.1.4 Qualitätssicherung

Zur Qualitätssicherung bei der Durchführung der Gesundheitsuntersuchungen wurde ein Operationshandbuch erstellt, das die genauen Verfahrensanweisungen (standard operating procedures, SOP) für die Durchführung der Untersuchungen beinhaltet. Das Personal wurde mittels dieses Operationshandbuches geschult und zertifiziert. Während der Feldphase fanden regelmäßige Monitoring-Besuche durch weiteres Personal des IUF statt. Im Falle von Verstößen gegen die SOPs wurden entsprechende Nachschulungen durchgeführt. Folgende weitere Qualitätssicherungsmaßnahmen wurden durchgeführt:

- ▶ Monitoring der Ultrafeinstaubkonzentration mit personal sampler (für Probanden verblindet)
- ▶ Monitoring des CO-Gehaltes in der Kammer bei Kerzenexposition
- ▶ Visuelle Kontrolle aller Lungenfunktionstests einmal wöchentlich durch Frau Seitner, IUF
- ▶ Kontrolle der Pulswellenanalyse mittels Qualitätsindex (im Gerät enthalten)

5.1.5 Statistische Auswertung

5.1.5.1 Deskriptionen

Alle Variablen wurden mittels geeigneter Verfahren deskriptiv zusammen gefasst (Mittelwerte und SD, Median und IQR, Anzahl und Prozent). Die zeitlichen Verläufe der untersuchten Variablen wurden absolut sowie als Abweichung von der Baseline berechnet und graphisch dargestellt. Hierbei ist zu bedenken, dass es sich jeweils um alle vorhandenen zeitlichen Abläufe handelt, also zum Teil unterschiedliche Probanden in die Auswertungen eingehen (unverbundene Analyse)

5.1.5.2 Vergleich der Mittelwerte

Die Differenz der Differenzen wird als Differenzen zwischen den jeweiligen Zeitpunkten t1 bis t5 mit dem Zeitpunkt t0 für jede Exposition berechnet und von den entsprechenden Differenzen bei RaumlufTEXposition nach folgender Formel abgezogen. In diese Auswertung gehen nur diejenigen Probanden ein, die sowohl Daten aus der Experimental-Exposition sowie aus der RaumlufTEXposition vorliegen hatten (verbundene Analyse):

$$MW = ([X_{it1Toast} - X_{it0Toast}] - [X_{it1RL} - X_{it0RL}])$$

wobei

- ▶ x = die zu betrachtende Messvariable
- ▶ i = alle Probanden, die die zu betrachtende Quelle und die RaumlufTEXposition absolviert haben
- ▶ t0 = Zeitpunkt vor der Exposition
- ▶ t1 = Zeitpunkt während der Exposition
- ▶ t2 = Zeitpunkt nach der Exposition
- ▶ t3 = Zeitpunkt 2 Stunden nach der Exposition
- ▶ t4 = Zeitpunkt 4 Stunden nach Exposition
- ▶ t5 = Zeitpunkt 24 Stunden nach der Exposition

darstellt. Für die erhaltenen Differenzen der Differenzen werden die 95%-Konfidenzbereiche berechnet, um ihre statistische Signifikanz beurteilen zu können.

5.1.5.3 Analyse mit linearen Regressionsmodellen

In der Regressionsanalyse werden die probandenspezifischen kumulierten Partikelexpositionen mit Hilfe der Metriken Partikelmasse (PM₁₀, PM_{2.5} und PM₁), Partikelanzahl (PN) und lungendeponierbare Oberfläche (PSC) in sogenannten gemischten linearen Regressionsmodellen ausgewertet. Hierbei wird ein sogenanntes random intercept eingeführt um zu berücksichtigen, dass die Einzelmessungen die verglichen werden jeweils bei derselben Person durchgeführt wurden. Die Einflussvariablen sind hier die probandenspezifischen Konzentrationen der oben genannten Partikelmetriken und die abhängige Variable ist die intra-individuelle Differenz zwischen dem jeweiligen Untersuchungszeitpunkt und dem Zeitpunkt t0 für die ausgewertete medizinische Kenngröße.

Für jede Exposition (Kerzen, Toasten, Braten) wurden separate lineare Regressionen durchgeführt und die verschiedenen Zeitpunkte mit einem Interaktionsterm, der eine Indikatorvariable für den Messzeitpunkt beinhaltet, modelliert.

Es wurden das nichtadjustierte Modell, sowie ein Modell, das wichtige Störgrößen berücksichtigt, gerechnet. Hier wurde für Alter, Größe, Geschlecht, Temperatur, Feuchtigkeit, Anreisetransportmittel (Auto, öffentliche Verkehrsmittel, zu Fuß) und Anreisezeit adjustiert.

Um zu evaluieren, ob zusätzlich die Feinstaubaußenkonzentrationen am Tag der Untersuchung von Bedeutung sind, wurden in einer zusätzlichen Sensitivitätsanalyse für Blutdruck und Lungenfunktion die PM10 Massenkonzentrationen an der nächstgelegenen Messstation berücksichtigt: im einem Modell für den Untersuchungsort (Messstation Mülheim/Styrum) und in einem weiteren Modell für den Ort, von dem aus die Probanden zur Untersuchung anreisen (Ergebnisse im Anhang).

5.2 Ergebnisse

5.2.1 Studienpopulation, Studientage und Exposition

Die 46 Probanden der ersten Feldphase (mittlere Exposition) sowie die 39 Probanden der zweiten Feldphase (maximale Exposition) wurden jeweils in 10 Untersuchungsgruppen aufgeteilt (Tabelle 21, Tabelle 22). Die Expositionstermine der einzelnen Untersuchungsgruppen fanden jeweils am gleichen Wochentag, zu gleicher Uhrzeit, in einem Abstand von zwei Wochen statt. Pro Expositionsquelle waren 10 Untersuchungstage vor-

gesehen, wobei wegen der Neurekrutierung von Probanden 4 zusätzliche Untersuchungstage mit Raumluft erfolgen mussten. Bei der hohen Exposition gegenüber Kerzenbrand wurden zweimal jeweils 5 Probanden untersucht, so dass nur 9 anstatt 10 Untersuchungstage anfielen. Die Expositionsuntersuchungen wurden am 13.06.13 abgeschlossen.

Tabelle 21: Übersicht der Expositionstage für mittlere und hohe Exposition

Anzahl	Raumluft	Kerzen	Toasten	Braten	Gesamt
09.10.2012 – 14.02.2013 (mittlere Exposition)					
Expositionstage	10	10	10	10	40
Probanden	38	36	36	36	47
25.02.2013 – 13.06.2013 (maximale Exposition)					
Expositionstage	4	9	10	10	33
Probanden	9	38	35	36	39

Tabelle 22: Eigenschaften des Probandenkollektivs (n = 56) der EPIA Studie; mean = Mittelwert, SD = Standardabweichung

Eigenschaften		mean / n	SD / %
Allgemeines	Männlich	28	50.0
	Weiblich	28	50.0
	Alter (Jahre)	32.9	16.5
	Gewicht, kg	72.3	14.0
	Größe, cm	174.0	9.3
	in Deutschland geboren	36	65.5
Schulabschluss	Hauptschulabschluss	4	7.4
	Mittlere Reife	2	3.7
	Fachhochschulreife	5	9.3
	allgemeine Hochschulreife	43	79.6
Erwerbsstatus	berufstätig	26	48.2
	arbeitslos	11	20.4
	Rentner oder nicht erwerbstätig	28	51.9
Rauchstatus	Ex-Raucher	3	5.5
	Niemalsraucher	52	94.6
Sport	kein Sport	15	27.3
	1x Woche	12	21.8
	2 - 3x Woche	25	45.5
	> 3x Woche	3	5.5
Erkrankungen	Allergien	17	32.1
	Stoffwechselerkrankung	3	5.5
	Schilddrüsenerkrankung	2	3.6
	Arthrose	3	5.6
	Bluthochdruck	2	3.6

Eigenschaften		mean / n	SD / %
	stattgehabte Krebserkrankung	1	1.8
Wohnsituation	Anwohnerverkehr	34	61.8
	Nähe einer Straßenschlucht von mind. 100 m Länge	29	52.7
	Schimmel- oder Stockflecken in Wohnung	7	12.7
	Feuchte Wohnung	3	5.5
	Gasherd zum Kochen	1	1.8

Insgesamt gingen 527 Untersuchungstage (Expositionstage plus Tage für die 24 h Nachuntersuchung) in die Auswertung mit ein. An 287 Untersuchungstagen erfolgte die Anreise mit öffentlichen Verkehrsmitteln und an 192 mit dem eigenen PKW. An nur 4 Untersuchungstagen kamen Probanden zu Fuß. Eine Übersicht der persönlichen Probandenexposition während der Versuche ist in Tabelle 23, Tabelle 24, Tabelle 25 dargestellt.

Tabelle 23: Übersicht der Temperatur und relativen Luftfeuchtigkeit während der Kammermessung

	Temperatur [C°]			relative Luftfeuchtigkeit [%]	
	N	mean	SD	mean	SD
Raumluft	45	24.2	0.88	30.45	4.98
Kerzen Level 1	36	24.16	1.31	37.14	7.85
Kerzen Level 2	38	24.66	1.12	31.94	7.88
Toasten Level 1	32	23.71	1.2	36.38	6.46
Toasten Level 2	32	23.56	0.69	40.2	7.85
Braten Level 1	36	23.09	0.95	38.47	8.34
Braten Level 2	36	22.98	0.4	31.51	5.85

Tabelle 24: Übersicht der Partikelmassenkonzentration [pro 10 µg/m³] während der Kammermessung

	PM10			PM2.5		PM1	
	N	mean	SD	mean	SD	mean	SD
Raumluft	35	6.24	5.76	4.74	5.35	3.23	3.51
Kerzen Level 1	25	55.89	17.4	52.6	16.35	47.87	14.12
Kerzen Level 2	38	83.7	13.99	80.88	13.53	79.31	13.21
Toasten Level 1	27	125.56	353.28	62.61	97.41	37.71	18.42
Toasten Level 2	35	84.62	20.53	81.56	20.59	79.88	20.7
Braten Level 1	30	99.97	82.46	84.39	66.74	71.26	53.89
Braten Level 2	36	296.85	123.54	235.15	89.7	207.83	83.82

Tabelle 25: Übersicht der Partikeloberflächenkonzentration und Partikelanzahl während der Kammermessung

	PSC [pro 100 µm ² /cm ³]			PNC<100 nm [pro 10000 Partikel/cm ³]		
	N	mean	SD	N	mean	SD
Raumluft	47	0.23	0.18	47	0.34	0.21

Kerzen Level 1	36	22	3.4	36	190.82	26.34
Kerzen Level 2	38	38.4	4.64	38	269.97	17.75
Toasten Level 1	36	17.66	3.22	35	90.07	11.78
Toasten Level 2	35	37.79	6.59	35	155.79	15.39
Braten Level 1	36	13.25	6.1	36	31.12	6.09
Braten Level 2	36	34.56	12.66	36	60.7	11.78

5.2.2 Zusammenhangsanalysen

Die detaillierten Ergebnisse der unverbundenen Analyse (Deskription der Mittelwerte auf Gruppenebene) befinden sich im Anhang. Die deskriptive Analyse kann jedoch die individuelle Entwicklung der Gesundheitsendpunkte über die Zeit im Vergleich zur Placebo-Exposition nicht berücksichtigen. Dies wird dagegen in der Zusammenhangsanalyse berücksichtigt, deren Ergebnisse im nun folgenden Teil dargestellt sind. Hierzu wurden Mittelwertvergleiche als Differenz der Differenzen berechnet und Regressionsanalysen durchgeführt. Die Ergebnisse der Mittelwertvergleiche werden in den Grafiken und die Ergebnisse der Regressionsanalysen in Tabellen gezeigt.

Die Mittelwertvergleiche (Analyse der Differenz der Differenzen) untersuchen, ob zwischen dem jeweiligen Expositionsszenario und der Raumluft Unterschiede in den gemessenen gesundheitlichen Variablen bei den Probanden vorliegen. Diese Analyse ist allerdings nicht in der Lage, quantitative Unterschiede in den tatsächlichen Feinstaubkonzentrationen zwischen Probanden und Expositionen zu berücksichtigen, genauso wenig wie Unterschiede in potentiellen Störgrößen, die zwischen den Probanden oder den Kammerexpositionstagen bestehen. Dies kann nur durch eine weitergehende Analyse mit Regressionsmodellen erreicht werden.

Die Regressionsanalyse untersucht ob mit einer Erhöhung der Partikelkonzentrationen, die mit dem jeweiligen Expositionsszenario einhergehen, eine Veränderung der gemessenen Gesundheitsparameter assoziiert ist.

Diese Analyse kann also quantitative Unterschiede in den Feinstaubkonzentrationen zwischen Probanden und Expositionen berücksichtigen und zeigt demnach ein höheres Diskriminationsvermögen zwischen den einzelnen probandenspezifischen Expositionen. Ein weiterer Vorteil ist, dass Unterschiede in potentiellen Störgrößen, die zwischen den Probanden oder den Kammerexpositionstagen bestehen, durch Adjustierung im statistischen Modell berücksichtigt werden können. Das relevante Modell in den nachfolgenden Tabellen ist also das adjustierte Modell („full model“).

5.2.2.1 Nasallavage – lokale Entzündung

Zellzahlen und zelluläre Bestandteile

Zunächst wurde die Gesamtzellzahl in der Nasallavage erfasst, die in der Regel hauptsächlich durch Epithelzellen und neutrophile Granulozyten bestimmt wird. An weiteren Zellbestandteilen wurden basophile und eosinophile Granulozyten, Lymphozyten und Monozyten/Makrophagen bestimmt.

Die bestimmten Anteile der Basophilen sowie der Monozyten/Makrophagen waren extrem gering (oft im Mittel 0 mit Standardabweichung 0, siehe Anhang) und sind deswegen für eine weitergehende Analyse nicht geeignet.

Für eosinophile Granulozyten und Lymphozyten waren keine Muster zu erkennen, am ehesten noch eine Erniedrigung der eosinophilen Granulozyten in Zusammenhang mit den Partikeloberflächen- und Partikelanzahlkonzentrationen bei der 2 h und 24 h Messung für Braten (detaillierte Ergebnisse siehe Anhang). Auch bei diesen Zelltypen, waren die gezählten Zellzahlen sehr niedrig und wiesen eine entsprechend breite Streuung auf.

Gesamtzellzahl und Anteil von Epithelzellen und neutrophilen Granulozyten

Die Nasallavage wurden vor der Exposition, 2 h und 24 h nach der Exposition durchgeführt. Die Mittelwerte bewegen sich zwischen den verschiedenen Zeitpunkten und Expositionen von 334×10^3 bis 1177×10^3 für die Gesamtzellzahl, von 13 bis 37 % für den Anteil der Epithelzellen und von 60 bis 80% für den Anteil der neutrophilen Granulozyten (siehe Anhang). Bei der Nasallavage wurde generell, vermutlich aufgrund eines Auswascheffektes, eine Verringerung der Gesamtzellanzahl nach der ersten Nasallavage beobachtet. Ähnliches wird auch in der Literatur berichtet (Hauser et al 1994). Dies spielt jedoch bei der angewandten Auswertungsstrategie keine Rolle, da die Ergebnisse der Exposition immer im Vergleich zur Kontrolle (Raumluft) betrachtet werden, bei der ein ähnlicher Auswascheffekt vorliegt.

Im Mittelwertvergleich zwischen den Expositionen und Raumluft (Differenz der Differenzen) zeigt sich ein leichter Abfall für die 2h-Messung bei Kerzen, der nur für Level 1 statistisch signifikant ist. Für Toasten sieht man eine statistisch signifikante Erniedrigung der Zellzahl zu allen Zeitpunkten bis auf die 24 h-Messung bei Level 2, bei Braten bis auf die 24 h-Messung bei Level 1 (Abbildung 146). Für die Anzahl der neutrophilen Granulozyten und der Epithelzellen sieht man keine klaren Veränderungen nach Exposition (Abbildung 147, Abbildung 148).

In der Regressionsanalyse, die die tatsächlichen Feinstaubkonzentrationen der Expositionen berücksichtigt, sieht man für die Gesamtzellzahl in der Nasallavage eine statistisch signifikante Erhöhung in Zusammenhang mit der Partikeloberflächenkonzentration für Kerzen bei der 24 h-Messung, sowie eine Tendenz zu höheren Werten bei der 2 h-Messung (Tabelle 26). Die Epithelzellen sind 2 h und 24 h nach der Exposition gegenüber Toastvorgängen verringert (Tabelle 27). Dies gilt für mehrere der untersuchten Feinstaubmetriken (Oberfläche, Anzahl und PM1). Eine Erhöhung der Anzahl der Neutrophilen findet sich jeweils 2 h und 24 h nach Toastexposition, ebenfalls für die Metriken Oberfläche, Anzahl und PM1 (Tabelle 28). Diese Metriken sind insbesondere geeignet, um ultrafeine Stäube zu beschreiben. Es ist also zu vermuten, dass insbesondere ultrafeine Stäube aus Toastvorgängen die Zellzusammensetzung in der Nasallavage hin zu einer entzündlichen Reaktion beeinflussen.

Entzündungsparameter Interleukin (IL)-8 (NAL)

Interleukin-8 als Marker für lokale Entzündung ist ein Zytokin das maßgeblich bei der Rekrutierung der neutrophilen Granulozyten beteiligt ist.

IL-8 wurde in den 2 h und 24 h nach der Exposition entnommenen Nasallavageflüssigkeiten gemessen. Die Mittelwerte bewegen sich zwischen den verschiedenen Zeitpunkten und Expositionen von 117 bis 217 pg/ml (siehe Anhang).

Im Mittelwertvergleich zwischen den Expositionen sieht man für Kerzen signifikant niedrigere IL-8 Konzentrationen. Ferner sieht man für Toasten eine statistisch signifikante Erniedrigung 2 h nach der Exposition für Level 1 (Abbildung 149). Analog zu den Ergebnissen der Zellanzahl ist dies vermutlich ebenfalls auf den erwähnten Auswascheffekt zurückzuführen.

In der Regressionsanalyse zeigen sich für Kerzen und Toasten keine maßgeblichen Veränderungen (Tabelle 29). Für Braten sieht man in der Tendenz eine Erniedrigung mit steigender Partikelmassenkonzentration bei den 24 h-Messungen für Braten (statistisch signifikant für PM10). In Anbetracht der Vielzahl der Analysen, der insgesamt breiten Konfidenzintervalle und des Fehlens eines konsistenten Musters handelt es sich hierbei am ehesten um einen Zufallsbefund.

Abbildung 146: Differenz der Differenz der Nasallavage-Zellanzahl [$10^3/\text{ml}$] zu 2 Messzeitpunkten zu unterschiedlichen Innenraumbelastungen und unterschiedlichen Belastungsniveaus im Vergleich zur Raumluft

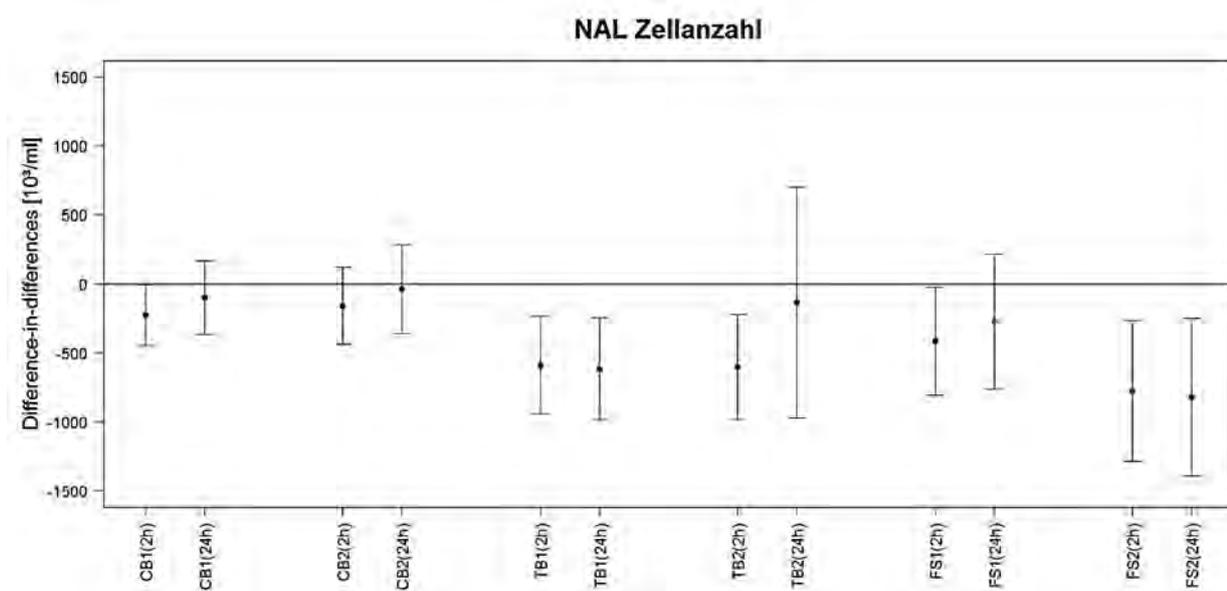


Abbildung 147: Differenz der Differenz der Epithelzellen in der Nasallavage [%] zu 2 Messzeitpunkten zu unterschiedlichen Innenraumbelastungen und unterschiedlichen Belastungsniveaus im Vergleich zur Raumluft

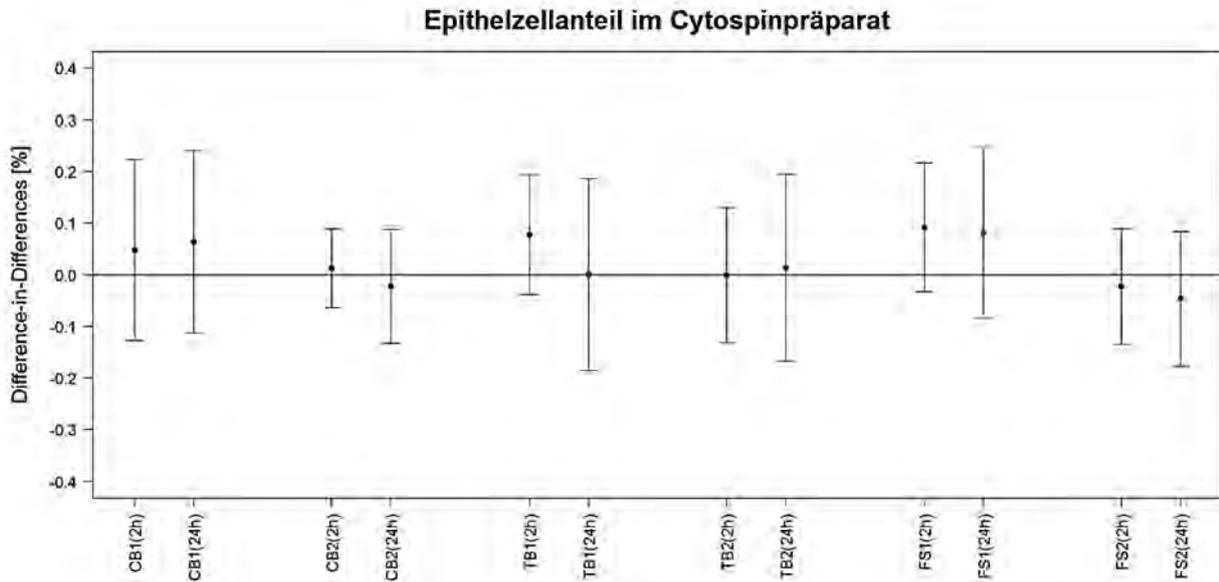


Abbildung 148: Differenz der Differenz der neutrophilen Granulozyten in der Nasallavage [%] zu 2 Messzeitpunkten zu unterschiedlichen Innenraumbelastungen und unterschiedlichen Belastungsniveaus im Vergleich zur Raumluft

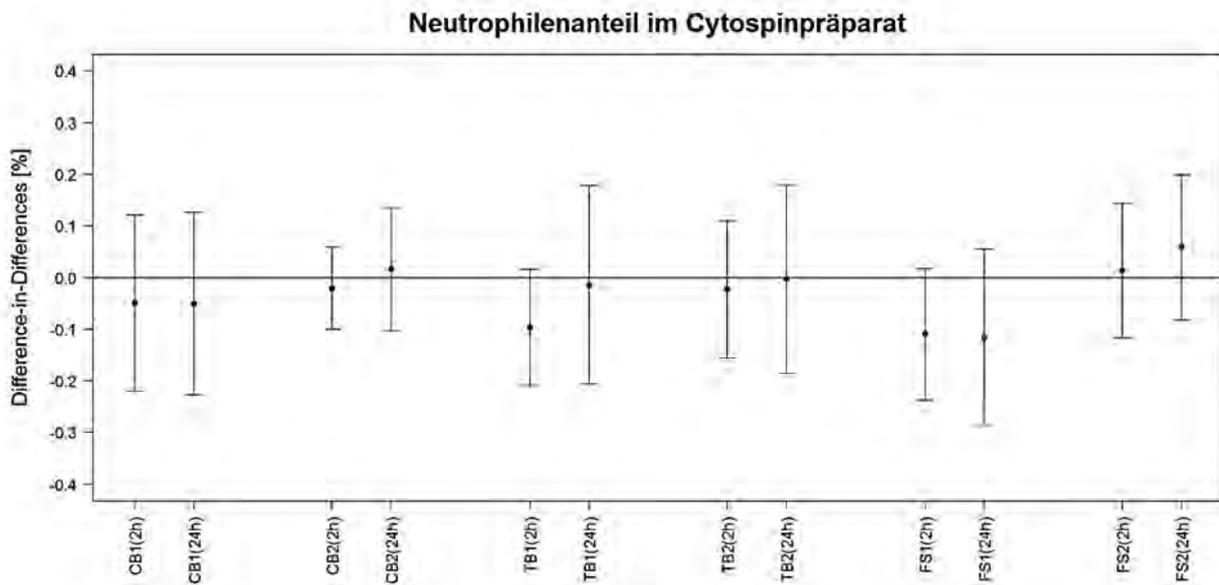


Abbildung 149: Differenz der Differenz der Interleukin-8-Bestimmung aus der Nasallavage [pg/ml] zu 2 Messzeitpunkten zu unterschiedlichen Innenraumbelastungen und unterschiedlichen Belastungsniveaus im Vergleich zur Raumluft

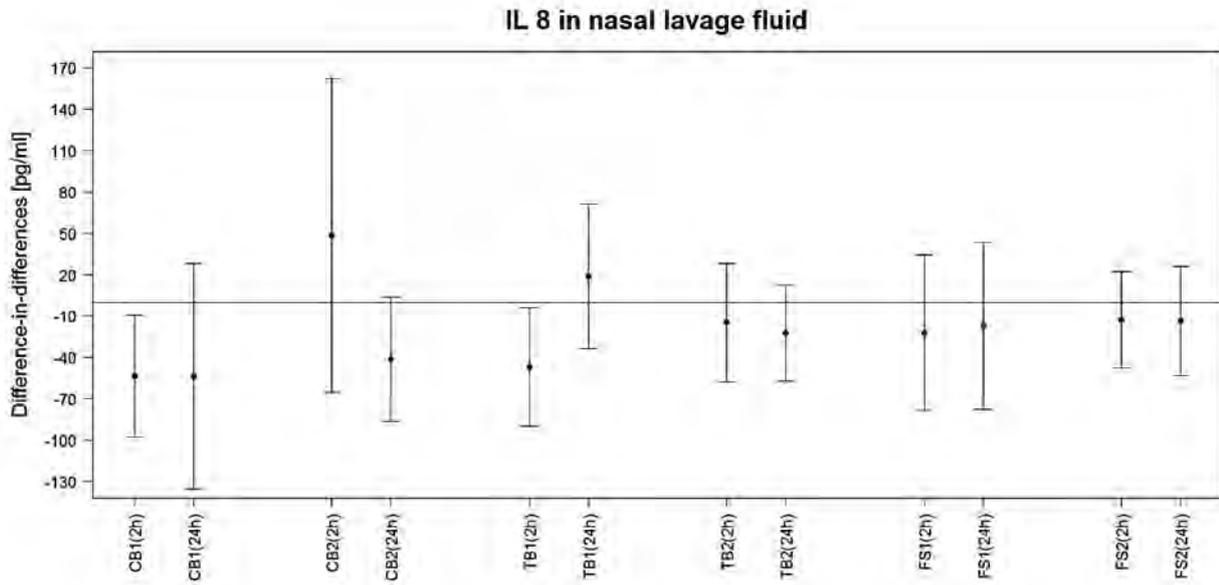


Tabelle 26: Veränderung der Nasallavage Zellanzahl [$10^3/\text{ml}$]: Mittelwert (mean) und 95%- Konfidenzintervall (95%- CI)

Nasallavage Zellanzahl [$10^3/\text{ml}$]		
Oberflächenkonzentration [$\text{pro } 100 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$]		
PSC		
Mean (95%-CI)		
	post 2 h	post 24 h
Kerzen		
crude model	-3.671 (-9.878; 2.537)	0.363 (-5.935; 6.661)
full model	30.359 (-0.559; 61.277)	34.705 (3.653; 65.757)
Toasten		
crude model	-13.837 (-25.867; -1.807)	1.642 (-10.542; 13.826)
full model	25.822 (-16.749; 68.393)	39.749 (-2.636; 82.134)
Braten		
crude model	-21.648 (-32.234; -11.062)	-18.337 (-29.199; -7.475)
full model	-5.081 (-24.816; 14.655)	9.697 (-12.052; 31.446)
Anzahl [$\text{pro } 10000 \text{ Partikel}/\text{cm}^3$]		
PNC < 100 nm		
Mean (95%-CI)		
	post 2 h	post 24 h
Kerzen		
crude model	-0.63 (-1.489; 0.23)	-0.306 (-1.181; 0.568)
full model	-3.129 (-9.254; 2.995)	-2.775 (-8.933; 3.382)
Toasten		
crude model	-3.504 (-6.432; -0.575)	-0.679 (-3.647; 2.29)
full model	4.31 (-11.618; 20.238)	6.868 (-9.102; 22.838)
Braten		
crude model	-12.39 (-18.937; -5.844)	-11.059 (-17.701; -4.417)
full model	1.468 (-19.774; 22.711)	6.755 (-14.605; 28.116)
PMC [$\text{pro } 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$]		
PM ₁₀		
Mean (95%-CI)		
	post 2 h	post 24 h
Kerzen		
crude model	-17.145 (-48.033; 13.743)	12.853 (-18.662; 44.368)
full model	22.744 (-68.459; 113.947)	52.926 (-39.365; 145.217)
Toasten		
crude model	-2.666 (-14.794; 9.462)	-2.511 (-14.659; 9.637)
full model	1.25 (-10.622; 13.122)	19.401 (-28.472; 67.274)
Braten		
crude model	-22.049 (-34.789; -9.309)	-19.595 (-32.733; -6.457)
full model	-7.257 (-26.896; 12.382)	6.087 (-16.263; 28.437)

Nasallavage Zellanzahl [$10^3/\text{ml}$]		
PMC [pro $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$]		
PM _{2,5}		
Mean (95%-CI)		
	post 2 h	post 24 h
Kerzen		
crude model	-17.937 (-49.46; 13.586)	13.563 (-18.571; 45.697)
full model	27.335 (-67.966; 122.636)	59.283 (-37.031; 155.597)
Toasten		
crude model	-20.027 (-56.959; 16.905)	-3.516 (-40.776; 33.744)
full model	4.124 (-37.559; 45.807)	48.263 (-30.068; 126.594)
Braten		
crude model	-32.181 (-48.331; -16.031)	-27.371 (-44.176; -10.566)
full model	-18.198 (-44.591; 8.195)	1.702 (-28.433; 31.837)
PMC [pro $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$]		
PM ₁		
Mean (95%-CI)		
	post 2 h	post 24 h
Kerzen		
crude model	-18.679 (-50.537; 13.179)	13.649 (-18.795; 46.093)
full model	31.602 (-73.585; 136.789)	64.462 (-41.454; 170.378)
Toasten		
crude model	-52.238 (-113.711; 9.235)	16.137 (-46.589; 78.863)
full model	-4.623 (-124.683; 115.437)	55.136 (-65.204; 175.476)
Braten		
crude model	-37.348 (-55.286; -19.41)	-32.005 (-50.776; -13.234)
full model	-23.253 (-53.333; 6.827)	0.634 (-34.693; 35.961)

crude model = unadjustiertes Modell; full model = adjustiert für Expositionsquelle, Alter, Geschlecht, Größe, Temperatur im Versuchsraum, relative Luftfeuchtigkeit im Versuchsraum, Verkehrsmittel, Anfahrtszeit

Tabelle 27: Veränderung der Zellanzahl der Epithelzellen aus der Nasallavage [%]: Mittelwert (mean) und 95%- Konfidenzintervall (95%- CI)

Epithelzellen aus der Nasallavage [%]		
Oberflächenkonzentration [pro 100 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$]		
PSC		
Mean (95%-CI)		
	post 2 h	post 24 h
Kerzen		
crude model	0.001 (-0.002; 0.004)	0.002 (-0.001; 0.005)
full model	0.003 (-0.012; 0.017)	0.002 (-0.013; 0.017)
Toasten		
crude model	0 (-0.004; 0.003)	0.001 (-0.002; 0.004)
full model	-0.021 (-0.033; -0.009)	-0.02 (-0.032; -0.008)
Braten		
crude model	0 (-0.003; 0.002)	0.001 (-0.002; 0.004)
full model	0.001 (-0.005; 0.007)	0.003 (-0.003; 0.01)
Anzahl [pro 10000 Partikel/cm ³]		
PNC < 100 nm		
Mean (95%-CI)		
	post 2 h	post 24 h
Kerzen		
crude model	0 (0; 0.001)	0 (0; 0.001)
full model	0.002 (-0.001; 0.005)	0.002 (-0.001; 0.005)
Toasten		
crude model	0 (-0.001; 0.001)	0 (-0.001; 0.001)
full model	-0.007 (-0.012; -0.003)	-0.007 (-0.012; -0.003)
Braten		
crude model	0 (-0.002; 0.002)	0.001 (-0.001; 0.003)
full model	0.005 (-0.001; 0.011)	0.006 (-0.001; 0.012)
PMC [pro 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$]		
PM ₁₀		
Mean (95%-CI)		
	post 2 h	post 24 h
Kerzen		
crude model	0.003 (-0.011; 0.017)	0.003 (-0.011; 0.017)
full model	-0.029 (-0.072; 0.014)	-0.03 (-0.073; 0.013)
Toasten		
crude model	0 (-0.002; 0.002)	-0.001 (-0.003; 0.001)
full model	0.001 (-0.003; 0.005)	-0.008 (-0.02; 0.004)
Braten		
crude model	-0.001 (-0.005; 0.003)	0 (-0.004; 0.004)
full model	0 (-0.006; 0.006)	0.002 (-0.004; 0.008)

Epithelzellen aus der Nasallavage [%]		
PMC [pro 10 µg/m ³]		
PM _{2,5}		
Mean (95%-CI)		
	post 2 h	post 24 h
Kerzen		
crude model	0.002 (-0.012; 0.016)	0.004 (-0.01; 0.018)
full model	-0.032 (-0.077; 0.013)	-0.032 (-0.077; 0.013)
Toasten		
crude model	0 (-0.008; 0.008)	-0.003 (-0.011; 0.005)
full model	-0.003 (-0.013; 0.007)	-0.015 (-0.035; 0.005)
Braten		
crude model	-0.001 (-0.005; 0.003)	0 (-0.004; 0.004)
full model	0.001 (-0.007; 0.009)	0.005 (-0.003; 0.013)
PMC [pro 10 µg/m ³]		
PM ₁		
Mean (95%-CI)		
	post 2 h	post 24 h
Kerzen		
crude model	0.002 (-0.012; 0.016)	0.004 (-0.01; 0.018)
full model	-0.035 (-0.084; 0.014)	-0.035 (-0.084; 0.014)
Toasten		
crude model	-0.005 (-0.019; 0.009)	-0.002 (-0.016; 0.012)
full model	-0.054 (-0.083; -0.025)	-0.05 (-0.077; -0.023)
Braten		
crude model	-0.002 (-0.006; 0.002)	0.001 (-0.003; 0.005)
full model	0.001 (-0.007; 0.009)	0.006 (-0.004; 0.016)

crude model = unadjustiertes Modell; full model = adjustiert für Expositionsquelle, Alter, Geschlecht, Größe, Temperatur im Versuchsraum, relative Luftfeuchtigkeit im Versuchsraum, Verkehrsmittel, Anfahrtszeit

Tabelle 28: Veränderung der neutrophilen Granulozyten aus der Nasallavage [%]: Mittelwert (mean) und 95%- Konfidenzintervall (95%- CI)

neutrophile Granulozyten aus der Nasallavage [%]		
Oberflächenkonzentration [pro 100 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$]		
PSC		
Mean (95%-CI)		
	post 2 h	post 24 h
Kerzen		
crude model	-0.001 (-0.004; 0.002)	-0.002 (-0.005; 0.001)
full model	0 (-0.015; 0.015)	0 (-0.015; 0.015)
Toasten		
crude model	0 (-0.003; 0.003)	-0.001 (-0.004; 0.002)
full model	0.02 (0.008; 0.032)	0.02 (0.008; 0.032)
Braten		
crude model	0 (-0.003; 0.004)	-0.001 (-0.004; 0.003)
full model	0 (-0.006; 0.006)	-0.002 (-0.008; 0.005)
Anzahl [pro 10000 Partikel/cm ³]		
PNC < 100 nm		
Mean (95%-CI)		
	post 2 h	post 24 h
Kerzen		
crude model	0 (-0.001; 0)	0 (-0.001; 0)
full model	-0.002 (-0.005; 0.001)	-0.002 (-0.005; 0.001)
Toasten		
crude model	0 (-0.001; 0.001)	0 (-0.001; 0.001)
full model	0.007 (0.003; 0.012)	0.007 (0.003; 0.012)
Braten		
crude model	0 (-0.002; 0.002)	-0.001 (-0.003; 0.001)
full model	-0.003 (-0.01; 0.003)	-0.004 (-0.01; 0.003)
PMC [pro 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$]		
PM ₁₀		
Mean (95%-CI)		
	post 2 h	post 24 h
Kerzen		
crude model	-0.004 (-0.018; 0.01)	-0.003 (-0.017; 0.011)
full model	0.031 (-0.012; 0.074)	0.033 (-0.01; 0.076)
Toasten		
crude model	0 (-0.002; 0.002)	0.001 (-0.001; 0.003)
full model	-0.001 (-0.005; 0.003)	0.009 (-0.003; 0.021)
Braten		
crude model	0.001 (-0.003; 0.005)	0.001 (-0.003; 0.005)
full model	0.001 (-0.005; 0.007)	-0.001 (-0.007; 0.005)

neutrophile Granulozyten aus der Nasallavage [%]		
PMC [pro 10 µg/m ³]		
PM _{2,5}		
Mean (95%-CI)		
	post 2 h	post 24 h
Kerzen		
crude model	-0.004 (-0.018; 0.01)	-0.004 (-0.018; 0.01)
full model	0.034 (-0.011; 0.079)	0.035 (-0.01; 0.08)
Toasten		
crude model	0 (-0.008; 0.008)	0.003 (-0.005; 0.011)
full model	0.003 (-0.007; 0.013)	0.018 (-0.002; 0.038)
Braten		
crude model	0.001 (-0.003; 0.005)	0 (-0.004; 0.004)
full model	0 (-0.008; 0.008)	-0.003 (-0.013; 0.007)
PMC [pro 10 µg/m ³]		
PM ₁		
Mean (95%-CI)		
	post 2 h	post 24 h
Kerzen		
crude model	-0.003 (-0.019; 0.013)	-0.004 (-0.02; 0.012)
full model	0.037 (-0.012; 0.086)	0.037 (-0.012; 0.086)
Toasten		
crude model	0.003 (-0.013; 0.019)	0.004 (-0.012; 0.02)
full model	0.053 (0.024; 0.082)	0.053 (0.024; 0.082)
Braten		
crude model	0.002 (-0.004; 0.008)	0 (-0.006; 0.006)
full model	0 (-0.01; 0.01)	-0.003 (-0.013; 0.007)

crude model = unadjustiertes Modell; full model = adjustiert für Expositionsquelle, Alter, Geschlecht, Größe, Temperatur im Versuchsraum, relative Luftfeuchtigkeit im Versuchsraum, Verkehrsmittel, Anfahrtszeit

Tabelle 29: Veränderung der Interleukin 8 aus Nasallavage [pg/ml]: Mittelwert (mean) und 95%-Konfidenzintervall (95%- CI)

Interleukin 8 aus Nasallavage [pg/ml]		
Oberflächenkonzentration [pro 100 µm ² /cm ³]		
PSC		
Mean (95%-CI)		
	post 2 h	post 24 h
Kerzen		
crude model	1.097 (-0.85; 3.044)	-1.104 (-3.053; 0.844)
full model	3.011 (-7.891; 13.913)	0.738 (-10.178; 11.654)
Toasten		
crude model	-0.308 (-1.541; 0.926)	-0.249 (-1.483; 0.985)
full model	1.051 (-3.677; 5.779)	1.211 (-3.491; 5.913)
Braten		
crude model	-0.04 (-1.15; 1.07)	-0.435 (-1.581; 0.71)
full model	-0.397 (-2.687; 1.892)	-0.811 (-3.386; 1.763)
Anzahl [pro 10000 Partikel/cm ³]		
PNC < 100 nm		
Mean (95%-CI)		
	post 2 h	post 24 h
Kerzen		
crude model	0.069 (-0.203; 0.34)	-0.138 (-0.41; 0.134)
full model	0.354 (-1.568; 2.275)	0.142 (-1.79; 2.074)
Toasten		
crude model	-0.124 (-0.426; 0.177)	-0.028 (-0.33; 0.273)
full model	-0.192 (-1.985; 1.6)	-0.06 (-1.86; 1.739)
Braten		
crude model	-0.024 (-0.712; 0.663)	-0.116 (-0.812; 0.579)
full model	1.742 (-0.735; 4.219)	1.745 (-0.783; 4.274)
PMC [pro 10 µg/m ³]		
PM ₁₀		
Mean (95%-CI)		
	post 2 h	post 24 h
Kerzen		
crude model	5.123 (-5.287; 15.533)	-5.705 (-16.12; 4.71)
full model	-9.355 (-39.878; 21.168)	-20.085 (-50.802; 10.632)
Toasten		
crude model	0.092 (-1.092; 1.276)	-0.429 (-1.613; 0.755)
full model	-0.092 (-1.399; 1.215)	-3.642 (-8.928; 1.644)
Braten		
crude model	-0.128 (-1.418; 1.162)	-0.668 (-1.989; 0.653)
full model	-1.785 (-4.021; 0.451)	-2.598 (-5.148; -0.048)

Interleukin 8 aus Nasallavage [pg/ml]		
PMC [pro 10 µg/m ³]		
PM _{2,5}		
Mean (95%-CI)		
	post 2 h	post 24 h
Kerzen		
crude model	5.149 (-5.482; 15.78)	-5.699 (-16.334; 4.936)
full model	-11.27 (-43.2; 20.66)	-22.072 (-54.181; 10.037)
Toasten		
crude model	0.286 (-3.364; 3.936)	-1.413 (-5.063; 2.237)
full model	-0.174 (-4.749; 4.401)	-2.562 (-11.292; 6.168)
Braten		
crude model	-0.132 (-1.792; 1.528)	-0.77 (-2.489; 0.949)
full model	-2.613 (-5.627; 0.401)	-3.715 (-7.167; -0.263)
PMC [pro 10 µg/m ³]		
PM ₁		
Mean (95%-CI)		
	post 2 h	post 24 h
Kerzen		
crude model	5.52 (-5.229; 16.269)	-5.426 (-16.177; 5.325)
full model	-12.772 (-48.244; 22.7)	-23.794 (-59.38; 11.792)
Toasten		
crude model	0.201 (-6.13; 6.532)	-1.256 (-7.587; 5.075)
full model	3.737 (-9.315; 16.789)	2.694 (-10.248; 15.636)
Braten		
crude model	-0.049 (-1.907; 1.809)	-0.629 (-2.564; 1.306)
full model	-2.44 (-5.892; 1.012)	-3.568 (-7.643; 0.507)

crude model = unadjustiertes Modell; full model = adjustiert für Expositionsquelle, Alter, Geschlecht, Größe, Temperatur im Versuchsraum, relative Luftfeuchtigkeit im Versuchsraum, Verkehrsmittel, Anfahrtszeit

5.2.2.2 FeNO und Lungenfunktion – pulmonale Entzündung und lokale Organwirkung

FeNO

Für FeNO als Marker einer pulmonalen Entzündung ergaben sich keine konsistenten Veränderungen außer einer statistisch signifikanten Erhöhung für Braten Level 2 nach 2 Stunden und in Zusammenhang mit einer Erhöhung in der Partikelanzahlkonzentration (2h und 24h Messungen). Auf eine weitergehende Darstellung im Haupttext wird daher verzichtet. Die detaillierten Ergebnisse finden sich im Anhang.

Lungenfunktion

Die Lungenfunktion wurde vor der Exposition, 4h und 24h nach der Exposition gemessen. Die Mittelwerte bewegen sich zwischen den verschiedenen Zeitpunkten und Expositionen von 3.43 bis 3.6 l für FEV₁, 4.26 bis 4.49l für FVC, 0,79 bis 0,81 für FEV₁/FVC und 3.28 bis 3.6l/s für MEF_{25-75%} (siehe Anhang).

Im Mittelwertvergleich zwischen Exposition und Raumluft ist für Kerzen und Toasten eine Tendenz zu einer Erhöhung der Lungenfunktionswerte zu sehen. So steigen FEV₁ und FVC zu mehreren Zeitpunkten leicht an. Für den Quotienten sowie für MEF_{25-75%} sieht man keine klaren Veränderungen (Abbildung 150, Abbildung 151, Abbildung 152, Abbildung 153)

In der Regressionsanalyse beobachtet man bei Kerzen einen Abfall aller vier Lungenfunktionsparameter (FEV₁, FVC, FEV₁/FVC und MEF25%–75%) in Zusammenhang mit einem Anstieg in der Partikeloberflächenkonzentration (Tabelle 30, Tabelle 31, Tabelle 32, Tabelle 33). Für die Partikelmassenkonzentrationen zeigt sich ebenfalls ein Muster für eine Abnahme, das am deutlichsten für FEV₁ zu sehen ist. Da sich in nahezu allen Lungenfunktionsvariablen und für alle Zeitpunkte eine Tendenz zur Abnahme zeigt, wird dies als real und nicht als Zufallsbefund gewertet.

Für Toasten ergaben sich keine nennenswerten Effekte.

Für Braten sieht man in Zusammenhang mit steigenden Partikelmassenkonzentrationen einen deutlichen Abfall in MEF25-75% und etwas weniger klar auch in FEV₁. Für die anderen Lungenfunktionsparameter und Partikelmetriken sind die Zusammenhänge eher undeutlich oder sporadisch.

Die Sensitivitätsanalyse, die die PM₁₀ Massenkonzentration in der Außenluft berücksichtigte (siehe Anhang), ergab ähnliche Ergebnisse wie die hier gezeigten Analysen.

Abbildung 150: Differenz der Differenz des FEV₁[l] zu 2 Messzeitpunkten zu unterschiedlichen Innenraumbelastungen und unterschiedlichen Belastungsniveaus im Vergleich zur Raumluft

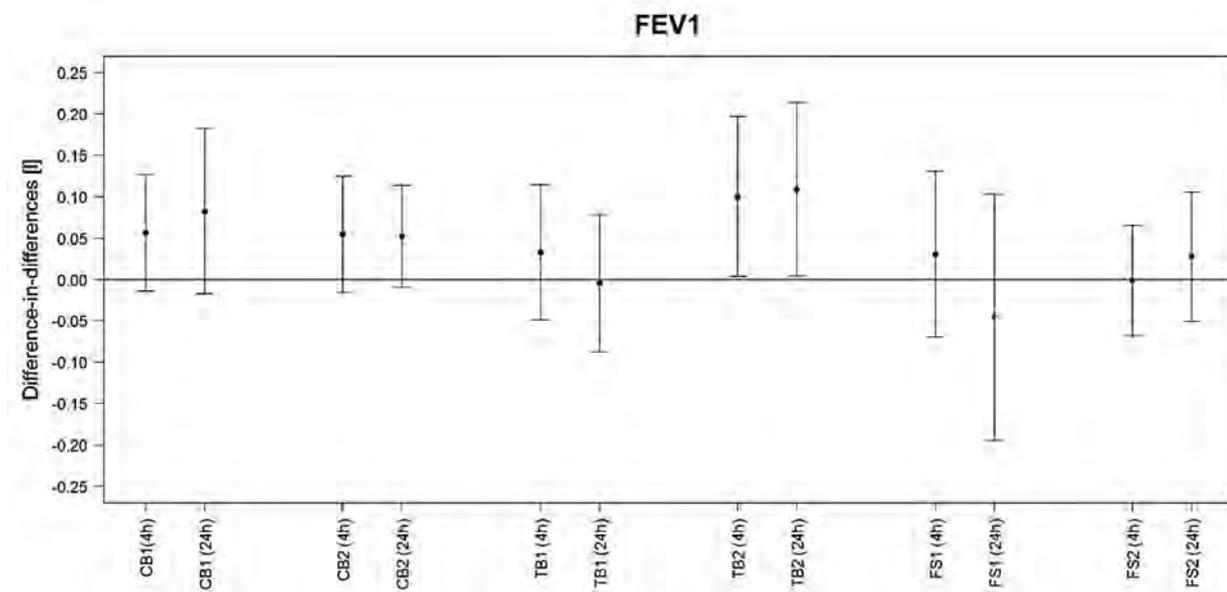


Abbildung 151: Differenz der Differenz des FVC [l] zu 2 Messzeitpunkten zu unterschiedlichen Innenraumbelastungen und unterschiedlichen Belastungsniveaus im Vergleich zur Raumluft

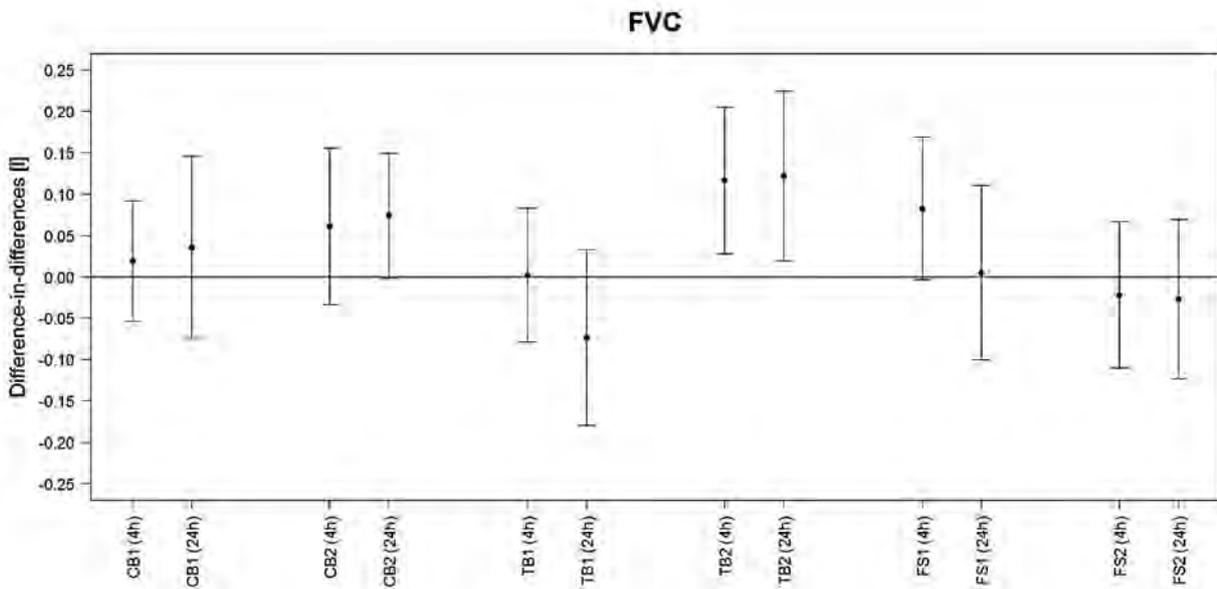


Abbildung 152: Differenz der Differenz des Verhältnisses von FEV₁ zu FVC zu 2 Messzeitpunkten zu unterschiedlichen Innenraumbelastungen und unterschiedlichen Belastungsniveaus im Vergleich zur Raumluft

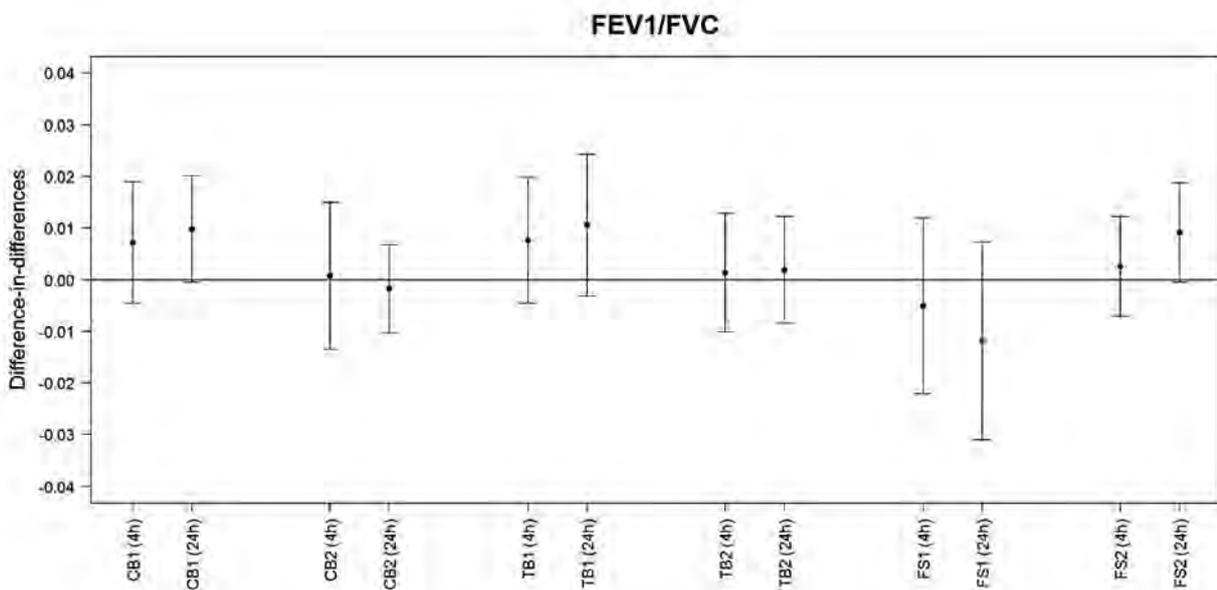


Abbildung 153: Differenz der Differenz des MEF_{25-75} [l/s] zu 2 Messzeitpunkten zu unterschiedlichen Innenraumbelastungen und unterschiedlichen Belastungsniveaus im Vergleich zur Raumluft

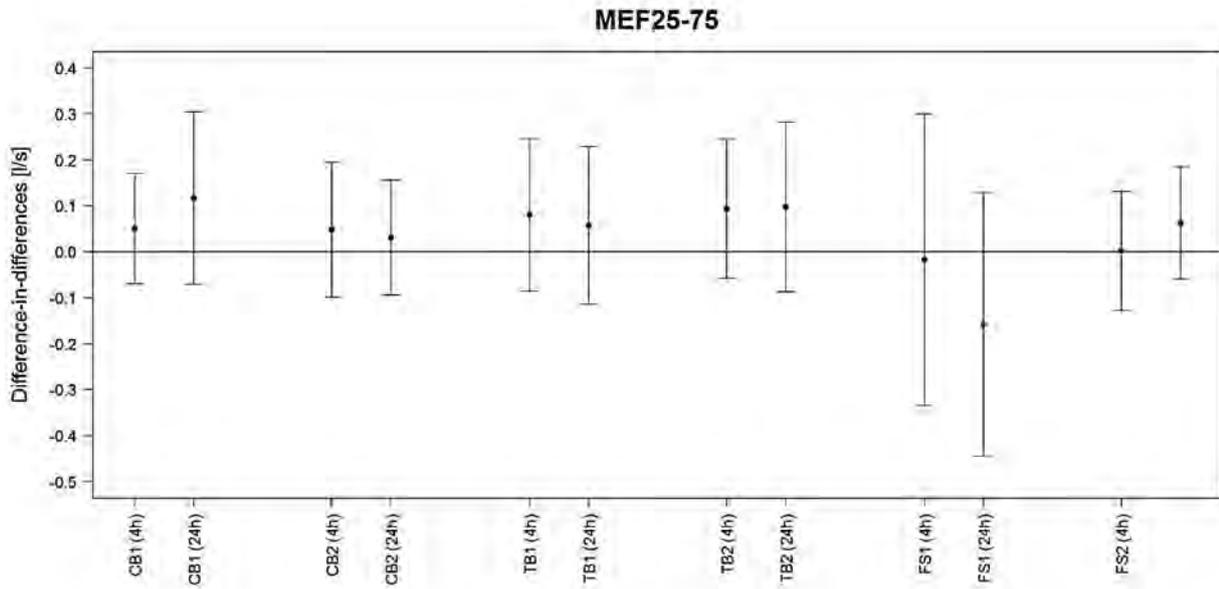


Tabelle 30: Veränderung der FEV₁ [ml]: Mittelwert (Mean) und 95%- Konfidenzintervall (95%- CI)

FEV ₁ [ml]		
Oberflächenkonzentration [pro 100 µm ² /cm ³]		
PSC		
Mean (95%-CI)		
	post 2 h	post 24 h
Kerzen		
crude model	2 (0; 3)	1 (-1; 2)
full model	-13 (-20;-6)	-13 (-20;-6)
Toasten		
crude model	3 (1; 5)	2 (0; 4)
full model	-2 (-10; 5)	-3 (-10;5)
Braten		
crude model	1 (-2; 3)	0 (-2; 3)
full model	-1 (-6; 4)	0 (-5; 5)
Anzahl [pro 10000 Partikel/cm ³]		
PNC < 100 nm		
Mean (95%-CI)		
	post 2 h	post 24 h
Kerzen		
crude model	0 (0; 0)	0 (0; 0)
full model	-1 (-2; 1)	-1 (-2; 1)
Toasten		
crude model	1 (0; 1)	0 (0; 1)
full model	1 (-2; 4)	1 (-2; 4)
Braten		
crude model	0 (-1; 2)	0 (-1; 2)
full model	0 (-5; 5)	0 (-5; 6)
PMC [pro 10 µg/m ³]		
PM ₁₀		
Mean (95%-CI)		
	post 2 h	post 24 h
Kerzen		
crude model	7 (-1; 15)	5 (-3; 13)
full model	-18 (-40; 4)	-19 (-41; 3)
Toasten		
crude model	0 (-2; 2)	0 (-2; 2)
full model	0 (-2; 2)	0 (-8; 8)
Braten		
crude model	0 (-2; 2)	1 (-1; 3)
full model	-3 (-7; 1)	-2 (-8; 4)

FEV ₁ [ml]		
PMC [pro 10 µg/m ³]		
PM _{2,5}		
Mean (95%-CI)		
	post 2 h	post 24 h
Kerzen		
crude model	8 (0; 16)	5 (-3; 13)
full model	-19 (-43; 5)	-20 (-44; 4)
Toasten		
crude model	4 (-2; 10)	2 (-4; 8)
full model	1 (-5; 7)	-2 (-16; 12)
Braten		
crude model	0 (-4; 4)	1 (-3; 5)
full model	-6 (-12; 0)	-5 (-13; 3)
PMC [pro 10 µg/m ³]		
PM ₁		
Mean (95%-CI)		
	post 2 h	post 24 h
Kerzen		
crude model	8 (0; 16)	5 (-3; 13)
full model	-22 (-47; 3)	-23 (-48; 2)
Toasten		
crude model	11 (1; 21)	10 (0; 20)
full model	-6 (-26; 14)	-7 (-27; 13)
Braten		
crude model	1 (-3; 5)	2 (-2; 6)
full model	-5 (-13; 3)	-3 (-11; 5)

crude model = unadjustiertes Modell; full model = adjustiert für Expositionsquelle, Alter, Geschlecht, Größe, Temperatur im Versuchsraum, relative Luftfeuchtigkeit im Versuchsraum, Verkehrsmittel, Anfahrtszeit

Tabelle 31: Veränderung des FVC [ml]: Mittelwert (Mean) und 95%- Konfidenzintervall (95%- CI)

FVC [ml]		
Oberflächenkonzentration [pro 100 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$]		
PSC		
Mean (95%-CI)		
	post 2 h	post 24 h
Kerzen		
crude model	2 (0; 4)	0 (-2; 2)
full model	-9 (-18;-1)	-10 (-18;-1)
Toasten		
crude model	3 (1; 5)	2 (0; 5)
full model	1 (-7; 9)	1 (-7; 8)
Braten		
crude model	0 (-2; 3)	-1 (-3; 1)
full model	3 (-1; 7)	2 (-3; 7)
Anzahl [pro 10000 Partikel/ cm^3]		
PNC < 100 nm		
Mean (95%-CI)		
	post 2 h	post 24 h
Kerzen		
crude model	0 (0; 0)	0 (0; 0)
full model	-1 (-3; 0)	-1 (-3; 0)
Toasten		
crude model	1 (0; 1)	0 (0; 1)
full model	1 (-2; 4)	1 (-2; 4)
Braten		
crude model	0 (-1; 2)	-1 (-2; 1)
full model	4 (-1; 8)	3 (-2; 8)
PMC [pro 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$]		
PM ₁₀		
Mean (95%-CI)		
	post 2 h	post 24 h
Kerzen		
crude model	8 (-2; 18)	7 (-3; 17)
full model	-13 (-38; 12)	-12 (-39; 15)
Toasten		
crude model	0 (-2; 2)	-1 (-3; 1)
full model	0 (-2; 2)	-2 (-10; 6)
Braten		
crude model	0 (-2; 2)	0 (-2; 2)
full model	2 (-2; 6)	1 (-3; 5)

	FVC [ml]	
	PMC [pro 10 µg/m ³]	
	PM _{2,5}	
	Mean (95%-CI)	
Kerzen	post 2 h	post 24 h
crude model	9 (-1; 19)	8 (-2; 18)
full model	-12 (-39; 15)	-11 (-38; 16)
Toasten	post 2 h	post 24 h
crude model	4 (-2; 10)	1 (-5; 7)
full model	1 (-7; 9)	-2 (-16; 12)
Braten	post 2 h	post 24 h
crude model	0 (-4; 4)	0 (-4; 4)
full model	3 (-3; 9)	2 (-4; 8)
	PMC [pro 10 µg/m ³]	
	PM ₁	
	Mean (95%-CI)	
Kerzen	post 2 h	post 24 h
crude model	9 (-1; 19)	8 (-2; 18)
full model	-13 (-44; 18)	-12 (-43; 19)
Toasten	post 2 h	post 24 h
crude model	14 (4; 24)	14 (4; 24)
full model	0 (-22; 22)	0 (-21; 19)
Braten	post 2 h	post 24 h
crude model	1 (-3; 5)	0 (-4; 4)
full model	5 (-1; 11)	4 (-4; 12)

crude model = unadjustiertes Modell; full model = adjustiert für Expositionsquelle, Alter, Geschlecht, Größe, Temperatur im Versuchsraum, relative Luftfeuchtigkeit im Versuchsraum, Verkehrsmittel, Anfahrtszeit

Tabelle 32: Veränderung des Quotienten von FEV₁/FVC: Mittelwert (Mean) und 95%- Konfidenzintervall (95%- CI)

FEV ₁ /FVC [%]; Prozentpunkt* 1000		
Oberflächenkonzentration [pro 100 µm ² /cm ³]		
PSC		
Mean (95%-CI)		
	post 2 h	post 24 h
Kerzen		
crude model	0 (0; 0)	0 (0; 0)
full model	-1 (-2; 0)	1 (-2; 0)
Toasten		
crude model	0 (0; 0)	0 (0; 0)
full model	-1 (-2; 0)	-1 (-2; 0)
Braten		
crude model	0 (0; 0)	0 (0; 1)
full model	-1 (-2; 0)	0 (-1; 0)
Anzahl [pro 10000 Partikel/cm ³]		
PNC < 100 nm		
Mean (95%-CI)		
	post 2 h	post 24 h
Kerzen		
crude model	0 (0; 0)	0 (0; 0)
full model	0 (0; 0)	0 (0; 0)
Toasten		
crude model	0 (0; 0)	0 (0; 0)
full model	0 (0; 0)	0 (0; 0)
Braten		
crude model	0 (0; 0)	0 (0; 0)
full model	-1 (-2; 0)	-1 (-1; 0)
PMC [pro 10 µg/m ³]		
PM ₁₀		
Mean (95%-CI)		
	post 2 h	post 24 h
Kerzen		
crude model	0 (-2; 2)	0 (-2; 2)
full model	-2 (-6; 2)	-3 (-7; 1)
Toasten		
crude model	0 (0; 0)	0 (0; 0)
full model	0 (0; 0)	0 (0; 0)
Braten		
crude model	0 (0; 0)	0 (0; 0)
full model	-1 (-1; -1)	-1 (-1; -1)

FEV ₁ /FVC [%]; Prozentpunkt*1000		
	PMC [pro 10 µg/m ³]	
	PM _{2,5}	
	Mean (95%-CI)	
Kerzen	post 2 h	post 24 h
crude model	0 (-2; 2)	0 (-2; 2)
full model	-3 (-7; 1)	-3 (-7; 1)
Toasten	post 2 h	post 24 h
crude model	0 (0; 0)	0 (0; 0)
full model	0 (0; 0)	0 (-2; 2)
Braten	post 2 h	post 24 h
crude model	0 (0;0)	0 (0;0)
full model	-2 (-4; 0)	-2 (-4; 0)
	PMC [pro 10 µg/m ³]	
	PM ₁	
	Mean (95%-CI)	
Kerzen	post 2 h	post 24 h
crude model	0 (-2; 2)	0 (-2; 2)
full model	-3 (-7; 1)	-4 (-8; 0)
Toasten	post 2 h	post 24 h
crude model	0 (-2; 2)	0 (-2; 2)
full model	-1 (-3; 1)	-1 (-3; 1)
Braten	post 2 h	post 24 h
crude model	0 (0;0)	0 (0;0)
full model	-2 (-4; 0)	-2 (-4; 0)

crude model = unadjustiertes Modell; full model = adjustiert für Expositionsquelle, Alter, Geschlecht, Größe, Temperatur im Versuchsraum, relative Luftfeuchtigkeit im Versuchsraum, Verkehrsmittel, Anfahrtszeit

Tabelle 33: Veränderung des Quotienten von MEF_{25-75} [l/s]: Mittelwert (Mean) und 95%- Konfidenzintervall (95%- CI)

	MEF₂₅₋₇₅ [ml/s]	
	Oberflächenkonzentration [pro 100 µm²/cm³]	
	PSC	
	Mean (95%-CI)	
	post 2 h	post 24 h
Kerzen		
crude model	2 (-1; 6)	1 (-3; 4)
full model	-13 (-28;2)	-14 (-29;1)
Toasten		
crude model	3 (-1; 7)	1 (-3; 5)
full model	-8 (-22;6)	-9 (-23;5)
Braten		
crude model	0 (-5; 6)	1 (-4; 7)
full model	-8 (-18; 3)	-5 (-17; 7)
	Anzahl [pro 10000 Partikel/cm³]	
	PNC < 100 nm	
	Mean (95%-CI)	
	post 2 h	post 24 h
Kerzen		
crude model	0 (0; 1)	0 (0; 1)
full model	1 (-2; 4)	1 (-2; 4)
Toasten		
crude model	1 (0; 2)	0 (0; 1)
full model	1 (-4; 6)	1 (-4; 6)
Braten		
crude model	1 (-3; 4)	1 (-3; 4)
full model	-7 (-18; 5)	-5 (-17; 6)
	PMC [pro 10 µg/m³]	
	PM₁₀	
	Mean (95%-CI)	
	post 2 h	post 24 h
Kerzen		
crude model	9 (-7; 25)	-3 (-19; 13)
full model	-23 (-70; 24)	-37 (-84; 10)
Toasten		
crude model	1 (-3; 5)	0 (-4; 4)
full model	1 (-3; 5)	0 (-14; 14)
Braten		
crude model	0 (-6; 6)	2 (-4; 8)
full model	-11 (-21;-1)	-8 (-20; 4)

	MEF ₂₅₋₇₅ [ml/s]	
	PMC [pro 10 µg/m ³]	
	PM _{2,5}	
	Mean (95%-CI)	
Kerzen	post 2 h	post 24 h
crude model	10 (-6; 26)	2 (-18; 14)
full model	-26 (-75; 23)	-39 (-88; 10)
Toasten	post 2 h	post 24 h
crude model	5 (-5; 15)	0 (-10; 10)
full model	1 (-11; 13)	-6 (-30; 18)
Braten	post 2 h	post 24 h
crude model	-1 (-9; 7)	1 (-7; 9)
full model	-23 (-37;-9)	-20 (-36;-4)
	PMC [pro 10 µg/m ³]	
	PM ₁	
	Mean (95%-CI)	
Kerzen	post 2 h	post 24 h
crude model	10 (-6; 26)	-2 (-20; 16)
full model	-31 (-84; 22)	-45 (-100; 10)
Toasten	post 2 h	post 24 h
crude model	11 (-7; 29)	2 (-16; 20)
full model	-14 (-49; 21)	-22 (-57; 13)
Braten	post 2 h	post 24 h
crude model	0 (-8; 8)	2 (-8; 12)
full model	-22 (-38;-6)	-19 (-39;1)

crude model = unadjustiertes Modell; full model = adjustiert für Expositionsquelle, Alter, Geschlecht, Größe, Temperatur im Versuchsraum, relative Luftfeuchtigkeit im Versuchsraum, Verkehrsmittel, Anfahrtszeit

5.2.2.3 Blutwerte – systemische Entzündung und Hämatologie

Im Blut wurden zum einen Blutbestandteile und Marker für systemische Entzündung und oxidativen Stress bestimmt. Zu den bestimmten Blutbestandteilen gehören Leukozyten (mit Aufteilung nach Lymphozyten, eosinophilen, basophilen und neutrophilen Granulozyten), Monozyten, Thrombozyten, Erythrozyten, Hämoglobin und Hämatokrit. Als Marker für systemische Entzündung wurde IL-8 und als Marker für oxidativen Stress wurden die Trolox-äquivalente antioxidative Kapazität (TEAC) und Harnsäure (UrAc) bestimmt.

Blutbestandteile

Für die Anzahl der Leukozyten, Erythrozyten und Thrombozyten sind keine Veränderungen zu beobachten (detaillierte Ergebnisse im Anhang). Auch im Differenzialblutbild zeigten sich keine konsistenten Veränderungen der Zellzusammensetzung. Beispielhaft sind im Folgenden die Ergebnisse für Lymphozyten und Erythrozyten gezeigt (Abbildung 154, Abbildung 155, Tabelle 34, Tabelle 35).

Abbildung 154: Differenz der Differenz der Lymphozyten [tsd/ μ L] zur post-24-Stunden-Messung zu unterschiedlichen Innenraumbelastungen und unterschiedlichen Belastungsniveaus im Vergleich zur Raumluft

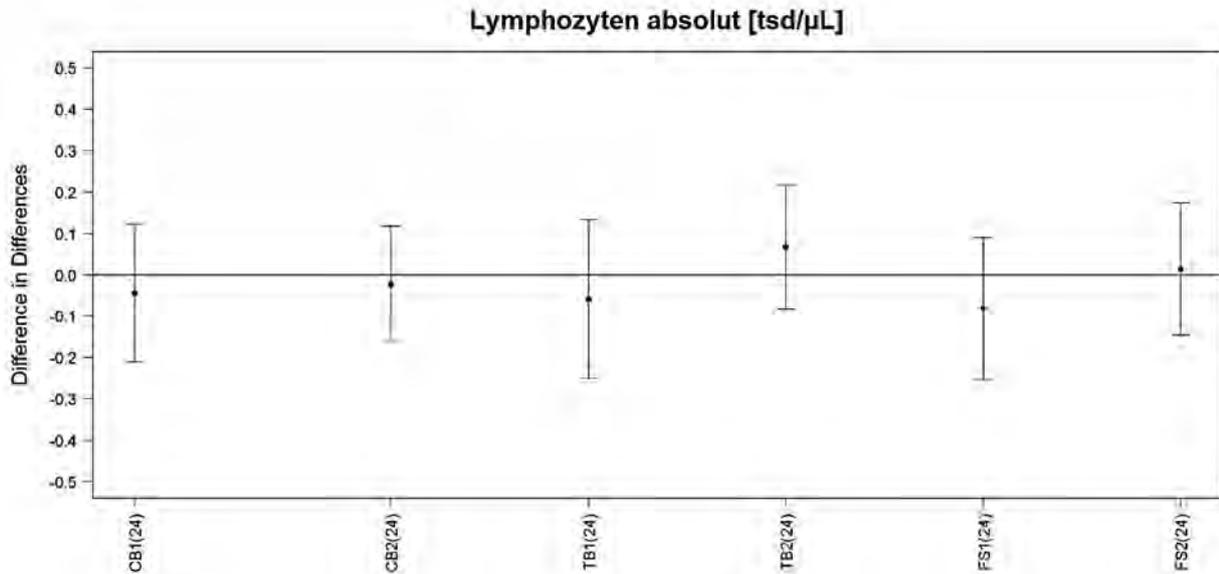


Abbildung 155: Differenz der Differenz der Erythrozyten [mill/ μ L] zur post-24-Stunden-Messung zu unterschiedlichen Innenraumbelastungen und unterschiedlichen Belastungsniveaus im Vergleich zur Raumluft

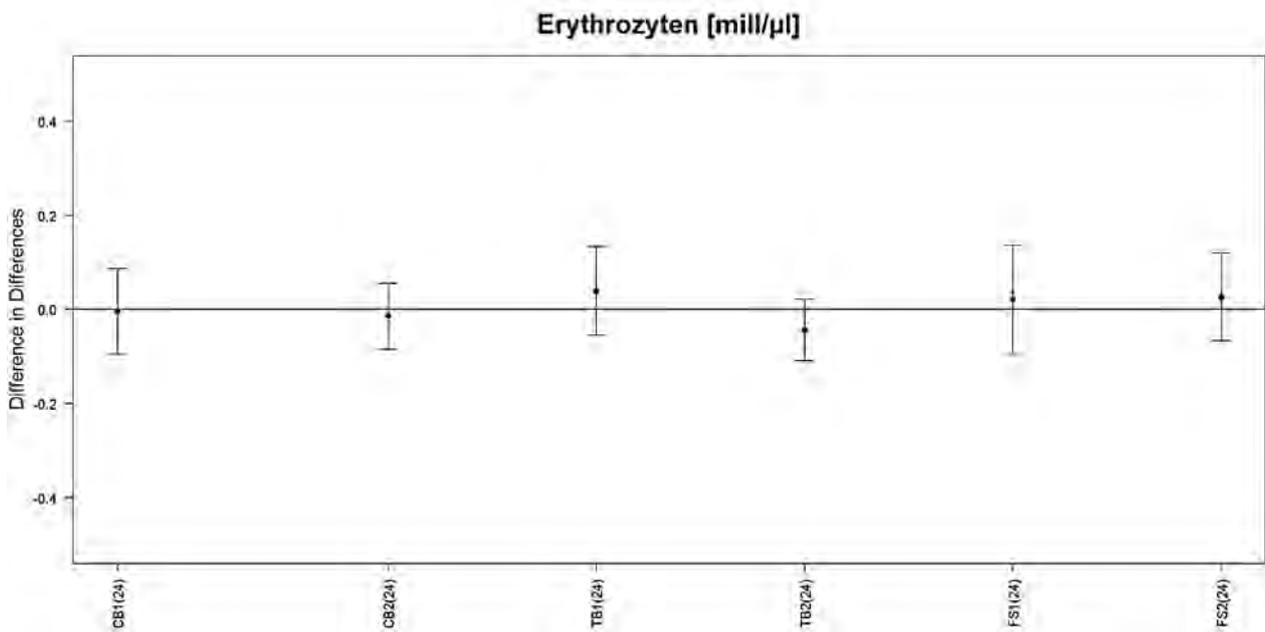


Tabelle 34: Veränderung der Lymphozyten[tsd/ μ l]: Mittelwert (Mean) und 95%- Konfidenzintervall (95%- CI)

	Lymphozyten [tsd/ μ l]	
	Oberflächenkonzentration [pro 100 μ m ² /cm ³]	Anzahl [pro 10000 Partikel/cm ³]
	PSC Mean (95%-CI)	PNC < 100 nm Mean (95%-CI)
Kerzen	post 24 h	post 24 h
crude model	-0.001 (-0.005; 0.002)	0 (-0.001; 0)
full model	0.005 (-0.018; 0.028)	0.001 (-0.004; 0.005)
Toasten		
crude model	0.001 (-0.003; 0.005)	0 (-0.001; 0.001)
full model	0.004 (-0.016; 0.025)	0.004 (-0.004; 0.011)
Braten		
crude model	0 (-0.004; 0.003)	0 (-0.002; 0.002)
full model	-0.002 (-0.012; 0.008)	0.002 (-0.009; 0.012)
	PMC [pro 10 μ g/m ³]	
	PM ₁₀ Mean (95%-CI)	PM _{2.5} Mean (95%-CI)
Kerzen	post 24 h	post 24 h
crude model	-0.001 (-0.019; 0.017)	-0.001 (-0.019; 0.017)
full model	0.059 (-0.002; 0.12)	0.066 (0.001; 0.131)
Toasten	post 24 h	post 24 h
crude model	0 (-0.004; 0.004)	0.002 (-0.008; 0.012)
full model	-0.009 (-0.025; 0.007)	-0.01 (-0.053; 0.033)
Braten	post 24 h	post 24 h
crude model	-0.001 (-0.005; 0.003)	-0.001 (-0.007; 0.005)
full model	-0.004 (-0.014; 0.006)	-0.005 (-0.019; 0.009)

	Lymphozyten [tsd/ μ l]
	PMC [pro 10 μ g/m ³]
	PM ₁ Mean (95%-CI)
Kerzen	post 24 h
crude model	-0.001 (-0.019; 0.017)
full model	0.069 (-0.004; 0.142)
Toasten	post 24 h
crude model	0.011 (-0.009; 0.031)
full model	0.026 (-0.047; 0.099)
Braten	post 24 h
crude model	0 (-0.006; 0.006)
full model	-0.006 (-0.024; 0.012)

crude model = unadjustiertes Modell; full model = adjustiert für Expositionsquelle, Alter, Geschlecht, Größe, Temperatur im Versuchsraum, relative Luftfeuchtigkeit im Versuchsraum, Verkehrsmittel, Anfahrtszeit

Tabelle 35: Veränderung der Erythrozyten [mill/μl]: Mittelwert (Mean) und 95%- Konfidenzintervall (95%- CI)

	Erythrozyten [mill/μl]	
	Oberflächenkonzentration [pro 100 μm ² /cm ³]	Anzahl [pro 10000 Partikel/cm ³]
	PSC Mean (95%-CI)	PNC < 100 nm Mean (95%-CI)
Kerzen	post 24 h	
crude model	0 (-0.001; 0.002)	0 (0; 0)
full model	0.015 (0.003; 0.027)	0.001 (-0.001; 0.004)
Toasten	post 24 h	
crude model	0 (-0.002; 0.002)	0 (-0.001; 0.001)
full model	0.007 (-0.005; 0.02)	0.002 (-0.003; 0.006)
Braten	post 24 h	
crude model	0.001 (-0.001; 0.003)	0 (-0.001; 0.002)
full model	-0.001 (-0.007; 0.005)	-0.004 (-0.01; 0.002)

	Erythrozyten [mill/μl]	
	PMC [pro 10 μg/m ³]	
	PM ₁₀ Mean (95%-CI)	PM _{2,5} Mean (95%-CI)
Kerzen	post 24 h	
crude model	0.005 (-0.005; 0.015)	0.005 (-0.005; 0.015)
full model	0.025 (-0.006; 0.056)	0.023 (-0.01; 0.056)
Toasten	post 24 h	
crude model	0 (-0.002; 0.002)	0 (-0.006; 0.006)
full model	0.003 (-0.007; 0.013)	0.016 (-0.011; 0.043)
Braten	post 24 h	
crude model	0.002 (0; 0.004)	0.002 (-0.002; 0.006)
full model	0.001 (-0.005; 0.007)	0 (-0.008; 0.008)
	PM ₁ Mean (95%-CI)	
Kerzen	post 24 h	
crude model	0.004 (-0.006; 0.014)	
full model	0.022 (-0.015; 0.059)	
Toasten	post 24 h	
crude model	0.002 (-0.01; 0.014)	
full model	0.037 (-0.008; 0.082)	
Braten	post 24 h	
crude model	0.002 (-0.002; 0.006)	
full model	0 (-0.01; 0.01)	

crude model = unadjustiertes Modell; full model = adjustiert für Expositionsquelle, Alter, Geschlecht, Größe, Temperatur im Versuchsraum, relative Luftfeuchtigkeit im Versuchsraum, Verkehrsmittel, Anfahrtszeit

Entzündungsmarker und Marker für oxidativen Stress

5.2.2.3.1.1 Interleukin-8

Die Blutproben für die Bestimmung des IL-8 wurden vor, 2 h und 24 h nach der Exposition genommen und die Mittelwerte bewegen sich zwischen den verschiedenen Zeitpunkten und Expositionen von 3.6 bis 7.4 pg/ml (siehe Anhang). Im Mittelwertvergleich sieht man keine Veränderung für IL-8, außer einem statistisch nicht signifikantem Anstieg für die Messung 2 h nach der Exposition bei Braten Level 2 (Abbildung 156).

In der Regressionsanalyse kommt es bei mehreren Expositionen (Kerzen und Braten), mehreren Partikelmetriken und beiden Zeitpunkten zu einem Anstieg der IL-8 Konzentration (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Bei dem IL-8 Anstieg durch Kerzenstäube spielt vor allem die Partikelmasse eine Rolle, während für den Anstieg beim Braten die Partikelanzahl die entscheidende Metrik ist. Für Toasten sind keine Veränderungen zu beobachten.

5.2.2.3.1.2 Marker für oxidativen Stress

Die Werte für TEAC und Harnsäure wurden vor, 2 h und 24 h nach der Exposition gemessen. Die Werte bewegen sich zwischen den verschiedenen Zeitpunkten und Expositionen von 460 bis 519 μM für TEAC, von 240 bis 283 μM für Harnsäure und 221 bis 246 μM für TEAC-Harnsäure (siehe Anhang).

Im Mittelwertvergleich sieht man für TEAC eine Erniedrigung für Level 2 von Toasten und Braten 2h nach der Exposition, die für Braten statistisch signifikant ist. Für Harnsäure sieht man statistisch signifikant erniedrigte Werte für Level 2 von Toasten und Braten ebenfalls 2 Stunden nach der Exposition. Dagegen sieht man 24 h nach der Exposition erhöhte Werte für Level 2 von Kerzen und Braten (statistisch signifikant für Braten). Bei TEAC minus Harnsäure, d.h. der antioxidativen Kapazität, die nicht auf die Harnsäure zurückzuführen ist, sind keine signifikanten Änderungen zu sehen (Abbildung 157, Abbildung 158, Abbildung 159).

In der Regressionsanalyse sieht man nach Toastexposition für höhere Partikeloberflächenkonzentrationen sowohl bei TEAC als auch bei der Harnsäure einen meist statistisch signifikanten Anstieg bei der 2 h und 24 h Messung (Tabelle 36, Tabelle 37, Tabelle 38). Ferner sieht man bei beiden Markern einen Anstieg für die Partikelmassenkonzentration von PM1 bei der 2 h und 24 h Messung, der bei letzterer statistisch signifikant ist. Für TEAC minus Harnsäure zeigen sich keine derartigen Effekte (Tabelle 39). Für die anderen beiden Expositionen sind keine signifikanten Effekte im adjustierten Modell zu beobachten.

Abbildung 156: Differenz der Differenz der Interleukin-8-Bestimmung im Plasma [pg/ml] zu 2 Messzeitpunkten zu unterschiedlichen Innenraumbelastungen und unterschiedlichen Belastungsniveaus im Vergleich zur Raumluft

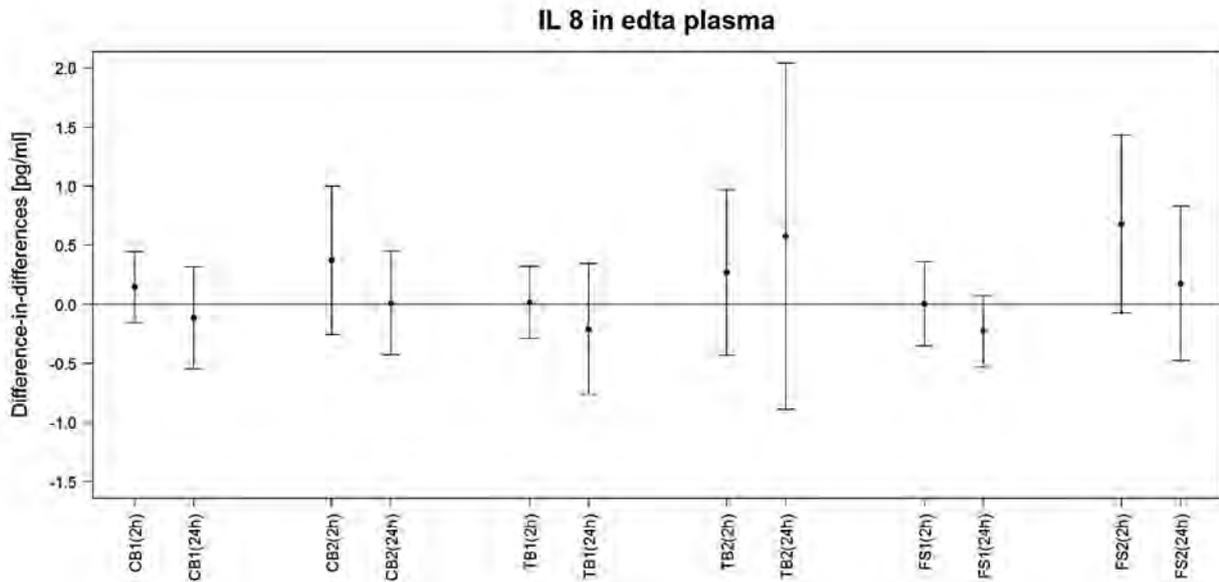


Abbildung 157: Differenz der Differenz der TEAC [μ M] zu 2 Messzeitpunkten zu unterschiedlichen Innenraumbelastungen und unterschiedlichen Belastungsniveaus im Vergleich zur Raumluft

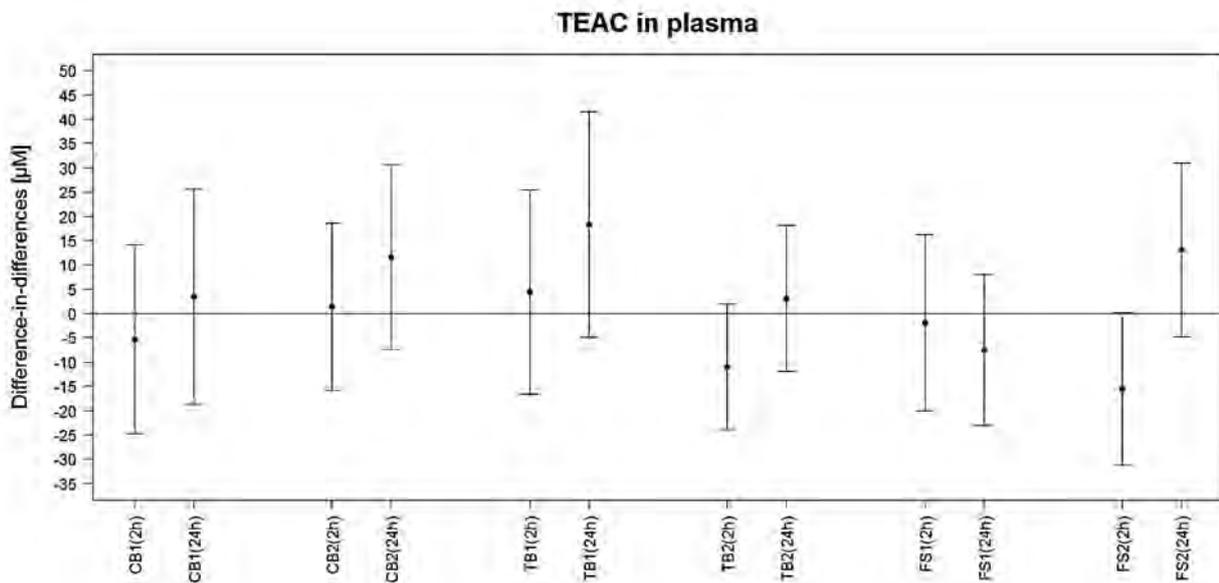


Abbildung 158: Differenz der Differenz der Harnsäure (UrAc) [μM] zu 2 Messzeitpunkten zu unterschiedlichen Innenraumbelastungen und unterschiedlichen Belastungsniveaus im Vergleich zur Raumluft

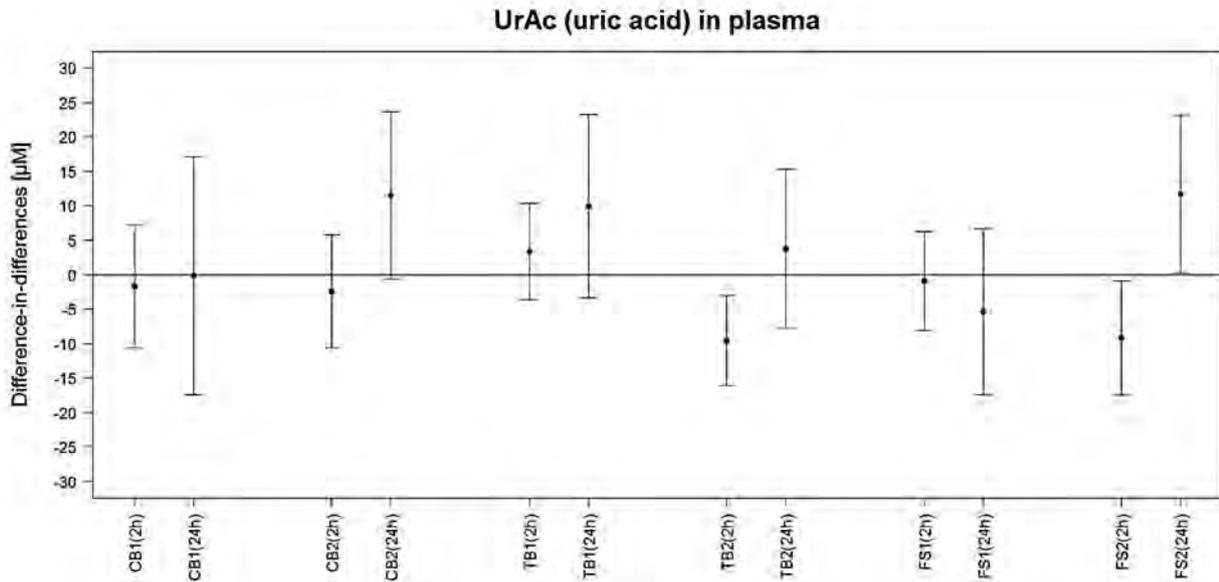


Abbildung 159: Differenz der Differenz für TEAC minus Harnsäure (UrAc) [μM] zu 2 Messzeitpunkten zu unterschiedlichen Innenraumbelastungen und unterschiedlichen Belastungsniveaus im Vergleich zur Raumluft

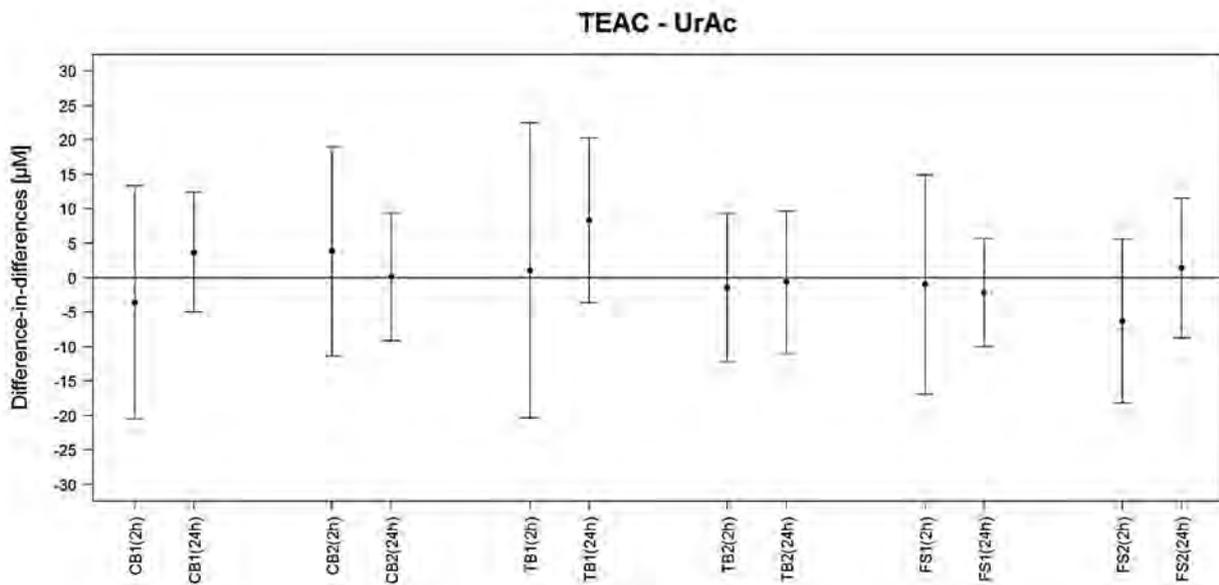


Tabelle 36 Veränderung der Interleukin 8 aus Plasma [pg/ml]: Mittelwert (Mean) und 95%- Konfidenzintervall (95%- CI)

Interleukin 8 im Plasma [pg/ml]		
Oberflächenkonzentration [pro 100 µm ² /cm ³]		
PSC		
Mean (95%-CI)		
	post 2 h	post 24 h
Kerzen		
crude model	0.011 (0.001; 0.021)	-0.001 (-0.011; 0.009)
full model	0.053 (-0.006; 0.111)	0.038 (-0.021; 0.097)
Toasten		
crude model	0.008 (-0.011; 0.028)	0.014 (-0.005; 0.034)
full model	0.023 (-0.071; 0.116)	0.026 (-0.067; 0.119)
Braten		
crude model	0.017 (0.004; 0.031)	0.002 (-0.01; 0.015)
full model	0.03 (-0.003; 0.063)	0.016 (-0.019; 0.05)
Anzahl [pro 10000 Partikel/cm ³]		
PNC < 100 nm		
Mean (95%-CI)		
	post 2 h	post 24 h
Kerzen		
crude model	0.001 (0; 0.003)	0 (-0.002; 0.001)
full model	-0.017 (-0.027; -0.007)	-0.019 (-0.029; -0.009)
Toasten		
crude model	0.002 (-0.003; 0.007)	0.003 (-0.002; 0.008)
full model	-0.004 (-0.037; 0.029)	-0.004 (-0.037; 0.03)
Braten		
crude model	0.011 (0.004; 0.019)	0.002 (-0.006; 0.01)
full model	0.059 (0.026; 0.092)	0.05 (0.017; 0.083)
PMC [pro 10 µg/m ³]		
PM ₁₀		
Mean (95%-CI)		
	post 2 h	post 24 h
Kerzen		
crude model	0.091 (0.038; 0.144)	0.03 (-0.023; 0.083)
full model	0.269 (0.104; 0.434)	0.204 (0.039; 0.369)
Toasten		
crude model	-0.004 (-0.022; 0.014)	-0.001 (-0.019; 0.017)
full model	-0.004 (-0.024; 0.016)	-0.054 (-0.14; 0.032)
Braten		
crude model	0.015 (-0.003; 0.033)	0.002 (-0.014; 0.018)
full model	-0.002 (-0.033; 0.029)	-0.015 (-0.05; 0.02)

Interleukin 8 im Plasma [pg/ml]		
PMC [pro 10 µg/m³]		
PM _{2,5}		
Mean (95%-CI)		
	post 2 h	post 24 h
Kerzen		
crude model	0.092 (0.037; 0.147)	0.03 (-0.023; 0.083)
full model	0.287 (0.115; 0.459)	0.22 (0.046; 0.394)
Toasten		
crude model	-0.002 (-0.057; 0.053)	0.015 (-0.04; 0.07)
full model	-0.016 (-0.089; 0.057)	-0.025 (-0.186; 0.136)
Braten		
crude model	0.024 (0.002; 0.046)	0.005 (-0.017; 0.027)
full model	0.013 (-0.032; 0.058)	-0.008 (-0.057; 0.041)
PMC [pro 10 µg/m³]		
PM ₁		
Mean (95%-CI)		
	post 2 h	post 24 h
Kerzen		
crude model	0.089 (0.034; 0.144)	0.026 (-0.029; 0.081)
full model	0.322 (0.13; 0.514)	0.252 (0.058; 0.446)
Toasten		
crude model	0.038 (-0.068; 0.144)	0.091 (-0.015; 0.197)
full model	0.126 (-0.209; 0.461)	0.164 (-0.165; 0.493)
Braten		
crude model	0.028 (0.003; 0.053)	0.006 (-0.018; 0.03)
full model	0.024 (-0.029; 0.077)	0.001 (-0.058; 0.06)

crude model = unadjustiertes Modell; full model = adjustiert für Expositionsquelle, Alter, Geschlecht, Größe, Temperatur im Versuchsraum, relative Luftfeuchtigkeit im Versuchsraum, Verkehrsmittel, Anfahrtszeit

Tabelle 37: Veränderung der TEAC im Plasma [μM]: Mittelwert (Mean) und 95%- Konfidenzintervall (95%- CI)

TEAC im Plasma [μM]		
Oberflächenkonzentration [pro 100 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$]		
PSC		
Mean (95%-CI)		
	post 2 h	post 24 h
Kerzen		
crude model	-0.027 (-0.505; 0.452)	0.232 (-0.236; 0.699)
full model	-0.852 (-2.841; 1.136)	-0.52 (-2.511; 1.47)
Toasten		
crude model	-0.094 (-0.491; 0.303)	0.049 (-0.343; 0.442)
full model	1.664 (-0.204; 3.532)	1.851 (0.002; 3.7)
Braten		
crude model	-0.342 (-0.754; 0.07)	0.143 (-0.245; 0.531)
full model	-0.509 (-1.387; 0.369)	-0.007 (-0.917; 0.903)
Anzahl [pro 10000 Partikel/ cm^3]		
PNC < 100 nm		
Mean (95%-CI)		
	post 2 h	post 24 h
Kerzen		
crude model	-0.005 (-0.072; 0.062)	0.027 (-0.038; 0.092)
full model	-0.229 (-0.605; 0.148)	-0.193 (-0.571; 0.185)
Toasten		
crude model	-0.023 (-0.119; 0.073)	0.021 (-0.073; 0.115)
full model	0.306 (-0.322; 0.933)	0.361 (-0.267; 0.99)
Braten		
crude model	-0.198 (-0.443; 0.048)	0.111 (-0.126; 0.348)
full model	0.243 (-0.626; 1.112)	0.574 (-0.286; 1.435)
PMC [pro 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$]		
PM ₁₀		
Mean (95%-CI)		
	post 2 h	post 24 h
Kerzen		
crude model	0.303 (-2.321; 2.927)	1.74 (-0.843; 4.323)
full model	-0.345 (-6.586; 5.896)	1.647 (-4.635; 7.929)
Toasten		
crude model	-0.041 (-0.4; 0.318)	0.027 (-0.332; 0.386)
full model	-0.062 (-0.45; 0.326)	0.002 (-1.68; 1.684)
Braten		
crude model	-0.276 (-0.784; 0.232)	0.254 (-0.224; 0.732)
full model	-0.573 (-1.392; 0.246)	-0.209 (-1.109; 0.691)

TEAC im Plasma [μM]		
PMC [pro 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$]		
PM _{2,5}		
Mean (95%-CI)		
	post 2 h	post 24 h
Kerzen		
crude model	0.351 (-2.336; 3.038)	1.703 (-0.941; 4.347)
full model	-0.697 (-7.269; 5.875)	1.215 (-5.406; 7.836)
Toasten		
crude model	-0.159 (-1.311; 0.993)	0.111 (-1.038; 1.26)
full model	-0.036 (-1.441; 1.369)	1.098 (-1.93; 4.126)
Braten		
crude model	-0.411 (-1.085; 0.263)	0.219 (-0.408; 0.846)
full model	-0.982 (-2.178; 0.214)	-0.402 (-1.682; 0.878)
PMC [pro 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$]		
PM ₁		
Mean (95%-CI)		
	post 2 h	post 24 h
Kerzen		
crude model	0.405 (-2.325; 3.135)	1.545 (-1.14; 4.23)
full model	-1.246 (-8.569; 6.077)	0.474 (-6.888; 7.836)
Toasten		
crude model	-0.304 (-2.442; 1.834)	0.164 (-1.957; 2.285)
full model	5.948 (-0.777; 12.673)	6.922 (0.358; 13.486)
Braten		
crude model	-0.471 (-1.233; 0.291)	0.214 (-0.486; 0.914)
full model	-1.178 (-2.577; 0.221)	-0.462 (-1.969; 1.045)

crude model = unadjustiertes Modell; full model = adjustiert für Expositionsquelle, Alter, Geschlecht, Größe, Temperatur im Versuchsraum, relative Luftfeuchtigkeit im Versuchsraum, Verkehrsmittel, Anfahrtszeit

Tabelle 38: Veränderung der Harnsäure im Plasma [μM]: Mittelwert (Mean) und 95%- Konfidenzintervall (95%- CI)

Harnsäure im Plasma [μM]		
Oberflächenkonzentration [pro 100 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$]		
PSC		
Mean (95%-CI)		
	post 2 h	post 24 h
Kerzen		
crude model	-0.095 (-0.374; 0.185)	0.217 (-0.056; 0.49)
full model	-0.388 (-1.543; 0.767)	-0.008 (-1.165; 1.149)
Toasten		
crude model	-0.196 (-0.418; 0.026)	0.084 (-0.135; 0.303)
full model	1.254 (0.242; 2.265)	1.554 (0.553; 2.555)
Braten		
crude model	-0.28 (-0.535; -0.025)	0.232 (-0.008; 0.472)
full model	-0.214 (-0.78; 0.353)	0.359 (-0.228; 0.946)
Anzahl [pro 10000 Partikel/ cm^3]		
PNC < 100 nm		
Mean (95%-CI)		
	post 2 h	post 24 h
Kerzen		
crude model	-0.014 (-0.053; 0.025)	0.025 (-0.013; 0.063)
full model	-0.15 (-0.369; 0.069)	-0.105 (-0.326; 0.115)
Toasten		
crude model	-0.046 (-0.1; 0.007)	0.024 (-0.029; 0.077)
full model	0.19 (-0.153; 0.534)	0.267 (-0.077; 0.611)
Braten		
crude model	-0.182 (-0.334; -0.031)	0.145 (-0.001; 0.291)
full model	-0.052 (-0.607; 0.504)	0.309 (-0.241; 0.86)
PMC [pro 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$]		
PM ₁₀		
Mean (95%-CI)		
	post 2 h	post 24 h
Kerzen		
crude model	-0.287 (-1.81; 1.236)	1.567 (0.068; 3.066)
full model	0.501 (-3.021; 4.023)	2.854 (-0.688; 6.396)
Toasten		
crude model	-0.048 (-0.25; 0.154)	0.038 (-0.164; 0.24)
full model	-0.058 (-0.266; 0.15)	0.221 (-0.686; 1.128)
Braten		
crude model	-0.197 (-0.516; 0.122)	0.298 (-0.002; 0.598)
full model	-0.153 (-0.686; 0.38)	0.371 (-0.215; 0.957)

Harnsäure im Plasma [μM]		
PMC [pro 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$]		
PM _{2,5}		
Mean (95%-CI)		
	post 2 h	post 24 h
Kerzen		
crude model	-0.278 (-1.836; 1.28)	1.605 (0.072; 3.138)
full model	0.467 (-3.241; 4.175)	2.872 (-0.86; 6.604)
Toasten		
crude model	-0.321 (-0.968; 0.326)	0.138 (-0.505; 0.781)
full model	-0.098 (-0.853; 0.657)	1.279 (-0.34; 2.898)
Braten		
crude model	-0.321 (-0.744; 0.102)	0.342 (-0.05; 0.734)
full model	-0.363 (-1.141; 0.415)	0.406 (-0.427; 1.239)
PMC [pro 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$]		
PM ₁		
Mean (95%-CI)		
	post 2 h	post 24 h
Kerzen		
crude model	-0.3 (-1.886; 1.286)	1.522 (-0.036; 3.08)
full model	-0.313 (-4.458; 3.832)	2.066 (-2.099; 6.231)
Toasten		
crude model	-0.968 (-2.152; 0.216)	0.205 (-0.969; 1.379)
full model	3.626 (-0.073; 7.325)	5.125 (1.517; 8.733)
Braten		
crude model	-0.384 (-0.86; 0.092)	0.383 (-0.054; 0.82)
full model	-0.439 (-1.348; 0.47)	0.513 (-0.467; 1.493)

crude model = unadjustiertes Modell; full model = adjustiert für Expositionsquelle, Alter, Geschlecht, Größe, Temperatur im Versuchsraum, relative Luftfeuchtigkeit im Versuchsraum, Verkehrsmittel, Anfahrtszeit

Tabelle 39: Veränderung der TEAC minus Harnsäure [μM]: Mittelwert (Mean) und 95%- Konfidenzintervall (95%- CI)

TEAC minus Harnsäure [μM]		
Oberflächenkonzentration [pro 100 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$]		
PSC		
Mean (95%-CI)		
	post 2 h	post 24 h
Kerzen		
crude model	0.071 (-0.28; 0.421)	0.016 (-0.326; 0.359)
full model	-0.504 (-2.074; 1.066)	-0.558 (-2.126; 1.009)
Toasten		
crude model	0.1 (-0.208; 0.407)	-0.035 (-0.339; 0.269)
full model	0.413 (-1.11; 1.937)	0.296 (-1.213; 1.805)
Braten		
crude model	-0.058 (-0.337; 0.222)	-0.084 (-0.347; 0.18)
full model	-0.284 (-0.894; 0.326)	-0.354 (-0.986; 0.279)
Anzahl [pro 10000 Partikel/ cm^3]		
PNC < 100 nm		
Mean (95%-CI)		
	post 2 h	post 24 h
Kerzen		
crude model	0.01 (-0.04; 0.059)	0.003 (-0.045; 0.051)
full model	-0.08 (-0.375; 0.215)	-0.09 (-0.387; 0.207)
Toasten		
crude model	0.023 (-0.051; 0.098)	-0.003 (-0.076; 0.071)
full model	0.114 (-0.393; 0.621)	0.092 (-0.416; 0.6)
Braten		
crude model	-0.013 (-0.18; 0.154)	-0.031 (-0.193; 0.13)
full model	0.275 (-0.331; 0.882)	0.246 (-0.355; 0.847)
PMC [pro 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$]		
PM ₁₀		
Mean (95%-CI)		
	post 2 h	post 24 h
Kerzen		
crude model	0.593 (-1.383; 2.569)	0.178 (-1.766; 2.122)
full model	-1.264 (-6.211; 3.683)	-1.717 (-6.674; 3.24)
Toasten		
crude model	-0.003 (-0.279; 0.273)	-0.019 (-0.295; 0.257)
full model	-0.014 (-0.328; 0.3)	-0.275 (-1.635; 1.085)
Braten		
crude model	-0.072 (-0.423; 0.279)	-0.041 (-0.372; 0.29)
full model	-0.417 (-0.987; 0.153)	-0.578 (-1.205; 0.049)

TEAC minus Harnsäure [μM]		
PMC [pro 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$]		
PM _{2,5}		
Mean (95%-CI)		
	post 2 h	post 24 h
Kerzen		
crude model	0.632 (-1.389; 2.653)	0.103 (-1.886; 2.092)
full model	-1.607 (-6.807; 3.593)	-2.192 (-7.408; 3.024)
Toasten		
crude model	0.119 (-0.771; 1.009)	-0.06 (-0.948; 0.828)
full model	0.016 (-1.121; 1.153)	-0.308 (-2.766; 2.15)
Braten		
crude model	-0.081 (-0.547; 0.385)	-0.119 (-0.552; 0.314)
full model	-0.62 (-1.455; 0.215)	-0.809 (-1.703; 0.085)
PMC [pro 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$]		
PM ₁		
Mean (95%-CI)		
	post 2 h	post 24 h
Kerzen		
crude model	0.709 (-1.343; 2.761)	0.029 (-1.988; 2.046)
full model	-1.376 (-7.168; 4.416)	-2.119 (-7.919; 3.681)
Toasten		
crude model	0.586 (-1.062; 2.234)	-0.084 (-1.719; 1.551)
full model	2.073 (-3.356; 7.502)	1.543 (-3.759; 6.845)
Braten		
crude model	-0.08 (-0.605; 0.445)	-0.167 (-0.651; 0.317)
full model	-0.742 (-1.718; 0.234)	-0.98 (-2.034; 0.074)

crude model = unadjustiertes Modell; full model = adjustiert für Expositionsquelle, Alter, Geschlecht, Größe, Temperatur im Versuchsraum, relative Luftfeuchtigkeit im Versuchsraum, Verkehrsmittel, Anfahrtszeit

5.2.2.4 Blutdruck

Der Blutdruck wurde während, direkt nach, sowie 2 h, 4 h und 24 h nach der Exposition gemessen. Die Mittelwerte für den systolischen Blutdruck bewegen sich zwischen den verschiedenen Zeitpunkten und Expositionen von 112 bis 121 mmHg (siehe Anhang).

Im Mittelwertvergleich, zeigt sich für Kerzen Level 2 eine Tendenz für eine Erhöhung des systolischen Blutdrucks nach 2 Stunden (Abbildung 160). Für Toasten Level 2 zeigt sich eine statistisch signifikante Erhöhung 2 h und 4 h nach der Exposition für systolischen Blutdruck. Für Braten zeigen sich keine signifikanten Änderungen (Abbildung 160).

In der Regressionsanalyse zeigt der systolische Blutdruck einen deutlichen Anstieg in Zusammenhang mit einem Anstieg in der Partikelmasse für Kerzen zu allen Zeitpunkten, insbesondere 2 h und 4 h nach der Exposition. Für die Partikeloberfläche und Partikelanzahl ist dieser Effekt nicht zu beobachten (Tabelle 40).

Beim Toasten sind nach der Adjustierung für Störgrößen keine Änderungen mehr zu sehen. Beim Braten ist ein Abfall des systolischen Blutdrucks mit steigender Partikelmasse und -oberfläche zu sehen, der jedoch kleiner ist als der Anstieg, der bei Kerzen beobachtet wurde (Tabelle 40).

Das Muster für den diastolischen Blutdruck ist ähnlich, aber die Veränderungen sind kleiner und nicht statistisch signifikant (siehe Anhang). Beim Toasten sieht man nach der Adjustierung einen kleinen Abfall mit

steigenden Oberflächen- und Anzahlkonzentration und einen etwas stärkeren Abfall für die Massenkonzentration von PM_{10} (bis zu $0.7\text{mmHg}/10\mu\text{m}/\text{m}^3$).

Die Sensitivitätsanalyse, die die PM_{10} Massenkonzentration in der Außenluft berücksichtigte (siehe Anhang), ergab ähnliche Ergebnisse wie die hier gezeigten Analysen.

Abbildung 160: Differenz der Differenz des systolischen Blutdrucks [mmHg] zu allen 5 Messzeitpunkten zu unterschiedlichen Innenraumbelastungen und unterschiedlichen Belastungsniveaus im Vergleich zur Raumluft

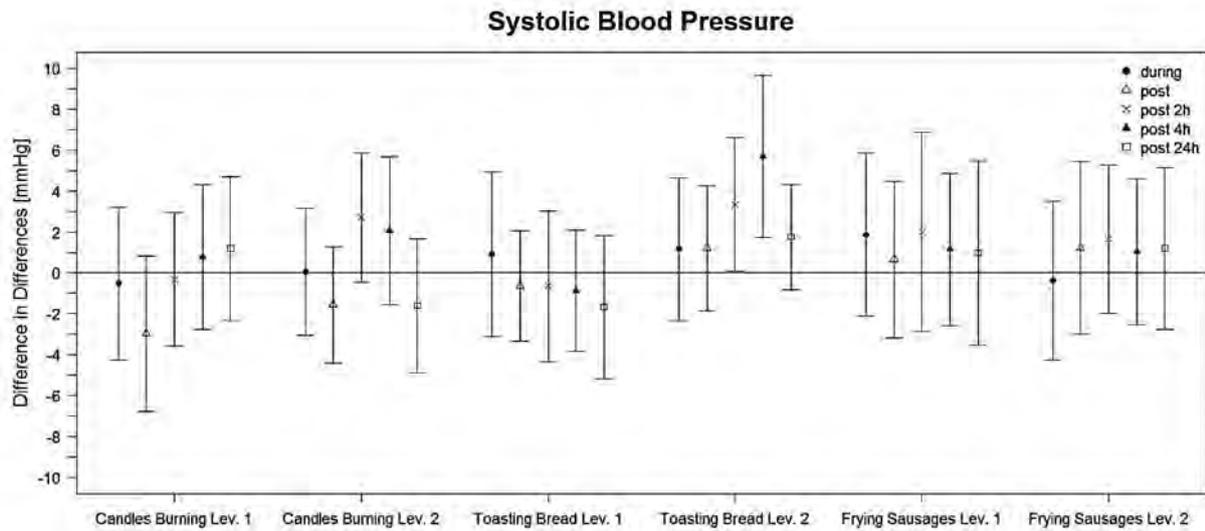


Tabelle 40: Veränderung des Blutdrucks (Systole): Mittelwert (Mean) und 95%- Konfidenzintervall (95%- CI)

systolischer Blutdruck [mmHg]					
Oberflächenkonzentration [pro 100 µm ² /cm ³]					
PSC					
Mean (95%-CI)					
	during	post	post 2 h	post 4 h	post 24 h
Kerzen					
crude model	-0.016 (-0.092; 0.060)	-0.052 (-0.128; 0.024)	0.063 (-0.013; 0.139)	0.064 (-0.012; 0.140)	0.064 (-0.012; 0.140)
full model	-0.059 (-0.305; 0.187)	-0.105 (-0.351; 0.141)	0.024 (-0.222; 0.270)	0.031 (-0.215; 0.277)	-0.052 (-0.301; 0.196)
Toasten					
crude model	0.024 (-0.061; 0.108)	0.017 (-0.067; 0.102)	0.092 (0.008; 0.177)	0.157 (0.072; 0.242)	0.157 (0.072; 0.242)
full model	0.036 (-0.200; 0.272)	0.016 (-0.220; 0.252)	0.076 (-0.161; 0.312)	0.154 (-0.082; 0.390)	0.034 (-0.200; 0.268)
Braten					
crude model	-0.026 (-0.113; 0.062)	0.008 (-0.079; 0.096)	0.067 (-0.021; 0.154)	0.028 (-0.060; 0.115)	0.028 (-0.060; 0.115)
full model	-0.178 (-0.317; -0.039)	-0.142 (-0.282; -0.003)	-0.077 (-0.216; 0.062)	-0.116 (-0.255; 0.023)	-0.147 (-0.302; 0.007)
Anzahl [pro 10000 Partikel/cm ³]					
PNC < 100 nm					
Mean (95%-CI)					
	during	post	post 2 h	post 4 h	post 24 h
Kerzen					
crude model	-0.002 (-0.013; 0.009)	-0.008 (-0.018; 0.003)	0.008 (-0.003; 0.018)	0.008 (-0.002; 0.019)	0.008 (-0.002; 0.019)
full model	0.001 (-0.045; 0.047)	-0.007 (-0.052; 0.039)	0.011 (-0.035; 0.057)	0.013 (-0.033; 0.059)	0.005 (-0.042; 0.051)
Toasten					
crude model	0.006 (-0.015; 0.027)	0.004 (-0.016; 0.025)	0.017 (-0.003; 0.038)	0.033 (0.012; 0.053)	0.033 (0.012; 0.053)
full model	-0.052 (-0.141; 0.038)	-0.055 (-0.144; 0.034)	-0.046 (-0.135; 0.043)	-0.028 (-0.117; 0.061)	-0.053 (-0.142; 0.037)
Braten					
crude model	-0.009 (-0.063; 0.045)	0.014 (-0.040; 0.068)	0.034 (-0.019; 0.088)	0.024 (-0.030; 0.078)	0.024 (-0.030; 0.078)
full model	-0.084 (-0.224; 0.055)	-0.060 (-0.200; 0.079)	-0.035 (-0.174; 0.104)	-0.046 (-0.185; 0.093)	-0.051 (-0.192; 0.090)

systolischer Blutdruck [mmHg]					
PMC [pro 10 µg/m³]					
PM ₁₀					
Mean (95%-CI)					
Kerzen	during	post	post 2 h	post 4 h	post 24 h
crude model	0.074 (-0.306; 0.454)	-0.142 (-0.518; 0.234)	0.258 (-0.118; 0.634)	0.340 (-0.036; 0.716)	0.340 (-0.036; 0.716)
full model	1.040 (0.278; 1.802)	0.777 (0.017; 1.537)	1.230 (0.470; 1.990)	1.346 (0.586; 2.106)	0.799 (0.033; 1.565)
Toasten	during	post	post 2 h	post 4 h	post 24 h
crude model	0.053 (-0.029; 0.135)	0.055 (-0.027; 0.137)	-0.037 (-0.119; 0.045)	-0.015 (-0.097; 0.067)	-0.015 (-0.097; 0.067)
full model	0.073 (-0.005; 0.151)	0.073 (-0.005; 0.151)	-0.019 (-0.097; 0.059)	0.002 (-0.076; 0.080)	-0.020 (-0.316; 0.276)
Braten	during	post	post 2 h	post 4 h	post 24 h
crude model	-0.075 (-0.179; 0.029)	-0.020 (-0.124; 0.084)	0.037 (-0.067; 0.141)	-0.022 (-0.126; 0.082)	-0.022 (-0.126; 0.082)
full model	-0.256 (-0.399; -0.113)	-0.200 (-0.343; -0.057)	-0.134 (-0.277; 0.009)	-0.192 (-0.335; -0.049)	-0.229 (-0.390; -0.068)
PMC [pro 10 µg/m³]					
PM _{2.5}					
Mean (95%-CI)					
Kerzen	during	post	post 2 h	post 4 h	post 24 h
crude model	0.060 (-0.328; 0.448)	-0.138 (-0.522; 0.246)	0.259 (-0.125; 0.643)	0.347 (-0.037; 0.731)	0.347 (-0.037; 0.731)
full model	1.043 (0.245; 1.841)	0.796 (0.000; 1.592)	1.249 (0.453; 2.045)	1.374 (0.578; 2.170)	0.818 (0.016; 1.620)
Toasten	during	post	post 2 h	post 4 h	post 24 h
crude model	0.166 (-0.085; 0.417)	0.160 (-0.091; 0.411)	0.005 (-0.246; 0.256)	0.130 (-0.121; 0.381)	0.130 (-0.121; 0.381)
full model	0.203 (-0.058; 0.464)	0.181 (-0.080; 0.442)	-0.014 (-0.275; 0.247)	0.117 (-0.144; 0.378)	-0.073 (-0.516; 0.370)
Braten	during	post	post 2 h	post 4 h	post 24 h
crude model	-0.069 (-0.202; 0.064)	-0.007 (-0.140; 0.126)	0.052 (-0.081; 0.185)	-0.008 (-0.143; 0.127)	-0.008 (-0.143; 0.127)
full model	-0.283 (-0.471; -0.095)	-0.220 (-0.408; -0.032)	-0.150 (-0.338; 0.038)	-0.207 (-0.395; -0.019)	-0.268 (-0.482; -0.054)

systolischer Blutdruck [mmHg]					
PMC [pro 10 µg/m³]					
PM ₁					
Mean (95%-CI)					
	during	post	post 2 h	post 4 h	post 24 h
Kerzen					
crude model	0.025 (-0.369; 0.419)	-0.140 (-0.530; 0.250)	0.251 (-0.139; 0.641)	0.336 (-0.054; 0.726)	0.336 (-0.054; 0.726)
full model	1.011 (0.133; 1.889)	0.796 (-0.078; 1.670)	1.245 (0.371; 2.119)	1.372 (0.498; 2.246)	0.814 (-0.066; 1.694)
Toasten					
crude model	0.074 (-0.345; 0.493)	0.059 (-0.360; 0.478)	0.364 (-0.055; 0.783)	0.656 (0.237; 1.075)	0.656 (0.237; 1.075)
full model	-0.098 (-0.759; 0.563)	-0.165 (-0.826; 0.496)	0.054 (-0.607; 0.715)	0.405 (-0.256; 1.066)	-0.196 (-0.849; 0.457)
Braten					
crude model	-0.062 (-0.213; 0.089)	-0.002 (-0.153; 0.149)	0.064 (-0.087; 0.215)	0.008 (-0.143; 0.159)	0.008 (-0.143; 0.159)
full model	-0.275 (-0.489; -0.061)	-0.214 (-0.428; 0.000)	-0.135 (-0.349; 0.079)	-0.188 (-0.402; 0.026)	-0.270 (-0.517; -0.023)

crude model = unadjustiertes Modell; full model = adjustiert für Expositionsquelle, Alter, Geschlecht, Größe, Temperatur im Versuchsraum, relative Luftfeuchtigkeit im Versuchsraum, Verkehrsmittel, Anfahrtszeit

5.2.2.5 Arterielle Steifigkeit

Zur Beurteilung der arteriellen Steifigkeit wurden aus der Pulswelle der Augmentationsdruck, der Augmentationsindex sowie die Pulswellengeschwindigkeit abgeleitet. Ein höherer Wert in diesen Parametern bedeutet eine erhöhte Steifigkeit. Der Augmentationsdruck sowie der Augmentationsindex werden auf eine Herzfrequenz von 75 standardisiert. Der Augmentationsdruck sowie der Augmentationsindex wurden direkt nach sowie 2 h, 4 h und 24 h nach der Exposition gemessen, die Pulswellengeschwindigkeit direkt nach und 24 h nach der Exposition.

Die Mittelwerte bewegen sich zwischen den verschiedenen Zeitpunkten und Expositionen von 0,8 bis 3,4 mmHg für den Augmentationsdruck, von 1,8 bis 10,8 % für den Augmentationsindex und 56,1 bis 76,4 m/s für die Pulswellengeschwindigkeit (siehe Anhang).

In der Mittelwertanalyse zeigt sich beim Augmentationsdruck (Abbildung 161) und beim Augmentationsindex (siehe Anhang) keine statistisch signifikante Änderung durch die Expositionen. Für die PWV ist bei den Messungen 24 h nach Exposition bei Level 2 von Kerzen und Toasten eine statistische signifikante Erniedrigung zu sehen, sowie eine Tendenz bei Braten Level 2 (Abbildung 162).

In der linearen Regression beobachtet man bei Kerzen zu allen Zeitpunkten einen Anstieg des zentralen Augmentationsdrucks in Abhängigkeit von der Partikeloberflächenkonzentration, jedoch entgegengesetzte Ergebnisse (erniedrigte Steifigkeit) bei der Partikelmassenkonzentration (Tabelle 41). Für Toasten dagegen beobachtet man eine erhöhte Steifigkeit in Abhängigkeit von der Partikelmassenkonzentration bei den Messungen direkt nach und 2 h nach der Exposition. Ebenfalls kein klares Muster ist beim Braten zu erkennen mit einer statistisch signifikante Erhöhung für die Partikelanzahlkonzentration nach 24 h und einem statistisch signifikanten Abfall für die 2 h und 4 h Messungen für die Partikelmassenkonzentration von PM₁₀.

Das Muster für den Augmentationsindex (detaillierte Ergebnisse der Regressionsanalysen im Anhang) ist ähnlich aber meist weniger deutlich. Auch die erniedrigte Steifigkeit bei der Partikelmassenkonzentration ist hier weniger ausgeprägt. Die statistisch signifikante Erhöhung für die Partikelanzahlkonzentration beim Braten sieht man hier bei allen Messzeitpunkten.

Für die Pulswellengeschwindigkeit ergaben sich keine Veränderungen in Relation zur Feinstaubkonzentration außer für Toasten, wo ein statistisch signifikanter Anstieg bei der Messung direkt nach der Exposition für die Massenkonzentration von PM₁₀ und eine ähnliche Tendenz für PM_{2.5} zu beobachten war (Tabelle 42).

Abbildung 161: Differenz der Differenz des zur Herzfrequenz korrigierten Augmentationsdrucks [%] zu 4 Messzeitpunkten zu unterschiedlichen Innenraumbelastungen und unterschiedlichen Belastungsniveaus im Vergleich zur Raumluft

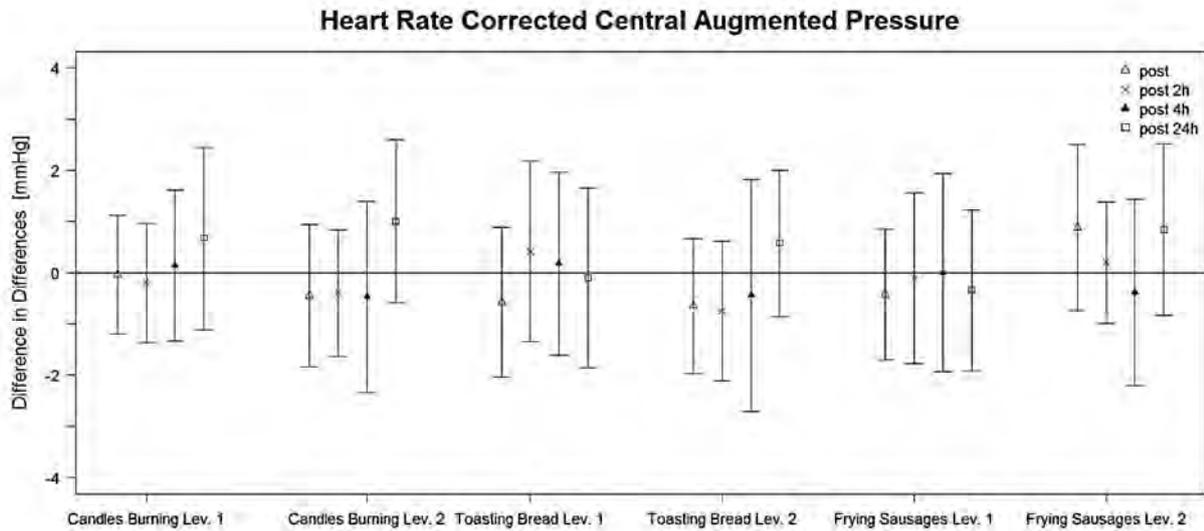


Abbildung 162: Differenz der Differenz der PWV [m/s] zu 2 Messzeitpunkten zu unterschiedlichen Innenraumbelastungen und unterschiedlichen Belastungsniveaus im Vergleich zur Raumluft

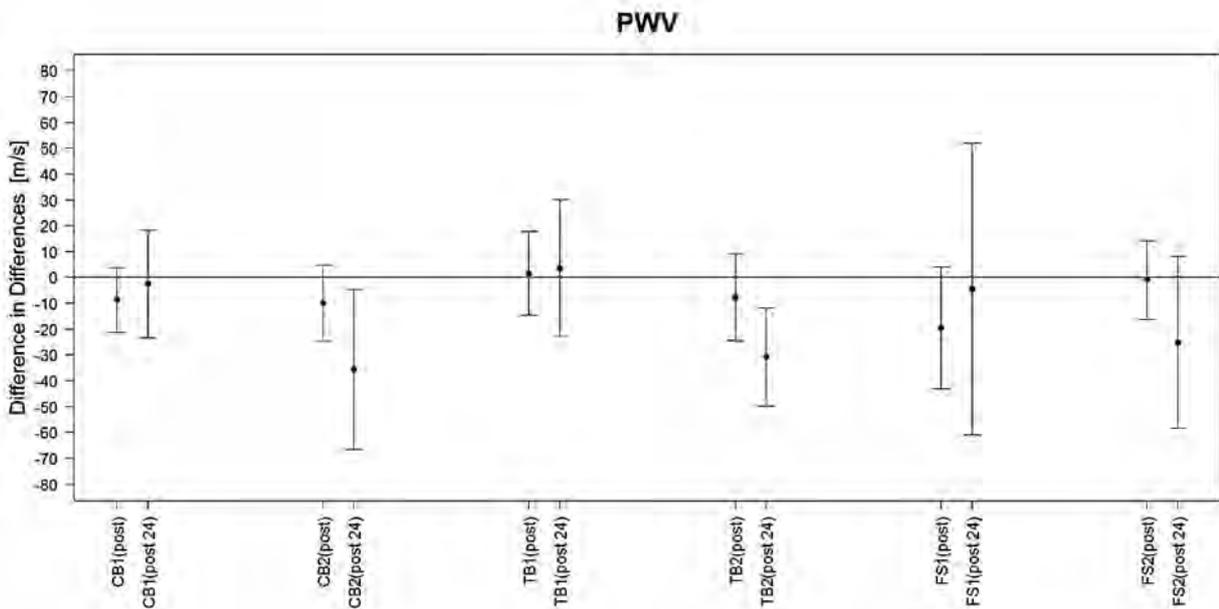


Tabelle 41: Veränderung des zur Herzfrequenz korrigierten Augmentationsdrucks [mmHg]: Mittelwert (mean) und 95%- Konfidenzintervall (95%- CI)

Augmentationsdruck [mmHg]				
Oberflächenkonzentration [pro 100 µm ² /cm ³]				
PSC				
Mean (95%-CI)				
	post	post 2 h	post 4 h	post 24 h
Kerzen				
crude model	0.006 (-0.026; 0.037)	0.011 (-0.019; 0.041)	0.015 (-0.016; 0.046)	0.015 (-0.016; 0.046)
full model	0.114 (0.006; 0.221)	0.119 (0.011; 0.226)	0.12 (0.013; 0.227)	0.149 (0.04; 0.258)
Toasten				
crude model	-0.006 (-0.04; 0.028)	0.001 (-0.032; 0.034)	0.01 (-0.025; 0.046)	0.01 (-0.025; 0.046)
full model	-0.054 (-0.167; 0.058)	-0.058 (-0.169; 0.052)	-0.049 (-0.163; 0.064)	-0.044 (-0.156; 0.068)
Braten				
crude model	0.026 (-0.005; 0.058)	0.013 (-0.016; 0.042)	0.006 (-0.025; 0.037)	0.006 (-0.025; 0.037)
full model	0.012 (-0.038; 0.061)	-0.005 (-0.055; 0.044)	-0.012 (-0.061; 0.038)	0.023 (-0.033; 0.079)
Anzahl [pro 10000 Partikel/cm ³]				
PNC < 100 nm				
Mean (95%-CI)				
	post	post 2 h	post 4 h	post 24 h
Kerzen				
crude model	0.001 (-0.003; 0.005)	0.001 (-0.003; 0.005)	0.001 (-0.003; 0.006)	0.001 (-0.003; 0.006)
full model	0.013 (-0.006; 0.032)	0.013 (-0.006; 0.032)	0.013 (-0.006; 0.032)	0.017 (-0.002; 0.037)
Toasten				
crude model	-0.001 (-0.01; 0.007)	0 (-0.008; 0.008)	0.003 (-0.006; 0.011)	0.003 (-0.006; 0.011)
full model	-0.022 (-0.064; 0.019)	-0.024 (-0.064; 0.017)	-0.021 (-0.062; 0.02)	-0.019 (-0.06; 0.022)
Braten				
crude model	0.016 (-0.003; 0.035)	0.01 (-0.008; 0.028)	0.004 (-0.015; 0.023)	0.004 (-0.015; 0.023)
full model	0.045 (-0.005; 0.095)	0.036 (-0.014; 0.087)	0.032 (-0.019; 0.083)	0.056 (0.004; 0.109)

Augmentationsdruck [mmHg]				
PMC [pro 10 µg/m ³]				
PM ₁₀				
Mean (95%-CI)				
	post	post 2 h	post 4 h	post 24 h
Kerzen				
crude model	0.077 (-0.086; 0.24)	0.038 (-0.113; 0.189)	0.078 (-0.081; 0.237)	0.078 (-0.081; 0.237)
full model	-0.324 (-0.626; -0.022)	-0.372 (-0.672; -0.072)	-0.336 (-0.64; -0.032)	-0.297 (-0.603; 0.009)
Toasten				
crude model	0.051 (0.024; 0.078)	0.041 (0.014; 0.068)	0.016 (-0.011; 0.043)	0.016 (-0.011; 0.043)
full model	0.051 (0.022; 0.08)	0.039 (0.01; 0.068)	0.015 (-0.014; 0.044)	-0.032 (-0.15; 0.086)
Braten				
crude model	0.044 (0.005; 0.083)	0.019 (-0.016; 0.054)	0.011 (-0.026; 0.048)	0.011 (-0.026; 0.048)
full model	-0.031 (-0.084; 0.022)	-0.058 (-0.109; -0.007)	-0.061 (-0.112; -0.01)	-0.048 (-0.103; 0.007)
PMC [pro 10 µg/m ³]				
PM _{2.5}				
Mean (95%-CI)				
	post	post 2 h	post 4 h	post 24 h
Kerzen				
crude model	0.079 (-0.088; 0.246)	0.043 (-0.112; 0.198)	0.083 (-0.08; 0.246)	0.083 (-0.08; 0.246)
full model	-0.33 (-0.648; -0.012)	-0.375 (-0.691; -0.059)	-0.34 (-0.659; -0.021)	-0.303 (-0.624; 0.018)
Toasten				
crude model	0.156 (0.066; 0.246)	0.124 (0.036; 0.212)	0.054 (-0.036; 0.144)	0.054 (-0.036; 0.144)
full model	0.17 (0.068; 0.272)	0.123 (0.023; 0.223)	0.051 (-0.051; 0.153)	-0.004 (-0.2; 0.192)
Braten				
crude model	0.061 (0.012; 0.11)	0.03 (-0.015; 0.075)	0.022 (-0.025; 0.069)	0.022 (-0.025; 0.069)
full model	-0.01 (-0.077; 0.057)	-0.047 (-0.114; 0.02)	-0.049 (-0.116; 0.018)	-0.033 (-0.107; 0.041)

Augmentationsdruck [mmHg]				
PMC [pro 10 µg/m ³]				
PM ₁				
Mean (95%-CI)				
	post	post 2 h	post 4 h	post 24 h
Kerzen				
crude model	0.084 (-0.085; 0.253)	0.041 (-0.116; 0.198)	0.09 (-0.075; 0.255)	0.09 (-0.075; 0.255)
full model	-0.359 (-0.708; -0.01)	-0.412 (-0.759; -0.065)	-0.368 (-0.719; -0.017)	-0.339 (-0.692; 0.014)
Toasten				
crude model	0.082 (-0.09; 0.254)	0.065 (-0.098; 0.228)	0.062 (-0.114; 0.238)	0.062 (-0.114; 0.238)
full model	-0.051 (-0.357; 0.255)	-0.134 (-0.434; 0.166)	-0.145 (-0.455; 0.165)	-0.186 (-0.5; 0.128)
Braten				
crude model	0.074 (0.021; 0.127)	0.039 (-0.01; 0.088)	0.033 (-0.018; 0.084)	0.033 (-0.018; 0.084)
full model	0.014 (-0.062; 0.09)	-0.027 (-0.101; 0.047)	-0.028 (-0.102; 0.046)	-0.01 (-0.098; 0.078)

crude model = unadjustiertes Modell; full model = adjustiert für Expositionsquelle, Alter, Geschlecht, Größe, Temperatur im Versuchsraum, relative Luftfeuchtigkeit im Versuchsraum, Verkehrsmittel, Anfahrtszeit

Tabelle 42: Veränderung der Pulswellengeschwindigkeit [m/s]: Mittelwert (mean) und 95%- Konfidenzintervall (95%- CI)

	PWV [m/s]	
	Oberflächenkonzentration [pro 100 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$]	
	PSC	
	Mean (95%-CI)	
Kerzen	post	post 24 h
crude model	-0.186 (-0.524; 0.151)	-0.34 (-0.777; 0.097)
full model	-0.674 (-2.394; 1.047)	-0.76 (-2.5; 0.981)
Toasten	post	post 24 h
crude model	-0.173 (-0.543; 0.196)	-0.181 (-0.706; 0.344)
full model	0.004 (-1.691; 1.698)	0.023 (-1.688; 1.734)
Braten	post	post 24 h
crude model	0.003 (-0.406; 0.412)	-0.169 (-0.673; 0.335)
full model	0.098 (-0.716; 0.913)	-0.607 (-1.61; 0.396)
	Anzahl [pro 10000 Partikel/cm³]	
	PNC < 100 nm	
	Mean (95%-CI)	
Kerzen	post	post 24 h
crude model	-0.018 (-0.064; 0.029)	-0.043 (-0.107; 0.02)
full model	0.171 (-0.126; 0.469)	0.161 (-0.149; 0.472)
Toasten	post	post 24 h
crude model	-0.045 (-0.134; 0.044)	-0.052 (-0.179; 0.074)
full model	-0.159 (-0.758; 0.439)	-0.16 (-0.752; 0.431)
Braten	post	post 24 h
crude model	-0.033 (-0.282; 0.217)	-0.171 (-0.499; 0.157)
full model	0.153 (-0.747; 1.053)	-0.233 (-1.177; 0.71)
	PMC [pro 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$]	
	PM₁₀	
	Mean (95%-CI)	
Kerzen	post	post 24 h
crude model	-1.5 (-3.229; 0.229)	-1.454 (-3.728; 0.82)
full model	-4.078 (-8.807; 0.651)	-3.755 (-8.728; 1.218)
Toasten	post	post 24 h
crude model	0.296 (-0.022; 0.614)	-1.224 (-3.437; 0.989)
full model	0.361 (0.034; 0.688)	-0.147 (-2.691; 2.397)
Braten	post	post 24 h
crude model	0.011 (-0.508; 0.53)	-0.193 (-0.787; 0.401)
full model	0.291 (-0.599; 1.181)	-0.406 (-1.466; 0.654)

	PWV [m/s]	
	PMC [pro 10 µg/m³]	
	PM _{2,5}	
	Mean (95%-CI)	
Kerzen	post	post 24 h
crude model	-1.477 (-3.247; 0.293)	-1.465 (-3.788; 0.858)
full model	-3.825 (-8.811; 1.161)	-3.519 (-8.737; 1.699)
Toasten	post	post 24 h
crude model	0.578 (-0.414; 1.57)	-1.157 (-3.55; 1.236)
full model	1.133 (-0.047; 2.313)	0.594 (-2.321; 3.509)
Braten	post	post 24 h
crude model	0.017 (-0.622; 0.656)	-0.23 (-1.014; 0.554)
full model	0.405 (-0.757; 1.567)	-0.509 (-2.004; 0.986)
	PMC [pro 10 µg/m³]	
	PM ₁	
	Mean (95%-CI)	
Kerzen	post	post 24 h
crude model	-1.403 (-3.204; 0.398)	-1.563 (-3.915; 0.789)
full model	-3.853 (-9.443; 1.737)	-3.728 (-9.543; 2.087)
Toasten	post	post 24 h
crude model	-0.668 (-2.422; 1.086)	-1.197 (-3.692; 1.298)
full model	-0.959 (-5.075; 3.157)	-0.996 (-5.533; 3.541)
Braten	post	post 24 h
crude model	0.047 (-0.657; 0.751)	-0.185 (-1.057; 0.687)
full model	0.46 (-0.839; 1.759)	-0.587 (-2.343; 1.169)

crude model = unadjustiertes Modell; full model = adjustiert für Expositionsquelle, Alter, Geschlecht, Größe, Temperatur im Versuchsraum, relative Luftfeuchtigkeit im Versuchsraum, Verkehrsmittel, Anfahrtszeit

5.2.2.6 Herzratenvariabilität (HRV): SDNN und RMSSD (Vagusindex)

Die Herzratenvariabilität wurde direkt nach und 24 h nach der Exposition bestimmt. Eine Verringerung der Herzratenvariabilität bedeutet eine verschlechterte Regulierung durch das autonome Nervensystem. Die Werte bewegen sich zwischen den verschiedenen Zeitpunkten und Expositionen von 54 bis 82 ms für die SDNN und von 45 bis 73 ms für die RMSSD (siehe Anhang).

Im Mittelwertvergleich zeigt sich für die SDNN eine leichte Tendenz für eine Erniedrigung für Kerzen Level 2 bei der 24 h Messung und eine leichte Tendenz für eine Erhöhung für Braten Level 1 bei der Messung direkt nach der Exposition (Abbildung 163). Bei der RMSSD zeigt sich bei Kerzen und Toasten eine Tendenz zur Erhöhung der RMSSD bei Level 2 direkt nach der Exposition (Abbildung 164). Bei Braten sieht man für die Messung direkt nach der Exposition bei Level 1 einen statistisch signifikanten Anstieg, der jedoch bei Level 2 deutlich schwächer ausfällt und nicht statistisch signifikant ist. Dort ist dagegen bei Level 2 nach 24 h tendenziell eine Verringerung zu sehen, ebenso bei Kerzen für beide Level.

Die Ergebnisse der linearen Regression für die Herzratenvariabilität sind unterschiedlich für die verschiedenen Expositionen. Während für Kerzen direkt nach der Exposition ein statistisch signifikanter Anstieg der Variabilität (SDNN als auch RMSSD) in Zusammenhang mit einer erhöhten Partikelmassen- und Oberflächenkonzentration zu sehen ist, ergibt sich für Toasten ein statistisch signifikanter Abfall nach 24 h hin Zusammenhang mit einer erhöhten Partikelmassenkonzentration. Für Braten waren keine Veränderungen im Vergleich zur Raumluft zu beobachten (Tabelle 43, Tabelle 44).

Abbildung 163: Differenz der Differenz des SDNN [ms] zu 2 Messzeitpunkten zu unterschiedlichen Innenraumbelastungen und unterschiedlichen Belastungsniveaus im Vergleich zur Raumluft

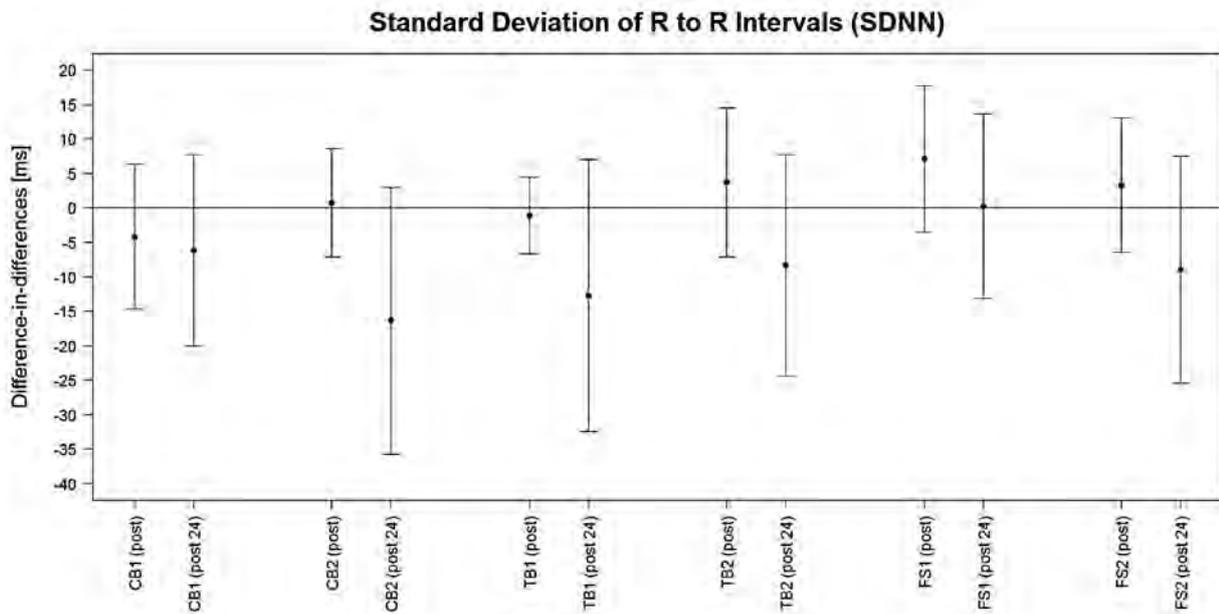


Abbildung 164: Differenz der Differenz des RMSSD (Vagusindex) [ms] zu 2 Messzeitpunkten zu unterschiedlichen Innenraumbelastungen und unterschiedlichen Belastungsniveaus im Vergleich zur Raumluft

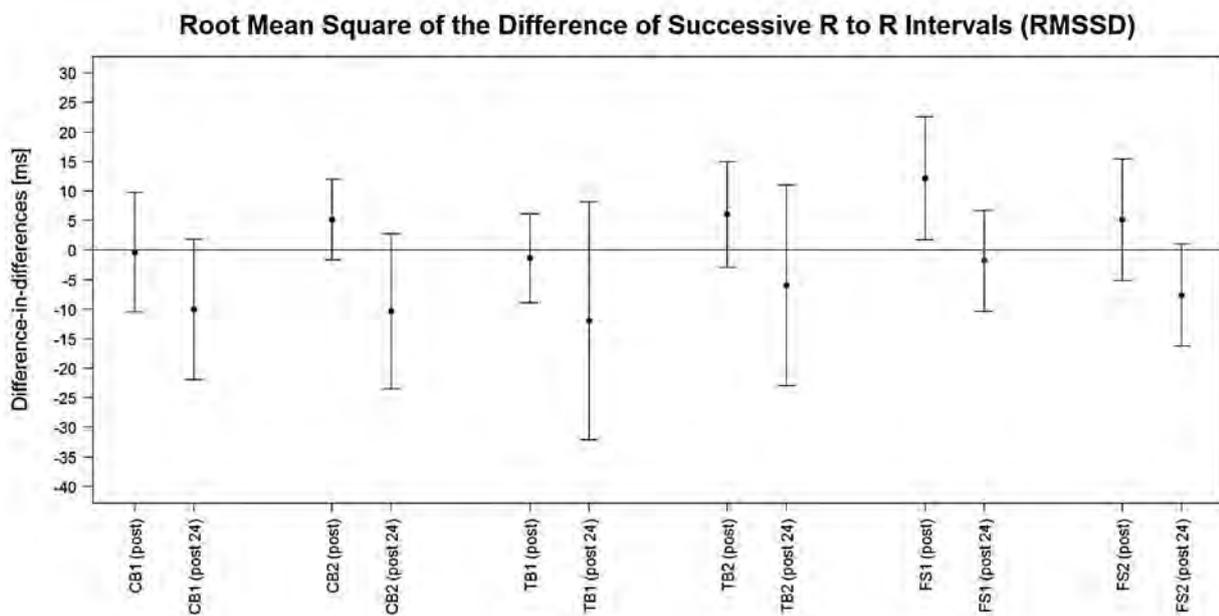


Tabelle 43: Veränderung des SDNN [ms]: Mittelwert (mean) und 95%- Konfidenzintervall (95%- CI)

SDNN [ms]		
Oberflächenkonzentration [pro 100 µm ² /cm ³]		
PSC		
Mean (95%-CI)		
	post	post 24 h
Kerzen		
crude model	0.04 (-0.166; 0.247)	-0.289 (-0.56; -0.017)
full model	1.396 (0.261; 2.532)	1.05 (-0.089; 2.188)
Toasten		
crude model	0.139 (-0.09; 0.367)	-0.077 (-0.382; 0.229)
full model	-0.199 (-1.247; 0.849)	-0.442 (-1.506; 0.621)
Braten		
crude model	0.07 (-0.188; 0.328)	-0.028 (-0.363; 0.307)
full model	-0.026 (-0.644; 0.591)	-0.266 (-0.963; 0.431)
Anzahl [pro 10000 Partikel/cm ³]		
PNC < 100 nm		
Mean (95%-CI)		
	post	post 24 h
Kerzen		
crude model	-0.001 (-0.03; 0.028)	-0.036 (-0.076; 0.004)
full model	0.114 (-0.088; 0.315)	0.081 (-0.127; 0.29)
Toasten		
crude model	0.027 (-0.029; 0.083)	-0.019 (-0.093; 0.055)
full model	0.138 (-0.221; 0.497)	0.075 (-0.28; 0.43)
Braten		
crude model	0.069 (-0.085; 0.223)	-0.083 (-0.289; 0.122)
full model	-0.281 (-0.903; 0.342)	-0.493 (-1.123; 0.137)
PMC [pro 10 µg/m ³]		
PM ₁₀		
Mean (95%-CI)		
	post	post 24 h
Kerzen		
crude model	0.256 (-0.8; 1.312)	-1.698 (-3.143; -0.253)
full model	3.846 (0.828; 6.864)	1.586 (-1.587; 4.759)
Toasten		
crude model	0.022 (-0.213; 0.257)	-1.383 (-2.869; 0.103)
full model	0.04 (-0.205; 0.285)	-1.888 (-3.699; -0.077)
Braten		
crude model	0.007 (-0.318; 0.332)	0.118 (-0.305; 0.541)
full model	0.146 (-0.448; 0.74)	0.024 (-0.707; 0.755)

SDNN [ms]		
PMC [pro 10 µg/m ³]		
PM _{2,5}		
Mean (95%-CI)		
	post	post 24 h
Kerzen		
crude model	0.247 (-0.831; 1.325)	-1.755 (-3.227; -0.283)
full model	3.993 (0.79; 7.196)	1.681 (-1.665; 5.027)
Toasten		
crude model	0.084 (-0.627; 0.795)	-1.459 (-3.029; 0.111)
full model	-0.026 (-0.902; 0.85)	-2.083 (-4.137; -0.029)
Braten		
crude model	0.047 (-0.374; 0.468)	-0.009 (-0.593; 0.575)
full model	0.163 (-0.658; 0.984)	-0.166 (-1.191; 0.859)
PMC [pro 10 µg/m ³]		
PM ₁		
Mean (95%-CI)		
	post	post 24 h
Kerzen		
crude model	0.206 (-0.882; 1.294)	-1.889 (-3.373; -0.405)
full model	4.229 (0.583; 7.875)	1.837 (-1.942; 5.616)
Toasten		
crude model	0.177 (-0.985; 1.339)	-1.508 (-3.125; 0.109)
full model	-2.25 (-4.955; 0.455)	-4.114 (-7.132; -1.096)
Braten		
crude model	0.048 (-0.426; 0.522)	-0.114 (-0.769; 0.541)
full model	0.102 (-0.849; 1.053)	-0.355 (-1.535; 0.825)

crude model = unadjustiertes Modell; full model = adjustiert für Expositionsquelle, Alter, Geschlecht, Größe, Temperatur im Versuchsraum, relative Luftfeuchtigkeit im Versuchsraum, Verkehrsmittel, Anfahrtszeit

Tabelle 44: Veränderung des RMSSD [ms]: Mittelwert (mean) und 95%- Konfidenzintervall (95%-CI)

	RMSSD [ms]	
	Oberflächenkonzentration [pro 100 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$]	
	PSC	
	Mean (95%-CI)	
	post	post 24 h
Kerzen		
crude model	0.141 (-0.048; 0.329)	-0.194 (-0.443; 0.055)
full model	1.579 (0.467; 2.69)	1.189 (0.074; 2.304)
Toasten		
crude model	0.163 (-0.065; 0.39)	-0.071 (-0.376; 0.234)
full model	-0.614 (-1.747; 0.518)	-0.889 (-2.037; 0.259)
Braten		
crude model	0.09 (-0.174; 0.355)	0.019 (-0.324; 0.362)
full model	0.019 (-0.649; 0.687)	-0.181 (-0.927; 0.565)
	Anzahl [pro 10000 Partikel/ cm^3]	
	PNC < 100 nm	
	Mean (95%-CI)	
	post	post 24 h
Kerzen		
crude model	0.012 (-0.014; 0.039)	-0.025 (-0.062; 0.012)
full model	0.089 (-0.111; 0.289)	0.047 (-0.159; 0.254)
Toasten		
crude model	0.04 (-0.016; 0.095)	-0.021 (-0.095; 0.052)
full model	0.052 (-0.343; 0.446)	-0.022 (-0.413; 0.369)
Braten		
crude model	0.089 (-0.068; 0.247)	-0.052 (-0.262; 0.158)
full model	-0.234 (-0.908; 0.439)	-0.41 (-1.09; 0.27)
	PMC [pro 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$]	
	PM ₁₀	
	Mean (95%-CI)	
	post	post 24 h
Kerzen		
crude model	0.889 (-0.097; 1.875)	-0.858 (-2.214; 0.498)
full model	4.379 (1.235; 7.523)	2.572 (-0.733; 5.877)
Toasten		
crude model	0.029 (-0.214; 0.272)	-1.38 (-2.923; 0.163)
full model	0.024 (-0.25; 0.298)	-2.422 (-4.433; -0.411)
Braten		
crude model	0.119 (-0.228; 0.466)	0.163 (-0.29; 0.616)
full model	0.325 (-0.336; 0.986)	0.167 (-0.639; 0.973)

RMSSD [ms]		
PMC [pro 10 µg/m³]		
PM _{2,5}		
Mean (95%-CI)		
	post	post 24 h
Kerzen		
crude model	0.901 (-0.106; 1.908)	-0.906 (-2.288; 0.476)
full model	4.636 (1.302; 7.97)	2.755 (-0.726; 6.236)
Toasten		
crude model	0.149 (-0.592; 0.89)	-1.303 (-2.938; 0.332)
full model	-0.212 (-1.196; 0.772)	-2.634 (-4.923; -0.345)
Braten		
crude model	0.195 (-0.256; 0.646)	0.114 (-0.507; 0.735)
full model	0.5 (-0.406; 1.406)	0.227 (-0.892; 1.346)
PMC [pro 10 µg/m³]		
PM ₁		
Mean (95%-CI)		
	post	post 24 h
Kerzen		
crude model	0.878 (-0.139; 1.895)	-1.018 (-2.414; 0.378)
full model	5.013 (1.216; 8.81)	3.036 (-0.898; 6.97)
Toasten		
crude model	0.359 (-0.854; 1.572)	-1.202 (-2.89; 0.486)
full model	-3.959 (-6.942; -0.976)	-5.833 (-9.157; -2.509)
Braten		
crude model	0.198 (-0.31; 0.706)	0.052 (-0.646; 0.75)
full model	0.505 (-0.544; 1.554)	0.17 (-1.12; 1.46)

crude model = unadjustiertes Modell; full model = adjustiert für Expositionsquelle, Alter, Geschlecht, Größe, Temperatur im Versuchsraum, relative Luftfeuchtigkeit im Versuchsraum, Verkehrsmittel, Anfahrtszeit

5.2.3 Zusammenfassung nach Exposition

5.2.3.1 Kerzen

In der NAL gibt es Anzeichen für eine erhöhte Zellzahl mit steigender Partikelbelastung, die sich jedoch nicht in einem veränderten Verhältnis von Epithelzellen und neutrophilen Granulozyten widerspiegelt. Auch für IL-8 ergeben sich keine Änderungen, sodass es keinen klaren Hinweis auf durch Kerzenstäube ausgelöste Entzündungsprozesse in der Nase gibt.

Für die Lunge ergeben sich keine Hinweise für eine Entzündung. Jedoch sieht man eine leichte Verschlechterung der Lungenfunktion.

Für das Blutbild und die im Blut enthaltenen Marker für Entzündung und oxidativen Stress ergab sich ein Anstieg des IL-8, während sich keine Veränderungen für die Marker von oxidativem Stress fanden.

Bezüglich des kardiovaskulären Systems ergaben sich deutliche und kohärente Anstiege im systolischen Blutdruck. Der Zusammenhang mit diastolischem Blutdruck folgt im Wesentlichen demselben Muster, ist jedoch weniger ausgeprägt. Bezüglich der arteriellen Steifigkeit konnte keine Veränderung in der Pulswellengeschwindigkeit gesehen werden. Die Ergebnisse für den Augmentationsdruck und -index unterscheiden sich

den sich je nach Partikelmetrik: während man einen Anstieg mit der Oberflächenkonzentration sieht, gibt es eine Erniedrigung für die Massenkonzentration (die jedoch beim Augmentationsindex kaum von einem Null-effekt zu unterscheiden ist). Die Herzfrequenzvariabilität zeigt einen Anstieg sowohl für den SDNN als auch den Vagusindex.

5.2.3.2 Toasten

In der NAL sieht man einen Anstieg des Anteils der Neutrophilen parallel zu einem Abfall der Epithelzellen. Für IL-8 ist jedoch keine Änderung zu sehen.

Bezüglich der Lunge zeigt sich keinerlei Anzeichen für eine Entzündung oder eine Einschränkung der Funktion.

Im Blut ergeben sich keine Änderungen im Blutbild und auch keine Veränderungen in IL-8. Dagegen sieht man einen Anstieg in TEAC und Harnsäure. Keine Veränderungen sind für die von der Harnsäure unabhängige TEAC zu sehen.

Im kardiovaskulären System ergab sich eine Erhöhung der arteriellen Steifigkeit und eine Abnahme Herzfrequenzvariabilität. Beim systolischen Blutdruck zeigten sich für Toastbelastung keine Effekte.

5.2.3.3 Braten

In der Nasallavage sieht man eine Erniedrigung von IL-8. Bezüglich der Zellen in der Nasallavage ergaben sich keine Änderungen.

Ein Anstieg in der FeNO-Konzentration bei steigender Partikelanzahlkonzentration könnte für eine leichte Entzündungsreaktion in der Lunge sprechen. Die Lungenfunktion zeigte einen Anstieg in $MEF_{25\%-75\%}$, einem Marker für die kleinen Atemwege, und weniger ausgeprägt für FEV_1 mit ansteigenden Partikelmassenkonzentrationen.

Für IL-8 im Serum beobachtete man einen Anstieg. Für die Marker von oxidativen Stress ergab sich, außer für die Harnsäure, eine leichte Tendenz zu einer Verringerung bei steigenden Massenkonzentrationen. Im Blutbild ergaben sich keine Änderungen.

Der Blutdruck zeigte einen Abfall mit steigender Oberflächen- und Massenkonzentration. Die Ergebnisse für die arterielle Steifigkeit unterschieden sich nach Partikelmetrik und Messparameter. Kein Effekt wurde für die PWV gefunden. Sowohl der Augmentationsdruck und -index stiegen an mit steigender Partikelanzahlkonzentration und fielen ab (weniger deutlich der Augmentationsindex) mit der Partikelmassenkonzentration von PM_{10} . Da die Partikelanzahlkonzentration die kleineren Partikel ($< 100nm$) widerspiegelt könnte es sich hier um größenspezifische Effekte handeln. Keinerlei Veränderungen wurden bezüglich der Herzfrequenzvariabilität beobachtet.

5.2.3.4 Effekte der Partikelmetriken

Bezüglich der verwendeten Partikelmetriken, sieht man die meisten beobachteten Effekte bei einem Anstieg der Massenkonzentrationen. Vereinzelt können unterschiedliche Veränderungen je nach Größenklasse unterschieden werden. Mehrere Effekte sieht man auch in Abhängigkeit von der Oberflächenkonzentration, allerdings wurde nur in einem Fall (Zellzahl in der NAL nach Kerzen) ein deutlicher Zusammenhang gefunden, der nicht schon durch die Massenkonzentrationen aufgefallen war. Änderungen in der Anzahlkonzentration waren v.a. beim Braten mit Änderungen von Gesundheitsparametern assoziiert, die nicht mit anderen Partikelmetriken in Zusammenhang standen, oder sogar einen entgegengesetzten Zusammenhang zeigten wie bei der arteriellen Steifigkeit.

5.3 Diskussion

Das Hauptergebnis dieser Studie zeigt, dass selbst kurzfristige Belastungen gegenüber Fein- und Ultrafeinstäuben aus typischen Quellen im Innenraum bei gesunden Probanden akute gesundheitsbezogene Wirkungen haben. Dabei zeigten sich die stärksten und konsistentesten Effekte auf den systolischen Blutdruck, das autonome Nervensystem, auf die lokale und systemische Entzündungsantwort/oxidativen Stress und auf die Lungenfunktion.

Unsere Studie zeigt erste Ergebnisse, die auf eine Erhöhung des oxidativen Stress hinweisen. Hier konnten bei der Exposition gegenüber Stäuben aus Toastvorgängen die deutlichsten Wirkungen gesehen werden. Vergleichbare Daten gibt es bis jetzt noch nicht in der Literatur für Expositionen mit Fein- und Ultrafeinstäuben aus Innenraumquellen. Eine Studie zu Langzeiteffekten von polyaromatischen Kohlenwasserstoffen aus dem Verkehr fand keinen Zusammenhang mit TEAC, jedoch mit Glutathion und Glutathionperoxidase. Jedoch ist die Vergleichbarkeit unserer Studie mit einer Studie zu Langzeiteffekten eingeschränkt. Darüber hinaus zeigte sich eine subklinische lokale und systemische Entzündungsreaktion, die sich an einem Anstieg von Neutrophilen in der NAL und von IL-8 bei mehreren Expositionen manifestierte. Diese Wirkungen sind von großer Bedeutung, da sie auf vermutete biologische Wirkungspfade hindeuten. Bisherige Vorstellungen darüber, wie Fein- und Ultrafeinstäube im Körper wirken, beinhalten die Auslösung von lokalem und systemischem oxidativen Stress und Entzündung als zentralen und vereinigenden biologischen Wirkmechanismus.

Es konnten darüber hinaus deutliche Auswirkungen auf das Herzkreislaufsystem aufgezeigt werden. Insbesondere für die Exposition mit Kerzen sieht man einen klaren Anstieg des Blutdrucks in Zusammenhang mit steigenden Partikelmassenkonzentrationen, der bereits innerhalb einer Stunde nach Beginn der Exposition einsetzt. Eine kontrollierte Expositionsstudie mit Dieselabgasen aus den USA zeigte ebenfalls einen schnellen Anstieg des systolischen Blutdrucks noch während der Exposition mit einem Maximum bei der 1h Messung während der Exposition (Cosselman et al. 2012). Bei uns zeigte sich der höchste Anstieg des systolischen Blutdrucks nach 4h mit einem Anstieg um 1,37 mmHg für einen Anstieg von $10 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{PM}_{10}$. Der Blutdruck blieb über längere Zeit erhöht – noch in der 24 h Messung in unserer Studie bzw. der entsprechenden 22 h Messung in der Studie von Cosselman. Eine kontrollierte Studie zu Holzrauch dagegen zeigte keinen Effekt auf den Blutdruck (Unosson et al. 2013). Die Höhe des Effekts für den systolischen Blutdruck war in unserer Studie mit einem maximalen Anstieg von 1,37 mmHg pro $10 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{PM}_{10}$ vergleichbar mit Studien, die die Effekte von Außenluft untersuchen.

Im Gegensatz zur Exposition mit Kerzen sehen wir bei Braten und Toasten keinen Effekt oder sogar eine Blutdruckverringerung (bis zu 0,7 mmHg für den diastolischen Blutdruck direkt nach der Exposition mit Toasten). Eine Erklärung für dieses Phänomen kann hier nicht gegeben werden. Es wäre zu überlegen, ob die Geruchsentwicklung beim Toasten, die subjektiv als angenehm empfunden wird, vegetative Prozesse anstößt, die einen Abfall des Blutdruckes nach sich ziehen.

Die Ergebnisse für arterielle Steifigkeit und für die Herzratenvariabilität waren insgesamt sehr heterogen mit unterschiedlichen Effekten für einzelne Expositionen und Partikelmetriken. Bei Toasten sah man einen kurzfristigen (0 h und 2 h) Anstieg der arteriellen Steifigkeit für steigende Partikelmassenkonzentrationen. Dies

entspricht Ergebnissen für kontrollierte Expositionen mit Dieselabgasen und Holzrauch in anderen Studien (Lundbäck et al. 2009, Unosson et al. 2013). Bei Kerzen und Braten dagegen sah man keinen Effekt oder sogar eine Abnahme der arteriellen Steifigkeit für die Massenkonzentration und einen Anstieg für die Oberflächenkonzentration bzw. Anzahlkonzentration. Vergleichbare Daten in der Literatur gibt es nicht.

Für die Herzratenvariabilität konnte für die Exposition gegenüber Kerzen eine klare Zunahme der SDNN und des Vagusindex beobachtet werden, während für Toasten eine klare Abnahme des Vagusindex zu erkennen war. Neben zufälligen Befunden kommt als potentielle Erklärung die unterschiedliche chemische Zusammensetzung der Stäube aus den unterschiedlichen Quellen in Frage.

Für die Lungenfunktion beobachteten wir konsistente schwache Abnahmen vor allem in Zusammenhang mit steigenden Partikelmassenkonzentrationen, die von Kerzen oder Braten emittiert wurden. In der Literatur gibt es bis jetzt kaum kontrollierte Studien, die einen Effekt auf die Lungenfunktion nachweisen konnten. Eine Ausnahme ist die Studie von Xu et al. 2013, die einen Abfall im Peak Expiratory Flow (PEF) für Dieselpartikel (PM_{10}) berichtet. In unserer Studie war das Muster am konsistentesten für $MEF_{25\%-75\%}$, ein Hinweis, dass es insbesondere in den kleinen Atemwegen zu obstruktiven Veränderungen kommt. In den meisten Studien wird jedoch MEF nicht berichtet, sondern überwiegend FEV_1 , FVC und PEF. Da in unserer Studie nur gesunde Probanden ohne bekanntes Asthma oder chronisch-obstruktive Lungenerkrankung eingeschlossen wurden, können wir keine Aussagen über die Auswirkung bei besonders empfindlichen Patientengruppen machen. McCreanor et al. 2007 zeigten in ihrer Studie an Probanden mit leichten Asthma, dass eine zweistündige Exposition gegenüber Dieselabgasen an einer stark befahrenen Straße (Oxford Street, London) im Gegensatz zu einer zweistündigen Exposition in einem Grüngelände (Hyde Park) zu einer signifikanten Verschlechterung der Lungenfunktion führte. Dies konnten wir nun in ähnlicher Weise für lungengesunde Probanden bei Partikelbelastung aus Innenraumquellen zeigen.

Die hier beobachteten gesundheitsbezogenen Effekte sind von Bedeutung, weil sie auf Wirkmechanismen und potentielle Risikoerhöhungen für gesundheitliche Folgen hinweisen. Lokale und vor allem systemische Entzündungsreaktionen können relevante gesundheitliche Folgen nach sich ziehen. So können durch eine Entzündungsreaktion des Körpers und nachfolgendem Anstieg der Koagulationsbereitschaft akute kardiovaskuläre Ergebnisse ausgelöst („getriggert“) werden. Ebenfalls kann eine Erhöhung des Blutdruckes bei vorgeschädigtem Herz-Kreislaufsystem akute kardiovaskuläre Ereignisse auslösen. Eine kurzfristige Steigerungen der Außenluftbelastung mit Feinstäuben führt innerhalb von Stunden bis Tagen zu vermehrten Herzinfarkten (Rich et al. 2010) und zu einer erhöhten kardiovaskulären Mortalität (Brook et al. 2010), möglicherweise vermittelt durch eine systemische Entzündung (Rückerl et al. 2007). Auf Grund der in dieser Studie beobachteten Ergebnisse lässt sich vermuten, dass diese Mechanismen in ähnlicher Weise auch bei Partikeln aus Innenraumquellen eine Rolle spielen.

Bei der Studie wurden akute Auswirkungen einer einmaligen, zweistündigen Exposition untersucht. Aus diesem Grund kann die Studie keine Aussage machen über die kumulative Wirkung von regelmäßig wiederkehrenden Expositionen und auch nicht zur Wirkung von langandauernden Expositionen. Auch war die Expositionshöhe innerhalb der 2 Stunden höher, als man es üblicherweise unter Alltagsbedingungen antrifft. Ziel war, während der zwei Stunden Expositionszeit eine kumulative Exposition zu erreichen, die ansonsten unter Alltagsbedingungen in einer Woche erfahren werden könnte. Die maximalen PM-Konzentrationen, die in dieser Studie erreicht wurden, lagen außer bei Braten auf Stufe 2 deutlich unter den Konzentrationen, die typischerweise in kontrollierten Expositionsstudien für Außenluftschadstoffe vorhanden sind. In diesen Studien wird meist eine Massenkonzentration von durchschnittlich 200-300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ $PM_{2.5}$ angestrebt (Cosselman et al. 2012; Mills et al. 2007).

Es handelte sich um eine bevölkerungsbezogene Studie, die durchgeführt wurde in klinisch gesunden Probanden, bei denen keine erhöhte Empfindlichkeit gegenüber Feinstäuben, basierend auf Vorergebnissen epidemiologischer Studien, zu vermuten war. So wurden explizit Diabetiker, Patienten mit COPD und mit bestehender koronarer Herzkrankheit ausgeschlossen. Weiterführende Untersuchungen sind notwendig, um besonders empfindliche Gruppen zu identifizieren und um Wechselwirkungen mit anderen persönlichen oder

umweltbedingten Faktoren, die die Wirkung der Innenraumfeinstäube verstärken können, zu erkennen. Insbesondere bei den Organwirkungen wie z. B. der Erhöhung des Blutdruckes nach Kerzenrauchbelastung sowie der systemischen Entzündungsreaktion handelt es sich potentiell um klinisch wichtige Auswirkungen, wie bereits oben erläutert.

Generell wurden Effekte sowohl für neue Metriken und für Massenkonzentrationen gefunden. Die Effekte variieren z.T. nach Expositionsmetrik. Unterschiedliche Effekte zwischen den Expositionsszenarien sind möglicherweise durch unterschiedliche chemische Zusammensetzungen der Partikel in Abhängigkeit von der Quelle bedingt. Insgesamt wurden aber die meisten und konsistentesten Zusammenhänge mit der Partikelmassenkonzentration beobachtet. Ergebnisse für andere Metriken waren eher sporadisch und können in Anbetracht der großen Zahl der analysierten Zusammenhänge nicht mit Sicherheit von zufallsbedingten Ergebnissen unterschieden werden.

Bei den Analysen konnte ein deutlicher Effekt durch die Adjustierung für Covariate gesehen werden. So führt die Aufnahme von Störgrößen wie Anfahrtszeit und Verkehrsmittel am Tag der Exposition in Modell zu einer erheblichen Änderung der Effektschätzer. Dies manifestiert sich auch an den zum Teil konträren Ergebnissen der Mittelwertvergleiche und der adjustierten Regressionsanalysen. Es ist eine Stärke des Projekts, dass eine Berücksichtigung dieser Störgrößen möglich war. Weitere Störgrößen, die im Rahmen von Sensitivitätsanalysen berücksichtigt wurden, waren die Außenluftbelastung an der Wohnadresse am Tag vor der Untersuchung. Diese Ergebnisse, die im Anhang zu sehen sind, unterscheiden jedoch qualitativ nicht von den Hauptmodellen im Abschlussbericht.

In weitere Analysen werden die Interaktionen der Störgrößen mit den Expositionen untersucht, sowie der Haupteffekt der Außenluftbelastung im Rahmen einer Panel-Studien-Auswertung isoliert, um mögliche Kumulationen von Effekten aus der Außen- und Innenraumluft zu erkennen.

6 Fazit

Im Rahmen dieser Studie wurden hinsichtlich der untersuchten Innenraumquellen erhebliche Unterschiede der emittierten Partikel bzgl. ihrer Masse-, Anzahl-, Oberflächenkonzentration und chemisch-physikalischen Eigenschaften festgestellt.

Dabei zeigen die *in Vitro* Untersuchungen an Lungenepithelzellen ebenfalls kontrastierende Ergebnisse von keinen bis geringen toxischen Effekten. Die Partikel aus der Innenraumemissionsquelle „Toasten“ wurden im Vergleich zu den anderen Quellen als die am stärksten effektauslösenden identifiziert.

Ähnlich den *in vitro* Ergebnissen konnten auch *in vivo* geringe, akute Veränderungen auf das Herz-Kreislaufsystem, die Lunge, oxidativen Stress und Entzündungswerte nach einer einmaligen zweistündigen Exposition in gesunden Probanden festgestellt werden. Belastungen gegenüber Fein- und Ultrafeinstäuben aus typischen Innenraumquellen können somit zu biologischen Veränderungen führen, die mit denen einer Außenluftexposition vergleichbar sind.

Die Wirkung und Intensität allerdings scheint stark abhängig von den chemisch-physikalischen Eigenschaften der Partikel zu sein und kann somit nicht generell auf alle Quellen von Innenraumpartikel übertragen werden. Aussagen zu gesundheitsbezogenen Effekten durch sich häufig wiederholende oder langanhaltende Expositionen gegenüber Innenraumpartikeln, vor allem auch für prädisponierte Bevölkerungsgruppen, können auf Basis dieser Studie nicht gemacht werden. Analog zu der Entwicklung partikulärer Außenluft und neuer Kenntnisse über deren möglichen gesundheitlichen Folgen in den letzten Jahren bleibt es somit eine Aufgabe zu erörtern in wie fern eine Langzeitexposition gegenüber Innenraumpartikeln möglicherweise zu biologischen/physiologischen Veränderungen bzw. Gesundheitseffekten in der Bevölkerung beiträgt.

7 Publikationen

7.1 Veröffentlichte Publikationen/Poster

- Soppa VJ, Schins RP, Hennig F, Hellack B, Quass U, Kaminski H, Kuhlbusch TA, Hoffmann B, Weinmayr G. Respiratory effects of fine and ultrafine particles from indoor sources--a randomized sham-controlled exposure study of healthy volunteers. *Int J Environ Res Public Health*. 2014 Jul 4;11(7):6871-89. doi: 10.3390/ijerph110706871.
- Soppa VJ, Weinmayr, G. Hennig, F., Schins, R.P.F., Hellack, B., Quass, U., Kuhlbusch, T.A.J., Hoffmann, B. Respiratory effects of fine and ultrafine particulates from indoor sources- a randomized sham-controlled exposure study of healthy volunteers (presented on Conference of the International Society of Environmental Epidemiology (ISEE), August 24-28, 2014, Seattle, USA.
- Soppa VJ, Hellack B, Quass U, Schins RPF, Kuhlbusch TAJ, Hoffmann B. UFP from indoor sources and physiological changes – a randomized sham-controlled exposure study of healthy volunteers. (Presented on 10th International Particle Toxicology Conference, June 4-7, 2013, Düsseldorf, Germany)
- Thongkam W, Albrecht C, Kolling J, Hellack B, Quass U, Hoffmann B, Kuhlbusch T. In vitro evaluation of oxidative stress and DNA damage induced by particulate matter from different indoor sources. (Presented on 10th International Particle Toxicology Conference, June 4-7, 2013, Düsseldorf, Germany)
- Soppa VJ, Hellack B, Quass U, Schins RPF, Kuhlbusch TAJ, Hoffmann B. UFP from indoor sources and physiological changes – a randomized sham-controlled exposure study of healthy volunteers. (presented on Conference of the International Society of Environmental Epidemiology (ISEE), August 19-23, 2013, Basel, Switzerland; Environmental Health Perspectives; Abstract Number : 4160 | ID : P-2-09-31 <http://ehp.niehs.nih.gov/ehbasel13/p-2-09-31/>)
- B. Hellack, U. Quass, H. Kaminski, C. Asbach, V. Soppa, B. Hoffmann, C. Albrecht, R.P.F. Schins, T.A.J. Kuhlbusch. Characterisation of fine and ultrafine particulate matter from indoor activities. (presented on the 3rd Workplace and Indoor Conference, May 13-26, 2014, Wroclaw, Poland.
- B. Hellack, U. Quass, H. Kaminski, C. Asbach, V. Soppa, B. Hoffmann, C. Albrecht, R.P.F. Schins, T.A.J. Kuhlbusch. Characterisation of fine and ultrafine particulate matter from indoor activities. (presented on the International Aerosol Conference, August 31-5 September, 2014, Busan, South Korea.

7.1.1 Manuskripte in Vorbereitung

- Vanessa J Soppa, Bryan Hellack, Waluree Thongkam, Ulrich Quass, Gudrun Weinmayr, Roel P F Schins, Thomas A J Kuhlbusch and Barbara Hoffmann. UFP from indoor sources and physiological changes – a randomized sham-controlled exposure study of healthy volunteers. *IJHEM* in preparation.
- Vanessa Soppa, Samir Shinnawi, Bryan Hellack, Waluree Thongkam, Ulrich Quass, Gudrun Weinmayr, Roel P F Schins, Thomas A J Kuhlbusch and Barbara Hoffmann. Association of UFP from indoor sources with blood pressure, arterial stiffness and pulse wave velocity in healthy volunteers. In preparation.

7.1.2 Abgeschlossene Qualifizierungsarbeiten

- Thomas Klauke, Titel der Masterarbeit: Innenraumquellen von UFP und ihre Effekte auf Lungenfunktion und pulmonale Inflammation.

7.1.3 Qualifizierungsarbeiten in Vorbereitung

- Samir Shinnawi, Medizinische Doktorarbeit mit dem Titel: Are UFP from indoor sources associated with acute changes in vascular function in healthy volunteers?
Stand: Datenerfassung erfolgt, statistische Analyse in Arbeit.
- Birgitta Sasse, Medizinische Doktorarbeit mit dem Titel: Akute hämatologische und inflammatorische Veränderungen nach Exposition gegenüber UFP aus Innenraumquellen.
Stand: Datenerfassung erfolgt, statistische Analyse in Arbeit.

8 Quellenverzeichnis

- Allen J, Trenga CA, Peretz A, Sullivan JH, Carlsten CC, Kaufman JD. Effect of diesel exhaust inhalation on antioxidant and oxidative stress responses in adults with metabolic syndrome. *Inhal Toxicol.*, 2009, 21(13):1061-67
- Bhargar S, Mullen NA, Hering SV, Kreisberg NM & Nazaroff WW. Ultrafine particle concentrations and exposures in seven residences in northern California. *Indoor Air.* 2011, 21(2):132-44
- Boots AW, Drent M, Swennen EL, Moonen HJ, Bast A, Haenen GR. Antioxidant status associated with inflammation in sarcoidosis: a potential role for antioxidants. *Respir Med* 2009;103):364-372.
- Borm PJA, Keman S, Jetten M, Schins RPF. Endotoxin-binding proteins in nasal lavage: evaluation as biomarkers to occupational endotoxin exposure. *Biomarkers* 2000;5:108-118.
- Bräuner EV, Forchhammer L, Møller P, Simonsen J, Glasius M, Wåhlin P, Raaschou-Nielsen O & Loft S. Exposure to ultrafine particles from ambient air and oxidative stress-induced DNA damage. *Environ Health Perspect.* 2007, 115:1177–1182
- Brook RD, Rajagopalan S, Pope CA, III, Brook JR, Bhatnagar A, ez-Roux AV, Holguin F, Hong Y, Luepker RV, Mittelman MA, Peters A, Siscovick D, Smith SC, Jr, Whitsel L & Kaufman JD. Particulate matter air pollution and cardiovascular disease: An update to the scientific statement from the American Heart Association. *Circulation.* 2010, 121:2331-2378
- Calderon-Garciduenas L, Azzarelli B, Acuna H, Garcia R, Gambling TM, Osnaya N, Monroy S, DEL Tizapantzi MR, Carson JL, Villarreal-Calderon A & Rewcastle B. Air pollution and brain damage. *Toxicol Pathol.* 2002, 30: 373-389
- Calderon-Garciduenas L, Villarreal-Calderon R, Valencia-Salazar G, Henríquez-Rolda'n C, Gutie´rrez-Castello'n P, Torres-Jardo'n R, Osnaya-Brizuela N, Romero L, Torres-Jardo'n R, Solt A & Reed W. Systemic inflammation, endothelial dysfunction, and activation in clinically healthy children exposed to air pollutants. *Inhal Toxicol.* 2008, 20:499–506
- Chuang KJ, Chan CC, Su TC, Lee CT & Tang CS. The effect of urban air pollution on inflammation, oxidative stress, coagulation, and autonomic dysfunction in young adults. *Am J Respir Crit Care Med.* 2007, 176:370–376
- Delfino RJ, Staimer N, Tjoa T, Polidori A, Arhami M, Gillen DL, Kleinman MT, Vaziri ND, Longhurst J, Zaldivar F & Sioutas C. Circulating biomarkers of inflammation, antioxidant activity, and platelet activation are associated with primary combustion aerosols in subjects with coronary artery disease. *Environ Health Perspect.* 2008, 116:898–906
- Diaz-Sanchez D, Tsien A, Casillas A, Dotson AR, Saxon A. Enhanced nasal cytokine production in human beings after in vivo challenge with diesel exhaust particles. *J Allergy Clin Immunol.* 1996 Jul;98(1):114-23.
- DIN EN ISO 14644-1, Reinräume und zugehörige Reinraumbereiche - Teil 1: Klassifizierung der Luftreinheit (ISO 14644-1:1999); Deutsche Fassung EN ISO 14644-1:1999
- Donaldson K, Borm PJA, Stone V, Jimenez LA, Gilmour PS, Schins RPF, Shi T, Rahman I, Faux AP, MacNee W. Respiratory health effects of ambient air pollution particles: the role of reactive species. In: Vallyathan V (Ed.). *Oxygen/Nitrogen radicals: Lung Injury and Disease Series Volume 187*, Marcel Dekker, Inc. New York, 2004, pp. 257-288.
- Forbes LJ, Patel MD, Rudnicka AR, Cook DG, Bush T, Stedman JR, Whincup PH, Strachan DP & Anderson RH. Chronic exposure to outdoor air pollution and markers of systemic inflammation. *Epidemiology*, 2009, 20(2):245-53
- Frampton. Human clinical studies of airborne pollutants. In: Gardner D, ed. *Toxicology of the Lung*. Boca Raton, Fla: Taylor & Francis; 2006: 29–82

- Fromme H, Gabrio T, Lahrz T, Dietrich S, Sagunski H, Herbert Grams, Link B & Twardella D. Verhalten, Vorkommen und gesundheitliche Aspekte von Feinstäuben in Innenräumen, Bayerisches Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit, 2007
- Gerloff K, Pereira DIA, Faria N, Boots AW, Kolling J, Förster I, Albrecht C, Powell JJ, Schins RPF. Influence of simulated gastro-intestinal conditions on particle-induced cytotoxicity and interleukin-8 regulation in differentiated and undifferentiated Caco-2 cells, *Nanotoxicol* 2013;7:353-66. PMID: 22394261
- Ghio AJ, Soukup JM, Case M, Dailey LA, Richards J, Berntsen J, Devlin RB, Stone S & Rappold A. Exposure to wood smoke particles produces inflammation in healthy volunteers. *Occup Environ Med*. 2011 Jun 30. [Epub ahead of print]
- Hauser R, Elreedy S, Hoppin JA, Christiani DC. Upper airway response in workers exposed to fuel oil ash: nasal lavage analysis. *Occup Environ Med*. 1995 May;52(5):353-8.
- Hoffmann B, Moebus S, Dragano N, Stang A, Möhlenkamp S, Schermund A, Memmesheimer M Mann K, Erbel R & Jöckel KH. Chronic residential exposure to particulate matter air pollution and inflammatory markers of atherosclerosis. *Environ Health Perspect* 2009, 117:1302–1308
- IRK. Mitteilungen der Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte der Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes und der Obersten Landesgesundheitsbehörden. Health evaluation of fine particulate matter in indoor air. *Bundesgesundheitsblatt Gesundheitsforschung Gesundheitsschutz*. 2008, 51(11):1370-1378
- Johansson C, Möller P, Forchhammer L, Loft S, Godschalk RW, Langie SA, Lumeij S, Jones GD, Kwok RW, Azqueta A, Phillips DH, Sozeri O, Routledge MN, Charlton AJ, Riso P, Porrini M, Allione A, Matullo G, Palus J, Stepnik M, Collins AR, Möller L. An ECVAG trial on assessment of oxidative damage to DNA measured by the comet assay. *Mutagenesis*. 2010;25:125-32.
- Lundbäck M, Mills NL, Lucking A, Barath S, Donaldson K, Newby DE, Sandström T, Blomberg A. Experimental exposure to diesel exhaust increases arterial stiffness in man. *Part Fibre Toxicol*. 2009 Mar 13;6:7. doi: 10.1186/1743-8977-6-7.
- Luttmann-Gibson H, Suh HH, Coull BA, Dockery DW, Sarnat SE, Schwartz J, Stone PH & Gold DR. Systemic inflammation, heart rate variability and air pollution in a cohort of senior adults. *Occup Environ Med*. 2010, 67(9):625-30. Epub 2010 Jun 2
- McCreanor J, Cullinan P, Nieuwenhuijsen MJ, Stewart-Evans J, Malliarou E, Jarup L, Harrington R, Svartengren M, Han IK, Ohman-Strickland P, Chung KF, Zhang J. Respiratory effects of exposure to diesel traffic in persons with asthma. *N Engl J Med*. 2007 Dec 6;357(23):2348-58.
- Monteiller C, Tran L, MacNee W, Faux S, Jones A, Miller B, Donaldson K. 24. The pro-inflammatory effects of low-toxicity low-solubility particles, nanoparticles and fine particles, on epithelial cells in vitro: the role of surface area. *Occup Environ Med*. 2007 Sep;64(9):609-15.
- Oberdörster G, Finkelstein JN, Johnston C, Gelein R, Cox C, Baggs R & Elder AC. Acute pulmonary effects of ultrafine particles in rats and mice. *Res Rep Health Eff Inst.*, 2000, 96: 5-74
- Oberdörster G. Pulmonary effects of inhaled ultrafine particles. *Int Arch Occup Environ Health* 2001, 74(1):1-8
- Oberdörster G, Sharp Z, Atudorei V, Elder A, Gelein R, Kreyling W & Cox C. Translocation of inhaled ultrafine particles to the brain. *Inhal Toxicol*. 2004, 16: 437-445
- Panasevich S, Leander K, Rosenlund M, Ljungman P, Bellander T, de Faire U, Pershagen G & Nyberg F. Associations of long- and short-term air pollution exposure with markers of inflammation and coagulation in a population sample. *Occup Environ Med*. 2009, 66(11):747-53. Epub 2009 Aug 16
- Peretz A, Sullivan JH, Leotta DF, Trenga CA, Sands FN, Allen J, Carlsten C, Wilkinson CW, Gill EA & Kaufman JD. Diesel exhaust inhalation elicits acute vasoconstriction in vivo. *Environ Health Perspect*. 2008, 116(7):937-42

- Peters A, Dockery DW, Muller JE & Mittleman MA. Increased particulate air pollution and the triggering of myocardial infarction. *Circulation*. 2001, 103(23):2810-5
- Rahman I & MacNee W. Role of oxidants/antioxidants in smoking-induced lung diseases *Free Radic Biol Med*. 1996, 21(5):669-81. Review
- Rich DQ, Kipen HM, Zhang J, Kamat L, Wilson AC & Kostis JB. Triggering of transmural infarctions, but not nontransmural infarctions, by ambient fine particles. *Environ Health Perspect*. 2010, 118(9):1229-34. Epub 2010 Apr 30
- Rückerl R, Ibaldo-Mulli A, Koenig W, Schneider A, Woelke G, Cyrys J, Heinrich J, Marder V, Frampton M, Wichmann HE & Peters A. Air pollution and markers of inflammation and coagulation in patients with coronary heart disease. *Am J Respir Crit Care Med*. 2006, 73(4):432-41. Epub 2005 Nov 17
- Schins RPF, Hoogendijk LMG, Emmen HH, Borm PJA. Nasal inflammatory and respiratory parameters in human volunteers during and after repeated exposure to chlorine. *Eur Respir J* 2000; 16: 626-632.
- Schins RPF, McAlinden A, MacNee W, Jimenez, LA, Ross JA, Guy K, Faux S, Donaldson K. Persistent depletion of I kappa B alpha and interleukin-8 expression in human pulmonary epithelial cells exposed to quartz. *Toxicol Applied Pharmacol* 2000; 167: 107-117.
- Schins RPF, Knaapen AM, Weishaupt C, Winzer A, Borm PJA. Cytotoxic and inflammatory effects of coarse and fine particulate matter in macrophages and epithelial cells. *Ann Occup Hyg* 2002;46(suppl.1);203-206.
- Shi, T; Schins, RPF; Knaapen, AM; Kuhlbusch, T; Pitz, M; Heinrich, J & Borm PJA (2003): Hydroxyl radical generation by electron paramagnetic resonance as a new method to monitor ambient particulate matter composition. *Journal of Environmental Monitoring*, 5, 1-8.
- Steenenbergh PA, Nierkens S, Fischer PH, Van Loveren H, Opperhuizen A, Vos JG, et al. 2001. Traffic-related air pollution affects peak expiratory flow, exhaled nitric oxide, and inflammatory nasal markers. *Arch Environ Health* 56(2):167-174.
- Unosson J, Blomberg A, Sandström T, Muala A, Boman C, Nyström R, Westerholm R, Mills NL, Newby DE, Langrish JP, Bosson JA. Exposure to wood smoke increases arterial stiffness and decreases heart rate variability in humans. *Part Fibre Toxicol*. 2013 Jun 6;10:20. doi: 10.1186/1743-8977-10-20. PMID: 23742058
- Wessels A, Birmili W, Albrecht C, Hellack B, Jermann E, Wick G, Harrison RM, Schins RP. Oxidant generation and toxicity of size-fractionated ambient particles in human lung epithelial cells. *Environ Sci Technol*. 2010;44:3539-45.
- Wichmann, E, Claudia Spix, Thomas Tuch, Gabriele Wölke, Annette Peters, Joachim Heinrich, Wolfgang G Kreyling, and Joachim Heyder. Daily Mortality and Fine and Ultrafine Particles in Erfurt, Germany Part I: Role of Particle Number and Particle Mass. HEI research report 2000.
- Woodin MA, Liu Y, Hauser R, Smith TJ, Christiani DC. Pulmonary function in workers exposed to low levels of fuel-oil ash. *J Occup Environ Med*. 1999 Nov;41(11):973-80.
- Xia Meng, Yanjun Ma, Renjie Chen, Zhijun Zhou, Bingheng Chen and Haidong Kan. Size-Fractionated Particle Number Concentrations and Daily Mortality in a Chinese City. *ENVIRONMENTAL HEALTH PERSPECTIVES* 2013, <http://dx.doi.org/10.1289/ehp.1206398>
- Xu Y, Barregard L, Nielsen J, Gudmundsson A, Wierzbicka A, Axmon A, Jönsson BA, Kårdal M, Albin M. Effects of diesel exposure on lung function and inflammation biomarkers from airway and peripheral blood of healthy volunteers in a chamber study. *Part Fibre Toxicol*. 2013 Dec 9;10:60. doi: 10.1186/1743-8977-10-60.

9 Anhang I

Tabelle 45: Übersicht der probandenspezifischen Exposition; Expo. = Exposition, SD = Standardabweichung, MW = Mittelwert

Probanden ID	Expo. ID	Datum	Expo. Stat Uhrzeit	Expo. Ende	Temp. °C	
					MW	SD
1	3	1/7/2013	9:54	11:54	22.66	0.25
1	4	12/10/2012	10:07	12:07	24.75	0.36
3	1	10/10/2012	10:20	12:20	24.21	0.19
5	2	10/25/2012	9:39	11:39	23.96	0.44
5	3	10/11/2012	11:42	13:42	23.52	0.23
6	1	12/11/2012	9:42	11:42	24.04	0.66
6	2	10/25/2012	10:08	12:08	24.06	0.52
6	2.1	4/3/2013	10:36	12:36	24.16	0.23
6	3	10/11/2012	9:40	11:40	23.65	0.29
6	3.1	2/26/2013	9:44	11:44	24.15	0.61
6	4	2/14/2013	10:00	12:00	23.04	0.44
6	4.1	3/12/2013	9:34	11:34	22.08	0.42
7	1	11/22/2012	10:40	12:40	23.35	0.26
7	2	10/25/2012	11:37	13:37	24.91	0.76
7	2.1	2/25/2013	9:48	11:48	23.41	0.25
7	3	10/11/2012	13:38	15:38	24.01	0.25
7	3.1	6/13/2013	10:09	12:09	23.53	0.41
7	4.1	3/11/2013	10:16	12:16	23.33	0.28
8	4	12/10/2012	10:54	12:54	25.07	0.18
9	1	2/12/2013	9:22	11:22	21.68	0.63
9	2	2/5/2013	9:36	11:36	22.32	0.28
9	2.1	4/2/2013	10:35	12:35	27.3	1.53
9	3	1/22/2013	9:31	11:31	22.36	0.57
9	3.1	3/25/2013	10:43	12:43	24.77	0.51
9	4	1/8/2013	9:57	11:57	22.3	0.44
9	4.1	5/14/2013	10:08	12:08	22.98	0.18
11	1	10/10/2012	11:02	13:02	24.17	0.33
11	2	10/24/2012	10:51	12:51	24.29	0.19
11	2.1	3/26/2013	9:27	11:27	24.27	0.86
11	3	2/13/2013	10:23	12:23		
11	3.1	2/26/2013	10:54	12:54	24.78	0.15
11	4	11/21/2012	10:51	12:51	23.53	0.43
11	4.1	3/12/2013	9:50	11:50	22.15	0.33
12	1	12/11/2012	11:00	13:00	25.06	0.26
13	1	10/10/2012	9:40	11:40	24.02	0.22
13	2	10/23/2012	9:57	11:57	24.96	0.11
13	2.1	4/22/2013	9:43	11:43	24.76	0.21
13	3	10/29/2012	11:31	13:31	21.02	0.61
13	3.1	5/6/2013	9:26	11:26	23.33	0.35

13	4	11/20/2012	9:47	11:47	21.36	0.29
13	4.1	4/8/2013	9:52	11:52	22.73	0.27
14	3	10/9/2012	9:44	11:44	23.83	0.1
17	1	11/26/2012	10:15	12:15	24.72	0.32
17	2	11/12/2012	9:53	11:53	22.9	0.29
17	2.1	5/7/2013	9:54	11:54	23.95	0.84
17	3	10/29/2012	11:11	13:11	21.06	0.7
17	3.1	3/20/2013	10:35	12:35	22.63	0.2
17	4	10/15/2012	10:29	12:29	23.86	0.12
17	4.1	3/6/2013	10:25	12:25	23.34	0.33
20	1	12/11/2012	10:02	12:02	24.35	0.64
20	2	10/23/2012	10:56	12:56	25.07	0.09
20	3	10/9/2012	11:55	13:55	23.84	0.01
20	4	11/20/2012	10:49	12:49	21.45	0.3
22	1	10/16/2012	10:24	12:24	24.97	0.15
22	2	10/30/2012	10:05	12:05	24.23	0.47
22	3	11/27/2012	9:51	11:51	23.52	1.41
22	4	11/13/2012	10:13	12:13	21.87	0.22
23	1	11/22/2012	11:10	13:10	23.54	0.19
23	2	10/25/2012	11:10	13:10	24.84	0.82
23	2.1	4/2/2013	10:06	12:06	27.82	0.77
23	3	10/11/2012	11:11	13:11	23.57	0.23
23	3.1	3/25/2013	11:11	13:11	25.18	0.51
23	4	2/14/2013	11:17	13:17	22.73	1.45
23	4.1	3/19/2013	10:12	12:12	23.04	0.17
24	1	12/18/2012	9:53	11:53	24.71	0.32
24	2	2/4/2013	9:43	11:43	22.94	0.22
24	2.1	5/7/2013	10:54	12:54	23.03	0.21
24	3	12/4/2012	10:05	12:05	24.88	0.32
24	3.1	3/5/2013	10:06	12:06		
24	4	1/29/2013	10:29	12:29	24.12	0.42
24	4.1	5/14/2013	11:00	13:00	23.01	0.15
26	1	10/16/2012	9:43	11:43	24.89	0.2
26	2	10/30/2012	9:40	11:40	23.91	0.42
26	3	11/27/2012	9:31	11:31	23.84	1.48
26	4	11/13/2012	9:42	11:42	21.72	0.26
27	1	12/5/2012	9:37	11:37	24.87	0.44
27	2	2/4/2013	9:30	11:30	22.86	0.32
27	2.1	5/2/2013	10:09	12:09	25.93	0.35
27	3	12/19/2012	9:37	11:37	24.83	0.25
27	3.1	5/6/2013	9:47	11:47	23.19	0.3
27	4	1/30/2013	9:20	11:20	23.43	0.22
27	4.1	3/19/2013	9:58	11:58	23.26	0.62
28	1	11/26/2012	8:35	10:35	23.23	0.81
28	2	11/12/2012	9:31	11:31	22.7	0.37
28	2.1	2/25/2013	9:17	11:17	23.37	0.36
28	3	10/29/2012	10:53	12:53	20.98	0.72

28	3.1	3/25/2013	10:00	12:00	24.19	0.46
28	4	10/15/2012	9:58	11:58	24	0.24
28	4.1	3/19/2013	9:46	11:46	23.51	0.91
29	1	5/27/2013	11:05	13:05	23.84	0.21
29	2	10/23/2012	10:13	12:13	24.99	0.08
29	2.1	2/25/2013	9:30	11:30	23.32	0.3
29	3	10/9/2012	11:10	13:10	23.84	0.02
29	3.1	3/25/2013	10:17	12:17	24.46	0.45
29	4	11/20/2012	10:55	12:55	21.44	0.31
29	4.1	3/11/2013	9:34	11:34	22.82	0.95
30	1	12/6/2012	12:30	14:30	25.37	0.19
30	2	12/20/2012	11:10	13:10	25.71	1.59
30	2.1	3/21/2013	10:26	12:26	25.44	0.26
30	3	1/17/2013	10:20	12:20	24.43	0.67
30	3.1	3/7/2013	10:20	12:20	23.08	0.2
30	4	1/31/2013	10:29	12:29	23.11	0.21
30	4.1	4/4/2013	10:46	12:46	22.88	0.17
31	4	12/10/2012	9:46	11:46	24.55	0.38
32	1	12/5/2012	11:33	13:33	25.51	0.12
32	2	10/24/2012	11:45	13:45	24.08	0.28
32	2.1	3/26/2013	9:40	11:40	24.13	0.78
32	3	2/13/2013	11:50	13:50		
32	3.1	2/26/2013	10:06	12:06	24.48	0.39
32	4	11/21/2012	11:05	13:05	23.67	0.36
32	4.1	3/12/2013	10:05	12:05	22.18	0.32
33	1	10/16/2012	11:05	13:05	24.84	0.26
33	2	10/30/2012	10:24	12:24	24.44	0.42
33	2.1	4/3/2013	9:49	11:49	23.83	0.4
33	3	11/27/2012	10:17	12:17	22.92	1.04
33	3.1	3/20/2013	9:40	11:40	22.64	0.17
33	4	11/13/2012	10:32	12:32	21.94	0.21
33	4.1	3/6/2013	10:05	12:05	23.18	0.31
34	1	10/16/2012	11:42	13:42	24.71	0.23
34	2	10/30/2012	10:52	12:52	24.67	0.29
34	2.1	4/3/2013	10:13	12:13	24.04	0.24
34	3	11/27/2012	10:45	12:45	22.87	1
34	3.1	3/20/2013	9:21	11:21	22.65	0.25
34	4	11/13/2012	11:01	13:01	22	0.18
34	4.1	3/6/2013	10:15	12:15	23.26	0.33
35	1	2/12/2013	11:20	13:20	22.5	0.13
35	2	2/5/2013	9:57	11:57	22.42	0.23
35	2.1	5/2/2013	10:31	12:31	26.11	0.28
35	3	1/22/2013	10:56	12:56	23.43	0.25
35	3.1	5/16/2013	10:00	12:00	23.45	0.24
35	4	1/29/2013	10:15	12:15	23.98	0.48
35	4.1	4/18/2013	10:43	12:43	23.64	0.18
36	1	11/26/2012	11:06	13:06	25.11	0.24

36	2	11/12/2012	11:12	13:12	23.25	0.21
36	2.1	4/16/2013	9:51	11:51	24.17	0.26
36	3	12/19/2012	9:57	11:57	24.92	0.16
36	4	1/8/2013	10:36	12:36	22.05	0.47
37	1	11/26/2012	11:30	13:30	25.25	0.2
37	2	11/12/2012	11:42	13:42	23.3	0.21
37	2.1	4/16/2013	10:05	12:05	24.25	0.21
37	3	12/4/2012	11:35	13:35	25.66	0.3
37	4	1/8/2013	11:00	13:00	21.93	0.48
37	4.1	5/14/2013	9:47	11:47	22.91	0.19
38	1	11/26/2012	9:40	11:40	24.26	0.56
38	2	10/24/2012	10:00	12:00	24.26	0.14
38	4	11/21/2012	9:46	11:46	22.86	0.71
39	1	11/26/2012	9:11	11:11	23.74	0.82
39	2	10/24/2012	10:36	12:36	24.32	0.13
39	3	2/13/2013	9:50	11:50		
39	4	11/21/2012	10:07	12:07	23.22	0.43
40	1	11/22/2012	9:55	11:55	22.93	0.44
40	2	10/25/2012	10:41	12:41	24.62	0.97
40	2.1	5/7/2013	11:20	13:20	23.13	0.47
40	3	1/17/2013	11:40	13:40	24.07	0.95
40	3.1	3/5/2013	9:30	11:30		
40	4.1	4/4/2013	10:15	12:15	22.83	0.21
41	1	12/11/2012	10:27	12:27	24.72	0.48
41	2	1/15/2013	9:50	11:50	23.32	0.36
41	3	12/4/2012	10:38	12:38	25.19	0.32
41	4	2/14/2013	10:27	12:27	23.25	0.25
42	1	12/5/2012	10:27	12:27	25.29	0.2
42	2	1/16/2013	9:51	11:51	23.38	0.5
42	2.1	4/16/2013	10:35	12:35	24.33	0.19
42	3	1/22/2013	10:26	12:26	23.16	0.47
42	3.1	6/13/2013	10:33	12:33	23.72	0.27
42	4	1/30/2013	10:02	12:02	23.51	0.2
42	4.1	5/14/2013	10:39	12:39	23.01	0.16
44	1	12/5/2012	11:06	13:06	25.45	0.12
44	2	1/16/2013	10:24	12:24	23.81	0.44
44	2.1	5/2/2013	9:46	11:46	25.66	0.4
44	3	12/19/2012	10:30	12:30	24.95	0.13
44	3.1	5/16/2013	9:40	11:40	23.43	0.22
44	4	1/30/2013	10:39	12:39	23.52	0.18
44	4.1	4/18/2013	10:13	12:13	23.59	0.19
45	1	12/6/2012	11:09	13:09	25.09	0.17
45	2	12/20/2012	10:31	12:31	26.79	1.62
45	2.1	4/22/2013	10:37	12:37	24.72	0.18
45	3	1/17/2013	10:40	12:40	24.2	0.85
45	3.1	5/15/2013	10:04	12:04	23.32	0.17
45	4	1/31/2013	10:12	12:12	23.11	0.21

45	4.1	4/17/2013	10:13	12:13	23.31	0.24
46	1	12/6/2012	9:50	11:50	24.34	0.54
46	2	12/20/2012	9:48	11:48	27.68	0.67
46	2.1	3/21/2013	9:40	11:40	25.38	0.28
46	3	1/17/2013	9:56	11:56	24.69	0.19
46	3.1	3/7/2013	10:00	12:00	23.34	0.59
46	4	1/31/2013	9:53	11:53	23.14	0.21
46	4.1	4/4/2013	10:02	12:02	22.8	0.23
47	1	12/6/2012	10:33	12:33	24.84	0.37
49	1	12/6/2012	9:10	11:10	23.59	0.7
49	2	12/20/2012	9:20	11:20	27.45	0.62
49	2.1	3/21/2013	9:19	11:19	25.3	0.32
49	3	1/17/2013	9:26	11:26	24.43	0.53
49	3.1	3/7/2013	9:30	11:30	23.66	0.69
49	4	1/31/2013	9:28	11:28	23.1	0.23
49	4.1	4/4/2013	9:46	11:46	22.71	0.26
50	1	12/18/2012	9:22	11:22	24.31	0.52
50	2	1/15/2013	11:09	13:09	23.85	0.2
50	2.1	4/2/2013	8:45	10:45	25.56	1.9
50	3	12/4/2012	9:46	11:46	24.67	0.39
50	3.1	3/5/2013	11:32	13:32		
50	4	1/29/2013	11:05	13:05	23.85	0.79
50	4.1	4/9/2013	10:00	12:00	23.02	0.27
51	1	12/6/2012	11:46	13:46	25.24	0.13
52	1	12/18/2012	10:25	12:25	24.92	0.19
52	2	1/15/2013	10:50	12:50	23.76	0.24
52	2.1	3/26/2013	10:26	12:26	23.91	0.23
52	3	12/4/2012	11:58	13:58	25.83	0.26
52	3.1	2/26/2013	10:23	12:23	24.65	0.29
52	4	2/14/2013	11:00	13:00	23.29	0.32
52	4.1	3/12/2013	10:24	12:24	22.15	0.32
53	1	1/23/2013	9:58	11:58	22.91	0.89
53	2	2/5/2013	9:20	11:20	22.21	0.31
53	2.1	5/2/2013	12:09	14:09	25.55	0.48
53	3.1	5/16/2013	11:05	13:05	23.34	0.3
53	4	1/30/2013	11:00	13:00	23.49	0.19
53	4.1	4/9/2013	10:49	12:49	23.12	0.24
54	1	1/23/2013	11:05	13:05	23.94	0.3
54	2	2/5/2013	11:06	13:06	22.34	0.43
54	2.1	4/3/2013	11:28	13:28	24.29	0.29
54	3	1/7/2013	11:14	13:14	23	0.33
54	3.1	5/15/2013	9:43	11:43	23.22	0.22
54	4	1/29/2013	11:34	13:34	23.5	0.91
54	4.1	3/6/2013	10:37	12:37	23.43	0.32
56	1	1/23/2013	10:30	12:30	23.59	0.64
56	2	1/16/2013	11:23	13:23	24.44	0.3
56	2.1	5/7/2013	10:14	12:14	23.68	0.81

56	3.1	4/23/2013	10:20	12:20	23.1	0.3
56	4	1/30/2013	9:42	11:42	23.47	0.21
56	4.1	4/9/2013	10:33	12:33	23.1	0.25
57	1	5/22/2013	9:20	11:20		
57	2	1/16/2013	12:04	14:04	24.63	0.32
57	2.1	5/7/2013	14:07	16:07	24.66	0.07
57	3	2/13/2013	10:44	12:44		
57	3.1	3/20/2013	10:55	12:55	22.59	0.19
57	4.1	3/6/2013	11:00	13:00	23.61	0.3
58	4	1/30/2013	10:21	12:21	23.52	0.2
59	1	2/12/2013	9:49	11:49	21.99	0.48
59	2.1	2/25/2013	10:50	12:50	23.34	0.45
59	3.1	3/25/2013	9:48	11:48	23.98	0.57
59	4.1	3/11/2013	9:58	11:58	23.18	0.51
60	3.1	3/7/2013	9:45	11:45	23.55	0.69
64	1	5/28/2013	9:45	11:45	24.25	0.22
64	2.1	3/21/2013	10:43	12:43	25.47	0.26
64	3.1	3/7/2013	10:55	12:55	22.97	0.17
64	4.1	4/4/2013	11:07	13:07	22.88	0.16
66	1	5/28/2013	9:15	11:15	24.2	0.25
66	2.1	5/7/2013	9:34	11:34	24.17	0.77
66	3.1	4/23/2013	9:34	11:34	23.22	0.23
66	4.1	4/9/2013	9:43	11:43	22.96	0.28
67	1	5/22/2013	9:55	11:55		
67	2.1	3/21/2013	10:02	12:02	25.4	0.26
67	3.1	3/7/2013	11:15	13:15	22.97	0.16
68	4.1	4/8/2013	11:25	13:25	22.73	0.26
69	1	5/27/2013	10:22	12:22	23.79	0.21
69	2.1	4/22/2013	10:15	12:15	24.75	0.2
69	3.1	6/13/2013	9:49	11:49	23.43	0.4
69	4.1	4/8/2013	10:22	12:22	22.7	0.28
70	1	5/23/2013	9:41	11:41	23.9	0.25
70	2.1	5/2/2013	11:24	13:24	25.96	0.47
70	3.1	5/16/2013	10:45	12:45	23.35	0.3
70	4.1	4/18/2013	11:20	13:20	23.69	0.15
71	1	5/23/2013	10:04	12:04	23.94	0.21
71	2.1	5/2/2013	11:48	13:48	25.77	0.54
71	3.1	5/16/2013	11:25	13:25	23.26	0.29
71	4.1	4/4/2013	10:34	12:34	22.86	0.19
72	1	5/28/2013	9:40	11:40	24.24	0.23
72	2.1	5/7/2013	10:33	12:33	23.35	0.65
72	3.1	4/23/2013	9:52	11:52	23.19	0.25
72	4.1	4/9/2013	10:13	12:13	23.06	0.27
73	2.1	4/22/2013	12:36	14:36	25.18	0.26

Fortsetzung der Tabelle

Probanden ID	rel. Feuchte	FMPS Anzahl [# / cm ³]				
--------------	--------------	------------------------------------	--	--	--	--

	%		< 10 nm		10 - 30 nm	
	MW	SD	MW	SD	MW	SD
1	48.67	0.98	77646.33	7440.11	559304.64	33300.3
1	30.43	0.39	3911.43	1939.07	64288.36	24769.59
3	33.43	0.33	234.41	37.81	1362.05	80.51
5	44.04	2.67	252873.15	26297.83	1019992.84	62547.94
5	36.36	1.13	61159.03	14662.62	387349.8	70795.87
6	26.36	0.53	69.93	57.29	508.6	166.52
6	43.49	3.01	252091.13	24331.46	1010838.78	57434.2
6	23.69	0.44	408000.25	41944.17	1509199.32	109640.61
6	35.71	0.61	53656	9328.29	362845.67	48590.19
6	35.67	0.87	96975.16	17073.96	718550.74	97995.6
6	22.03	0.65	3596.38	1964.24	55167.19	20652.75
6	29.16	0.99	7886.74	5840.81	117299.67	60018.86
7	36	0.52	54.29	61.15	1138.67	98.39
7	40.62	2.71	272410.11	31361.93	1019344.69	65251.91
7	33.89	0.68	459446.62	32676.28	1796864.53	100041.15
7	34.66	0.31	61232.58	8541.94	385644.39	32488.04
7	51.69	1.22	85720.93	12855.89	658420.82	68116.62
7	19.93	0.5	6896.98	1515.11	114806.56	19172.51
8	30.19	0.33	3487.36	2087.25	54168.14	22646.91
9	21.82	0.67	299.83	105.15	868.76	374.75
9	37.37	0.51	154847.89	45921.12	1071137.78	118426.3
9	21.18	1.34	455866.45	53834.75	1721180.6	190800.86
9	31.88	0.38	62421.01	6231.49	506643.93	32875.5
9	30.94	7.23	66376.94	23669.32	537485.93	151949.14
9	44.6	1.26	11632.48	6928.93	132645.44	57485.53
9	39.62	0.84	2435.85	1348.09	57915.36	29054.79
11	32.97	0.78	298.04	66.18	1330.04	97.73
11	40.82	1.92	294127.07	21224.96	1068656.27	65538.24
11	19.93	1.57	417360.98	66486.96	1572827.69	190731.83
11			51748.79	16282.12	455453.99	121872.46
11	35.66	0.93	97162.24	16166.21	717992.3	99085.33
11	30.7	1.74	13062.05	5999.94	117273.19	35020.11
11	29.32	0.87	8343.62	6810.17	119804.51	67863.88
12	24.78	1.04	45	53.88	349.11	42.27
13	33.33	0.44	192.56	36.44	1447.28	84.05
13	46.54	1.03	297769.77	21369.2	1094664.74	51533.84
13	32.62	1.34	460152.56	30557.33	1650084.4	79414.68
13	37.64	1.78				
13	43.14	2.95	108626.69	17847.5	727695.14	72128.56
13	41.18	0.96	10484.55	6690.17	101535.78	47472.91
13	27.11	1.39	5920.45	2328.8	115610.37	33207.95
14	43.76	0.83	57963.65	14271.85	398016.12	71181.06
17	32.71	0.51	647.39	388.42	1734.97	1280.32
17	44.62	1.18	272267.23	47608.59	1262393.7	127790.45
17	43.46	2.87	277831.46	22696.94	1336815.64	78348.05

17	38.47	2.75	72278.95	19916.57	442572.26	134345.64
17	39.21	0.57	90004.71	16119.96	635359.04	101650.78
17	43.48	0.52	11165.96	4636.39	106886.31	32654.75
17	31.31	1.01	3698.31	2798.24	74976.18	43337.74
20	26	0.53	66.95	54.89	485.05	156.94
20	46.83	0.87	283286.46	17691.64	1068818.08	59383.54
20	39.47	1.81	70235.94	11424.93	442975.57	51680.08
20	41.75	0.79	10855.87	5932.45	108935.9	38115.71
22	31.72	0.66	646.72	63.8	1477.05	70.4
22	40.6	0.92	374570.41	20831.7	1246407.53	69122.03
22	42.63	3.04	58120.17	17057.52	422107.73	105266.4
22	42.58	2.89	3673.66	3091.91	85266.72	45842.15
23	35.52	0.51	85.16	86.53	1036.24	136.59
23	41.49	2.59	271590.51	31038.43	1024422.66	65153.75
23	20.37	0.7	477209.47	50607.48	1786977.11	168758.18
23	36.64	0.79	59010.91	15232.78	384633.39	72705.35
23	35.79	7.55	61340.81	18750.38	507816.86	121010.42
23	21.79	1.23	3007.08	2112.62	44034.15	27138.43
23	35.2	1.66	6666.94	5822.26	91596.4	57480.22
24	34.77	0.47	46.09	24.3	383.9	39.25
24	40.04	0.48	372796.19	22586.71	1276136.38	76445.46
24	41.3	0.3	283757.44	25095.93	1332908.12	73799.36
24	34.08	0.27	67954.77	10312.95	473376.57	42249.15
24			76235.61	22359.22	590395.71	122993.63
24	39.61	0.46	7640.88	4764.5	105743.79	43934.69
24	39.69	1.01	1949.5	630.32	48456.08	19600.36
26	31.15	0.39	555.2	96.94	1418.41	81.25
26	41.07	0.91	371842.9	21156.02	1244964.36	64981.88
26	41.68	2.75	58127.67	16652.64	413705.28	100583.76
26	40.76	1.12	3548.08	3254.75	77425.17	49522.67
27	30.5	0.5	17.78	23.03	477.76	109.54
27	40.08	0.5	372427.7	22272.49	1281305.88	79291.38
27	32.91	0.95	475116.06	35285.38	1681516.98	102746.22
27	39.08	0.3	60135.19	14567.27	466783	88723.84
27	42.19	2.79	109373.65	17124.16	729498.44	76032.6
27	48.66	1.18	5690.44	3656.25	79403.62	33889.6
27	34.23	2.51	6510.15	5309.47	89881.08	53673.01
28	33.81	0.5	172.56	102.63	662.04	210.17
28	44.97	1.13	299418.04	66503.35	1338320.67	177214.38
28	33.28	1.46	461155.27	33711.51	1818207.09	110488.36
28	39.53	3.52	69620.23	22336.91	449635.18	164199.59
28	24.96	2.59	81113.67	22719.49	628692.69	137050.99
28	43.3	0.86	10547.64	4699.9	103222.18	31372.03
28	33.25	2.95	6535.38	5271.83	91729.39	52876.09
29	35.07	0.95	199.45	36.18	702.51	127.22
29	46.75	0.93	293132.19	21885.25	1085416.77	57765.74
29	33.76	0.7	464908.23	34432.51	1816380.93	109920.07

29	41.36	1.17	65039.17	16080.96	417413.89	76742.01
29	27.22	5.07	75203.77	23556.09	596316.3	143177.87
29	41.83	0.78	10220.07	5518.14	106529.05	36507.71
29	20.33	0.61	7064.68	1914.43	114882.89	23531.65
30	23.96	0.77	29.89	34.58	471.73	98.98
30	29.96	1.83	318900.7	147802.34	1154576.25	457330.75
30	29.79	1.01	412415.92	47481.6	1568056.14	145118.43
30	26.06	0.88	67922.38	8513.58	511241	35572.09
30	35.94	1.08	102396.61	25186.93	686137.44	133816.89
30	37.27	1.26	4707.6	4271.28	61414.36	31747.62
30	29.36	0.67	2211.45	803.51	50517.12	17042.9
31	30.63	0.37	4150.51	2512.7	66584.36	27839.12
32	28.58	1.18	19.58	24.78	450.29	78.21
32	42.29	2.55	298934.6	43063.36	1079932.62	106239.31
32	20.35	1.24	401842.23	52438.16	1523253.08	141408.49
32			47438.31	21995.91	401703.97	167208.04
32	35.92	0.63	94493.24	14750.8	710934.67	86230.07
32	30.02	1.4	12942.9	6413.67	114072.99	39445.73
32	29.4	0.81	9145.21	6853.44	130866.11	70179.03
33	32.62	1	805.8	214.58	1787.16	493.54
33	40.23	0.85	379531.19	22355.23	1262784.92	74532.86
33	23.44	0.53	438782.5	38795.15	1564062.75	110136.21
33	44.05	2.55	60274	17622.61	442160.59	112626.96
33	38.59	0.94	92106.53	15741.34	647661.64	77290.42
33	44.32	4.09	3489.65	3130.18	82003.68	46458.74
33	31.12	1.27	3444.41	2577.36	70921.98	40533.15
34	33.39	0.83	897.3	212.77	2102.81	559.21
34	39.54	0.88	382595.33	23129.67	1267208.2	73363.82
34	23.63	0.47	425428.71	47544.33	1552027.01	119281.9
34	43.97	2.56	58269.56	17334.2	435456.73	112135.8
34	38.06	1.36	95379.35	16823.34	661142.14	81531.07
34	46.91	4.94	3529.69	2904.88	89531.37	41239.83
34	31.26	1.07	3660.81	2752.83	73229.09	42469.37
35	19.41	0.66	196.1	5.68	460.02	35.42
35	37.13	0.63	135905.88	39204.9	1016867.51	109642.06
35	32.44	0.77	475441.67	34751.73	1680488.87	102567.36
35	31.01	0.88	60476.9	9245.41	480150.33	61596.12
35	52.02	3.33	89394.33	11239.71	745329.51	57922.01
35	39.51	0.44	7261.33	4239.76	101095.47	41716.08
35	35.81	3.57	4783.5	6376.85	64934.94	47922.05
36	32.13	0.46	890.36	349.99	3649.8	2047.04
36	43.1	1.6	227831.13	26697.49	1155960.65	88059.69
36	44.81	3.54	410087.62	27672.34	1697996.48	95791.69
36	39.16	0.27	63908.35	16669.76	464047.35	91448.97
36	45.14	1.26	10322.91	6420.51	122411.56	52481.4
37	31.77	0.53	906.58	331.4	4436.21	1585.19
37	42.31	1.58	225951.63	28094.81	1136000.95	91963.94

37	43.63	3.16	416400.86	29870.88	1711254.71	98637.39
37	33.08	0.7	63318.28	9084.81	468672.46	37864.05
37	45.37	1.13	9923.31	6415.7	118304.3	51333.23
37	39.34	0.91	2880.39	1420.67	65889.22	28698.98
38	33.11	0.45	359.09	210.79	948.71	428.96
38	40.59	1.81	294424.94	20375.35	1076305.47	66048.79
38	32.91	1.78	11929.36	5749.41	119140.71	38572.38
39	33.43	0.57	288.23	211.62	879.92	438.46
39	40.8	1.95	292611.54	21218.82	1069072.88	65500.52
39			54690.94	12483.21	477204.14	85894.73
39	31.96	1.47	13349.68	5049.16	126412.84	33515.57
40	36.62	0.76	56.07	18.31	1159.74	87.34
40	43.03	2.84	269629.53	33197.88	1028381.19	63571.25
40	42.7	3.28	282882.66	22547.86	1334918.22	59681.97
40	25.57	1.8	68626.74	16747.39	511186.32	73958.35
40			78520.39	17067.93	616702.74	85048.11
40	28.7	1.42	2266.04	749.32	51520.66	15840.97
41	25.56	0.78	49.6	52.46	399.61	71.08
41	22.76	0.32	293294.84	56167.86	1288494.76	114796.73
41	33.83	0.38	65829.6	8934.25	474800.11	41041.69
41	22.23	0.65	3307.66	1823.05	53071.45	20844.7
42	29.97	0.39	16.69	21.81	470.74	107.63
42	25.21	0.39	468950.74	29490.48	1504460.18	80595.29
42	41.94	2.29	421699.05	31539.24	1718338.17	103366.53
42	31.49	0.73	61358.31	8594.69	490735.68	49245.6
42	50.86	1.27	84608.95	12616.11	645707.27	64525.31
42	49.48	1.21	4165.28	2594.36	64866.5	23472.23
42	39.77	0.85	1956.14	624.73	47881.15	18714.66
44	29.3	0.84	16.58	24.41	451.79	78.49
44	24.98	0.53	465768.53	28356.62	1499672.93	89734.72
44	33.83	1.72	477151.52	33327.76	1691615.26	91760.43
44	39.22	0.32	63320	17191.43	462603.87	98952.67
44	52.78	2.3	90576.9	13071.75	749248.54	57061.88
44	49.95	1.1	3947.65	3236.84	61950.12	26552.48
44	39.49	4.71	5358.16	6344	73359.67	50420.78
45	25.61	0.62	27.48	35.24	449.32	151.29
45	29.18	1.94	416296.45	98531.75	1431310.63	260540.34
45	31.48	1.02	450419.98	29970.59	1628831.76	83055.99
45	26.32	0.93	69867.12	9195.78	517704.22	36999.37
45	51.11	1.63	92087.6	12105.21	673251.59	74672.27
45	37.53	1.12	5087.42	4322.03	64020.88	32961.75
45	48.39	1.93	4133.54	1607.48	89195.98	30197.33
46	26.48	0.39	23.66	36.51	368.53	74.62
46	27.77	0.51	469830.85	71848.71	1559396.82	180426.54
46	29.61	1.13	410894.8	52108.05	1550032.73	160461.25
46	25.54	0.33	65726.41	7232.53	510661.29	35572.37
46	35.08	1.95	101023.57	25652.81	682627.85	132171.66

46	37.66	0.91	4942.63	3347.83	68189.97	34541.85
46	28.31	1.73	2102.51	693.96	47572.08	13705.18
47	26.15	0.49	19.25	27.77	383.55	127.74
49	26.72	0.32	32.06	38.06	431.1	87.17
49	28.22	1.04	490618.91	22543.78	1589187.29	86612.2
49	29.39	1.08	404709	56074.06	1543151.72	169676.7
49	25.55	0.45	66550.36	9982.61	515005.74	55223.65
49	33.28	2.86	96046.44	24152.65	671255.14	120914.25
49	37.35	1.12	4436.72	3259.44	63855.17	34063.48
49	27.61	1.94	2182.13	793.89	48833.17	14311.06
50	35.31	0.62	65.99	28.74	401.64	55.72
50	22.51	0.36	252385.83	39885.62	1180708.73	103746.54
50	20.24	0.47	424086.57	161259.95	1484082.31	620617.28
50	34.2	0.29	68956.98	9926.73	472532.3	40852.05
50			66723.74	30559.69	526708.88	215825.19
50	40.99	2.02	7338.82	4691.22	102118.04	44758.53
50	34.22	1.44	2960.66	704.02	79651.59	14754.74
51	24.98	0.78	31.7	34.62	492.18	132.49
52	34.28	0.64	38.01	22.27	373.92	35.01
52	22.59	0.25	251789.74	37293.07	1190888.72	83436.4
52	20.74	0.7	377173.36	48768.61	1446641.5	138830.09
52	32.7	0.67	63550.21	7114.08	478180.45	28673.03
52	35.96	0.58	94368.57	15022.72	707582.68	87664.8
52	22.06	1.01	3325.74	1969.73	50457.82	23035.24
52	29.54	0.62	8731.92	5958.11	129518.09	60398.11
53	25.1	0.77	69.06	28.86	729.03	166.07
53	37.43	0.45	168032.68	44893.22	1109058.9	127884.29
53	32.37	0.45	509581.64	31005.89	1696223.84	77022.82
53	46.75	3.86	96329.35	11549.78	744727.59	57053.42
53	49.92	1.18	4093.35	3203.09	63749.44	26383.44
53	35.21	0.62	2789.72	636.88	74094.84	16441.08
54	23.4	1.11	48.8	31.4	663.96	192.95
54	35.63	1.25	79575.9	41897.19	744429.94	345750.39
54	23.12	1.11	364448.89	104144.93	1384027.08	364172.09
54	47.39	2.83	62193.07	31193.57	446898.09	206838.45
54	50.52	1.85	93628.82	12345.26	670200.2	76000.3
54	41.98	2.05	5546.25	4060.43	82380.22	37183.06
54	31.22	1.08	3657.04	2791.69	74957.5	43007.05
56	24.41	1.09	61.54	33.65	729.5	165.62
56	24.06	0.71	469183.34	26618.32	1504244.17	73992
56	42.53	2.43	276777.94	22656.97	1328978.06	73272.37
56	45.4	4.95	79339.76	14466.4	614023.28	77403.04
56	49.01	1.19	5210.65	3621.79	72449.8	30794.44
56	35.03	0.86	2796.11	679.88	74215.14	16739.14
57			355.68	58.67	773.5	119.9
57	23.21	0.96	421275.43	141637.5	1352591.14	425712.2
57	40.32	0.97	345667.63	27620.96	1451464.24	87573.6

57			51185.55	16353.1	449816.86	121244.39
57	39.28	0.47	90369.76	16463.99	637010.56	97507.37
57	30.98	1.38	3194.47	1727.76	72153.44	29903.78
58	49.77	1.15	4199.88	3369.68	62729.78	27422.74
59	21.35	0.8	244.47	53.69	664.55	197.33
59	33.65	1.16	396205.3	134931.41	1581891.42	500781.22
59	24.01	1.57	86014.9	22197.13	644751.86	132379.33
59	20.2	0.65	7230.48	1237.85	119053.17	15620.79
60	34.19	2.46	100488.35	25535.94	680570.78	132569.43
64	37.57	1.41	164.23	16.22	770.3	116.13
64	29.67	1.14	415854.48	49752.86	1571071.91	143665.17
64	37.55	2.96	98768.99	21099.88	678126.02	109087.48
64	29.45	0.57	2195.14	794.07	48892.11	17632.13
66	38.17	0.95	180.1	32.12	816.62	108.09
66	44.31	2.8	286054.2	22945.33	1353955.64	82193.99
66	41.1	1.37	84441.38	14330.8	629675.52	74647.72
66	33.57	1.67	2849.9	800.13	76791.36	18505
67			403.15	37.5	873.71	94.68
67	29.79	1.02	407575.72	52379.98	1541787.99	155824.7
67	39.52	4.41	91536.68	22171.31	645314.84	113647.64
68	24.08	1.05	5271.13	2507.18	102075.86	38793.54
69	35.65	0.61	161.81	31.19	593.57	82.06
69	31.93	1.33	455700.67	33094.89	1639632.57	87727.88
69	52.88	2.16	86902.38	12940.08	664455.25	71619.27
69	26.1	1.41	5371.83	1689.2	109782.83	28007.36
70	33.41	0.53	340.84	136.44	1101.96	37.54
70	32.09	0.38	491440.99	40127.28	1685047.54	93525.08
70	48.58	4.54	93075.46	11217.03	742471.48	56046.56
70	32.79	2.59	4600.24	4112.55	71577.5	36620.93
71	33.27	0.59	349.89	111.2	1166.14	101.61
71	32.22	0.48	500456.87	36773.27	1688789.93	89711.87
71	45.23	2.5	96994.68	11446.02	742720.93	60139.55
71	29.17	0.99	2287.89	735.59	51883.44	15707.41
72	37.71	1.39	165.84	18.45	776.11	113.58
72	41.79	1.59	277457.36	22870.9	1331540.15	74796.71
72	42.4	2.67	82495.17	14518.77	626290.95	78615.05
72	34.62	1.17	2828.9	680.39	76631.63	14233.22
73	29.2	1.13	462759.6	29054.89	1696341.51	94684.19

Fortsetzung der Tabelle

Probanden						
ID	FMPS Anzahl [# / cm ³]					
	30 - 50 nm		50 - 100 nm		100 - 250 nm	
	MW	SD	MW	SD	MW	SD
1	368548.89	26643.25	143245.08	15576.98	3407.86	564.58
1	87330.62	28065.03	63082.68	27968.34	5679.61	2789.46
3	3407.26	226.61	4856.16	275	1909.96	80.54
5	353447.93	29043.95	110663.76	16437.62	8698.21	2378.68

5	186198.17	43312.21	57778.34	19439.03	2294.51	1086.56
6	490.92	56.94	654.41	37.42	619.09	18.47
6	343077.31	24253.2	107146.41	14745.32	10125.92	1870.56
6	473153.58	25062.79	171463.7	17634.59	18859.57	4532.51
6	203129.5	44049.31	73726.85	26328.78	2798.35	1045.57
6	556922.75	67818.54	269377.36	50246.87	9841.06	3293.97
6	94264.08	21199.52	100242.2	21823.49	10354.8	2905.74
6	213212.03	77161.99	279440.75	92588.25	54279.34	19452.7
7	1460.57	100.21	1204.28	75	430.08	8.25
7	328121.59	23881.48	98727.87	11366.99	13345.27	3457.18
7	571043.73	24850.12	215503.15	12960.39	24898.55	3204.54
7	172074.92	32392.21	50696.09	16171.06	8201.18	3238.85
7	582132.34	52159.54	353361.03	53265.78	20526.26	4374.42
7	169978.17	15500.92	134407.83	19356.06	13330.27	2833.61
8	79460.8	28929.73	62800.94	25740.34	6094.02	2239.92
9	446.91	33.32	610.22	41.55	933.2	32.7
9	328847.38	18894.06	69244.26	5852.27	5148.05	1012.84
9	493740.3	28804.55	159520.77	20797.24	14397.11	5106.01
9	322521.76	29244.04	104556.98	17410.18	2124.13	350.52
9	471186.26	111959.65	333889.85	158899.45	28364.45	26731.37
9	123482.47	46688.35	71412.18	30065.8	6252.42	3271.05
9	240684.81	48317.27	448531.75	40472.52	128441.09	27287.2
11	3106.33	409.19	4507.29	523.08	1774.48	218.21
11	318634.77	17228.29	86522.7	5527.03	5660.52	1330.2
11	499015.49	24556.55	190303.28	32125.49	23135.25	7954.04
11	343242.6	78368.58	137436.51	27292.07	3164.47	416.26
11	560153.94	72987.19	278435.92	43178.99	11501.92	2447.34
11	117986.11	30968.09	85143	31116.32	11327.87	5340.96
11	206948.32	80658.71	260893.4	87886.75	49548.48	16660.2
12	422.95	19.84	639.91	14.42	644.89	18.59
13	3286.52	389.44	4694.78	486.77	1887.58	110.65
13	340565.83	13727.54	94322.92	3943.14	4240.11	559.88
13	497261.64	18927.69	175107.05	12020.79	18211.49	2989.55
13						
13	460617.61	52553.49	201470.53	32805.87	7145.02	2418.22
13	91743.03	33366.12	64551.64	27328.43	8537.07	3905.77
13	256046.2	58395.93	301466.23	84099.56	53085.88	26352.36
14	266230.39	47920.1	125773.87	40585.33	8050.59	2848.43
17	653.2	68.64	963.45	64.89	524.22	26.52
17	390730.56	21107.8	110694.06	4286.23	8165.5	1540.97
17	608793.03	30637.95	281917.94	26310.32	22049.74	4505.45
17	234979.53	34137.27	194457.36	60403.43	21330.97	8063.66
17	467801.3	56820.55	222971.15	30781.65	8272.96	1562.9
17	72819.87	24267.42	39515.2	23113.54	4386.31	3161.49
17	173192.04	57774.82	230101.98	69720.24	38256.89	20429.86
20	476.23	58.57	656.64	29.94	629.75	10.72
20	342494.28	11450.24	96847.97	3096.18	4883.07	882.31

20	244179.44	30881.38	87356.39	13685.73	3700.33	688.94
20	113316.99	35149.39	87870.33	35809.34	11545.73	4928.39
22	792.54	25.37	880.58	37.79	477.25	17.99
22	310454.88	14117.26	61667.86	3240.27	7197.08	1739.97
22	292640.03	67136.62	124624.48	29923.51	4856.74	1213.19
22	101270.07	41702.1	98863.1	42653.06	16852.06	8781.51
23	1481.75	72.24	1241.64	54.49	432.12	9.8
23	326031.76	22602.08	94637.15	8412.68	11102.16	3016.37
23	494256.42	29329.1	150589.56	19724.23	12217.15	4171.93
23	191615.23	41946.68	61193.05	17973	2491.96	947.55
23	511183.76	83440.13	448608.15	154052.14	54413.46	39787.91
23	79617.01	41700.31	107996.85	63973.66	19172.58	16973.97
23	181753.59	70585.76	316204.1	102201.24	90356.13	27465.53
24	652.9	24.39	781.25	38.47	469.72	13.91
24	331065.92	14804.19	66170.61	2728.61	3037.42	1221.87
24	613249.11	22928.19	281651.43	16009.47	19421.89	4258.81
24	203233.4	35123.35	50027.78	13485.65	1393.99	314.27
24	462469.08	75920.77	242847.78	45700.63	12759.7	2697.89
24	113724.62	19379.38	74425.44	17637.28	6422.93	3102.46
24	216762.7	41724.33	431911.41	37457.74	135887.81	31143.28
26	779.63	39.79	902.17	15.28	492.05	10.3
26	315768.05	13676.22	62767.33	4303.51	6424.51	1586.45
26	284727.79	63949.53	118822.51	26698.37	4444.26	1035.71
26	85271.49	41421.44	77687.99	33435.42	12281.31	5245.73
27	597.48	48.21	910.66	55.91	572.24	41.91
27	334636.94	16972.23	65265.68	5278.9	2786.94	1441.52
27	489975.03	17508.41	158841.49	11979.62	14968.98	2920.02
27	300744.07	66696.12	113517.48	27578.69	2855.15	476.83
27	467955.66	55452.22	211344.35	32524.28	8323.67	1813.8
27	133279.43	32420.5	193497.78	50571.86	44935.29	19099.17
27	182009.74	69025.29	317499.93	100949.77	90051.79	27944.08
28	709.62	51.17	1161.56	76.14	586.04	13.39
28	399507.05	29575.14	107294.81	12482.93	9374.23	3315.28
28	574072.55	27906.55	210742.21	22467.47	23581.65	5157.11
28	338271.65	151469.53	277082.77	112811.59	27239.94	10384.31
28	450523.56	107669.15	210685.02	91807.83	8174.45	6253.81
28	74197.21	24004.34	42534.07	22646.45	4803.65	3136.64
28	186591.58	68909.61	317741.44	99923.51	87015.9	28510.4
29	783.59	25.43	1504.27	89.94	505.13	20.68
29	339462.08	14219.9	94257.97	3920.54	4469.97	509.47
29	575626.49	25589.55	215054.57	13358.35	24542.2	3482.04
29	236901.45	41492.68	88377.84	15751.1	4414.65	874.14
29	466258.55	112734.86	266396.75	144389.51	14788.41	15398.98
29	117962.55	36908.87	93519.73	36497.42	12222.38	4897.81
29	162084.7	24143.77	131173.24	23184.88	18593.37	12454.44
30	599.82	46.95	714.81	51.34	457.07	23.31
30	318424.45	76490.99	87280.74	21752.59	9890.63	5321.78

30	492323.29	35835.02	177548.85	19493.96	19987.98	4602.19
30	312324.32	23759.04	105747.28	10856.99	2293.22	227.55
30	486619.17	83221.21	228126.38	44403.2	9149.37	2544.71
30	100481.87	39824.49	177216.01	64099.76	56561.26	22542.82
30	165408.41	33030.3	318789.36	25047.35	89763.6	18719.59
31	89066.28	25838.39	64539.29	27115.91	5909.22	2892.56
32	778.25	107.73	1155.05	160.69	703.57	58.79
32	319376.01	17143.59	84597.28	4482.69	5867.67	2001.53
32	496404.55	25794.85	196430.33	23746.88	24546.59	6444.68
32	289791.19	112367.69	120293.96	43279.69	3323.96	765.47
32	570123.04	64989.43	287336.71	38807.86	11374.57	1851.95
32	110008.9	29048.35	76718.54	23787.72	9933.98	4006.66
32	218168.17	81975	269676.27	90090.54	50585.31	17251.71
33	822.88	62.09	877.52	45.94	470.07	19.18
33	309299.23	14682.66	60350.15	2547.58	7745.66	1463.16
33	465494.72	25833.33	158695.99	15670.7	15819.21	3786.81
33	301766.86	72130.65	128684.61	32328.58	5145.23	1456.89
33	498528.82	50939.46	247601.66	33439.23	9297.28	1860.99
33	100997.68	43276.25	103941.68	44848.26	19893.57	11038.72
33	171670.02	55330.19	235389.19	67175.01	41943.42	20324.38
34	889.14	113.29	902.59	72.65	476.22	24.44
34	308701.43	13779.34	60219.09	2481.92	8596.31	1365.35
34	473225.49	25396.03	166025.95	19952.04	17399.19	5009.82
34	297674.97	70787.37	128524.15	32325.87	5248.51	1504.56
34	495043.98	50238.57	240108.47	33815.05	8537.24	2443.62
34	115603.68	35920.81	124125.98	39961.96	27074.74	12523.66
34	170554.13	56786.83	231290.89	70722.78	40037.8	21490.11
35	389.73	16.61	526.81	19.44	869.06	16.95
35	326086.71	17507.25	70381.81	4986.99	5521.25	1024.24
35	486063.46	18833.73	154608.91	13945.62	14251.62	3235.86
35	323269.27	52527.32	122786.62	29133.76	3239.58	878.83
35	672620.61	40878.53	376894.64	36197.2	17860.8	2998.11
35	110097.64	21011.7	75505.17	18918.78	7140.96	4268.56
35	146376.39	44615.81	297214.05	68841.33	119783.82	58653.66
36	838.55	248.8	913.23	21.43	519.16	14.58
36	383879.03	19619.3	110494.16	4382.09	7421.31	589.73
36	552831.42	30924.48	202482.16	18261.1	22191.26	4152.54
36	276982.01	68187.63	101344.8	29349.21	2701.51	540.88
36	120217.76	41383.67	71046.71	26294.95	5958.64	2529.18
37	997.45	307.11	915.59	23.83	527.05	15.05
37	374291.37	22365.86	107619.93	6325.81	7778.79	1005.15
37	549612.9	28766.48	197522.96	15464.35	21013.21	3500.24
37	223986.02	26204.18	59499.96	10400.68	1543.89	194.79
37	115147.46	38384.29	67099.32	22872.96	5510.05	2198.76
37	251545.49	45261.39	452155.41	45073.99	125830.07	24340.7
38	655.46	47.95	1037.58	89.71	545.1	35.08
38	323157.81	19943.17	87059.92	5906.36	5947.38	1438.09

38	141738.94	37949.63	119008	33750.22	17614.79	5902.97
39	690.11	53.09	1108.96	97.96	567.48	31.54
39	320534.94	18923.25	87113.95	6004.36	5809.62	1494.65
39	349411.74	57142.7	135119.46	26473.99	2913.5	652.18
39	141294.26	38831.18	112050.06	38025.84	15896.94	6528.26
40	1280.17	205.25	1114.28	84.84	430.57	7.06
40	329300.66	23843.69	95763.34	11026.65	10236.26	2435.77
40	610868.57	21022.26	271846.99	16367	16884.22	3163.58
40	317810.16	29541.13	112097.18	12217.9	2494.8	347.93
40	488506.92	48945.53	254129.59	32234.47	12034.2	3761.76
40	167543.61	28854.17	315489.88	23962.34	84031.28	9469.42
41	447.03	31.21	647.31	17.27	636.76	18.29
41	324562.68	18708.64	87508.22	6759.54	6798.56	1172.06
41	215848.39	28482.16	55471.62	9494.32	1508.75	246.66
41	95450.33	21289.82	109391.53	30939.03	13056.69	6992.66
42	644.14	59.18	966.64	61.11	621.94	38.38
42	329709.7	16211.87	58679.02	7668.71	2125.28	644.89
42	549036.69	25557.01	194788.31	12056.68	20370.57	2836.42
42	319987.38	34077.56	114531.47	19942.63	2819.67	702.82
42	575844.79	55243.97	363740.68	48346.01	22767.45	3236.27
42	128441.55	28370.27	211276.12	47193.36	53622.06	16854.79
42	220569.2	42387.53	445332.44	39204.03	139520.34	29315.93
44	719.54	100.77	1058.88	127.82	670.3	56.37
44	329400.64	17778.18	61593.52	5028.48	2127.15	669.51
44	497848.61	19449.9	165808.74	14510.7	16182	3302.71
44	273548.26	65812.08	97158.79	25771.3	2574.82	467.71
44	668469.84	45555.92	366623.79	49973.9	16131.33	5091.8
44	123451.6	28304.02	209559.6	50193.83	53899.99	15990.28
44	160120.05	48367.6	319364.25	60911.8	129115.6	52571.38
45	485.96	118.76	572.52	88.43	424.95	33.14
45	339208.16	17520.62	76586.84	23675.95	7087.14	6409.17
45	505732.74	22621.18	182128.59	12991.84	19829.25	3325.07
45	308586.19	22143.04	103196.8	9558.08	2251.91	182.03
45	597738.68	59211.15	368076.6	60893.72	21504	5386.39
45	103756.47	42713.26	177490.43	64369.71	53407.14	19404.89
45	280127.23	46493.32	450961.06	62709.27	89227.87	21429.16
46	409.28	39.64	483.26	28.43	360.03	37.73
46	330234.49	18043.79	59989.91	10922.72	3318.69	4605.4
46	475485.58	40125.99	168730.73	21033.16	18585.2	5049.25
46	316303.32	24947.53	106068.36	10971.62	2280.01	253.84
46	493753.51	85859.42	234557.79	50787.45	9533.15	3061.25
46	109169.28	41994.46	179884.13	65797.27	51048.46	20507.36
46	159277.05	22996.46	308454.87	19231.33	85089.62	9181.42
47	416.5	58.71	510.76	58.69	397.34	38.69
49	441.02	39.69	480.72	24.78	320.14	35.56
49	317736.49	23308	52468.05	8559.4	1670.53	914.69
49	477190.21	42631.69	169685.89	21711.65	18717.17	5161.01

49	306466.01	47397	97793.48	22712.64	2111.92	443.24
49	504172.74	75677.51	244052.72	47055.8	9678.91	3172.1
49	108233.13	43455.5	177927.93	66724.91	49278.67	18782.75
49	159498.17	20493.47	303402.04	16581.06	80967.1	11673.16
50	650.98	35.31	805.39	50.23	470.02	18.98
50	316055.1	27758.37	88213.66	9213.9	7179.07	1047.91
50	385144.86	185668.04	112085.05	59487.93	9266.09	5876.34
50	198941.26	36742.99	48357.24	13979.26	1368.77	317.54
50	414532.31	154366.67	225918.46	79291.75	13101.07	4396.6
50	111678.78	23447.06	75369.77	22687.55	7177.24	4331.56
50	269212.67	29424.48	390204.51	53636.88	70069.8	14145.34
51	552.16	101.65	640.82	88.64	443.06	26.1
52	646.94	22.63	770.72	34.11	474.53	13.57
52	318723.19	20390.4	87868.72	7453.22	7145.09	1051.52
52	489908.84	36576.35	203041.05	19186.04	26995.63	5164.82
52	235447.47	27044.92	64823.23	12729.29	1694.87	274.69
52	568239.91	64414.87	288740.34	40711.08	12007.82	2388.61
52	91785.52	30040.34	120014.41	50667.43	19926.11	16316.01
52	223336.22	69676.12	285819.91	80681.7	55834.73	18516.24
53	911.73	135.49	2027.32	207.92	1960.37	237
53	332575.48	22777.57	66199.23	9051.41	4880.09	1081.13
53	461454.23	25688.02	139144.28	17587.5	11767.57	3366.31
53	630354.08	40719.48	347977.84	23714.44	18109.36	1515.21
53	126597.43	29680.83	212134.58	51224.95	52254.09	14920.78
53	274751.74	26967.12	444954.47	60362.77	95512.4	30121.6
54	1214.23	165.84	3205.12	894.4	2801.92	634.21
54	261179.35	111368.19	59497.78	24379.08	5971.6	2022.25
54	451845.78	98110.81	170668.48	33380.37	19659.6	5195.26
54	290571.21	126093.61	111873.94	46191.15	2733.44	905.7
54	595203.92	64762.4	369425.93	64481.97	21448.19	5697.24
54	106327.07	24801.02	89848.93	37710.49	10612.15	6670.2
54	171731.72	56563.78	226866.21	62555.11	36714.54	16438.44
56	1055.35	206.17	2563.98	839.72	2360.75	638.46
56	322683.98	15050.26	59371.14	4401.5	2350.23	1052.19
56	614518.66	25326.28	288467.36	16894.67	22352.29	4102.25
56	490863.36	76949.79	285065.84	29494.48	16497.38	3175.16
56	128839.64	31306.97	197562.9	50680.17	47820.81	18663.64
56	271938.71	27846.53	432805.97	59663.29	88506.19	29549.75
57	323.79	36.15	409.81	13.16	229.94	14.22
57	297318.78	80529.84	56759.87	14049.76	3065.84	2033.6
57	569679.76	27608.13	236786.36	12491.09	14738.43	1832.06
57	342145.48	78340.25	140135.26	28215.06	3320.67	476.08
57	470371.8	55267.02	224193.14	30622.07	8231.33	1534.85
57	175758.99	40392.42	249333.84	64686.95	42892.94	20949.34
58	120526.26	27818.9	201222.81	52273.66	51981.64	18475.67
59	427.82	19.69	584.15	32.46	913.61	24.73
59	520801.32	137210.26	201130.16	48969.64	23434.11	7206.77

59	426961.7	93697.2	180750.8	58464.11	6103.44	3590.72
59	169214.6	17509.64	130690.13	15803.1	14544.03	6442.31
60	494645.12	86326.22	236579.87	52521.5	9718.23	3056.05
64	1170.32	138.95	2091.44	134.65	1089.38	35.87
64	493606.22	34610.5	178339.52	18355.15	20178.63	4339.06
64	495257.98	70337.47	245058.75	68822.14	10165.65	4997.19
64	156362.81	38017.96	312098.46	27608.65	96510.72	23463.55
66	1266.73	104.15	2213.3	182.69	1124.88	58.95
66	597490.5	35340.78	271087.73	31669.39	21349.49	5283.37
66	547712.07	57569.08	315910.71	35129.26	16091.5	3246.16
66	250678.99	47487.53	360318.66	48528.94	68448.01	11630.91
67	359.38	36.73	412.98	11.65	224.03	5.68
67	479180.59	43135.01	172589.83	23057.11	19462.25	5289.45
67	501689.12	68874	283330.16	88384.55	14834	10122.15
68	258467.56	66180.81	380655.34	116878.71	91917.6	57938.29
69	802.17	54.8	1472.82	67.29	503.14	22.82
69	502550.2	18692.54	179695.17	11436.41	19223.28	3107.47
69	567935.45	62070.49	342519.4	59971.89	19621.18	4514.81
69	255608.89	54700.08	304820.81	89042.93	50565.71	24926.27
70	984.08	38.92	902.12	38.54	386.93	18.04
70	466789.04	29750.37	139952.48	16792.59	11844.6	3160.16
70	645590.69	48985.83	361014.58	33276.46	18565.62	1676.72
70	175045.21	54540.51	325899.62	85435.9	101147.63	53780.05
71	1016.52	58.15	906.99	32.71	388.78	14.96
71	462550.36	25771.79	138541.39	16093.59	11633.98	3137.23
71	622323.36	40620.28	340694.94	21156.64	17668.71	1305.83
71	169190.35	28799.7	320087.76	24266.68	85595.15	11911.89
72	1187.4	132.98	2109.89	144.25	1096.03	40.42
72	619844.8	24940.57	289096.38	16134.1	21448.41	4877.64
72	531219.53	67424.15	306977.63	40605	16427.71	3047.94
72	269422.97	29770.49	401061.73	55350.24	73832.52	17393.52
73	528644.78	27650.83	188320.05	20677.41	20422.37	4548.67

Fortsetzung der Tabelle

Probanden ID	FMPS Anzahl [# /cm ³]					
	< 50 nm		< 100 nm		> 100 nm	
	MW	SD	MW	SD	MW	SD
1	1005499.86	53377.04	1148744.94	61148.1	3446.28	569.52
1	155530.41	47668.45	218613.09	66111.93	5750.47	2817.16
3	5003.72	269.21	9859.88	536.92	1935.92	81.7
5	1626313.92	80044.24	1736977.69	78190.83	9336.15	2544.87
5	634707.01	115524.92	692485.36	128600.84	2353.77	1148.43
6	1069.44	247.83	1723.85	281.59	668.77	19.54
6	1606007.22	75821.35	1713153.64	77145.41	10962.31	2076.46
6	2390353.15	147350.02	2561816.85	139246.53	19149.52	4661.22
6	619631.18	81660.4	693358.03	96487.6	2813.06	1049.54
6	1372448.65	154687.71	1641826.01	173362.54	9909.14	3279.43

6	153027.66	41332.12	253269.86	56020.64	10536.87	2921.04
6	338398.45	137240.15	617839.2	219595.18	56141.52	20227.19
7	2653.53	94.1	3857.81	134.19	449.23	8.5
7	1619876.39	85586.39	1718604.26	80816.91	15043.94	4107.2
7	2827354.88	144401.42	3042858.03	143590.28	25282.22	3301.78
7	618951.88	53061.36	669647.97	62278.98	9380.46	3893.58
7	1326274.09	97010.58	1679635.12	110528.95	20530.04	4369.15
7	291681.7	31889.39	426089.53	37176.55	13488.03	2862.6
8	137116.31	47992.21	199917.25	68095.01	6178.77	2255.04
9	1615.5	509.7	2225.73	548.87	1065.22	32.29
9	1554833.04	158679.86	1624077.31	155758.18	6176.42	1257.54
9	2670787.35	255262.11	2830308.12	243669.53	14565.74	5225.46
9	891586.7	55539.61	996143.68	64551.68	2275.89	352.83
9	1075049.13	238308.19	1408938.98	278597.79	28451.13	26681.48
9	267760.39	104727.15	339172.58	127567.83	6336.31	3319.28
9	301036.02	77656.38	749567.77	80105.35	132430.7	28611.21
11	4734.4	431.54	9241.69	947.63	1798.57	222.82
11	1681418.11	85516.73	1767940.82	84215.79	6103.97	1430.75
11	2489204.17	259769.39	2679507.44	235112.07	23571.51	8192.04
11	850445.38	211295	987881.89	235050.23	3323.38	417.5
11	1375308.49	169551.48	1653744.4	196902.08	11564.99	2447.19
11	248321.35	65008.61	333464.35	86284.7	11608.19	5486.61
11	335096.46	149389.86	595989.86	226370.46	51286.95	17412.87
12	817.06	97.07	1456.97	98.89	696.24	19.7
13	4926.36	364.95	9621.13	847.45	1911.63	113.94
13	1733000.33	67332.84	1827323.25	65638.02	4544.71	592.93
13	2607498.59	111440.66	2782605.65	109321.46	18462.92	3070.3
13						
13	1296939.44	112979.12	1498409.97	125814.44	7151.05	2410.9
13	203763.35	80757.6	268314.99	97659.86	8735.87	3999.29
13	377577.03	89664.75	679043.26	162247.21	54446.66	27579.01
14	722210.16	109753.71	847984.03	126725.19	8118.94	2849.35
17	3035.55	1711.29	3999	1675.78	560.49	28.68
17	1925391.49	178780.55	2036085.55	179306.96	9501.75	1909.13
17	2223440.12	111279.68	2505358.07	116131.14	22146.63	4551.45
17	749830.74	180462.48	944288.1	132464.78	21330.97	8063.66
17	1193165.05	154855.5	1416136.21	166492.67	8345.79	1559.77
17	190872.14	54708.27	230387.34	70260.66	4418.36	3175.36
17	251866.53	98745	481968.52	140301.67	38870.35	20967.63
20	1028.23	237.96	1684.86	265.79	680.26	11.9
20	1694598.82	77345.86	1791446.79	76491.51	5237.09	937.04
20	757390.94	74105.09	844747.33	78800.97	3737.65	696.73
20	233108.76	65837.75	320979.09	87766.72	11806.02	5040.76
22	2916.32	132.79	3796.89	122.62	483.29	19.12
22	1931432.82	88711.93	1993100.68	88370.32	7819.22	1964.35
22	772867.93	175675.54	897492.41	194452.4	4929.59	1230.63
22	190210.45	86261.45	289073.55	121608.41	17643.32	9178.82

23	2603.15	143.38	3844.79	154.24	452.25	10.97
23	1622044.93	86427.96	1716682.08	81566.51	12320.99	3484.76
23	2758443	225876.36	2909032.56	217778.84	12334.71	4251.73
23	635259.53	117838.2	696452.58	129837.1	2552.64	1006.96
23	1080341.42	176756.52	1528949.57	180706.44	54469.03	39735.79
23	126658.24	67184.18	234655.09	123180.59	19767.17	17702.75
23	280016.92	129022.27	596221.02	220679.95	93114.68	28540.23
24	1082.89	82.36	1864.15	119.86	511.12	18.06
24	1979998.49	98479.74	2046169.1	98429.81	3380.08	1352.24
24	2229914.66	110438.54	2511566.09	111038.94	19485.69	4300.73
24	744564.75	62797.4	794592.52	69174.95	1435.09	319.4
24	1129100.4	195281.19	1371948.18	216409.81	12791.43	2697.59
24	227109.29	63692	301534.72	58814	6501.43	3162.65
24	267168.28	60644.33	699079.68	67760.22	140541.45	32289.39
26	2753.24	212.93	3655.4	214.66	499.4	11.14
26	1932575.3	84538.55	1995342.64	85208.74	6911.41	1760.15
26	756560.75	167972.75	875383.26	183901.24	4513.61	1051.56
26	166244.74	91646.57	243932.72	122265.21	12870.22	5514.06
27	1093.02	130.85	2003.68	153.35	618.34	48.02
27	1988370.51	105405.23	2053636.19	103519.58	3105.42	1595.05
27	2646608.07	139162.91	2805449.56	134449.26	15143.48	2985.99
27	827662.26	156872.28	941179.74	179292.47	2920.04	483.8
27	1306827.75	119682.61	1518172.1	133485.72	8325.01	1812.86
27	218373.48	65517.47	411871.26	95456.09	46389.37	19759.49
27	278400.97	123748.07	595900.91	215465.24	92842.25	28995.73
28	1544.22	333.63	2705.78	363.63	625.53	12.5
28	2037245.76	254086	2144540.58	246530.89	11100.05	4205.86
28	2853434.91	157312.82	3064177.13	157906.78	23932.82	5287.54
28	857527.06	300892.34	1134609.83	358708.93	27239.94	10384.31
28	1160329.92	219797.52	1371014.94	260968.94	8295.48	6260.59
28	187967.03	53879.45	230501.09	70092.31	4835.54	3151.15
28	284856.35	122558.76	602597.79	213204.12	89726.53	29650.09
29	1685.55	182.92	3189.82	269.16	510.4	20.86
29	1718011.04	75935.11	1812269.02	73886.97	4791.57	541.18
29	2856915.65	158102.15	3071970.22	156088.57	24914.23	3587.92
29	719354.51	116434.47	807732.35	122476.82	4466.2	884.96
29	1137778.62	221339.81	1404175.37	276392.34	14898.15	15374.84
29	234711.67	66217.72	328231.4	90582.48	12498.44	5008.26
29	284032.27	47573.41	415205.51	65047.8	19304.45	13556.47
30	1101.44	147.26	1816.26	129.18	503.02	24.96
30	1791901.4	668168.02	1879182.14	668445.99	10923.48	5868.69
30	2472795.36	209982.15	2650344.2	210688.79	20291.97	4736.1
30	891487.7	52662.63	997234.97	56374.67	2424.08	231.77
30	1275153.22	214775.7	1503279.6	235788.84	9190.54	2537.44
30	166603.84	71137.96	343819.85	130764.82	58496.67	23476.34
30	218136.97	49690.65	536926.33	68573.69	90936.88	19003.05
31	159801.15	47041.5	224340.44	60938.88	5980	2925.89

32	1248.12	140.61	2403.17	281.36	758.9	61.65
32	1698243.23	154585.19	1782840.51	153374.6	6348.9	2185
32	2421499.86	198786.33	2617930.19	185981.3	25018.54	6652.65
32	738933.48	294138.69	859227.44	333100.81	3463.04	771.18
32	1375550.95	148726.6	1662887.66	174944.09	11435.79	1849.75
32	237024.8	71560.91	313743.34	88398.05	10175.08	4113.95
32	358179.49	153112.28	627855.76	233074.89	52487.31	18139.35
33	3415.84	763.82	4293.36	785.84	474.93	19.95
33	1951615.34	97911.35	2011965.49	97523.11	8466.99	1674.85
33	2468339.97	147726.44	2627035.97	142619.59	16028.4	3882.58
33	804201.44	190110.17	932886.05	212635.58	5216.32	1471.81
33	1238296.99	116028.18	1485898.65	130037.48	9374.31	1855.43
33	186491.02	88526.7	290432.69	125294.08	20834.97	11571.85
33	246036.4	94435.26	481425.59	134056.5	42702.69	20885.37
34	3889.25	851.38	4791.84	907.86	480.76	25.21
34	1958504.96	95654.64	2018724.05	95445.36	9503.19	1614.37
34	2450681.21	159793.75	2616707.16	148639.97	17650.54	5145.47
34	791401.26	188135.39	919925.41	210189.93	5320.28	1519.94
34	1251565.48	116918.39	1491673.95	127018.57	8622	2426.34
34	208664.74	74424.31	332790.72	102431	28440.57	13209.71
34	247444.03	96894.51	478734.92	138614.03	40717.44	22073.38
35	1045.86	56.76	1572.67	75.1	999.01	17.82
35	1478860.1	145763.82	1549241.91	143354.17	6607.09	1237.91
35	2641994	136533.94	2796602.91	130387.54	14412.9	3307.54
35	863896.5	103627.78	986683.12	117847.54	3393.85	883.68
35	1507344.46	81849.97	1884239.1	93501.51	17882.34	2996.01
35	218454.45	62131.16	293959.62	57607.08	7235.1	4356.56
35	216094.83	83213.47	513308.88	105287.1	122394.23	60273.15
36	5378.71	2504.57	6291.93	2497.76	556.12	17.46
36	1767670.81	116978.63	1878164.97	116555.28	8563.3	674.44
36	2660915.53	133828.98	2863397.69	134280.6	22503.12	4264.56
36	804937.71	154881.5	906282.51	175099.06	2763.19	547.74
36	252952.23	92847.39	323998.94	110235.65	6027.59	2543.27
37	6340.23	1905.14	7255.82	1911.4	564.98	17.63
37	1736243.95	122422.73	1843863.88	123010.61	9008.02	1195.71
37	2677268.47	140389.07	2874791.43	140342.9	21292.9	3590.13
37	755976.76	54691.74	815476.72	58933.77	1589.19	197.58
37	243375.07	88625.52	310474.39	102429.12	5580.92	2216.47
37	320315.11	73585.93	772470.51	81987.36	129541.33	25361
38	1963.27	628.72	3000.85	587.37	582.98	37.61
38	1693888.21	88136.91	1780948.14	87099.02	6408.45	1548.74
38	272809.01	76453.24	391817.01	102603.73	18081.19	6088.76
39	1858.26	640.44	2967.21	599.14	606.16	32.61
39	1682219.37	85954.55	1769333.31	85078.34	6264.77	1608.11
39	881306.82	142104.69	1016426.28	157406.03	3078.69	647.59
39	281056.78	71317.15	393106.84	103987.08	16293.16	6726.37
40	2495.98	243.28	3610.26	316.23	448.97	6.74

40	1627311.37	83822.29	1723074.71	78925.19	11218.71	2783.52
40	2228669.45	88340.97	2500516.45	86826.41	16925.75	3184.96
40	897623.22	107989.03	1009720.4	110435.47	2621.47	348.85
40	1183730.05	124583.08	1437859.64	130149.44	12078.69	3743.83
40	221330.31	44321.11	536820.2	63824.25	85314.6	9836.09
41	896.23	116.66	1543.54	124.69	687.97	19.65
41	1906352.28	166160.22	1993860.5	164477.57	7784.07	1369.26
41	756478.1	60942.65	811949.72	65160	1552.15	250.03
41	151829.44	40730.76	261220.97	60294.28	13289.18	7131.27
42	1131.57	121.31	2098.21	141.02	673.68	41.11
42	2303120.62	100820.52	2361799.64	97979.08	2314.94	677.14
42	2689073.91	146810.21	2883862.22	146322.65	20633.59	2907.8
42	872081.38	72987.72	986612.85	77859.17	2971.13	704.23
42	1306161.01	101765.27	1669901.69	117924.83	22767.7	3236.23
42	197473.34	49766.74	408749.46	83632.86	55207.4	17311.08
42	270406.49	60831.83	715738.93	72391.08	144139.33	30461.18
44	1187.91	152.35	2246.78	263.86	723.4	60.14
44	2294842.1	113086.74	2356435.63	110639.44	2319.85	706.1
44	2666615.39	126284.68	2832424.13	124339.72	16382.72	3382.45
44	799472.13	161951.72	896630.92	177604.03	2636.94	474.28
44	1508295.27	76640.3	1874919.07	96537.91	16161.97	5077.43
44	189349.37	51081.98	398908.98	87406.07	55308.06	16444.13
44	238837.89	90662.85	558202.14	107855.13	132047.55	54035.95
45	962.76	276.02	1535.28	354.12	468.16	37.7
45	2186815.25	355982.96	2263402.08	335981.04	7837.39	7057.96
45	2584984.48	112969.46	2767113.07	110581.14	20124.12	3420.53
45	896157.54	53763.07	999354.34	56806.3	2380.14	184.1
45	1363077.87	120237.65	1731154.47	144614.62	21516.6	5385.51
45	172864.77	75717.84	350355.2	136232.3	55086.24	20023.37
45	373456.74	74141.67	824417.81	100097.88	90774.23	21803.65
46	801.46	123.19	1284.72	123.68	396.45	41.03
46	2359462.16	249598.86	2419452.07	241663.11	3689.85	5101.53
46	2436413.11	233390.58	2605143.84	232960.99	18864.25	5206.29
46	892691.02	54955.56	998759.38	58692.31	2412.69	257.06
46	1277404.93	211762.14	1511962.72	235074.91	9574.1	3054.23
46	182301.88	76663.76	362186.01	137129.45	52689.34	21212.5
46	208951.63	36251.86	517406.5	49950.54	86461.38	9479.17
47	819.3	191.37	1330.06	233.22	436.75	42.54
49	904.19	133.51	1384.91	137.65	353.78	36.71
49	2397542.7	109417.36	2450010.75	109067.91	1864.85	974.98
49	2425050.93	247094.74	2594736.82	246246.47	18997.84	5318.85
49	888022.1	100540.75	985815.58	115234.59	2245.64	445.41
49	1271474.32	195464.84	1515527.04	220068.99	9726.01	3159.6
49	176525.02	77771.56	354452.94	140634.01	50770.49	19499.19
49	210513.46	33971.15	513915.51	41628.58	82356.09	11963.68
50	1118.61	119.49	1924	169.53	513.97	25.53
50	1749149.66	150411.16	1837363.32	155336.48	8172.38	1282.03

50	2293313.74	949154.84	2405398.79	998825.45	9363.93	5956.86
50	740430.54	64451.42	788787.77	71961.75	1407.65	322.17
50	1007964.93	388813.33	1233883.39	455159.57	13130.92	4394.54
50	221135.64	68400.27	296505.41	67961.56	7313.18	4422.52
50	351824.93	41727.25	742029.44	84170.19	71486.08	14548.19
51	1076.04	228.6	1716.85	293.94	488.19	29.89
52	1058.87	75.02	1829.6	108.26	515.65	16.45
52	1761401.65	115408.89	1849270.37	115961.74	8142.2	1275.06
52	2313723.71	205980.24	2516764.76	209179.5	27556.97	5364.92
52	777178.13	41053.51	842001.37	47204.58	1741.91	277.82
52	1370191.16	148541.98	1658931.51	174269.03	12066.08	2389.64
52	145569.08	50503.37	265583.49	89480.41	20512.6	17061.3
52	361586.23	130818.58	647406.14	202138.18	57968.7	19436.62
53	1709.83	313.76	3737.15	467.08	2118.22	297.52
53	1609667.06	172178.66	1675866.29	166781.52	5849.68	1357.03
53	2667259.71	110481.29	2806404	112937.93	11888.82	3435.23
53	1471411.02	91817.55	1819388.86	103253.85	18118.15	1516.92
53	194440.23	51913.81	406574.8	90210.92	53562.04	15306.56
53	351636.3	42167.66	796590.76	64666.79	97965.57	31416.18
54	1926.99	181.43	5132.1	891.54	3142.89	765.12
54	1085185.19	493604.53	1144682.97	517482.28	7119.16	2386.86
54	2200321.76	560847.59	2370990.23	589121.71	19976.35	5329.83
54	799662.37	360736.67	911536.31	405227.93	2767.77	909.83
54	1359032.95	125712.12	1728458.88	154811	21463.8	5692.98
54	194253.54	57319.85	284102.47	69684.26	10834.96	6808.47
54	250346.26	97511.34	477212.47	133074.84	37179.5	16602.65
56	1846.39	280.44	4410.37	976.33	2604.17	771.43
56	2296111.49	97609.24	2355482.63	95983.82	2551.33	1095.59
56	2220274.65	108471.38	2508742.01	114610.89	22447.82	4151.11
56	1184226.39	143407.56	1469292.24	159089.73	16572.45	3185.45
56	206500.09	60564.52	404062.99	92246.44	49344.23	19235.62
56	348949.96	43286.55	781755.93	66319.47	90578.69	30726.75
57	1452.97	211.28	1862.79	208.26	235.96	14.94
57	2071185.35	641830.28	2127945.23	652381.01	3343.55	2204.83
57	2366811.64	131966.75	2603597.99	134972.83	14779.83	1848.92
57	843147.89	210439.66	983283.14	234847.39	3475.36	476.67
57	1197752.13	149781.57	1421945.27	161585.66	8308.38	1534.33
57	251106.9	66672.93	500440.75	107831.91	43332.38	21156.72
58	187455.92	51529.63	388678.73	88128.13	53440.97	19035.95
59	1336.84	265.71	1920.99	295.04	1045.82	25.98
59	2498898.04	767039.62	2700028.2	811216.95	23798.34	7355.8
59	1157728.46	217712.62	1338479.26	247056.55	6220.14	3590.27
59	295498.26	31787.63	426188.38	41916.4	14854.9	6891.32
60	1275704.26	211476.48	1512284.13	235492.45	9759.57	3050.2
64	2104.85	228.21	4196.3	331.01	1101.11	35.8
64	2480532.61	210166.78	2658872.13	210344.96	20486.85	4468.12
64	1272152.99	159177.2	1517211.74	166525.59	10208.15	4989.94

64	207450.06	55333.93	519548.52	77541.42	97691.89	23811.71
66	2263.44	196.19	4476.75	346.83	1136.44	58.68
66	2237500.34	115000.01	2508588.07	119563.51	21449.17	5332.85
66	1261828.97	123689.7	1577739.68	139865.44	16378.48	3318.85
66	330320.25	64376.37	690638.91	108199	70062.6	12403.98
67	1636.24	165.56	2049.22	172.05	229.69	6.27
67	2428544.3	230080.04	2601134.13	231925.34	19764.05	5448.85
67	1238540.64	165391.69	1521870.8	166973.86	14869.91	10105.59
68	365814.54	102958.66	746469.88	183105.42	95301.83	60079.27
69	1557.55	104.43	3030.38	152.83	508.6	23.36
69	2597883.44	120706.91	2777578.61	116251.01	19501.75	3194.67
69	1319293.08	107695.17	1661812.47	126516.89	19626.37	4510.63
69	370763.55	80708.44	675584.36	156478.41	52000.37	26278.51
70	2426.89	145.88	3329.01	160.11	390.49	17.55
70	2643277.57	131113.82	2783230.04	129219.76	11961.59	3218.72
70	1481137.63	90413.77	1842152.2	106932.72	18577.54	1680.12
70	251222.95	86450.14	577122.58	140303.79	103398.88	55086.67
71	2532.55	198.54	3439.54	211.68	391.79	14.46
71	2651797.16	127174.09	2790338.55	126205.74	11750.04	3198.53
71	1462038.97	93956.08	1802733.91	101266.73	17676.28	1305.51
71	223361.69	43926.47	543449.45	61842.63	86803.59	12207.41
72	2129.35	220.19	4239.23	330.94	1107.77	40.29
72	2228842.31	112547.05	2517938.69	116976.3	21533.86	4932.11
72	1240005.66	135664	1546983.29	156964.04	16614.02	3192.59
72	348883.5	42565.54	749945.24	84652.25	75336.41	17964.39
73	2687745.88	127049.05	2876065.94	123937.06	20727.33	4667.56

Probanden						
ID	APS Anzahl [# / cm ³]					
	100 - 300 nm		300 - 500 nm		0,5 - 0,75 µm	
	MW	SD	MW	SD	MW	SD
1	3430.89	566.27	15.39	5.82	1.324	0.275
1	5725.53	2807.98	24.94	13.89	0.978	0.431
3	1933.06	81.47	2.86	0.45		
5	9177.51	2505.59	158.64	41.1	2.51	0.602
5	2337.49	1127.98	16.28	22.59		
6	648.08	19.07	20.69	1.12	0.525	0.098
6	10752.96	2023.37	209.34	65.67	2.399	0.657
6	19044.07	4609.9	105.45	53.38	1.113	1.192
6	2811.35	1048.04	1.7	1.95		
6	9854.92	3279.82	54.22	10.98	2.464	0.524
6	10465.94	2920.33	70.94	12.01	6.024	0.819
6	55410.78	19917.92	730.74	364.43	46.828	22.729
7	440.6	8.26	8.63	0.61	0.137	0.014
7	14576.8	3911.87	467.14	213.54	2.047	0.925
7	25143.42	3262.71	138.8	40.59	0.335	0.069
7	8924.4	3633.36	456.06	264.61		

7	20528.34	4371.04	1.7	3.35	1.534	0.388
7	13447.52	2856.88	40.51	20.14	4.101	1.782
8	6147.7	2250.68	31.07	14.57	1.071	0.464
9	1008.43	32.76	56.79	1.7	4.207	0.334
9	5640.49	1128.5	535.94	141.3		
9	14507.52	5179.92	58.23	47.17	0.485	0.267
9	2201.15	350.1	74.74	3.85	32.299	21.556
9	28390.96	26711.58	60.17	43.07	2.406	0.61
9	6311.72	3304.69	24.58	20.24	1.471	0.588
9	130996.31	28027.84	1434.39	646.64	11.633	5.066
11	1796.08	221.95	2.49	0.9		
11	5977.72	1403.04	126.24	32.11	3.114	2.059
11	23404.95	8095.82	166.56	99.13	1.149	1.152
11	3233.54	414.57	89.84	5.89	4.25	0.454
11	11510.47	2445.74	54.52	6.57	3.107	0.294
11	11506.01	5430.24	102.18	61.39	5.271	2.16
11	50601.28	17099.14	685.67	346.71	41.479	19.095
12	674.57	19.3	21.67	0.94	0.493	0.08
13	1909.08	113.38	2.56	0.65		
13	4463.18	586.65	81.53	8.91	1.666	0.2
13	18373.85	3038.57	89.06	32.5	0.046	0.057
13					1.916	0.424
13	7146.55	2415.41	4.51	7.7	0.015	0.006
13	8659.43	3962.81	76.44	38.48	1.717	0.593
13	53983.3	27100.47	463.36	520.3	35.866	31.848
14	8104.09	2845.23	14.85	8.06		
17	541.7	27.5	18.79	1.36	0.344	0.018
17	8805.36	1716.42	696.39	199.94		
17	22121.56	4537.87	25.07	14.73	0.378	0.401
17	21330.97	8063.66	0	0	2.246	0.513
17	8288.42	1558.15	57.37	6.62	3.144	0.342
17	4413.63	3173.64	4.73	3.68		
17	38674.53	20774.33	195.82	226.99	12.874	14.174
20	659.1	11.45	21.17	1.18	0.492	0.089
20	5141.81	925.24	95.28	12.64	1.576	0.299
20	3731.52	694.75	6.14	2.75		
20	11709.76	4998.7	96.26	44.93	1.711	0.575
22	482.86	18.91	0.43	0.23	0.399	0.02
22	7670.02	1910.13	149.2	58.39	0.481	0.124
22	4889.01	1220.4	40.58	10.98	1.444	0.675
22	17230.96	8971.69	412.36	210.16		
23	443.01	10.16	9.24	1.07	0.18	0.081
23	12000.28	3356.02	320.7	140.39	1.826	0.387
23	12295.98	4222.58	38.73	30.3	0.472	0.243
23	2536.13	987.02	16.5	22.43		
23	54426.01	39774.6	43.02	49.24	2.972	0.779
23	19537.25	17416.4	229.92	307.84	18.103	21.922

23	92080.2	28113.73	1034.48	515.1	98.413	41.604
24	487.41	15.01	23.7	3.8	0.348	0.062
24	3285.82	1318.64	94.26	34.08	0.413	0.075
24	19470.21	4288.8	15.48	12.7	0.238	0.152
24	1415.47	316.27	19.62	3.75	0.579	0.166
24	12760.47	2697.03	30.96	8.51	0.86	0.164
24	6474.04	3140.2	27.39	33.07	1.37	1.213
24	138781.24	31764.23	1760.21	595.32	12.338	5.287
26	498.67	10.92	0.73	0.27	0.404	0.019
26	6796.34	1720.72	115.07	41	0.972	1.17
26	4474.51	1042.19	39.09	10.36	1.164	0.606
26	12563.31	5374.14	306.91	143.32		
27	594.32	44.6	24.02	5.79		
27	3017.56	1554.88	87.86	40.49	0.406	0.081
27	15083.89	2961.12	59.59	25.69	0.318	0.203
27	2888.09	478.23	31.95	6.56	0.871	0.155
27	8323.68	1813.79	1.33	2.77	0.017	0.007
27	45807.78	19494.53	581.59	292.85	16.189	8.096
27	91783.92	28589.54	1058.33	494.14	99.876	40.416
28	604.95	13.15	20.58	1.08	0.315	0.076
28	10200.64	3740.74	899.41	472.77		
28	23806.43	5236.9	126.38	52.96	0.406	0.126
28	27239.94	10384.31	0	0	3.299	2.185
28	8219.43	6242.9	76.06	21.52	1.923	0.315
28	4831.13	3149.34	4.41	2.49		
28	88692.57	29201.89	1033.96	516.03	97.271	42.358
29	509.81	20.83	0.59	0.06	0.01	0.002
29	4705.65	534.77	85.92	9.45	1.725	0.205
29	24780.04	3545.48	134.19	43.88	0.363	0.071
29	4457.48	882.62	8.72	2.91		
29	14825.09	15381.7	73.05	30.92	2.093	0.499
29	12396.22	4966.95	102.22	44.21	1.763	0.582
29	19015.95	13063.22	288.49	506.06	27.109	52.483
30	479.07	23.79	23.94	4.12		
30	10593.18	5705.39	330.3	188.92	4.768	8.864
30	20181.73	4682.56	110.24	56	2.053	2.008
30	2352.39	229	71.69	3.32	2.969	0.368
30	9158.63	2538.57	31.91	9.5	1.564	0.172
30	57690.66	23067.24	806.01	540.86	24.601	17.11
30	90698.61	18931.96	238.26	111.45	12.454	4.632
31	5956.2	2914.71	23.8	13.88	0.982	0.505
32	730.06	59.95	28.83	5.38		
32	6202.94	2113.85	145.96	83.24	8.433	11.59
32	24838.12	6567.44	180.41	87.82	1.211	1.124
32	3383.21	763.22	79.82	10.09	3.385	0.493
32	11381.9	1849.59	53.89	9.43	2.653	0.536
32	10088.04	4072.84	87.04	47.97	5.168	2.211

32	51720.13	17757.43	767.18	410.79	45.422	23.483
33	474.72	19.87	0.21	0.21	0.362	0.051
33	8292.1	1621.72	174.89	60.9	0.444	0.122
33	15954.75	3845.34	73.65	38.8	0.529	0.423
33	5176.03	1462.38	40.29	10.71	1.698	0.522
33	9311.29	1855.23	63.02	9.53	3.211	0.367
33	20344.36	11293.97	490.61	279.78		
33	42455.45	20683.57	247.23	240.98	16.45	14.844
34	480.63	25.13	0.14	0.2	0.32	0.068
34	9277.61	1545.42	225.59	79.87	0.419	0.141
34	17560.16	5091.88	90.39	55.59	1.009	1.233
34	5278.88	1510.03	41.41	11.19	1.782	0.338
34	8556.83	2430.16	65.17	11.09	3.258	0.35
34	27728.77	12852.03	711.8	363.23		
34	40499.85	21865.47	217.59	239.28	14.338	14.592
35	942.38	17.73	56.64	1.37	3.783	0.122
35	6041.21	1124.57	565.88	131.44		
35	14358.1	3280.61	54.8	27.71	0.235	0.172
35	3314.24	877.95	79.61	6.78	4.094	1.975
35	17860.82	2998.06	21.52	10.24	0.454	0.246
35	7205.07	4329.9	30.03	30.7	1.471	1.348
35	121522.32	59718.29	871.92	633.94	9.712	6.494
36	537.08	16.08	19.04	1.53	0.393	0.073
36	7968.15	628.84	595.15	62.83		
36	22392.59	4220.57	110.52	45.8	0.212	0.154
36	2733.99	541.91	29.19	6.32	0.824	0.156
36	6008.88	2541.52	18.7	6.49	1.311	0.343
37	545.51	16.4	19.47	1.44	0.419	0.073
37	8367.41	1095.53	640.61	109.33		
37	21195.05	3555.26	97.84	36.29	0.215	0.149
37	1565.73	196.17	23.46	1.9	0.729	0.139
37	5561.15	2213.53	19.77	6.46	1.254	0.346
37	128254.33	24936.68	1287	477.02	9.579	5.094
38	563.23	36.16	19.75	1.61	0.348	0.019
38	6280.26	1520.19	128.19	34.6	2.663	1.897
38	17901.42	6010.39	179.77	87.63	9.038	6.09
39	586.05	32.04	20.11	1.25	0.328	0.064
39	6136.12	1579.21	128.65	34.26	2.742	1.9
39	2986.59	646.74	92.1	4.16	4.494	0.348
39	16144.5	6644.04	148.65	91.19	7.052	5.122
40	440.82	6.94	8.14	0.61	0.14	0.012
40	10968.71	2692.51	249.99	101.64	2.134	0.685
40	16916.5	3179.41	9.25	5.89	0.254	0.138
40	2550.3	346.79	71.17	3.11	2.317	0.266
40	12039.54	3752.9	39.15	12.09	0.896	0.208
40	85022.04	9717.47	292.56	163.75	12.476	4.533
41	666.34	19.16	21.63	0.97	0.485	0.079

41	7270.47	1263.55	513.6	136.57		
41	1530.57	248.46	21.58	2.21	0.661	0.177
41	13202	7085.19	87.18	58.25	7.638	5.512
42	646.71	39.39	26.96	5.23		
42	2255.76	668.55	59.17	9.51	3.384	1.774
42	20542.26	2880.35	91.33	28.72	0.332	0.742
42	2894.33	701.22	76.8	4.34	9.346	9.446
42	22767.49	3236.22	0.21	0.73	1.481	0.359
42	54592.33	17140.67	615.07	252.59	15.5	7.529
42	142403.45	29926.09	1735.88	627.94	12.827	5.132
44	695.73	57.98	27.67	5.32		
44	2257.79	697.14	62.06	10.38	3.251	1.829
44	16313.19	3351.81	69.52	31.52	0.416	0.206
44	2608.88	469.33	28.06	5.55	0.803	0.142
44	16134.49	5085.11	27.48	12.21	0.474	0.221
44	54772.21	16267.47	535.85	260.99	13.849	6.565
44	131073.59	53523.74	973.96	597.02	13.022	6.728
45	445.64	35.17	22.52	4.16		
45	7611.58	6873.53	225.82	185.49	1.349	0.967
45	20017.93	3382.43	106.19	39.59	0.014	0.005
45	2309.8	182.41	70.34	3.03	2.776	0.365
45	21504	5386.39	12.6	6.25	0.137	0.056
45	54420.04	19791.58	666.2	306.74	19.539	7.95
45	90310.87	21682.37	463.35	182.16	5.57	3.655
46	377.47	39.25	18.98	2.79		
46	3574.64	4967.29	115.21	134.71	1.139	0.725
46	18762.86	5142.28	101.39	68.8	2.307	1.978
46	2340.53	254.72	72.16	3.22	3.199	0.302
46	9542.07	3054.79	32.03	9.22	1.495	0.164
46	52039.8	20939.05	649.54	344.38	19.366	9.756
46	86137.23	9382.1	324.14	152.78	13.665	4.147
47	416.21	40.44	20.54	3.45		
49	336.25	36.05	17.53	2.31		
49	1798.11	957.54	66.74	18.66	1.05	0.739
49	18895.94	5254.82	101.9	68.77	3.813	4.506
49	2174.1	442.12	71.54	4.24	3.357	0.234
49	9690.01	3162.96	36	13.51	1.446	0.167
49	50196	19211.88	574.5	347.43	19.74	10.212
49	82009.21	11884.54	346.88	151.54	15.436	5.375
50	488.03	20.7	25.94	5.33	0.314	0.071
50	7654.72	1157.35	517.66	147.07		
50	9332.61	5926	31.32	34.52	0.827	0.897
50	1389.97	319.41	17.68	4.24	0.559	0.119
50	13103.79	4392.34	27.13	8.6	0.745	0.204
50	7258.86	4388.72	54.32	53.76	2.035	1.688
50	71034.41	14399.29	451.66	177.59	19.278	11.067
51	464.67	27.65	23.52	4.47		

52	492.47	14.54	23.19	3.15	0.377	0.046
52	7622.56	1155.81	519.64	143.18		
52	27339.06	5279.51	217.91	91.78	3.28	9.808
52	1717.32	275.71	24.58	2.42	0.743	0.12
52	12014.09	2387.4	51.99	6.33	2.876	0.545
52	20285.27	16768.73	227.32	309.18	17.934	22.017
52	57103.48	19042.75	865.23	439.65	50.146	24.305
53	2049.06	263.23	69.16	34.84	2.988	1.121
53	5344.38	1211.98	505.3	154.95		
53	11848.28	3409.53	40.54	26.48	0.288	0.224
53	18109.36	1515.21	8.8	4.8	0.156	0.158
53	53067.85	15165.52	494.19	230.2	11.954	5.136
53	97107.53	30896.31	858.05	538.86	38.913	26.838
54	2972.71	693.72	170.18	71.92	5.366	1.576
54	6521.11	2195.79	598.05	202.77		
54	19860.18	5276.57	116.17	56.72	3.629	8.815
54	2754.59	905.54	13.18	5.05	0.952	0.233
54	21448.2	5697.21	15.6	11.61	0.15	0.052
54	10746.61	6757.41	88.36	71.7	3.175	2.275
54	37044.86	16563.65	134.64	78	8.846	4.999
56	2487.91	698.47	116.26	73.44	4.158	1.864
56	2485.12	1089.73	66.21	18.31	3.427	2.226
56	22423.21	4136.58	24.61	15.19	0.264	0.174
56	16501.27	3176.87	71.19	43.08	0.062	0.014
56	48739.07	19016.26	605.16	269.39	15.847	7.722
56	89871.83	30255.74	706.87	482.1	31.759	25.187
57	235.3	14.6	0.66	0.35	0.592	0.175
57	3245.17	2141.03	98.38	90.67	5.766	7.198
57	14770.2	1844.11	9.63	5.63	0.218	0.132
57	3386.7	473.75	88.66	5.36	4.038	0.45
57	8248.9	1531.36	59.48	7.03	3.204	0.362
57	43218.24	21111.79	114.14	55.78	6.97	2.839
58	52879.42	18820.46	561.55	282.95	14.538	8.28
59	988.73	25.59	57.09	1.29	4.043	0.189
59	23666.09	7299.44	132.25	60.33	1.94	5.547
59	6151.52	3581.23	68.62	14.78	1.864	0.218
59	14745.97	6696.34	108.93	202.88	9.153	16.188
60	9726.85	3049.86	32.72	10.36	1.465	0.167
64	1099.71	35.83	1.41	0.1	0.011	0.003
64	20375.03	4416.28	111.82	54.21	2.115	1.996
64	10174.95	4992.15	33.2	8.58	1.659	0.112
64	97456.6	23720.29	235.3	108.65	14.615	6.408
66	1135.09	58.78	1.35	0.14	0.012	0.003
66	21422.88	5318.38	26.3	16.49	0.686	0.781
66	16166.08	3254.21	212.4	172.32	0.058	0.016
66	69513.52	12068.12	549.08	401.18	25.013	24.897
67	229.24	6.09	0.45	0.22	0.709	0.149

67	19653.76	5384.2	110.28	69.73	2.082	1.984
67	14840.99	10117.11	28.92	14.09	1.712	0.155
68	93901.93	59178.18	1399.9	997.49	56.613	22.522
69	507.99	23.28	0.61	0.09	0.01	0.002
69	19402.06	3160.13	99.69	35.62	0.015	0.005
69	19623.78	4512	2.59	4.78	1.682	0.45
69	51456.69	25687.1	543.69	697.56	41.107	31.085
70	390.23	17.75	0.26	0.43	1.09	0.082
70	11923.01	3197.36	38.58	22.18	0.169	0.094
70	18565.62	1676.72	11.92	7.39	0.277	0.267
70	102580.58	54629.85	818.3	569.09	6.748	4.621
71	391.62	14.63	0.18	0.37	1.058	0.093
71	11711.6	3175.93	38.43	23.39	0.257	0.223
71	17668.71	1305.83	7.57	3.47	0.091	0.049
71	86544.46	12122.86	259.13	137.97	12.664	4.927
72	1106.36	40.34	1.41	0.11	0.011	0.003
72	21512.07	4916.18	21.79	16.61	0.262	0.167
72	16463.69	3085.56	150.33	138.86	0.061	0.016
72	74853.64	17744.19	482.77	232.87	21.244	14.491
73	20617.25	4620.94	110.07	48.33	0.04	0.016

Fortsetzung der Tabelle

Probanden ID	APS Anzahl [# / cm ³ APS]					
	0,75 - 1 µm		1 - 2,5 µm		2,5 - 10 µm	
	MW	SD	MW	SD	MW	SD
1	1.467	0.256	0.763	0.13	0.021	0.009
1	1.122	0.427	1.742	0.498	0.167	0.08
3						
5	6.479	1.504	8.06	2.187	0.204	0.063
5						
6	0.603	0.129	0.452	0.091	0.038	0.03
6	6.468	1.484	8.044	2.193	0.184	0.07
6	1.419	1.381	1.333	1.587	0.114	0.133
6						
6	4.259	0.395	2.471	0.216	0.07	0.016
6	8.397	0.686	3.954	1.037	0.262	0.154
6	40.681	21.014	24.424	13.936	1.254	0.864
7	0.268	0.021	0.679	0.064	0.046	0.025
7	5.343	1.105	5.761	0.924	0.14	0.086
7	0.801	0.134	0.808	0.162	0.069	0.021
7						
7	1.441	0.312	1.022	0.19	0.099	0.027
7	3.667	2.122	3.198	3.7	0.535	0.87
8	1.181	0.438	1.706	0.484	0.178	0.078
9	5.917	0.238	1.579	0.082	0.041	0.019
9						
9	0.65	0.318	0.792	0.51	0.119	0.089

9	49.731	33.825	189.153	138.738	47.633	37.393
9	2.36	0.576	1.477	0.445	0.121	0.033
9	1.432	0.327	0.943	0.219	0.068	0.023
9	12.243	6.209	9.005	4.398	1.526	0.807
11						
11	6.521	3.016	5.215	2.576	0.175	0.079
11	1.407	1.128	1.328	1.052	0.081	0.053
11	5.888	0.54	1.394	0.107	0.035	0.022
11	5.163	0.785	3.062	0.638	0.067	0.019
11	6.304	2.03	4.491	1.041	0.261	0.089
11	35.562	18.143	20.792	12.436	0.949	0.563
12	0.497	0.054	0.355	0.056	0.032	0.032
13						
13	3.459	0.345	2.323	0.296	0.145	0.033
13	0.058	0.061	0.081	0.057	0.029	0.01
13	3.316	0.734	8.694	1.898	1.298	0.351
13	0.027	0.009	0.063	0.016	0.019	0.007
13	2.592	0.631	2.933	0.753	0.235	0.119
13	27.439	25.722	15.162	14.401	1.136	1.384
14						
17	0.394	0.029	0.748	0.112	0.039	0.017
17						
17	0.375	0.376	0.563	0.432	0.11	0.103
17	3.963	0.963	9.141	1.663	1.259	0.463
17	2.883	0.288	1.328	0.113	0.051	0.01
17						
17	8.718	9.262	6.718	5.781	0.915	0.757
20	0.55	0.109	0.411	0.078	0.037	0.03
20	3.279	0.532	2.223	0.357	0.131	0.031
20						
20	2.617	0.596	3.24	0.75	0.259	0.109
22	0.486	0.022	0.64	0.131	0.106	0.064
22	0.663	0.165	0.789	0.171	0.078	0.017
22	1.256	0.517	1.305	0.443	0.103	0.05
22						
23	0.295	0.061	0.64	0.04	0.032	0.015
23	5.363	0.986	6.207	1.481	0.121	0.039
23	0.637	0.285	0.735	0.477	0.11	0.089
23						
23	2.892	0.743	1.813	0.518	0.132	0.028
23	17.453	15.677	7.579	5.409	0.54	0.488
23	64.428	29.974	38.612	19.924	3.078	2.653
24	0.397	0.044	0.669	0.056	0.026	0.006
24	0.458	0.073	0.575	0.089	0.025	0.007
24	0.26	0.148	0.411	0.182	0.105	0.102
24	0.593	0.125	0.909	0.112	0.039	0.012
24	0.854	0.159	0.649	0.1	0.091	0.039

24	1.407	1.061	1.837	0.852	0.174	0.101
24	12.852	6.311	8.403	4.57	1.364	0.743
26	0.485	0.027	0.632	0.183	0.116	0.076
26	1.187	1.232	1.245	1.07	0.101	0.068
26	1.05	0.449	1.183	0.431	0.108	0.054
26						
27						
27	0.46	0.072	0.592	0.076	0.025	0.007
27	0.272	0.116	0.329	0.088	0.045	0.008
27	1.057	0.172	0.85	0.115	0.034	0.007
27	0.028	0.009	0.064	0.017	0.018	0.008
27	14.971	7.717	12.094	7.682	1.061	0.851
27	65.728	28.972	39.497	19.224	3.174	2.588
28	0.393	0.05	0.917	0.063	0.049	0.018
28						
28	0.945	0.261	0.953	0.234	0.076	0.02
28	5.735	3.41	11.242	8.701	1.375	1.655
28	1.9	0.269	1.137	0.163	0.094	0.024
28						
28	64.288	30.101	38.525	19.982	3.069	2.649
29	0.026	0.004	0.167	0.016	0.057	0.013
29	3.575	0.289	2.409	0.27	0.149	0.034
29	0.861	0.163	0.873	0.178	0.072	0.02
29						
29	2.058	0.44	1.24	0.274	0.104	0.03
29	2.668	0.618	3.31	0.809	0.263	0.11
29	29.816	62.475	21.912	50.524	0.761	1.504
30						
30	3.947	7.166	3.422	6.448	0.135	0.218
30	1.41	1.336	1.123	1.367	0.113	0.17
30	4.018	0.335	1.645	0.128	0.048	0.008
30	1.563	0.26	1.796	0.769	0.305	0.256
30	25.922	19.005	29.361	22.985	2.825	2.994
30	15.054	6.865	25.273	16.577	6.01	4.844
31	1.124	0.482	1.77	0.49	0.164	0.081
32						
32	15.581	13.496	12.963	10.606	0.345	0.403
32	1.511	1.096	1.478	1.031	0.081	0.053
32	4.88	0.548	1.228	0.189	0.027	0.009
32	4.361	0.464	2.499	0.235	0.072	0.015
32	6.186	2.07	4.312	1.003	0.228	0.064
32	39.46	22.6	23.859	16.409	1.029	0.648
33	0.45	0.051	0.526	0.081	0.063	0.036
33	0.623	0.167	0.747	0.18	0.077	0.018
33	0.743	0.414	0.593	0.515	0.066	0.063
33	1.442	0.41	1.43	0.34	0.115	0.054
33	2.98	0.326	1.439	0.174	0.059	0.011

33						
33	10.954	9.734	8.343	6.581	1.111	0.887
34	0.404	0.073	0.469	0.1	0.052	0.03
34	0.595	0.188	0.723	0.2	0.074	0.021
34	1.297	1.426	1.214	1.634	0.109	0.136
34	1.502	0.28	1.465	0.284	0.102	0.051
34	3.027	0.297	1.448	0.167	0.061	0.011
34						
34	9.57	9.47	7.252	6.146	0.968	0.822
35	5.405	0.151	1.318	0.089	0.014	0.01
35						
35	0.225	0.098	0.296	0.07	0.046	0.01
35	5.527	3.118	10.606	11.701	1.655	2.414
35	0.644	0.342	0.495	0.205	0.079	0.038
35	1.53	1.27	2.035	1.214	0.182	0.108
35	11.883	7.376	14.858	10.411	6.056	5.408
36	0.399	0.039	0.604	0.108	0.025	0.012
36						
36	0.346	0.135	0.503	0.129	0.081	0.03
36	1.023	0.169	0.843	0.104	0.035	0.008
36	1.356	0.293	0.872	0.191	0.059	0.022
37	0.398	0.039	0.527	0.102	0.018	0.009
37						
37	0.328	0.142	0.486	0.133	0.082	0.029
37	0.622	0.121	0.672	0.114	0.028	0.013
37	1.279	0.286	0.844	0.197	0.057	0.022
37	10.466	5.939	8.17	4.589	1.469	0.807
38	0.412	0.019	0.837	0.078	0.045	0.016
38	5.005	1.72	3.937	1.215	0.17	0.073
38	10.61	7.421	6.354	4.163	0.328	0.167
39	0.4	0.042	0.886	0.068	0.046	0.016
39	5.507	1.979	4.33	1.492	0.171	0.067
39	6.251	0.448	1.476	0.131	0.031	0.023
39	8.184	5.993	4.845	2.741	0.269	0.095
40	0.282	0.022	0.709	0.064	0.053	0.028
40	6.112	1.613	7.443	2.461	0.149	0.064
40	0.287	0.139	0.417	0.157	0.067	0.025
40	3.335	0.362	1.386	0.191	0.036	0.011
40	0.904	0.165	0.671	0.1	0.093	0.038
40	13.346	4.334	18.28	8.915	3.893	2.64
41	0.517	0.064	0.38	0.05	0.037	0.03
41						
41	0.622	0.126	0.815	0.107	0.034	0.011
41	9.572	4.089	4.738	1.89	0.338	0.198
42						
42	3.933	2.014	2.787	2.505	0.088	0.083
42	0.398	0.649	0.587	0.661	0.092	0.068

42	13.748	14.764	43.121	58.726	9.437	14.391
42	1.404	0.293	1.011	0.173	0.097	0.028
42	13.586	6.955	11.943	5.87	1.239	0.862
42	13.343	6.117	8.972	4.405	1.487	0.747
44						
44	3.798	2.074	2.556	2.6	0.079	0.086
44	0.335	0.128	0.375	0.1	0.047	0.007
44	1.004	0.141	0.839	0.086	0.035	0.008
44	0.683	0.293	0.52	0.171	0.075	0.039
44	12.034	5.732	11.74	5.469	1.273	0.828
44	14.849	6.868	17.784	9.147	7.037	4.977
45						
45	1.207	0.902	1.01	0.635	0.055	0.021
45	0.026	0.008	0.051	0.013	0.03	0.009
45	3.843	0.333	1.595	0.123	0.046	0.009
45	0.185	0.075	0.16	0.037	0.025	0.006
45	19.997	8.971	22.568	17.85	2.207	2.749
45	3.744	1.354	2.959	1.388	1.088	0.882
46						
46	1.053	0.743	1.04	0.801	0.049	0.022
46	1.618	1.309	1.334	1.319	0.112	0.158
46	4.187	0.324	1.696	0.124	0.049	0.008
46	1.455	0.285	1.589	0.871	0.272	0.274
46	19.363	10.423	18.464	13.962	1.587	1.913
46	14.132	3.845	18.916	8.515	4.081	2.548
47						
49						
49	0.981	0.761	0.976	0.828	0.046	0.023
49	2.832	3.478	3.098	4.78	0.26	0.442
49	4.394	0.324	1.868	0.373	0.073	0.086
49	1.34	0.279	1.282	0.91	0.226	0.29
49	19.602	11.203	18.656	13.908	1.458	1.646
49	15.109	4.608	17.668	8.486	3.656	2.644
50	0.384	0.049	0.699	0.042	0.026	0.006
50						
50	0.919	0.801	0.768	0.742	0.077	0.075
50	0.611	0.151	0.992	0.176	0.043	0.012
50	0.658	0.139	0.477	0.113	0.05	0.019
50	1.965	1.477	2.179	1.287	0.213	0.175
50	11.864	6.408	7.795	3.758	0.951	0.511
51						
52	0.408	0.038	0.632	0.068	0.022	0.006
52						
52	3.435	7.46	3.621	7.382	0.128	0.393
52	0.627	0.12	0.641	0.101	0.024	0.008
52	4.633	0.717	2.656	0.481	0.072	0.015
52	17.048	15.892	7.462	5.499	0.541	0.489

52	43.569	23.133	26.709	16.88	1.25	0.823
53	4.092	1.648	3.245	2.454	0.097	0.104
53						
53	0.354	0.233	0.445	0.218	0.051	0.016
53	0.216	0.218	0.216	0.157	0.055	0.034
53	10.267	4.466	10.677	5.548	1.169	0.862
53	21.275	14.295	12.414	7.992	1.578	1.152
54	7.473	2.213	7.269	2.606	0.19	0.098
54						
54	3.316	6.647	3.127	6.51	0.213	0.409
54	1.04	0.254	0.535	0.156	0.019	0.01
54	0.201	0.07	0.17	0.037	0.023	0.005
54	2.983	2.106	2.888	1.588	0.266	0.177
54	6.028	3.035	5.342	2.213	0.886	0.7
56	5.765	2.704	5.37	3.508	0.163	0.121
56	3.808	2.079	2.26	1.983	0.053	0.048
56	0.263	0.156	0.424	0.215	0.107	0.103
56	0.18	0.078	0.305	0.154	0.039	0.017
56	14.099	7.142	11.086	6.18	1.058	0.864
56	17.705	13.461	11.025	7.928	1.482	1.177
57	0.6	0.154	0.794	0.196	0.051	0.036
57	5.716	5.929	4.075	5.339	0.105	0.154
57	0.22	0.125	0.279	0.131	0.028	0.013
57	5.612	0.534	1.344	0.096	0.036	0.022
57	2.926	0.305	1.343	0.135	0.049	0.008
57	4.745	1.606	5.083	2.138	0.992	0.689
58	12.749	7.599	11.654	6.346	1.238	0.889
59	5.76	0.193	1.543	0.125	0.042	0.019
59	2.446	5.484	2.008	4.207	0.209	0.526
59	1.842	0.177	1.095	0.096	0.088	0.019
59	8.887	17.277	5.689	11.071	0.354	0.225
60	1.393	0.291	1.447	0.914	0.251	0.283
64	0.027	0.009	0.111	0.022	0.035	0.009
64	1.473	1.333	1.265	1.387	0.131	0.172
64	1.743	0.109	2.086	0.427	0.335	0.232
64	18.492	8.901	33.544	20.168	8.317	5.824
66	0.03	0.007	0.119	0.015	0.035	0.009
66	0.654	0.709	0.869	0.777	0.128	0.106
66	0.123	0.055	0.163	0.098	0.039	0.018
66	18.262	21.591	11.74	13.238	0.966	0.53
67	0.72	0.139	0.975	0.158	0.064	0.03
67	1.431	1.307	1.117	1.286	0.106	0.159
67	1.793	0.145	1.933	0.198	0.243	0.06
68	41.6	17.345	22.614	10.695	1.755	1.775
69	0.026	0.004	0.171	0.015	0.051	0.014
69	0.026	0.008	0.05	0.013	0.03	0.009
69	1.561	0.352	1.029	0.192	0.097	0.028

69	31.699	25.091	17.543	14.102	1.215	1.392
70	0.627	0.027	0.43	0.047	0.018	0.005
70	0.222	0.104	0.316	0.095	0.046	0.011
70	0.378	0.364	0.322	0.235	0.07	0.043
70	9.261	5.734	9.315	5.193	3.084	2.197
71	0.638	0.024	0.473	0.061	0.019	0.004
71	0.318	0.233	0.41	0.22	0.05	0.017
71	0.127	0.068	0.147	0.063	0.041	0.018
71	14.728	6.597	23.287	15.803	5.487	4.733
72	0.028	0.009	0.113	0.021	0.035	0.009
72	0.27	0.153	0.438	0.208	0.109	0.101
72	0.148	0.067	0.216	0.132	0.041	0.017
72	12.467	7.601	8.29	4.828	1.115	0.8
73	0.066	0.031	0.091	0.041	0.035	0.014

Fortsetzung der Tabelle

Probanden ID	APS Anzahl [#/cm ³]		NSAM		FMPS Masse [µg/m ³]	
	> 10 µm		LDSA [µm ² /cm ³]		r= 1 g/cm ³	
	MW	SD	MW	SD	MW	SD
1	0	0	2211.58	168.64	37.68	3.662
1	0.001	0.001	793.65	297.67	21.253	8.924
3			73.02	3.42	4.257	0.182
5	0	0	2582.44	183.29	56.025	8.685
5			1227.03	295.29	19.137	6.529
6	0	0	15.8	0.73	2.284	0.066
6	0	0.001	2549.48	175.18	61.709	8.558
6	0	0	3391.25	147.68	75.425	12.187
6			1374.27	317.97	21.505	6.137
6	0.001	0.001	3659.4	497.92	71.366	12.314
6	0.001	0.001	1054.1	221.08	35.82	7.609
6	0.002	0.002	3256.04	1110.33	167.15	60.977
7	0	0	18.78	0.7	1.351	0.041
7	0	0.001	2483.14	143.63	82.801	20.442
7	0.001	0.001	4218.03	97.87	96.086	8.67
7			1286.6	168.73	51.762	18.398
7	0	0	4655.19	456.87	95.85	13.56
7	0.002	0.004	1610.65	180.61	46.844	7.236
8	0	0	772.68	284.75	21.891	7.548
9	0	0	22.29	0.7	4.728	0.087
9			1527.32	76.13	56.351	8.702
9	0.001	0.001	3356.92	225.44	65.52	12.767
9	0.023	0.02	1894.59	184.54	32.103	3.509
9	0.001	0.001	3991.84	1405.09	102.728	56.648
9	0	0	953.41	374.18	24.757	10.923
9	0.008	0.004	5467.42	481.92	347.873	73.3
11			68.2	7.28	3.971	0.491
11	0.001	0.001	2352.4	85.29	42.661	4.846

11	0.001	0.001	3558.89	278.99	88.688	21.203
11	0	0	2082.95	430.11	38.774	6.846
11	0.001	0.001	3751.58	516.86	74.804	10.929
11	0.001	0.001	1174.18	392.12	38.601	16.195
11	0.002	0.001	3049.16	1054.87	154.697	55.74
12	0	0	15.49	0.29	2.365	0.067
13			71.27	5.78	4.15	0.315
13	0.001	0.001	2436.03	71.53	39.201	1.771
13	0.001	0.001	3729.43	110.03	75.106	8.051
13	0.001	0.001	1855.03	222.74		
13	0	0	2920.34	347.9	53.506	8.265
13	0.001	0.001	913.3	345.69	29.01	12.358
13	0.002	0.004	3361.17	1009.36	157.97	78.451
14			2002.81	439.99	39.325	10.403
17	0	0	16.6	1.02	1.936	0.115
17			1883.34	98.67	77.279	12.692
17	0.001	0.001	4625.59	277.79	93.848	11.258
17	0.001	0.001	1985.86	318.44	64.893	18.992
17	0	0	3176.57	352.9	59.946	7.38
17			612.85	264.78	15.046	8.707
17	0.003	0.008	1348.72	448.96	106.387	50.48
20	0	0	15.81	0.64	2.322	0.06
20	0.001	0.001	2468.47	71.68	41.62	2.702
20			1644.16	184.02	26.618	3.397
20	0.001	0.001	1198.36	423.21	38.646	15.396
22	0	0.001	17.71	0.25	1.051	0.052
22	0	0	2333.92	78.74	46.33	7.347
22	0.001	0.001	2032.85	429.73	35.652	7.913
22			801.6	324.56	61.074	29.177
23	0	0	19.04	0.46	1.388	0.063
23	0	0.001	2434.62	113.63	68.895	15.236
23	0.001	0.001	3271.01	236.15	60.091	10.668
23			1267.39	281.6	20.072	6.01
23	0.001	0.001	5144.12	1469.58	155.743	74.121
23	0.001	0.001	1210.83	730.94	58.887	49.925
23	0.006	0.007	3828.1	1233.49	244.87	81.241
24	0	0	13.72	0.3	2.045	0.19
24	0	0	2197.18	63.75	34.499	4.353
24	0.001	0.001	4583.23	158.77	89.342	8.894
24	0	0	1227.38	186.75	17.244	3.272
24	0	0	3282.08	526.9	67.477	11.539
24	0	0	925.98	165.01	24.999	7.86
24	0.008	0.004	5376.67	571.79	371.755	76.547
26	0.001	0.001	17.71	0.21	1.096	0.029
26	0	0	2343.92	81.03	42.514	5.967
26	0.001	0.001	1974.99	407.14	33.944	7
26			645.29	263.19	46.041	19.959

27			12.33	0.73	2.17	0.308
27	0	0	2195.68	63.16	33.581	5.388
27	0.002	0.001	3719.83	164.8	66.28	7.43
27	0	0	1829.38	388.29	31.269	6.665
27	0	0	3015.46	361.05	56.499	7.957
27	0.001	0.001	2277.51	627.65	130.479	50.016
27	0.006	0.007	3844.38	1226.65	245.499	81.086
28	0	0	17.86	0.67	2.157	0.035
28			1933.43	130.16	89.029	29.08
28	0.001	0.001	4187.3	157.49	92.886	13.745
28	0.001	0.001	2417.5	1042.26	87.7	33.058
28	0.001	0.001	2990.15	911.96	58.352	23.97
28			638.53	263.24	16.093	8.642
28	0.006	0.007	3824.94	1217.29	239.449	83.009
29	0	0	18.36	1.05	1.11	0.047
29	0.001	0	2433.07	74.15	39.865	1.756
29	0.001	0.001	4206.86	117.26	95.404	9.18
29			1624.38	238.54	27.899	4.089
29	0.001	0.001	3427.74	1276.01	75.348	42.286
29	0.001	0.001	1264.11	433.4	40.911	15.451
29	0.002	0.003	1659.74	363.05	67.555	48.346
30			10.69	0.27	1.959	0.2
30	0	0.001	2255.78	474.91	62.517	22.225
30	0.001	0.003	3700.15	210.93	79.153	12.577
30	0	0	1823.99	118.16	31.769	2.407
30	0.001	0.002	3313.58	548.93	61.519	11.083
30	0.004	0.005	2217.51	802.86	156.17	65.826
30	0.013	0.013	3649.29	241.36	207.185	31.633
31	0	0.001	810.25	274.81	21.838	8.903
32			15.65	1.45	2.635	0.286
32	0.001	0.001	2355.73	95.67	43.653	7.48
32	0.001	0.001	3607.85	216.83	92.2	17.429
32	0	0	1812.69	647.41	34.398	10.794
32	0.001	0.001	3816.33	453.65	76.197	9.474
32	0.001	0.001	1067.9	316.1	34.224	12.191
32	0.002	0.001	3156.3	1084.44	161.786	60.249
33	0	0	18.03	0.75	1.021	0.055
33	0	0	2339.28	81.61	49.147	6.817
33	0	0	3307.89	148.97	67.206	10.072
33	0.001	0.001	2078.62	455.79	36.886	8.74
33	0	0	3441.11	367.4	65.97	8.014
33			851.22	366.61	69.846	35.772
33	0.004	0.008	1401.73	427.11	115.814	50.481
34	0	0	18.67	1.16	1.031	0.068
34	0	0	2340.53	78.97	54.35	7.892
34	0	0	3384.49	150.38	71.733	13.403
34	0.001	0.001	2047.27	450.21	36.895	8.732

34	0	0	3385	376.3	63.989	8.306
34			1048.95	356.32	94.151	40.58
34	0.003	0.008	1363.85	458.49	110.61	53.357
35	0	0	20.61	0.48	4.572	0.071
35			1510.12	76.31	58.359	8.083
35	0.002	0.001	3651.4	151.81	64.239	8.358
35	0.001	0.001	2058.49	347.26	36.179	6.421
35	0	0	4905.95	417.61	99.459	9.331
35	0	0	926.1	175.61	26.421	10.068
35	0.016	0.018	3803.44	1037.59	278.144	128.405
36	0	0	18.3	2.39	1.935	0.099
36			1821.23	78.99	70.621	3.763
36	0	0	4059.9	117.47	87.982	11.47
36	0	0	1681.64	396.17	28.571	6.954
36	0	0	935.84	317.38	23.837	8.451
37	0	0	19.51	2.28	1.976	0.098
37			1783.56	93.85	72.663	6.496
37	0	0	4059.42	113.05	84.759	9.514
37	0	0	1341.53	144.73	19.499	2.366
37	0	0	893.31	285.33	22.54	7.47
37	0.007	0.003	5496.42	531.26	337.925	62.471
38	0	0	16.73	0.89	2.026	0.145
38	0.001	0.001	2378.12	103.27	43.814	5.314
38	0.001	0.001	1557.13	448.68	57.66	18.463
39	0	0	17.41	0.87	2.095	0.105
39	0.001	0.001	2364.79	100.31	43.32	5.576
39	0	0	2105.9	330.84	38.502	5.927
39	0.001	0.001	1493.55	491.03	52.478	20.514
40	0.001	0.001	17.74	1.11	1.309	0.037
40	0	0.001	2440.91	132.95	62.979	11.953
40	0.001	0.001	4494.4	140.04	83.767	7.077
40	0	0	1878.88	150.91	32.98	2.815
40	0	0	3429.14	334.53	69.303	9.164
40	0.008	0.008	3575.27	213.63	201.182	21.319
41	0	0	15.62	0.37	2.352	0.069
41			2532.99	93.8	60.6	8.024
41	0	0	1298.69	145.7	18.605	2.35
41	0.001	0.001	1147.63	316.35	42.178	17.491
42			13.46	0.91	2.396	0.259
42	0.001	0.001	2184.5	88.95	29.217	2.258
42	0	0	3987.34	165.69	83.049	7.46
42	0.004	0.006	1985.66	222.53	34.314	4.316
42	0	0	4412.18	624.7	100.001	11.55
42	0.002	0.002	2490.42	574.53	148.283	42
42	0.009	0.004	5538.26	506.43	378.03	72.971
44			14.72	1.4	2.514	0.289
44	0.001	0.001	2200.96	82.56	29.632	2.083

44	0.003	0.001	3808.66	180.03	69.861	8.852
44	0	0	1642.82	365.69	27.722	6.193
44	0	0	4901.23	418.14	95.911	14.078
44	0.002	0.001	2462.46	595.69	144.221	41.396
44	0.019	0.017	4088.19	860.47	302.799	113.747
45			9.49	0.91	1.824	0.232
45	0	0	2354.41	148.8	51.61	26.553
45	0	0	3722.96	124.51	79.668	9.074
45	0	0	1802.44	111.08	31.199	2.065
45	0	0	5039.82	251.69	100.303	16.342
45	0.003	0.005	2186.89	771.88	145.094	52.212
45	0.004	0.004	4651.04	639.26	235.15	47.493
46			7.96	0.47	1.549	0.17
46	0	0	2252.92	102.24	35.349	19.16
46	0.001	0.003	3792.55	359.78	74.769	13.695
46	0	0	1832.82	120.35	31.956	2.429
46	0.001	0.002	3386.21	599.98	63.15	12.822
46	0.002	0.003	2203.36	810.59	141.326	56.712
46	0.008	0.008	3521.06	213.56	203.326	20.794
47			8.68	0.86	1.683	0.202
49			7.54	0.26	1.418	0.135
49	0	0	2172.65	113.16	27.587	3.792
49	0.001	0.003	3877.51	392.56	75.154	13.926
49	0	0.001	1764.05	251.22	30.343	4.934
49	0.001	0.002	3490.15	550.93	65.159	12.073
49	0.002	0.003	2147.1	809.04	134.825	54.49
49	0.007	0.008	3423.03	229.73	196.842	24.924
50	0	0	13.38	0.57	2.143	0.27
50			2503.48	265.58	60.922	8.941
50	0	0	2517.01	1134.49	46.188	23.664
50	0	0	1202.97	197.56	16.772	3.412
50	0	0	2988.31	1029.73	63.93	21.163
50	0.001	0.001	952.4	228.13	27.605	11.127
50	0.001	0.002	4099.13	577.84	195.878	37.278
51			10.14	0.65	1.909	0.231
52	0	0	13.87	0.11	2.034	0.155
52			2535.45	101.18	61.04	8.225
52	0.001	0.001	3673.38	202.77	98.464	14.893
52	0	0	1415.2	158.57	20.854	2.855
52	0.001	0.001	3834.14	474.78	77.063	10.443
52	0.001	0.001	1330.47	601.38	61.784	47.509
52	0.002	0.002	3339.86	984.34	177.318	61.447
53	0	0	47.53	7.36	7.201	2.018
53			1534.3	79.17	54.177	9.6
53	0.001	0.001	3663.68	188.79	56.836	9.393
53	0	0	4481.36	253.42	93.793	5.989
53	0.001	0.001	2458.26	583.87	139.765	38.003

53	0.002	0.003	4833.89	779.51	264.359	81.179
54	0	0	75.64	20.55	13.41	4.475
54			1211.57	512.98	56.751	18.738
54	0	0	3234.66	669.2	76.193	17.773
54	0	0	1749.85	737.39	29.732	11.817
54	0	0	4799.22	534.6	100.481	17.367
54	0.001	0.001	1029.48	364.4	36.429	18.219
54	0.003	0.008	1306.58	370.32	100.207	34.915
56	0	0	60.55	20.33	10.113	4.55
56	0	0	2185.98	81.56	29.761	2.968
56	0.002	0.001	4667.86	225.6	95.283	9.237
56	0	0	3502.91	419.65	81.171	8.05
56	0.001	0.002	2336.13	623.16	136.714	47.558
56	0.002	0.003	4644.92	772.16	243.741	77.424
57	0	0	7.8	0.36	0.6	0.028
57	0	0	2003.56	547	31.289	8.536
57	0	0	4188.4	141.24	74.955	4.301
57	0	0	2099.65	438.36	39.222	7.004
57	0	0	3189.87	355.87	60.229	7.355
57	0.004	0.008	1411.32	390.08	111.735	43.669
58	0.002	0.002	2379.08	645.65	141.417	47.697
59	0	0	21.93	0.7	4.695	0.089
59	0.001	0.002	3875.38	974.83	89.529	25.318
59	0.002	0.001	2719.63	652.3	50.504	14.891
59	0.001	0.003	1612.61	195.73	51.815	21.424
60	0.001	0.002	3398.99	610.14	63.722	13.211
64	0	0	29.43	1.32	2.225	0.072
64	0.001	0.003	3672.97	208.07	79.69	11.865
64	0.001	0.002	3422.6	585.12	65.65	17.25
64	0.018	0.015	3647.1	245.03	215.409	38.23
66	0	0	30.71	1.71	2.293	0.108
66	0.002	0.001	4551.9	319.92	91.151	13.385
66	0	0	3895.48	383.28	92.168	14.295
66	0.001	0.001	3840.36	429.43	193.899	34.546
67	0	0	8.34	0.71	0.596	0.017
67	0.001	0.003	3782.24	360.15	77.21	14.64
67	0	0	3683.98	688.79	77.237	25.725
68	0.003	0.005	4422.19	1525.38	273.313	150.083
69	0	0	17.63	0.62	1.111	0.059
69	0	0	3727.6	115.94	77.979	8.21
69	0	0	4452.43	561.81	92.779	14.993
69	0.002	0.004	3349.89	1032.36	156.952	82.034
70	0	0	16.52	0.32	0.852	0.038
70	0.001	0.001	3571.53	108.77	57.129	8.811
70	0	0	4636.2	370.88	96.849	7.899
70	0.007	0.007	3837.21	1113.34	248.101	116.379
71	0	0	16.6	0.32	0.845	0.032

71	0.001	0.001	3631.81	189.08	56.465	8.636
71	0	0	4256.11	772.88	91.88	5.046
71	0.012	0.013	3629.27	235.36	202.489	23.709
72	0	0	29.68	1.47	2.238	0.078
72	0.001	0.001	4675.91	220.18	93.991	10.333
72	0	0	3783.22	462.24	88.365	15.069
72	0.002	0.002	4222.28	626.84	204.891	45.895
73	0.001	0	3977.41	122.47	82.485	12.547

Fortsetzung der Tabelle

Probanden ID	APS Masse [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]		PM1 Masse [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]		PM1-2.5 Masse [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	
	$r = 1 \text{ g}/\text{cm}^3$		$r = 1 \text{ g}/\text{cm}^3$		$r = 1 \text{ g}/\text{cm}^3$	
	MW	SD	MW	SD	MW	SD
1	2.4	0.6	38.36	3.74	0.95	0.17
1	8.6	3.66	21.77	9.03	3.23	1.04
3						
5	19.01	4.24	58.74	8.75	10.46	2.92
5						
6	2.5	2.08	2.56	0.05	0.66	0.14
6	18.37	4.78	64.412	8.203	10.32	3.04
6	6	6	76.07	12.44	2.34	2.93
6						
6	7.88	1.59	73.2	12.22	2.74	0.23
6	17.28	7.09	39.52	7.86	6.19	2.27
6	86	51	187.23	70.62	32.39	18.95
7	3.24	2.14	1.47	0.04	1.23	0.15
7	13.53	4.06	85.04	20.71	7.17	1.66
7	5.31	1.61	96.42	8.67	1.07	0.24
7						
7	5.48	1.12	96.54	13.65	1.62	0.26
7	26.64	39.65	48.64	7.54	6.06	8.31
8	8.65	3.33	22.44	7.63	3.18	1
9	5.53	0.86	7.32	0.18	1.59	0.18
9						
9	6.08	4.67	65.81	12.83	1.52	1.07
9	1839.02	1447.04	54.34	15.65	470.79	350.03
9	9.58	2.81	103.85	56.92	2.28	0.68
9	4.48	1.23	25.44	11.05	1.58	0.44
9	74.35	34.61	353.62	75.8	17.25	8.18
11						
11	15	6	45.44	5.84	6.11	3.19
11	6.18	3.67	89.33	21.36	2.14	1.77
11	5.11	1.16	41.35	6.98	1.38	0.1
11	8.43	1.21	77.04	11.04	3.36	0.61
11	18.32	4.53	41.485	16.84	6.74	1.65
11	70.1	39.15	172.31	63.81	26.85	16.23
12	2	2	2.6	0.09	0.53	0.15

13							
13	9.75	1.78	40.67	1.87	2.93	0.43	
13	2.87	1.79	75.13	8.04	0.16	0.08	
13	52.02	13.58					
13	0.91	0.37	53.52	8.27	0.14	0.04	
13	14.02	5.68	30.16	12.58	5.027	1.606	
13	66.12	71.19	171.97	71.34	20.95	19.72	
14							
17	2.96	1.06	2.12	0.12	1.25	0.22	
17							
17	6.89	3.46	94.03	11.18	1.1	0.75	
17	52.02	15.65	83.11	8.34	14.57	0.59	
17	4.81	0.6	61.34	7.37	1.73	0.15	
17							
17	47.21	45.36	110.96	54.76	11.71	9.15	
20	2.41	2.12	2.58	0.07	0.609	0.138	
20	8.91	1.85	43.01	2.63	2.83	0.48	
20							
20	15	5	39.81	15.58	5.65	1.58	
22	5.68	3.48	1.274	0.056	1.268	0.377	
22	4.45	0.97	46.63	7.35	1.46	0.31	
22	6.89	3.1	36.27	7.99	2.17	0.84	
22							
23	2.24	0.84	1.52	0.09	1.12	0.13	
23	13.61	3.17	71.12	14.98	7.57	1.94	
23	5.75	4.73	60.38	10.73	1.39	1.01	
23							
23	9.54	2.33	157.12	74.48	2.74	0.73	
23	34.88	28.49	67.19	57.53	11.69	8.21	
23	174.36	121.78	278.9	95.48	58.28	33.32	
24	2.01	0.35	2.24	0.2	1	0.09	
24	2.03	0.5	34.71	4.37	0.92	0.16	
24	6.29	3.62	89.46	8.86	0.86	0.36	
24	3.16	0.77	17.53	3.29	1.43	0.22	
24	5	3	67.88	11.59	1.18	0.17	
24	9.18	4.77	25.67	8.26	3.61	1.71	
24	68.67	33.35	377.8	79.04	15.48	8.17	
26	6.29	4.09	1.311	0.031	1.28	0.49	
26	6.01	4.13	43.06	5.81	2.27	1.92	
26	6.94	3.34	34.46	7.01	2.02	0.85	
26							
27							
27	2	0	33.8	5.41	0.95	0.14	
27	6.32	2.63	66.41	7.44	0.606	0.135	
27	2.91	0.52	31.75	6.72	1.26	0.13	
27	0.88	0.45	56.51	7.96	0.14	0.04	
27	56.09	40.4	137.73	53.15	21.94	15.25	

27	179.1	118.47	280.16	94.72	59.58	32.31
28	3.61	1.19	2.34	0.048	1.55	0.16
28						
28	5.97	1.45	93.28	13.66	1.26	0.31
28	59.73	63.96	103.89	28.6	26	29.07
28	8.44	3.35	59.25	24.09	1.76	0.27
28						
28	174.8	121.38	273.31	97.38	57.76	33.6
29	2.4	0.68	1.12	0.05	0.41	0.05
29	10	1.79	41.38	1.82	3.04	0.43
29	5.67	1.5	95.76	9.16	1.16	0.25
29						
29	8.87	3.12	76.33	42.5	1.92	0.44
29	15.3	5.46	42.09	15.65	5.78	1.69
29	63.14	125.45	81.51	76.71	30.27	71.45
30						
30	10.91	18.54	64.47	23.04	5.51	10.52
30	7	13	79.89	12.81	1.96	2.45
30	5.31	0.69	33.56	2.48	1.81	0.14
30	14.63	12.99	62.26	11.07	3.69	1.97
30	141.51	136.41	168.42	73.69	56.54	48.31
30	249.31	203.55	214.15	33.82	55.57	38.67
31	8.55	3.65	22.36	9.03	3.27	1.01
32						
32	32.34	30.44	50.39	13.03	15.89	15.22
32	6.51	3.5	92.89	17.53	2.33	1.72
32	4.22	0.76	36.52	10.97	1.23	0.21
32	7.84	1.46	78.08	9.43	2.79	0.25
32	17.01	3.93	37.051	12.977	6.35	1.49
32	77.61	47.57	181.27	70.24	31.07	22.15
33	3.57	2.21	1.23	0.06	0.98	0.2
33	4.32	0.98	49.43	6.83	1.39	0.33
33	3.34	2.68	67.53	10.12	1.04	1.04
33	7.67	2.98	37.6	8.85	2.37	0.67
33	5.18	0.72	67.41	8.12	1.94	0.25
33						
33	57	50	121.59	54.86	14.55	11.03
34	2.96	1.83	1.21	0.05	0.87	0.22
34	4.1	1.17	54.62	7.86	1.35	0.36
34	5.46	6.12	72.32	13.72	2.16	3.01
34	6.93	2.67	37.64	8.82	2.38	0.65
34	5	1	65.45	8.41	1.95	0.25
34						
34	50.18	47.67	115.65	57.81	12.6	10.05
35	3.95	0.53	6.935	0.122	1.188	0.129
35						
35	5.22	2.23	64.35	8.37	0.56	0.11

35	68.71	91.94	38.68	5.92	23.21	28.48
35	3.48	1.63	99.75	9.44	0.79	0.29
35	9.75	5.49	27.15	10.62	3.95	2.24
35	252.58	232.59	283.61	131.55	31.18	23.81
36	2.2	0.68	2.13	0.12	0.948	0.233
36						
36	3.89	1.43	87.6	11.08	0.95	0.26
36	2.95	0.63	29.04	7.01	1.27	0.12
36	3.96	1.12	24.47	8.47	1.42	0.38
37	1.84	0.64	2.17	0.11	0.791	0.205
37						
37	4	1	84.9	9.5	0.93	0.26
37	2.47	0.82	19.81	2.36	0.98	0.2
37	3.75	1.11	23.14	7.51	1.38	0.38
37	68.97	34.35	342.81	64.23	15.98	8.51
38	3	1	2.22	0.15	1.41	0.14
38	12.94	4.71	45.97	5.84	4.888	1.968
38	23.5	13.37	62.53	20.91	8.92	5.41
39	3.44	1.09	2.28	0.11	1.5	0.15
39	13.74	4.64	45.68	6.08	5.16	2.06
39	5.21	1.13	41.24	5.86	1.43	0.12
39	18.84	7.8	56.24	22.59	6.87	3.09
40	4.11	2.96	1.43	0.03	1.282	0.152
40	16.44	5.17	65.52	11.58	9.3	3.42
40	4.88	2.49	83.9	7.02	0.84	0.29
40	4.25	0.85	34.45	2.74	1.5	0.24
40	5.26	2.91	69.73	9.22	1.22	0.16
40	163.41	111.06	207.5	22.64	38.61	20.95
41	2.41	2.14	2.59	0.09	0.569	0.127
41						
41	2.81	0.73	18.91	2.37	1.24	0.2
41	21.34	10.33	46.482	19.295	7.648	3.408
42						
42	9.08	7.33	31.02	3.07	4.41	4.35
42	4.3	3.28	83.23	7.53	1.16	1.29
42	366	550	40.48	7.25	103.99	146.35
42	5.33	1.23	100.68	11.63	1.6	0.24
42	61.79	37.64	154.94	44.7	23.27	13.13
42	73.75	33.04	384.31	75.39	16.83	7.98
44						
44	8.31	7.65	31.37	2.91	3.95	4.53
44	7.15	2.65	70.03	8.88	0.67	0.15
44	2.94	0.55	28.18	6.24	1.28	0.12
44	3.41	1.67	96.21	14.18	0.82	0.26
44	61.82	36.14	150.13	43.71	23.73	12.71
44	296.27	216.28	309.73	116.39	36.68	21.1
45						

45	3.99	1.68	52.2	26.78	1.59	0.92
45	2.03	0.98	79.68	9.07	0.11	0.03
45	5.09	0.77	32.9	2.1	1.75	0.15
45	1.28	0.44	100.39	16.37	0.25	0.04
45	110.23	121.37	154.59	55.67	44.49	42.57
45	50.88	39.75	237.12	47.71	5.69	3.11
46						
46	3.71	2.01	35.86	19.2	1.72	1.31
46	7.76	12.62	75.61	13.96	2.28	2.28
46	5.57	0.79	33.83	2.51	1.87	0.13
46	13	14	63.85	12.76	3.24	2.21
46	83.57	85.64	150.56	60.87	34.15	31.17
46	172	107	210.06	21.76	39.99	20.16
47						
49						
49	3.44	2.09	28.06	4.09	1.62	1.35
49	14.9	22.55	76.6	14.62	5.76	9.36
49	6.9	4.7	32.31	4.89	2.18	0.82
49	11.3	14.38	65.81	12.01	2.56	2.35
49	79.74	77.64	144.18	58.59	34.2	29.38
49	156.74	110.59	204.12	25.35	36.35	20.53
50	2.05	0.33	2.35	0.28	1.08	0.06
50						
50	4	4	46.64	23.72	1.41	1.39
50	3.37	0.83	17.06	3.42	1.58	0.3
50	2.71	0.98	64.25	21.21	0.82	0.21
50	11	8	28.55	11.68	4.23	2.78
50	46.02	23.68	202.3	39.83	13.27	6.29
51						
52	1.86	0.41	2.23	0.16	0.94	0.1
52						
52	10.93	23.08	100.1	15.95	5.33	12.53
52	2.22	0.62	21.16	2.84	0.91	0.15
52	8.19	1.55	79.07	10.55	2.957	0.489
52	34.68	28.67	69.92	55.36	11.62	8.28
52	89.14	53.33	198.83	71.7	35.33	23.4
53	8.41	6.21	9.04	2.74	4.42	3.87
53						
53	4.82	1.63	57	9.44	0.83	0.39
53	2.18	1.48	93.89	6.05	0.4	0.25
53	57	37	144.83	39.74	21.93	13.22
53	75.59	53.1	276.28	89.14	21.52	14.32
54	17.05	6.04	16.76	5.43	10	3.81
54						
54	11.5	22.16	77.81	16.57	5.44	11.45
54	2	1	30.22	11.93	0.66	0.2
54	1.25	0.45	100.57	17.39	0.26	0.04

54	14.65	8.49	37.87	19.09	5.43	3.06
54	43.85	40.51	103.36	35.57	10.02	4.82
56	13.45	8.35	12.7	5.73	7.51	5.23
56	6.61	5.35	31.52	3.69	3.19	3.14
56	6.85	3.44	95.41	9.25	0.87	0.41
56	2.22	0.83	81.25	8.04	0.42	0.18
56	54.71	38.42	143.6	50.57	20.49	13.18
56	69.7	54.27	253.6	84.9	19.57	14.48
57	3.19	1.66	0.89	0.07	1.26	0.32
57	11	14	34	10.72	6.14	8.65
57	1.74	0.72	76.37	4.35	0.54	0.25
57	5	1.17	41.68	7.08	1.346	0.095
57	4.76	0.56	61.64	7.36	1.74	0.17
57	46.38	40.53	114.22	44.23	10.31	5.01
58	60.89	39.58	147.67	50.77	23.03	13.84
59	5.42	1	7.21	0.16	1.56	0.21
59	11.75	25	90.65	24.26	3.19	7.55
59	8.21	3.29	51.38	14.96	1.68	0.16
59	24.49	27.45	56.08	29.36	7.92	13.53
60	12.3	14.09	64.39	13.14	2.93	2.32
64	1.4	0.47	2.24	0.07	0.25	0.05
64	8	13	80.46	12.07	2.28	2.53
64	15.79	12.08	66.47	17.29	4.27	1.33
64	346.49	246.96	223.9	41.58	74.62	46.63
66	1.39	0.48	2.3	0.1	0.27	0.04
66	8.18	4.35	91.46	13.24	1.62	1.36
66	1.99	0.94	92.22	14.29	0.24	0.11
66	52.9	38.08	203.33	43.72	17.73	17.01
67	3.79	1.28	0.94	0.06	1.56	0.23
67	7.29	12.69	77.95	14.87	1.9	2.22
67	11.37	2.44	78.08	25.79	3.74	0.58
68	100	82	172.18	105.3	31.33	17.58
69	2.09	0.75	1.12	0.06	0.41	0.04
69	2	0.94	77.99	8.21	0.11	0.03
69	5.52	1.08	93.53	15.09	1.6	0.28
69	72.79	70.44	165.93	74.13	23.81	19.25
70	1.52	0.29	1.18	0.04	0.67	0.03
70	4.18	1.16	57.23	8.79	0.61	0.16
70	2.88	1.87	97.02	8.02	0.56	0.35
70	127.66	92.71	252.26	118.85	17.75	10.52
71	1.63	0.25	1.18	0.03	0.73	0.1
71	4.61	1.52	56.61	8.67	0.77	0.39
71	1.64	0.63	91.94	5.05	0.29	0.11
71	229.64	199.64	209.35	25.91	50.78	37.13
72	1.4	0.47	2.25	0.08	0.26	0.05
72	6.7	3.49	94.12	10.34	0.91	0.39
72	2.18	0.88	88.43	15.06	0.31	0.16

72	52.68	36.69	211.73	49.74	14.68	9.18
73	2.54	1.03	83.31	11.65	0.17	0.07

Fortsetzung der Tabelle

Probanden ID	PM2.5-10 Masse [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	
	MW	SD
1	0.663	0.398
1	4.255	2.125
3		
5	5.383	2.023
5		
6	1.378	1.487
6	4.819	2.071
6	2.6	2.45
6		
6	2.371	0.689
6	6.949	4.372
6	31.08	22.69
7	1.594	1.627
7	3.756	2.047
7	2.852	0.907
7		
7	2.99	0.904
7	16.811	27.841
8	4.468	2.084
9	1.175	0.63
9		
9	3.816	3.218
9	1328.683	1067.761
9	4.12	1.224
9	1.965	0.667
9	41.031	22.062
11		
11	5.334	1.733
11	2.122	1.061
11	1.059	1.024
11	2.205	0.848
11	7.275	2.418
11	23.341	14.361
12	1.15	1.54
13		
13	4.526	1.234
13	1.264	0.422
13		
13	0.709	0.311
13	6.647	3.572
13	29.453	40.139

14		
17	1.302	0.695
17		
17	3.672	2.893
17	11.564	0.665
17	1.429	0.358
17		
17	27.933	31.251
20	1.33	1.5
20	3.955	1.092
20		
20	7.24	3.27
22	3.78	2.746
22	2.334	0.604
22	3.491	2.038
22		
23	0.851	0.617
23	3.378	1.447
23	3.608	3.284
23		
23	4.184	1.038
23	13.972	13.979
23	75.352	76.036
24	0.6	0.181
24	0.674	0.215
24	3.453	2.927
24	1.235	0.514
24	3.21	2.64
24	4.488	2.651
24	36.605	19.98
26	4.28	3.23
26	2.79	1.475
26	3.729	2.206
26		
27		
27	0.672	0.215
27	2.173	0.676
27	0.998	0.308
27	0.654	0.33
27	25.317	21.395
27	78.029	74.416
28	1.547	0.802
28		
28	3.125	0.821
28	31.215	60.204
28	3.293	1.195
28		

28	76.307	75.373
29	1.807	0.525
29	4.646	1.235
29	3.006	0.837
29		
29	3.624	1.253
29	7.332	3.284
29	17.166	25.25
30		
30	2.95	4.03
30	3.76	8.22
30	1.427	0.372
30	9.459	9.886
30	68.944	78.911
30	176.868	153.003
31	4.176	2.158
32		
32	8.516	7.725
32	2.107	1.069
32	0.783	0.342
32	2.393	0.658
32	6.4	1.82
32	24.632	15.127
33	2.083	1.774
33	2.349	0.66
33	1.828	1.433
33	3.875	2.2
33	1.56	0.4
33		
33	33.59	33.62
34	1.617	1.425
34	2.22	0.75
34	2.516	2.495
34	3.254	1.818
34	1.59	0.41
34		
34	29.457	32.432
35	0.374	0.365
35		
35	1.959	0.574
35	41.697	61.452
35	2.241	1.202
35	4.605	2.766
35	203.286	193.132
36	0.91	0.52
36		
36	2.385	0.861

36	1.01	0.38
36	1.697	0.657
37	0.707	0.475
37		
37	2.36	0.85
37	1	0.532
37	1.612	0.661
37	39.269	21.893
38	1.51	0.73
38	5.194	2.182
38	8.466	4.478
39	1.463	0.73
39	5.445	1.982
39	0.911	1.052
39	7.095	2.598
40	2.052	1.906
40	4.095	1.823
40	2.276	1.126
40	1.112	0.447
40	3.281	2.603
40	112.338	83.468
41	1.345	1.489
41		
41	1.116	0.508
41	8.824	5.43
42		
42	2.021	1.621
42	2.475	1.434
42	251.99	392.91
42	2.892	0.973
42	30.016	22.374
42	39.678	20.179
44		
44	1.852	1.678
44	2.446	0.657
44	1.025	0.367
44	2.116	1.245
44	30.624	21.605
44	237.6	180.824
45		
45	1.492	0.522
45	1.252	0.325
45	1.367	0.386
45	0.801	0.243
45	53.519	72.597
45	39.883	34.279
46		

46	1.25	0.491
46	3.656	8.136
46	1.479	0.377
46	8.61	10.31
46	38.064	49.252
46	118.5	80.85
47		
49		
49	1.171	0.512
49	6.403	11.281
49	2.149	2.817
49	7.413	10.754
49	33.93	41.999
49	107.176	83.886
50	0.528	0.068
50		
50	2.15	1.82
50	1.281	0.503
50	1.466	0.744
50	5.58	4.53
50	25.008	14.577
51		
52	0.515	0.224
52		
52	2.723	6.706
52	0.867	0.394
52	2.428	0.695
52	13.996	13.977
52	29.671	19.196
53	1.935	1.625
53		
53	1.793	0.509
53	1.602	1.031
53	28.107	22.496
53	39.87	31.287
54	3.38	1.643
54		
54	4.13	7.09
54	0.61	0.39
54	0.733	0.225
54	6.939	4.54
54	27.705	30.724
56	3.036	1.953
56	1.304	1.059
56	3.701	2.849
56	1.526	0.729
56	25.699	22.371

56	38.146	31.844
57	1.492	1.293
57	2.09	2.69
57	0.744	0.319
57	1.074	1.01
57	1.383	0.305
57	30.523	30.176
58	29.998	22.986
59	1.177	0.647
59	5.817	11.859
59	3.099	1.085
59	10.813	6.022
60	8.018	10.556
64	1.056	0.402
64	4.06	8.2
64	9.984	9.436
64	248.922	185.242
66	1.03	0.421
66	4.035	2.968
66	1.556	0.782
66	24.467	13.036
67	1.754	1.15
67	3.611	8.142
67	6.441	1.88
68	44.84	53.2
69	1.53	0.599
69	1.217	0.342
69	2.998	0.889
69	31.024	40.684
70	0.59	0.231
70	1.674	0.41
70	2.019	1.289
70	99.997	75.557
71	0.563	0.196
71	1.759	0.526
71	1.243	0.523
71	162.749	150.66
72	1.056	0.403
72	3.65	2.854
72	1.637	0.739
72	29.579	23.109
73	1.391	0.5

10 Anhang II

10.1 Deskriptionstabellen

Tabelle 46: Mittelwert (mean) und Standardabweichung (SD) der Nasallavage für alle Probanden und Expositionen zu den jeweiligen Messzeitpunkten

	Pre		Post 2h		Post 24h	
Zellanzahl [10³/ml]	mean	SD	mean	SD	mean	SD
Raumluft	406.14	337.9	388.48	509.03	497.05	602.72
Kerzen Level 1	570.67	616.58	365.88	436.8	505.76	573.55
Kerzen Level 2	539.19	564.28	376.76	495.47	563.78	845.6
Toasten Level 1	875.56	1070.61	419.14	596.69	334.44	317.51
Toasten Level 2	923.53	1165.03	454.12	784.48	959.71	1961.42
Braten Level 1	753.71	979.93	434.86	720.25	460.29	762.67
Braten Level 2	1177.22	1729.73	487.71	512.76	487.43	706.44
Epithelzellen in der Nasallavage [%]	mean	SD	mean	SD	mean	SD
Raumluft	29	33	22	21	25	30
Kerzen Level 1	30	29	31	27	37	34
Kerzen Level 2	22	26	21	21	27	28
Toasten Level 1	30	30	24	28	25	26
Toasten Level 2	20	27	13	15	26	28
Braten Level 1	16	21	21	23	21	22
Braten Level 2	24	27	17	21	28	30
neutrophilen Granulozyten in der Nasallavage [%]	mean	SD	mean	SD	mean	SD
Raumluft	68	32	75	21	71	31
Kerzen Level 1	67	29	66	27	60	33
Kerzen Level 2	74	25	75	22	68	30
Toasten Level 1	69	30	73	29	72	27
Toasten Level 2	76	28	79	23	70	30
Braten Level 1	80	21	74	26	72	27
Braten Level 2	71	29	77	25	68	30
basophilen Granulozyten in der Nasallavage [%] #	mean	SD	mean	SD	mean	SD
Raumluft	0	0	0	0	0	0
Kerzen Level 1	0	0	0	0	0	0
Kerzen Level 2	0	0	1	2	0	0
Toasten Level 1	0	0	0	0	0	0
Toasten Level 2	0	0	0	2	0	0
Braten Level 1	0	0	0	0	0	0
Braten Level 2	0	0	0	0	0	0
	Pre		Post 2h		Post 24h	
eosinophilen Granulozyten in der Nasallavage [%]	mean	SD	mean	SD	mean	SD

Raumluft	1	4	1	3	0	1
Kerzen Level 1	1	2	0	2	0	2
Kerzen Level 2	1	7	2	5	4	15
Toasten Level 1	0	1	0	2	0	1
Toasten Level 2	1	2	3	13	1	4
Braten Level 1	1	2	0	1	1	3
Braten Level 2	3	15	1	3	4	4
Monozyten/Makrophagen in der Nasallavage [%] #	mean	SD	mean	SD	mean	SD
Raumluft	0	1	0	1	0	1
Kerzen Level 1	1	1	0	1	0	1
Kerzen Level 2	0	0	0	1	0	0
Toasten Level 1	0	0	1	1	0	1
Toasten Level 2	0	1	0	2	0	0
Braten Level 1	1	1	0	1	0	1
Braten Level 2	0	1	0	1	0	1
Lymphozyten in der Na- sallavage [%]	mean	SD	mean	SD	mean	SD
Raumluft	1	3	1	2	2	5
Kerzen Level 1	1	3	2	3	2	3
Kerzen Level 2	2	3	1	2	2	4
Toasten Level 1	1	2	2	4	2	3
Toasten Level 2	2	4	3	6	2	5
Braten Level 1	2	4	4	8	6	15
Braten Level 2	1	2	4	10	2	6
Interleukin 8 aus Nasalla- vage [pg/ml]	mean	SD	mean	SD	mean	SD
Raumluft	129.01	113.00	112.95	91.60	127.28	86.82
Kerzen Level 1	206.78	258.65	146.44	179.53	164.02	197.26
Kerzen Level 2	186.66	260.89	217.16	548.34	150.79	186.96
Toasten Level 1	169.22	197.48	109.87	80.14	185.07	310.21
Toasten Level 2	166.77	172.43	139.57	189.23	157.09	193.68
Braten Level 1	179.70	272.87	146.59	200.92	159.37	187.59
Braten Level 2	147.05	116.53	116.93	99.26	136.65	104.00

Messwerte liegen bei 0

Tabelle 47: Mittelwert (mean) und Standardabweichung (SD) des NO-Anteils der Ausatemluft (FeNO) für alle Probanden und Expositionen zu den jeweiligen Messzeitpunkten

FeNO [ppb]	Pre		Post 2h		Post 24h	
	mean	SD	mean	SD	mean	SD
Raumluft	10.9	7.7	10.9	6.7	11.3	7.3
Kerzen Level 1	10.9	7.5	12.3	8.5	12.4	8.7
Kerzen Level 2	15.7	18.9	15.3	18.7	13.6	14.4
Toasten Level 1	12.6	9.5	11.3	9.1	12.5	10.3
Toasten Level 2	10.9	9.9	12.6	14.8	12.8	15.5
Braten Level 1	11.7	10.9	12.0	11.7	11.9	10.6
Braten Level 2	11.7	11.8	13.8	12.1	12.4	13.9

Tabelle 48: Mittelwert (mean) und Standardabweichung (SD) der Lungenfunktionsvariablen für alle Probanden und Expositionen zu den jeweiligen Messzeitpunkten

FEV ₁ [l]	Pre		Post 4h		Post 24h	
	mean	SD	mean	SD	mean	SD
Raumluft	3.60	0.84	3.51	0.79	3.56	0.78
Kerzen Level 1	3.50	0.79	3.55	0.80	3.60	0.83
Kerzen Level 2	3.53	0.89	3.55	0.91	3.56	0.89
Toasten Level 1	3.50	0.88	3.49	0.82	3.48	0.84
Toasten Level 2	3.54	0.75	3.57	0.79	3.60	0.75
Braten Level 1	3.50	0.88	3.46	0.85	3.43	0.91
Braten Level 2	3.57	0.68	3.44	0.70	3.50	0.71
FVC [l]	mean	SD	mean	SD	mean	SD
Raumluft	4.47	1.00	4.34	0.94	4.43	0.95
Kerzen Level 1	4.35	0.96	4.37	0.94	4.45	0.99
Kerzen Level 2	4.45	1.09	4.42	1.08	4.44	1.08
Toasten Level 1	4.42	1.00	4.34	0.90	4.35	0.93
Toasten Level 2	4.43	0.91	4.43	0.95	4.49	0.92
Braten Level 1	4.37	1.00	4.35	0.99	4.35	1.04
Braten Level 2	4.48	0.83	4.26	0.79	4.33	0.86
FEV ₁ /FVC	mean	SD	mean	SD	mean	SD
Raumluft	0.806	0.073	0.811	0.068	0.805	0.076
Kerzen Level 1	0.807	0.076	0.814	0.076	0.810	0.082
Kerzen Level 2	0.793	0.071	0.801	0.068	0.801	0.071
Toasten Level 1	0.791	0.082	0.804	0.080	0.801	0.083
Toasten Level 2	0.799	0.068	0.807	0.073	0.804	0.074
Braten Level 1	0.799	0.085	0.797	0.090	0.788	0.099
Braten Level 2	0.799	0.074	0.808	0.076	0.811	0.078
MEF ₂₅₋₇₅ [l/s]	mean	SD	mean	SD	mean	SD
Raumluft	3.47	1.22	3.47	1.19	3.45	1.17
Kerzen Level 1	3.48	1.25	3.60	1.27	3.58	1.27

Kerzen Level 2	3.28	1.18	3.41	1.22	3.37	1.22
Toasten Level 1	3.35	1.37	3.48	1.37	3.44	1.41
Toasten Level 2	3.35	1.16	3.48	1.21	3.42	1.10
Braten Level 1	3.41	1.34	3.41	1.39	3.28	1.39
Braten Level 2	3.35	1.06	3.33	1.18	3.35	1.12

Tabelle 49: Mittelwert (mean) und Standardabweichung (SD) der Variablen des Differenzialblutbildes für alle Probanden und Expositionen zu den jeweiligen Messzeitpunkten

	Lymphozyten [tsd/ μ l]				Erythrozyten [mill/ μ l]			
	Pre		Post 24h		Pre		Post 24h	
	mean	SD	mean	SD	mean	SD	mean	SD
Raumluft	1.84	0.45	1.83	0.47	4.56	0.41	4.53	0.46
Kerzen Level 1	1.87	0.56	1.76	0.43	4.63	0.44	4.6	0.45
Kerzen Level 2	1.9	0.48	1.84	0.48	4.58	0.44	4.56	0.47
Toasten Level 1	1.88	0.52	1.76	0.43	4.53	0.45	4.53	0.47
Toasten Level 2	1.88	0.49	1.9	0.6	4.52	0.4	4.47	0.47
Braten Level 1	1.86	0.55	1.76	0.52	4.57	0.44	4.54	0.49
Braten Level 2	1.86	0.55	1.82	0.59	4.61	0.4	4.6	0.46
	Leukozyten [$10^3/\mu$ l]				Thrombozyten [tsd/ μ l]			
	Pre		Post 24h		Pre		Post 24h	
	mean	SD	mean	SD	mean	SD	mean	SD
Raumluft	5.91	1.25	5.96	1.33	245.64	45.66	246.7	45.9
Kerzen Level 1	6.1	1.44	6.06	1.33	249.29	47.96	251.67	49.27
Kerzen Level 2	5.79	1.48	5.45	1.19	234.35	43.27	233.03	44.71
Toasten Level 1	6.44	2.14	6	1.55	243.21	54.18	244.36	57.57
Toasten Level 2	5.75	1.27	5.92	1.1	243.45	47.35	239.74	48.46
Braten Level 1	6.36	1.66	5.89	1.46	252.88	54.66	247.96	54.71
Braten Level 2	5.77	1.26	5.53	1.05	236.72	49.18	238.9	46.25

Neutrophile [tsd/ μ l]					Eosinophile [tsd/ μ l]			
	Pre		Post 24h		Pre		Post 24h	
	mean	SD	mean	SD	mean	SD	mean	SD
Raumluft	3.4	1.09	3.51	1.26	0.13	0.08	0.14	0.1
Kerzen Level 1	3.54	1.15	3.66	1.18	0.16	0.14	0.14	0.14
Kerzen Level 2	3.22	1.42	3.01	1.01	0.16	0.15	0.15	0.13
Toasten Level 1	3.85	1.88	3.63	1.53	0.17	0.14	0.13	0.12
Toasten Level 2	3.23	1.05	3.36	0.9	0.15	0.13	0.16	0.18
Braten Level 1	3.81	1.51	3.49	1.17	0.15	0.15	0.15	0.13
Braten Level 2	3.25	1.12	3.07	0.89	0.13	0.13	0.13	0.12
Basophile [tsd/ μ l]					Monozyten [tsd/ μ l]			
	Pre		Post 24h		Pre		Post 24h	
	mean	SD	mean	SD	mean	SD	mean	SD
Raumluft	0.04	0.05	0.03	0.05	0.51	0.13	0.48	0.14
Kerzen Level 1	0.03	0.04	0.04	0.05	0.5	0.15	0.45	0.12
Kerzen Level 2	0.03	0.04	0.02	0.04	0.44	0.14	0.42	0.11
Toasten Level 1	0.02	0.04	0.03	0.05	0.53	0.16	0.46	0.11
Toasten Level 2	0.03	0.04	0.04	0.05	0.46	0.16	0.49	0.15
Braten Level 1	0.04	0.05	0.03	0.05	0.51	0.12	0.48	0.13
Braten Level 2	0.02	0.04	0.03	0.05	0.49	0.17	0.48	0.16
Hämoglobin [g/dl]					Hämatokrit [%]			
	Pre		Post 24h		Pre		Post 24h	
	mean	SD	mean	SD	mean	SD	mean	SD
Raumluft	13.83	1.43	13.85	1.48	41.01	3.68	40.77	4.18
Kerzen Level 1	14.02	1.59	14	1.41	41.64	4.54	41.27	4.2
Kerzen Level 2	14.01	1.41	13.91	1.48	41.07	3.96	40.75	4.16
Toasten Level 1	13.88	1.59	13.8	1.6	40.68	4.47	40.65	4.61
Toasten Level 2	13.81	1.33	13.57	1.34	40.31	3.4	39.83	3.89
Braten Level 1	13.91	1.58	13.81	1.69	40.91	4.44	40.54	4.68
Braten Level 2	14.05	1.25	14	1.37	41.25	3.55	40.89	3.97

Tabelle 50: Mittelwert (mean) und Standardabweichung (SD) von Markern für oxidativen Stress und Entzündungen für alle Probanden und Expositionen zu den jeweiligen Messzeitpunkten

	Pre		Post		Post 24h	
TEAC in plasma [μM]	mean	SD	mean	SD	mean	SD
Raumluft	479.74	87.20	472.04	91.95	460.42	88.11
Kerzen Level 1	518.75	101.94	493.69	102.12	510.70	110.86
Kerzen Level 2	502.51	89.80	497.77	87.93	496.20	99.02
Toasten Level 1	489.44	92.90	479.22	89.92	479.67	87.82
Toasten Level 2	502.18	95.24	489.11	86.59	472.45	87.11
Braten Level 1	518.87	101.05	497.34	95.12	492.65	94.39
Braten Level 2	495.83	74.51	468.92	71.76	484.65	73.56
UrAc (uric acid) in plasma [μM]	mean	SD	mean	SD	mean	SD
Raumluft	254.20	74.09	248.43	69.55	239.39	75.62
Kerzen Level 1	279.83	93.38	260.31	94.43	264.59	96.38
Kerzen Level 2	268.49	76.79	261.14	71.68	265.77	82.92
Toasten Level 1	253.73	82.47	248.50	76.12	240.90	75.04
Toasten Level 2	271.19	84.81	258.04	73.83	249.06	74.56
Braten Level 1	283.32	91.48	270.91	88.13	264.71	82.9
Braten Level 2	261.04	65.25	239.64	57.08	255.45	60.70
TEAC minus UrAc [μM]	mean	SD	mean	SD	mean	SD
Raumluft	225.54	30.49	223.6	38.27	221.03	30.77
Kerzen Level 1	238.92	29.68	233.38	30.79	246.11	51.79
Kerzen Level 2	234.03	30.89	236.63	32.78	230.43	28.92
Toasten Level 1	235.71	30.67	230.73	29.92	238.77	48.06
Toasten Level 2	231.00	23.26	231.07	26.11	223.39	35.28
Braten Level 1	235.55	27.22	226.43	24.09	227.94	28.69
Braten Level 2	234.79	24.33	229.28	28.03	229.2	25.48
Interleukin 8 aus Plasma [pg/ml]	mean	SD	mean	SD	mean	SD
Raumluft	6.31	11.69	5.87	10.33	6.26	10.62
Kerzen Level 1	4.07	4.90	3.60	4.29	4.02	4.86
Kerzen Level 2	6.43	11.72	6.45	11.49	6.16	10.72
Toasten Level 1	4.05	5.10	3.96	4.94	3.89	4.88
Toasten Level 2	6.50	10.55	6.33	10.47	6.84	12.22
Braten Level 1	3.56	3.89	3.58	4.30	3.48	3.79
Braten Level 2	6.85	12.42	7.39	12.76	6.95	12.32

Tabelle 51: Mittelwert (mean) und Standardabweichung (SD) des Blutdrucks für alle Probanden und Expositionen zu den jeweiligen Messzeitpunkten

systolischer Blutdruck [mmHg]	Pre		Während		Post		Post 2h		Post 4h		Post 24h	
	mean	SD	mean	SD	mean	SD	mean	SD	mean	SD	mean	SD
Raumluft	115.5	15.3	112.2	16.3	118.4	15.6	113.9	15.3	114.1	15.3	113.9	13.0
Kerzen Level 1	117.9	14.2	113.8	14.0	117.3	14.1	115.8	13.8	117.0	14.3	116.9	14.1
Kerzen Level 2	116.1	15.9	112.5	17.2	117.4	15.6	117.1	14.8	116.9	15.2	112.4	14.4
Toasten Level 1	118.4	14.5	116.3	22.7	119.0	14.4	115.2	14.4	115.8	15.4	114.1	15.9
Toasten Level 2	115.0	14.4	112.0	14.8	118.5	18.3	116.2	16.4	119.0	14.3	114.3	15.3
Braten Level 1	117.4	12.5	114.3	16.3	119.8	15.0	116.3	16.1	115.6	13.5	115.3	13.8
Braten Level 2	117.5	14.2	112.6	16.2	120.9	19.4	116.9	15.9	116.4	15.8	115.7	17.0
diastolischer Blutdruck [mmHg]	mean	SD	mean	SD	mean	SD	mean	SD	mean	SD	mean	SD
Raumluft	74.3	10.3	74	11.3	78.8	12.2	73.5	10.8	74.5	11.0	73.6	9.6
Kerzen Level 1	75.7	10.6	74.4	9.9	77.6	9.5	73.5	9.7	75.5	10.1	75.7	10.8
Kerzen Level 2	75.2	9.4	73.7	11.6	77.9	9.8	74.4	10.0	75.5	10.2	73.4	8.4
Toasten Level 1	77.2	10.5	75.8	14.1	78.2	9.4	72.5	10.3	75.5	11.5	75.1	11.4
Toasten Level 2	74.9	9.5	74.3	11.1	78.6	12.3	74.2	10.8	76.5	11.1	74.8	9.7
Braten Level 1	75.2	9.0	73.3	11.0	78.8	11.0	74.0	11.0	74.5	9.2	75.0	9.8
Braten Level 2	75.6	11.9	73.3	11.4	79.6	12.0	75.0	11.8	76.0	11.9	75.0	11.1

Tabelle 52: Mittelwert (mean) und Standardabweichung (SD) derPWA für alle Probanden und Expositionen zu den jeweiligen Messzeitpunkten

	Pre		Post		Post 2h		Post 4h		Post 24h	
	mean	SD	mean	SD	mean	SD	mean	SD	mean	SD
Augmentationsdruck(standardisiert auf eine Herzfrequenz von 75) [mmHg]										
Raumluft	2.4	4.3	3.0	5.3	0.6	4.1	1.8	4.8	1.7	4.3
Kerzen Level 1	2.4	4.5	2.7	4.7	1.1	4.0	1.6	4.3	2.0	4.9
Kerzen Level 2	2.2	4.6	3.2	4.7	1.3	4.7	2.2	5.3	2.2	4.0
Toasten Level 1	3.1	4.6	3.2	4.7	1.8	5.0	2.7	4.5	1.9	4.3
Toasten Level 2	2.0	3.6	2.1	4.8	0.8	3.9	2.2	4.2	1.3	3.8
Braten Level 1	3.0	3.4	3.0	4.9	1.3	4.5	2.1	4.6	1.8	4.4
Braten Level 2	1.7	4.0	3.4	5.3	1.2	4.4	2.0	4.0	2.2	4.0
Augmentationsindex (standardisiert auf eine Herzfrequenz von 75) [%]										
Raumluft	7.7	13.2	8.6	15.7	1.8	13.8	5.5	14.0	5.8	15.1
Kerzen Level 1	8.0	13.4	8.1	14.3	3.1	13.7	4.5	13.5	6.4	14.5
Kerzen Level 2	6.6	13.9	10.1	13.6	3.9	15.3	5.9	14.4	7.3	12.4
Toasten Level 1	10.0	14.0	9.8	15.2	5.6	16.0	8.4	14.5	5.6	13.3
Toasten Level 2	7.3	11.7	6.8	14.8	2.8	14.5	7.0	13.7	4.6	13.8
Braten Level 1	10.8	11.3	8.3	14.6	3.6	14.6	6.3	16.1	6.2	15.2
Braten Level 2	6.3	14.1	9.0	14.2	3.4	14.5	6.6	13.8	6.8	14.1

Tabelle 53: Mittelwert (mean) und Standardabweichung (SD) der Pulswellengeschwindigkeit für alle Probanden und Expositionen zu den jeweiligen Messzeitpunkten

PWV [m/s]	Pre		Post		Post 24h	
	mean	SD	mean	SD	mean	SD
Raumluft	71.2	20.4	74.8	22.1	74.4	28.4
Kerzen Level 1	70.0	18.7	69.3	21.3	67.2	21.4
Kerzen Level 2	70.3	24.8	69.4	26.1	59.0	24.7
Toasten Level 1	64.7	30.9	68.7	21.0	67.8	29.3
Toasten Level 2	69.8	24.4	68.1	28.3	76.2	21.8
Braten Level 1	76.4	24.3	66.5	25.8	56.1	27.2
Braten Level 2	70.6	24.8	75.1	21.6	70.0	26.5

Tabelle 54: Mittelwert (mean) und Standardabweichung (SD) der Herzfrequenzvariabilität für alle Probanden und Expositionen zu den jeweiligen Messzeitpunkten

SDNN [ms]	Pre		Post		Post 24h	
	mean	SD	mean	SD	mean	SD
Raumluft	58.2	23.3	72.0	27.5	68.1	31.0
Kerzen Level 1	58.8	31.6	71.2	29.7	61.3	24.9
Kerzen Level 2	61.4	25.8	77.6	28.5	64.7	28.4
Toasten Level 1	58.3	27.4	69.6	25.2	64.0	20.4
Toasten Level 2	57.3	25.6	76.9	30.0	69.6	30.1
Braten Level 1	55.4	22.9	81.7	41.6	62.8	28.9
Braten Level 2	54.3	23.0	72.1	27.5	65.4	30.2
RMSSD [ms]	mean	SD	mean	SD	mean	SD
Raumluft	52.98	29.09	64.53	30.31	55.31	36.47
Kerzen Level 1	53.24	38.21	64.17	35.88	46.11	27.94
Kerzen Level 2	54.92	35.13	73.02	43.23	53.3	37.28
Toasten Level 1	49.88	35.22	58.19	32.04	51.36	27.56
Toasten Level 2	48.65	35.72	67.95	36.05	57.21	35.34
Braten Level 1	45.35	32.51	73.12	54.49	47.38	32.29
Braten Level 2	46.08	28.61	61.58	37.62	50.11	40.46

Tabelle 55: Deskription der Gesundheitsendpunkte für die gesamte Studienpopulation über alle Zeitpunkte. EPIA Studie, 56 Teilnehmer; mean = Mittelwert, SD =Standardabweichung, median = Median, IQR = Interquartilsspanne

Gesundheitsendpunkte		N	mean	SD	median	IQR
Nasallavage	Zellanzahl Nasallavage [$10^3/\text{ml}$]	763	564.9	881.8	280	490
	Epithelzellen [%]	747	0.2	0.3	0.1	0.3
	neutrophile Granulozyten [%]	747	0.7	0.3	0.8	0.3
	basophile Granulozyten [%]	747	0	0	0	0
	eosinophile Granulozyten [%]	747	0	0.1	0	0
	Monozyten/Makrophagen [%]	747	0	0	0	0
	Lymphozyten [%]	747	0	0.1	0	0
	Interleukin 8 [pg/ml]	706	153.8	215.1	94.5	112.1
FeNO- Test	FeNO- Messwert [ppb]	770	12.3	11.6	9	8
Lungenfunktion	FEV ₁ [l]	766	3.5	0.8	3.4	1.2
	FVC [l]	766	4.4	1	4.3	1.3
	FEV ₁ /FVC	766	0.8	0.1	0.8	0.1
	MEF ₂₅₋₇₅ [l/s]	766	3.4	1.2	3.4	1.6

Gesundheitsendpunkte		N	mean	SD	median	IQR
Differenzialblutbild	Lymphozyten [tsd/ μ l]	442	32	8.9	31.2	12.4
	Erythrozyten [mill/ μ l]	442	4.6	0.4	4.6	0.6
	Leukozyten [tsd/ μ l]	442	5.9	1.4	5.8	1.8
	Thrombozyten [tsd/ μ l]	442	243.3	48.6	239.5	59
	Neutrophile [tsd/ μ l]	442	56.8	9.7	57.1	13.5
	Eosinophile [tsd/ μ l]	442	2.4	2	2	1.7
	Basophile [tsd/ μ l]	442	0.7	0.4	0.6	0.5
	Monozyten [tsd/ μ l]	442	8.2	2	7.9	2.5
	Hämoglobin [g/dl]	442	13.9	1.5	14	2
	Hämatokrit [%]	442	40.8	4.1	41	5.5
Marker für oxidativen Stress und Entzündungen	TEAC [μ M]	664	489.7	91.1	483.5	107.6
	Harnsäure (UrAc) [μ M]	664	258.4	78.4	248.5	100.6
	TEAC - UrAc [μ M]	664	231.3	32.1	227.9	41.2
	Interleukin-8 in Plasma [pg/ml]	571	5.5	9.3	2.2	2.4
Blutdruck	systolischer Blutdruck [mmHg]	1575	115.9	15.4	115	22
	diastolischer Blutdruck [mmHg]	1575	75.3	10.7	74	15

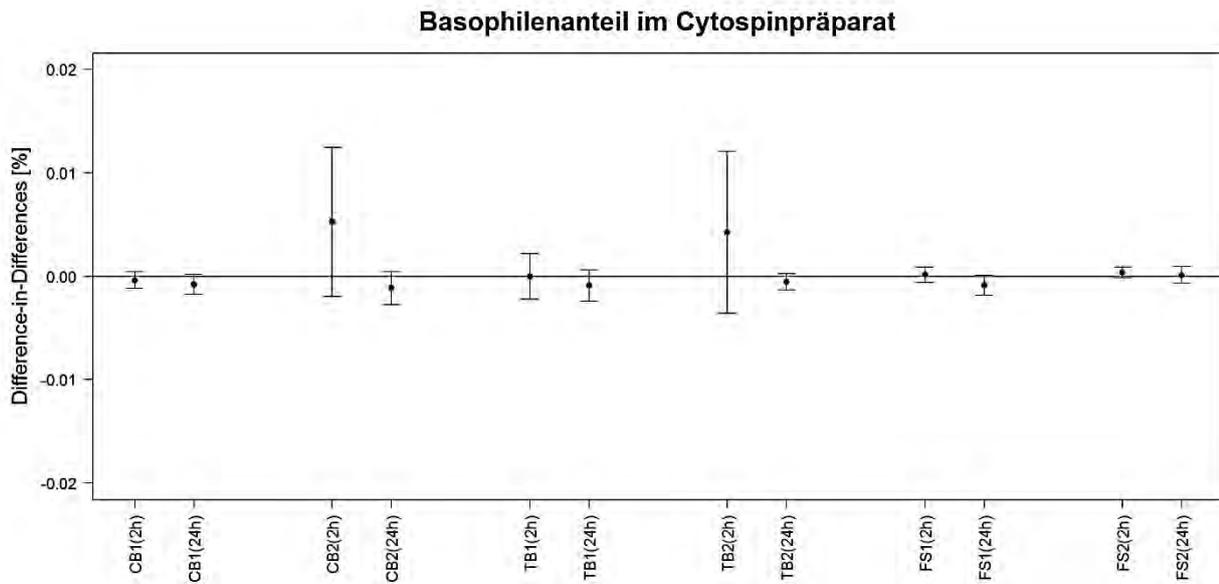
Gesundheitsendpunkte		N	mean	SD	median	IQR
Pulsellenanalyse	Augmentationsdruck (AP_HR75) [mmHg]	1132	2.1	4.4	1	6
	Augmentationsindex (AGPH_HR75) [%]	1132	6.4	14.1	6	23
Pulswellengeschwindigkeit	PWV [m/s]	598	69.9	24.4	72	22
Herzratenvariabilität	SDNN [ms]	659	65.9	28.8	60.8	39.7
	RMSSD [ms]	659	56.9	36.5	49.6	48.1

11 Anhang III

11.1 Ergebnisse der statistischen Auswertung

11.1.1 Basophile in Nasallavage

Abbildung 165: Differenz der Differenz der basophilen Granulozyten in der Nasallavage [%] zu 2 Messzeitpunkten zu unterschiedlichen Innenraumbelastungen und unterschiedlichen Belastungsniveaus im Vergleich zur Raumluft



Anteil basophiler Granulozyten: Man sieht unterschiedliche Tendenzen zu einem Abfall (Kerzen und Toasten jeweils bei der 24h Messung, und Braten Level1 bei der 24h Messung) und einen Anstieg bei Braten Level 2 für die 2h Messung.

Tabelle 56: Veränderung der basophilen Granulozyten aus der Nasallavage [%]: Mittelwert (mean) und 95%- Konfidenzintervall (95%- CI)

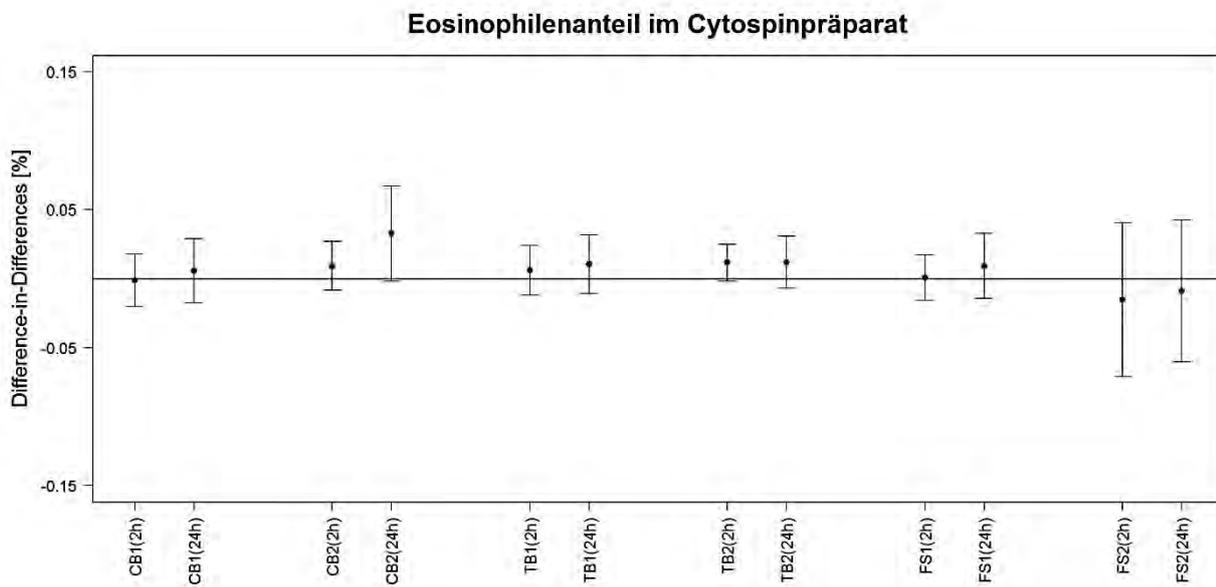
basophile Granulozyten aus der Nasallavage [%]		
Oberflächenkonzentration [pro 100 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$]		
PSC		
Mean (95%-CI)		
Kerzen	post 2h	post 24h
crude model	0 (0; 0) [#]	0 (0; 0) [#]
full model	0 (-0.001; 0) [#]	0 (-0.001; 0) [#]
Toasten	post 2h	post 24h
crude model	0 (0; 0) [#]	0 (0; 0) [#]
fullmodel	0 (0; 0.001) [#]	0 (0; 0.001) [#]
Braten	post 2h	post 24h
crude model	0 (0; 0) [#]	0 (0; 0) [#]
full model	0 (0; 0) [#]	0 (0; 0) [#]
Anzahl [pro 10000 Partikel/cm ³]		
PNC < 100 nm		
Mean (95%-CI)		
Kerzen	post 2h	post 24h
crude model	0 (0; 0) [#]	0 (0; 0) [#]
full model	0 (-0.001; 0) [#]	0 (-0.001; 0) [#]
Toasten	post 2h	post 24h
crude model	0 (0; 0) [#]	0 (0; 0) [#]
fullmodel	0 (0; 0) [#]	0 (0; 0) [#]
Braten	post 2h	post 24h
crude model	0 (0; 0) [#]	0 (0; 0) [#]
full model	0 (0; 0) [#]	0 (0; 0) [#]

basophile Granulozyten aus der Nasallavage [%]		
PMC [pro 10 µg/m ³]		
PM ₁₀		
Mean (95%-CI)		
Kerzen	post 2h	post 24h
crude model	0 (0; 0) [#]	0 (0; 0) [#]
full model	-0.001 (-0.003; 0.001) [#]	-0.001 (-0.003; 0.001) [#]
Toasten	post 2h	post 24h
crude model	0 (0; 0) [#]	0 (0; 0) [#]
fullmodel	0 (0; 0) [#]	0 (0; 0) [#]
Braten	post 2h	post 24h
crude model	0 (0; 0) [#]	0 (0; 0) [#]
full model	0 (0; 0) [#]	0 (0; 0) [#]
PMC [pro 10 µg/m ³]		
PM _{2,5}		
Mean (95%-CI)		
Kerzen	post 2h	post 24h
crude model	0 (0; 0) [#]	0 (0; 0) [#]
full model	-0.001 (-0.003; 0.001) [#]	-0.001 (-0.003; 0.001) [#]
Toasten	post 2h	post 24h
crude model	0 (0; 0) [#]	0 (0; 0) [#]
fullmodel	0 (0; 0) [#]	0 (0; 0) [#]
Braten	post 2h	post 24h
crude model	0 (0; 0) [#]	0 (0; 0) [#]
full model	0 (0; 0) [#]	0 (0; 0) [#]
PMC [pro 10 µg/m ³]		
PM ₁		
Mean (95%-CI)		
Kerzen	post 2h	post 24h
crude model	0 (0; 0) [#]	0 (0; 0) [#]
full model	-0.001 (-0.003; 0.001) [#]	-0.002 (-0.004; 0)
Toasten	post 2h	post 24h
crude model	0.001 (0.001; 0.001) [#]	0 (0; 0) [#]
fullmodel	0.001 (-0.001; 0.003) [#]	0 (-0.002; 0.002) [#]
Braten	post 2h	post 24h
crude model	0 (0; 0) [#]	0 (0; 0) [#]
full model	0 (0; 0) [#]	0 (0; 0) [#]

crude model = unadjustiertes Modell; full model = adjustiert für Expositionsquelle, Alter, Geschlecht, Größe, Temperatur in Messkammer, relative Luftfeuchtigkeit in Messkammer, Verkehrsmittel, Anfahrtszeit; # = Messwerte liegen bei 0

11.1.2 Eosinophile in Nasallavage

Abbildung 166: Differenz der Differenz der eosinophilen Granulozyten in der Nasallavage [%] zu 2 Messzeitpunkten zu unterschiedlichen Innenraumbelastungen und unterschiedlichen Belastungsniveaus im Vergleich zur Raumluft



Eosinophilenanteil: Man sieht eine Tendenz zur Erhöhung der Konzentration bei der 2h-Messung bei Level 2 von Kerzen und Toasten

Tabelle 57: Veränderung der eosinophilen Granulozyten aus der Nasallavage [%]: Mittelwert (mean) und 95%- Konfidenzintervall (95%- CI)

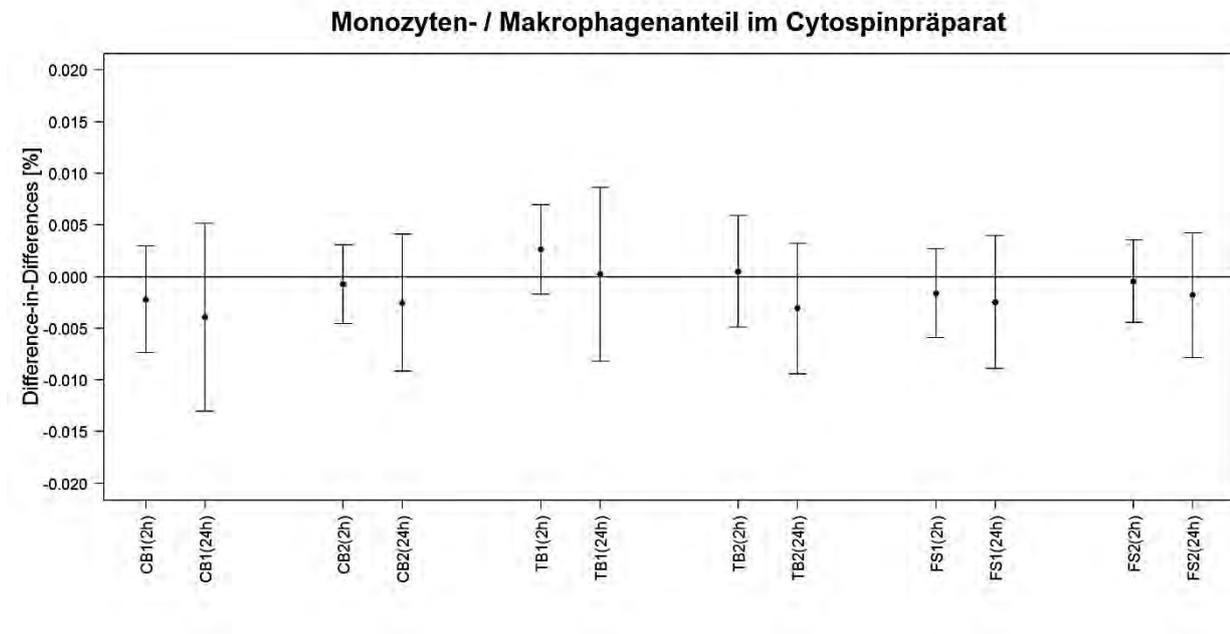
eosinophile Granulozyten aus der Nasallavage [%]		
Oberflächenkonzentration [pro 100 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$]		
PSC		
Mean (95%-CI)		
	post 2h	post 24h
Kerzen		
crude model	0 (0; 0.001)	0.001 (0; 0.001)
full model	0 (-0.001; 0.002)	0.001 (-0.001; 0.003)
Toasten		
crude model	0 (0; 0)	0 (0; 0)
fullmodel	0 (-0.001; 0.001)	0 (-0.001; 0.001)
Braten		
crude model	-0.001 (-0.002; 0)	0 (-0.001; 0.001)
full model	-0.002 (-0.003; 0)	-0.002 (-0.004; 0)
Anzahl [pro 10000 Partikel/ cm^3]		
PNC < 100 nm		
Mean (95%-CI)		
	post 2h	post 24h
Kerzen		
crude model	0 (0; 0)	0 (0; 0)
full model	0 (0; 0)	0 (0; 0)
Toasten		
crude model	0 (0; 0)	0 (0; 0)
fullmodel	0 (0; 0)	0 (0; 0)
Braten		
crude model	0 (-0.001; 0)	0 (-0.001; 0)
full model	-0.003 (-0.005; -0.001)	-0.003 (-0.005; -0.001)

eosinophile Granulozyten aus der Nasallavage [%]		
PMC [pro 10 µg/m ³]		
PM ₁₀		
Mean (95%-CI)		
	post 2h	post 24h
Kerzen		
crude model	0.001 (-0.001; 0.003)	0.002 (0; 0.004)
full model	0 (-0.006; 0.006)	0.001 (-0.005; 0.007)
Toasten		
crude model	0 (0; 0)	0 (0; 0)
fullmodel	0 (0; 0)	0 (-0.002; 0.002)
Braten		
crude model	0 (-0.002; 0.002)	0 (-0.002; 0.002)
full model	0 (-0.002; 0.002)	0 (-0.002; 0.002)
PMC [pro 10 µg/m ³]		
PM _{2,5}		
Mean (95%-CI)		
	post 2h	post 24h
Kerzen		
crude model	0.001 (-0.001; 0.003)	0.003 (0.001; 0.005)
full model	0 (-0.006; 0.006)	0.001 (-0.005; 0.007)
Toasten		
crude model	0 (0; 0)	0 (0; 0)
fullmodel	0 (-0.002; 0.002)	0 (-0.002; 0.002)
Braten		
crude model	-0.001 (-0.003; 0.001)	0 (-0.002; 0.002)
full model	0 (-0.002; 0.002)	-0.001 (-0.005; 0.003)
PMC [pro 10 µg/m ³]		
PM ₁		
Mean (95%-CI)		
	post 2h	post 24h
Kerzen		
crude model	0.001 (-0.001; 0.003)	0.003 (0.001; 0.005)
full model	0.001 (-0.005; 0.007)	0.002 (-0.004; 0.008)
Toasten		
crude model	0.001 (-0.001; 0.003)	0.001 (-0.001; 0.003)
fullmodel	-0.001 (-0.005; 0.003)	-0.001 (-0.005; 0.003)
Braten		
crude model	-0.001 (-0.003; 0.001)	0 (-0.002; 0.002)
full model	-0.001 (-0.005; 0.003)	-0.001 (-0.005; 0.003)

crude model = unadjustiertes Modell; full model = adjustiert für Expositionsquelle, Alter, Geschlecht, Größe, Temperatur in Messkammer, relative Luftfeuchtigkeit in Messkammer, Verkehrsmittel, Anfahrtszeit

11.1.3 Monozyten in Nasallavage

Abbildung 167: Differenz der Differenz der Monozyten/Makrophagen in der Nasallavage [%] zu 2 Messzeitpunkten zu unterschiedlichen Innenraumbelastungen und unterschiedlichen Belastungsniveaus im Vergleich zur Raumluft



Monozyten/Macrophagenanteil: Keine maßgeblichen Veränderungen sind zu sehen.

Tabelle 58: Veränderung der Monozyten/Makrophagen aus der Nasallavage [%]: Mittelwert (mean) und 95%- Konfidenzintervall (95%- CI)

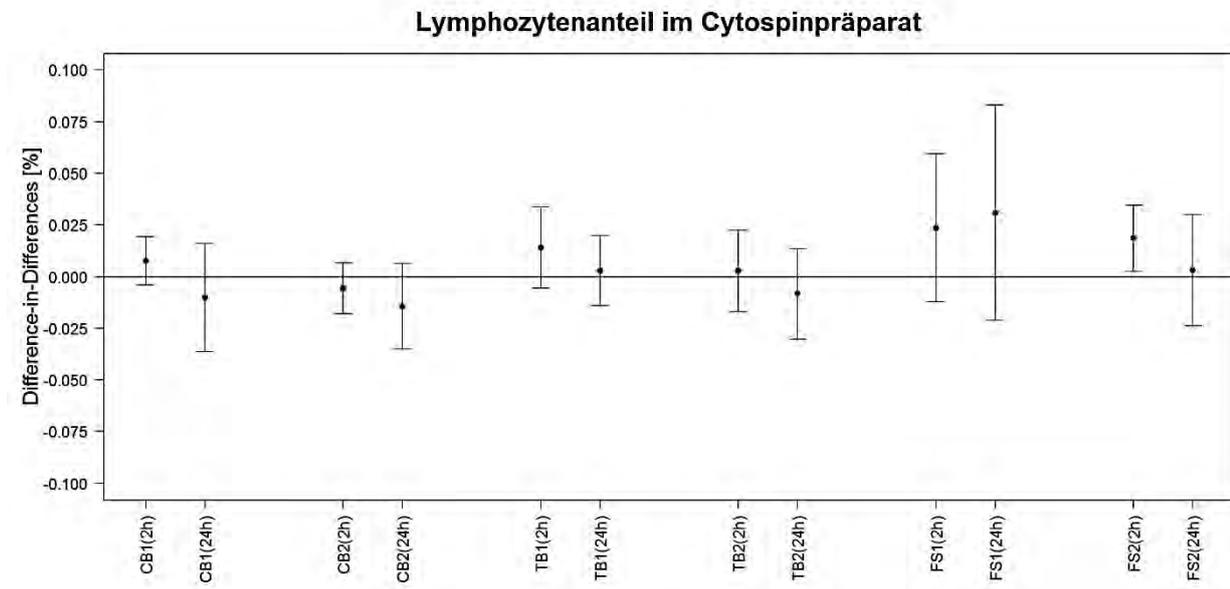
Monozyten/Makrophagen aus der Nasallavage [%]		
Oberflächenkonzentration [pro 100 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$]		
PSC		
Mean (95%-CI)		
	post 2h	post 24h
Kerzen		
crude model	0 (0; 0) [#]	0 (0; 0) [#]
full model	0 (-0.001; 0) [#]	0 (-0.001; 0) [#]
Toasten		
crude model	0 (0; 0) [#]	0 (0; 0) [#]
fullmodel	0 (0; 0) [#]	0 (0; 0) [#]
Braten		
crude model	0 (0; 0) [#]	0 (0; 0) [#]
full model	0 (0; 0) [#]	0 (0; 0) [#]
Anzahl [pro 10000 Partikel/cm ³]		
PNC < 100 nm		
Mean (95%-CI)		
	post 2h	post 24h
Kerzen		
crude model	0 (0; 0) [#]	0 (0; 0) [#]
full model	0 (0; 0) [#]	0 (0; 0) [#]
Toasten		
crude model	0 (0; 0) [#]	0 (0; 0) [#]
fullmodel	0 (0; 0) [#]	0 (0; 0) [#]
Braten		
crude model	0 (0; 0) [#]	0 (0; 0) [#]
full model	0 (0; 0) [#]	0 (0; 0) [#]

Monozyten/Makrophagen aus der Nasallavage [%]		
PMC [pro 10 µg/m³]		
PM ₁₀		
Mean (95%-CI)		
	post 2h	post 24h
Kerzen		
crude model	0 (0; 0) [#]	0 (0; 0) [#]
full model	-0.001 (-0.003; 0.001) [#]	-0.001 (-0.003; 0.001) [#]
Toasten		
crude model	0 (0; 0) [#]	0 (0; 0) [#]
fullmodel	0 (0; 0) [#]	0 (0; 0) [#]
Braten		
crude model	0 (0; 0) [#]	0 (0; 0) [#]
full model	0 (0; 0) [#]	0 (0; 0) [#]
PMC [pro 10 µg/m³]		
PM _{2.5}		
Mean (95%-CI)		
	post 2h	post 24h
Kerzen		
crude model	0 (0; 0) [#]	0 (0; 0) [#]
full model	-0.001 (-0.003; 0.001) [#]	-0.001 (-0.003; 0.001) [#]
Toasten		
crude model	0 (0; 0) [#]	0 (0; 0) [#]
fullmodel	0 (0; 0) [#]	0 (0; 0) [#]
Braten		
crude model	0 (0; 0) [#]	0 (0; 0) [#]
full model	0 (0; 0) [#]	0 (0; 0) [#]
PMC [pro 10 µg/m³]		
PM ₁		
Mean (95%-CI)		
	post 2h	post 24h
Kerzen		
crude model	0 (0; 0) [#]	0 (0; 0) [#]
full model	-0.001 (-0.003; 0.001) [#]	-0.001 (-0.003; 0.001) [#]
Toasten		
crude model	0 (0; 0)	0 (0; 0)
fullmodel	0 (-0.002; 0.002)	0 (-0.002; 0.002)
Braten		
crude model	0 (0; 0) [#]	0 (0; 0) [#]
full model	0 (0; 0) [#]	0 (0; 0) [#]

crude model = unadjustiertes Modell; full model = adjustiert für Expositionsquelle, Alter, Geschlecht, Größe, Temperatur in Messkammer, relative Luftfeuchtigkeit in Messkammer, Verkehrsmittel, Anfahrtszeit; # = Messwerte liegen bei 0

11.1.4 Lymphozyten in Nasallavage

Abbildung 168: Differenz der Differenz der Lymphozyten in der Nasallavage [%] zu 2 Messzeitpunkten zu unterschiedlichen Innenraumbelastungen und unterschiedlichen Belastungsniveaus im Vergleich zur Raumluft



Lymphozytenanteil: Man sieht eine Tendenz zu einer Erhöhung bei der 2h Messung bei Level 1 von Kerzen und Toasten, die sich jedoch nicht für Level 2 bestätigt. Außerdem sieht man eine statistisch signifikante Erhöhung bei der 2h Messung für Level 2 von Braten.

Tabelle 59: Veränderung der Lymphozyten aus der Nasallavage [%]: Mittelwert (mean) und 95%-Konfidenzintervall (95%- CI)

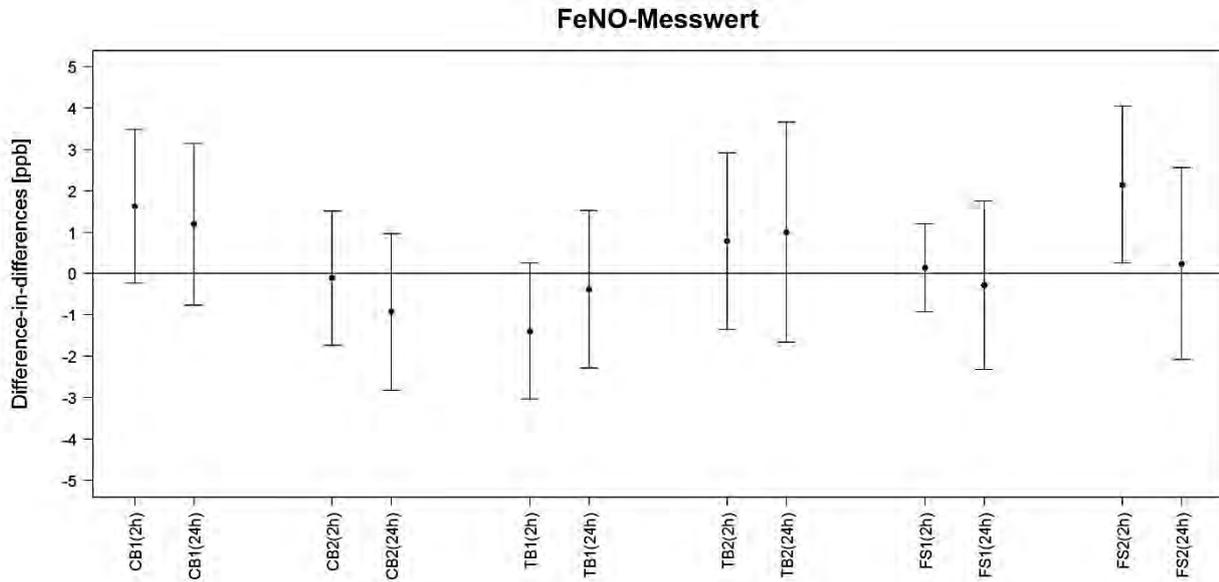
Lymphozyten aus der Nasallavage [%]		
Oberflächenkonzentration [pro 100 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$]		
PSC		
Mean (95%-CI)		
	post 2h	post 24h
Kerzen		
crude model	0 (0; 0)	0 (-0.001; 0)
full model	-0.002 (-0.004; 0)	-0.002 (-0.004; 0)
Toasten		
crude model	0 (0; 0.001)	0 (-0.001; 0)
fullmodel	0 (-0.001; 0.002)	0 (-0.002; 0.001)
Braten		
crude model	0 (0; 0.001)	0 (-0.001; 0.001)
full model	0 (-0.001; 0.002)	0 (-0.001; 0.001)
Anzahl [pro 10000 Partikel/cm^3]		
PNC < 100 nm		
Mean (95%-CI)		
	post 2h	post 24h
Kerzen		
crude model	0 (0; 0)	0 (0; 0)
full model	0 (0; 0)	0 (0; 0)
Toasten		
crude model	0 (0; 0)	0 (0; 0)
fullmodel	0 (-0.001; 0.001)	0 (-0.001; 0)
Braten		
crude model	0 (0; 0.001)	0 (-0.001; 0.001)
full model	0.001 (0; 0.002)	0.001 (-0.001; 0.002)

Lymphozyten aus der Nasallavage [%]		
PMC [pro 10 µg/m³]		
PM ₁₀		
Mean (95%-CI)		
	post 2h	post 24h
Kerzen		
crude model	0 (-0.002; 0.002)	-0.001 (-0.003; 0.001)
full model	0 (-0.006; 0.006)	-0.001 (-0.007; 0.005)
Toasten		
crude model	0 (0; 0)	0 (0; 0)
fullmodel	0 (0; 0)	-0.001 (-0.003; 0.001)
Braten		
crude model	0 (0; 0)	0 (0; 0)
full model	0 (-0.002; 0.002)	-0.001 (-0.003; 0.001)
PMC [pro 10 µg/m³]		
PM _{2,5}		
Mean (95%-CI)		
	post 2h	post 24h
Kerzen		
crude model	0 (-0.002; 0.002)	-0.001 (-0.003; 0.001)
full model	0 (-0.006; 0.006)	-0.002 (-0.008; 0.004)
Toasten		
crude model	0.001 (-0.001; 0.003)	0 (-0.002; 0.002)
fullmodel	0 (-0.002; 0.002)	-0.002 (-0.006; 0.002)
Braten		
crude model	0 (-0.002; 0.002)	0 (-0.002; 0.002)
full model	0 (-0.002; 0.002)	-0.001 (-0.003; 0.001)
PMC [pro 10 µg/m³]		
PM ₁		
Mean (95%-CI)		
	post 2h	post 24h
Kerzen		
crude model	0 (-0.002; 0.002)	-0.001 (-0.003; 0.001)
full model	-0.001 (-0.007; 0.005)	-0.002 (-0.008; 0.004)
Toasten		
crude model	0.002 (0; 0.004)	-0.001 (-0.003; 0.001)
fullmodel	0.002 (-0.002; 0.006)	0 (-0.004; 0.004)
Braten		
crude model	0 (-0.002; 0.002)	0 (-0.002; 0.002)
full model	0 (-0.002; 0.002)	-0.001 (-0.003; 0.001)

crude model = unadjustiertes Modell; full model = adjustiert für Expositionsquelle, Alter, Geschlecht, Größe, Temperatur in Messkammer, relative Luftfeuchtigkeit in Messkammer, Verkehrsmittel, Anfahrtszeit

11.1.5 FeNO

Abbildung 169: Differenz der Differenz vom FeNO- Messwert [ppb] zu 2 Messzeitpunkten zu unterschiedlichen Innenraumbelastungen und unterschiedlichen Belastungsniveaus im Vergleich zur Raumluft



Man sieht eine statistisch signifikante Erhöhung für Braten Level 2 nach 2 Stunden. Ferner sieht man eine leichte Tendenz für eine Erniedrigung für Toasten Level 1, die sich jedoch nicht bei Level 2 bestätigt.

Man sieht eine statistisch signifikante Erhöhung für die Partikelanzahlkonzentration der ultrafeinen Partikel bei Braten Level 2 nach 2 als auch nach 24 Stunden. Ansonsten sind keine Veränderungen zu sehen.

Tabelle 60: Veränderung des FeNO- Messwertes [ppb]: Mittelwert (mean) und 95%- Konfidenzintervall (95%- CI)

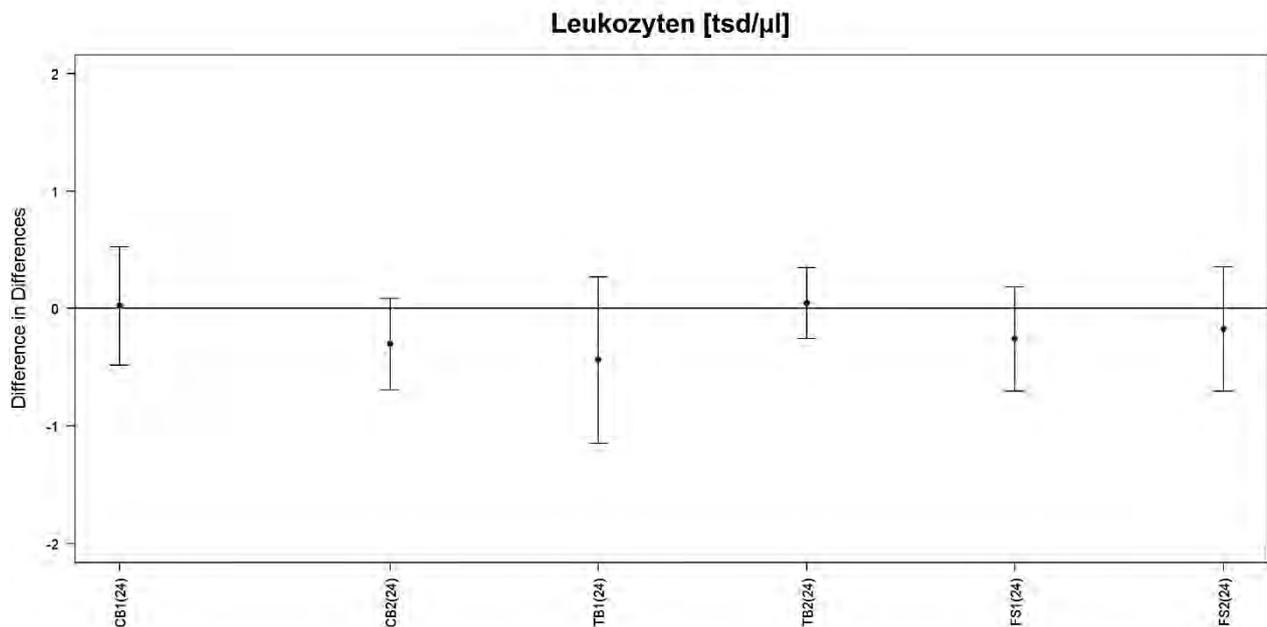
FeNO- Messwert [ppb]		
Oberflächenkonzentration [pro 100 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$]		
PSC		
Mean (95%-CI)		
	post	post 24h
Kerzen		
crude model	0.004 (-0.038; 0.046)	-0.022 (-0.064; 0.021)
full model	-0.06 (-0.241; 0.12)	-0.09 (-0.27; 0.09)
Toasten		
crude model	0.018 (-0.031; 0.067)	0.02 (-0.028; 0.068)
fullmodel	-0.049 (-0.229; 0.13)	-0.042 (-0.219; 0.135)
Braten		
crude model	0.056 (0.013; 0.098)	0.019 (-0.024; 0.062)
full model	0.042 (-0.041; 0.125)	0.022 (-0.07; 0.115)
Anzahl [pro 10000 Partikel/cm ³]		
PNC < 100 nm		
Mean (95%-CI)		
	post	post 24h
Kerzen		
crude model	0 (-0.005; 0.006)	-0.001 (-0.007; 0.005)
full model	-0.018 (-0.051; 0.016)	-0.02 (-0.054; 0.014)
Toasten		
crude model	0.002 (-0.01; 0.014)	0.003 (-0.009; 0.014)
fullmodel	-0.06 (-0.128; 0.008)	-0.058 (-0.127; 0.01)
Braten		
crude model	0.039 (0.013; 0.065)	0.012 (-0.014; 0.038)
full model	0.118 (0.03; 0.207)	0.098 (0.008; 0.189)

FeNO- Messwert [ppb]		
PMC [pro 10 µg/m ³]		
PM ₁₀		
Mean (95%-CI)		
Kerzen	post	post 24h
crude model	-0.002 (-0.223; 0.219)	-0.15 (-0.375; 0.075)
full model	0.001 (-0.53; 0.532)	-0.166 (-0.697; 0.365)
Toasten	post	post 24h
crude model	-0.017 (-0.062; 0.028)	-0.027 (-0.072; 0.018)
fullmodel	-0.009 (-0.054; 0.036)	-0.153 (-0.335; 0.029)
Braten	post	post 24h
crude model	0.045 (-0.004; 0.094)	0.003 (-0.046; 0.052)
full model	-0.015 (-0.097; 0.067)	-0.043 (-0.135; 0.049)
PMC [pro 10 µg/m ³]		
PM _{2,5}		
Mean (95%-CI)		
Kerzen	post	post 24h
crude model	-0.007 (-0.234; 0.22)	-0.161 (-0.39; 0.068)
full model	-0.047 (-0.606; 0.512)	-0.218 (-0.777; 0.341)
Toasten	post	post 24h
crude model	-0.022 (-0.165; 0.121)	-0.057 (-0.2; 0.086)
fullmodel	-0.026 (-0.185; 0.133)	-0.108 (-0.416; 0.2)
Braten	post	post 24h
crude model	0.067 (0.004; 0.13)	0.015 (-0.05; 0.08)
full model	0.017 (-0.093; 0.127)	-0.015 (-0.14; 0.11)
PMC [pro 10 µg/m ³]		
PM ₁		
Mean (95%-CI)		
Kerzen	post	post 24h
crude model	-0.016 (-0.247; 0.215)	-0.183 (-0.416; 0.05)
full model	-0.128 (-0.749; 0.493)	-0.306 (-0.925; 0.313)
Toasten	post	post 24h
crude model	0.112 (-0.143; 0.367)	0.059 (-0.19; 0.308)
fullmodel	0.123 (-0.355; 0.601)	0.104 (-0.359; 0.567)
Braten	post	post 24h
crude model	0.076 (0.005; 0.147)	0.023 (-0.05; 0.096)
full model	0.027 (-0.098; 0.152)	0 (-0.147; 0.147)

crude model = unadjustiertes Modell; full model = adjustiert für Expositionsquelle, Alter, Geschlecht, Größe, Temperatur in Messkammer, relative Luftfeuchtigkeit in Messkammer, Verkehrsmittel, Anfahrtszeit

11.1.6 Leukozyten im Blut

Abbildung 170: Differenz der Differenz der Leukozyten [tsd/ μ l] zur post-24-Stunden- Messung zu unterschiedlichen Innenraumbelastungen und unterschiedlichen Belastungsniveaus im Vergleich zur Raumluft



Leukozyten: Man sieht keine Veränderungen, außer einer leichten Tendenz zu einer Erniedrigung der Leukozytenkonzentration für Kerzen Level 2, die jedoch nicht statistisch signifikant ist.

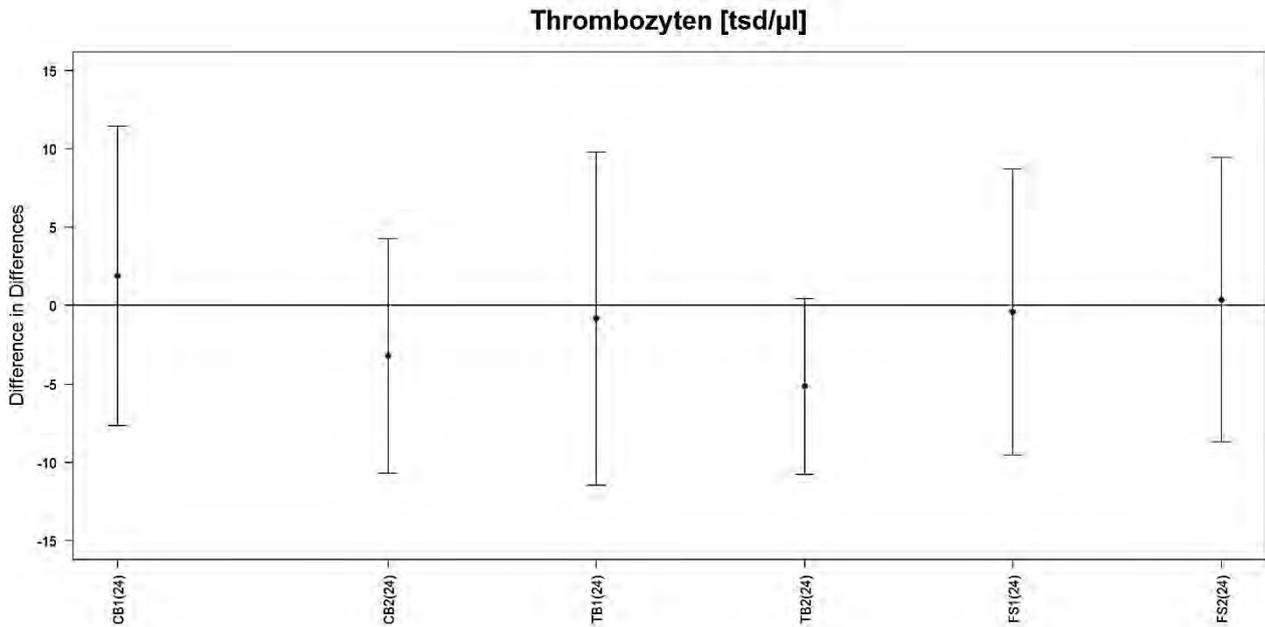
Tabelle 61: Veränderung der Leukozyten [tsd/ μl]: Mittelwert (mean) und 95%- Konfidenzintervall (95%- CI)

	Leukozyten [tsd/ μl]	
	Oberflächenkonzentration [pro 100 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$]	Anzahl [pro 10000 Partikel/ cm^3]
	PSC Mean (95%-CI)	PNC < 100 nm Mean (95%-CI)
Kerzen	post 24h	
crude model	-0.01 (-0.02; 0.001)	-0.001 (-0.003; 0)
full model	-0.05 (-0.122; 0.022)	-0.008 (-0.022; 0.006)
Toasten	post 24h	
crude model	0 (-0.012; 0.012)	0 (-0.003; 0.002)
full model	-0.016 (-0.086; 0.055)	-0.002 (-0.027; 0.024)
Braten	post 24h	
crude model	-0.002 (-0.012; 0.009)	-0.003 (-0.01; 0.003)
full model	0.018 (-0.014; 0.05)	0.004 (-0.028; 0.037)
	PMC [pro 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$]	
	PM ₁₀ Mean (95%-CI)	PM _{2.5} Mean (95%-CI)
Kerzen	post 24h	
crude model	-0.026 (-0.085; 0.033)	-0.027 (-0.086; 0.032)
full model	0.141 (-0.084; 0.366)	0.16 (-0.077; 0.397)
Toasten	post 24h	
crude model	-0.006 (-0.016; 0.004)	-0.012 (-0.045; 0.021)
full model	-0.005 (-0.064; 0.054)	-0.012 (-0.165; 0.141)
Braten	post 24h	
crude model	0.002 (-0.012; 0.016)	0.003 (-0.015; 0.021)
full model	0.02 (-0.011; 0.051)	0.017 (-0.03; 0.064)
	PM ₁ Mean (95%-CI)	
Kerzen	post 24h	
crude model	-0.029 (-0.09; 0.032)	
full model	0.172 (-0.097; 0.441)	
Toasten	post 24h	
crude model	0.015 (-0.048; 0.078)	
full model	-0.034 (-0.295; 0.227)	
Braten	post 24h	
crude model	0.004 (-0.016; 0.024)	
full model	0.02 (-0.039; 0.079)	

crude model = unadjustiertes Modell; full model = adjustiert für Expositionsquelle, Alter, Geschlecht, Größe, Temperatur in Messkammer, relative Luftfeuchtigkeit in Messkammer, Verkehrsmittel, Anfahrtszeit

11.1.7 Thrombozyten im Blut

Abbildung 171: Differenz der Differenz der Thrombozyten [tsd/ μ l] zur post-24-Stunden- Messung zu unterschiedlichen Innenraumbelastungen und unterschiedlichen Belastungsniveaus im Vergleich zur Raumluft



Thrombozyten: Man sieht keine Veränderungen, außer eine Tendenz zu einer Erniedrigung der Thrombozytenkonzentration für Toasten Level 2, die jedoch nicht statistisch signifikant ist.

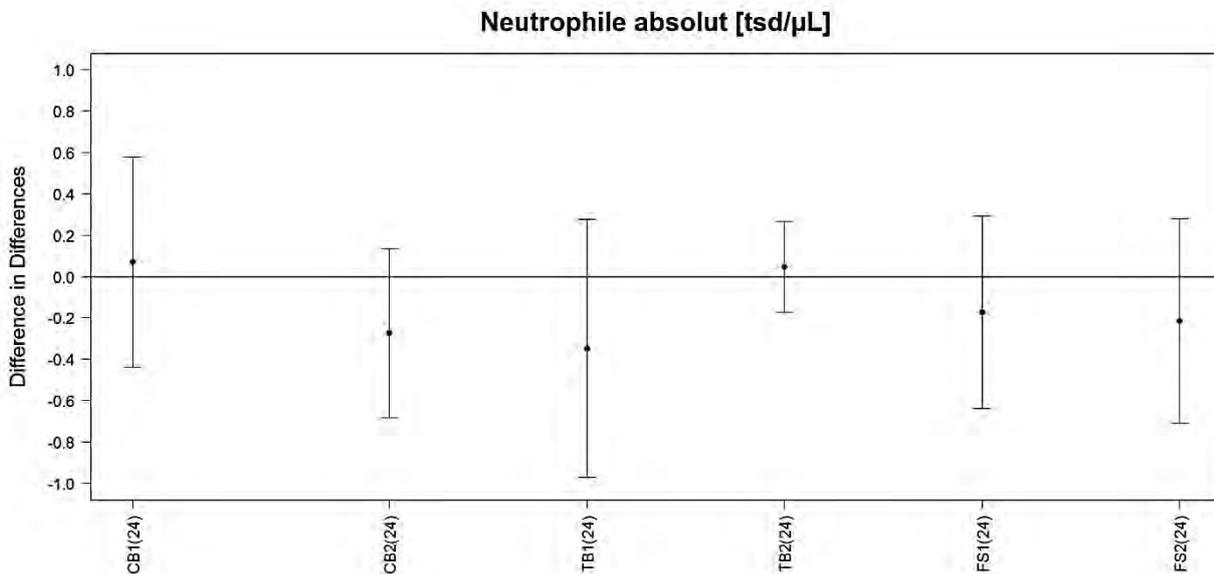
Tabelle 62: Veränderung der Thrombozyten [tsd/ μl]: Mittelwert (mean) und 95%- Konfidenzintervall (95%- CI)

	Thrombozyten [tsd/ μl]	
	Oberflächenkonzentration [pro 100 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$]	Anzahl [pro 10000 Partikel/ cm^3]
	PSC Mean (95%-CI)	PNC < 100 nm Mean (95%-CI)
Kerzen	post 24h	
crude model	-0.099 (-0.276; 0.079)	-0.012 (-0.036; 0.013)
full model	0.46 (-0.605; 1.525)	0.08 (-0.12; 0.281)
Toasten	post 24h	
crude model	-0.205 (-0.402; -0.008)	-0.05 (-0.098; -0.003)
full model	0.04 (-1.066; 1.147)	0.051 (-0.347; 0.45)
Braten	post 24h	
crude model	-0.004 (-0.19; 0.183)	-0.008 (-0.123; 0.106)
full model	-0.232 (-0.762; 0.298)	-0.24 (-0.768; 0.288)
	PMC [pro 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$]	
	PM ₁₀ Mean (95%-CI)	PM _{2.5} Mean (95%-CI)
Kerzen	post 24h	
crude model	-0.459 (-1.372; 0.454)	-0.478 (-1.413; 0.457)
full model	-0.784 (-3.761; 2.193)	-0.94 (-4.088; 2.208)
Toasten	post 24h	
crude model	-0.019 (-0.191; 0.153)	-0.235 (-0.788; 0.318)
full model	-0.213 (-1.179; 0.753)	-0.265 (-2.774; 2.244)
Braten	post 24h	
crude model	0.015 (-0.21; 0.24)	0.026 (-0.27; 0.322)
full model	-0.143 (-0.658; 0.372)	-0.223 (-0.993; 0.547)
	PM ₁ Mean (95%-CI)	
Kerzen	post 24h	
crude model	-0.509 (-1.456; 0.438)	
full model	-1.425 (-4.98; 2.13)	
Toasten	post 24h	
crude model	-0.934 (-1.985; 0.117)	
full model	0.426 (-3.839; 4.691)	
Braten	post 24h	
crude model	0.047 (-0.282; 0.376)	
full model	-0.227 (-1.172; 0.718)	

crude model = unadjustiertes Modell; full model = adjustiert für Expositionsquelle, Alter, Geschlecht, Größe, Temperatur in Messkammer, relative Luftfeuchtigkeit in Messkammer, Verkehrsmittel, Anfahrtszeit

11.1.8 Neutrophile im Blut

Abbildung 172: Differenz der Differenz der Neutrophile[tsd/μl] zur post-24-Stunden- Messung zu unterschiedlichen Innenraumbelastungen und unterschiedlichen Belastungsniveaus im Vergleich zur Raumluft



Neutrophile: Man sieht keine Veränderungen.

Tabelle 63: Veränderung der Neutrophile [tsd/μl]: Mittelwert (mean) und 95%- Konfidenzintervall (95%- CI)

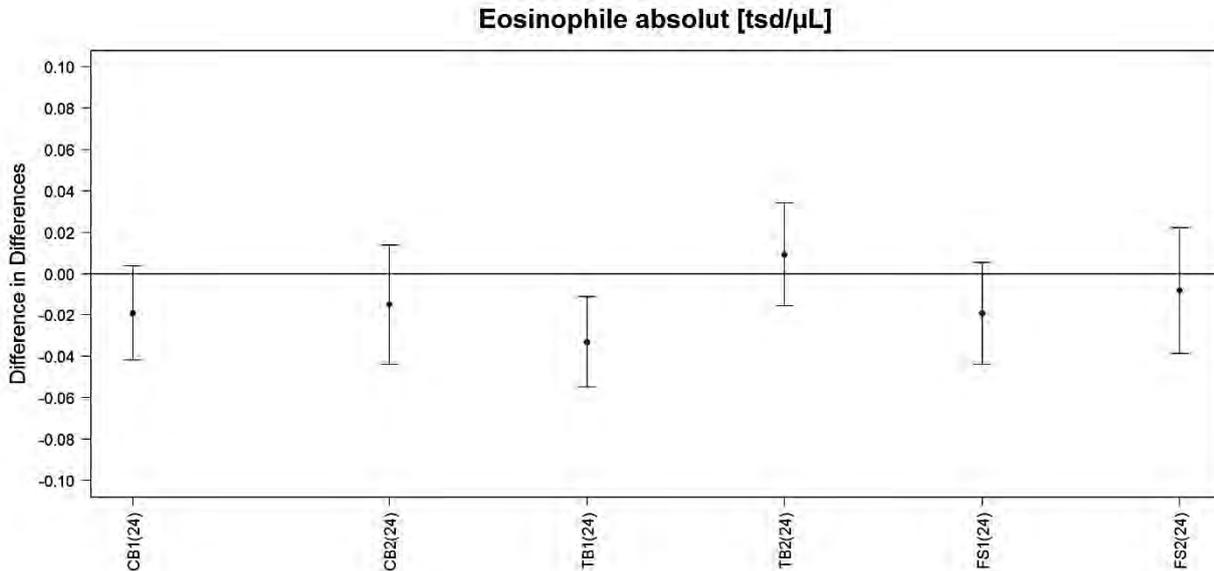
	Neutrophile[tsd/μl]	
	Oberflächenkonzentration [pro 100 μm ² /cm ³]	Anzahl [pro 10000 Partikel/cm ³]
	PSC	PNC < 100 nm
	Mean (95%-CI)	Mean (95%-CI)
Kerzen	post 24h	post 24h
crude model	-0.008 (-0.018; 0.002)	-0.001 (-0.002; 0)
full model	-0.058 (-0.128; 0.011)	-0.009 (-0.022; 0.004)
Toasten	post 24h	post 24h
crude model	-0.002 (-0.012; 0.008)	-0.001 (-0.003; 0.002)
full model	-0.027 (-0.085; 0.032)	-0.007 (-0.028; 0.014)
Braten	post 24h	post 24h
crude model	-0.001 (-0.011; 0.008)	-0.003 (-0.009; 0.003)
full model	0.02 (-0.01; 0.049)	0.004 (-0.025; 0.034)

	Neutrophile [tsd/ μ l]	
	PMC [pro 10 μ g/m ³]	
	PM ₁₀	PM _{2.5}
	Mean (95%-CI)	Mean (95%-CI)
Kerzen	post 24h	
crude model	-0.026 (-0.081; 0.029)	-0.027 (-0.084; 0.03)
full model	0.063 (-0.153; 0.279)	0.074 (-0.153; 0.301)
Toasten	post 24h	
crude model	-0.005 (-0.013; 0.003)	-0.015 (-0.042; 0.012)
full model	0.01 (-0.041; 0.061)	-0.001 (-0.132; 0.13)
Braten	post 24h	
crude model	0.003 (-0.009; 0.015)	0.003 (-0.013; 0.019)
full model	0.024 (-0.005; 0.053)	0.024 (-0.019; 0.067)
	PM ₁	
	Mean (95%-CI)	
Kerzen	post 24h	
crude model	-0.028 (-0.085; 0.029)	
full model	0.084 (-0.173; 0.341)	
Toasten	post 24h	
crude model	-0.004 (-0.057; 0.049)	
full model	-0.09 (-0.311; 0.131)	
Braten	post 24h	
crude model	0.004 (-0.014; 0.022)	
full model	0.028 (-0.025; 0.081)	

crude model = unadjustiertes Modell; full model = adjustiert für Expositionsquelle, Alter, Geschlecht, Größe, Temperatur in Messkammer, relative Luftfeuchtigkeit in Messkammer, Verkehrsmittel, Anfahrtszeit

11.1.9 Eosinophile im Blut

Abbildung 173: Differenz der Differenz der Eosinophile [tsd/ μ L] zur post-24-Stunden- Messung zu unterschiedlichen Innenraumbelastungen und unterschiedlichen Belastungsniveaus im Vergleich zur Raumluft



Eosinophile: Man sieht keine Veränderungen, außer einer statistisch signifikanten Erniedrigung der Eosinophilenkonzentration für Toasten Level 1, die sich jedoch nicht für Level 2 bestätigt, wo keine Änderung zu sehen ist.

Tabelle 64: Veränderung der Eosinophile [tsd/ μ L]: Mittelwert (mean) und 95%- Konfidenzintervall (95%- CI)

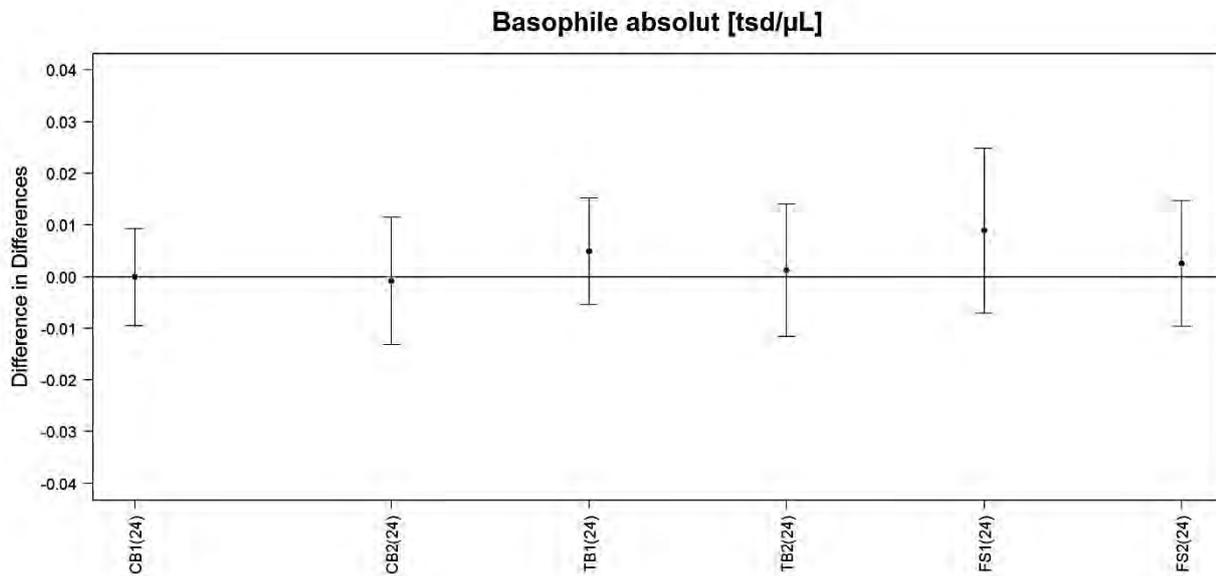
	Eosinophile[tsd/ μ L]	
	Oberflächenkonzentration [pro 100 μ m ² /cm ³]	Anzahl [pro 10000 Partikel/cm ³]
	PSC	PNC < 100 nm
	Mean (95%-CI)	Mean (95%-CI)
Kerzen	post 24h	post 24h
crude model	0 (-0.001; 0)	0 (0; 0)
full model	0.001 (-0.002; 0.004)	0 (-0.001; 0)
Toasten	post 24h	post 24h
crude model	0 (0; 0.001)	0 (0; 0)
full model	0.002 (-0.002; 0.005)	0 (-0.001; 0.002)
Braten	post 24h	post 24h
crude model	0 (-0.001; 0)	0 (-0.001; 0)
full model	0 (-0.002; 0.001)	-0.001 (-0.002; 0.001)

	Eosinophile [tsd/ μ l]	
	PMC [pro 10 μ g/m ³]	
	PM ₁₀	PM _{2.5}
	Mean (95%-CI)	Mean (95%-CI)
Kerzen	post 24h	post 24h
crude model	-0.001 (-0.003; 0.001)	-0.001 (-0.003; 0.001)
full model	0.003 (-0.007; 0.013)	0.003 (-0.007; 0.013)
Toasten	post 24h	post 24h
crude model	0 (0; 0)	0 (-0.002; 0.002)
full model	-0.002 (-0.004; 0)	0 (-0.008; 0.008)
Braten	post 24h	post 24h
crude model	0 (0; 0)	0 (0; 0)
full model	0 (-0.002; 0.002)	0 (-0.002; 0.002)
	PM ₁	
	Mean (95%-CI)	
Kerzen	post 24h	
crude model	-0.001 (-0.003; 0.001)	
full model	0.003 (-0.009; 0.015)	
Toasten	post 24h	
crude model	0.002 (-0.002; 0.006)	
full model	0.011 (-0.001; 0.023)	
Braten	post 24h	
crude model	0 (0; 0)	
full model	-0.001 (-0.003; 0.001)	

crude model = unadjustiertes Modell; full model = adjustiert für Expositionsquelle, Alter, Geschlecht, Größe, Temperatur in Messkammer, relative Luftfeuchtigkeit in Messkammer, Verkehrsmittel, Anfahrtszeit

11.1.10 Basophile im Blut

Abbildung 174: Differenz der Differenz der Basophile [tsd/ μ l] zur post-24-Stunden-Messung zu unterschiedlichen Innenraumbelastungen und unterschiedlichen Belastungsniveaus im Vergleich zur Raumluft



Basophile: Man sieht keine Veränderungen.

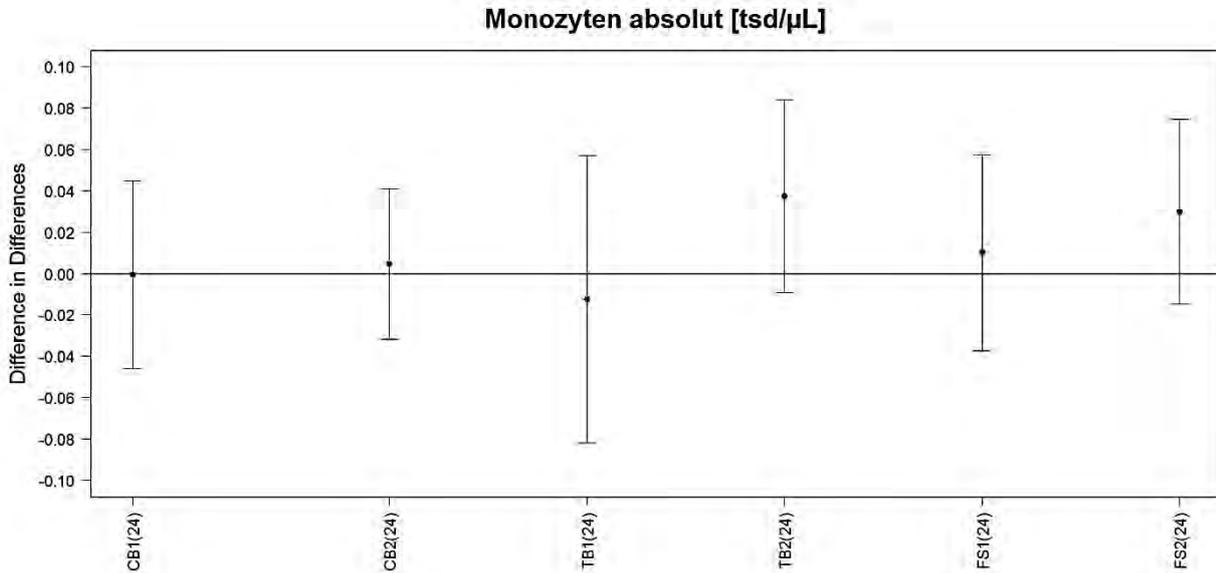
Tabelle 65: Veränderung der Basophile[tsd/ μl]: Mittelwert (mean) und 95%- Konfidenzintervall (95%- CI)

	Basophile [tsd/ μl]	
	Oberflächenkonzentration [pro 100 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$]	Anzahl [pro 10000 Partikel/ cm^3]
	PSC Mean (95%-CI)	PNC < 100 nm Mean (95%-CI)
Kerzen	post 24h	post 24h
crude model	0 (0; 0)	0 (0; 0)
full model	0 (-0.002; 0.001)	0 (0; 0)
Toasten	post 24h	post 24h
crude model	0 (0; 0)	0 (0; 0)
full model	0 (-0.001; 0.002)	0 (-0.001; 0.001)
Braten	post 24h	post 24h
crude model	0 (0; 0)	0 (0; 0)
full model	0 (-0.001; 0.001)	0 (-0.001; 0.001)
	PMC [pro 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$]	
	PM₁₀	PM_{2.5}
	Mean (95%-CI)	Mean (95%-CI)
Kerzen	post 24h	post 24h
crude model	0 (-0.002; 0.002)	0 (-0.002; 0.002)
full model	-0.001 (-0.005; 0.003)	-0.001 (-0.005; 0.003)
Toasten	post 24h	post 24h
crude model	0 (0; 0)	0 (0; 0)
full model	-0.001 (-0.003; 0.001)	-0.001 (-0.005; 0.003)
Braten	post 24h	post 24h
crude model	0 (0; 0)	0 (0; 0)
full model	0 (0; 0)	0 (-0.002; 0.002)
	PM₁	
	Mean (95%-CI)	
Kerzen	post 24h	
crude model	0 (-0.002; 0.002)	
full model	0 (-0.006; 0.006)	
Toasten	post 24h	
crude model	0 (-0.002; 0.002)	
full model	0.002 (-0.004; 0.008)	
Braten	post 24h	
crude model	0 (0; 0)	
full model	0 (-0.002; 0.002)	

crude model = unadjustiertes Modell; full model = adjustiert für Expositionsquelle, Alter, Geschlecht, Größe, Temperatur in Messkammer, relative Luftfeuchtigkeit in Messkammer, Verkehrsmittel, Anfahrtszeit

11.1.11 Monozyten im Blut

Abbildung 175: Differenz der Differenz der Monozyten [tsd/ μ l] zur post-24-Stunden-Messung zu unterschiedlichen Innenraumbelastungen und unterschiedlichen Belastungsniveaus im Vergleich zur Raumluft



Monozyten: Man sieht keine Veränderungen, außer eine leichte Tendenz zu einem Anstieg der Monozytenkonzentration für Toasten Level 2, die jedoch nicht statistisch signifikant ist.

Tabelle 66: Veränderung der Monozyten[tsd/ μ l]: Mittelwert (mean) und 95%- Konfidenzintervall (95%- CI)

	Monozyten [tsd/ μ l]	
	Oberflächenkonzentration [pro 100 μ m ² /cm ³]	Anzahl [pro 10000 Partikel/cm ³]
	PSC	PNC < 100 nm
	Mean (95%-CI)	Mean (95%-CI)
Kerzen	post 24h	post 24h
crude model	0 (-0.001; 0.001)	0 (0; 0)
full model	-0.002 (-0.009; 0.004)	0 (-0.001; 0.001)
Toasten	post 24h	post 24h
crude model	0.001 (-0.001; 0.002)	0 (0; 0)
full model	0.002 (-0.005; 0.01)	0 (-0.002; 0.003)
Braten	post 24h	post 24h
crude model	0.001 (0; 0.002)	0 (0; 0.001)
full model	0 (-0.004; 0.003)	-0.001 (-0.004; 0.002)

	Monozyten [tsd/ μ l]	
	PMC [pro 10 μ g/m ³]	
	PM ₁₀	PM _{2.5}
	Mean (95%-CI)	Mean (95%-CI)
Kerzen	post 24h	
crude model	-0.002 (-0.008; 0.004)	-0.002 (-0.008; 0.004)
full model	0.007 (-0.013; 0.027)	0.008 (-0.012; 0.028)
Toasten	post 24h	
crude model	-0.001 (-0.003; 0.001)	-0.001 (-0.005; 0.003)
full model	-0.004 (-0.01; 0.002)	-0.004 (-0.02; 0.012)
Braten	post 24h	
crude model	0 (-0.002; 0.002)	0 (-0.002; 0.002)
full model	0 (-0.004; 0.004)	-0.002 (-0.006; 0.002)
	PM ₁	
	Mean (95%-CI)	
Kerzen	post 24h	
crude model	-0.002 (-0.008; 0.004)	
full model	0.008 (-0.016; 0.032)	
Toasten	post 24h	
crude model	0.004 (-0.002; 0.01)	
full model	0.01 (-0.015; 0.035)	
Braten	post 24h	
crude model	0 (-0.002; 0.002)	
full model	-0.002 (-0.008; 0.004)	

crude model = unadjustiertes Modell; full model = adjustiert für Expositionsquelle, Alter, Geschlecht, Größe, Temperatur in Messkammer, relative Luftfeuchtigkeit in Messkammer, Verkehrsmittel, Anfahrtszeit

11.1.12 Hämoglobin im Blut

Abbildung 176: Differenz der Differenz der Hämoglobin- Werte [g/dl] zur post-24-Stunden- Messung zu unterschiedlichen Innenraumbelastungen und unterschiedlichen Belastungsniveaus im Vergleich zur Raumluft

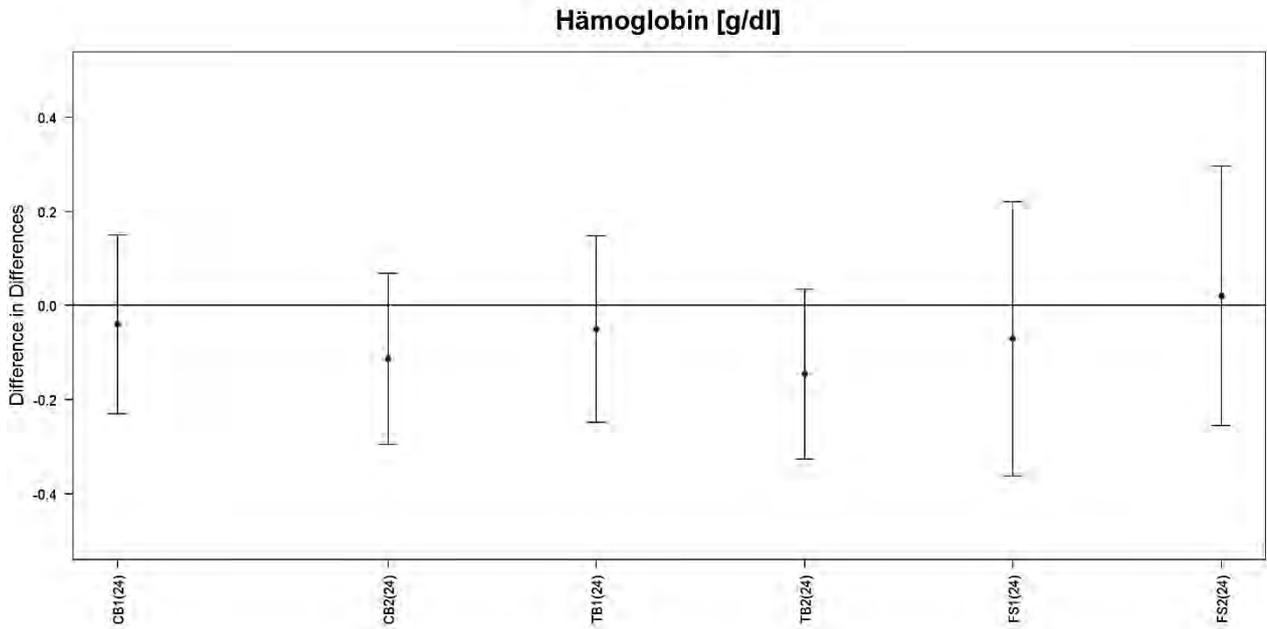


Tabelle 67: Veränderung des Hämoglobin [g/dl]: Mittelwert (mean) und 95%- Konfidenzintervall (95%- CI)

	Hämoglobin [g/dl]	
	Oberflächenkonzentration [pro 100 µm ² /cm ³]	Anzahl [pro 10000 Partikel/cm ³]
	PSC	PNC < 100 nm
	Mean (95%-CI)	Mean (95%-CI)
Kerzen	post 24h	post 24h
crude model	-0.002 (-0.007; 0.002)	0 (-0.001; 0)
full model	0.005 (-0.025; 0.035)	0 (-0.005; 0.006)
Toasten	post 24h	post 24h
crude model	-0.003 (-0.008; 0.002)	-0.001 (-0.002; 0)
full model	0.002 (-0.029; 0.033)	0.001 (-0.01; 0.012)
Braten	post 24h	post 24h
crude model	0.001 (-0.005; 0.006)	0 (-0.003; 0.003)
full model	-0.008 (-0.023; 0.008)	-0.007 (-0.022; 0.008)

	Hämoglobin [g/dl]	
	PMC [pro 10 µg/m ³]	
	PM ₁₀	PM _{2.5}
	Mean (95%-CI)	Mean (95%-CI)
Kerzen	post 24h	
crude model	-0.005 (-0.029; 0.019)	-0.005 (-0.029; 0.019)
full model	0.036 (-0.046; 0.118)	0.033 (-0.055; 0.121)
Toasten	post 24h	
crude model	-0.001 (-0.005; 0.003)	-0.006 (-0.02; 0.008)
full model	0.003 (-0.021; 0.027)	0.013 (-0.05; 0.076)
Braten	post 24h	
crude model	0 (-0.006; 0.006)	0.001 (-0.007; 0.009)
full model	-0.005 (-0.019; 0.009)	-0.008 (-0.028; 0.012)
	Hämoglobin [g/dl]	
	PMC [pro 10 µg/m ³]	
	PM ₁	
	Mean (95%-CI)	
Kerzen	post 24h	
crude model	-0.006 (-0.03; 0.018)	
full model	0.04 (-0.06; 0.14)	
Toasten	post 24h	
crude model	-0.013 (-0.038; 0.012)	
full model	0.03 (-0.078; 0.138)	
Braten	post 24h	
crude model	0.002 (-0.008; 0.012)	
full model	-0.012 (-0.037; 0.013)	

crude model = unadjustiertes Modell; full model = adjustiert für Expositionsquelle, Alter, Geschlecht, Größe, Temperatur in Messkammer, relative Luftfeuchtigkeit in Messkammer, Verkehrsmittel, Anfahrtszeit

11.1.13 Hämatokrit im Blut

Abbildung 177: Differenz der Differenz der Hämatokrit- Werte [%] zur post-24-Stunden- Messung zu unterschiedlichen Innenraumbelastungen und unterschiedlichen Belastungsniveaus im Vergleich zur Raumluft

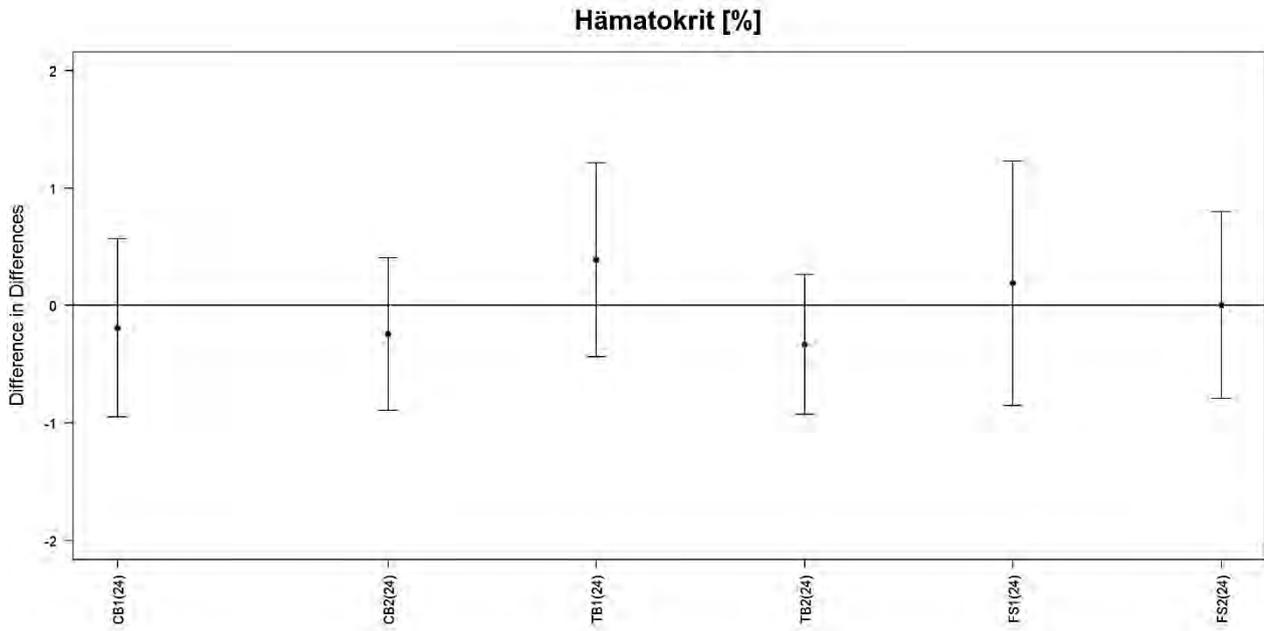


Tabelle 68: Veränderung des Hämatokrit [%]: Mittelwert (mean) und 95%- Konfidenzintervall (95%-CI)

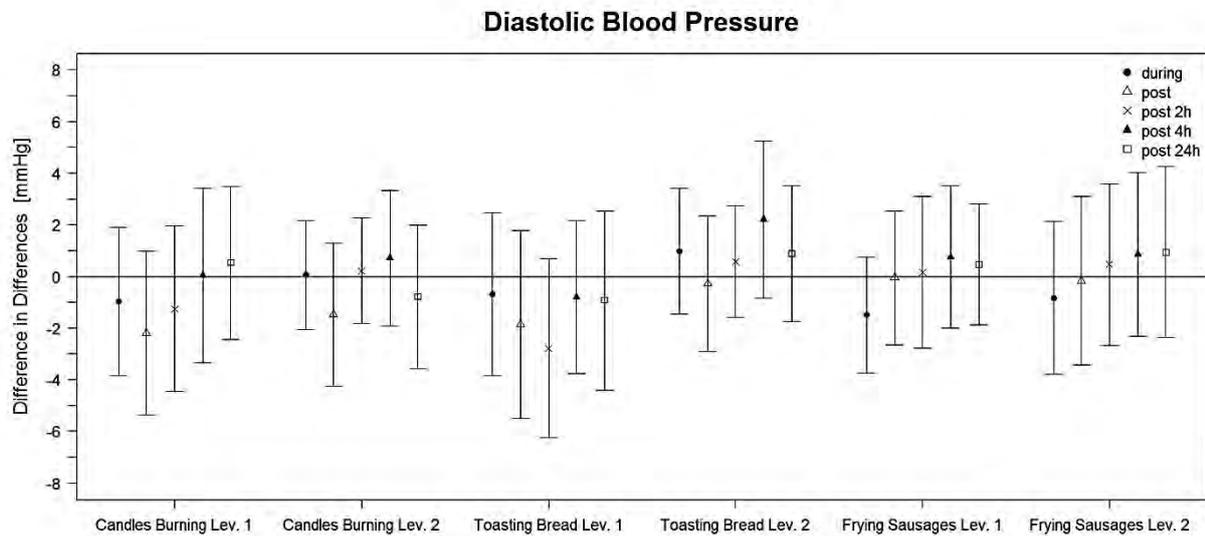
	Hämatokrit [%]	
	Oberflächenkonzentration [pro 100 µm ² /cm ³]	Anzahl [pro 10000 Partikel/cm ³]
	PSC	PNC < 100 nm
	Mean (95%-CI)	Mean (95%-CI)
Kerzen	post 24h	post 24h
crude model	0.002 (-0.014; 0.018)	0 (-0.003; 0.002)
full model	0.138 (0.035; 0.242)	0.006 (-0.014; 0.026)
Toasten	post 24h	post 24h
crude model	0.004 (-0.015; 0.023)	0.001 (-0.004; 0.005)
full model	0.06 (-0.044; 0.164)	0.009 (-0.029; 0.046)
Braten	post 24h	post 24h
crude model	0.002 (-0.016; 0.019)	0 (-0.011; 0.011)
full model	-0.012 (-0.065; 0.041)	-0.03 (-0.082; 0.022)

	Hämatokrit [%]	
	PMC [pro 10 µg/m³]	
	PM₁₀	PM_{2,5}
	Mean (95%-CI)	Mean (95%-CI)
Kerzen	post 24h	post 24h
crude model	0.034 (-0.05; 0.118)	0.031 (-0.055; 0.117)
full model	0.248 (-0.021; 0.517)	0.226 (-0.058; 0.51)
Toasten	post 24h	post 24h
crude model	-0.001 (-0.017; 0.015)	0.001 (-0.05; 0.052)
full model	0.022 (-0.064; 0.108)	0.123 (-0.1; 0.346)
Braten	post 24h	post 24h
crude model	0.004 (-0.018; 0.026)	0.004 (-0.023; 0.031)
full model	0.001 (-0.048; 0.05)	-0.008 (-0.081; 0.065)
	PM₁	
	Mean (95%-CI)	
Kerzen	post 24h	
crude model	0.027 (-0.061; 0.115)	
full model	0.206 (-0.119; 0.531)	
Toasten	post 24h	
crude model	0.016 (-0.082; 0.114)	
full model	0.286 (-0.09; 0.662)	
Braten	post 24h	
crude model	0.004 (-0.027; 0.035)	
full model	-0.015 (-0.103; 0.073)	

crude model = unadjustiertes Modell; full model = adjustiert für Expositionsquelle, Alter, Geschlecht, Größe, Temperatur in Messkammer, relative Luftfeuchtigkeit in Messkammer, Verkehrsmittel, Anfahrtszeit

11.1.14 Diastolischer Blutdruck

Abbildung 178: Differenz der Differenz des diastolischen Blutdrucks [mmHg] zu allen 5 Messzeitpunkten zu unterschiedlichen Innenraumbelastungen und unterschiedlichen Belastungsniveaus im Vergleich zur Raumluft



Diastolischer Blutdruck: Es zeigt sich keine statistisch signifikante Änderung durch die Expositionen.

Tabelle 69: Veränderung des Blutdrucks (Diastole): Mittelwert (mean) und 95%- Konfidenzintervall (95%- CI)

diastolischer Blutdruck [mmHg]					
Oberflächenkonzentration [pro 100 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$]					
PSC					
Mean (95%-CI)					
Kerzen	during	post	post 2h	post 4h	post 24h
crude model	-0.035 (-0.097; 0.027)	-0.048 (-0.109; 0.014)	0.008 (-0.053; 0.070)	0.014 (-0.047; 0.076)	0.014 (-0.047; 0.076)
full model	0.001 (-0.200; 0.201)	-0.014 (-0.215; 0.187)	0.051 (-0.150; 0.251)	0.061 (-0.139; 0.262)	0.021 (-0.181; 0.223)
Toasten	during	post	post 2h	post 4h	post 24h
crude model	0.005 (-0.063; 0.072)	-0.011 (-0.078; 0.056)	0.010 (-0.058; 0.077)	0.042 (-0.025; 0.110)	0.042 (-0.025; 0.110)
full model	-0.235 (-0.424; -0.047)	-0.264 (-0.452; -0.075)	-0.242 (-0.431; -0.054)	-0.213 (-0.401; -0.024)	-0.225 (-0.412; -0.038)
Braten	during	post	post 2h	post 4h	post 24h
crude model	-0.034 (-0.098; 0.029)	0.006 (-0.057; 0.070)	0.012 (-0.052; 0.076)	0.007 (-0.056; 0.071)	0.007 (-0.056; 0.071)
full model	-0.104 (-0.208; 0.000)	-0.060 (-0.163; 0.044)	-0.052 (-0.155; 0.052)	-0.055 (-0.159; 0.049)	-0.096 (-0.211; 0.019)
Anzahl [pro 10000 Partikel/cm ³]					
PNC < 100 nm					
Mean (95%-CI)					
Kerzen	during	post	post 2h	post 4h	post 24h
crude model	-0.004 (-0.013; 0.004)	-0.007 (-0.016; 0.001)	-0.001 (-0.009; 0.008)	0.000 (-0.009; 0.008)	0.000 (-0.009; 0.008)
full model	0.010 (-0.027; 0.048)	0.007 (-0.030; 0.044)	0.015 (-0.023; 0.052)	0.016 (-0.022; 0.053)	0.014 (-0.024; 0.052)
Toasten	during	post	post 2h	post 4h	post 24h
crude model	0.000 (-0.016; 0.016)	-0.004 (-0.020; 0.013)	0.000 (-0.016; 0.017)	0.009 (-0.007; 0.026)	0.009 (-0.007; 0.026)
full model	-0.076 (-0.147; -0.004)	-0.081 (-0.153; -0.010)	-0.078 (-0.149; -0.006)	-0.069 (-0.140; 0.003)	-0.073 (-0.145; -0.001)
Braten	during	post	post 2h	post 4h	post 24h
crude model	-0.025 (-0.064; 0.014)	0.001 (-0.038; 0.040)	0.008 (-0.031; 0.048)	0.008 (-0.031; 0.047)	0.008 (-0.031; 0.047)
full model	-0.112 (-0.215; -0.008)	-0.083 (-0.186; 0.021)	-0.073 (-0.177; 0.031)	-0.072 (-0.176; 0.032)	-0.092 (-0.197; 0.012)

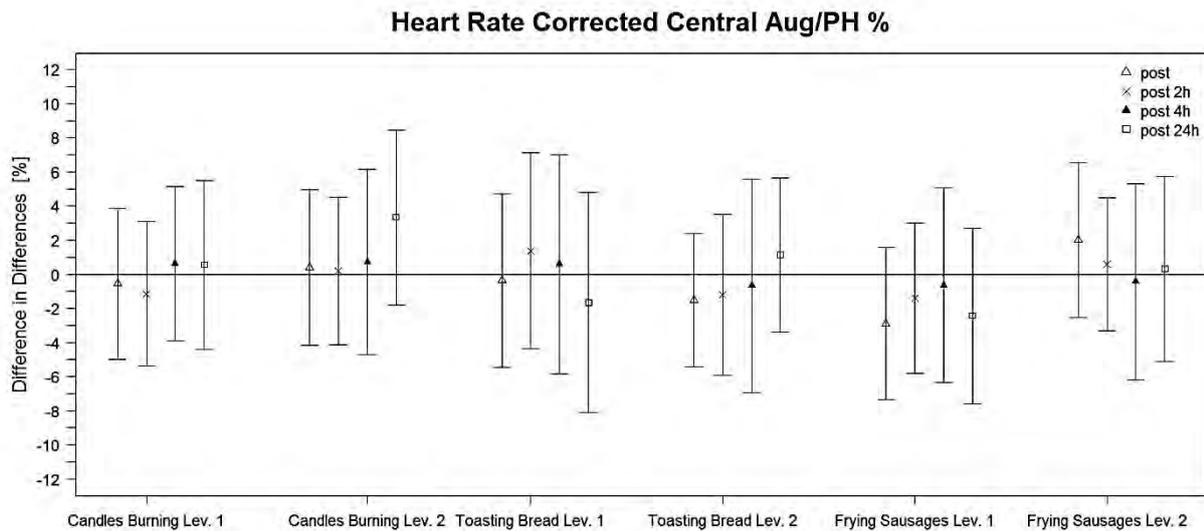
diastolischer Blutdruck [mmHg]					
PMC [pro 10 µg/m ³]					
PM ₁₀					
Mean (95%-CI)					
Kerzen	during	post	post 2h	post 4h	post 24h
crude model	-0.109 (-0.405; 0.187)	-0.234 (-0.526; 0.058)	-0.056 (-0.348; 0.236)	-0.008 (-0.300; 0.284)	-0.008 (-0.300; 0.284)
full model	0.328 (-0.272; 0.928)	0.201 (-0.395; 0.797)	0.406 (-0.190; 1.002)	0.484 (-0.112; 1.080)	0.290 (-0.312; 0.892)
Toasten	during	post	post 2h	post 4h	post 24h
crude model	0.027 (-0.038; 0.092)	-0.029 (-0.094; 0.036)	-0.057 (-0.122; 0.008)	-0.023 (-0.088; 0.042)	-0.023 (-0.088; 0.042)
full model	0.044 (-0.021; 0.109)	-0.011 (-0.076; 0.054)	-0.040 (-0.105; 0.025)	-0.006 (-0.071; 0.059)	-0.099 (-0.342; 0.144)
Braten	during	post	post 2h	post 4h	post 24h
crude model	-0.046 (-0.122; 0.030)	-0.005 (-0.081; 0.071)	-0.007 (-0.083; 0.069)	-0.011 (-0.087; 0.065)	-0.011 (-0.087; 0.065)
full model	-0.077 (-0.185; 0.031)	-0.032 (-0.140; 0.076)	-0.032 (-0.140; 0.076)	-0.035 (-0.143; 0.073)	-0.058 (-0.180; 0.064)
PMC [pro 10 µg/m ³]					
PM _{2,5}					
Mean (95%-CI)					
Kerzen	during	post	post 2h	post 4h	post 24h
crude model	-0.118 (-0.420; 0.184)	-0.231 (-0.531; 0.069)	-0.057 (-0.357; 0.243)	-0.012 (-0.312; 0.288)	-0.012 (-0.312; 0.288)
full model	0.391 (-0.234; 1.016)	0.275 (-0.348; 0.898)	0.479 (-0.144; 1.102)	0.556 (-0.067; 1.179)	0.364 (-0.263; 0.991)
Toasten	during	post	post 2h	post 4h	post 24h
crude model	0.068 (-0.128; 0.264)	-0.114 (-0.310; 0.082)	-0.176 (-0.372; 0.020)	-0.065 (-0.261; 0.131)	-0.065 (-0.261; 0.131)
full model	0.104 (-0.110; 0.318)	-0.090 (-0.304; 0.124)	-0.165 (-0.379; 0.049)	-0.055 (-0.269; 0.159)	-0.090 (-0.453; 0.273)
Braten	during	post	post 2h	post 4h	post 24h
crude model	-0.060 (-0.158; 0.038)	-0.003 (-0.101; 0.095)	-0.012 (-0.110; 0.086)	-0.016 (-0.114; 0.082)	-0.016 (-0.114; 0.082)
full model	-0.116 (-0.259; 0.027)	-0.054 (-0.197; 0.089)	-0.060 (-0.203; 0.083)	-0.063 (-0.206; 0.080)	-0.109 (-0.270; 0.052)

diastolischer Blutdruck [mmHg]					
PMC [pro 10 µg/m³]					
PM ₁					
Mean (95%-CI)					
Kerzen	during	post	post 2h	post 4h	post 24h
crude model	-0.146 (-0.452; 0.160)	-0.238 (-0.542; 0.066)	-0.064 (-0.368; 0.240)	-0.022 (-0.326; 0.282)	-0.022 (-0.326; 0.282)
full model	0.398 (-0.288; 1.084)	0.303 (-0.381; 0.987)	0.511 (-0.173; 1.195)	0.586 (-0.098; 1.270)	0.392 (-0.296; 1.080)
Toasten	during	post	post 2h	post 4h	post 24h
crude model	-0.010 (-0.341; 0.321)	-0.159 (-0.490; 0.172)	-0.119 (-0.450; 0.212)	0.005 (-0.326; 0.336)	0.005 (-0.326; 0.336)
full model	-0.499 (-1.040; 0.042)	-0.702 (-1.243; -0.161)	-0.691 (-1.232; -0.150)	-0.580 (-1.121; -0.039)	-0.506 (-1.039; 0.027)
Braten	during	post	post 2h	post 4h	post 24h
crude model	-0.061 (-0.169; 0.047)	0.002 (-0.106; 0.110)	-0.011 (-0.119; 0.097)	-0.010 (-0.120; 0.100)	-0.010 (-0.120; 0.100)
full model	-0.114 (-0.275; 0.047)	-0.044 (-0.205; 0.117)	-0.055 (-0.216; 0.106)	-0.052 (-0.213; 0.109)	-0.119 (-0.305; 0.067)

crude model = unadjustiertes Modell; full model = adjustiert für Expositionsquelle, Alter, Geschlecht, Größe, Temperatur in Messkammer, relative Luftfeuchtigkeit in Messkammer, Verkehrsmittel, Anfahrtszeit

11.1.15 Augmentationsindex

Abbildung 179: Differenz der Differenz des zur Herzfrequenz korrigierten Augmentationsindex [%] zu 4 Messzeitpunkten zu unterschiedlichen Innenraumbelastungen und unterschiedlichen Belastungsniveaus im Vergleich zur Raumluft



Augmentationsindex: Es zeigt sich keine statistisch signifikante Änderung durch die Expositionen.

Tabelle 70: Veränderung des zur Herzfrequenz korrigierten Augmentationsindexes [%]: Mittelwert (mean) und 95%- Konfidenzintervall (95%- CI)

Augmentationsindex [%]				
Oberflächenkonzentration [pro 100 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$]				
PSC				
Mean (95%-CI)				
	post	post 2h	post 4h	post 24h
Kerzen				
crude model	0.061 (-0.041; 0.162)	0.077 (-0.02; 0.174)	0.072 (-0.027; 0.171)	0.072 (-0.027; 0.171)
full model	0.504 (0.16; 0.848)	0.509 (0.164; 0.854)	0.492 (0.151; 0.834)	0.572 (0.221; 0.922)
Toasten				
crude model	0.004 (-0.106; 0.115)	0.023 (-0.084; 0.13)	0.044 (-0.071; 0.16)	0.044 (-0.071; 0.16)
full model	-0.082 (-0.433; 0.269)	-0.1 (-0.445; 0.246)	-0.091 (-0.447; 0.264)	-0.111 (-0.46; 0.238)
Braten				
crude model	0.082 (-0.021; 0.185)	0.032 (-0.065; 0.13)	0.027 (-0.076; 0.129)	0.027 (-0.076; 0.129)
full model	0.132 (-0.033; 0.298)	0.068 (-0.097; 0.233)	0.066 (-0.1; 0.233)	0.142 (-0.045; 0.329)

Augmentationsindex [%]				
Anzahl [pro 10000 Partikel/cm ³]				
PNC < 100 nm				
Mean (95%-CI)				
Kerzen	post	post 2h	post 4h	post 24h
crude model	0.008 (-0.006; 0.022)	0.008 (-0.005; 0.022)	0.006 (-0.008; 0.02)	0.006 (-0.008; 0.02)
full model	0.038 (-0.023; 0.099)	0.036 (-0.025; 0.098)	0.033 (-0.028; 0.094)	0.042 (-0.02; 0.105)
Toasten	post	post 2h	post 4h	post 24h
crude model	0 (-0.027; 0.027)	0.005 (-0.021; 0.032)	0.012 (-0.016; 0.04)	0.012 (-0.016; 0.04)
full model	-0.029 (-0.157; 0.099)	-0.032 (-0.158; 0.095)	-0.027 (-0.155; 0.101)	-0.031 (-0.158; 0.097)
Braten	post	post 2h	post 4h	post 24h
crude model	0.04 (-0.023; 0.103)	0.021 (-0.039; 0.081)	0.017 (-0.045; 0.08)	0.017 (-0.045; 0.08)
full model	0.249 (0.083; 0.415)	0.224 (0.056; 0.391)	0.223 (0.054; 0.392)	0.272 (0.097; 0.448)
PMC [pro 10 µg/m ³]				
PM ₁₀				
Mean (95%-CI)				
Kerzen	post	post 2h	post 4h	post 24h
crude model	0.406 (-0.129; 0.941)	0.333 (-0.165; 0.831)	0.353 (-0.168; 0.874)	0.353 (-0.168; 0.874)
full model	-0.643 (-1.658; 0.372)	-0.78 (-1.791; 0.231)	-0.787 (-1.81; 0.236)	-0.614 (-1.647; 0.419)
Toasten	post	post 2h	post 4h	post 24h
crude model	0.177 (0.083; 0.271)	0.149 (0.055; 0.243)	0.013 (-0.081; 0.107)	0.013 (-0.081; 0.107)
full model	0.192 (0.096; 0.288)	0.158 (0.064; 0.252)	0.025 (-0.069; 0.119)	-0.191 (-0.573; 0.191)
Braten	post	post 2h	post 4h	post 24h
crude model	0.131 (-0.008; 0.27)	0.05 (-0.072; 0.172)	0.021 (-0.106; 0.148)	0.021 (-0.106; 0.148)
full model	-0.061 (-0.257; 0.135)	-0.156 (-0.338; 0.026)	-0.17 (-0.352; 0.012)	-0.147 (-0.347; 0.053)

Augmentationsindex [%]				
PMC [pro 10 µg/m ³]				
PM _{2.5}				
Mean (95%-CI)				
Kerzen	post	post 2h	post 4h	post 24h
crude model	0.421 (-0.126; 0.968)	0.35 (-0.158; 0.858)	0.367 (-0.166; 0.9)	0.367 (-0.166; 0.9)
full model	-0.606 (-1.674; 0.462)	-0.743 (-1.805; 0.319)	-0.757 (-1.831; 0.317)	-0.59 (-1.674; 0.494)
Toasten	post	post 2h	post 4h	post 24h
crude model	0.554 (0.248; 0.86)	0.443 (0.145; 0.741)	0.05 (-0.254; 0.354)	0.05 (-0.254; 0.354)
full model	0.656 (0.325; 0.987)	0.49 (0.165; 0.815)	0.08 (-0.249; 0.409)	-0.146 (-0.781; 0.489)
Braten	post	post 2h	post 4h	post 24h
crude model	0.181 (0.012; 0.35)	0.078 (-0.077; 0.233)	0.059 (-0.104; 0.222)	0.059 (-0.104; 0.222)
full model	0.032 (-0.211; 0.275)	-0.098 (-0.337; 0.141)	-0.101 (-0.34; 0.138)	-0.061 (-0.331; 0.209)
PMC [pro 10 µg/m ³]				
PM ₁				
Mean (95%-CI)				
Kerzen	post	post 2h	post 4h	post 24h
crude model	0.46 (-0.095; 1.015)	0.346 (-0.168; 0.86)	0.389 (-0.15; 0.928)	0.389 (-0.15; 0.928)
full model	-0.592 (-1.764; 0.58)	-0.778 (-1.948; 0.392)	-0.768 (-1.946; 0.41)	-0.614 (-1.81; 0.582)
Toasten	post	post 2h	post 4h	post 24h
crude model	0.381 (-0.203; 0.965)	0.232 (-0.319; 0.783)	0.129 (-0.469; 0.727)	0.129 (-0.469; 0.727)
full model	0.044 (-0.956; 1.044)	-0.337 (-1.315; 0.641)	-0.532 (-1.543; 0.479)	-0.695 (-1.72; 0.33)
Braten	post	post 2h	post 4h	post 24h
crude model	0.218 (0.034; 0.402)	0.1 (-0.071; 0.271)	0.098 (-0.082; 0.278)	0.098 (-0.082; 0.278)
full model	0.117 (-0.153; 0.387)	-0.025 (-0.295; 0.245)	-0.016 (-0.286; 0.254)	0.02 (-0.296; 0.336)

crude model = unadjustiertes Modell; full model = adjustiert für Expositionsquelle, Alter, Geschlecht, Größe, Temperatur in Messkammer, relative Luftfeuchtigkeit in Messkammer, Verkehrsmittel, Anfahrtszeit

11.2 Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen

11.2.1 Lungenfunktion

Tabelle 71: Veränderung der FEV₁ [l] nach Sensitivitätsanalyse: Mittelwert (mean) und 95%- Konfidenzintervall (95%- CI)

	FEV ₁ [ml]	
	Oberflächenkonzentration [pro 100 µm ² /cm ³]	
	PSC	
	Mean (95%-CI)	
Kerzen	post 2h	post 24h
Model A	-8 (-16; 0)	-8 (-16; -1)
Model B	-10 (-18; -3)	-10 (-18; -3)
Toasten	post 2h	post 24h
Model A	-2 (-10; 5)	-3 (-10; 5)
Model B	-4 (-11; 4)	-4 (-12; 4)
Braten	post 2h	post 24h
Model A	0 (-6; 6)	1 (-6; 7)
Model B	1 (-4; 7)	3 (-3; 8)
	Anzahl [pro 10000 Partikel/cm ³]	
	PNC < 100 nm	
	Mean (95%-CI)	
Kerzen	post 2h	post 24h
Model A	0 (-2; 1)	0 (-2; 1)
Model B	-1 (-3; 0)	-1 (-3; 0)
Toasten	post 2h	post 24h
Model A	2 (-1; 5)	2 (-1; 4)
Model B	1 (-2; 5)	1 (-2; 4)
Braten	post 2h	post 24h
Model A	0 (-5; 6)	1 (-5; 6)
Model B	1 (-4; 7)	2 (-3; 8)

	FEV ₁ [ml]	
	PMC [pro 10 µg/m ³]	
	PM ₁₀	
	Mean (95%-CI)	
	post 2h	post 24h
Kerzen		
Model A	-14 (-38; 10)	-15 (-39; 9)
Model B	-14 (-41; 13)	-14 (-41; 13)
Toasten		
Model A	1 (-1; 3)	0 (-8; 8)
Model B	0 (-2; 2)	0 (-8; 8)
Braten		
Model A	-7 (-13; -1)	-5 (-11; 1)
Model B	-3 (-9; 3)	-2 (-8; 4)
	PMC [pro 10 µg/m ³]	
	PM _{2,5}	
	Mean (95%-CI)	
	post 2h	post 24h
Kerzen		
Model A	-15 (-39; 9)	-17 (-41; 7)
Model B	-17 (-44; 10)	-17 (-44; 10)
Toasten		
Model A	2 (-6; 10)	-1 (-15; 13)
Model B	1 (-7; 9)	-1 (-15; 13)
Braten		
Model A	-11 (-19; -3)	-10 (-18; -2)
Model B	-6 (-14; 2)	-5 (-13; 3)

	FEV1 [ml]	
	PMC [pro 10 µg/m ³]	
	PM ₁	
	Mean (95%-CI)	
Kerzen	post 2h	post 24h
Model A	-20 (-45; 5)	-21 (-46; 4)
Model B	-24 (-53; 5)	-23 (-52; 6)
Toasten	post 2h	post 24h
Model A	-7 (-29; 15)	-9 (-31; 13)
Model B	-6 (-26; 14)	-7 (-27; 13)
Braten	post 2h	post 24h
Model A	-10 (-20; 0)	-8 (-18; 2)
Model B	-5 (-13; 3)	-2 (-12; 8)

model A = noch zusätzlich zum full model adjustiert für PM10 und NO₂ gemessen am Studienort (LANUV-Referenzstation Mülheim- Styrum); model B = noch zusätzlich zum full model adjustiert für PM10 und NO₂ gemessen am Wohnort der Probanden (LANUV- Messstationen)

Tabelle 72: Veränderung der FVC [ml] nach Sensitivitätsanalyse: Mittelwert (mean) und 95%- Konfidenzintervall (95%- CI)

	FVC [ml]	
	Oberflächenkonzentration [pro 100 µm²/cm³]	
	PSC	
	Mean (95%-CI)	
Kerzen	post 2h	post 24h
Model A	-2 (-11; 7)	-3 (-12; 7)
Model B	-5 (-14; 4)	-5 (-14; 4)
Toasten	post 2h	post 24h
Model A	3 (-5; 11)	2 (-6; 1)
Model B	1 (-7; 9)	1 (-7; 9)
Braten	post 2h	post 24h
Model A	3 (-2; 8)	2 (-3; 8)
Model B	4 (0 ; 9)	4 (-1; 9)
	Anzahl [pro 10000 Partikel/cm³]	
	PNC < 100 nm	
	Mean (95%-CI)	
Kerzen	post 2h	post 24h
Model A	-1 (-3; 1)	-1 (-3; 1)
Model B	-2 (-3; 0)	-2 (-3; 0)
Toasten	post 2h	post 24h
Model A	2 (-1; 6)	2 (-1; 5)
Model B	2 (-1; 5)	2 (-1; 5)
Braten	post 2h	post 24h
Model A	3 (-2; 8)	3 (-2; 7)
Model B	5 (0 ; 1)	5 (0 ; 9)
	PMC [pro 10 µg/m³]	
	PM₁₀	
	Mean (95%-CI)	
Kerzen	post 2h	post 24h
Model A	-5 (-32; 22)	-4 (-31; 23)
Model B	-6 (-37; 25)	-3 (-34; 28)
Toasten	post 2h	post 24h
Model A	1 (-1; 3)	-1 (-9; 7)
Model B	0 (-2; 2)	-2 (-1; 6)
Braten	post 2h	post 24h
Model A	-1 (-5; 3)	-2 (-8; 4)
Model B	1 (-3; 5)	1 (-3; 5)
	FVC [ml]	
	PMC [pro 10 µg/m³]	
	PM_{2,5}	
	Mean (95%-CI)	

Kerzen	post 2h	post 24h
Model A	-5 (-32; 22)	-5 (-32; 22)
Model B	-7 (-38; 24)	-4 (-35; 27)
Toasten	post 2h	post 24h
Model A	2 (-6; 1)	-1 (-15; 13)
Model B	2 (-6; 1)	-1 (-15; 13)
Braten	post 2h	post 24h
Model A	-1 (-7; 5)	-1 (-9; 7)
Model B	3 (-3; 9)	2 (-4; 8)
PMC [pro 10 µg/m³]		
PM₁		
Mean (95%-CI)		
Kerzen	post 2h	post 24h
Model A	-8 (-37; 21)	-8 (-39; 23)
Model B	-14 (-49; 21)	-11 (-46; 24)
Toasten	post 2h	post 24h
Model A	-2 (-24; 2)	-4 (-26; 18)
Model B	2 (-2; 24)	1 (-21; 23)
Braten	post 2h	post 24h
Model A	2 (-6; 1)	2 (-6; 1)
Model B	5 (-1; 11)	5 (-3; 13)

model A = noch zusätzlich zum full model adjustiert für PM10 und NO2 gemessen am Studienort (LANUV-Referenzstation Mülheim- Styrum); model B = noch zusätzlich zum full model adjustiert für PM10 und NO2 gemessen am Wohnort der Probanden (LANUV- Messstationen)

Tabelle 73: Veränderung der FEV₁/FVC nach Sensitivitätsanalyse: Mittelwert (mean) und 95%- Konfidenzintervall (95%- CI)

		FEV₁/FVC [*1000]	
		Oberflächenkonzentration [pro 100 µm²/cm³]	
		PSC	
		Mean (95%-CI)	
		post 2h	post 24h
Kerzen			
Model A		-2 (-3; 0)	-2 (-3;0)
Model B		-2 (-3; 0)	-2 (-3; 0)
Toasten			
Model A		-1 (-2; 0)	-1 (-2; 0)
Model B		-1 (-2; 0)	-1 (-2; 0)
Braten			
Model A		-1 (-2; 0)	0 (-1; 1)
Model B		-1 (-1; 0)	0 (-1; 1)
		Anzahl [pro 10000 Partikel/cm³]	
		PNC < 100 nm	
		Mean (95%-CI)	
		post 2h	post 24h
Kerzen			
Model A		0 (0; 0)	0 (0; 0)
Model B		0 (0; 0)	0 (0; 0)
Toasten			
Model A		0 (-1; 0)	0 (-1; 0)
Model B		0 (-1; 0)	0 (-1; 0)
Braten			
Model A		-1 (-1; 0)	0 (-1; 0)
Model B		-1 (-2; 0)	0 (-1; 0)
		PMC [pro 10 µg/m³]	
		PM₁₀	
		Mean (95%-CI)	
		post 2h	post 24h
Kerzen			
Model A		-3 (-7; 1)	-4 (-8; 0)
Model B		-4 (-8; 0)	-4 (-8; 0)
Toasten			
Model A		0 (0; 0)	0 (0; 0)
Model B		0 (0; 0)	0 (0; 0)
Braten			
Model A		-1 (-1; -1)	-1 (-3; 1)
Model B		-1 (-1; -1)	-1 (-1; -1)
		FEV₁/FVC[*1000]	
		PMC [pro 10 µg/m³]	
		PM_{2,5}	
		Mean (95%-CI)	

Kerzen	post 2h	post 24h
Model A	-4 (-8; 0)	-4 (-8; 0)
Model B	-4 (-8; 0)	-5 (-9; -1)
Toasten	post 2h	post 24h
Model A	0 (0 ; 0)	(-2; 2)
Model B	0 (0 ; 0)	(-2; 2)
Braten	post 2h	post 24h
Model A	-2 (-4; 0)	-2 (-4; 0)
Model B	-2 (-4; 0)	-1 (-3; 1)
PMC [pro 10 µg/m³]		
PM₁		
Mean (95%-CI)		
Kerzen	post 2h	post 24h
Model A	-4 (-8; 0)	-4 (-8; 0)
Model B	-5 (-9; -1)	-5 (-9; -1)
Toasten	post 2h	post 24h
Model A	-1 (-3; 1)	-1 (-3; 1)
Model B	-1 (-3; 1)	-2 (-4; 0)
Braten	post 2h	post 24h
Model A	-2 (-4; 0)	-2 (-4; 0)
Model B	-2 (-4; 0)	-1 (-3; 1)

model A = noch zusätzlich zum full model adjustiert für PM10 und NO2 gemessen am Studienort (LANUV-Referenzstation Mülheim- Styrum); model B = noch zusätzlich zum full model adjustiert für PM10 und NO2 gemessen am Wohnort der Probanden (LANUV- Messstationen)

Tabelle 74: Veränderung der MEF₂₅₋₇₅[ml] nach Sensitivitätsanalyse: Mittelwert (mean) und 95%-Konfidenzintervall (95%-CI)

MEF ₂₅₋₇₅ [ml]		
Oberflächenkonzentration [pro 100 µm ² /cm ³]		
PSC		
Mean (95%-CI)		
	post 2h	post 24h
Kerzen		
Model A	-8 (-25; 9)	-9 (-26; 7)
Model B	-13 (-29; 3)	-14 (-31; 2)
Toasten		
Model A	-8 (-23;6)	-1 (-24; 5)
Model B	-1 (-25; 5)	-12 (-26; 3)
Braten		
Model A	-8 (-21; 6)	-5 (-19; 1)
Model B	-5 (-17; 7)	-2 (-15; 12)
Anzahl [pro 10000 Partikel/cm ³]		
PNC < 100 nm		
Mean (95%-CI)		
	post 2h	post 24h
Kerzen		
Model A	2 (-1; 5)	2 (-1; 5)
Model B	0 (-3; 4)	0 (-3; 4)
Toasten		
Model A	2 (-4; 8)	2 (-4; 8)
Model B	1 (-5; 8)	1 (-5; 7)
Braten		
Model A	-6 (-18; 6)	-5 (-17; 8)
Model B	-5 (-18; 8)	-4 (-16; 9)
PMC [pro 10 µg/m ³]		
PM ₁₀		
Mean (95%-CI)		
	post 2h	post 24h
Kerzen		
Model A	-15 (-62; 32)	-29 (-76; 18)
Model B	-13 (-7;44)	-25 (-82; 32)
Toasten		
Model A	1 (-3; 5)	1 (-13; 15)
Model B	1 (-3; 5)	1 (-13; 15)
Braten		
Model A	-17 (-31; -3)	-14 (-28; 0)
Model B	-12 (-24; 0)	-8 (-22; 6)
MEF ₂₅₋₇₅ [ml]		
PMC [pro 10 µg/m ³]		
PM _{2,5}		
Mean (95%-CI)		

Kerzen	post 2h	post 24h
Model A	-19 (-68; 3)	-33 (-82; 16)
Model B	-17 (-76; 42)	-29 (-88; 3)
Toasten	post 2h	post 24h
Model A	3 (-11; 17)	-3 (-27; 21)
Model B	2 (-12; 16)	-5 (-29; 19)
Braten	post 2h	post 24h
Model A	-35 (-53; -17)	-32 (-52; -12)
Model B	-25 (-41; -9)	-22 (-4; -4)
PMC [pro 10 µg/m³]		
PM₁		
Mean (95%-CI)		
Kerzen	post 2h	post 24h
Model A	-27 (-82; 28)	-41 (-96; 14)
Model B	-29 (-92; 34)	-41 (-14; 22)
Toasten	post 2h	post 24h
Model A	-12 (-49; 25)	-2 (-57; 17)
Model B	-13 (-5; 24)	-21 (-58; 16)
Braten	post 2h	post 24h
Model A	-35 (-55; -15)	-32 (-54; -1)
Model B	-25 (-43; -7)	-21 (-43; 1)

model A = noch zusätzlich zum full model adjustiert für PM10 und NO2 gemessen am Studienort (LANUV-Referenzstation Mülheim- Styrum); model B = noch zusätzlich zum full model adjustiert für PM10 und NO2 gemessen am Wohnort der Probanden (LANUV- Messstationen)

11.2.2 Blutdruck

Tabelle 75: Veränderung des Blutdrucks (Systole) nach Sensitivitätsanalyse: Mittelwert (mean) und 95%- Konfidenzintervall (95%- CI)

systolischer Blutdruck [mmHg]					
Oberflächenkonzentration [pro 100 µm ² /cm ³]					
PSC					
Mean (95%-CI)					
Kerzen	during	post	post 2h	post 4h	post 24h
model A	-0.174 (-0.444; 0.095)	-0.221 (-0.490; 0.049)	-0.092 (-0.362; 0.178)	-0.085 (-0.355; 0.184)	-0.165 (-0.436; 0.106)
model B	-0.105 (-0.368; 0.158)	-0.158 (-0.421; 0.105)	-0.016 (-0.279; 0.247)	-0.019 (-0.282; 0.244)	-0.100 (-0.365; 0.165)
Toasten	during	post	post 2h	post 4h	post 24h
model A	0.093 (-0.158; 0.344)	0.073 (-0.178; 0.324)	0.132 (-0.119; 0.383)	0.211 (-0.040; 0.462)	0.094 (-0.154; 0.342)
model B	0.082 (-0.175; 0.338)	0.063 (-0.194; 0.319)	0.123 (-0.133; 0.379)	0.194 (-0.063; 0.450)	0.075 (-0.178; 0.327)
Braten	during	post	post 2h	post 4h	post 24h
model A	0.035 (-0.139; 0.208)	0.070 (-0.103; 0.244)	0.136 (-0.038; 0.309)	0.097 (-0.077; 0.270)	0.062 (-0.122; 0.247)
model B	-0.142 (-0.296; 0.013)	-0.107 (-0.262; 0.048)	-0.032 (-0.186; 0.123)	-0.078 (-0.233; 0.077)	-0.108 (-0.277; 0.061)
Anzahl [pro 10000 Partikel/cm ³]					
PNC < 100 nm					
Mean (95%-CI)					
Kerzen	during	post	post 2h	post 4h	post 24h
model A	-0.005 (-0.051; 0.042)	-0.012 (-0.059; 0.034)	0.005 (-0.041; 0.052)	0.007 (-0.039; 0.054)	0.000 (-0.047; 0.047)
model B	-0.009 (-0.059; 0.041)	-0.017 (-0.067; 0.033)	0.002 (-0.047; 0.052)	0.003 (-0.047; 0.052)	-0.005 (-0.055; 0.045)
Toasten	during	post	post 2h	post 4h	post 24h
model A	-0.064 (-0.168; 0.041)	-0.067 (-0.171; 0.037)	-0.058 (-0.162; 0.046)	-0.040 (-0.144; 0.064)	-0.063 (-0.167; 0.041)
model B	-0.053 (-0.162; 0.056)	-0.056 (-0.165; 0.053)	-0.046 (-0.155; 0.062)	-0.031 (-0.139; 0.078)	-0.054 (-0.163; 0.054)
Braten	during	post	post 2h	post 4h	post 24h
model A	0.006 (-0.140; 0.152)	0.030 (-0.116; 0.176)	0.056 (-0.090; 0.202)	0.045 (-0.102; 0.191)	0.032 (-0.115; 0.179)
model B	-0.071 (-0.219; 0.078)	-0.048 (-0.196; 0.100)	-0.015 (-0.163; 0.134)	-0.031 (-0.180; 0.117)	-0.038 (-0.188; 0.112)

systolischer Blutdruck [mmHg]					
PMC [pro 10 µg/m ³]					
PM ₁₀					
Mean (95%-CI)					
	during	post	post 2h	post 4h	post 24h
Kerzen					
model A	0.862 (0.074; 1.650)	0.600 (-0.186; 1.386)	1.053 (0.267; 1.839)	1.169 (0.383; 1.955)	0.625 (-0.165; 1.415)
model B	0.985 (0.097; 1.873)	0.697 (-0.187; 1.581)	1.219 (0.335; 2.103)	1.265 (0.381; 2.149)	0.671 (-0.213; 1.555)
Toasten					
model A	0.070 (-0.010; 0.150)	0.070 (-0.010; 0.150)	-0.022 (-0.102; 0.058)	-0.001 (-0.081; 0.079)	-0.016 (-0.310; 0.278)
model B	0.076 (-0.004; 0.156)	0.076 (-0.004; 0.156)	-0.014 (-0.094; 0.066)	0.004 (-0.076; 0.084)	-0.014 (-0.318; 0.290)
Braten					
model A	-0.092 (-0.257; 0.073)	-0.036 (-0.201; 0.129)	0.030 (-0.135; 0.195)	-0.028 (-0.193; 0.137)	-0.069 (-0.249; 0.111)
model B	-0.229 (-0.384; -0.074)	-0.171 (-0.326; -0.016)	-0.094 (-0.249; 0.061)	-0.160 (-0.315; -0.005)	-0.194 (-0.366; -0.022)
PMC [pro 10 µg/m ³]					
PM _{2.5}					
Mean (95%-CI)					
	during	post	post 2h	post 4h	post 24h
Kerzen					
model A	0.882 (0.067; 1.697)	0.636 (-0.175; 1.447)	1.089 (0.278; 1.900)	1.214 (0.403; 2.025)	0.661 (-0.156; 1.478)
model B	1.009 (0.098; 1.920)	0.738 (-0.171; 1.647)	1.261 (0.352; 2.170)	1.313 (0.404; 2.222)	0.709 (-0.200; 1.618)
Toasten					
model A	0.209 (-0.058; 0.476)	0.187 (-0.080; 0.454)	-0.008 (-0.275; 0.259)	0.123 (-0.144; 0.390)	-0.030 (-0.473; 0.413)
model B	0.221 (-0.051; 0.493)	0.202 (-0.070; 0.474)	0.009 (-0.263; 0.281)	0.119 (-0.153; 0.391)	-0.060 (-0.521; 0.401)
Braten					
model A	-0.041 (-0.259; 0.177)	0.022 (-0.196; 0.240)	0.092 (-0.126; 0.310)	0.035 (-0.183; 0.253)	-0.032 (-0.269; 0.205)
model B	-0.247 (-0.453; -0.041)	-0.183 (-0.389; 0.023)	-0.096 (-0.302; 0.110)	-0.166 (-0.372; 0.040)	-0.223 (-0.454; 0.008)

systolischer Blutdruck [mmHg]					
PMC [pro 10 µg/m ³]					
PM ₁					
Mean (95%-CI)					
	during	post	post 2h	post 4h	post 24h
Kerzen					
model A	0.902 (0.020; 1.784)	0.687 (-0.193; 1.567)	1.136 (0.256; 2.016)	1.263 (0.383; 2.143)	0.711 (-0.173; 1.595)
model B	1.092 (0.124; 2.060)	0.853 (-0.113; 1.819)	1.373 (0.407; 2.339)	1.426 (0.460; 2.392)	0.825 (-0.141; 1.791)
Toasten					
model A	0.130 (-0.558; 0.818)	0.063 (-0.625; 0.751)	0.283 (-0.405; 0.971)	0.633 (-0.055; 1.321)	0.061 (-0.623; 0.745)
model B	-0.068 (-0.770; 0.634)	-0.125 (-0.827; 0.577)	0.104 (-0.598; 0.806)	0.405 (-0.297; 1.107)	-0.173 (-0.863; 0.517)
Braten					
model A	0.031 (-0.216; 0.278)	0.092 (-0.155; 0.339)	0.171 (-0.076; 0.418)	0.117 (-0.130; 0.364)	0.035 (-0.241; 0.311)
model B	-0.225 (-0.456; 0.006)	-0.163 (-0.394; 0.068)	-0.066 (-0.297; 0.165)	-0.133 (-0.364; 0.098)	-0.208 (-0.475; 0.059)

model A = noch zusätzlich zum full model adjustiert für PM10 und NO2 gemessen am Studienort (LANUV- Referenzstation Mülheim- Styrum); model B = noch zusätzlich zum full model adjustiert für PM10 und NO2 gemessen am Wohnort der Probanden (LANUV- Messstationen)

Tabelle 76: Veränderung des Blutdrucks (Diastole) nach Sensitivitätsanalyse: Mittelwert (mean) und 95%- Konfidenzintervall (95%- CI)

diastolischer Blutdruck [mmHg]					
Oberflächenkonzentration [pro 100 µm ² /cm ³]					
PSC					
Mean (95%-CI)					
Kerzen	during	post	post 2h	post 4h	post 24h
model A	0.031 (-0.189; 0.251)	0.016 (-0.204; 0.236)	0.081 (-0.139; 0.301)	0.092 (-0.128; 0.312)	0.052 (-0.169; 0.272)
model B	0.029 (-0.185; 0.242)	0.007 (-0.206; 0.221)	0.084 (-0.130; 0.297)	0.086 (-0.128; 0.299)	0.045 (-0.170; 0.260)
Toasten	during	post	post 2h	post 4h	post 24h
model A	-0.284 (-0.485; -0.082)	-0.312 (-0.513; -0.111)	-0.291 (-0.492; -0.090)	-0.261 (-0.462; -0.060)	-0.274 (-0.473; -0.075)
model B	-0.315 (-0.516; -0.115)	-0.358 (-0.558; -0.157)	-0.331 (-0.531; -0.130)	-0.286 (-0.486; -0.085)	-0.325 (-0.522; -0.127)
Braten	during	post	post 2h	post 4h	post 24h
model A	0.004 (-0.127; 0.135)	0.048 (-0.083; 0.179)	0.056 (-0.075; 0.187)	0.052 (-0.079; 0.183)	0.010 (-0.129; 0.149)
model B	-0.079 (-0.194; 0.036)	-0.036 (-0.151; 0.079)	-0.025 (-0.140; 0.090)	-0.032 (-0.146; 0.083)	-0.080 (-0.206; 0.045)
Anzahl [pro 10000 Partikel/cm ³]					
PNC < 100 nm					
Mean (95%-CI)					
Kerzen	during	post	post 2h	post 4h	post 24h
model A	0.013 (-0.025; 0.051)	0.010 (-0.028; 0.047)	0.017 (-0.020; 0.055)	0.018 (-0.019; 0.056)	0.016 (-0.022; 0.055)
model B	0.004 (-0.036; 0.044)	0.000 (-0.041; 0.040)	0.009 (-0.031; 0.049)	0.009 (-0.032; 0.049)	0.007 (-0.034; 0.048)
Toasten	during	post	post 2h	post 4h	post 24h
model A	-0.108 (-0.191; -0.024)	-0.113 (-0.197; -0.030)	-0.110 (-0.193; -0.026)	-0.101 (-0.184; -0.017)	-0.105 (-0.188; -0.021)
model B	-0.135 (-0.221; -0.050)	-0.143 (-0.229; -0.058)	-0.138 (-0.224; -0.053)	-0.127 (-0.213; -0.042)	-0.136 (-0.222; -0.051)
Braten	during	post	post 2h	post 4h	post 24h
model A	-0.058 (-0.168; 0.052)	-0.029 (-0.139; 0.081)	-0.019 (-0.129; 0.091)	-0.018 (-0.128; 0.092)	-0.042 (-0.153; 0.068)
model B	-0.088 (-0.198; 0.022)	-0.060 (-0.170; 0.050)	-0.048 (-0.158; 0.062)	-0.048 (-0.158; 0.062)	-0.077 (-0.188; 0.034)

diastolischer Blutdruck [mmHg]					
PMC [pro 10 µg/m ³]					
PM ₁₀					
Mean (95%-CI)					
	during	post	post 2h	post 4h	post 24h
Kerzen					
model A	0.477 (-0.142; 1.096)	0.350 (-0.267; 0.967)	0.554 (-0.063; 1.171)	0.633 (0.016; 1.250)	0.434 (-0.185; 1.053)
model B	0.709 (0.017; 1.401)	0.553 (-0.135; 1.241)	0.820 (0.132; 1.508)	0.840 (0.152; 1.528)	0.629 (-0.059; 1.317)
Toasten					
model A	0.053 (-0.014; 0.120)	-0.001 (-0.068; 0.066)	-0.030 (-0.097; 0.037)	0.004 (-0.063; 0.071)	-0.084 (-0.327; 0.159)
model B	0.061 (-0.004; 0.126)	0.005 (-0.060; 0.070)	-0.023 (-0.088; 0.042)	0.011 (-0.054; 0.076)	-0.120 (-0.365; 0.125)
Braten					
model A	0.041 (-0.084; 0.166)	0.086 (-0.039; 0.211)	0.086 (-0.039; 0.211)	0.083 (-0.042; 0.208)	0.057 (-0.078; 0.192)
model B	-0.069 (-0.185; 0.047)	-0.025 (-0.141; 0.091)	-0.021 (-0.137; 0.095)	-0.030 (-0.146; 0.086)	-0.053 (-0.182; 0.076)
PMC [pro 10 µg/m ³]					
PM _{2.5}					
Mean (95%-CI)					
	during	post	post 2h	post 4h	post 24h
Kerzen					
model A	0.515 (-0.124; 1.154)	0.398 (-0.239; 1.035)	0.602 (-0.035; 1.239)	0.678 (0.041; 1.315)	0.483 (-0.158; 1.124)
model B	0.775 (0.065; 1.485)	0.630 (-0.078; 1.338)	0.898 (0.190; 1.606)	0.914 (0.206; 1.622)	0.707 (0.001; 1.413)
Toasten					
model A	0.140 (-0.080; 0.360)	-0.055 (-0.275; 0.165)	-0.129 (-0.349; 0.091)	-0.019 (-0.239; 0.201)	-0.052 (-0.417; 0.313)
model B	0.161 (-0.059; 0.381)	-0.050 (-0.270; 0.170)	-0.117 (-0.337; 0.103)	0.003 (-0.217; 0.223)	-0.135 (-0.505; 0.235)
Braten					
model A	0.035 (-0.130; 0.200)	0.098 (-0.067; 0.263)	0.092 (-0.073; 0.257)	0.088 (-0.077; 0.253)	0.038 (-0.140; 0.216)
model B	-0.102 (-0.255; 0.051)	-0.040 (-0.193; 0.113)	-0.041 (-0.194; 0.112)	-0.053 (-0.206; 0.100)	-0.101 (-0.273; 0.071)

diastolischer Blutdruck [mmHg]					
PMC [pro 10 µg/m ³]					
PM ₁					
Mean (95%-CI)					
	during	post	post 2h	post 4h	post 24h
Kerzen					
model A	0.471 (-0.221; 1.163)	0.375 (-0.315; 1.065)	0.583 (-0.107; 1.273)	0.658 (-0.032; 1.348)	0.459 (-0.235; 1.153)
model B	0.788 (0.035; 1.541)	0.662 (-0.089; 1.413)	0.936 (0.185; 1.687)	0.949 (0.198; 1.700)	0.740 (-0.011; 1.491)
Toasten					
model A	-0.478 (-1.044; 0.088)	-0.681 (-1.247; -0.115)	-0.670 (-1.236; -0.104)	-0.559 (-1.125; 0.007)	-0.497 (-1.061; 0.067)
model B	-0.594 (-1.157; -0.031)	-0.859 (-1.422; -0.296)	-0.826 (-1.389; -0.263)	-0.660 (-1.223; -0.097)	-0.719 (-1.272; -0.166)
Braten					
model A	0.071 (-0.113; 0.255)	0.141 (-0.043; 0.325)	0.130 (-0.054; 0.314)	0.133 (-0.053; 0.319)	0.063 (-0.143; 0.269)
model B	-0.091 (-0.262; 0.080)	-0.023 (-0.194; 0.148)	-0.028 (-0.199; 0.143)	-0.034 (-0.206; 0.138)	-0.105 (-0.303; 0.093)

model A = noch zusätzlich zum full model adjustiert für PM10 und NO2 gemessen am Studienort (LANUV- Referenzstation Mülheim- Styrum); model B = noch zusätzlich zum full model adjustiert für PM10 und NO2 gemessen am Wohnort der Probanden (LANUV- Messstationen)