



Abschlussbericht zum Forschungsprojekt

Schadstoffbelastung von Pkw-Innenräumen beim Rauchen unterschiedlicher Rauchsysteme

März 2018

Sachgebiet Chemikaliensicherheit und Toxikologie

Projekttitle

Schadstoffbelastung von Pkw-Innenräumen beim Rauchen unterschiedlicher Rauchsysteme (Förderkennzeichen: ZMVI1-2717DSM229)

Leitung:
Hermann Fromme

Laufzeit:
18.10.2017 bis 31.03.2018

Herausgeber: Bayerisches Landesamt für
Gesundheit und Lebensmittelsicherheit (LGL)
Eggenreuther Weg 43, 91058 Erlangen

Telefon: 09131 6808-0
Telefax: 09131 6808-2102
E-Mail: poststelle@lgl.bayern.de
Internet: www.lgl.bayern.de
Bildnachweis: Bayerisches Landesamt für
Gesundheit und Lebensmittelsicherheit (LGL)

Projektmitarbeitende: Wolfgang Schober¹, Ludwig Fembacher¹, Adela Frenzen¹,
Hermann Fromme¹

¹ Bayerisches Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit, Sachgebiet Chemikalien-
sicherheit und Toxikologie. Pfarrstraße 3, D-80538 München

© Bayerisches Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit
alle Rechte vorbehalten

Im Auftrag des Bundesministeriums für Gesundheit

INHALTSVERZEICHNIS

1	ZUSAMMENFASSUNG	4
2	EINLEITUNG	6
2.1	Ziel des Projekts	6
2.2	Konzeption der Studie	6
2.3	Durchführung der Messfahrten	8
2.4	Konsumierte Rauchmittel	10
2.4.1	IQOS-Rauchsystem	10
2.4.2	Elektrische Zigarette (E-Zigarette)	11
2.4.3	Tabakzigarette	12
3	MATERIAL UND METHODEN	13
3.1	Erfassung der Klimaparameter	13
3.2	Messung der Partikelbelastung	13
3.3	Analyse der flüchtigen organischen Verbindungen (VOC)	14
3.4	Bestimmung der Aldehyde und Ketone (Carbonyle)	15
4	ERGEBNISSE	16
4.1	Innenraumklima der Pkw	16
4.2	Partikelbelastung der Raumluft	17
4.3	Raumluftgehalte von flüchtigen organischen Verbindungen (VOC)	26
4.4	Innenraumkonzentration von Aldehyden und Ketonen	29
5	DISKUSSION	32
6	FAZIT	36
7	REFERENZEN	37

1 Zusammenfassung

Jedes Jahr sterben weltweit etwa 6 Millionen Menschen an den Folgen des Tabakkonsums, und Rauchen ist immer noch der größte Risikofaktor für die Entstehung und Manifestation von Herz-Kreislauf- und Lungenkrankheiten. Tabakrauch ist ein komplexes Gemisch aus zahlreichen gesundheitlich bedenklichen Substanzen, die beim Verbrennen des Tabaks entstehen, und der mit Abstand gefährlichste, leicht vermeidbare Innenraumschadstoff. Besondere Bedeutung kommt dem Rauchen im Fahrzeuginnenraum zu, da hier in einem sehr kleinen Raum (ca. zwei bis fünf Kubikmeter) mit hohen Gehalten an tabaktypischen Substanzen gerechnet werden muss. Auch mitfahrende Nichtraucher und insbesondere Kinder könnten hier gesundheitlich bedenklichen Konzentrationen exponiert sein. Im Rahmen des vorliegenden Projekts wurde daher unter realen Expositionsbedingungen (im Fahrbetrieb) die Schadstoffbelastung (Feinstäube, flüchtige organische Verbindungen) von verschiedenen Pkw-Innenräumen während des Rauchens von IQOS, E-Zigarette und Tabakzigarette umfassend untersucht.

Für die Studie wurden 7 Autofahrer (einer männlich, 6 weiblich) mit ihrem Privat-Pkw und 7 Beifahrer (einer männlich, 6 weiblich) über einen LGL-internen Aufruf zur Studienteilnahme rekrutiert. Alle Freiwilligen waren aktive Raucher oder E-Zigarettenkonsumenten und stufen sich zum Zeitpunkt der Studie als gesund ein. Die Messfahrten fanden immer zur selben Tageszeit an 7 aufeinanderfolgenden Werktagen im November 2017 in München statt. An jedem Messtag wurde ein Fahrzeug beprobt, das unter verschiedenen Expositionsbedingungen (Rauchmittel, Raumbelüftung) einen 8,5 km langen Innenstadtkurs befahren musste. Von den beiden Personen im Auto rauchte ausschließlich der Beifahrer. Insgesamt wurden in 7 Pkw-Innenräumen während 49 Messfahrten Daten zum Raumklima und zur Belastung der Raumluft durch feine und ultrafeine Partikel (Anzahl- und Massenkonzentration) sowie flüchtige organische Verbindungen gemessen. Die Messinstrumente befanden sich dabei auf dem Rücksitz hinter dem Beifahrer und waren so positioniert, dass sie in der Atemzone eines potenziell mitfahrenden Kindes lagen.

Durch den Gebrauch der E-Zigarette stieg die Konzentration von Propylenglykol in 5 Pkw-Innenräumen auf 50-762 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, wobei der Richtwert I für Propylenglykol (RW I: 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) in 3 Fahrzeugen und der Richtwert II (RW II: 600 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) in einem Fahrzeug deutlich überschritten wurde. In 4 Innenräumen führte das Dampfen der E-Zigarette zu einem Anstieg der Nikotinkonzentration auf 4-10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Ähnliche Nikotinbelastungen wurden auch beim Gebrauch des IQOS-Rauchsystems beobachtet (4-12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Das Rauchen von IQOS hatte nahezu keinen Einfluss auf die mittlere Anzahlkonzentration mikroskaliger Partikel und auf die $\text{PM}_{2,5}$ -Konzentration im Innenraum. Dagegen nahm die Anzahlkonzentration nanoskaliger

Partikel in allen Fahrzeugen zu $(1,6-12,3 \times 10^4/\text{cm}^3)$ und lag im Mittel 9-232 % über der Hintergrundbelastung ohne Rauchaktivität. Wurde im Innenraum eine E-Zigarette gedampft, war dagegen ein starker Anstieg der $\text{PM}_{2,5}$ -Konzentration auf $75-490 \mu\text{g}/\text{m}^3$ zu beobachten (Kontrolle: $6-11 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Im Vergleich zu IQOS setzte der Konsum der E-Zigarette mehr größere Partikel ($> 300 \text{ nm}$) in der Raumluft frei, während die mittleren Anzahlkonzentrationen nanoskaliger Partikel tendenziell bei IQOS höher lagen. Die höchsten Partikelbelastungen wurden in den Pkw während des Rauchens der Tabakzigaretten gemessen. Dabei stieg die mittlere $\text{PM}_{2,5}$ -Konzentration im Innenraum auf $64-1.988 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Kontrolle: $4-11 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Die Verbrennung von Zigaretten tabak führte auch zu einer Belastung der Raumluft mit tabaktypischen Substanzen wie Nikotin ($8-140 \mu\text{g}/\text{m}^3$) und 3-Ethenylpyridin ($8-14 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Darüber hinaus wurden auch erhöhte Gehalte an Benzol ($6-15 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Toluol ($15-46 \mu\text{g}/\text{m}^3$) und Furfural ($4-29 \mu\text{g}/\text{m}^3$) festgestellt. Vergleichbare Schadstoffbelastungen wurden auch in der Raumluft von Rauchergaststätten gemessen. Als kritisch ist die Freisetzung von Aldehyden mit kanzerogenem Potenzial zu bewerten. In den Fahrzeugen stieg die Formaldehydbelastung durch Rauchaktivität auf $18,5-56,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (MW Kontrolle: $6,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$) und die Belastung mit Acetaldehyd auf $26,5-141,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (MW Kontrolle: $5,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Die Innenraumkonzentrationen von Formaldehyd und Acetaldehyd blieben jedoch bis auf eine Ausnahme in allen Pkw unterhalb des jeweils für die beiden Schadstoffe festgelegten RW I von $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Das Rauchen von IQOS, E-Zigarette und Tabakzigarette beeinträchtigt die Luftqualität in Pkw-Innenräumen durch Freisetzung von feinen und ultrafeinen Partikeln sowie organischen Verbindungen. Die Schadstoffbelastung und das damit einhergehende Gesundheitsrisiko für Mitfahrende lagen beim Rauchen von Tabakzigaretten mit Abstand am höchsten. Es wurden ähnlich hohe Schadstoffgehalte wie in der Raumluft von Rauchergaststätten gemessen. Bei der Verwendung von IQOS und der E-Zigarette ergab sich ein differenziertes Bild. Die beiden Rauchmittel unterschieden sich bei der Freisetzung von flüchtigen organischen Verbindungen und beim suchterzeugenden Nikotin nur gering voneinander. Im Gegensatz zu IQOS setzte die E-Zigarette aber hohe Mengen feiner Flüssigkeitspartikel ($\text{PM}_{2,5}$) frei, die aus übersättigtem Propylenglykoldampf geformt werden. Die Partikel können tief in die Lunge eindringen und die Lungenfunktion beeinträchtigen. Bei Verwendung von IQOS waren dagegen deutlich höhere Gehalte an ultrafeinen, alveolengängigen Partikeln (Durchmesser: $25-300 \text{ nm}$) in der Raumluft nachweisbar. Die gesundheitliche Bedeutung für den Passivraucher ist derzeit unklar. Insgesamt stellen alle 3 Rauchtchniken vermeidbare Quellen für Innenraumschadstoffe dar (insbesondere für Nikotin und $\text{PM}_{2,5}$) und sollten aus Gründen des vorsorgeorientierten Gesundheitsschutzes, vor allem von empfindlichen Personen wie Kindern und Schwangeren, nicht im Auto praktiziert werden.

2 Einleitung

2.1 Ziel des Projekts

Tabakrauch ist der mit Abstand gefährlichste, leicht vermeidbare Innenraumschadstoff. Es handelt sich bei ihm um ein komplexes Gemisch aus zahlreichen gesundheitlich bedenklichen Substanzen, die beim Verbrennen des Tabaks entstehen. Neben der Belastung des Rauchers selbst durch den Hauptstromrauch können auch Dritte durch den Passivrauch belastet sein. Es besteht seit Langem wissenschaftlicher Konsens, dass Rauchen und Passivrauchen mit einer Vielzahl an negativen gesundheitlichen Wirkungen auf die Atemwege und das Herz-Kreislaufsystem bis hin zum Lungenkrebs verbunden sind. Besondere Bedeutung kommt dem Rauchen im Fahrzeuginnenraum zu, da hier in einem sehr kleinen Raum (ca. zwei bis fünf Kubikmeter) mit hohen Gehalten an tabaktypischen Substanzen gerechnet werden muss. Auch mitfahrende Nichtraucher und insbesondere Kinder könnten hier gesundheitlich bedenklichen Konzentrationen exponiert sein. Ziel des Projekts war es deshalb, die Schadstoffbelastung (Feinstäube, flüchtige organische Verbindungen) von Pkw-Innenräumen beim Rauchen von IQOS-Rauchsystemen, E-Zigaretten und Tabakzigaretten umfassend zu untersuchen und auf der Basis der vorliegenden wissenschaftlichen Literatur zu bewerten. Der vorliegende Abschlussbericht fasst die Ergebnisse und Analysen in diesem Projekt vom 18. Oktober 2017 bis 31. März 2018 zusammen.

2.2 Konzeption der Studie

Für die Studie wurden 7 Autofahrer (einer männlich, 6 weiblich) mit ihrem Privat-Pkw und 7 Beifahrer (einer männlich, 6 weiblich), die während der Fahrten rauchen sollten, über einen LGL-internen Aufruf zur Studienteilnahme rekrutiert. Alle Freiwilligen waren aktive Raucher oder E-Zigarettenkonsumenten und stufen sich zum Zeitpunkt der Studie als gesund ein. Die Messungen zur Qualität der Innenraumluft während der Fahrten mit und ohne Rauchaktivität wurden in folgenden Fahrzeugen mit unterschiedlichen Raumvolumina durchgeführt:

- großes Innenraumvolumen (4-5 m³)
 - Skoda Octavia (Baujahr 2015)
 - Volvo S (1997)
- mittleres Innenraumvolumen (3-4 m³)
 - VW Golf (I) (2001)
 - VW Golf (II) 2006)
 - VW Golf (III) (2005)

- Kleines Innenraumvolumen (2-3 m³)
 - Smart ForFour (2016)
 - Fiat Punto (2009)

Alle Messinstrumente wurden in einer Tasche verstaut, die sich während der Fahrten auf dem Rücksitz hinter dem Beifahrer befand und mit Gurten gegen Verrutschen gesichert war. Die Messfühler der einzelnen Geräte wurden aus der Tasche herausgeführt und so positioniert, dass sie in der Atemzone eines potenziell mitfahrenden Kindes lagen (Abbildung 1).



Abbildung 1: Anordnung der Messinstrumente auf dem Rücksitz hinter dem Beifahrer. Die Messfühler wurden so positioniert, dass sie in der Atemzone eines potenziell mitfahrenden Kindes lagen.

Folgende Untersuchungsparameter wurden in der Studie im Einzelnen berücksichtigt:

- Raumklima
 - Temperatur (°C)
 - relative Luftfeuchtigkeit (%)
 - Luftdruck (hPa)
 - Kohlenmonoxid (CO), Kohlendioxid (CO₂)

- Partikelbelastung
 - Partikelanzahlkonzentration (PNC) im Größenbereich von 25 nm bis 300 nm
 - Partikelanzahlkonzentration (PNC) und -masse ($PM_{2,5}$) für 15 verschiedene Partikelgrößen im Größenbereich von 300 nm bis $> 20 \mu m$
- Emission von organischen Verbindungen
 - Flüchtige organische Verbindungen (z.B. Nikotin, 3-Ethenylpyridin, Propylenglykol)
 - Carbonyle (z.B. Acrolein, Acetaldehyd, Formaldehyd, 2-Butanon)

Im Rahmen von Testfahrten wurde sichergestellt, dass die Messinstrumente im Fahrbetrieb zuverlässig arbeiten und ausreichend gegen Verrutschen gesichert sind. Darüber hinaus wurde geprüft, wie weit das Fenster auf der Beifahrerseite während der Fahrten zu öffnen ist, um einerseits belastbare Innenraummessungen durchführen zu können und gleichzeitig realistische Expositionsbedingungen beim Rauchen im Auto zu simulieren. Da davon auszugehen war, dass der Konsum von Tabakzigaretten die höchste Schadstoffbelastung im Innenraum verursacht, wurde während verschiedener Testfahrten auf der Beifahrerseite jeweils eine Tabakzigarette unter verschiedenen Lüftungsbedingungen konsumiert. Auf Basis der Vorversuche erwiesen sich für die Messfahrten folgende Ausgleichsbedingungen als geeignet: (I) Frontlüftung auf Stufe 1 (keine Umluft) und (II) Fenster auf der Beifahrerseite 5 cm oder 2 cm nach unten gefahren und jeweils alle anderen Fenster geschlossen.

2.3 Durchführung der Messfahrten

Die Messfahrten fanden immer zur selben Tageszeit (9.00 bis 13.00 Uhr) an 7 aufeinanderfolgenden Werktagen im November 2017 in München statt. An jedem Messtag wurde ein Fahrzeug beprobt, das jeweils unter den unten genannten Expositionsbedingungen einen 8,5 km langen Innenstadtkurs befahren musste (Abbildung 2). Von den beiden Personen im Auto konsumierte ausschließlich der Beifahrer die verschiedenen Rauchmittel. Insgesamt wurden pro Fahrzeug 7 Messfahrten (MF) in folgender Reihenfolge durchgeführt:

MF1: ohne Rauchaktivität, Fenster Beifahrerseite (FBS): 5 cm geöffnet

MF2: Rauchen von 2 Tabak-Heets mit IQOS, FBS: 5 cm geöffnet

MF3: Rauchen von 2 Tabak-Heets mit IQOS, FBS: 2 cm geöffnet

MF4: Dampfen einer E-Zigarette, FBS: 5 cm geöffnet

MF5: Dampfen einer E-Zigarette, FBS: 2 cm geöffnet

MF6: Rauchen von 2 Tabakzigaretten, FBS: 5 cm geöffnet

MF7: Rauchen von 2 Tabakzigaretten, FBS: 2 cm geöffnet

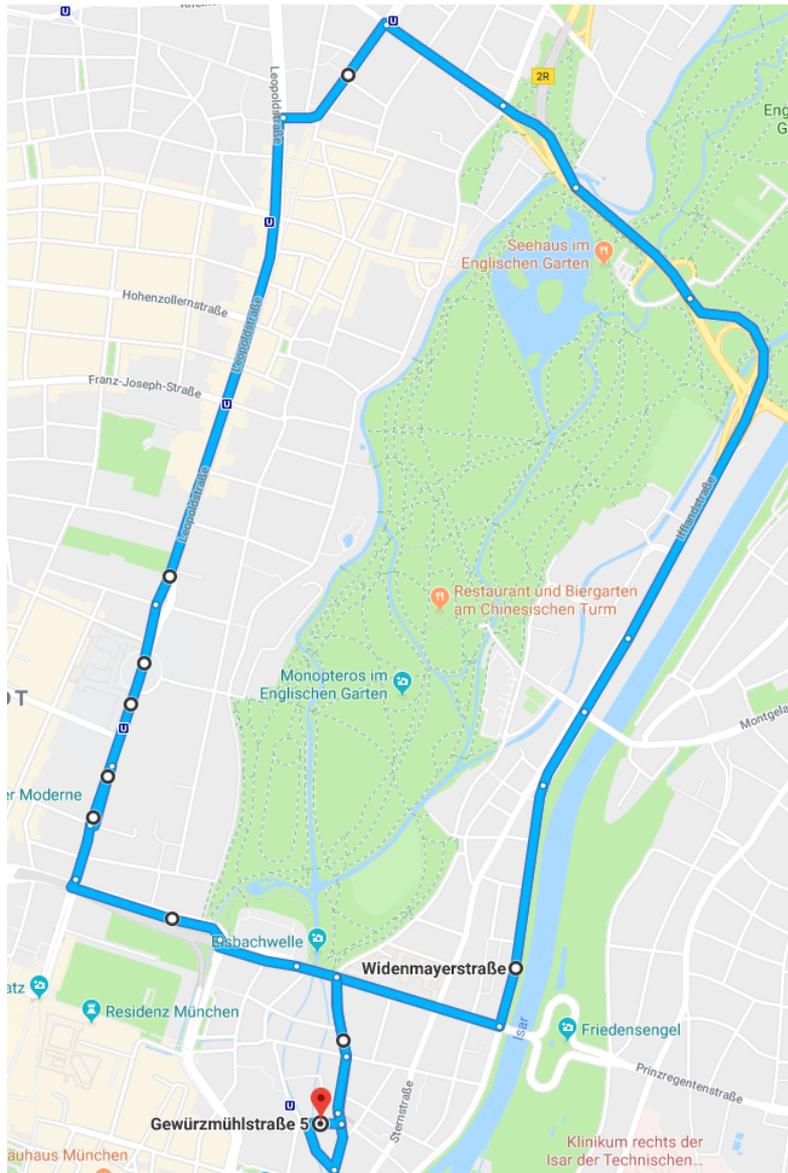


Abbildung 2:

Alle 49 Messfahrten der Studie wurden zur gleichen Tageszeit auf einem 8,5 km langen Rundkurs in der Münchner Innenstadt durchgeführt.

Um die äußeren Expositionsbedingungen weitgehend vergleichbar zu halten, wurden alle 49 Messfahrten zur gleichen Tageszeit auf einem definierten Rundkurs durchgeführt. Die Fahrzeuge bewältigten die Strecke reproduzierbar in 20-23 Minuten. Durch diese Vorgehensweise war es auch möglich, die Laufzeiten der Messgeräte, die Zeiten zum Konsum der verschiedenen Rauchmittel und die Fahrzeiten zu standardisieren und damit optimal aufeinander abzustimmen. Vor der ersten Messfahrt und zwischen den einzelnen Messfahrten wurden alle Türen der Fahrzeuge geöffnet und der Innenraum für 10 Minuten stoßgelüftet (Abbildung 3). In dieser Zeit wurden auch die Desorptionsröhrchen zur Bestimmung der flüchtigen organischen Verbindungen gewechselt und die Messinstrumente für die nächste Fahrt vorbereitet. An allen Versuchstagen hat es weder geregnet noch geschneit, sodass davon auszugehen ist, dass der verkehrsbedingte Eintrag von Schadstoffen in den Innenraum des jeweils beprobten Pkw während der 7 Messfahrten weitgehend vergleichbar war.



Abbildung 3: Die Fahrzeuge wurden zwischen den einzelnen Messfahrten für 10 Minuten stoßgelüftet (links) und die Messgeräte während der Standzeiten für den nächsten Einsatz vorbereitet (rechts: Wechseln der Desorptionsröhrchen zur Bestimmung der flüchtigen organischen Verbindungen).

2.4 Konsumierte Rauchmittel

2.4.1 IQOS-Rauchsystem

Bei IQOS handelt es sich um ein neuartiges Rauchsystem von Philip Morris, bei dem Tabaksticks (Heets), die aus komprimierten Tabak bestehen, in einem speziellen Gerät (Holder) elektronisch auf etwa 300 °C erhitzt werden (Heat-not-burn Tabakprodukt) (Abbildung 4). Dabei entsteht ein Aerosol, das nach Angaben des Herstellers vorwiegend aus Wasser, Glycerin und Nikotin, aber auch weiteren Substanzen besteht. Dieses Aerosol wird vom Konsumenten in gleicher Weise wie Tabakrauch inhaliert. Die Dauer der Nutzung entspricht etwa dem Rauchen einer herkömmlichen Tabakzigarette, also ca. 14 Züge oder rund 6 Minuten.



Abbildung 4: Einzelne Tabaksticks (Heets) werden in einem elektrischen Gerät (Holder) auf 300 °C erhitzt. Ist der Akku des Holders nach etwa 6 Minuten (ca. 14 Züge) aufgebraucht, muss er im Ladegerät (Charger) wieder aufgeladen werden (ca. 6 Minuten), bevor ein neuer Tabakstick in den Holder eingesetzt und geraucht werden kann.

Die Tabaksticks werden in vier Geschmackssorten in den Varianten Bronze, Red, Amber und Yellow angeboten. Während der Messfahrten wurden jeweils Heets der Sorte Bronze konsumiert. Die Label-Variante hat einen Nikotingehalt von 0,5 mg Nikotin/Heet und wurde zum Zeitpunkt der Studie am stärksten nachgefragt. Am Versuchstag wurden die Raucher mit der Handhabung von IQOS vertraut gemacht und das Wechseln der Tabaksticks und das Aufladen des Holders geübt. Die Rauchzeiten von 2 Heets und der einmalige Ladevorgang des Holders entsprachen genau der Fahrzeit für die Bewältigung des Rundkurses.

2.4.2 Elektrische Zigarette (E-Zigarette)

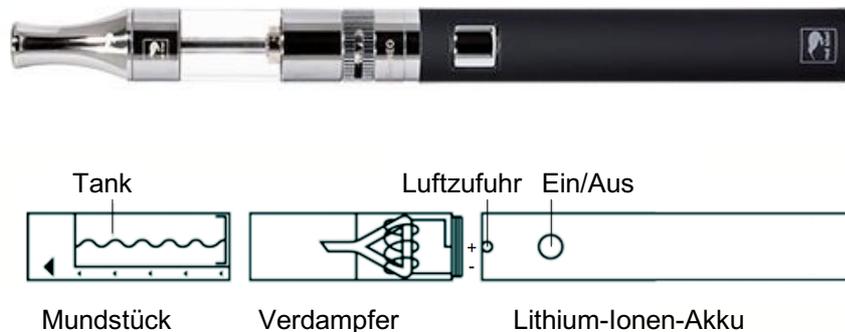


Abbildung 5: Aufbau einer E-Zigarette, bestehend aus Akku, Verdampfer und einem Tank, der mit aromatisierten Flüssigkeiten (Liquids) befüllt wird. Zieht man an der E-Zigarette, so wird die Flüssigkeit unter Wärmeeinwirkung zu einem inhalierbaren Dampf vernebelt. Für die Messfahrten wurde das Tankmodell SubTwin Neo von Red Kiwi (Seevetal, Deutschland) eingesetzt (obere Abbildung).

Die E-Zigarette ist ein batteriebetriebenes elektronisches System, das aerosolisiertes Nikotin ohne Verbrennungsprozesse zur Einatmung freigibt. Die Geräte bestehen aus einem Akku, einem Verdampfer und einer Kartusche mit der zu verdampfenden Flüssigkeit (Liquid). Die Liquids enthalten eine Trägerflüssigkeit, Aromen und Nikotin. Zieht man an der E-Zigarette, so wird die Flüssigkeit unter Wärmeeinwirkung vernebelt und der Dampf kann über das Mundstück inhaliert werden. Im Gegensatz zum Rauchen findet jedoch keine Verbrennung von Tabak statt. Für die Messfahrten wurde die E-Zigarette SubTwin Neo von Red Kiwi (Seevetal, Deutschland) eingesetzt (Abbildung 5). Es handelt sich um ein Standardtankmodell mit einer Akku-Kapazität von 900 mAh und einem Verdampferwiderstand von 1,2 Ohm. Als Betriebsflüssigkeit wurde ein Liquid mit Tabakaroma und 18 mg/ml Nikotingehalt (Dreamliner, Deutschland) verwendet. Am Versuchstag wurden die Raucher mit der Handhabung der E-Zigarette vertraut gemacht und das Dampfen geübt. Die Raucher wurden angewiesen, während der Messfahrten ein- bis zweimal pro Minute an der E-Zigarette zu ziehen.

2.4.3 Tabakzigarette

Während der letzten beiden Messfahrten wurden jeweils 2 Tabakzigaretten der Marke Marlboro Red von Philip Morris geraucht. Marlboro Red hat einen Nikotingehalt von 0,8 mg Nikotin/Zigarette und ist seit Jahrzehnten die meist verkaufte Zigarettenmarke der Welt.

3 Material und Methoden

3.1 Erfassung der Klimaparameter

Zur Bestimmung der Innenraumkonzentration von Kohlenmonoxid (CO) und Kohlendioxid (CO₂) sowie zur Messung von Temperatur, relativer Luftfeuchte und Luftdruck wurde der Datenlogger Almemo 710 (Ahborn, Holzkirchen, Deutschland) mit entsprechendem Fühlersatz eingesetzt. Der Logger wurde in einer Tasche verstaut, die sich auf dem Rücksitz hinter dem Beifahrer befand und mit Sicherheitsgurten gegen Verrutschen gesichert war. Die Messfühler wurden so außerhalb der Tasche positioniert, dass sie die Klimadaten im Pkw-Innenraum störungsfrei aufzeichneten. Die Datenerfassung (10 Messungen pro Minute) erfolgte kontinuierlich über die 7 Messfahrten.

3.2 Messung der Partikelbelastung

Die Anzahl- und Massenkonzentrationen (PM_{2,5}) der durch Rauchaktivität im Pkw-Innenraum freigesetzten Partikel wurden fortlaufend mit einem optischen Laseraerosolspektrometer (Staubmessgerät 1.108, Grimm Technologies, Ainring, Deutschland) gemessen. Das Messgerät saugt über eine volumenstromgeregelte Pumpe kontinuierlich Luft an und führt diese durch eine Lasermesskammer. Die Streusignale, die die Partikel beim Durchtritt durch den Laser erzeugen, werden von einer Hochgeschwindigkeitsphotodiode detektiert und mit Hilfe eines integrierten Pulshöhenanalysators gezählt. Das Laseraerosolspektrometer misst die Konzentration von 15 verschiedenen Partikelgrößen im Bereich zwischen 300 nm bis > 20 µm. Da die Streuintensität mit der sechsten Potenz der Partikelgröße abnimmt, können optische Lichtstreuungssysteme keine Partikel mit einem Durchmesser < 0,1 µm detektieren. Aus diesem Grund wurde das Laseraerosolspektrometer mit einem speziellen Steckmodul zur Messung von Nanopartikeln (NanoCheck 1.320, Grimm Technologies, Ainring, Deutschland) erweitert. Die Messtechnik des Nanopartikelzählers basiert auf einer Kombination aus einem unipolaren Diffusionslader, einer elektrischen Leitfähigkeitsmessung und einem Aerosol-Faraday-Cup-Elektrometer und erlaubt die kontinuierliche Erfassung von Nanopartikeln unterhalb des optischen Bereichs bis 25 nm. Zusätzlich wird der mittlere Teilchendurchmesser der Nanopartikelgrößenverteilung bestimmt. Beide Partikelmessgeräte wurden als Messeinheit im Fußraum hinter dem Fahrersitz platziert und gegen Verrutschen gesichert. Die Raumluft wurde über einen antistatischen Schlauch angesaugt (1,2 l/min), dessen radial-symmetrischer Ansaugkopf in der gemeinsamen Messzone der übrigen Messgeräte lag (Abbildung 6). Die Partikelbelastung der Raumluft wurde alle 6 Sekunden kontinuierlich während der 7 Messfahrten gemessen.



Abbildung 6: Die Partikelmessgeräte (Aerosolspektrometer 1.108 mit NanoCheck 1.320) befanden sich während der Messfahrten im Fußraum hinter dem Fahrersitz. Die Raumluft wurde über einen radialsymmetrischen Kopf, der sich in der gemeinsamen Messzone der anderen Instrumente befand, angesaugt und über einen antistatischen Schlauch (schwarz) in die Partikelzähler geführt.

3.3 Analyse der flüchtigen organischen Verbindungen (VOC)

Zur Bestimmung der VOC im Innenraum wurden während jeder Messfahrt 1- und 2-Liter-Luftproben mittels Probenahmepumpe (Gilian GilAir Plus, Sensidyne, St. Petersburg, USA) gesammelt. Dazu wurde die Raumluft mit einer Flussrate von 55 bzw. 110 ml/min über Thermodesorptionsröhrchen mit Tenax-TA als Sorbens (20010-U Supelco, Sigma-Aldrich, St. Louis, USA) geleitet. Die Probenahme erfolgte jeweils 1 Minute nach Beginn der Messfahrt über einen Zeitraum von 18 Minuten. Die flüchtigen Verbindungen wurden anschließend mittels Thermodesorption (Shimadzu TD-20) vom Trägermaterial desorbiert und in einem GC/MS-Gerät analysiert (Shimadzu GCMS-QP2010). Für die chromatographische Trennung wurden die Analyten über eine fokussierende Kryo-Trap-Tube, gepackt mit Tenax-TA, auf die GC-Säule (Optima 5 MS Accent, Länge 60 m x Innendurchmesser 0,25 mm x Filmdicke 1 µm; Macherey-Nagel, Düren, Deutschland) überführt und durch einen massenselektiven Detektor quantifiziert (Abbildung 7). Die Desorptionstemperatur betrug 285 °C.

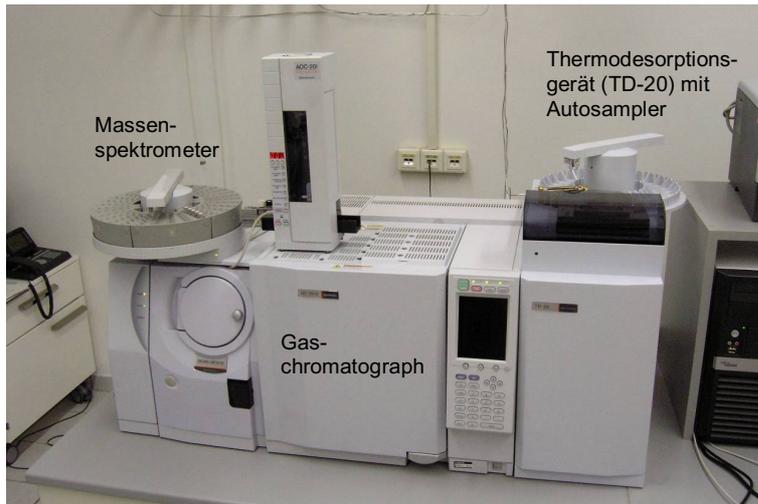


Abbildung 7:

Die VOC wurden mittels Thermodesorption vom Trägermaterial gelöst und anschließend in einem GC/MS-Gerät (Shimadzu GCMS-QP2010) analysiert.

3.4 Bestimmung der Aldehyde und Ketone (Carbonyle)

Die Konzentration der Carbonyle in der Raumluft wurde mittels DNPH-Methode bestimmt (DNPH, 2,4-Dinitrophenylhydrazin). Bei dem Verfahren wird Luft über eine DNPH-Kartusche geleitet und die in der Luftprobe enthaltenen Aldehyde und Ketone chemisch an die DNPH-Absorberphase gebunden (Hydrazonbildung). Dazu wurde die Raumluft während der Messfahrten durch eine Probenahmepumpe (Gilian GilAir Plus, Sensidyne, St. Petersburg, USA) mit einer konstanten Flussrate von 1,115 l/min auf einer LpDNPH-H10-Kartusche (Sigma-Aldrich, St. Louis, USA) gesammelt. Die Probenahme erfolgte jeweils 1 Minute nach Beginn der Messfahrt über einen Zeitraum von 18 Minuten. Die beprobten DNPH-Kartuschen (20 Liter Luftvolumen) wurden bis zur weiteren Aufarbeitung im Kühlschrank gelagert und die Reaktionsprodukte (Carbonylderivate) frühestens 24 Stunden nach Beprobung mit 5 ml Acetonitril (LiChrosolv, Merck, Deutschland) eluiert. Für die Analyse wurde ein Dionex HPLC-Gerät (UltiMate 3000, Thermo Fisher Scientific, Waltham, USA) mit UV-Detektor (Säule 1: 365 nm; Säule 2: 360 nm) verwendet. Die Trennung erfolgte entweder nach Verdünnung mit Wasser (1:2) über eine Reversed-Phase-Säule SUPELCOSIL LC-18 (Säule 1; 250 mm x 4,6 mm, Partikelgröße 5 µm, Sigma-Aldrich, St. Louis, USA) mit einem Gradienten aus Wasser und Acetonitril oder unverdünnt über eine Reversed-Phase-Säule Acclaim Carbonyl C18-LC (Säule 2; 150 mm x 2,1 mm, Partikelgröße 2,2 µm, Thermo Fisher Scientific, Waltham, USA) mit Acetonitril und wässrigem Ammoniumacetatpuffer (2 mmol/l) als mobile Phase. Die Verwendung von zwei verschiedenen Säulen war notwendig, um die Trenneffizienz bei einzelnen Substanzen zu verbessern (z.B. Butyraldehyd und 2-Butanon). Die Bestimmungsgrenzen lagen für Formaldehyd und Acetaldehyd bei 2 µg/m³, für Propionaldehyd und Benzaldehyd bei 1,5 µg/m³ und für Butyraldehyd, Aceton, Acrolein und 2-Butanon bei 1 µg/m³.

4 Ergebnisse

4.1 Innenraumklima der Pkw

Die Klimaparameter, die während der Messfahrten im Innenraum der Fahrzeuge gemessen wurden, sind in Tabelle 1 als Mittelwerte zusammengefasst. Bei allen Messfahrten lag die Konzentration von Kohlenmonoxid (CO) im Bereich der Hintergrundbelastung. Ein leichter Anstieg war nur dann zu beobachten, wenn im Pkw Tabakzigaretten geraucht wurden. Die höchste CO-Belastung wurde im VW Golf (III) mit 8,8 ppm (Kontrolle: 1,5 ppm) gemessen.

Tabelle 1: Mittelwerte der Klimaparameter in der Raumlufte der Fahrzeuge während der 7 Messfahrten (MF) ohne Rauchaktivität (MF1) und mit Konsum des IQOS-Rauchsystems (MF2/3), der E-Zigarette (MF4/5) und der Tabakzigarette (MF6/7). MF1/2/4/6: FBS 5 cm geöffnet; MF3/5/7: FBS 2 cm geöffnet.

Pkw	Temperatur (°C)	rel. Luftfeuchte (%)	Luftdruck (hPa)	CO (ppm)	CO ₂ (ppm)
Skoda Octavia					
MF1	17,4	34,7	962	0,4	766
MF2	17,5	34,4	962	0,6	769
MF3	17,4	34,4	962	0,7	790
MF4	16,6	35,2	962	0,5	703
MF5	18,3	34,2	962	0,9	837
MF6	18,6	33,4	961	2,1	797
MF7	19,1	32,5	961	2,5	779
VW Golf (I)					
MF1	18,2	41,6	957	0,8	749
MF2	17,3	44,7	957	0,4	627
MF3	18,4	43,4	957	0,7	669
MF4	17,1	43,3	957	0,7	601
MF5	18,5	41,1	957	0,9	699
MF6	18,5	39,8	956	1,3	619
MF7	19,1	41,3	956	1,5	734
Fiat Punto					
MF1	18,4	40,9	954	1,7	1.170
MF2	26,3	25,9	955	1,6	720
MF3	22,5	28,9	955	1,4	676
MF4	21,3	30,2	954	1,2	622
MF5	21,8	29,5	954	1,6	645
MF6	22,2	28,7	954	2,6	636
MF7	22,5	28,0	954	2,0	640
VW Golf (II)					
MF1	16,7	38,0	953	0,5	809
MF2	18,4	34,8	954	1,6	814
MF3	18,9	33,3	954	1,3	812
MF4	18,4	32,6	954	1,2	704
MF5	19,3	30,9	953	1,3	719
MF6	19,6	29,9	953	2,7	719
MF7	20,5	28,7	953	3,5	726

Pkw	Temperatur (°C)	rel. Luftfeuchte (%)	Luftdruck (hPa)	CO (ppm)	CO ₂ (ppm)
Smart ForFour					
MF1	17,1	35,9	956	0,6	720
MF2	18,7	32,3	956	0,8	663
MF3	19,0	31,3	955	1,0	624
MF4	19,9	30,0	955	0,9	618
MF5	20,6	29,5	955	2,0	662
MF6	21,2	28,0	955	2,3	642
MF7	22,1	26,5	955	4,1	656
VW Golf (III)					
MF1	18,0	40,2	946	1,5	1.242
MF2	19,5	37,3	946	2,4	1.438
MF3	19,5	37,2	946	3,6	1.411
MF4	18,8	36,9	946	2,9	1.106
MF5	19,5	37,6	946	3,7	1.574
MF6	19,0	38,4	945	8,8	1.314
MF7	19,3	39,1	945	8,0	1.534
Volvo S					
MF1	15,8	41,7	945	0,3	803
MF2	17,4	36,9	945	2,5	730
MF3	19,0	32,0	945	0,7	678
MF4	16,9	34,3	945	2,8	627
MF5	18,7	30,9	945	1,1	698
MF6	18,1	32,2	945	2,4	640
MF7	18,6	33,4	945	3,1	675

4.2 Partikelbelastung der Raumluft

Die Abbildungen 8 bis 14 spiegeln den Verlauf der Partikelbelastung (Anzahl- und Massenkonzentrationen) in der Raumluft jedes Pkw während der Messfahrten ohne Rauchaktivität und mit Konsum von IQOS, E-Zigarette und Tabakzigarette zeitgenau wider. Die Standzeiten mit Stoßlüftung der Fahrzeuge zwischen den Messfahrten wurden in der Darstellung ausgeklammert. Die verschiedenen Lüftungsbedingungen (FBS 5 cm vs. 2 cm geöffnet) hatten keinen wesentlichen Einfluss auf die Höhe der Partikelbelastung in den Fahrzeugen (Abbildungen 8-14). Aus diesem Grund wurden in Tabelle 2 nur Partikelbelastungen betrachtet, bei denen die Pkw während des Gebrauchs der Rauchmittel schlechter belüftet waren (Worst-Case). Demnach hatte das Rauchen von IQOS nahezu keinen Einfluss auf die mittlere Anzahlkonzentration mikroskaliger Partikel und auf die PM_{2,5}-Konzentration im Innenraum. Dagegen nahm die Anzahlkonzentration nanoskaliger Partikel in allen Pkw zu (1,6-12,3 x 10⁴/cm³) und lag im Mittel 9-232 % über der Hintergrundbelastung ohne Rauchaktivität (Tabelle 2).

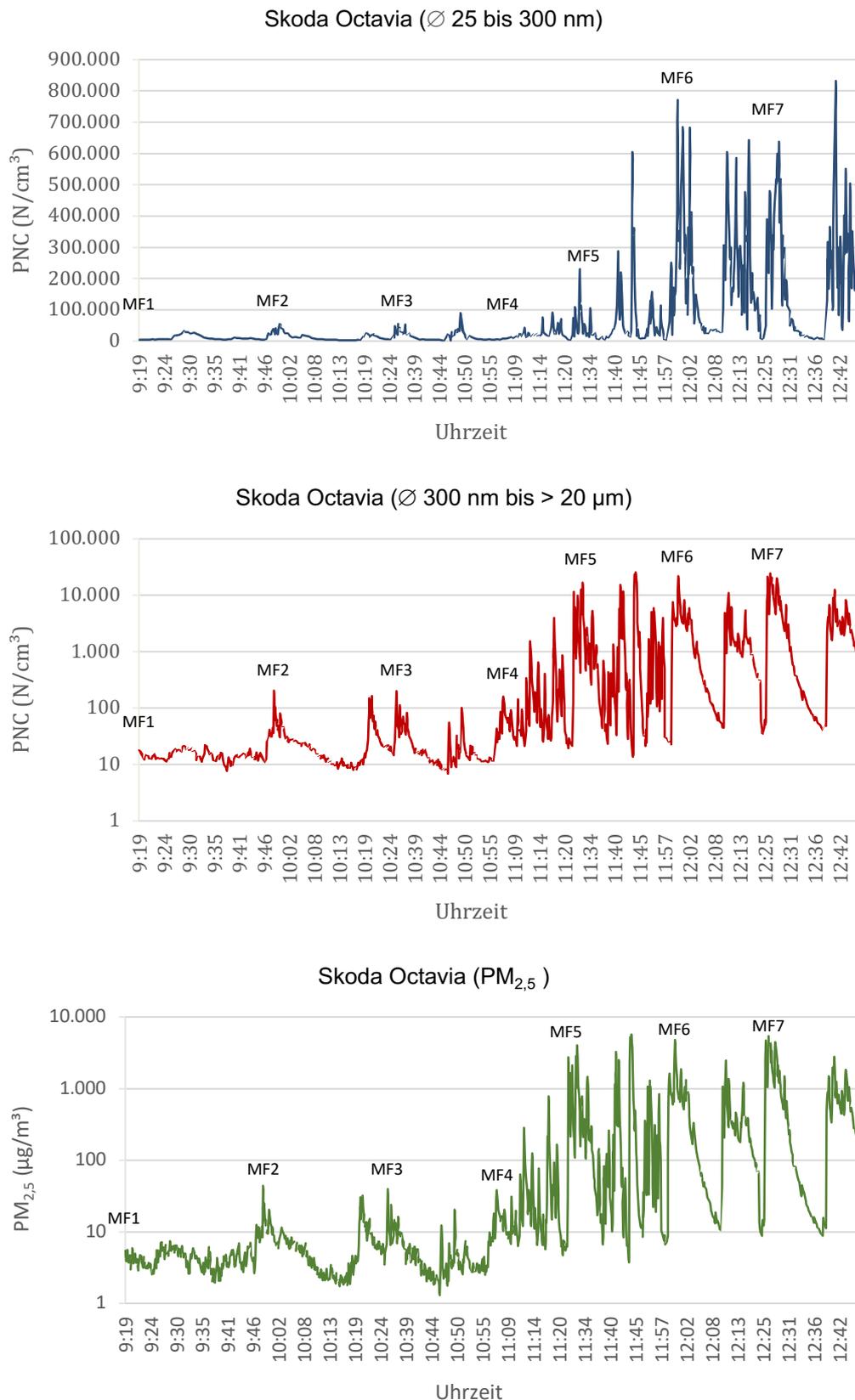


Abbildung 8: Partikelanzahl- (PNC) und Massenkonzentrationen (PM_{2,5}) im 1. Pkw-Innenraum während der 7 Messfahrten ohne Rauchaktivität (MF1) und mit Konsum von IQOS (MF2/3), E-Zigarette (MF4/5) und Tabakzigarette (MF6/7) in linearer und semilogarithmischer (Mitte/unten) Darstellung.

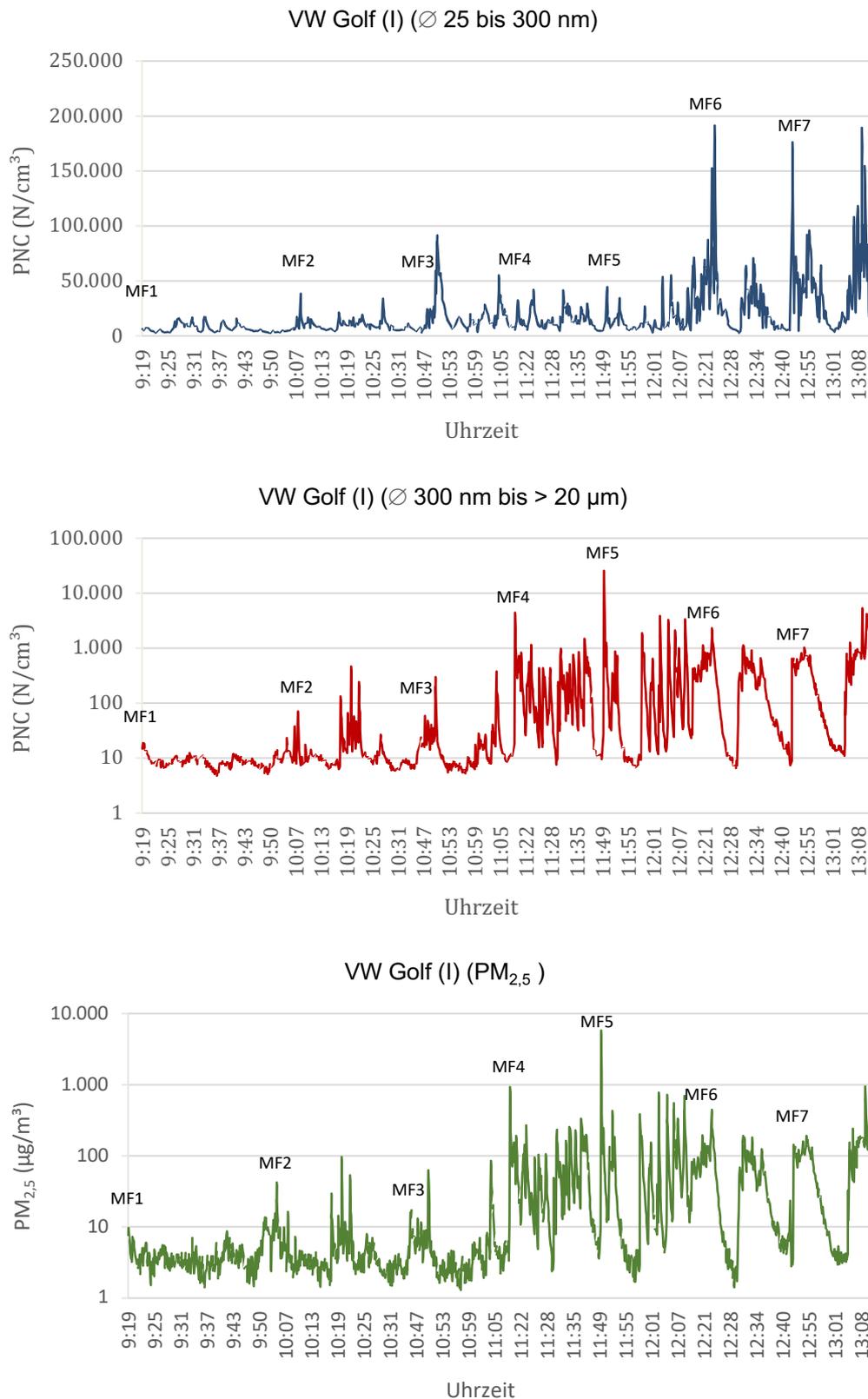


Abbildung 9: Partikelanzahl- (PNC) und Massenkonzentrationen ($\text{PM}_{2,5}$) im 2. Pkw-Innenraum während der 7 Messfahrten ohne Rauchaktivität (MF1) und mit Konsum von IQOS (MF2/3), E-Zigarette (MF4/5) und Tabakzigarette (MF6/7) in linearer und semilogarithmischer (Mitte/unten) Darstellung.

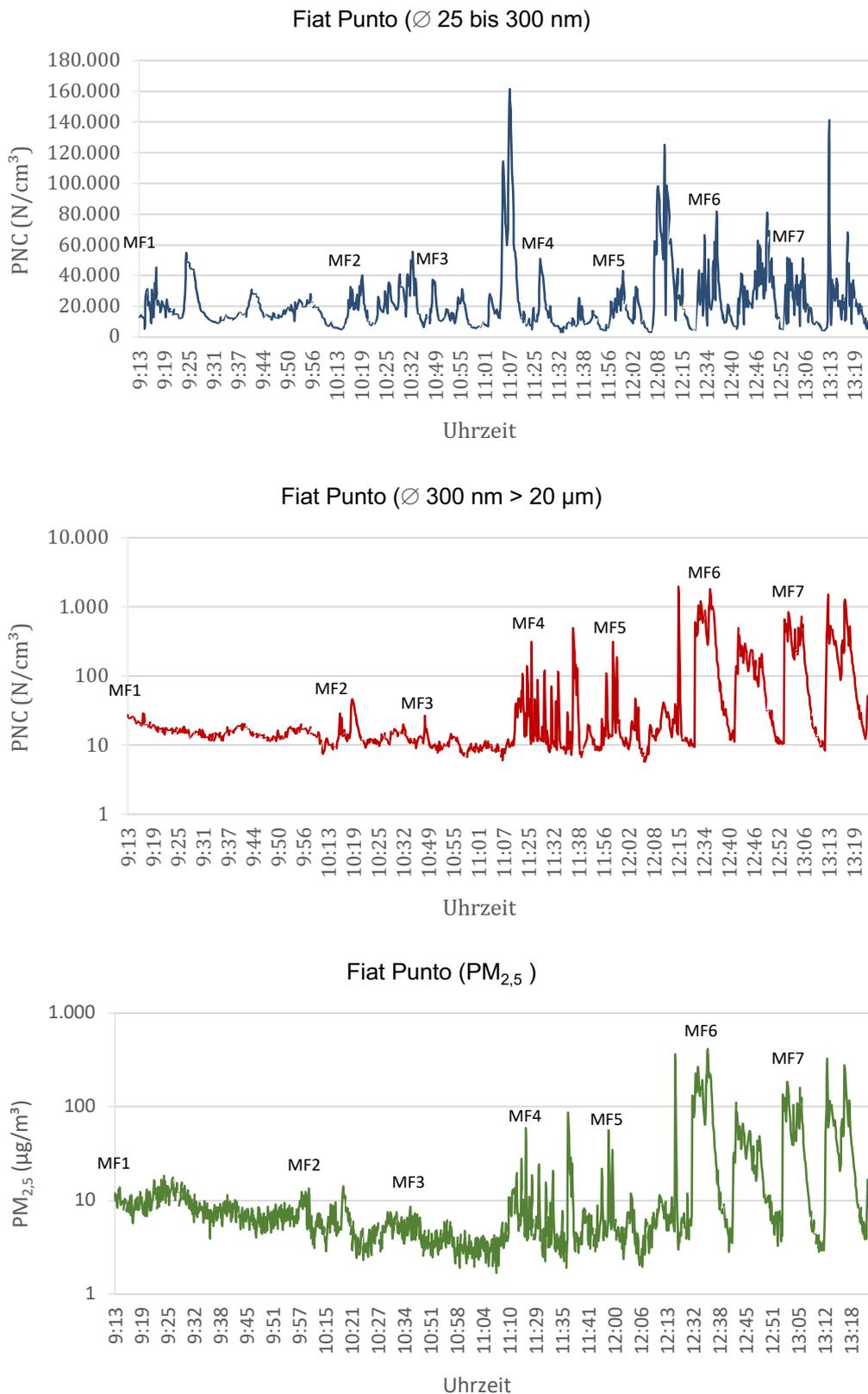


Abbildung 10: Partikelanzahl- (PNC) und Massenkonzentrationen (PM_{2,5}) im 3. Pkw-Innenraum während der 7 Messfahrten ohne Rauchaktivität (MF1) und mit Konsum von IQOS (MF2/3), E-Zigarette (MF4/5) und Tabakzigarette (MF6/7) in linearer und semilogarithmischer (Mitte/unten) Darstellung.

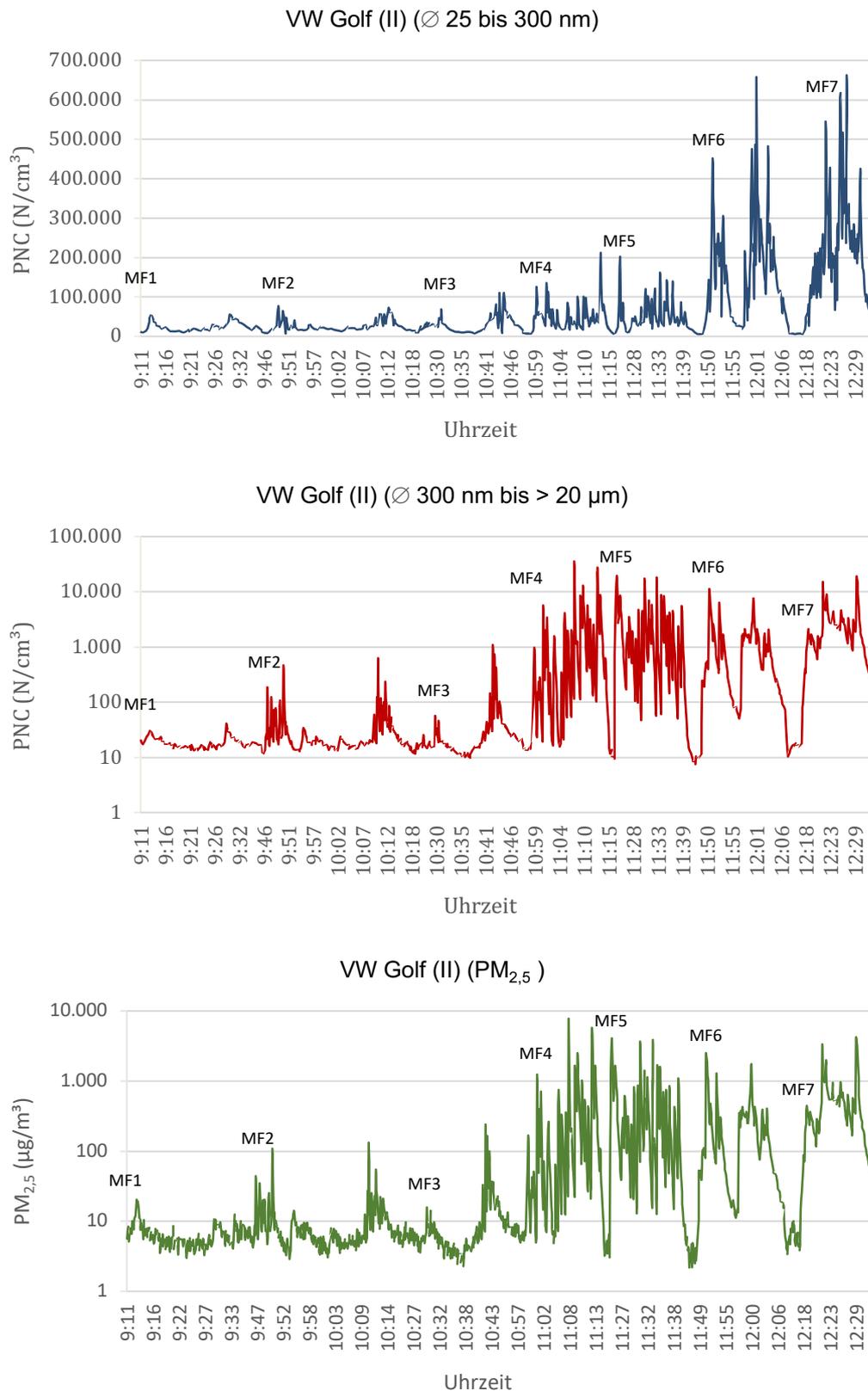


Abbildung 11: Partikelanzahl- (PNC) und Massenkonzentrationen (PM_{2,5}) im 4. Pkw-Innenraum während der 7 Messfahrten ohne Rauchaktivität (MF1) und mit Konsum von IQOS (MF2/3), E-Zigarette (MF4/5) und Tabakzigarette (MF6/7) in linearer und semilogarithmischer (Mitte/unten) Darstellung.

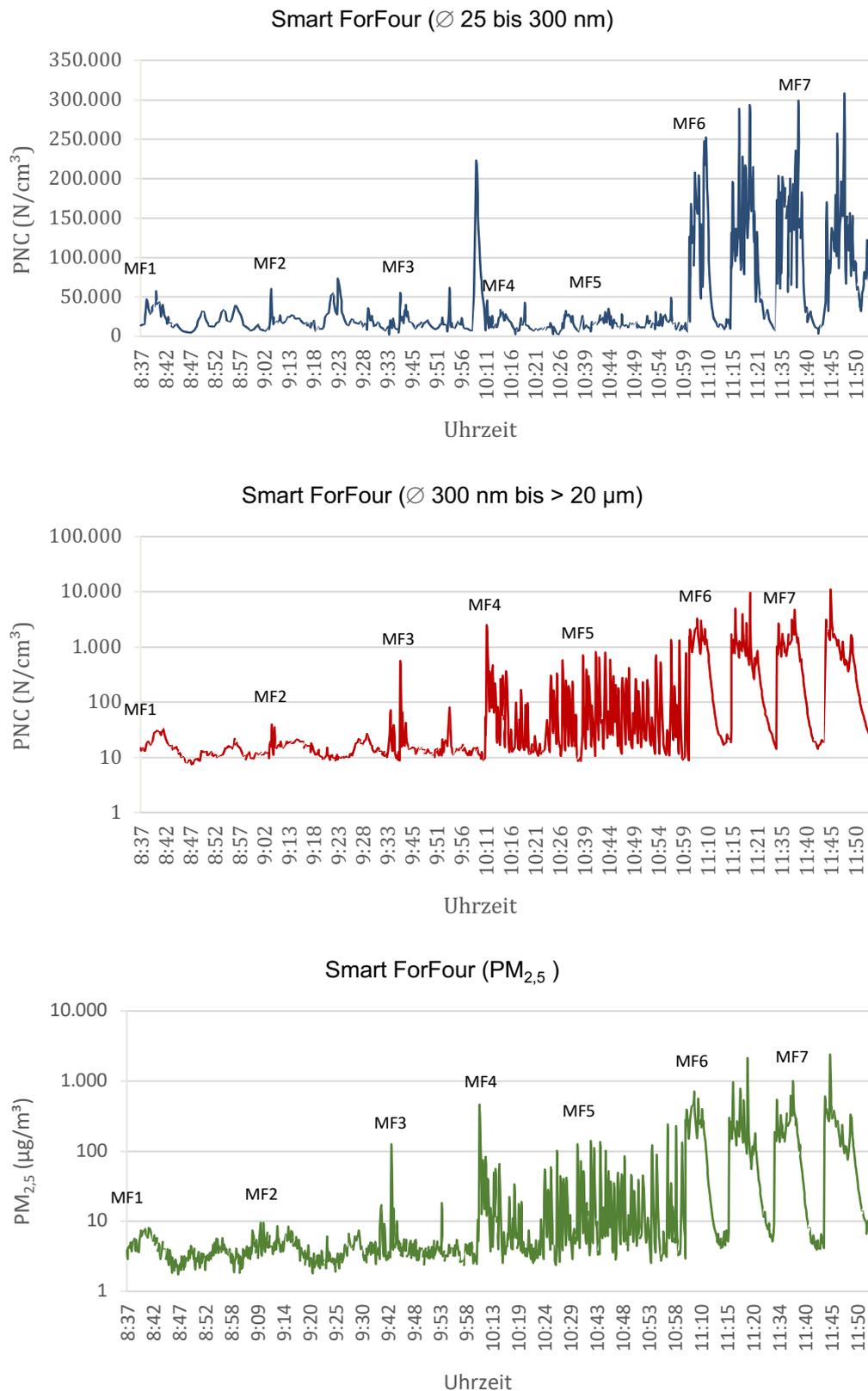


Abbildung 12: Partikelanzahl- (PNC) und Massenkonzentrationen (PM_{2,5}) im 5. Pkw-Innenraum während der 7 Messfahrten ohne Rauchaktivität (MF1) und mit Konsum von IQOS (MF2/3), E-Zigarette (MF4/5) und Tabakzigarette (MF6/7) in linearer und semilogarithmischer (Mitte/unten) Darstellung.

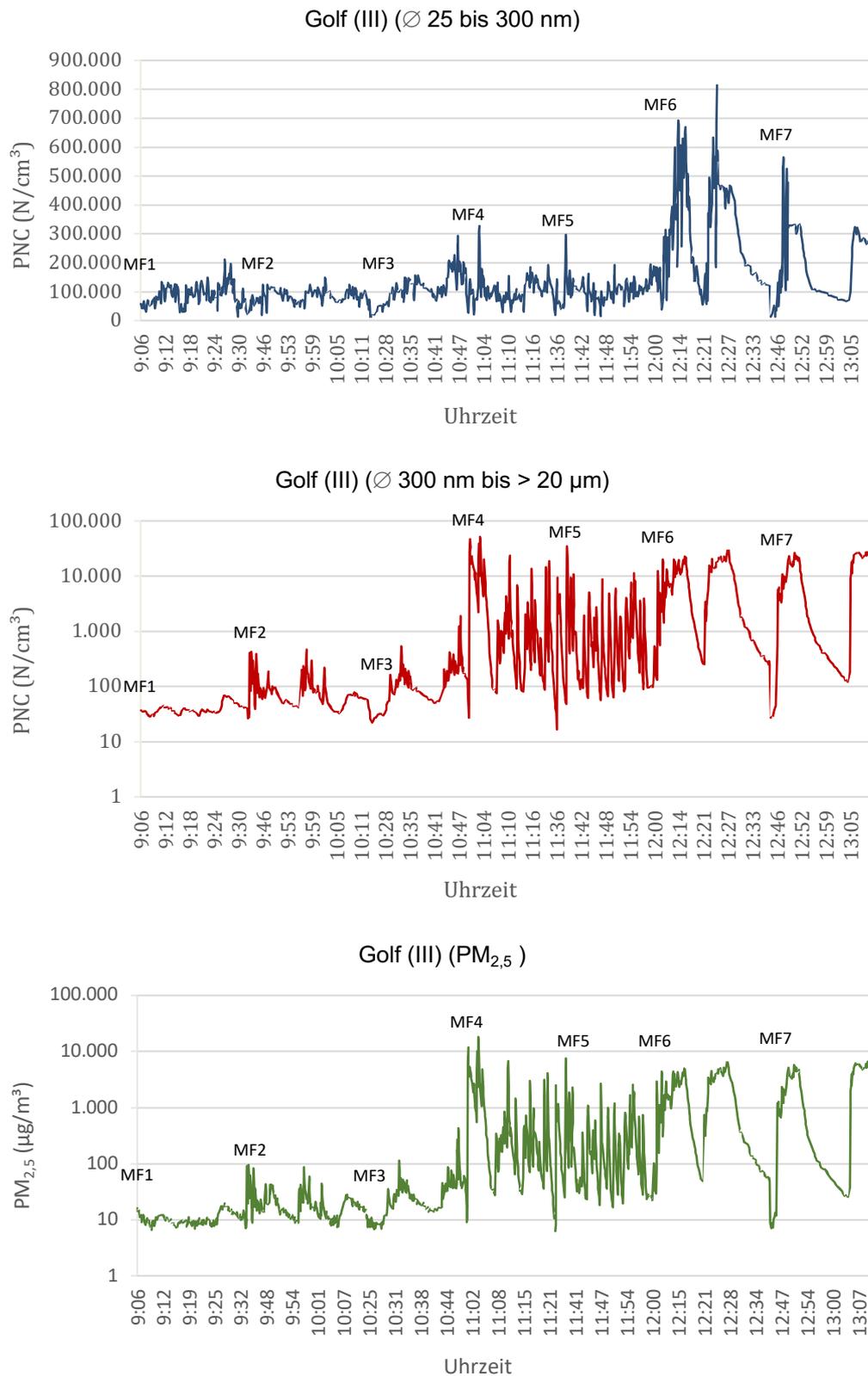


Abbildung 13: Partikelanzahl- (PNC) und Massenkonzentrationen (PM_{2,5}) im 6. Pkw-Innenraum während der 7 Messfahrten ohne Rauchaktivität (MF1) und mit Konsum von IQOS (MF2/3), E-Zigarette (MF4/5) und Tabakzigarette (MF6/7) in linearer und semilogarithmischer (Mitte/unten) Darstellung.

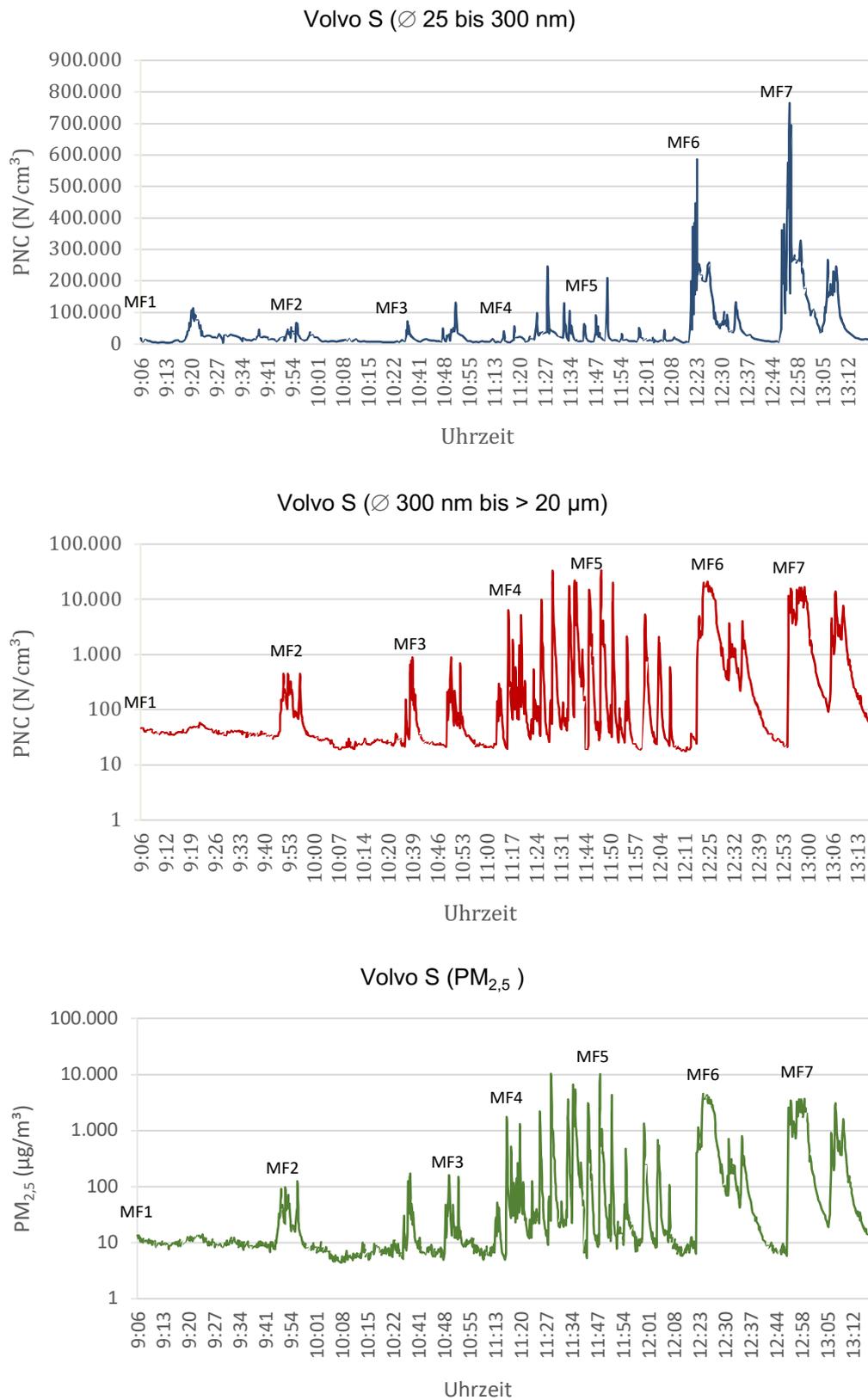


Abbildung 14: Partikelanzahl- (PNC) und Massenkonzentrationen (PM_{2,5}) im 7. Pkw-Innenraum während der 7 Messfahrten ohne Rauchaktivität (MF1) und mit Konsum von IQOS (MF2/3), E-Zigarette (MF4/5) und Tabakzigarette (MF6/7) in linearer und semilogarithmischer (Mitte/unten) Darstellung.

Wurde im Innenraum eine E-Zigarette gedampft, war bei 5 der 7 beprobten Pkw ein starker Anstieg der PM_{2,5}-Konzentration auf 75-490 µg/m³ zu beobachten (Kontrolle: 6-11 µg/m³).

Tabelle 2: Mittelwerte der Anzahlkonzentrationen (PNC; N/cm³) nano- und mikroskaliger Partikel sowie der Partikelmasse (PM_{2,5}; µg/m³) im Pkw-Innenraum (FBS: 2 cm geöffnet) ohne Rauchaktivität (Kontrolle) und während des Konsums von IQOS, der E-Zigarette (E-Zig) und der Tabakzigarette (TZ).

Pkw	mittlere PNC (Ø 25-300 nm)	mittlere PNC (Ø 0,3 bis > 20 µm)	mittlere PM _{2,5}
Skoda Octavia			
Kontrolle ^a	10.491	20	6
IQOS ^b	16.726	23	6
E-Zig ^c	53.579	2.145	490
TZ ^d	181.487	3.420	759
VW Golf (I)			
Kontrolle ^a	8.434	18	7
IQOS ^b	19.554	21	6
E-Zig ^c	10.248	289	75
TZ ^d	46.491	594	117
Fiat Punto			
Kontrolle ^a	18.626	19	9
IQOS ^b	28.827	10	4
E-Zig ^c	19.901	28	8
TZ ^d	24.319	288	64
VW Golf (II)			
Kontrolle ^a	20.675	22	7
IQOS ^b	29.044	40	11
E-Zig ^c	33.014	1.362	262
TZ ^d	236.167	2.863	594
Smart ForFour			
Kontrolle ^a	17.716	14	4
IQOS ^b	25.616	21	5
E-Zig ^c	13.543	90	18
TZ ^d	107.534	940	189
VW Golf (III)			
Kontrolle ^a	73.941	40	11
IQOS ^b	123.656	144	34
E-Zig ^c	73.954	1.188	269
TZ ^d	193.792	9.048	1.988
Volvo S			
Kontrolle ^a	20.231	41	10
IQOS ^b	22.152	90	19
E-Zig ^c	14.209	659	170
TZ ^d	191.173	4.168	895

^a Mittelwerte aus einer 20-minütigen Kontrollfahrt ohne Rauchaktivität (MF1: FBS 5 cm geöffnet).

^b Mittelwerte aus zwei 6-minütigen Rauchepisoden mit Tabak-Heets während MF3.

^c Mittelwerte aus einer kontinuierlichen Dampfepisode während MF5.

^d Mittelwerte aus zwei 6-minütigen Rauchepisoden mit Tabakzigaretten während MF7.

Im Vergleich zu IQOS setzte der Konsum der E-Zigarette mehr größere Partikel ($> 300 \text{ nm}$) in der Raumluft frei (z.B. Skoda Octavia: 2.145 vs. 23 Partikel/ cm^3), während die mittleren Anzahlkonzentrationen nanoskaliger Partikel tendenziell bei IQOS höher lagen (Tabelle 2). Die höchste Partikelbelastung wurde jedoch während des Rauchens der Tabakzigaretten gemessen. Dabei stieg die mittlere $\text{PM}_{2,5}$ -Konzentration auf $64\text{-}1.988 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Kontrolle: $4\text{-}11 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Die Anzahlkonzentration nanoskaliger Partikel lag 1,3-17-fach über der Kontrolle.

4.3 Raumluftgehalte von flüchtigen organischen Verbindungen (VOC)

Tabelle 3 enthält die Konzentrationen der VOC, die während der Messfahrten mit und ohne Rauchaktivität in der Raumluft der Pkw gemessen wurden. Der Konsum von IQOS führte in 3 der 7 Pkw zu einem Anstieg der Nikotinkonzentration auf $4\text{-}12 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Darüber hinaus war in keinem Fahrzeug eine Erhöhung der Hintergrundbelastung an VOC zu beobachten. Im Vergleich zum Rauchen durch Tabakerhitzung beeinträchtigte das Dampfen der E-Zigarette die Qualität der Raumluft wesentlich stärker. Während der Messfahrten stieg die Konzentration von Propylenglykol in 5 Pkw-Innenräumen auf $50\text{-}762 \mu\text{g}/\text{m}^3$, wobei der Richtwert I für Propylenglykol ($60 \mu\text{g}/\text{m}^3$) in 3 Fahrzeugen und der Richtwert II ($600 \mu\text{g}/\text{m}^3$) in einem Fahrzeug deutlich überschritten wurde (AIR 2017). Propylenglykol wird in Betriebsflüssigkeiten für E-Zigaretten (Liquids) als Trägersubstanz eingesetzt und ist beim Verdampfen für den Nebel-effekt verantwortlich. In 4 Fahrzeugen war durch den Gebrauch der E-Zigarette auch ein Anstieg der Nikotinkonzentration auf $4\text{-}10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ zu beobachten. Damit lag die Nikotinbelastung, die durch IQOS und E-Zigarette in den Pkw-Innenräumen verursacht wurde, auf vergleichbarem Niveau. Die höchsten Nikotinkonzentrationen ($8\text{-}140 \mu\text{g}/\text{m}^3$) wurden allerdings beim Rauchen der Tabakzigarette erreicht. Die Verbrennung von Zigaretten tabak führte auch zu einer Belastung der Raumluft mit 3-Ethenylpyridin, dem primären Pyrolyseprodukt von Nikotin und einem Marker für Passivrauchbelastung. In 4 Fahrzeugen war ein Anstieg der Konzentration von 3-Ethenylpyridin auf $8\text{-}14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ zu beobachten. Darüber hinaus wurden auch erhöhte Gehalte an Benzol ($6\text{-}15 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Toluol ($15\text{-}46 \mu\text{g}/\text{m}^3$) und Furfural ($4\text{-}29 \mu\text{g}/\text{m}^3$) festgestellt. Die übrigen VOC waren durch das Tabakrauchen allerdings nicht stärker erhöht als beim Konsum von IQOS und E-Zigarette und lagen teilweise im Bereich der Hintergrundbelastung ohne Rauchaktivität. Insgesamt war kein Zusammenhang zwischen den verschiedenen Lüftungsbedingungen (FBS 5 cm vs. 2 cm geöffnet) und der Höhe der VOC-Konzentrationen im Pkw-Innenraum zu erkennen. Schlechtere Lüftungsbedingungen hatten nicht zwangsläufig eine höhere Belastung der Raumluft zur Folge. Darüber hinaus wurden die höchsten VOC-Konzentrationen nicht in den kleinsten Pkw (Fiat Punto, Smart ForFour) gefunden, sondern in Pkw mit mittlerem ($3\text{-}4 \text{ m}^3$) und großem Raumvolumen ($4\text{-}5 \text{ m}^3$).

Tabelle 3: Konzentration der flüchtigen organischen Verbindungen (VOC; $\mu\text{g}/\text{m}^3$) im Pkw-Innenraum während der Messfahrten ohne Rauchaktivität (Kontrolle) und mit Konsum von IQOS, der E-Zigarette und der Tabakzigarette bei verschiedenen Lüftungsbedingungen (FBS: 5 cm geöffnet/2 cm geöffnet).

VOC	Kontrolle ^a	IQOS ^b	E-Zigarette ^b	Tabakzigarette ^b
Skoda Octavia				
n-Hexan	<BG	<BG	<BG	3/2
2-Methylfuran	<BG	<BG	<BG	5/5
Methylcyclopentan	<BG	<BG	<BG	1/<BG
Benzol	2	2/2	1/1	10/9
n-Heptan	1	<BG	<BG	3/<BG
Propylenglykol	<BG	<BG	262/502	39/<BG
Toluol	10	7/8	5/7	37/25
Furfural	<BG	<BG	<BG	8/9
Ethylbenzol	2	1/1	<BG/1	5/4
Xylol	10	8/8	7/8	28/16
Capronsäure	<BG	<BG	<BG	1/1
3-Ethyltoluol	<BG	<BG	<BG	2/2
Phenol	<BG	<BG	<BG	5/5
3-Ethenylpyridin	<BG	<BG	<BG	10/10
1,2,4-Trimethylbenzol	2	2/2	1/2	4/3
2-Ethyl-1-hexanol	<BG	<BG	<BG/1	<BG/2
Limonen	1	<BG/1	<BG	8/9
n-Nonanal	<BG	<BG	1/2	3/3
Nikotin	<BG	<BG	4/5	68/77
VW Golf (I)				
n-Hexan	3	2/2	<BG/1	1/2
2-Methylfuran	<BG	<BG	<BG	<BG
Methylcyclopentan	1	<BG	<BG	<BG
Benzol	<BG	<BG	<BG	<BG
n-Heptan	3	2/2	2/1	1/2
Propylenglykol	<BG	<BG	50/59	<BG
Toluol	39	35/41	32/30	28/40
Furfural	<BG	<BG	<BG	<BG
Ethylbenzol	4	3/4	3/3	3/4
Xylol	26	20/20	20/17	17/19
Capronsäure	2	2/2	4/3	3/3
3-Ethyltoluol	1	<BG	<BG	1/<BG
Phenol	<BG	<BG	<BG	<BG
3-Ethenylpyridin	<BG	<BG	<BG	<BG
1,2,4-Trimethylbenzol	3	2/2	2/2	2/2
2-Ethyl-1-hexanol	2	<BG/2	2/2	2/2
Limonen	<BG	<BG	<BG	2/2
n-Nonanal	<BG	<BG	3/<BG	<BG
Nikotin	<BG	<BG	5/<BG	9/8
Fiat Punto				
n-Hexan	10	<BG	<BG/3	6/1
2-Methylfuran	<BG	<BG	<BG	<BG
Methylcyclopentan	4	<BG	<BG/2	4/<BG
Benzol	9	<BG	2/4	8/5
n-Heptan	7	2/2	<BG/3	6/2
Propylenglykol	<BG	<BG	<BG	<BG
Toluol	35	15/11	8/26	44/18
Furfural	<BG	<BG/17	<BG	<BG
Ethylbenzol	4	2/2	2/4	8/3
Xylol	21	6/12	9/25	44/17
Capronsäure	<BG	<BG	<BG	<BG
3-Ethyltoluol	2	<BG	<BG/2	4/2

VOC	Kontrolle ^a	IQOS ^b	E-Zigarette ^b	Tabakzigarette ^b
Fiat Punto				
Phenol	<BG	<BG	2/2	2/2
3-Ethenylpyridin	<BG	<BG	<BG	<BG
1,2,4-Trimethylbenzol	3	3/2	2/5	8/4
2-Ethyl-1-hexanol	2	2/2	1/<BG	<BG/1
Limonen	4	1/5	9/3	15/3
n-Nonanal	2	<BG	2/2	2/2
Nikotin	<BG	<BG	<BG	<BG
VW Golf (II)				
n-Hexan	<BG	<BG	<BG	1/2
2-Methylfuran	<BG	<BG	<BG	4/6
Methylcyclopentan	<BG	<BG	<BG	<BG
Benzol	2	3/2	3/2	10/11
n-Heptan	<BG	<BG	<BG	1/2
Propylenglykol	<BG	<BG	341/370	<BG/36
Toluol	6	7/7	5/8	21/31
Furfural	<BG	<BG	<BG	6/29
Ethylbenzol	<BG	<BG	<BG	3/4
Xylole	7	7/7	5/7	14/19
Capronsäure	<BG	1/1	1/<BG	<BG
3-Ethyltoluol	<BG	<BG	<BG	2/2
Phenol	3	2/3	2/3	5/8
3-Ethenylpyridin	<BG	<BG	<BG	8/10
1,2,4-Trimethylbenzol	1	1/<BG	<BG/1	2/3
2-Ethyl-1-hexanol	2	2/2	2/2	2/2
Limonen	<BG	<BG/9	30/29	13/12
n-Nonanal	<BG	<BG	<BG	2/3
Nikotin	<BG	<BG/4	4/<BG	58/88
Smart ForFour				
n-Hexan	3	4/4	3/5	4/6
2-Methylfuran	<BG	<BG	<BG	2/3
Methylcyclopentan	2	2/2	2/2	2/3
Benzol	3	4/3	2/4	6/10
n-Heptan	2	2/2	1/2	2/3
Propylenglykol	<BG	<BG	<BG	<BG
Toluol	9	8/11	7/10	15/29
Furfural	<BG	<BG	<BG	4/4
Ethylbenzol	1	<BG	<BG/1	2/4
Xylole	8	6/6	5/8	10/22
Capronsäure	<BG	<BG	<BG	<BG
3-Ethyltoluol	<BG	<BG	<BG	<BG/2
Phenol	2	2/2	<BG/2	5/5
3-Ethenylpyridin	<BG	<BG	<BG	<BG
1,2,4-Trimethylbenzol	2	1/2	1/2	2/4
2-Ethyl-1-hexanol	<BG	<BG	<BG	<BG
Limonen	<BG	<BG	<BG	4/5
n-Nonanal	<BG	2/<BG	<BG	2/<BG
Nikotin	<BG	<BG	<BG	22/26
VW Golf (III)				
n-Hexan	<BG	<BG	<BG	2/<BG
2-Methylfuran	<BG	<BG	<BG	4/1
Methylcyclopentan	<BG	<BG	<BG	<BG
Benzol	2	<BG/1	<BG	15/9
n-Heptan	<BG	<BG	<BG	2/1
Propylenglykol	<BG	<BG	762/611	94/58
Toluol	5	3/4	3/2	38/22

VOC	Kontrolle ^a	IQOS ^b	E-Zigarette ^b	Tabakzigarette ^b
VW Golf (III)				
Furfural	<BG	<BG	<BG	12/8
Ethylbenzol	<BG	<BG	<BG	5/3
Xylole	5	3/3	2/2	21/12
Capronsäure	<BG	<BG	<BG	2/3
3-Ethyltoluol	<BG	<BG	<BG	2/1
Phenol	3	<BG	<BG	7/4
3-Ethenylpyridin	<BG	<BG	<BG	13/9
1,2,4-Trimethylbenzol	<BG	<BG	<BG	3/2
2-Ethyl-1-hexanol	5	<BG	<BG	<BG
Limonen	1	1/1	2/1	14/10
n-Nonanal	1	2/<BG	<BG/1	3/3
Nikotin	<BG	12/5	10/7	140/89
Volvo S				
n-Hexan	6	5/2	2/<BG	2/2
2-Methylfuran	<BG	<BG	<BG	<BG/2
Methylcyclopentan	3	2/<BG	<BG	<BG
Benzol	6	7/3	6/2	11/15
n-Heptan	3	4/2	3/2	3/3
Propylenglykol	<BG	<BG	196/226	<BG
Toluol	32	40/28	28/16	37/46
Furfural	<BG	<BG	<BG	28/13
Ethylbenzol	4	6/4	4/2	5/6
Xylole	23	34/26	26/16	24/29
Capronsäure	3	<BG/3	<BG	<BG
3-Ethyltoluol	2	3/2	2/1	2/3
Phenol	<BG	<BG	<BG	5/7
3-Ethenylpyridin	<BG	<BG	<BG	9/14
1,2,4-Trimethylbenzol	3	5/3	4/2	3/4
2-Ethyl-1-hexanol	2	2/1	1/1	1/2
Limonen	2	2/1	2/2	9/12
n-Nonanal	2	3/3	2/2	3/8
Nikotin	<BG	<BG/6	<BG	64/105

^a Messwerte während einer 20-minütigen Kontrollfahrt ohne Rauchaktivität (MF1: FBS 5 cm geöffnet).

^b Liegen die Messwerte für beide Lüftungsbedingungen unter der Bestimmungsgrenze (<BG), so wurde dies nur einmal angegeben.

4.4 Innenraumkonzentration von Aldehyden und Ketonen

In Tabelle 4 sind die Konzentrationen gesundheitlich relevanter Aldehyde und Ketone dargestellt, die während der 7 Messfahrten im Innenraum der Pkw ohne Rauchaktivität und mit Konsum verschiedener Rauchmittel gemessen wurden. Die Luftgehalte von Benzaldehyd, Butyraldehyd und Acrolein lagen in allen beprobten Fahrzeugen unterhalb der Bestimmungsgrenzen ($1,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ bzw. $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$) und sind daher nicht in Tabelle 4 berücksichtigt. Bei 5 der 7 Pkw war ein Anstieg der Konzentration von Formaldehyd, Acetaldehyd und Aceton in der Raumluft zu beobachten, wenn während der Fahrt Tabakzigaretten geraucht wurden (MF6/7). In den Fahrzeugen erhöhte sich die Formaldehydbelastung durch Rauchaktivität auf $18,5\text{-}56,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (MW Kontrolle: $6,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$) und die Belastung mit Acetaldehyd auf $26,5\text{-}$

141,5 µg/m³ (MW Kontrolle: 5,2 µg/m³). Wurde der Innenraum besser belüftet (FBS 5 cm geöffnet), waren tendenziell leicht geringere Carbonylkonzentrationen in der Raumluft messbar. Interessanterweise wurden die höchsten Belastungen in Fahrzeugen mit mittlerem (3-4 m³) und großem (4-5 m³) Raumvolumen erreicht: VW Golf (III) > Volvo S > Skoda Octavia > VW Golf (II) > Smart ForFour. Im Gegensatz zur Tabakzigarette hatte das Rauchen von IQOS (MF2/3) und das Dampfen der E-Zigarette (MF4/5) keinen Einfluss auf die Innenraumkonzentrationen der untersuchten Carbonyle. Die Messwerte lagen bis auf wenige Ausnahmen alle im Bereich der Hintergrundbelastung ohne Rauchaktivität.

Tabelle 4: Konzentration von Aldehyden und Ketonen (µg/m³) in der Raumluft der Pkw während der 7 Messfahrten (MF) ohne Rauchaktivität (MF1) und mit Konsum von IQOS (MF2/3), der E-Zigarette (MF4/5) und der Tabakzigarette (MF6/7). MF1/2/4/6: FBS 5 cm geöffnet; MF3/5/7: FBS 2 cm geöffnet.

Pkw	Formaldehyd	Acetaldehyd	Propionaldehyd	Aceton	2-Butanon
Skoda Octavia					
MF1	9,0	2,0	<BG	14,3	2,3
MF2	5,0	4,5	<BG	14,5	2,5
MF3	7,0	5,5	<BG	16,8	2,0
MF4	10,5	2,0	<BG	15,0	2,3
MF5	16,5	1,5	<BG	20,3	1,5
MF6	40,5	52,0	<BG	39,5	4,8
MF7	35,0	55,5	<BG	41,3	4,8
VW Golf (I)					
MF1	4,0	6,0	<BG	16,5	10,5
MF2	6,0	3,5	<BG	12,0	9,8
MF3	9,0	6,0	<BG	13,8	11,3
MF4	8,5	3,5	<BG	12,5	7,5
MF5	8,0	3,0	<BG	14,0	8,5
MF6	9,0	12,0	1,5	17,3	11,8
MF7	7,5	10,5	<BG	18,8	10,5
Fiat Punto					
MF1	11,5	7,0	3,5	40,8	8,8
MF2	5,0	3,0	<BG	13,3	4,0
MF3	5,5	2,5	<BG	15,0	2,5
MF4	4,5	2,0	<BG	14,8	2,5
MF5	4,5	2,5	<BG	13,8	3,0
MF6	7,0	6,5	2,5	16,8	3,0
MF7	7,5	7,5	2,5	16,0	3,5
VW Golf (II)					
MF1	4,5	3,5	<BG	16,5	1,8
MF2	4,0	4,0	<BG	19,8	2,5
MF3	5,0	6,5	<BG	21,3	2,0
MF4	3,0	2,5	<BG	22,0	1,8
MF5	3,0	2,5	<BG	22,0	1,8
MF6	30,5	44,5	5,0	33,8	1,5
MF7	40,0	68,5	<BG	55,0	3,5

Pkw	Formaldehyd	Acetaldehyd	Propionaldehyd	Aceton	2-Butanon
Smart ForFour					
MF1	3,0	2,5	<BG	11,8	3,0
MF2	4,5	2,5	<BG	12,0	3,0
MF3	4,0	2,5	<BG	12,5	3,3
MF4	4,5	3,0	<BG	12,3	3,3
MF5	4,5	2,5	1,5	15,0	3,5
MF6	18,5	26,5	3,0	27,8	5,0
MF7	22,5	31,5	3,0	28,5	3,3
VW Golf (III)					
MF1	11,5	14,0	<BG	22,3	7,5
MF2	6,0	17,0	<BG	22,0	7,0
MF3	8,0	17,5	<BG	25,0	7,8
MF4	7,0	6,5	<BG	22,3	5,8
MF5	8,5	11,5	<BG	31,0	7,0
MF6	56,5	141,5	10,0	75,8	11,8
MF7	44,0	111,5	6,5	67,8	8,8
Volvo S					
MF1	3,0	4,0	<BG	14,0	2,8
MF2	13,5	5,0	<BG	15,5	2,3
MF3	6,5	4,0	<BG	14,3	2,3
MF4	7,0	3,0	<BG	12,8	2,3
MF5	3,0	2,5	<BG	14,3	2,3
MF6	43,0	70,5	5,5	43,0	12,0
MF7	54,5	83,0	8,0	51,3	7,8

5 Diskussion

Jedes Jahr sterben weltweit etwa 6 Millionen Menschen an den Folgen des Tabakkonsums (WHO 2012), und Rauchen ist immer noch der größte Risikofaktor für die Entstehung und Manifestation von Herz-Kreislauf- und Lungenkrankheiten (Collaborators GBDT 2017). Tabakrauch ist ein komplexes Gemisch aus zahlreichen gesundheitlich bedenklichen Substanzen, die beim Verbrennen des Tabaks entstehen, und der mit Abstand gefährlichste, leicht vermeidbare Innenraumschadstoff. Seit Langem liegt überzeugende wissenschaftliche Evidenz aus experimentellen und epidemiologischen Studien vor, dass auch Passivrauchen mit schwerwiegenden Gesundheitsrisiken, einschließlich der Entstehung von Lungenkrebs, verbunden ist (IARC 2004; U.S. 2006; US-DHHS 2010). Zudem gilt Passivrauchexposition als bedeutender Risikofaktor für Asthma, Atemwegsinfektionen und plötzlichem Kindstod (EPA 1992; EPA 1997; Raupach et al. 2008). Mittlerweile existieren auch für E-Zigaretten eine Reihe von Studien, die nahelegen, dass das Inhalieren von propylenglykolhaltigen Aerosolen mit negativen gesundheitlichen Wirkungen, insbesondere für die Atemwege und das Herz-Kreislaufsystem, verknüpft sein kann (Fromme und Schober 2015). Durch das Dampfen können in Innenräumen auch Schadstoffe in Konzentrationen freigesetzt werden, bei denen eine gesundheitliche Beeinträchtigung für Dritte nicht auszuschließen ist (Schober et al. 2014). Besonders kritisch ist der Konsum von Tabak- und E-Zigaretten in Pkw-Innenräumen, da in einem sehr kleinen Raum (ca. zwei bis fünf Kubikmeter) mit hohen Gehalten an potenziell gesundheitsgefährdenden Substanzen gerechnet werden muss. Im Rahmen des vorliegenden Projekts wurde daher unter realen Expositionsbedingungen (im Fahrbetrieb) die Schadstoffbelastung (Feinstäube, VOC) von 7 Pkw-Innenräumen während des Rauchens von IQOS, E-Zigarette und Tabakzigarette umfassend untersucht.

E-Zigarette und IQOS-Rauchsystem

Durch den Gebrauch der E-Zigarette stieg die Konzentration von Propylenglykol in 5 Pkw-Innenräumen auf 50-762 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, wobei der Richtwert I für Propylenglykol (RW I: 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) in 3 Fahrzeugen und der Richtwert II (RW II: 600 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) in einem Fahrzeug deutlich überschritten wurde (AIR 2017). Vergleichbare Richtwertüberschreitungen wurden auch in einer anderen Expositionsstudie zur Passivdampfbelastung durch E-Zigaretten beobachtet (Schober et al. 2014). Propylenglykol dient als Vernebelungsmittel und ist für die Aufnahme über den Mund als unbedenklich eingestuft. Vernebelt löst die Substanz jedoch bereits bei kurzfristiger Exposition Augen- und Atemwegsirritationen aus (Wieslander et al. 2001). Personen, die am Arbeitsplatz regelmäßig propylenglykolhaltigen Aerosolen (Theaternebel) ausgesetzt sind,

leiden häufiger an Atemwegsreizungen und Einschränkungen der Lungenfunktion als nicht exponierte Personen. Die schwersten Symptome zeigen Beschäftigte, die den Dämpfen über längere Zeit direkt exponiert sind (Varughese et al. 2005). In einem Pkw lag die die Propylenglykolbelastung sogar 27 % über dem RW II. Konzentrationen eines Luftschadstoffes, die über dem RW II liegen, sind geeignet, die Gesundheit empfindlicher Personen einschließlich von Kindern zu gefährden. In so einem Fall besteht gemäß Basisschema zur Richtwertableitung ein unverzüglicher Handlungsbedarf die Exposition zu verringern (Bekanntmachung des UBA 2012).

In 4 Innenräumen führte das Dampfen der E-Zigarette zu einem Anstieg der Nikotinkonzentration auf 4-10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Ähnliche Nikotinbelastungen wurden auch beim Gebrauch des IQOS-Rauchsystems beobachtet (4-12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Nikotin ist ein Nervengift und Suchtstoff, der körperliche und psychische Abhängigkeit erzeugt (Benowitz 2010). Im Tierversuch löst es Arteriosklerose aus und unterstützt deren Voranschreiten (Heeschen et al. 2001; Lee und Cooke 2011; Zhang et al. 2011). Nikotin wirkt zudem fruchtschädigend (Bruin et al. 2010), fördert das Wachstum von bestehenden Tumoren (Heeschen et al. 2001) und steht im Verdacht, Krebs zu erzeugen (Grando 2014). Bereits frühere Studien konnten nachweisen, dass sich bei der Verwendung von E-Zigaretten die Nikotinkonzentration in der Raumluft erhöht (Ballbe et al. 2014; Czogala et al. 2014; Saffari et al. 2014; Schober et al. 2014). Nikotinanalysen in Speichelproben von Nichtraucher, die E-Zigarettenaerosolen ausgesetzt waren, bestätigen eine passive Aufnahme von Nikotin während der Dampfaktivität (Gallart-Mateu et al. 2016), allerdings auf niedrigerem Niveau als bei der Passivexposition gegenüber Zigarettenrauch (Jarvis et al. 2001; Jarvis et al. 1985). Auf Grundlage der Studienbefunde ist davon auszugehen, dass der Konsum von E-Zigarette und IQOS-Rauchsystem in Pkw-Innenräumen für Nichtraucher mit dem Risiko einer Nikotinaufnahme durch Passivexposition verknüpft ist.

Das Rauchen von IQOS hatte nahezu keinen Einfluss auf die mittlere Anzahlkonzentration mikroskaliger Partikel und auf die $\text{PM}_{2,5}$ -Konzentration im Innenraum. Dagegen nahm die Anzahlkonzentration nanoskaliger Partikel in allen Fahrzeugen zu ($1,6\text{-}12,3 \times 10^4/\text{cm}^3$) und lag im Mittel 9-232 % über der Hintergrundbelastung ohne Rauchaktivität. IQOS ist ein Rauchsystem, bei dem keine Tabakverbrennung stattfindet, sondern Sticks aus komprimiertem Tabak elektronisch auf etwa 300 °C erhitzt werden. Das entstehende Aerosol enthält tabaktypische Verbindungen, die bis zu dieser Temperatur flüchtig sind (Thermodesorption), darunter laut Herstellerangaben Nikotin, Glyzerin und weitere Substanzen. Da durch die Tabakerhitzung keine Asche entsteht, war in den Fahrzeugen auch keine Zunahme feiner Rußpartikel ($> 300 \text{ nm}$) zu beobachten. Allerdings beklagten alle Studienteilnehmer während des

Rauchens von IQOS eine unangenehme Geruchsentwicklung im Pkw, die das Wohlbefinden von Raucher und Fahrer wesentlich beeinträchtigte. Zwei Raucher berichteten von Übelkeit. Wurde im Innenraum eine E-Zigarette gedampft, war dagegen ein starker Anstieg der $PM_{2,5}$ -Konzentration auf 75-490 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ zu beobachten (Kontrolle: 6-11 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Im Vergleich zu IQOS setzte der Konsum der E-Zigarette mehr größere Partikel ($> 300 \text{ nm}$) in der Raumluft frei, während die mittleren Anzahlkonzentrationen nanoskaliger Partikel tendenziell bei IQOS höher lagen. Aerosole von E-Zigaretten enthalten feine und ultrafeine Flüssigkeitspartikel, die aus übersättigtem Propylenglykoldampf geformt werden (Schober et al. 2014; Schripp et al. 2013). Diese Partikel können tief in die Lunge eindringen, sich dort ablagern (Manigrasso et al. 2015) und oxidativen Stress und Entzündungsreaktionen auslösen (Cervellati et al. 2014). Als Kurzzeitfolgen des Dampfens wurden Atemwegsreizungen und trockener Husten, Beeinträchtigung der Lungenfunktion sowie Hinweise auf Entzündungsprozesse in den Atemwegen beschrieben (Pisinger und Dossing 2014). Das dauerhafte Einatmen von ultrafeinen Propylenglykoltröpfchen könnte sich besonders in der Wachstumsphase auswirken und bei Kindern und Jugendlichen das Asthmarisiko erhöhen (Choi et al. 2010). Zusätzlich kann die Regenerierung von geschädigtem Lungengewebe nach Infektionen oder chronischen Entzündungen nachteilig beeinflusst werden (BfR 2015). Studien zu gesundheitlichen Effekten bei langfristiger Inhalation von propylenglykohlhaltigen Aerosolen aus E-Zigaretten liegen allerdings bislang nicht vor. Insgesamt beeinträchtigt der Gebrauch von IQOS und E-Zigarette die Luftqualität in Pkw-Innenräumen durch erhöhte Partikelbelastung. Im Falle von IQOS ist die gesundheitliche Bedeutung für den Passivraucher derzeit unklar. Bei der E-Zigarette liegen aber mittlerweile eine Reihe von experimentellen Befunden vor, die ein Gesundheitsrisiko durch das Einatmen von E-Zigarettenaerosolen auch für Nichtraucher nahelegen (Fromme und Schober 2015; IRK 2016).

Tabakzigaretten

Die höchsten Partikelbelastungen wurden in den Pkw während des Rauchens der Tabakzigaretten gemessen. Dabei stieg die mittlere $PM_{2,5}$ -Konzentration im Innenraum auf 64-1.988 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Kontrolle: 4-11 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Vergleichbare $PM_{2,5}$ -Konzentrationen wurden auch in anderen Studien zur Rauchbelastung in Fahrzeuginnenräumen beobachtet. Partikelmessungen, bei denen während der Rauchaktivität ein Fenster teilweise geöffnet war, lieferten $PM_{2,5}$ -Gehalte in Pkw-Innenräumen von 47-12.150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Raouf et al. 2015). Die Verbrennung von Zigarettentabak führte auch zu einer Belastung der Raumluft mit tabaktypischen Substanzen wie Nikotin (8-140 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) und 3-Ethenylpyridin (8-14 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Darüber hinaus wurden auch erhöhte Gehalte an Benzol (6-15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Toluol (15-46 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) und Furfural (4-29 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) festge-

stellt. Ähnliche Schadstoffbelastungen wurden auch in der Raumluft von Bewirtungsbetrieben mit Rauchaktivität gemessen. Im Rahmen einer Expositionsstudie untersuchten Bolte und Mitarbeiter (2008) in 28 Rauchergaststätten (Restaurants/Cafés, Kneipen, Diskotheken) zur Hauptbesuchszeit die Innenraumgehalte von tabaktypischen Verbrennungsprodukten. Die mittleren Konzentrationen von Nikotin ($21\text{-}227\ \mu\text{g}/\text{m}^3$), 3-Ethenylpyridin ($4\text{-}23\ \mu\text{g}/\text{m}^3$) und Benzol ($11\text{-}24\ \mu\text{g}/\text{m}^3$) lagen dabei durchwegs im Bereich der Werte, die auch in der Raumluft der Pkw während des Zigarettenkonsums gefunden wurden. In den Rauchergaststätten variierten die mittlere $\text{PM}_{2,5}$ -Belastung von $224\text{-}1.210\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ und die Partikelanzahlkonzentration von $12\text{-}21 \times 10^4$ Partikeln/ cm^3 , mit Belastungsspitzen bei Partikeln mit einem Durchmesser von $10\text{-}500\ \text{nm}$. Während des Rauchens dominierten in der Raumluft der Pkw ebenfalls nanoskalige Partikel (Durchmesser $25\text{-}300\ \text{nm}$: $2,4\text{-}23,6 \times 10^4/\text{cm}^3$). Allerdings wurden in 4 Fahrzeugen $\text{PM}_{2,5}$ -Konzentrationen ($594\text{-}1.988\ \mu\text{g}/\text{m}^3$) erreicht, die deutlich über der Passivrauchbelastung in Rauchergaststätten lagen (Bolte et al. 2008).

Als kritisch ist die Freisetzung von Aldehyden mit kanzerogenem Potenzial zu bewerten. In den Fahrzeugen stieg die Formaldehydbelastung durch Rauchaktivität auf $18,5\text{-}56,5\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ (MW Kontrolle: $6,2\ \mu\text{g}/\text{m}^3$) und die Belastung mit Acetaldehyd auf $26,5\text{-}141,5\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ (MW Kontrolle: $5,2\ \mu\text{g}/\text{m}^3$). Damit erreichten die Formaldehydgehalte in der Raumluft der Pkw ein ähnlich hohes Niveau wie in den untersuchten Rauchergaststätten ($14,4\text{-}47,2\ \mu\text{g}/\text{m}^3$) (Bolte et al. 2008). Die Innenraumkonzentrationen von Formaldehyd und Acetaldehyd blieben jedoch bis auf eine Ausnahme in allen Pkw unterhalb des jeweils für die beiden Schadstoffe festgelegten RW I von $100\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Bekanntmachung des UBA 2013; AIR 2016). Die Internationale Krebsforschungsagentur der WHO stuft Formaldehyd als Kanzerogen der Kategorie 1 ein (IARC 2018). Acetaldehyd besitzt eine hohe Ziliartoxizität. Infolge einer Lähmung und Zerstörung der Flimmerepithelien auf der Oberfläche der Atemwege kommt es zu Stauungen des Bronchialschleims, wodurch die Selbstreinigung der Atemwege vermindert oder unterdrückt wird. Es wird vermutet, dass Acetaldehyd neben den Wirkungen auf die Atemwege, insbesondere der Epithelien der Nase, auch an der Entstehung von Lungenkrebs beteiligt ist (IARC 2018). Im Vergleich zu den anderen Rauchtchniken, die nicht auf Verbrennungsprozessen beruhen, führte das Rauchen von Tabakzigaretten in allen Fahrzeugen zu den höchsten Schadstoffkonzentrationen.

6 Fazit

Das Rauchen von IQOS, E-Zigarette und Tabakzigarette beeinträchtigt die Luftqualität in Pkw-Innenräumen durch Freisetzung von feinen und ultrafeinen Partikeln sowie organischen Verbindungen. Die Schadstoffbelastung und das damit einhergehende Gesundheitsrisiko für Mitfahrende lagen beim Rauchen von Tabakzigaretten mit Abstand am höchsten. Es wurden ähnlich hohe Schadstoffgehalte wie in der Raumluft von Rauchergaststätten gemessen. Insbesondere die hohen $PM_{2,5}$ -Konzentrationen geben Anlass zur Besorgnis. Bei der Verwendung von IQOS und der E-Zigarette ergab sich ein differenziertes Bild. Die beiden Rauchmittel unterschieden sich bei der Freisetzung von flüchtigen organischen Verbindungen und beim suchterzeugenden Nikotin nur gering voneinander. Im Gegensatz zu IQOS setzte die E-Zigarette aber hohe Mengen feiner Flüssigkeitspartikel ($PM_{2,5}$) frei, die aus übersättigtem Propylenglykoldampf geformt werden. Die Partikel können tief in die Lunge eindringen und die Lungenfunktion beeinträchtigen. Darüber hinaus können Propylenglykoldämpfe Augen und Atemwege reizen. Bei Verwendung von IQOS waren dagegen deutlich höhere Gehalte an ultrafeinen, alveolengängigen Partikeln (Durchmesser: 25-300 nm) in der Raumluft nachweisbar. Die gesundheitliche Bedeutung für den Passivraucher ist derzeit unklar. Insgesamt stellen alle 3 Rauchtchniken vermeidbare Quellen für Innenraumschadstoffe dar (insbesondere für Nikotin und $PM_{2,5}$) und sollten aus Gründen des vorsorgeorientierten Gesundheitsschutzes, vor allem von empfindlichen Personen wie Kindern und Schwangeren, nicht im Auto praktiziert werden.

7 Referenzen

- AIR (Ausschuss für Innenraumrichtwerte) (2017) Richtwert für Propan-1,2-diol (Propylenglykol) in der Innenraumluft. Bundesgesundheitsblatt Gesundheitsforschung Gesundheitsschutz 60:1298-1304
- AIR (Ausschuss für Innenraumrichtwerte) (2016) Richtwert für Formaldehyd in der Innenraumluft. Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz 59:1040-1044
- Ballbe M, Martinez-Sanchez JM, Sureda X, Fu M, Perez-Ortuno R, Pascual JA, Salto E, Fernandez E (2014) Cigarettes vs. e-cigarettes: Passive exposure at home measured by means of airborne marker and biomarkers. Environ Res 135:76-80
- Bekanntmachung des UBA (2013) Indoor air guide values for acetaldehyde: Announcement of the German Ad-hoc Working Group on Indoor Guidelines of the Indoor Air Hygiene Committee and of the States' Supreme Health Authorities. Bundesgesundheitsblatt Gesundheitsforschung Gesundheitsschutz 56:1434-1447
- Bekanntmachung des UBA (2012) Guide values for indoor air: update of the German risk assessment procedure (basic scheme). Bundesgesundheitsblatt Gesundheitsforschung Gesundheitsschutz 55:279-290
- Benowitz NL (2010) Nicotine addiction. N Engl J Med 362:2295-2303
- BfR (2015) Nikotinfreie E-Shishas bergen gesundheitliche Risiken. Stellungnahme Nr 010/2015 des BfR vom 23 April 2015
- Bolte G, Heitmann D, Kiranoglu M, Schierl R, Diemer J, Koerner W, Fromme H (2008) Exposure to environmental tobacco smoke in German restaurants, pubs and discotheques. J Expo Sci Environ Epidemiol 18:262-271
- Bruin JE, Gerstein HC, Holloway AC (2010) Long-term consequences of fetal and neonatal nicotine exposure: a critical review. Toxicol Sci 116:364-374
- Cervellati F, Muresan XM, Sticozzi C, Gambari R, Montagner G, Forman HJ, Torricelli C, Maioli E, Valacchi G (2014) Comparative effects between electronic and cigarette smoke in human keratinocytes and epithelial lung cells. Toxicol In Vitro 28:999-1005
- Choi H, Schmidbauer N, Sundell J, Hasselgren M, Spengler J, Bornehag CG (2010) Common household chemicals and the allergy risks in pre-school age children. PLoS One 5:e13423
- Collaborators GBDT (2017) Smoking prevalence and attributable disease burden in 195 countries and territories, 1990-2015: a systematic analysis from the Global Burden of Disease Study 2015. Lancet 389:1885-1906
- Czogala J, Goniewicz ML, Fidelus B, Zielinska-Danch W, Travers MJ, Sobczak A (2014) Secondhand exposure to vapors from electronic cigarettes. Nicotine Tob Res 16:655-661
- EPA (1992) Respiratory health effects of passive smoking: Lung cancer and other disorders. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Office of Health and Environmental Assessment. EPA/600/6-90/006F.
- EPA (1997) Health effects of exposure to environmental tobacco smoke. Sacramento: California Environmental Protection Agency, Office of Environmental Health Hazard Assessment, Final Report.
- Fromme H, Schober W (2015) Waterpipes and e-cigarettes: Impact of alternative smoking techniques on indoor air quality and health. Atmos Environ 106:429-441
- Gallart-Mateu D, Elbal L, Armenta S, de la Guardia M (2016) Passive exposure to nicotine from e-cigarettes. Talanta 152:329-334
- Grando SA (2014) Connections of nicotine to cancer. Nat Rev Cancer 14:419-429
- Heeschen C, Jang JJ, Weis M, Pathak A, Kaji S, Hu RS, Tsao PS, Johnson FL, Cooke JP (2001) Nicotine stimulates angiogenesis and promotes tumor growth and atherosclerosis. Nat Med 7:833-839

- IARC (2004) Tobacco smoke and involuntary smoking. IARC Monogr Eval Carcinog Risks Hum Vol 83, IARC Press: Lyon
- IARC (2018) IARC Monographs, List of Classifications, Volumes 1-122.
http://monographs.iarc.fr/ENG/Classification/latest_classif.php
- IRK (Innenraumhygienekommission) (2016) Stellungnahme zu elektronischen Zigaretten (E-Zigaretten). Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz 59:1660-1661
- Jarvis MJ, Feyerabend C, Bryant A, Hedges B, Primatesta P (2001) Passive smoking in the home: plasma cotinine concentrations in non-smokers with smoking partners. Tob Control 10:368-374
- Jarvis MJ, Russell MA, Feyerabend C, Eiser JR, Morgan M, Gammage P, Gray EM (1985) Passive exposure to tobacco smoke: saliva cotinine concentrations in a representative population sample of non-smoking schoolchildren. Br Med J (Clin Res Ed) 291:927-929
- Lee J, Cooke JP (2011) The role of nicotine in the pathogenesis of atherosclerosis. Atherosclerosis 215:281-283
- Manigrasso M, Buonanno G, Fuoco FC, Stabile L, Avino P (2015) Aerosol deposition doses in the human respiratory tree of electronic cigarette smokers. Environ Pollut 196:257-267
- Pisinger C, Dossing M (2014) A systematic review of health effects of electronic cigarettes. Prev Med 69:248-260
- Raouf SA, Agaku IT, Vardavas CI (2015) A systematic review of secondhand smoke exposure in a car: Attributable changes in atmospheric and biological markers. Chron Respir Dis 12:120-131
- Raupach T, Radon K, Nowak D, Andreas S (2008) Passive smoking--health consequences and effects of exposure prevention. Pneumologie 62:44-50
- Saffari A, Daher N, Ruprecht A, De Marco C, Pozzi P, Boffi R, Hamad SH, Shafer MM, Schauer JJ, Westerdahl D, Sioutas C (2014) Particulate metals and organic compounds from electronic and tobacco-containing cigarettes: comparison of emission rates and secondhand exposure. Environ Sci Process Impacts 16:2259-2267
- Schober W, Szendrei K, Matzen W, Osiander-Fuchs H, Heitmann D, Schettgen T, Jörres RA, Fromme H (2014) Use of electronic cigarettes (e-cigarettes) impairs indoor air quality and increases FeNO levels of e-cigarette consumers. Int J Hyg Environ Health 217:628-637
- Schripp T, Markewitz D, Uhde E, Salthammer T (2013) Does e-cigarette consumption cause passive vaping? Indoor Air 23:25-31
- U.S. Department of Health and Human Services (2006). The health consequences of involuntary exposure to tobacco smoke: A report of the Surgeon General. Rockville, MD: U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, Coordinating Center for Health Promotion, National Center for Chronic Disease Prevention and Health Promotion, Office on Smoking and Health.
- US-DHHS (2010) How tobacco smoke causes disease: The biology and behavioral basis for smoking-attributable disease: A report of the Surgeon General. Atlanta.
- Varughese S, Teschke K, Brauer M, Chow Y, van Netten C, Kennedy SM (2005) Effects of theatrical smokes and fogs on respiratory health in the entertainment industry. Am J Ind Med 47:411-418
- WHO (2012) WHO global report: mortality attributable to tobacco.
http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/44815/1/9789241564434_eng.pdf.
- Wieslander G, Norbäck D, Lindgren T (2001) Experimental exposure to propylene glycol mist in aviation emergency training: acute ocular and respiratory effects. Occup Environ Med 58:649-655
- Zhang G, Marshall AL, Thomas AL, Kernan KA, Su Y, LeBoeuf RC, Dong XR, Tchoo BN (2011) In vivo knockdown of nicotinic acetylcholine receptor alpha1 diminishes aortic atherosclerosis. Atherosclerosis 215:34-42