

SHOTUP

Nachhaltige und gesundheitsorientierte Verkehrs- und Stadtplanung

Schlussbericht 2021



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Zuwendungsempfänger:

Technische Universität Darmstadt
Institut für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik (Leitung)
Fachgebiet Landmanagement

Förderkennzeichen:

01DP19005

Vorhabenbezeichnung:

Sustainable and Health-Oriented Transport Planning and Urban Planning (SHOTUP)
Nachhaltige und gesundheitsorientierte Verkehrs- und Stadtplanung

Laufzeit des Vorhabens: 01.04.2019 bis 30.09.2021

Berichtszeitraum: 01.04.2019 bis 30.09.2021

TU Darmstadt, Institut für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik

Prof. Dr.-Ing. Manfred Boltze

Karin Menges

Mit Beiträgen von: Dr.-Ing. Le Thi Huong

TU Darmstadt, Fachgebiet Landmanagement

Prof. Dr.-Ing. Hans-Joachim Linke

Martina Dettweiler

Schlussbericht des Forschungsprojekts:

„SHOTUP - Sustainable and Health-Oriented Transport Planning and Urban Planning“

Zuwendungsempfänger: Technische Universität Darmstadt

Projekträger: Bundesministerium für Bildung und Forschung

Förderkennzeichen: 01DP19005

Darmstadt, 30. September 2021

Technische Universität Darmstadt
Institut für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik
Otto-Berndt-Str. 2
64287 Darmstadt

Tel.: 06151/1622500

Fax: 06151/1622502

E-Mail: ivv@verkehr.tu-darmstadt.de

Website: https://www.verkehr.tu-darmstadt.de/vv/das_institut_ivv/index.de.jsp

Technische Universität Darmstadt
Institut für Geodäsie
Fachgebiet Landmanagement
Franziska-Braun-Str. 7
64287 Darmstadt

Tel.: 06151/1621964

Fax: 06151/1621916

E-Mail: linke@geod.tu-darmstadt.de

Website: <https://www.geodesy.tu-darmstadt.de/landmanagement>

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 01DP19005 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autor*innen.

Quellen Titelblatt: Eigene Aufnahmen und Darstellungen

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	V
Tabellenverzeichnis.....	IX
Abkürzungsverzeichnis.....	XI
1 Einleitung	1
1.1 Notwendigkeit städtischer Transformation im Kontext gesellschaftlicher Herausforderungen.....	1
1.2 Forschungsprojekt SHOTUP.....	2
1.3 Forschungsdesign des Projekts SHOTUP.....	3
2 Stadtplanung, Verkehrsplanung und Verkehrstechnik sowie Gesundheitswissenschaften im Kontext urbaner Luftschadstoffbelastung	7
2.1 Stadtentwicklung.....	7
2.2 Stadtplanung.....	7
2.2.1 Aufgaben und Bausteine der Stadtplanung	7
2.2.2 Akteure und Prozesse der Stadtentwicklung	10
2.3 Verkehrsplanung und Verkehrstechnik.....	10
2.3.1 Verkehrsangebot und Verkehrsnachfrage	11
2.3.2 Verkehrsmanagement als Teil der Verkehrsplanung.....	12
2.3.3 Akteure der Verkehrsplanung.....	12
2.4 Gesundheitswissenschaften.....	13
2.4.1 Begriffe in den Gesundheitswissenschaften	14
2.4.2 Determinanten von Gesundheit.....	15
2.4.3 Gesundheitsfördernde Stadtentwicklung.....	17
2.5 Grundlagen zu Luftschadstoffen	17
2.5.1 Begriffsbestimmungen Luftschadstoffe	17
2.5.2 Relevante Luftschadstoffe und ihre gesundheitlichen Auswirkungen.....	18
2.5.3 Rechtliche Grundlagen	22
2.6 Identifikation von Einflussfaktoren auf die Luftschadstoffbelastung	23
2.6.1 Hintergrundbelastung.....	23
2.6.2 Meteorologische Einflussfaktoren.....	24
2.6.3 Städtebaulichen Einflussfaktoren	26
2.6.4 Verkehrliche Einflussfaktoren.....	31
2.7 Planerische Maßnahmen und strategische Ansätze mit Gesundheitseffekt.....	35
2.8 Gewichtung der Gesundheit bei planerischen Entscheidungen.....	38
3 Analyse der Wirkungszusammenhänge zwischen Stadt, Verkehr und Gesundheit.....	43
3.1 Analyse der Wirkungszusammenhänge	43

3.2	Wechselwirkungen zwischen Stadt, Verkehr und Gesundheit.....	44
3.2.1	Zwischen Stadt und Verkehr.....	44
3.2.2	Zwischen Stadt und Gesundheit	44
3.2.3	Zwischen Verkehr und Gesundheit	45
3.3	Einfluss von Gesundheitseffekten auf Stadt und Verkehr - Integrierter Ansatz von Stadt, Verkehr und Gesundheit.....	46
4	Trends und ihre Auswirkungen auf den urbanen Raum	47
4.1	Vorgehen bei der Trendsammlung.....	47
4.2	Globale Megatrends.....	47
4.3	Zusammenfassung und Diskussion der Trends	50
4.4	Szenarien zur zukünftigen Entwicklung von Großstädten	54
5	Untersuchungsräume: Deutschland und Vietnam.....	55
5.1	Deutschland – Frankfurt am Main.....	55
5.1.1	Verkehrliche Situation	55
5.1.2	Schadstoffbelastungen.....	61
5.2	Vietnam - Ho Chi Minh City.....	62
5.2.1	Geografische Lage, Bevölkerungsentwicklung und Wirtschaft.....	62
5.2.2	Städtebauliche Entwicklung	63
5.2.3	Verkehrliche Situation	64
5.2.4	Schadstoffbelastungen.....	66
6	Felduntersuchungen	70
6.1	Messtechnik.....	70
6.1.1	Ultrafeine Partikel (UFP)	70
6.1.2	Partikel der Größenfraktionen PM _{2,5} und PM ₁₀	70
6.1.3	Stickoxide NO _x / NO / NO ₂	70
6.1.4	Erfassung verkehrlicher und meteorologischer Einflussfaktoren	71
6.2	Methodisches Vorgehen in Deutschland.....	72
6.2.1	Mobile Messungen.....	72
6.2.2	Stationäre Messungen	77
6.3	Methodisches Vorgehen in Vietnam	80
6.3.1	Mobile Messungen.....	80
6.4	Untersuchungen in Deutschland	83
6.4.1	Datenerhebung	83
6.4.2	Datenaufbereitung.....	84
6.4.3	Datenanalyse	84
6.5	Untersuchungen in Vietnam	88
6.5.1	Datenerhebung	88

6.5.2	Datenaufbereitung.....	89
6.5.3	Datenanalyse	89
6.6	Ergebnisse der Messungen in Deutschland.....	89
6.6.1	Analyse Fahrtzeiten	89
6.6.2	Hintergrundbelastung.....	90
6.6.3	Exposition gegenüber Luftschadstoffen in Abhängigkeit der Verkehrsmittelwahl	91
6.6.4	Exposition gegenüber Luftschadstoffen in Abhängigkeit der Verkehrsmittel- und Routenwahl	94
6.6.5	Exposition gegenüber Luftschadstoffen in Abhängigkeit der Zeitwahl	99
6.6.6	Inhalierete Dosis der Anzahlkonzentration UFP und der Massenkonzentration UFP in Abhängigkeit der Verkehrsmittel- und Routenwahl	100
6.6.7	Detailanalyse Messungen Radverkehr	104
6.6.8	Detailanalyse Messungen ÖPNV	106
6.6.9	Städtebauliche Auswertung der Messdaten	109
6.6.10	Stationäre Messungen	112
6.7	Ergebnisse der Messungen in Vietnam	117
6.7.1	Analyse Fahrtzeiten	117
6.7.2	Exposition gegenüber Luftschadstoffen in Abhängigkeit der Verkehrsmittelwahl	117
6.7.3	Exposition gegenüber Luftschadstoffen in Abhängigkeit der Zeitwahl	119
6.7.4	Exposition von Fußgänger*innen gegenüber Luftschadstoffen in Abhängigkeit der städtebaulichen und verkehrlichen Gegebenheiten.....	121
6.7.5	Inhalierete Dosis der Anzahlkonzentration UFP und der Massenkonzentration UFP in Abhängigkeit der Verkehrsmittelwahl.....	122
7	Diskussion der Erkenntnisse.....	124
7.1	Forschungsfeld 1 - Wirkzusammenhänge und Zielkonflikte.....	124
7.2	Forschungsfeld 2 - Einflussfaktoren der Wirkzusammenhänge	126
7.3	Forschungsfeld 3 - Verkehrsplanerische Aspekte	128
7.4	Forschungsfeld 4 - Stadtstrukturelle Aspekte	134
7.5	Forschungsfeld 5 - Potentielle Maßnahmen	138
8	Kernaussagen und Handlungsempfehlungen für eine gesundheitsorientierte Stadtentwicklung.....	144
8.1	Grundlagen der Handlungsempfehlungen.....	144
8.2	Handlungsfeld A: Gesundheit in allen Politikbereichen.....	146
8.3	Handlungsfeld B: Flächennutzungs- und Verkehrsentwicklungsplanung	150
8.4	Handlungsfeld C: Verkehrsplanung und Verkehrstechnik.....	154
8.5	Handlungsfeld D: Stadtstrukturen	161
8.6	Folgerungen und Konkretisierung für virtuelle Quartiere	166
9	Schluss	168
9.1	Fazit der durchgeführten Untersuchungen.....	168

9.2	Reflexion zur Corona-Pandemie als aktuelle Herausforderung	171
9.3	Ausblick.....	171
10	Quellenverzeichnis	173
11	Kurzfassung.....	191
12	Anhang	i

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Forschungsbereiche in SHOTUP	2
Abb. 2: Übersicht Forschungsvorgehen SHOTUP	4
Abb. 3: Wirkungsfelder des Verkehrsmanagements.....	12
Abb. 4: Akteursspektrum in der kommunalen Verkehrsplanung.....	13
Abb. 5: Bestimmungsgrößen der menschlichen Gesundheit	15
Abb. 6: Health Map	16
Abb. 7: Wirkungsraum von Luftschadstoffen	18
Abb. 8: Emissionen ausgewählter Luftschadstoffe von 1990 bis 2019	19
Abb. 9: Größenbereiche von Partikeln in der Atmosphäre.....	20
Abb. 10: Belastungen durch Partikel in unterschiedlichen Regionen des Atemtrakts	21
Abb. 11: Schema der Luftschadstoffbelastung in einem urbanen Ballungsraum	24
Abb. 12: Isoliniendiagramm einer dimensionslosen Konzentration von Luftschadstoffen	29
Abb. 13: PM _{2,5} und NO _x -Emissionen in Abhängigkeit zur Längsneigung.....	29
Abb. 14: Vereinfachte Formel zur Berechnung der Verkehrsemissionen	31
Abb. 15: NO _x -Ausstoß je Fahrzeugkategorie nach HBEFA.....	33
Abb. 16: Feinstaub-Emissionen in µg/km pro Fahrzeug für verschiedene Fahrzeugarten,.....	34
Abb. 17: Stickoxid-Emissionen in µg/km pro Fahrzeug für verschiedene Fahrzeugarten,	34
Abb. 18: Wirkungszusammenhänge zwischen Stadt, Verkehr und Gesundheit	43
Abb. 19: Übersicht der Trends im urbanen Raum	50
Abb. 20: Expertenworkshops in HCMC (links) und Darmstadt (rechts).....	53
Abb. 21: Straßennetz Frankfurt am Main.....	56
Abb. 22: Modal-Split nach Verkehrsaufkommen im Regionalverband FrankfurtRheinMain	58
Abb. 23: Modal Split nach Wegezweck im Regionalverband FrankfurtRheinMain	59
Abb. 24: Verkehrsmittelnutzung nach Fahrtzweck im Regionalverband FrankfurtRheinMain...	60
Abb. 25: Verkehrsmittelwahl und Häufigkeit der Nutzung im Regionalverband FrankfurtRheinMain	60
Abb. 26: Stadtwachstum in HCMC.....	63
Abb. 27: Private motorisierte Fahrzeuge in HCMC (2010-2017)	64
Abb. 28: Indikatoren für die Verkehrsentwicklung in HCMC (2011-2016)	66
Abb. 29: Beispiel für den Echtzeit-Luftqualitätsindex in HCMC, Daten vom US-Konsulat	66
Abb. 30: PM ₁₀ - und NO ₂ -Konzentration an Verkehrs- und Hintergrundmessstationen in HCMC 2017.....	68
Abb. 31: Verkehrsbedingte Luftverschmutzung in Vietnam 2014 (Anmerkung: TSP-Total suspended particle).....	69
Abb. 32: Arbeitsschritte im Rahmen der Felduntersuchung.....	72
Abb. 33: Übersicht der Routen der mobilen Messungen in Frankfurt am Main	73
Abb. 34: Lage der Messstellen bei stationären Messungen	78
Abb. 35: Messstellen Q1: Lorscher Straße (links) und Q2: Thudichumstraße (rechts).....	78

Abb. 36: Messstellen Q3: Reuterweg (links) und Q4: Miquelallee (rechts).....	79
Abb. 37: Untersuchungsgebiet mobile Messungen Ho Chi Minh City.....	80
Abb. 38: Ausgewählte Abschnitte für Fußgängermessungen	81
Abb. 39: Aufbau der Messgeräte während stationärer Messungen.....	84
Abb. 40: Einteilung der Fahrradrouten in städtebauliche Blöcke	87
Abb. 41: Auszug Detail städtebauliche Blöcke.....	87
Abb. 42: Durchschnittliche Exposition gegenüber UFP in Abhängigkeit der Verkehrsmittelwahl.....	91
Abb. 43: Durchschnittliche Exposition gegenüber PM _{2,5} und PM ₁₀ in Abhängigkeit der Verkehrsmittelwahl.....	93
Abb. 44: Durchschnittliche LDSA UFP in Abhängigkeit der Verkehrsmittel- und Routenwahl ...	94
Abb. 45: Durchschnittliche Anzahlkonzentration UFP in Abhängigkeit der Verkehrsmittel- und Routenwahl	95
Abb. 46: Durchschnittliche Massenkonzentration UFP in Abhängigkeit der Verkehrsmittel- und Routenwahl	96
Abb. 47: Durchschnittliche Partikelgröße UFP in Abhängigkeit der Verkehrsmittel- und Routenwahl	97
Abb. 48: Durchschnittliche Partikelmasse PM _{2,5} in Abhängigkeit der Verkehrsmittel- und Routenwahl	98
Abb. 49: Durchschnittliche Partikelmasse PM ₁₀ in Abhängigkeit der Verkehrsmittel- und Routenwahl	99
Abb. 50: Inhalierte Dosis der Anzahlkonzentration UFP in Abhängigkeit der Verkehrsmittel- und Routenwahl	100
Abb. 51: Inhalierte Dosis der Massenkonzentration UFP in Abhängigkeit der Verkehrsmittel- und Routenwahl	101
Abb. 52: Inhalierte Dosis der Partikelmasse PM _{2,5} in Abhängigkeit der Verkehrsmittel- und Routenwahl	102
Abb. 53: Inhalierte Dosis der Partikelmasse PM ₁₀ in Abhängigkeit der Verkehrsmittel- und Routenwahl	103
Abb. 54: Anzahlkonzentration UFP nach Situationen im Radverkehr	104
Abb. 55: Anzahlkonzentration UFP nach Situationen im Radverkehr	105
Abb. 56: Durchschnittliche Anzahlkonzentrationen UFP nach Situationen im ÖPNV	106
Abb. 57: Durchschnittliche Partikelmasse PM _{2,5} nach Situationen im ÖPNV	107
Abb. 58: Durchschnittliche Partikelmasse PM ₁₀ nach Situation im ÖPNV	108
Abb. 59: Analyse städtebaulicher Einflüsse - Streckenverlauf.....	109
Abb. 60: Analyse städtebaulicher Einflüsse - Bauweise.....	110
Abb. 61: Analyse städtebaulicher Einflüsse - Nutzung.....	111
Abb. 62: Ergebnisse stationäre Messungen UFP Loscher Straße	115
Abb. 63: Ergebnisse stationäre Messungen UFP Thudichumstraße	115
Abb. 64: Ergebnisse stationäre Messungen UFP Reuterweg.....	116
Abb. 65: Ergebnisse stationäre Messungen UFP Miquelallee	116

Abb. 66: Durchschnittliche Exposition gegenüber Luftschadstoffen in Abhängigkeit der Verkehrsmittelwahl.....	117
Abb. 67: Durchschnittliche Exposition gegenüber Luftschadstoffen in Abhängigkeit der	119
Abb. 68: Beispiel für Schwankungen der Partikelanzahlkonzentration UFP in Abhängigkeit der Verkehrsmittelwahl.....	120
Abb. 69: Durchschnittliche Exposition von Fußgängern gegenüber Luftschadstoffen in Abhängigkeit städtebaulicher Eigenschaften und Zeitwahl	121
Abb. 70: Durchschnittliche Dosis inhalierter Luftschadstoffe je Fahrt in Abhängigkeit des Verkehrsmittels.....	122
Abb. 71: Abstimmung über Gewichtung von Gesundheit beim 2. Expertenworkshop	125
Abb. 72: Beispielhafte Darstellung der Luftschadstoffbelastung durch UFP entlang eines Streckenverlaufs in Frankfurt am Main	134
Abb. 73: Beispielhafte Darstellung der Luftschadstoffbelastung durch UFP entlang eines Streckenverlaufs in HCMC	137
Abb. 74: Übersicht der Handlungsempfehlungen	145
Abb. 75: Health in all Policies als Basis (A 1).....	146
Abb. 76: Integriertes Vorgehen & Bewusstseinsbildung (A 2).....	147
Abb. 77: Vorbereitung für Maßnahmen zur Verkehrswende (A 3)	148
Abb. 78: No-Regret-Ansatz wegen Wirkzusammenhängen (A 4)	149
Abb. 79: Anordnung von Funktionen und Nutzungen (B 1)	150
Abb. 80: Abstimmung zwischen Dichte und Nutzungsmischung (B 2).....	151
Abb. 81: Abhängigkeit zwischen Stadt- und Verkehrsplanung (B 3).....	152
Abb. 82: Schaffung und Sicherung von Grün- und Freiflächen (B 4).....	153
Abb. 83: Luftschadstoffbelastungen von Radfahrer*innen und Fußgänger*innen (C 1)	154
Abb. 84: Einfluss der Routenwahl auf die Luftschadstoffbelastung (C 2).....	155
Abb. 85: Luftschadstoffbelastung von Radfahrer*innen an Lichtsignalanlagen (C 3).....	156
Abb. 86: Einfluss der Lüftungsanlage auf die Luftschadstoffbelastung im Fahrzeuginnenraum (C 4)	157
Abb. 87: Luftschadstoffbelastungen in Abhängigkeit des Streckenverlaufs des ÖPNV (C 5)	158
Abb. 88: Luftschadstoffbelastungen in Abhängigkeit der Lage der ÖPNV-Haltestelle (C 6).....	159
Abb. 89: Einfluss der Zeitwahl auf die Luftschadstoffbelastung (C 7).....	160
Abb. 90: Berücksichtigung der Luftqualität (D 1).....	161
Abb. 91: Berücksichtigung Belüftungssituation (D 2).....	162
Abb. 92: Kleinteilige und passende Begrünung (D 3)	163
Abb. 93: Angepasste Straßenraumgestaltung (D 4).....	164
Abb. 94: Technische Lösungen zur Luftfilterung an Stellen mit hoher Belastung und Exposition (D 5)	165
Abb. 95: Virtueller Straßenquerschnitt eines Quartiers	166



Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Vergleich der WHO-Richtwerte und der EU-Grenzwerte	23
Tab. 2: Auswirkungen von Schluchtenparameter auf die Luftschadstoffbelastung	27
Tab. 3: Auswirkungen von Bebauung und Windrichtung auf die Luftschadstoffbelastung	28
Tab. 4: Absolute Änderung der Emissionen (g/km) der österreichischen Flotte 2018 für Tempolimits 100, 130 und 140 km/h bei ebener und freier Strecke	32
Tab. 5: Darstellung der Wirkung einer Geschwindigkeitssenkenden Maßnahme in Berlin	32
Tab. 6: Übersicht der Determinanten und Interventionsmöglichkeiten	36
Tab. 7: Urbane Megatrends	48
Tab. 8: Identifizierte Auswirkungen und Trends auf Angebots- und Nachfrageseite im urbanen Raum	52
Tab. 9: Tägliches Verkehrsaufkommen und Modal Split für die Einwohner*innen von Frankfurt am Main 2020	58
Tab. 10: Gesamtbevölkerung und Bevölkerungsverteilung nach Gebiet und Geschlecht in HCMC (1989-2019)	62
Tab. 11: Flächennutzungsänderung in HCMC (2000-2010)	63
Tab. 12: Indikatoren zur Entwicklung des Straßenverkehrsnetzes in HCMC (2011-2017)	64
Tab. 13: Indikatoren für die Verkehrsnachfrage in HCMC	65
Tab. 14: Luftqualitätsnormen verschiedenen Vorschriften	67
Tab. 15: Anteil der Motorräder an den gesamten Verkehrsemissionen in ausgewählten asiatischen Städten	68
Tab. 16: Erhobene Kenngrößen mit zugehörigen Messverfahren, Einheiten und zeitlicher Auflösung	71
Tab. 17: Atemvolumen von Pendler*innen	75
Tab. 18: Morphologischer Kasten – Kriterien Straßentypen	77
Tab. 19: Emission-Faktoren nach Fahrzeugart	79
Tab. 20: Übersicht mobile Messungen	83
Tab. 21: Auswertungskategorien Radverkehr	85
Tab. 22: Auswertungskategorien ÖPNV	86
Tab. 23: Für Analyse ausgewählte städtebauliche Charakteristika	88
Tab. 24: Übersicht der mobilen Messungen Ho Chi Minh City	89
Tab. 25: Durchschnittliche Fahrtzeiten in Abhängigkeit der Verkehrsmittel- und Routenwahl ..	90
Tab. 26: Durchschnittliche Verkehrs- und Luftschadstoffbelastungen während der stationären Messungen	113
Tab. 27: Ergebnisse der Korrelationsanalyse zwischen Luftschadstoffen und Verkehrsbelastung	114
Tab. 28: Bewertung der Belastung durch UFP in Abhängigkeit der Verkehrsmittelwahl	129
Tab. 29: Bewertung der Belastung durch PM _{2,5} und PM ₁₀ in Abhängigkeit der Verkehrsmittelwahl	130

Tab. 30: Gesamtbewertung der Luftschadstoffbelastung in Abhängigkeit der Verkehrsmittelwahl.....	130
Tab. 31: Bewertung der Belastung durch UFP in Abhängigkeit der Verkehrsmittel- und Routenwahl	131
Tab. 32: Bewertung der Belastung durch PM _{2,5} und PM ₁₀ in Abhängigkeit der Verkehrsmittel- und Routenwahl	132
Tab. 33: Gesamtbewertung der Luftschadstoffbelastung in Abhängigkeit der Verkehrsmittel- und Routenwahl	132
Tab. 34: Beispiele für technische Maßnahmen zur Luftreinhaltung	141
Tab. 35: Akteure der akteursbezogenen Handlungsempfehlungen	144
Tab. 36: Maßnahmen in virtuellen Quartieren.....	167

Abkürzungsverzeichnis

AP	Arbeitspaket
AQI	Air Quality Index/Luftqualitätsindex
BauGB	Baugesetzbuch
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BImSchV	Bundes-Immissionsschutzverordnung
BIP	Bruttoinlandsprodukt
DFG	Deutschen Forschungsgemeinschaft
GBE	Gesundheitsberichterstattung
GG	Grundgesetz
IV	Individualverkehr
IVV	Institut für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik
HBEFA	Handbuch für Emissionsfaktoren
HCMC	Ho Chi Minh City
HIA	Health Impact Assessment
HLNUG	Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie
LDSA	lung deposited surface area
LM	Fachgebiet Landmanagement
LSA	Lichtsignalanlagen
MIV	Motorisierter Individualverkehr
NMIV	Nichtmotorisierter Individualverkehr
ÖV	Öffentlicher Verkehr
ÖPFV	Öffentlicher Personenfernverkehr
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
PM	Particulate Matter
PM _{2,5}	Particulate Matter mit einem aerodynamischen Durchmesser < 2,5 µm
PM ₁₀	Particulate Matter mit einem aerodynamischen Durchmesser < 10 µm
ppm	parts per million
SHOTUP	Sustainable and Health-Oriented Transport Planning and Urban Planning
SUP	Strategische Umweltverträglichkeitsprüfung
TPS	Schwebstoffe insgesamt
TUDa	Technische Universität Darmstadt
UBA	Umweltbundesamt
UFP	Ultrafeine Partikel
UTC	University of Transport and Communications



UVP	Umweltverträglichkeitsprüfung
VGU	Vietnamese-German University
VGTRC	Vietnamese-German Transport Research Centre
WHO	Weltgesundheitsorganisation

1 Einleitung

Dieser Bericht basiert auf den Ergebnissen des Forschungsvorhabens ‚Sustainable and Health-Oriented Transport Planning and Urban Planning‘ (SHOTUP), das von April 2019 bis September 2021 in Kooperation der Technischen Universität Darmstadt (TUDa) und der Vietnamesisch-Deutschen Universität (VGU) in Ho Chi Minh City durchgeführt wurde. Anlässe zur Forschung waren aktuelle gesellschaftliche Entwicklungen sowie die weltweite gesundheitliche Belastungssituation aufgrund von Luftschadstoffen in Städten, die eine nachhaltige und gesundheitsorientierte Weiterentwicklung der urbanen Räume erfordern.

1.1 Notwendigkeit städtischer Transformation im Kontext gesellschaftlicher Herausforderungen

Die Zahl der Menschen, die in Städten wohnen, steigt weltweit kontinuierlich. Seit 2007 lebt die Weltbevölkerung mehrheitlich in Städten und der Anteil wird nach Schätzungen der UN bis 2030 auf über 60 Prozent ansteigen. Diese Verstädterung ist einer der wichtigsten globalen Trends, der die Städte unweigerlich verändern wird. (Clos und Surinach 2019) Ergänzend zu den Vorteilen der Urbanisierung müssen negative Aspekte, wie erhöhte Gesundheitsrisiken, vermehrt in den Blick genommen werden (WHO Regional Office for Europe 2018). So sehen Giffinger und Haindlmaier trotz vielfältiger Bemühungen die nachhaltige Stadtentwicklung durch Effekte der Globalisierung und der Verstädterung stark gefährdet (Giffinger und Haindlmaier 2015: 137-138). Enge Bezüge bestehen hierbei zum Verkehr. Während als positive Wirkung der Fortbewegung ein Gewinn an Fitness durch Laufen und Fahrradfahren gesehen wird, beeinträchtigt der motorisierte Verkehr nicht nur durch Lärm, Stress, Unfälle und kleinere Verletzungen die Gesundheit von Verkehrsteilnehmenden und Anlieger*innen, sondern trägt zudem in hohem Maße zur städtischen Luftverschmutzung bei (Hoffmann 2019). Neben dem Anstieg des Verkehrsaufkommens hat ein sich wandelndes Verkehrsverhalten Veränderungen der Luftschadstoffbelastung zur Folge. Je mehr Menschen in Städten leben, desto mehr Verkehr entsteht, und durch den Wohlstandsgewinn wird verstärkt der motorisierte Individualverkehr genutzt, der mit höheren Emissionen und daraus resultierenden Immissionen für die Menschen verbunden ist. Die hohe Luftverschmutzung, mit der 6,5 Mio. vorzeitige Todesfälle pro Jahr weltweit in Verbindung gebracht werden (WHO Regional Office for Europe 2018), wird zu einem großen Teil durch bestehende Fahrzeugtechnologien sowie begrenzten Luftaustausch aufgrund ungeeigneter Gebäudestrukturen verursacht (Hoffmann 2019; Baumgart et al. 2018a).

Das Thema Gesundheit ist für Viele von großer Bedeutung, und das Bewusstsein für gesundheitliche Auswirkungen nimmt stetig zu (BBSR 2019). Die Weltgesundheitsorganisation definiert Gesundheit als Zustand des vollständigen körperlichen, geistigen und sozialen Wohlbefindens (WHO 1946). Mittlerweile ist in der Gesundheitswissenschaft nachgewiesen, dass neben individuellen Einflussfaktoren die gebaute Umwelt und deren Interaktion mit dem Individuum als Auslöser für Gesundheit oder Krankheit betrachtet werden muss. Verbesserte Lebensumwelt, weitergehende Bildung und steigendes Einkommen sind dabei voraussetzende Faktoren für die Verbesserung der menschlichen Gesundheit. Stadtentwicklung kann dabei die Bereiche beeinflussen, die u.a. die Lebens- und Arbeitsbedingungen, die Wohnverhältnisse und Aktivitäten betreffen. Jedoch werden bisher die gesundheitlichen Auswirkungen in der Stadt- und Verkehrsplanung nicht ausreichend berücksichtigt. (Hornberg et al. 2018; Tran 2018: 285; WHO 2013: 156) „Gesundheit‘ [ist] noch kein gängiges Entscheidungskriterium in Planungsprozessen bzw. es fehlt ein Bewusstsein für die [...] Zusammenhänge und Vorteile einer gesundheitsfördernden Stadtteilentwicklung“ (Fehr et al. 2005: 116). Darüber hinaus steht die Nachhaltigkeit, die durch die verabschiedeten UN-Nachhaltigkeitsziele international nochmals an Bedeutung gewonnen hat, in unmittelbarer Wechselwirkung mit der Gesundheit. Durch die weltweite Verstädterung und den damit einhergehenden ökologischen und sozialen Problemen wurde das Konzept der nachhaltigen Entwicklung vermehrt auf Städte übertragen. Gesundheit und die Schaffung sowie Erhaltung gesundheitsförderlicher Lebensbedingungen wurde somit eine zentrale Zielsetzung der integrierten Stadtentwicklung. (Baumeister et al. 2019: 159-160; Hopfner und Zakrzewski 2012:

47) Insgesamt erscheint ein gesundheitsorientierter Planungsansatz notwendig, um eine hohe Lebensqualität in den Städten zu gewährleisten.

1.2 Forschungsprojekt SHOTUP

Die Planung und Entwicklung von Städten finden in vielfältigen Spannungsfeldern statt. Ziel des gut zweijährigen Forschungsprojekts ‚Sustainable and Health-Oriented Transport Planning and Urban Planning‘ (SHOTUP) war es, die Wirkungszusammenhänge zwischen Stadtstrukturen, Verkehrssystemen und Gesundheit aufzuzeigen (s. Abb. 1). Darüber hinaus wurden ausgewählte Wirkungszusammenhänge mit Hilfe von Messungen der Luftschadstoffbelastung in verschiedenen Quartieren in Frankfurt am Main und Ho Chi Minh City (HCMC) analysiert. Neben den Auswirkungen der Verkehrsmittel-, Routen- und Zeitwahl wurde der Einfluss verschiedener städtebaulicher Elemente auf die Luftschadstoffbelastung untersucht (s. Kap. 6).

HCMC ist die größte Wirtschaftsmetropole in Vietnam mit über acht Millionen Einwohner*innen und Motor des gesellschaftlichen sowie ökonomischen Wandels des südostasiatischen Landes. Besonders der wirtschaftliche Aufschwung und der enorme Bevölkerungsanstieg haben zu einem sprunghaft ansteigenden Verkehrsbedarf und neuen Anforderungen an die unzureichende Verkehrsinfrastruktur geführt. Negative Folgen für die lokale Gesundheit sind ständig zunehmende Staus und Umweltbelastungen durch den Verkehr. (Waibel 2013; Zink 2013) Auch Frankfurt am Main gehört in Deutschland und Europa zu einem der wichtigen Wirtschaftsstandorte, der durch eine hohe Nachfrage nach Wohn- und Gewerbefläche sowie steigendes Verkehrsaufkommen und Bevölkerungszahlen mit ähnlichen Herausforderungen zu kämpfen hat.



Abb. 1: Forschungsbereiche in SHOTUP

Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von pixaby-Bildern

Die aktuelle Luftqualität in der vietnamesischen Metropole HCMC zeigt sehr deutlich die Notwendigkeit einer gesundheitsorientierten Stadt- und Verkehrsplanung. Aber auch in Frankfurt am Main ist die Situation noch nicht als gut zu bezeichnen. Für lebenswertere und zukunftsfähige Städte muss sich die urbane Mobilität ändern, und die aktuellen urbanen Transformationsprozesse müssen in den Blick genommen sowie die baulichen Grundlagen für gesunde Städte geschaffen werden. Ein integriertes Vorgehen und das Verständnis über die Haupttrends der Urbanisierung sind entscheidend für die Umsetzung der Agenda für nachhaltige Entwicklung bis 2030 (UN 2018). Denn „die Renaissance der Städte zeigt deutlich, dass immer mehr Menschen, allen Belastungen zum Trotz, in Städten leben wollen. Umso wichtiger wird für wirtschaftlich erfolgreiche und sozial stabile Städte der Faktor Le-

bensqualität“ (Zukunftsinstitut 2020e). Dafür müssen die Akteure der Stadtentwicklung konkret wissen, welche Einflussmöglichkeiten Stadt- und Verkehrsplanung auf die Gesundheit der städtischen Bevölkerung haben. Aus diesem Grund wurde detailliert untersucht, wie die Forschungsfelder Stadt, Verkehr und Gesundheit zusammenwirken. Nur wenn hinreichend belegt ist, welche Maßnahmen und Strategien innerhalb der beiden Fachdisziplinen die gesundheitlichen Auswirkungen positiv beeinflussen, können diese begründet und umgesetzt werden. Um die Bewusstseinsbildung bezüglich verkehrsbedingter Luftschadstoffimmissionen bei der Stadtentwicklung zu fördern, wurde als Ergebnis von SHOTUP ein praxisbezogener Leitfaden zu deren integrativen Berücksichtigung in Planungsprozessen erstellt. Es wurden Möglichkeiten erarbeitet, um städtische Strukturen schrittweise anzupassen, ein gesundes städtisches Umfeld für die Menschen zu ermöglichen und gesundheitliche Auswirkungen zu verbessern.

1.3 Forschungsdesign des Projekts SHOTUP

Dem gewählten Vorgehen des Forschungsprojekts liegt ein Forschungsdesign zugrunde, das neben der Aufstellung von Forschungsfragen unterschiedliche empirische Methoden zu deren Bearbeitung vorsieht. Das Forschungsprojekt hat sich mit folgender übergeordneten Forschungsfrage auseinandergesetzt:

„Welchen Einfluss haben Stadt- und Verkehrsplanung auf die Luftschadstoffbelastung in Städten und welche Interaktions- und Einflussmöglichkeiten haben sie auf die Gesundheit der städtischen Bevölkerung?“

Die komplexen Auswirkungen der Siedlungsstrukturen wurden im Verlauf des Projekts detaillierter untersucht und gesundheitsorientierte Maßnahmen identifiziert, um zukünftig die vielfältigen Wirkungszusammenhänge verstärkt zu berücksichtigen. Darunter sollen sowohl Maßnahmen zur Gesundheitsförderung als auch zur Prävention verstanden werden. Während die Gesundheitsförderung auf die Stärkung der Gesundheitsressourcen und -potenziale abzielt, sollen durch die zielgerichtete Prävention Risiken und Belastungen gesenkt oder verhindert werden (Sterdt und Walter 2012). Hierbei wurde der Fokus auf bauliche Interaktions- und Einflussmöglichkeiten gelegt, da insbesondere bei der konkreten Umsetzung von Ansätzen der gesundheitsorientierten Stadtentwicklung ein Defizit besteht. Teilweise sind Erkenntnisse in den umsetzenden Disziplinen nicht ausreichend bekannt, Prävention wird fokussiert oder sie sind nicht zur praktischen Anwendung aufgearbeitet. (Baumeister et al. 2019: 159-160; Böhm et al. 2020: 428; Sterdt und Walter 2012: 34-35) „Evidence of the health effects of land-use and transport policies needs to be used more effectively to guide the design of cities so that they enhance health and environmental sustainability“ (Sallis et al. 2016: 2936). Die folgende Abbildung stellt die Operationalisierung der übergeordneten Forschungsfrage in Forschungsfeldern bis zur Erstellung der Handlungsempfehlungen für eine nachhaltige und gesundheitsorientierte Stadtentwicklung dar.



Abb. 2: Übersicht Forschungsvorgehen SHOTUP
 Quelle: Eigene Darstellung

Forschungsfeld 1 - Wirkzusammenhänge und Zielkonflikte: Es existieren gesundheitsbezogene Zielkonflikte und vielfältige Wirkzusammenhänge zwischen Stadt-, Verkehrsplanung und Gesundheit.

- Forschungsfrage 1.1: Welche Wirkzusammenhänge bestehen zwischen den Fachdisziplinen Stadt, Verkehr und Gesundheit?
- Forschungsfrage 1.2: Was sind Zielkonflikte zwischen den Fachdisziplinen Stadt, Verkehr und Gesundheit?
- Forschungsfrage 1.3: Welche Konsequenzen haben die Erkenntnisse der Wirkungszusammenhänge auf die Gewichtung des Belanges Gesundheit bei planerischen Entscheidungen und wie kann der Belang ein höheres Gewicht erhalten?

Forschungsfeld 2 - Einflussfaktoren der Wirkzusammenhänge: Diese Wirkzusammenhänge sind abhängig von beeinflussbaren und nichtbeeinflussbaren rahmenbildenden Faktoren.

- Forschungsfrage 2.1: Welche rahmenbildenden Faktoren der Wirkzusammenhänge lassen sich identifizieren?
- Forschungsfrage 2.2: Können die rahmenbildenden Faktoren in beeinflussbar und nichtbeeinflussbar unterteilt werden?
- Forschungsfrage 2.3: Welche Trends wirken auf die Einflussfaktoren der Wirkzusammenhänge und welche Zukunftsbilder sind zu erwarten?

Forschungsfeld 3 - Verkehrsplanerische Aspekte: Verkehrsangebot, Verkehrsnachfrage und Verkehrsfluss beeinflussen die Luftqualität.

- Forschungsfrage 3.1: Kann die Luftschadstoffbelastung von Verkehrsteilnehmer*innen durch die Verkehrsmittelwahl beeinflusst werden?
- Forschungsfrage 3.2: Können Verkehrsteilnehmer*innen durch die Routenwahl ihre persönliche Exposition gegenüber Luftschadstoffbelastungen beeinflussen?
- Forschungsfrage 3.3: Können Verkehrsteilnehmer*innen durch die Zeitwahl ihre persönliche Exposition gegenüber Luftschadstoffbelastungen beeinflussen?
- Forschungsfrage 3.4: In welchen Situationen sind Radfahrer*innen besonders hohen Luftschadstoffbelastungen ausgesetzt?
- Forschungsfrage 3.5: In welchen Situationen sind Nutzer*innen des ÖPNV besonders hohen Luftschadstoffbelastungen ausgesetzt?

Forschungsfeld 4 - Stadtstrukturelle Aspekte: Städtebauliche Strukturen haben Auswirkungen auf die Belastungssituation.

- Forschungsfrage 4.1: Welche Erkenntnisse bezüglich städtebaulicher Strukturen und deren Auswirkung auf die Luftqualität sind festzustellen?
- Forschungsfrage 4.2: Sind Unterschiede in der Luftschadstoffbelastung verschiedener städtebaulichen Situationen durch Messungen nachweisbar?
- Forschungsfrage 4.3: Welche messbaren Effekte hat die Gestaltung von Straßenquerschnitten inklusive städtebauliche Randbebauung auf die Belastungssituation?
- Forschungsfrage 4.4: Sind Grünflächen innerhalb von Stadtgebieten Rückzugsräume mit geringerer Luftschadstoffbelastung?
- Forschungsfrage 4.5: Welche Wirkungen hat eine straßenbegleitende Begrünung auf die Belastungssituation durch Luftschadstoffe?

Forschungsfeld 5 - Potentielle Maßnahmen: Es existieren städtebauliche und verkehrliche Lösungen bzw. Lösungsansätze zur Luftverbesserung bzw. zum Schutz vor Luftschadstoffbelastung.

- Forschungsfrage 5.1: Welche strategischen und regulatorischen Maßnahmen aus den drei Fachdisziplinen können potenziell die menschliche Gesundheit positiv unterstützen?
- Forschungsfrage 5.2: Mit welchen baulichen (und technischen) Maßnahmen können die Erkenntnisse aus den Forschungsfeldern 3 und 4 umgesetzt werden?
- Forschungsfrage 5.3: Kann durch eine angepasste Straßenraumgestaltung Einfluss auf die Luftschadstoffbelastung genommen werden?

Um die in Forschungsfelder eingeteilten Forschungsfragen zu beantworten, wurde zunächst eine Literaturrecherche durchgeführt, die in Kapitel 2 dargestellt ist. Aufgrund der langjährigen Tradition innerhalb der drei Fachdisziplinen, konnte hierbei auf eine Vielzahl bestehender Forschungsergebnisse aufgebaut werden. Diese wurden im Zuge der intensiven Literaturrecherche in einem nächsten Schritt auf Widersprüche und Synergien überprüft. Identifizierte Wirkzusammenhänge (Kap. 3) werden dann im Zusammenhang mit den abzusehenden Trends diskutiert (Kap. 4). Dazu dienten auch interdisziplinäre Workshops, die in Deutschland sowie Vietnam mit Expert*innen aus den jeweiligen Gebieten durchgeführt wurden. Expert*innen verfügen über spezifisches theoretisches und praktisches Prozess- und Deutungswissen (Eckardt 2014: 151). Da „städtische Herausforderungen [...] besonders häufig auf Quartiersebene zum Ausdruck“ (EU 2020: 3) kommen und „Quartiere als sozialräumliche Einheiten [...] eine geeignete Interventionsebene für [...] integrierte Planungs- und Maßnahmenkonzepte des nachhaltigen Stadtumbaus“ (Bott 2018: 23) darstellen, wurde die

räumliche Ebene als Betrachtungsebene gewählt. Die Ebene Quartier wird meistens nach Schnur wie folgt definiert: „Ein Quartier ist ein kontextuell eingebetteter, durch externe und interne Handlungen sozial konstruierter, jedoch unscharf konturierter Mittelpunkt-Ort alltäglicher Lebenswelten und individueller sozialer Sphären, deren Schnittmengen sich im räumlich-identifikatorischen Zusammenhang eines überschaubaren Wohnumfelds abbilden“ (Schnur 2008: 40).

Beiden Untersuchungsräume HCMC und Frankfurt am Main werden in einem ersten Schritt grob analysiert, sodass Quartiere für die Messungen identifiziert werden konnten (Kap. 5). Hierbei wurden die beiden Großstädte analysiert, um die Aufgabenfelder der Stadtentwicklung - Neubau und Bestandsentwicklung - zu betrachten. Die Wahl der verschiedenen Quartiere bzw. Messsituationen erfolgte insbesondere unter Berücksichtigung verschiedener Situationen der Verkehrssysteme und daraus resultierender Umweltauswirkungen. Der Fokus lag auf unterschiedlichen Straßenquerschnitten inkl. Randbebauung, die als Stellvertreter für städtebauliche Quartierstypen dienten. Daher war die Auswahl abhängig von folgenden zwei Punkten:

- Forschungsfragen der Forschungsfelder,
- Analyse der Untersuchungsräume, wie Dichte (Bevölkerung, Gebäude, Grünflächen, ...), verschiedene Stadtstrukturen, Belüftungssituation (z.B. Ausrichtung der Straßen), Verkehrsstärke sowie typische Viertel im Bestand und Neubau.

Die Wahl war des Weiteren durch die Anzahl der Messgeräte, der Messmethodik und insbesondere in Vietnam durch die Anzahl der Messtage und die räumliche Nähe der Messpunkte beeinflusst. Die genaue Auswahl wird in Kapitel 6 zum methodischen Vorgehen näher erläutert. Bei den durchgeführten Messungen, ausführlich vorgestellt in Kapitel 6, wurden folgende für die Gesundheit relevante Luftschadstoffe und Einflussgrößen erfasst:

- ultrafeine Partikel (UFP), Feinstaub $PM_{2,5}/PM_{10}$
- Stickoxide
- Verkehrsstärke
- meteorologische Kenngrößen wie Temperatur, Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Luftfeuchtigkeit

Für die Analyse des Einflusses der städtebaulichen Elemente wurden zwei Messmethoden angewendet. Es kamen stationäre Messungen zum Einsatz, um die Zusammenhänge zwischen Verkehrsstärke, Straßentyp und Luftschadstoffbelastung zu ermitteln. Hierfür wurden zunächst Straßentypen anhand festgelegter Kriterien, wie Bebauungshöhe, Bauweise und Straßenraumbreite, klassifiziert und für die weitere Analyse ausgewählt. Des Weiteren wurden mobile Messungen durchgeführt, um den Einfluss städtebaulicher Elemente auf die Luftschadstoffbelastung zu untersuchen. In Kapitel 6 werden die Ergebnisse der Messungen detailliert beschrieben und in Kapitel 7 mit den weiteren Erkenntnissen diskutiert. Die gewonnenen Erkenntnisse wurden ebenfalls durch einen Expertenworkshop ergänzt, um daraus Handlungsempfehlungen für eine nachhaltige und gesundheitsorientierte Stadt- und Verkehrsplanung zu entwickeln (Kap. 8). Abschließend erfolgt noch ein Fazit mit Ausblick (Kap. 9).

2 Stadtplanung, Verkehrsplanung und Verkehrstechnik sowie Gesundheitswissenschaften im Kontext urbaner Luftschadstoffbelastung

In diesem Kapitel werden die wesentlichen bestehenden Erkenntnisse aus Stadt-, Verkehrsplanung und Verkehrstechnik sowie den Gesundheitswissenschaften im Kontext mit urbaner Luftbelastung dargestellt und die theoretischen Grundlagen zum Thema Luftschadstoffe behandelt. Ziel des Kapitels ist die Analyse der Forschungsstände in den Fachdisziplinen und die Frage, inwieweit Überschneidungen, Synergien und Widersprüche vorliegen. Gleichzeitig sollen Maßnahmen identifiziert werden, die Ansatzpunkte einer gesundheitsorientierten und nachhaltigen Stadtentwicklung bieten.

2.1 Stadtentwicklung

Da in den drei betrachteten Forschungsbereichen die meisten Begriffe nicht eindeutig definiert sind, werden diese jeweils für den betreffenden Bereich definiert. In SHOTUP soll unter **Stadtentwicklung** „alle Veränderungen der Stadtstruktur, z.B. des Bevölkerungsaufbaus, der Beschäftigtenstruktur, der Arbeitsplätze, der räumlichen Verteilung der Bevölkerung und der Flächennutzung“ (Friedrichs 2018: 2422) verstanden werden und somit ebenfalls die städtische Siedlungs- und Verkehrsentwicklung beinhaltet. Der Begriff Stadtentwicklung wird ebenfalls für Stadtentwicklungsplanung verwendet, die das Ziel hat, den Prozess städtischer Zukunftsgestaltung zu steuern, zu koordinieren und dabei alle entwicklungsrelevanten Aspekte miteinzubeziehen (Wékel 2018: 2435). Mit **gesundheitsorientiert** soll, im Vorgriff auf Kapitel 2.4, sowohl die Gesundheitsprävention als auch die Gesundheitsförderung verstanden werden. Beide Strategien werden dort näher erläutert. Der letzte Baustein, die **nachhaltige Stadtentwicklung**, soll in diesem Bericht als eine Stadtentwicklung definiert werden, die die sozialen, wirtschaftlichen und umweltschützenden Anforderungen auch in Verantwortung gegenüber künftigen Generationen miteinander in Einklang bringt, wie es als Aufgabe der Bauleitplanung in § 1 Abs. 5 BauGB heißt. Die Bauleitplanung ist ein Instrument der Stadtplanung.

2.2 Stadtplanung

Stadtplanung bezeichnet das planerische Einwirken auf die räumliche Entwicklung einer Stadt und ist damit eine Teilmenge von Stadtentwicklung (Sieber 2017: 20). „Stadtplanung ist eine fachliche Disziplin, die sich mit der Planung und Steuerung der räumlichen Entwicklung auf der kommunalen Ebene beschäftigt. Prägend ist der Zukunftsbezug. Sie umfasst alle Tätigkeiten zur vorausschauenden Ordnung und Lenkung der Entwicklung der gebauten Umwelt in städtischen wie auch ländlichen Räumen [...] und deren jeweiligen Teilräumen“ (Pahl-Weber und Schwartz 2018: 2510). Da insbesondere bauliche Maßnahmen in SHOTUP thematisiert werden, geht es um die Verwirklichung der Stadtplanung, die als **Städtebau** und Teil der Stadtplanung definiert werden kann. Städtebau fokussiert den gebauten Teil des Stadtraumes und wird durch weitere Dimensionen aus dem Bereich Stadtplanung, z.B. sozialen, ökologischen und ökonomischen Dimensionen, ergänzt. Zwischen beiden Disziplinen bestehen Überschneidungen und enge Zusammenhänge, weil beide das Koordinieren der räumlichen Verteilung und Verflechtung von Nutzungen und die baulichen Bestandteile des kommunalen Gemeinwesens thematisieren und sich gegenseitig ergänzen. (Pahl-Weber und Schwartz 2018: 2510) Diese Definitionen zielen schon auf die vielfältigen Aufgabenfelder der Stadtplanung.

2.2.1 Aufgaben und Bausteine der Stadtplanung

Stadtplanung in Deutschland steht in einem engen Verhältnis mit der hoheitlichen kommunalen Aufgabe der örtlichen Planung nach Art. 28 GG. Aufgaben sind die **Ordnung, Entwicklung und Sicherung des städtischen Raumes** mit dem zur Verfügung stehenden Instrumentarium und den gesetzlichen Grundlagen. Dafür sind die unterschiedlichen Anforderungen und konkurrierenden Interessen an den Raum aufeinander abzustimmen. (Baumeister et al. 2019: 46; Köckler 2017: 56; Pahl-Weber und Schwartz 2018: 2517) „Die menschliche Gesundheit war ein, wenn nicht sogar der maßgebende Faktor für die Entwicklung der modernen Stadtplanung, insbesondere im Zusammenhang mit besseren Wohn- und Lebensverhältnissen in Städten seit Ende des 19. Jahrhunderts. Bis heute ist die

menschliche Gesundheit von zentraler Bedeutung für diese Disziplin, die trotz sich ständig wandelnder Anforderungen an die Nutzung städtischer Räume insbesondere zu einer gesunden städtischen Umwelt beitragen soll“ (Knieling und Kretschmann 2018: 201). Dabei lassen sich Bausteine identifizieren, die über die Gestaltung der natürlichen und gebauten Umwelt Einfluss auf die Gesundheit haben. Drei Bausteinen, die Einfluss auf Gesundheit und Lebensqualität im urbanen Raum haben sollen näher betrachtet werden:

- Stadtstruktur
- Flächennutzung
- Dichte

„Unter Stadtstruktur versteht man die Anordnung und das Zusammenwirken der einzelnen Teile einer Stadt zu einem Gesamtgefüge einschließlich der dieser Anordnung zugrunde liegenden Prinzipien, Ideen und Gesetzmäßigkeiten. Ein räumliches Abbild der Stadtstruktur ist der Grundriss der Stadt“ (Reicher 2017: 46). Diese Struktur wird durch die beiden Aspekte Flächennutzung und Dichte inhaltlich weiter ausgestaltet.

Stadtstruktur

Stadt ist ein komplexes Gebilde. Diese Komplexität besteht aus sozialer, kultureller und räumlicher Komplexität sowie deren Wechselwirkungen. Die räumliche Komplexität resultiert aus Gebäuden und ihren verschiedensten Nutzungen, wie Wohnen, Büro, Einkaufen oder Freizeit, und den Verbindungen, Straßen und Wegen. (Adli 2017: 318) „Grundsätzlich haben Baumassen (Gebäudeform, Gebäudestellung, Bauvolumen) Auswirkungen auf das Mikroklima und die Lufthygiene“ (Umweltbundesamt 2019a: 9). Bebauungsstrukturen wirken sich auf das städtische Windfeld aus und senken durch die erhöhte Rauigkeit sowie die größere Oberfläche die mittlere Windgeschwindigkeit ab. Dies ist wichtig für die Stadtplanung, da die Feinstaubkonzentration und die Windgeschwindigkeit durch die verdünnende Wirkung des Windes einen deutlich negativen Zusammenhang haben. Der verminderte Luftaustausch behindert des Weiteren den Schadstofftransport. Gleichzeitig können neben den niedrigeren Windgeschwindigkeiten und häufigen Windstillen auch stärkere kleinräumige Beeinflussungen der Windrichtung und eine erhöhte Böigkeit beobachtet werden. Dies hat auch Effekte auf den Komfort im Stadtraum. Jedoch variiert die Belüftungssituation zwischen verschiedenen Bebauungsstrukturen (geschlossene und offen Bauweise, mittlere Gebäudehöhe und Homogenität der Bebauung), und weiteren Merkmalen, wie Topografie, Klima und Bewuchs, stark. (Kipsch 2014: 2-3; Merbitz 2013: 12; Merbitz und Schneider 2012: 139; MVI BW 2012: 34) Bei Messungen in Berlin wurde ein eindeutiger Effekt zwischen städtischen Gebieten in Blockrandbebauung (hohe, geschlossene Strukturen) und Gebieten mit offenerer Einfamilienhausbebauung nachgewiesen, der in Zusammenhang mit den jeweiligen Belüftungsverhältnissen gebracht wurde (Bonn et al. 2016: 7801). Neben der Vielfalt der Bebauungsstrukturtypen (Ein- und Zweifamilienhausgebieten, über Geschosswohnungsbau und Blockrandbebauung bis hin zu inhomogenen Gebieten) ist das Erschließungsnetz und dessen Ausrichtung zur Hauptwindrichtung entscheidend (Hopfner und Zakrzewski 2012: 59). Die Erschließungsqualität, verstärkt durch eine hohe Aufenthaltsqualität, kann sich ebenfalls gesundheitsfördernd auf das Bewegungsverhalten auswirken. (Baumeister et al. 2019: 37-38; Braubach und Grant 2010: 58)

Generell bildet die Stadtstruktur die Grundstruktur des täglichen Lebens in der Stadt. Sie entscheidet z.B. durch Zugang zu Verkehrsangeboten, einer hohen Bevölkerungs- und Nutzungsdichte und dem Straßennetz mit darüber, ob Menschen zu Fuß gehen oder mit dem Fahrrad fahren (NSW Department of Health: 37). „Das Leitbild der **„kompakten Stadt der kurzen Wege“**, aber auch die angestrebte Erlebnisdichte in urbanen Stadträumen impliziert eine Mischung der Funktionen Wohnen, Arbeiten, Erholen und Versorgen. Ergänzt werden können diese noch durch die Grundfunktionen Sich-Bilden, Am-Verkehr-Teilnehmen und In-Gemeinschaft-Leben. Vor allem durch die Vermeidung von (insbesondere motorisiertem) Verkehr und dem impliziten Schutz der Flächen im Außenbereich leistet die-

ser Ansatz einen großen Beitrag zum Umwelt- und Klimaschutz“ (Adrian et al. 2018: 310). Die Ermöglichung sogenannter kurzer Wege soll zur Reduktion von verkehrsbedingten Emissionen beitragen können (Khreis et al. 2019: 589; Stevenson et al. 2016: 2925). Dieses Ziel kann allerdings ebenfalls negative Auswirkungen haben. Beispielsweise entsteht Konfliktpotenzial aufgrund von störenden Einflüssen auf das Wohnen (Umweltbundesamt 2017b: 11). Diese lassen sich in Teilen jedoch vermeiden. Zum Beispiel durch eine abgestimmte Anordnung und Wahl der Flächennutzungen. Cho und Choi kommen in diesem Zusammenhang zu folgendem Schluss: „This study suggests that it is difficult to confidently assert that a compact city contributes to a reduction in air pollution; however, if compact urban development does contribute to a rising proportion of green areas, then such a development is helpful in mitigating air pollution“ (Cho und Choi 2014: 5979).

Flächennutzungen

Durch die Anordnung und Mischung der Nutzungsarten (Wohnen, Arbeiten, Freizeit, ...) kann eine wichtige Grundlage des städtischen Zusammenlebens geschaffen werden. In SHOTUP ist besonders die gegenseitige Abhängigkeit zwischen der Verkehrsinfrastruktur und der Flächennutzungsstruktur relevant (Grant 2019: 234; Lopez 2012: 138). Die Siedlungsentwicklung kann verkehrsvermeidend oder verkehrsinduzierend gestaltet werden. Positive Wirkungen auf das Verkehrsaufkommen haben hierbei u.a. eine Siedlungsentwicklung entlang der Schiene, eine Nutzungsmischung, keine große Flächenausdehnung und die Vermeidung von Zersiedelung. Weiter sollten stark emittierende Anlagen und Hauptverkehrsstraßen entfernt von sensiblen Nutzungen sowie mit Berücksichtigung der Belüftungssituation angesiedelt werden. Denn die Luftschadstoffbelastung verringert sich exponentiell mit der Distanz zur Quelle. (Beckröge 1999: 92; Gertz 2020: 369; Hoffmann 2019: 431; MVI BW 2012: 188, 226) „Bei der Entwicklung der Quartiere entsteht weniger Verkehr, wenn auf eine vielfältige Nutzungsmischung sowie auf kompakte fuß- und radverkehrsfreundliche Strukturen mit einer ausreichenden Bevölkerungsdichte und auf eine gute Anbindung an öffentliche Verkehrsmittel geachtet wird“ (Umweltbundesamt 2021a).

Allgemein verbessert Vegetation durch das Binden von Schadstoffen aus der Umgebungsluft die Luftqualität und fehlende **Grünflächen** beeinträchtigen das Wohlbefinden sowie die Gesundheit. Es bestehen signifikante negative Korrelationen mit den Particulate Matter (PM) Konzentrationen (s. Kap. 2.5.2). Besonders effektiv sind großflächige und zusammenhängende Grünflächen sowie Waldgebiete, die ebenfalls als Luftleitbahnen Frischluft in den städtischen Raum leiten können. Daher sollten diese Flächen von Bebauung freigehalten, gesichert sowie an verkehrsreichen Standorten angeordnet werden. (Fehr und Hornberg 2018a: 344; Kipsch 2014: 17; Merbitz 2013: 66, 143; MVI BW 2012: 30; Säumel et al. 2016: 71) Ebenfalls Auswirkungen auf die lufthygienische Situation können kleinteilige Begrünung (z.B. Bauwerks- und Straßenbegrünung) sowie Gewässer besitzen, indem sie ein Mitführen der wassernahen Luftschichten bewirken (Kuttler 1998: 161-163; Säumel et al. 2016: 76). Die Wirkungen von kleinräumiger Bepflanzung im Straßenraum wird in Kapitel 2.5.3 zusammen mit weiteren Einflussfaktoren der Luftbelastung in Straßenräumen beschrieben.

Dichte

Unter Dichte können unterschiedliche Tatbestandteile summiert werden: Nutzungs-, Bevölkerungs- und Bebauungsdichte. Die Effekte der **Nutzungsdichte** auf die Luftschadstoffbelastung wurde bereits vorstehend unter dem Thema Flächennutzungen/Nutzungsmischung angedeutet. Eine ausreichende **Bevölkerungsdichte** ist ausschlaggebend für eine gute Anbindung mit dem öffentlichen Verkehr, kann jedoch Stress und Nutzungskonflikte hervorrufen (Umweltbundesamt 2021a). „Studien weisen zudem darauf hin, dass die Anzahl von Wegen, die zu Fuß oder mit dem Fahrrad zurückgelegt werden, bei einer höheren Gebäudedichte und Nutzungsmischung zunimmt“ (Baumeister et al. 2019: 68). **Bauliche Dichte** ist aufgrund ihrer nachteiligen Auswirkungen auf die Ventilationsmöglichkeiten, insbesondere in engen Straßenschluchten, teilweise kritisch zu sehen. (Merbitz 2013: 7, 66) Die urbane Aufenthalts- und Umweltqualität wird von der baulichen Dichte determiniert, vor allem durch die Anordnung von bebauten und unbebauten Flächen und deren Verhältnis zueinander.

Jedoch können Dichtewerte nur schwer pauschal verglichen oder abstrakt beurteilt werden, da sie sehr kontextspezifisch sind. (Adrian et al. 2018: 32)

Stadtplanung und ihre Maßnahmen wirken direkt auf die Ebene der bebauten und unbebauten Umwelt (Baumeister et al. 2019: 36). Zusammen mit weiteren Disziplinen der Stadtentwicklung und den Menschen, die in der Stadt leben und arbeiten, und ihren Aktivitäten gestalten sie den urbanen Raum. Besonders in bestehenden Quartieren ist eine Weiterentwicklung nötig, da dort durch dichte Bebauung, geschlossene und hohe Gebäudestrukturen und einem geringen Grünflächenanteil eine mangelhafte Belüftung vorherrscht. Es besteht ein direkter Einfluss auf die Luftschadstoffbelastung. (Umweltbundesamt 2017b: 9) Maßnahmen die innerhalb der drei Bausteine denkbar sind, werden in Kapitel 7.5 als strategische, regulative, planerische und technische Maßnahmen gesammelt und vorgestellt. Des Weiteren wird seit mehreren Jahren das Thema Gesundheit wieder verstärkt in den Blick der Stadtentwicklung genommen (Baumgarten 2012: 75). Diese Debatten und die Zusammenarbeit zwischen den Akteuren der Stadtentwicklung und der Gesundheitswissenschaften werden als gesundheitsfördernde Stadtentwicklung in Kapitel 2.3.3 thematisiert. Es kann jedoch hier schon festgehalten werden: „The way we design our cities can improve the health of populations“ (Goenka und Andersen 2016: 2851). Dabei wirken viele Akteure in unterschiedlichen Prozessen zusammen.

2.2.2 Akteure und Prozesse der Stadtentwicklung

Diese vielfältigen Aufgaben zur Erfüllung einer gesundheitsorientierten Stadtentwicklung werden durch eine Vielzahl an **Akteuren** wahrgenommen. Diese sind neben den unterschiedlichen Akteuren der öffentlichen Hand auf verschiedenen räumlichen Ebenen sowie innerhalb der Fachplanungen, z.B. im Bereich Verkehr, Energie, Umwelt, private Planer*innen, Investor*innen, Planungsbeauftragte sowie mitwirkende Bürger*innen (Pahl-Weber und Schwartz 2018: 2517-2518). „Aufgabe der Planung ist und bleibt es, die jeweiligen Interessen der Akteure zumindest im Ansatz zu sortieren“ (Kaltenbrunner und Jakubowski 2018: 253).

Die **Prozesse** der Stadtentwicklung können unter anderem räumlich unterschieden werden. Seit Ende der 1960er Jahre verlagert sich die städtische Entwicklung, zumindest in Deutschland, von der Stadterweiterung hin zur Erneuerung und Umstrukturierung bestehender Stadtbereiche (Wékel 2018: 2437). Hierbei muss beachtet werden, dass sich „im Unterschied zur Neuplanung von ‚nachhaltigen Quartieren‘ [...] bei einer nachhaltigkeitsorientierten **Weiterentwicklung von Bestandsgebieten** ungleich komplexere Herausforderungen [stellen], allein schon aufgrund der bereits vorhandenen Bewohnerschaft“ (Hopfner und Zakrzewski 2012: 46). Im Gegensatz zur vorrangigen Qualifizierung des baulichen Bestandes und Restrukturierung bestehender Bereiche (Baumgart und Rüdiger 2019: 833) wird in stark wachsenden Räumen, wie HCMC oder andere asiatische Metropolräume, **Stadterweiterung** betrieben. Insgesamt muss beachtet werden, dass der Planungsgegenstand Stadt, insbesondere seine baulichen Strukturen, langlebig und teilweise unter anderen Rahmenbedingungen und städtebaulichen Leitbildern, z.B. der autogerechten Stadt, entstanden ist (Knieling und Kretschmann 2018: 215). „Urbane Bauwerke legen Zeugnis ab von früheren Epochen; urbane Planungsprozesse treffen Festlegungen, die als Ergebnisse von Bau- oder Verkehrsplanung oft für Dekaden sichtbar sind und Wirkung zeigen“ (Fehr und Hornberg 2018c: 135). In Hinblick auf diesen Umstand steht die gesundheitsorientierte Stadtentwicklung Entwicklungen gegenüber, die diesen Bestand und die Gesundheit der Bewohner*innen verändert bzw. beeinflussen können, wie den Klimawandel, den demografischen Wandel oder die Digitalisierung (Baumgart 2020: 213). Weitere Trends, mit denen sich die bestandsorientierte Stadtentwicklung und die Stadterweiterung in näherer Zukunft auseinandersetzen müssen, werden in Kapitel 4 näher erläutert.

2.3 Verkehrsplanung und Verkehrstechnik

Allgemein wird unter **Verkehr** die Bewegung bzw. Beförderung von Fahrzeugen, Personen, Gütern, Nachrichten auf dafür vorgesehenen Wegen verstanden (Duden 2021). Ursache für diese Ortsveränderungen sind meist menschliche Bedürfnisse, hierzu zählen Aktivitäten wie Arbeit, Einkaufen und

Freizeit (Gertz 2021b: 6). Die **Verkehrsplanung** ist einer der wichtigsten Bestandteile raumwirksamer Fachplanungen (Ahrens 2018: 2807; Gertz 2021b: 1). Sie „ist die Wissenschaft, die die Gesetzmäßigkeiten der räumlich-zeitlichen Entstehung und Durchführung der Ortsveränderungen von Personen (zu Fuß oder mit einem Verkehrsmittel) und Gütern im gesamten öffentlichen Verkehrsraum eines Territoriums untersucht“ (Schnabel und Lohse 2011a: VII). Im Rahmen der Verkehrsplanung werden Ursachen für Ortsveränderungen, Ortsveränderungen selbst, Verkehrsabläufen sowie verkehrsbedingte positive und negative Auswirkungen wie Erreichbarkeit, Reisezeiten, Ressourcenbeanspruchungen und Beeinträchtigungen auf allen Planungsebenen und für alle Verkehrsmittel untersucht. (Ahrens 2018: 2808)

Neben der Verkehrsplanung kann des Weiteren die **Verkehrstechnik** Einfluss auf den Verkehr nehmen. Als Verkehrstechnik „wird die Wissenschaft verstanden, die sich mit den Gesetzmäßigkeiten und der Organisation des Verkehrsablaufs auf den Straßenverkehrsanlagen sowie mit der Gestaltung und Dimensionierung der Verkehrsanlagen beschäftigt. Der Verkehrsablauf umfasst dabei die räumlich-zeitliche Abwicklung der Bewegungsvorgänge von Fahrzeugen und Fußgängern auf den Straßenverkehrsanlagen“ (Schnabel und Lohse 2011a: VII). Wie jede Planung sollten auch Verkehrsplanung und Verkehrstechnik darauf abzielen, unter Berücksichtigung und Abwägung der unterschiedlichen Interessen und Bedürfnisse aller Akteure die bestmögliche Lösung für die Gesellschaft als Ganzes zu erreichen. Die vier **Oberziele**, die dabei zu berücksichtigen sind, sind Erhöhung der Verkehrssicherheit, Optimierung des Verkehrsablaufs, sozial- und umweltverträgliche Abwicklung des Verkehrs und Wirtschaftlichkeit. (Boltze 1996)

2.3.1 Verkehrsangebot und Verkehrsnachfrage

„Das **Verkehrsangebot** ermöglicht die Durchführung von Ortsveränderungen und konstituiert sich aus der Verkehrsinfrastruktur und ggf. einer Verkehrsdienstleistung, einschließlich der Verkehrsmittel“ (Gertz 2021a: 9). Die Verkehrsmittel können in die Bereiche des **Individualverkehrs** (IV) und des **öffentlichen Verkehrs** (ÖV) unterteilt werden. Im Bereich des IVs sind die Nutzer*innen für Fahrzeuge sowie die individuelle Durchführung der Fahrt zuständig. Abfahrtszeiten und Routen können weitestgehend frei gewählt werden. Im ÖV sind Nutzer*innen an vorgegebene Abfahrtszeiten und Routen durch den ÖV-Betreiber gebunden, die Fahrzeuge werden ebenfalls vom Betreiber vorgehalten. In den letzten Jahren zunehmende Angebote von Verleihsystemen (Radleihsysteme, Car-sharing, E-Scooter) kombinieren Eigenschaften von IV und ÖV. Verkehrsmittel des IV können weiter in **motorisierten** und **nichtmotorisierten Individualverkehr** (MIV bzw. NMIV) unterteilt werden. Zum MIV zählen beispielsweise Pkw, Motorrad, Moped und E-Scooter, der NMIV umfasst den Fuß- und Radverkehr. Durch diese Art der Fortbewegung wird abgesehen von Muskelkraft keine weitere Energie benötigt. Es handelt sich somit um klimaneutrale und gesundheitsfördernde Fortbewegungsmöglichkeiten. Auch der ÖV kann in zwei weitere Bereiche unterteilt werden, den **öffentlichen Personennahverkehr** (ÖPNV) und den **öffentlichen Personenfernverkehr** (ÖPFV). Verkehrsmittel des NMIVs und des ÖVs werden als Verkehrsmittel des Umweltverbunds zusammengefasst, da bei ihrer Nutzung der Verkehr „umweltverträglicher“ abgewickelt wird. (Gertz 2021a: 9-10)

„Die **Verkehrsnachfrage** ist die Summe aller Ortsveränderungen von Personen und Gütern in einem Gebiet innerhalb eines Zeitraums“ (Gertz 2021a: 9). Sie lässt sich durch die Verkehrserzeugung, Verkehrsverteilung, Verkehrsmittelwahl und Routenwahl beschreiben. Bei der **Verkehrserzeugung** wird das Verkehrsaufkommen, also die Zahl der Ortsveränderungen (Wege), die in einer Verkehrszelle (Quelle - Q_i) entstehen und in einer Verkehrszelle (Ziel - Z_i) enden, ermittelt. Die **Verkehrsverteilung** gibt an, wie sich der Quell- und Zielverkehr zwischen Verkehrszellen verteilt, sie wird auch als Zielwahl bezeichnet. Anschließend wird bei der **Verkehrsmittelwahl** ermittelt, mit welchem Verkehrsmittel die Wege zurückgelegt werden. Somit kann der Modal Split, also die Verteilung auf Fußverkehr, Radverkehr, ÖV und MIV bestimmt werden. (Schnabel und Lohse 2011b: VII)

In Abhängigkeit des Verkehrsangebots und der Verkehrsnachfrage können Wege mit einer Kombination von verschiedenen Verkehrsmitteln zurückgelegt werden. Zur genaueren Beschreibung der Nutzung von Verkehrsmitteln können die Begriffe Intermodalität, Multimodalität und Monomodalität weiteren Aufschluss über die Verkehrsmittelwahl geben. Unter **Intermodalität** versteht man die Nutzung verschiedener Verkehrsmittel auf einem Weg. Werden innerhalb eines Zeitraums (meist innerhalb einer Woche) unterschiedliche Verkehrsmittel genutzt spricht man von **Multimodalität**. **Monomodalität** hingegen beschreibt die Nutzung nur eines Verkehrsmittels für alle Wege während eines Zeitraums (meist innerhalb einer Woche). (Gertz 2021: 11; Kagerbauer 2021: 184 ff) Ein weiterer Aspekt, der bei der Verkehrsnachfrage zusätzlich zu den zuvor beschriebenen vier Stufen Berücksichtigung findet, ist die **Zeitwahl** der Aktivitäten und Ortsveränderungen. Sie gibt an, zu welchem Zeitpunkt ein Weg zurückgelegt wird. (Schnabel und Lohse 2011b: 364)

2.3.2 Verkehrsmanagement als Teil der Verkehrsplanung

„**Verkehrsmanagement** ist die Beeinflussung von Verkehrsangebot und Verkehrsnachfrage durch ein Bündel von Maßnahmen mit dem Ziel, die positiven und negativen Wirkungen des Verkehrs insgesamt zu optimieren“ (Boltze 2015). Unter diesen Maßnahmen werden heute nicht mehr nur harte Infrastrukturmaßnahmen verstanden, sondern ein breites Spektrum, das neben baulichen Maßnahmen auch organisatorische und betriebliche Maßnahmen umfasst, die mit einem kurz-, mittel- oder langfristigen Planungshorizont umgesetzt werden können (Vallée et al. 2021: 3). Zielebenen des Verkehrsmanagements sind die Verkehrsvermeidung, die Verkehrsverlagerung (zeitlich, räumlich, modal) und die Verkehrslenkung (s. Abb. 3). **Verkehrsvermeidung** ist die Reduzierung von Wegen, ohne dabei die Mobilität einzuschränken. Das Ziel hierbei ist, Distanzen zu reduzieren und die Verkehrsnachfrage möglichst effizient abzuwickeln. Die **Verkehrsverlagerung** kann in die Bereiche zeitliche, räumliche oder modale Verlagerung unterteilt werden. Durch die zeitliche Verlagerung sollen Spitzenstunden mit hohen Verkehrsbelastungen vermieden und somit zu einer effizienteren Abwicklung des Verkehrs beigetragen werden. Die räumliche Verlagerung zielt darauf ab, den Verkehr abseits von sensiblen Bereichen, wie Wohngebieten zu führen und somit Anwohner*innen vor den negativen Auswirkungen des Verkehrs zu schützen. Die modale Verlagerung bedeutet in der Regel eine Verlagerung vom MIV auf den ÖV oder den Rad- bzw. Fußverkehr, um auch hiermit zu einer emissionsärmeren Abwicklung des Verkehrs beizutragen. Durch Maßnahmen der **Verkehrslenkung** wird versucht, die Auswirkungen des Verkehrs, der trotz Maßnahmen zur Verkehrsvermeidung und die Verkehrsverlagerung weiterhin besteht, möglichst gering zu halten. (Gertz und Holz-Rau 2020)

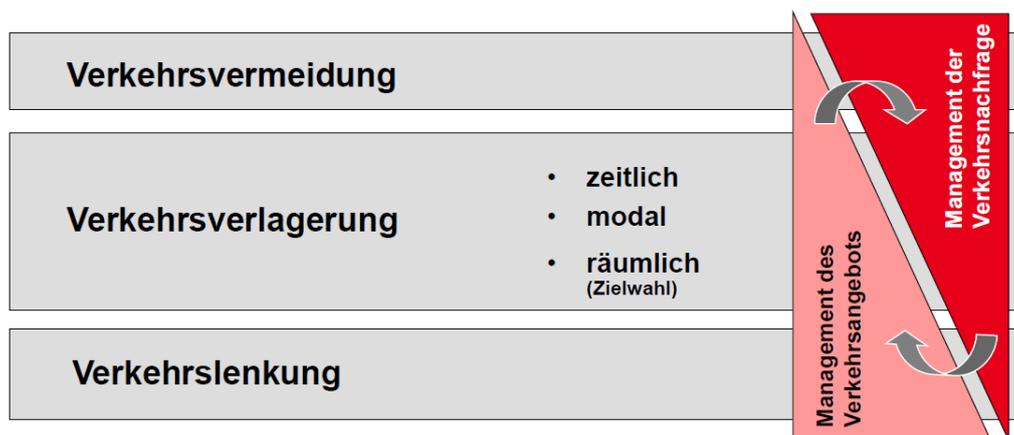


Abb. 3: Wirkungsfelder des Verkehrsmanagements
Quelle: Boltze 2015

2.3.3 Akteure der Verkehrsplanung

Die fachplanerische Entscheidungsvorbereitung der Verkehrsplanung wird meist in der Verwaltung der Kommunen durchgeführt. Je nach Kommune sind die Zuständigkeiten der Verkehrsplanung unterschiedlich zugeordnet. Die Verkehrsplanung kann beispielsweise der Stadtplanung, dem Tiefbau

oder der Wirtschaft zugeordnet sein. Zur Unterstützung können Planungsleistungen an externe Ingenieurbüros vergeben werden. Ein weiterer wichtiger Akteur im Zusammenspiel mit der Verwaltung ist die Politik. Durch ihre Beschlüsse werden Planungsprozesse in Gang gebracht und die Umsetzung von gezielten Maßnahmen entschieden. Zusätzlich sind auch Gebietskörperschaften und Mobilitätsanbieter an den Planungsprozessen beteiligt. Die große Anzahl an Akteuren spiegelt sich in einer Vielzahl von Abstimmungsprozessen wider. Zusätzlich zu den bereits genannten Akteuren kann auch die Beteiligung von Bürger*innen, Medien, Interessensvertretungen und Unternehmen von Relevanz sein. Es hat sich herausgestellt, dass eine gemeinsame Problembearbeitung und die Mitwirkungsmöglichkeit bei Planungen zu einer höheren Akzeptanz bei der Umsetzung später Maßnahmen mit sich bringen kann. Abbildung 4 zeigt das Akteursspektrum der kommunalen Verkehrsplanung. (Vallée et al. 2021: 34-35)

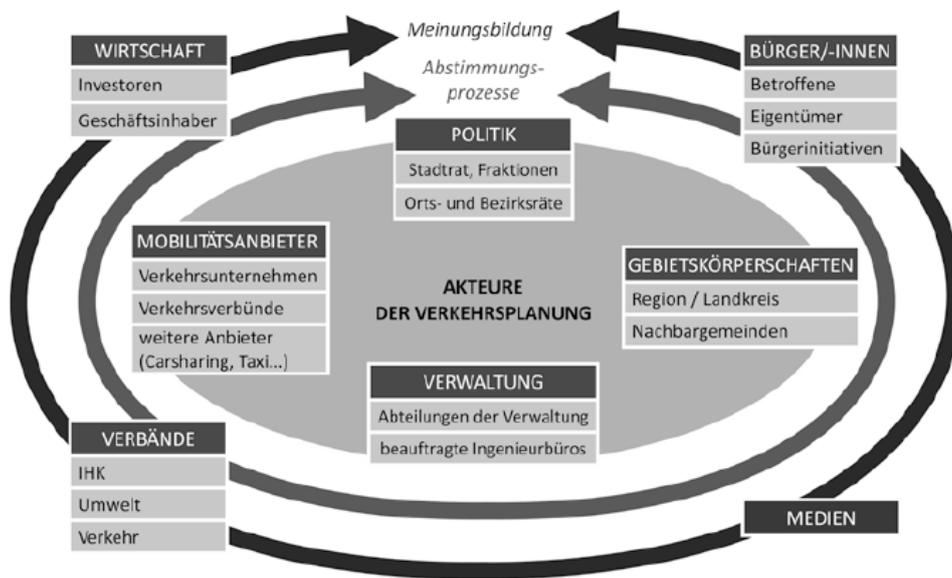


Abb. 4: Akteursspektrum in der kommunalen Verkehrsplanung
Quelle: Gertz 2021: 35

2.4 Gesundheitswissenschaften

In den 1980er-Jahren wurde als eine neue Querschnittsdisziplin in der Gesundheitsforschung und im Gesundheitswesen die Begriffskombination der **Gesundheitswissenschaften** eingeführt (Franzkowiak 2015). Sie „befassen sich mit den körperlichen, psychischen und gesellschaftlichen Bedingungen (Determinanten) von Gesundheit und Krankheit, der systematischen Erfassung der Verbreitung von gesundheitlichen Störungen in der Bevölkerung und den Konsequenzen für Organisation und Struktur des medizinischen und psychosozialen Versorgungssystems“ (Franzkowiak 2015). Für den Begriff **Gesundheit** existieren verschiedene Definitionen. Die bekannteste und am häufigsten verwendete Definition geht auf eine von der Weltgesundheitsorganisation (WHO) im Jahr 1946 erlassene Satzung zurück. In diesem Dokument wird die Gesundheit als „Zustand des vollständigen körperlichen, geistigen und sozialen Wohlbefindens“ (WHO 1946: 1) definiert. In dem fast 70 Jahre später erschienenen Rahmenprogramm Gesundheit 2020 weist die WHO darauf hin, dass eine gute Gesundheit „ein dynamischer Zustand physischen, psychischen und sozialen Wohlbefindens“ (WHO 2013: 43) ist und nicht nur als die Abwesenheit von Krankheiten verstanden werden darf. Damit definiert die WHO den Begriff der Gesundheit im Gegensatz zur Medizin erstmals positiv. Angestoßen durch verschiedene Kritiken an der Definition der WHO wurde der Versuch unternommen, neue Definitionen für den Begriff Gesundheit zu entwickeln. (Sterdt und Walter 2012: 27) Last beispielsweise definiert Gesundheit als „Gleichgewichtszustand zwischen Menschen und ihrer physischen, biologischen und sozialen Umwelt, in Einklang mit vollem Funktionsumfang“ (Last 1995: 73). Eine weitere Definition ist die

nach Hurrelmann und Franzkowiak, für die Gesundheit ein „Stadium des Gleichgewichts von Risikofaktoren und Schutzfaktoren [ist,] das eintritt, wenn einem Menschen eine Bewältigung sowohl der inneren als auch der äußeren Anforderungen gelingt“ (Hurrelmann und Franzkowiak 2003: 54). Diesen Definitionen ist gemein, dass die menschliche Gesundheit von verschiedenen Faktoren förderlich oder gefährdend beeinflusst wird und nicht lediglich als Abwesenheit von Krankheiten verstanden werden darf.

2.4.1 Begriffe in den Gesundheitswissenschaften

Weitere wichtige Begriffe sind die Gesundheitsförderung und die Prävention. Die **Gesundheitsförderung** umfasst alle Maßnahmen, „die auf die Veränderung und Förderung des individuellen Verhaltens zielen und die Lebensumstände im positiven Sinne verändern“ (Bürgerschaft Hamburg 2009: 30). Gesundheitsförderung kann damit als ein Prozess verstanden werden, „durch den Menschen befähigt werden, wirksamen Einfluss auf ihre Gesundheit und deren Determinanten auszuüben“ (WHO 2013: 55). Dies entspricht gleichermaßen dem von der WHO definierten Ziel der Gesundheitsförderung, „allen Menschen ein höheres Maß an Selbstbestimmung über ihre Gesundheit zu ermöglichen und sie damit zur Stärkung ihrer Gesundheit zu befähigen“ (WHO 1986). Außerdem betrachtet „Gesundheitsförderung [...] Gesundheit nicht als Ziel, sondern als Ressource des täglichen Lebens“ (Kistemann und Ritzinger 2018: 61). In der Gesundheitsförderung ist ebenfalls die **Prävention** beinhaltet. Während die reine Gesundheitsförderung auf die Stärkung der Gesundheitsressourcen und -potenziale abzielt, sollen durch die zielgerichtete Prävention Risiken und Belastungen gesenkt oder verhindert werden. Die Übergänge zwischen der Gesundheitsförderung und der Prävention sind in der Praxis allerdings häufig fließend und daher nicht klar voneinander abzugrenzen. (Bär et al. 2009: 15)

Die räumliche Planung eignet sich besonders gut für Präventionsmaßnahmen und geht über die reine Gefahrenabwehr hinaus. Durch ihr zielgerichtetes und vorausschauendes Vorgehen kann die Stadtplanung Risiken und Belastungen für die menschliche Gesundheit im Vorfeld verhindern oder zumindest abmildern. (Sterdt und Walter 2012: 28) Neben dem Arbeits- und Verbraucherschutz sowie weiteren Bereichen stellt Planung damit einen wichtigen Teil der Verhältnisprävention dar, deren Intention es ist, Gesundheitsrisiken in den Umwelt- und Lebensbedingungen zu kontrollieren, zu reduzieren oder bestenfalls zu beseitigen (Fehr et al. 2005: 18). Die Verhältnisprävention will damit sowohl die genannten Settings, wie auch ihre Strukturen und Regeln beeinflussen (Bär et al. 2009: 15). „Das Konzept der Lebenswelten (Settings), definiert als die Bereiche, in denen Menschen leben, lieben, arbeiten und spielen, hat sich zumindest für die Gesundheitsförderung weltweit durchgesetzt und ist auch über die Kreise von Gesundheitsexpert*innen hinaus bekannt geworden“ (Fehr und Hornberg 2018c: 134). Dieser Ansatz, eine wichtige Umsetzungsstrategie der Gesundheitsförderung, ermöglicht eine fachliche Bündelung, z.B. Gesundheitswissenschaften und Stadtentwicklung, und einen räumlichen Anknüpfungspunkt, wie Stadt oder Quartier (Hornberg et al. 2018: 52; Sterdt und Walter 2012: 34-35). Neben der Verhältnisprävention existiert die Verhaltensprävention, die auf eine Verbesserung der Lebensweise der Bevölkerung abzielt. Dies geschieht u.a. durch die Information von Risikogruppen über ihre Gefährdungen oder Tipps für angemessene Verhaltensweisen bei Extremwetterereignissen. (Fehr et al. 2005: 18; Gerlinger 2013: 115-116) Als gesundheitsorientiert sollen im weiteren Verlauf sowohl rein präventive als auch gesundheitsförderliche Strategien und Maßnahmen bezeichnet werden.

2.4.2 Determinanten von Gesundheit

In der 1986 erschienenen Ottawa-Charta zur Gesundheitsförderung bzw. dem genannten Rahmenprogramm Gesundheit 2020 werden Determinanten benannt, die einen positiven oder negativen Einfluss auf die menschliche Gesundheit haben können. Dazu gehören verschiedene soziale, ökonomische und umweltbedingte Determinanten, wie die Ernährung, das Einkommen oder angemessene Wohnbedingungen (WHO 1986; WHO 2013: 43). Insgesamt kann die menschliche Gesundheit damit als eine Bilanz von verschiedenen Ressourcen und Belastungen verstanden werden, die zudem einer stark subjektiven Bewertung unterliegt (Bär et al. 2009: 14; Mertens 2010: 13). Eine anschauliche Übersicht der **Determinanten** von Gesundheit zeigt die nachfolgende Abbildung, die in der Wissenschaft als Regenbogen-Modell bekannt ist. Es wird deutlich, dass neben den Determinanten, die jedes Individuum bereits von sich aus mitbringt, eine Vielzahl weiterer Kenngrößen die Gesundheit maßgeblich beeinflusst (s. Abb. 5).

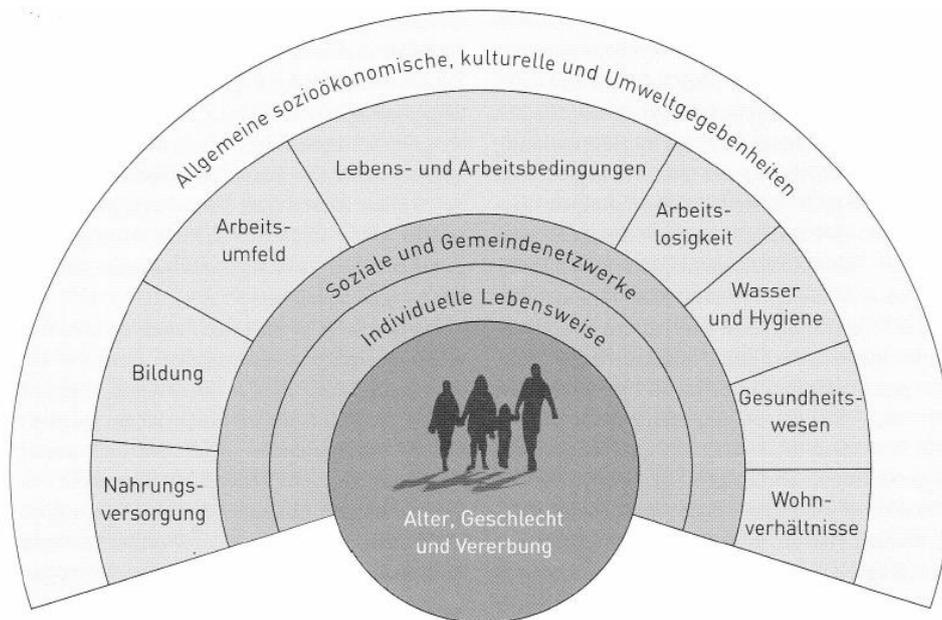


Abb. 5: Bestimmungsgrößen der menschlichen Gesundheit
Quelle: Dahlgren und Whitehead 1991, zitiert nach Weeber 2012: 63

Der **Mensch** bildet mit Faktoren, wie dem Alter und dem Geschlecht, das Zentrum des Modells. Diese Faktoren sind in der Regel nicht durch menschliche Eingriffe veränderbar. Im Gegensatz dazu können die anderen Aspekte, die in verschiedenen Schichten um das Zentrum angeordnet sind, beeinflusst und verändert werden. Die erste Schicht bezeichnet dabei die **individuelle Lebensweise**, die die menschliche Gesundheit fördern oder ihr schaden kann. Maßgeblich ist z.B., wie sich eine Person ernährt oder wie häufig sie Sport treibt. Die zweite Schicht thematisiert die **sozialen Kontakte und die Unterstützung**, die eine Person darüber erfahren kann. Die dritte Schicht beinhaltet **strukturelle Faktoren**, z.B. die Wohnverhältnisse, den Zugang zu Bildung oder die Arbeitsbedingungen. Über allem sind diejenigen Faktoren angeordnet, die ganze **Gesellschaften** betreffen können. (WHO 1997: 21) Barton und Grant entwickelten, angelehnt an das Regenbogen-Modell, die sogenannte Health Map, die die verschiedenen Determinanten differenzierter darstellt (s. Abb. 6). So unterscheidet dieses Modell weiter zwischen den Aktivitäten einer Person sowie der gebauten und natürlichen Umwelt. Die entsprechenden Inhalte werden in dem Regenbogen-Modell teilweise zur dritten Schicht bzw. die Aktivitäten zur individuellen Lebensweise gezählt.

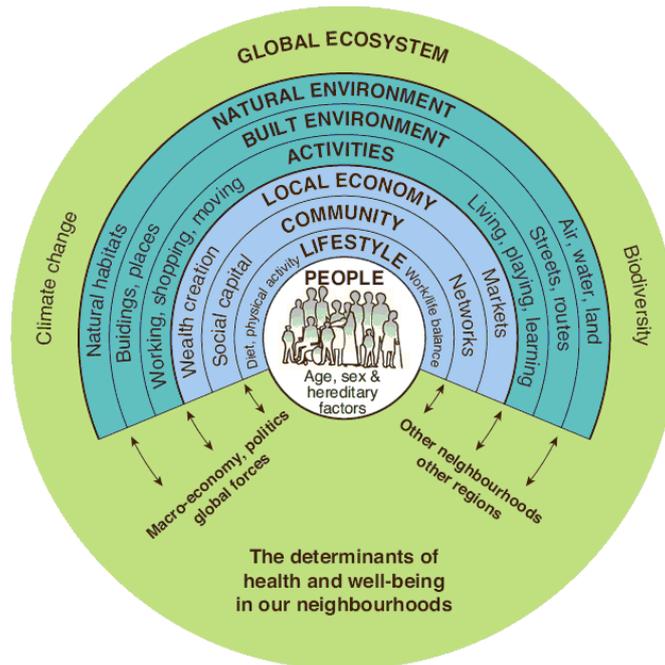


Abb. 6: Health Map
 Quelle: Barton und Grant 2006: 252

In beiden Modellen bestehen Zusammenhänge und **Wechselwirkungen** zwischen den verschiedenen Determinanten der menschlichen Gesundheit. Sogar die individuelle Lebensweise, die auf den ersten Blick im privaten Verantwortungsbereich eines jeden Menschen liegt, wird u.a. durch das soziale Umfeld oder bestimmte Umweltfaktoren beeinflusst. (Neuhaus 2002: 44; WHO 1997: 21) Dementsprechend sind viele verschiedene Ansatzpunkte vorhanden, um die menschliche Gesundheit zu beeinflussen. Vor dem Hintergrund des Rechts auf Gesundheit ist dies positiv zu bewerten, da Rahmenbedingungen geschaffen werden müssen, unter denen ein Höchstmaß an Gesundheit für jeden Menschen erreicht werden kann. (WHO 2013: 45) Die Stadtentwicklung kann dabei besonders die dunkelgrün gefärbten Bereiche der Health Map beeinflussen, wie die Lebens- und Arbeitsbedingungen, die Wohnverhältnisse und Aktivitäten (s. Abb. 6).

Gesundheit hängt von so vielen Determinanten ab, dass eine abschließende Auflistung kaum möglich ist. Es kann zwischen individuellen und systembedingten Determinanten unterschieden werden. Zu den **individuellen Determinanten** zählen:

- Prädisponierende Determinanten: z.B. Alter, Geschlecht, Erbgut, Krankheitsgeschichte
- Physische, biomedizinische Determinanten: z.B. körperliche Krankheiten, Übergewicht
- Psychische Determinanten: z.B. psychische Gesundheit, Wohlbefinden
- Soziale Determinanten: z.B. Kontakte, Beziehungen
- Verhaltensweisen und Lebensstile: z.B. Ernährung, körperliche Betätigung
- Ökonomische, materielle Faktoren: z.B. Einkommen

(Barton und Grant 2006: 252; Bolte et al. 2012: 20–21; Mertens 2010: 13; Sterdt und Walter 2012: 28; Trojan 1994: 26; Weeber 2012: 65; WHO 2013: 43)

Zu den **systembedingten Determinanten** oder auch Umweltdeterminanten zählen:

- Gesellschaftliche Verhältnisse: z.B. Naturbezug, soziale Teilhabe, politische Mitbestimmung, Bildungssystem
- Rechtliche Rahmenbedingungen: z.B. Arbeitsschutzrecht, Nichtraucherschutzrecht
- Natürliche Umwelt: z.B. Luftqualität, Wasserqualität, Bodenqualität, Vegetation
- Gebaute Umwelt: z.B. Wohnqualität, Wohnumfeld, Zugang zu Infrastruktur (Verkehr, Versorgung)

- Gesundheitswesen: z.B. Krankenkassen, Gesundheitsversorgung und deren Qualität
- Lebens- und Arbeitsbedingungen
- Wohnbedingungen

(Barton und Grant 2006: 252; Bolte et al. 2012: 20-21; Mertens 2010: 21-22; Rodenstein 1988: 12; Sterdt und Walter 2012: 28; Trojan 1994: 26; Waller 2006: 64-65; WHO 2013: 43)

Die einzelnen Einflüsse auf die menschliche Gesundheit stehen dabei in vielfältigen Wechselbeziehungen, was dazu führt, dass die Auswirkungen von Interventionen nur schwer im Vorhinein abzuschätzen sind (Noack 1996: 28).

2.4.3 Gesundheitsfördernde Stadtentwicklung

Gesundheitsfördernde Stadtentwicklung bezeichnet Stadtentwicklung, die Aspekte zur Förderung von Gesundheit in ihren Planungen aufgreift und integriert bzw. die explizit das Ziel der Gesundheitsförderung verfolgt (Sieber 2017: 76). Historisch betrachtet lassen sich Gesundheitsbezüge im Städtebau und in der Stadtentwicklung weit zurückverfolgen, existierten aber nicht zu jeder Zeit im gleichen Ausmaß und mit jeweils unterschiedlichen Schwerpunkten (Baumgart 2018b: 33). Bis heute haben sich die Einflüsse der Umwelt auf die menschliche Gesundheit stark gewandelt und sind heutzutage viel unterschwelliger als in der Vergangenheit. Dies ist vor allem verbesserten hygienischen Verhältnissen sowie Verbesserungen bei der Ernährung, im Gesundheitswesen und bei den Arbeitsbedingungen zu verdanken. Heute führen vor allem **chronische Erkrankungen**, wie Krebs, Herz- und Kreislauferkrankungen und Diabetes, sowie Übergewicht zu einer verminderten Lebensqualität und steigenden Kosten für das Gesundheitssystem (Minh-Chau et al. 2010: 1109-1110). Im Rahmen gesundheitsfördernder Stadtentwicklung wird insbesondere der **Kommune** eine wichtige Rolle zugeschrieben, da die lokale Ebene jene ist, auf der räumlichen Gesundheitsförderung am zielführendsten betrieben werden kann (Bär et al. 2009: 12; WHO 2013: 157).

Aktuell dominieren im Bereich Gesundheit nicht mehr Fragestellungen mangelnder Stadthygiene und ungesunder Wohnverhältnisse, es werden vielmehr Klima, Mobilität, Freiflächen und Umweltgerechtigkeit thematisiert (Schlicht 2017: 11). Daraus entstehen Anforderungen an die Planung im Rahmen der gesundheitsfördernden Stadtentwicklung vorwiegend in der Herstellung von wohnungsnahen Grünräumen zur Erholung, Freizeitgestaltung sowie von Spielräumen für Kinder und Jugendliche, im Aufbau von attraktiven Rad- und Fußwegeverbindungen und einer angepassten Standortauswahl für bestimmte Einrichtungen. In diesen Bereichen ist die räumliche Planung in besonderem Maße gefragt, eine gesundheitsfördernde Stadtentwicklung zu realisieren. Insbesondere die Kommunen besitzen dabei eine **Schlüsselfunktion**, da sich viele ihrer Ämter mit der Gesundheitsförderung befassen oder befassen sollten (Bär et al. 2009: 12-13).

2.5 Grundlagen zu Luftschadstoffen

Für die Beurteilung der Einflussmöglichkeiten der Stadt- und Verkehrsplanung bzw. der bebauten und unbebauten Umwelt sind die unterschiedlichen Luftschadstoffe noch näher zu untersuchen.

2.5.1 Begriffsbestimmungen Luftschadstoffe

Gemäß dem Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge werden als **Luftverunreinigungen** „Veränderungen der natürlichen Zusammensetzung der Luft, insbesondere durch Rauch, Ruß, Staub, Gase, Aerosole, Dämpfe oder Geruchsstoffe“ (§ 3 Abs. 4 BImSchG) bezeichnet. Des Weiteren wird als **Schadstoff** „jeder in der Luft vorhandene Stoff, der schädliche Auswirkung auf die menschliche Gesundheit oder die Umwelt insgesamt haben kann“ (§ 1 Nr. 31 39. BImSchV) definiert.

Luftschadstoffe können durch **natürliche Quellen** wie Waldbrände, Sandstürme oder Bodenverwitterungen entstehen. **Anthropogene Quellen** sind z.B. Industrie, Landwirtschaft und Verkehr. (Umweltbundesamt 2021c)

Allgemein können Luftschadstoffe als **gas- und partikelförmige Stoffe** in der Atmosphäre auftreten (Schultz und Petro 1998). Zusätzlich kann zwischen **primären** und **sekundären Schadstoffen** unterschieden werden. Als primäre Schadstoffe werden z.B. Stickoxide bezeichnet. Diese Stoffe werden von einer Schadstoffquelle emittiert und direkt in die Atmosphäre abgegeben. Sekundäre Schadstoffe wie Ozon entstehen durch eine chemische Reaktion in der Atmosphäre. (Becker et al. 2009: 13) Auch Feinstaub kann als primärer oder sekundärer Schadstoff auftreten. Hierbei zählt der Abrieb von Autoreifen z.B. als primärer Schadstoff und Partikel, die durch gasförmige Vorläufersubstanzen (z.B. Stickoxide) entstehen zählen zu den sekundären Feinstäuben. (Grunert und Schmitt 2017)

Seit dem Beginn der Industrialisierung stellen anthropogen emittierte Schadstoffe ein wachsendes Problem dar. Durch die hohe Bevölkerungsdichte und die große Anzahl von Emissionsquellen wie Energiewirtschaft, Industrieprozesse, Haushalte und Kleinverbraucher sowie den Verkehr kommt es hier zu einer wachsenden Gefährdung (Urban 2010). Unter dem Begriff **Emission** wird der Ausstoß von Stoffen unterschiedlichen Aggregatzustands in die Atmosphäre bezeichnet. Durch die **Transmission** breiten sich diese Stoffe in der Atmosphäre aus. Während dieses Vorgangs kann es zu einer möglichen Umwandlung von Primär- in Sekundärstoffe kommen. Die **Deposition** beschreibt die Ablagerung der Stoffe auf unterschiedlichen Oberflächen. Als **Immission** wird die Einwirkung von Stoffen auf den Mensch oder die Umwelt bezeichnet. Jede Emission bewirkt somit eine Immission. Die Intensität dieser wird durch die Entfernung vom Emissionsort bestimmt. Je weiter der Immissionsort vom Emittenten entfernt ist, umso geringer ist die Wirkung. (LUBW 2021) In Abbildung 7 wird der Wirkungsraum von Luftschadstoffen mit den zuvor erläuterten Begrifflichkeiten schematisch dargestellt.

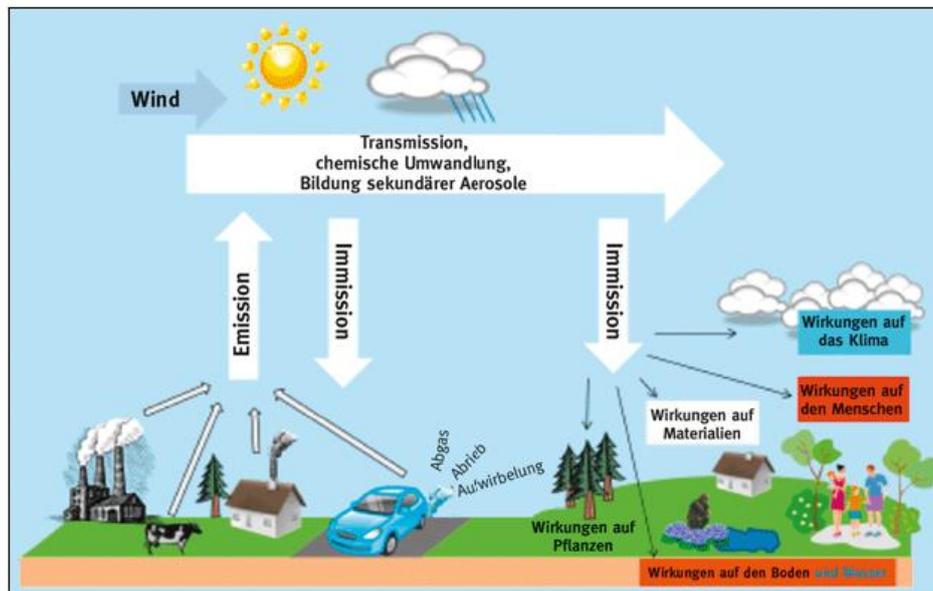


Abb. 7: Wirkungsraum von Luftschadstoffen
Quelle: FGSV 2018: 3

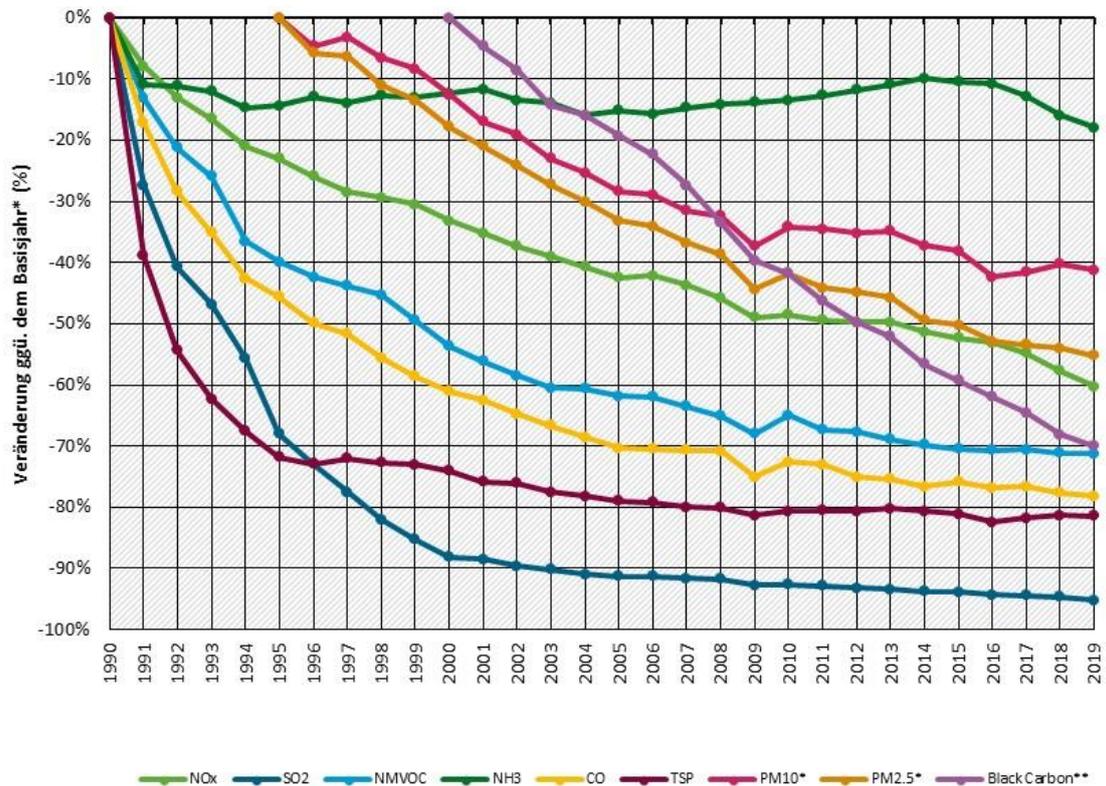
2.5.2 Relevante Luftschadstoffe und ihre gesundheitlichen Auswirkungen

Das Umweltbundesamt (UBA) führt folgende Luftschadstoffe als relevant für die menschliche Gesundheit auf:

- Ammoniak
- Benzol
- Feinstaub
- Kohlenmonoxid
- Ozon

- Schwefeldioxid
- Stickstoffoxide

Abbildung 8 zeigt die **Entwicklung der Emissionen** ausgewählter Luftschadstoffe von 1990 bis 2019. Dem Diagramm ist zu entnehmen, dass von Beginn der Messungen bis Mitte der 1990er Jahre bei den meisten Luftschadstoffen der größte Rückgang bei den Emissionen zu verzeichnen war. Anschließend gab es meist einen leichten kontinuierlichen Rückgang der Luftschadstoffbelastungen. Es wird deutlich, dass verschiedene Maßnahmen in den vergangenen Jahren bereits zur Reduzierung der Luftschadstoffe in der Atmosphäre beigetragen konnten. (Umweltbundesamt 2021d) Trotz der Reduzierung der Emissionen werden auch heute teilweise immer noch die durch die 2008 von der Europäischen Union verabschiedete EU-Richtlinie 2008/50 EG festgelegten Grenzwerte für Immissionen überschritten. (EU 2008, HLNUG 2021b)



* Basisjahr 1990, 1995 für PM₁₀/PM_{2.5}

** Black Carbon Emissionen erst ab 2000

Abb. 8: Emissionen ausgewählter Luftschadstoffe von 1990 bis 2019
Quelle: Umweltbundesamt 2021e

Folgend werden nun die einzelnen relevanten Luftschadstoffe näher erläutert und ihre Gesundheitswirkung beschrieben.

Ammoniak (NH₃)

Ammoniak ist eine gasförmige, unangenehm riechende farblose und giftige Verbindung des Stickstoffs. Er kann als primärer Luftschadstoff in der Atmosphäre vorkommen oder mit anderen Luftschadstoffen zu Feinstaub reagieren. Durch seine giftigen Eigenschaften kann es zu Augen- und Atemwegsreizungen kommen. Mit etwa 95% entsteht Ammoniak in Deutschland hauptsächlich in der Landwirtschaft. Die kommerzielle Tierhaltung stellt mit über 70% den größten Verursacher dar. Vor allem der massive Einsatz von Düngemittel verschlechtert die Luftqualität und trägt zu Schädigungen von Ökosystem und Pflanzen bei. Aus Abbildung 8 geht hervor, dass die Emissionen von Ammoniak

seit Beginn der Aufzeichnungen bis 2019 nur um knapp 20% zurückgegangen sind. Nach einem anfänglichen Rückgang blieben die Emissionen relativ stabil bis es von 2006 bis 2014 zu einer geringen Zunahme der Ammoniakemissionen kam. Seit 2014 ist allerdings wieder eine leicht rückläufige Tendenz zu verzeichnen. (Umweltbundesamt 2021f)

Benzol (C₆H₆)

Benzol gehört zu den Kohlenwasserstoffen und ist ein Bestandteil von Benzin. Der Straßenverkehr zählt somit zu den Hauptemittenten dieses Luftschadstoffs. In seiner gesundheitlichen Wirkung ist Benzol bereits in geringen Konzentrationen krebserregend. Ist der menschliche Organismus längerer Zeit Benzol ausgesetzt, kann es zu Schädigungen der inneren Organe und des Knochenmarks kommen. (Umweltbundesamt 2021f)

Schwebstaub und Feinstaub

Unter **Schwebstaub** (englisch Particulate Matter – PM) versteht man **feste und flüssige Schwebstoffe** (Aerosole), die eine gewisse Zeit in der Atmosphäre verweilen und nicht sofort zu Boden sinken. Er kann durch natürliche (z.B. Meeresgischt, Bodenverwitterung) oder anthropogene Quellen (z.B. Industrieprozesse, Hausbrand oder Kraftfahrzeugverkehr) entstehen. Zwei Drittel des Feinstaubes in der Umgebungsluft werden in der Atmosphäre aus verschiedenen Vorläufergasen gebildet. (Deutsche Umwelthilfe e.V. 2021a)

Als **Feinstaub** wird ein Teil des Gesamtschwebstaubs definiert, der je nach Korngröße in verschiedene Fraktionen unterteilt wird. Bei **PM₁₀** handelt es sich um Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser kleiner als 10 µm. **PM_{2,5}** ist eine Teilmenge von PM₁₀ und umfasst Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser kleiner als 2,5 µm. Diese Fraktion wird auch als „Feinfraktion“ bezeichnet, während der Bereich zwischen PM_{2,5} und PM₁₀ als „Grobfraktion“ bezeichnet wird. Partikel der Größenfraktionen PM₁₀ und PM_{2,5} werden üblicherweise als Massenkonzentration in µg/m³ angegeben. Wie Abbildung 8 zu entnehmen ist, werden die Feinstaubfraktionen PM₁₀ und PM_{2,5} erst seit 1995 erfasst. Die Jahre davor wurden nur die Werte für den Gesamtstaub beobachtet. Seit Beginn der Erfassung ging die Belastung von PM₁₀ um ca. 40% zurück und von PM_{2,5} um 55%. Dennoch liegt die Belastung durch Feinstaub vor allem in urbanen Gebieten teilweise noch über den Grenzwerten. (Umweltbundesamt 2021g)

Mit den **ultrafeinen Partikeln (UFP)** hat in den letzten Jahren eine weitere Größenfraktion an Aufmerksamkeit gewonnen. Sie bezeichnen Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser kleiner als 0,1 µm (100 nm). Aufgrund ihrer sehr geringen Größe haben diese Partikel bei der Massenkonzentration einen eher geringen Anteil, spielen aber bei der Partikelkonzentration mit einem Anteil von 90% an der Gesamtpartikelanzahl im Feinstaub eine große Rolle und werden daher in Partikel/cm³ angegeben. Abbildung 9 zeigt die Größenbereiche in denen sich die verschiedenen Partikelfraktionen befinden. (DGP 2018)

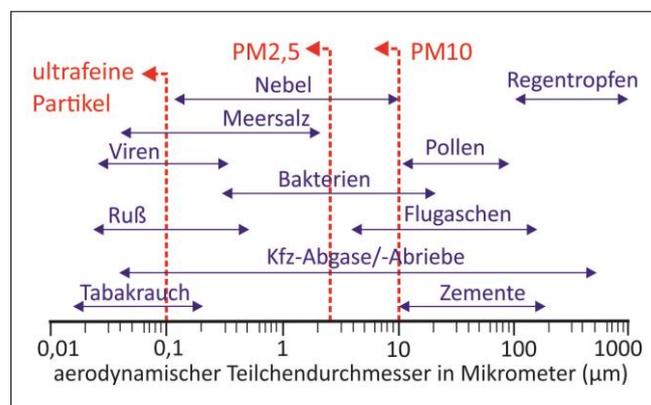


Abb. 9: Größenbereiche von Partikeln in der Atmosphäre
Quelle: HLNUG 2017

Die gesundheitlichen Wirkungen von Feinstaubpartikeln sind von verschiedenen Faktoren abhängig. Hierzu zählen neben physikalischen Eigenschaften, wie die Partikelgröße, -masse, -oberfläche und -struktur auch die chemischen Eigenschaften. Vor allem die Partikelgröße bestimmt, wie weit Partikel in den menschlichen Körper vordringen können. In Abbildung 10 ist die Belastung verschiedener Regionen im Atemtrakt dargestellt. Größere Partikel der **Fraktion 10 bis 2,5 µm** verbleiben bereits im Nasen- und Rachenraum oder gelangen bis in den oberen Bereich der Bronchien. Über Schleimsekretion und mit der Hilfe von Flimmerhaaren werden diese Teilchen innerhalb weniger Tage über Aushusten oder Verschlucken aus dem Körper heraustransportiert. Die nächste Gruppe, **Partikel 2,5 bis 0,1 µm** kann nochmal in zwei Größen unterschieden werden. Partikel von 2,5 bis 1 µm dringen bis in die stärker und feiner verästelten Bronchien und Bronchiolen vor. Hier können sie mehrere Wochen verbleiben, bis sie über Schleim und Filterhaare abtransportiert werden. Kleinere Partikel zwischen 1 bis 0,1 µm werden nur zu etwa 20% im Atemtrakt abgelagert. Grund hierfür ist ihre geringe Eigenbeweglichkeit, wodurch sie eher im Luftstrom der ein- und ausgeatmeten Luft verbleiben. UFP (**Partikel < 0,1 µm**) können bis in die Alveolen vordringen. Hier können sie sich am Gewebe festsetzen und dadurch deutlich größere negative gesundheitliche Wirkungen zeigen. Sie können sich zum einen mehrere Jahre dort ablagern und zum anderen in die Blutbahn und verschiedene Organe (Herz, Leber, Gehirn) übergehen und beispielsweise zu Verengungen von Gefäßen, Entzündungen und Herz-Kreislauf-Erkrankungen führen. Durch ihre geringe Größe und große Eindringtiefe in den menschlichen Körper geht von UFP eine höhere Gesundheitsgefährdung aus verglichen mit den Partikelfraktionen PM_{2,5} und PM₁₀. Dennoch gibt es bisher keinen gesetzlich geregelten Grenzwert oder Vorschriften, die die Messung der Belastung durch UFP vorschreiben. Einige Institutionen, wie das Hessische Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie, sehen dennoch die Notwendigkeit zur Erfassung der Immissionen von UFP und zeichnen diese z.B. an ausgewählten Stellen in Frankfurt am Main auf, um damit eine Datenbasis für weitere Untersuchungen zu schaffen. (HLNUG 2017)

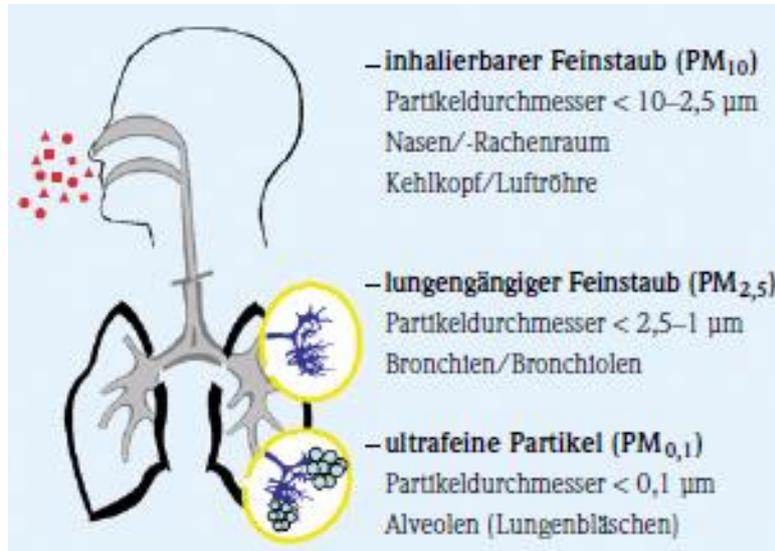


Abb. 10: Belastungen durch Partikel in unterschiedlichen Regionen des Atemtrakts
Quelle: Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie 2017

Kohlenmonoxid (CO)

Das farb-, geruch- und geschmacklose Gas entsteht bei Verbrennungsprozessen und wird hauptsächlich vom Verkehr, privaten Haushalten sowie der Industrie emittiert. Durch die Aufnahme von Kohlenmonoxid durch die Atemluft kommt es neben Beeinträchtigungen der Sauerstoffaufnahme zu Störungen des zentralen Nervensystems. Abbildung 8 zeigt, dass die Emission von Kohlenmonoxid in den letzten 30 Jahren rückläufig ist. (Umweltbundesamt 2021f)

Ozon (O₃)

Bei Ozon handelt es sich um ein farbloses, giftiges Gas, das einen stechenden Geruch mit sich bringt, der allerdings schnell nachlässt. Zwei Arten von Ozon können aufgrund des Vorkommens unterschieden werden. Zum einen die **Ozonschicht in der Stratosphäre** (obere Atmosphäre), in ca. 20 bis 30 km Höhe. Diese Schicht ist lebensnotwendig und stellt einen Schutz vor UV-Strahlung dar. Zum anderen tritt **Ozon als Schadgas in der Troposphäre** (untere Atmosphäre) auf. Das Ozon besteht hier zum Teil aus Ozon der Stratosphäre und zu einem weiteren Teil wird es aus Vorläufersubstanzen natürlichen oder anthropogenen Ursprungs gebildet. Einer dieser Vorläufersubstanzen ist Stickstoffdioxid, das etwa zur Hälfte vom Verkehr emittiert wird. Zu den gesundheitlichen Wirkungen von Ozon zählen Reizungen der Schleimhäute und Atemwege. Bei höheren Konzentrationen kann es zu subjektiven Befindlichkeitsstörungen, Kopfschmerzen oder Konzentrationsschwäche kommen. In den neunziger Jahren wurden bei Überschreitungen der Alarmschwelle teilweise Verkehrsbeschränkungen ausgesprochen, die allerdings keinen nennenswerten Beitrag zur Senkung der Ozonbelastung leisten konnten. Eine dauerhafte Reduzierung der Ozonkonzentration kann nur durch eine langfristige Reduzierung der Ozon Vorläufersubstanzen erreicht werden. (HLNUG 2021a, Umweltbundesamt 2021f)

Schwefeldioxid (SO₂)

Schwefeldioxid ist ein farbloses, stechend riechendes und wasserlösliches Gas. Es entsteht bei der Verbrennung von Kohle und Heizöl. Zu den Hauptemittenten zählen neben der Industrie Gebäudeheizungen und Verkehr (vor allem Dieselmotoren). Durch hohe Belastungen von Schwefeldioxid kann es zu Reizungen der Schleimhäute, Augen und Atemwegsproblemen kommen. Die Emissionen von Schwefeldioxid sind seit 1990 um ca. 95% gesunken. Der Wert liegt in Deutschland somit heute so weit unter dem Grenzwert, dass von diesem Luftschadstoff keine gesundheitlichen Probleme mehr ausgehen. (HLNUG 2021a, Umweltbundesamt 2021f)

Stickstoffoxide (NO_x)

Stickstoffoxide oder auch Stickoxide genannt sind gasförmige, giftige und stark gesundheitsschädliche Verbindungen, die aus Stickstoff (N) und Sauerstoff (O) aufgebaut sind. Vor allem Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO₂) beeinflussen die Luftqualität negativ. Ein Großteil der Stickoxide entsteht durch Verbrennungsmotoren und hier vor allem durch Dieselmotoren. Da die Auswirkungen dieser Luftschadstoffe stark von der Konzentration in der Luft abhängig sind, sind insbesondere Immissionsorte, die sich dicht an der Quelle befinden besonders gefährdet. Der Straßenverkehr stellt somit eine höhere Gefährdung dar, als sie von Stickoxiden in Form von Abgasen aus einem Schornstein ausgeht. Unter anderem durch strengere Gesetze und bessere Kraftstoffe konnte der Verkehrssektor zur Reduzierung der Emissionen um 60% zwischen 1990 und 2019 mit beitragen. Zu den gesundheitlichen Auswirkungen von Stickoxiden zählt eine reduzierte Lungenfunktion, die im weiteren Verlauf zu Asthma und Atembeschwerden führen kann. Außerdem kommt es zu einer Förderung von Allergien, der Zunahme von Herz- und Kreislauferkrankungen und einer damit verbundenen höheren Sterblichkeit. (Deutsche Umwelthilfe e.V. 2021b, Umweltbundesamt 2021f)

2.5.3 Rechtliche Grundlagen

Die Europäische Union erließ am 11. Juni 2008 die Richtlinie 2008/50/EG über Luftqualität und saubere Luft für Europa, um ein einheitliches Standardsystem zur Beurteilung und Kontrolle von Luftschadstoffen in Europa einzuführen. Demnach sind die Mitgliedsstaaten der Europäischen Union verpflichtet „den Ausstoß von Schadstoffen an der Quelle zu bekämpfen und die effizientesten Maßnahmen zur Emissionsminderung zu ermitteln und auf lokaler, nationaler und gemeinschaftlicher Ebene anzuwenden“ (Abs. 2 EU-Richtlinie 2008/50/EG). Die Richtlinie standardisiert Beurteilungsverfahren und Beurteilungskriterien nach denen die Mitgliedsstaaten verfahren müssen.

Auf Bundesebene wurde als Reaktion auf den europäischen Beschluss die „39. Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen“ (kurz 39. BImSchV) zur Durchführung des Bundes-

Immissionsschutzgesetzes verabschiedet, um die europäische Richtlinie auf nationale Ebene umzusetzen. Die 39. BImSchV verschärft mehrere bestehende Grenzwerte von Luftschadstoffen und löst vorherige Verordnungen (22. und 33. BImSchV) ab. Neben den EU-Grenzwerten hat auch die WHO-Richtwerte für die Immissionen von Luftschadstoffen festgelegt, die zum Schutz der Bevölkerung beitragen (s. Tab. 1).

Tab. 1: Vergleich der WHO-Richtwerte und der EU-Grenzwerte
Quelle: Eigene Darstellung nach WHO 2021 und EU 2008

Luftschadstoff	WHO-Richtwerte	Max. erlaubte Überschreitungen pro Jahr	EU-Grenzwerte	Max. erlaubte Überschreitungen pro Jahr
PM _{2,5}	5 µg/m ³ Jahresmittelwert		20 µg/m ³ Jahresmittelwert	
	15 µg/m ³ 24-Stunden-Maximum	3		
PM ₁₀	15 µg/m ³ Jahresmittelwert		40 µg/m ³ Jahresmittelwert	
	45 µg/m ³ Tagesmittelwert	3	50 µg/m ³ Tagesmittelwert	35
NO ₂	10 µg/m ³ Jahresmittelwert		40 µg/m ³ Jahresmittelwert	
	200 µg/m ³ 1-Stunden-Maximum		200 µg/m ³ 1-Stunden-Maximum	18
O ₃	100 µg/m ³ 8-Stunden-Maximum		120 µg/m ³ 8-Stunden-Maximum	25

Blau: EU-Grenzwert liegt hinter WHO-Empfehlung

2.6 Identifikation von Einflussfaktoren auf die Luftschadstoffbelastung

Verschiedene Faktoren wie beispielsweise Meteorologie oder städtebauliche und verkehrliche Gegebenheiten können die Luftschadstoffbelastungen beeinflussen. Die folgenden Erkenntnisse über Einflussfaktoren auf die Luftschadstoffbelastung sind Ergebnis der am Institut für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik angefertigten, unveröffentlichten Masterarbeit von Tobias Kälker zum Thema „Methoden zur quantifizierten Untersuchung des Einflusses von Straßentypen auf die Belastungsintensität durch Luftschadstoffe“. Diese wurden nach intensiver Prüfung sowie teilweiser Kürzung in diesen Bericht aufgenommen.

2.6.1 Hintergrundbelastung

Luftschadstoffe besitzen die Eigenschaft, sich großflächig über mehrere Gebiete zu verteilen. Daraus resultiert eine unterschiedliche Ausprägung der Luftschadstoffkonzentration in verschiedenen räumlich getrennten Gebieten. Somit reicht eine Einzelbetrachtung der Luftschadstoffbelastung in städtischen Gebieten oder einzelnen Straßenzügen nicht aus, wenn auf die **Gesamtbelastung** der Luft-

schadstoffkonzentration geschlossen werden soll. Die Gesamtbelastung der Luftschadstoffkonzentration resultiert aus der städtischen/ländlichen Hintergrundbelastung und der lokalen Zusatzbelastung. Die zugewiesenen Werte werden in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ oder mg/m^3 gemessen. (DGP 2018: 20)



Abb. 11: Schema der Luftschadstoffbelastung in einem urbanen Ballungsraum
Quelle: DGP 2018: 21

Abbildung 11 zeigt die unterschiedlichen Belastungsregime in ihrer allgemeinen Ausdehnung in der Fläche und ihrem gleichzeitigen Anteil an der Schadstoffkonzentration. Der untere Bereich der ländlichen Hintergrundbelastung berücksichtigt den Anteil der Region an der Gesamtbelastung der Schadstoffkonzentration. Die **Hauptverursacher** dieser Schadstoffkonzentration stammen überwiegend aus der Landwirtschaft und anderen biologischen Quellen. Ansonsten ist die Luftqualität weitgehend unbeeinflusst von städtischen Belastungsquellen. Hinzu addiert wird der städtische Anteil an der Schadstoffkonzentration. Sie speist sich aus anderen Emissionsquellen wie Industrie, Haushalten und Verkehr (FSGV 2018: 9). Diese Belastung kann für das städtische Gebiet als die typische Luftqualität bezeichnet werden. Die Zusatzbelastung durch lokale Emittenten erfolgt im verkehrsnahen Umfeld, normalerweise an stark befahrenen Straßen. Hauptverursacher dieser erhöhten Schadstoffkonzentration ist der Verkehr. Durch einen Vergleich zwischen den gemessenen Schadstoffwerten im lokalen straßennahen Hintergrund und einer nicht verkehrsbelasteten Hintergrundstation im Umfeld der Stadt kann auf die jeweilige Belastungsintensität der Belastungsregime geschlossen werden. (Klingner et al. 2006: 328)

2.6.2 Meteorologische Einflussfaktoren

Meteorologische Faktoren beeinflussen die Schadstoffkonzentration in vielerlei Hinsicht. Günstige oder ungünstige Ausbreitungsbedingungen führen zu einer erhöhten oder verringerten Schadstoffkonzentration im Straßenraum. Zum Beispiel führt ein Niederschlagsereignis zu einer Auswaschung der Atmosphäre und reduziert somit die Verweildauer von Luftschadstoffen in der Luft. Im Folgenden soll auf diese Erscheinungen näher eingegangen werden. Die meteorologischen Einflussfaktoren sind zusammengefasst:

- Atmosphärische Schichtung
- Luftfeuchtigkeit
- Niederschlag
- Temperatur
- Wind

Atmosphärische Schichtung

Die atmosphärische Schichtung ist der Ausdruck für den Grad an Stabilität bzw. Labilität von Luftmassen in der Atmosphäre. Grundsätzlich werden in der Literatur drei verschiedene Zustände bei einer Luftschicht unterschieden:

- Stabile Luftschicht (Temperaturabnahme unter 1 Grad je 100 m)
- Labile Luftschicht (Temperaturabnahme über 1 Grad je 100 m)
- Indifferente Luftschicht (Temperaturänderung von 1 Grad je 100 m)

Nimmt die Temperatur jedoch mit der Höhe zu, so wird von einer **Inversion** gesprochen. Die oberen Luftschichten sind somit kälter als die unteren, infolgedessen wird eine Luftdurchmischung verhindert (Baumüller 1999c: 222; Malberg 2007: 348). Inversionen besitzen einen signifikanten Einfluss auf die Luftschadstoffbelastung (Bigazzi 2014; Jian et al. 2012; Peters et al. 2014). Düring et al. (2008) stellte eine Korrelation zwischen einem Inversionsereignis und einer Veränderung der Schadstoffkonzentration der Feinstäube PM₁₀ und PM_{2,5} fest. Während einer Inversion sammeln sich unter der Grenzschicht Luftschadstoffe an, die im Tagesverlauf zu einer erhöhten Schadstoffkonzentration führen (Baum 2008: 25; Klinger et. al 2006).

Luftfeuchtigkeit und Niederschlag

Es ist in der Diskussion zu den meteorologischen Einflussmöglichkeiten in der Fachliteratur festzustellen, dass der Einfluss des Faktors Niederschlag auf die Luftschadstoffbelastung dem Einfluss des Faktors Luftfeuchtigkeit vorgezogen wird. Einige Studien bemerken durchaus einen Einfluss der **Luftfeuchte** auf die PM-Fraktionen (Bracker et al. 2010: 103), andere konnten dies nur bedingt bestätigen (Düring et al. 2008; Kantamaneni et al. 1996; Nieuwenhuijsen 1998) oder stellen dies in Frage (Schulze 2002: 75). Eine abschließende Bewertung zum Einfluss der Luftfeuchtigkeit auf die Schadstoffbelastung ist daher schwierig zu beantworten. Es ist darauf hinzuweisen, dass andere Einflussfaktoren wie Niederschlag, Windgeschwindigkeit oder Verkehrsaufkommen den Einfluss der Luftfeuchtigkeit überlagern (Schulze 2002: 36).

Dem **Niederschlag** wird in mehreren Studien ein großer Einfluss auf die Luftschadstoffbelastung zugesprochen (Kayes 2019: 276; Traistă et al. 2003: 100; Wang et al. 2019). Evelyn Schulze untersuchte den Einfluss von Regen und Luftfeuchtigkeit auf die PM₁₀-Emissionen und -Immissionen. Dazu betrachtete sie die meteorologischen Werte mehrerer Messstationen in Berlin und verglich diese mit den dort auftretenden NO_x- und PM₁₀-Gesamtbelastungen. Dabei stellte sie fest, dass die Feinstaubbelastung bei einem Niederschlagsereignis bis zu 30% verringert wurde. (Schulze 2002: 46) Ebenfalls beeinflusst ein Niederschlagsereignis die Gesamtbelastung an Stickoxiden. Der Effekt ist allerdings weniger ausgeprägt als bei den PM₁₀-Belastungen (Schulze 2002: 46 ff.). Andere Studien verweisen auf eine Beobachtung, dass Auftreten von Niederschlagsereignissen einen signifikanteren Einfluss auf die Luftschadstoffbelastung besitzt als die Niederschlagshöhe eines Niederschlagsereignisses (Klingner et al. 2006: 329; Lohmeyer et al.2004: 75).

Temperatur

Beim Einflussfaktor Temperatur zeichnet sich bei der Beeinflussungsmöglichkeit der Luftschadstoffe Stickoxid und Feinstaub ein ambivalentes Bild ab. In verschiedenen offiziellen Dokumentationen der Bundesanstalt für Straßenwesen wird der meteorologischen Kenngröße Temperatur ein signifikanter Einfluss auf die Luftschadstoffbelastung zugeschrieben. Demnach ergibt sich insbesondere für Feinstäube größerer Struktur (PM₁₀) ein Zusammenhang zwischen kälteren Temperaturperioden und erhöhter Feinstaubbelastung. (Baum et al. 2006: 26; Baum 2008: 56; Düring et al. 2008: 264). Der Deutsche Wetterdienst verglich meteorologische Parameter mit der Feinstaubbelastung in Berlin und am Hohenpeißenberg und stellte ähnliche Beobachtungen fest (Kaminski 2005). Internationale Studien gelangen zu ähnlichen Erkenntnissen (Bigi 2010: 2010) oder räumen dem Einfluss der Temperatur auf die Feinstaubbelastung zumindest einen schwachen Einfluss ein (Adams et al. 2001: 4564). Predrag et al. (2019) untersuchte zwischen 2015 und 2017 die Wirkung meteorologischer Faktoren

auf die Stickoxid-Belastung im städtischen und verkehrsnahen Umfeld in Banja Luka, Bosnien und Herzegowina. Die Studie stellte eine Korrelation zwischen Temperaturzunahme und Stickoxid-Abnahme sowie umgekehrt fest.

Trotz dieser zustimmenden Ergebnisse gilt es aber zu berücksichtigen, dass die positive Übereinstimmung des Einflussfaktors Temperatur mit einer beeinflussbaren Schadstoffbelastung auch weitere Gründe haben kann. Sowohl die zusätzliche Korrelation weiterer meteorologischer Kenngrößen, wie Luftaustauschbedingungen oder Windverhältnisse, als auch die Zunahme von nicht-motorbedingten Partikel-Emissionen im Winter aufgrund von Streugut und Zunahme vermehrter Verbrennungsprozesse (Düring 2008: 4; Kohoutek 2011: 17) kann in diesem Kontext nicht vollständig ausgeschlossen werden.

Wind

Der meteorologische Einflussfaktor Wind besitzt in mehrfacher Hinsicht einen spürbaren und messbaren Einfluss auf die Luftschadstoffbelastung. Der Wind ist eine gerichtete Größe und resultierend aus Ausgleichprozessen von Luftdruckunterschieden in der Atmosphäre. Dies ergibt eine Luftbewegung, die je nach Situation unterschiedlich stark ausfallen kann. Diese Windgeschwindigkeit beeinflusst die Belastungsintensität von Luftschadstoffen im Umfeld. (Beckröge 1999: 54)

Grundsätzlich führen höhere Windgeschwindigkeiten zu einer Durchmischung bzw. Verdünnung der Luftschadstoffe, insbesondere der Feinstäube (Baum 2008: 55; Düring 2008: 256). Der Effekt tritt ab Windgeschwindigkeiten von ca. 2,5 m/s auf. Ähnliche Beobachtungen stellte der Deutsche Wetterdienst bei der Auswertung der Überschreitungshäufigkeit des Feinstaubgrenzwerts fest (Kaminski 2005). Interessanterweise stellten die Studien von Baum (2008) an ausgewählten Messquerschnitten der Bundesautobahn und Düring (2008) in ausgewählten innerstädtischen Straßenräumen eine Zunahme der Luftschadstoffbelastung bei geringeren Werten als 2,5 m/s Windgeschwindigkeit fest. Dies wird mit einem Aufwirbelungseffekt (Düring 2008: 263) von Feinstäuben, aufgrund einer trockenen Fahrbahn begründet. Buchholz (2006) untersuchte in ihrer Diplomarbeit den Einfluss der Windgeschwindigkeit auf die Stickoxid-Belastung an Stuttgarter Messstationen. Ihre Ergebnisse bestätigten den antiproportionalen Zusammenhang zwischen Windgeschwindigkeit und Schadstoffkonzentration. Ab einer Windgeschwindigkeit von 2 m/s konnte ein Rückgang der Stickoxide um bis zu 50-80% beobachtet werden (Buchholz 2006: 105).

In internationalen Studien wurde in gleichem Maße eine Korrelation zwischen Wind und Luftschadstoffbelastung festgestellt. So beeinflusst nach Adams et al. (2001: 4564) die Windgeschwindigkeit die Transportrate der Feinstäube, ebenso wie die Verdünnungsrate mit sauberer Luft. Berghams et al. (2008: 1296) kamen in ihrer Studie zur Expositionsbewertung von Feinstäuben bei Radfahrer*innen zu ähnlichen Ergebnissen. Die gemessene Konzentration an Feinstäuben nahm mit zunehmender Windgeschwindigkeit ab, während sie bei abnehmender Geschwindigkeit wieder zunahm. Neben der Windgeschwindigkeit besitzt auch die Hauptwindrichtung einen indirekten Effekt auf die Belastungsintensität. Die Hauptwindrichtung hängt mit der jeweiligen Wetterlage zusammen (Düring 2008: 256). Ein wichtiges Kriterium bei der Betrachtung des Zusammenhangs der Windrichtung und der Luftschadstoffbelastung sind die sogenannten Seiten eines angeströmten Objektes. Die dem Wind zugewandten bzw. abgewandte Seite des Objektes wird als Luv bzw. Lee bezeichnet. Die Luftschadstoffkonzentration liegt im Allgemeinen auf der Lee-Seite auf einem höheren Niveau als auf der Luv-Seite (Baum 2008: 57; Kastner-Klein 1999: 93; Schlums 1998: 89).

2.6.3 Städtebaulichen Einflussfaktoren

Die städtebaulichen Einflussfaktoren sind abhängig von den jeweiligen örtlichen Gegebenheiten. Sie beschreiben die Einflüsse unveränderlicher oder schwer veränderlicher Elemente, wie die Randbebauung oder Straßenbreite, beeinflussen die Ausbreitung der Luftschadstoffe durch ihre physische Form und korrelieren mitunter stark mit meteorologischen Parametern. Die städtebaulichen Einflussfaktoren sind zusammengefasst:

- Randbebauung
- Straßenraumbreite
- Straßenlängsneigung
- Zustand und Material der Fahrbahnoberfläche
- Vegetation

Randbebauung

Im offenen bzw. aufgelockerten Umfeld wird die Ausbreitung von Emissionen hauptsächlich von Windrichtung und Windgeschwindigkeit bestimmt (Giebel 1996: 44). Im städtischen Umfeld werden beide Faktoren durch eine einseitige bzw. beidseitige Bebauung mit einhergehenden lokalen Strömungsformen beeinflusst. Diese unterschiedlichen Strömungen beeinflussen somit die Ausbreitungsmöglichkeiten der Luftschadstoffe. Daraus resultiert eine hohe Bedeutung der jeweiligen Bebauungsform für die Beeinflussung von Luftschadstoffbelastungen. Eine häufige Form der Bebauung im innerstädtischen Gebiet ist die sogenannte Straßenschlucht (Garben und Lehming 1992: 36). Bei einer Straßenschlucht handelt es sich im Allgemeinen um eine Straße mit einer lückenlos beidseitig umfassenden Bebauung mit mehrstöckigen Gebäudehöhen. Das geometrische Kriterium zur Identifizierung einer Straßenschlucht wird durch Straßenraumbreite und Gebäudehöhe bestimmt (Vardoulakis et al. 2014: 3). Je nach Verhältnis zwischen diesen beiden Parametern (0,5; 1; 2) kann die Straßenschlucht unterschiedliche Strömungsformen besitzen (Kastner-Klein 1999: 92 ff.). Als zweites Kriterium gilt die Länge der Straßenschlucht gegenüber zwei Hauptkreuzungen. Somit lassen sich diese in kurze, mittlere und lange Schluchten einteilen (Vardoulakis et al. 2014: 3). Beide Kriterien beeinflussen die Luftschadstoffbelastung in Straßenräumen, wie die Untersuchungen zu strömungsmechanischen Transportvorgängen in Straßenschluchten von Kastner-Klein (1999) zeigen.

Die Windgeschwindigkeit nimmt mit zunehmender Bodenreibung ab (Beckröge 1999: 55). In besiedelten Gebieten vergrößern Bauwerke die sogenannte "Rauhigkeit" (Beckröge 1999: 71), die zu einer erhöhten Turbulenzintensität und zu geringeren Windgeschwindigkeiten im städtischen Gebiet führt (Beckröge 1999: 73, 77). Je nach Windrichtung und baulichen Gegebenheiten können verschiedene Ausbreitungsmöglichkeiten der Luftschadstoffe auftreten. Die Emissionen des Kraftverkehrs werden in niedriger Höhe an die Umwelt abgegeben. Je nachdem, ob der Wind parallel, seitlich oder senkrecht zur Straßenachse weht, können unterschiedliche Belastungsszenarien eintreten (Giebel 1996: 45). Diese werden durch das Verhältnis zwischen Straßenraumbreite und Gebäudehöhe beeinflusst (s. Tab. 2).

Tab. 2: Auswirkungen von Schluchtenparameter auf die Luftschadstoffbelastung
Quelle: Eigene Darstellung nach Flassak et al. 1996: 31-34

Definierte Schluchtenparameter	Ergebnis
Gebäudehöhe	Eine Verringerung der Gebäudehöhe führt zu einer schwachen Verringerung der Konzentration von Luftschadstoffen. Eine Erhöhung der Gebäudehöhe führt zu einer stärkeren Erhöhung der Luftschadstoffkonzentration.
Schluchtenbreite	Eine Verringerung der Schluchtenbreite führt zu einer Erhöhung der Konzentration von Luftschadstoffen und umgekehrt.
Schluchtenlänge	Eine Verringerung der Schluchtenlänge führt zu einer Verringerung der Konzentration von Luftschadstoffen und umgekehrt.
Bebauungsdichte	Mit Verringerung der Bebauungsdichte sinkt im Allgemeinen die Konzentration von Luftschadstoffen in einer Straßenschlucht.

Kastner-Klein (1999) kommt in ihrer Dissertation zum Thema experimentelle Untersuchung der strömungsmechanischen Transportvorgänge in Straßenschluchten zu ähnlichen Ergebnissen (s. Tab. 3).

Hierzu nutzt sie ein maßstabsgerechtes Modell idealisierter Straßenschluchten und lässt dieses in einem Windkanal durchströmen. Für die Freisetzung der Kfz-Emissionen nutzt sie ein Tracergas, das an den jeweiligen Emissionsquellstandorten bestrahlt und freigesetzt wird (Kastner-Klein 1999: 2). Die definierten Parametervariationen nach Kastner-Klein (1999) auf die Konzentrationsverteilung sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt.

Tab. 3: Auswirkungen von Bebauung und Windrichtung auf die Luftschadstoffbelastung
Quelle: Eigene Darstellung nach Klein-Kastner 1999: 93-112

Definierte Parametervariationen	Ergebnis
Beidseitig bebaut (Referenzfall)	Die Luftschadstoffkonzentration ist auf der Lee-Seite des angewehten Gebäudes höher als auf der Luv-Seite des gegenüberliegenden Gebäudes. Am Boden auf der Lee Seite des angewehten Gebäudes lässt sich die maximale Konzentration von Luftschadstoffen feststellen.
Einseitig bebaut	Befindet sich die Emissionsquelle im Lee eines Gebäudes führt dies zu höheren Luftschadstoffbelastungen verglichen zu Emissionsquellen im Luv. Die Luftschadstoffkonzentration einseitig bebauter Randbebauungen auf der Lee-Seite liegt deutlich unter der Luftschadstoffkonzentration der Lee-Seite des angewehten Gebäudes bei beidseitiger Bebauung.
Einfluss Windrichtung	Die Konzentration von Luftschadstoffen liegt bei der senkrechten Windrichtung am höchsten, der niedrigste Wert wird bei der parallelen Windrichtung erreicht.
Einfluss Umgebungsbebauung	Die Konzentration von Luftschadstoffen steigt mit jedem zusätzlichen Gebäude vor der Straßenschlucht an. Der Luftaustausch zwischen der Strömung in der Schlucht und Grenzschicht ist abgeschwächt.
Einfluss Dachgeometrie	Die Dachgeometrie besitzt einen großen Einfluss auf die Konzentration der Luftschadstoffe in einer Straßenschlucht. Die Dachgeometrie des ersten angewehten Gebäudes ist dabei relevanter als die des gegenüberliegenden Gebäudes.

Straßenraumbreite

Ein weiteres Kriterium bei der Betrachtung möglicher Einflussfaktoren auf die Luftschadstoffbelastung in Straßenräumen ist die Straßenraumbreite. Die Straßenraumbreite bezeichnet nicht nur die reine Breite der Fahrbahn und des Gehwegs, sondern schließt die Vorflächen der Randbebauung an der Straße mit ein. Der Begriff Bebauungsabstand kann daher simultan verwendet werden. Dies verdeutlicht einen Zusammenhang zwischen den Ergebnissen der Randbebauung mit dem Einflussfaktor Straßenraumbreite. Grundsätzlich führt eine Halbierung der Straßenbreite zu einer Verdoppelung der Schadstoffbelastung (Giebel 1996: 45). Je breiter der Abstand der Bebauung, desto mehr verteilen sich die Emissionen im Straßenraum. Leisen (1978) simuliert in einem Windkanal verschiedene Immissionssituationen in verkehrsreichen Straßenschluchten. Ein Kriterium dieser Untersuchung ist der Einfluss der Bebauung und Straßenraumbreite auf die Luftschadstoffkonzentration in Straßenräumen. Die nachfolgende Abbildung zeigt ein Isoliniendiagramm einer dimensionslosen Konzentration von Luftschadstoffen.

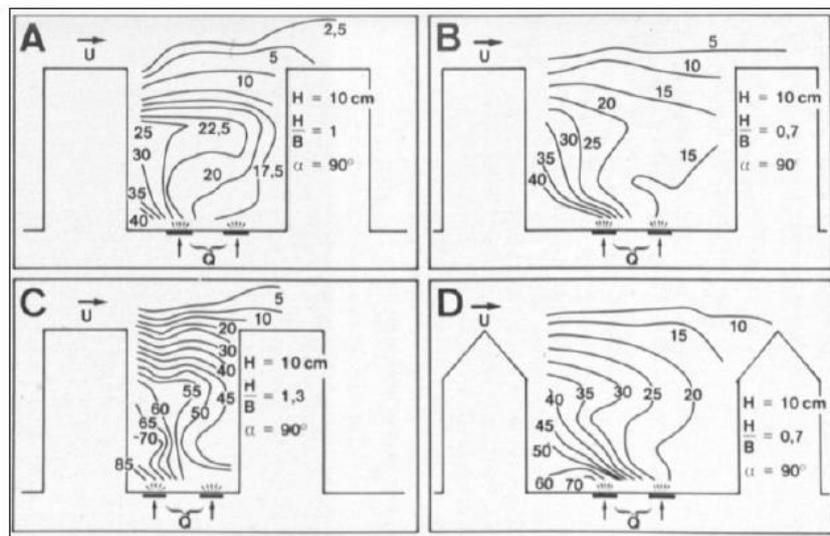


Abb. 12: Isoliniendiagramm einer dimensionslosen Konzentration von Luftschadstoffen
Quelle: Leisen 1978: 243

Es ist deutlich zu erkennen, dass mit abnehmender Straßenraumbreite eine Verdichtung der Konzentrationsfelder im Straßenraum stattfindet. Allerdings kann diese Beobachtung nicht nur mit einer Verringerung der Straßenraumbreite zusammenhängen, sondern ebenso mit einer Erhöhung der Bebauungshöhe bei gleichbleibender Straßenraumbreite. Diese Erkenntnis zeigt ebenfalls den hohen Zusammenhang zwischen den Einflussfaktoren Randbebauung und Straßenraumbreite.

Straßenlängsneigung

Die Straßenlängsneigung besitzt einen messbaren Einfluss auf die Luftschadstoffbelastung. Das liegt am Überwinden diverser Fahrwiderstände für den Vorantrieb des jeweiligen Verkehrsmittels. Eine Komponente des Fahrwiderstandes ist der Steigungswiderstand. Je höher die Steigung zunimmt, desto mehr Leistung muss der Motor des Fahrzeugs erzeugen, um den Steigungswiderstand zu überwinden. Je höher die Leistung des Fahrzeugs, desto höher die Schadstoffemissionen (Keller und Heldstab 1995:145). Dies wird auf Abbildung 13 nach dem Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs (Infras 2010) deutlich. Dem Diagramm ist zu entnehmen, dass die Belastungen durch PM_{2,5}- und NO_x mit zunehmender Steigung ansteigt.

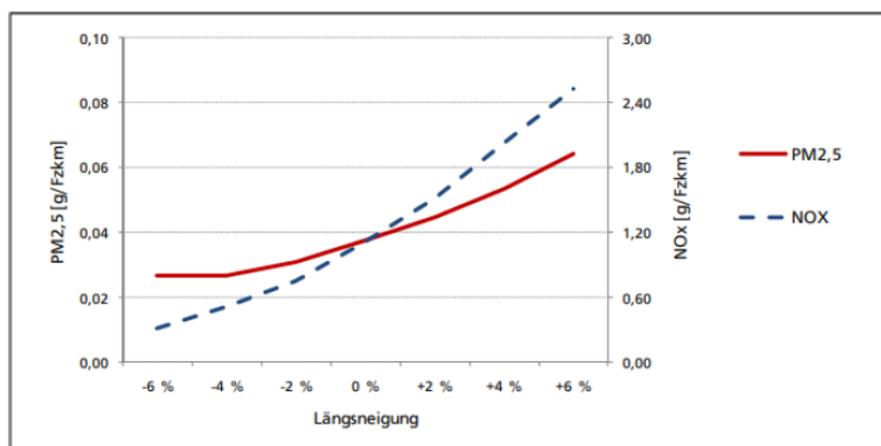


Abb. 13: PM_{2,5} und NO_x-Emissionen in Abhängigkeit zur Längsneigung
Quelle: Darstellung übernommen von Kohoutek (2011): 14. Datengrundlage nach HBEFA 3.1 (Infras 2010) für das Bezugsjahr 2005 mit SV-Anteil von 10% und für die Verkehrssituation „Innerortshauptstraße mit Lichtsignalanlage mit mittlerer Störung“

Zustand und Material der Fahrbahnoberfläche

Luftschadstoffemissionen im Verkehr werden, nicht nur durch Verbrennungsabgase erzeugt, sondern ebenfalls durch Reifen-, Bremsen- und Straßenabrieb, sowie durch Aufwirbelung an die Umwelt abgegeben. Einen größeren Einfluss auf diese Prozesse besitzt die Straßenoberfläche, die je nach Zustand den emittierten abgelagerten Luftschadstoff besser oder schlechter binden kann. Gründe für eine Veränderung bzw. Beschädigung einer Fahrbahn und somit einer Verschlechterung der Straßenoberfläche sind Bindemittelverluste, Splittverlust, Rissbildungen, Schlaglöcher, Flickstellen und Bindemittelanreicherungen (Heller et al. 2005).

Vegetation

Innerstädtische Straßenräume können verschiedene Vegetationsausstattungen aufweisen. Die Bandbreite reicht von einzelnen Baumbepflanzungen, Hecken, Sträucher, Grasflächen oder Wand- und Dachbegrünung bis hin zu kleineren bis größeren Parks am Straßenrand oder in unmittelbarer Umgebung zum Straßenraum. Pflanzen können im Straßencharakter integriert sein (Grünstreifen, Baumallee) oder in privaten Vorgärten stehen. Grundsätzlich besitzen Pflanzen die Fähigkeit, das Mikroklima in der Stadt zu verbessern (Bruse 2003: 70). Ein Teilaspekt betrifft hierbei die **Lufthygiene**. Allgemein wird der Vegetation sowohl ein positiver, wie negativer Effekt auf die Luftschadstoffbelastung zugesprochen, wobei der positive Effekt überwiegt (Thönnessen et al. 2013: 15). Die Luftschadstoffkonzentration lässt sich durch Vegetation auf direktem und indirektem Weg sowohl mindern, als auch steigern (Kappis und Endlicher 2007: 76; Langner 2006: 9; Thönnessen et al. 2013: 15).

Die direkte Konzentrationsminderung erfolgt durch eine Deposition der Schadstoffe auf der Blattoberfläche bzw. Aufnahme über Spaltöffnungen (Kappis und Endlicher 2007: 76). Die Deposition von Luftschadstoffen kann trocken, feucht oder nass erfolgen. Bei der trockenen Deposition lagern sich Schadstoffe ohne den Einfluss von Niederschlag auf der Vegetationsoberfläche oder dem Boden ab. Die Vegetationsoberfläche, in der Regel die Blattoberfläche, sammelt und entzieht den Feinstaub der Atmosphäre und scheidet diesen mit dem nächsten Niederschlag in Richtung Boden ab. Der Eintrag der Schadstoffe auf die Vegetation bzw. auf den Boden erfolgt bei der nassen bzw. feuchten Deposition über das Niederschlagsereignis direkt. (Langner 2006: 9) Eine indirekte Konzentrationsminderung kann durch eine Veränderung der Luftzirkulation, mithilfe einer gezielten Anordnung von Vegetation im Straßenraum erfolgen (Kappis und Endlicher 2007: 76; Thönnessen et al. 2013: 15).

Neben diesen positiven Wirkungen auf die Luftschadstoffbelastung kann Vegetation auch direkt zur Konzentrationssteigerung beitragen, indem durch ungünstigen Vegetationsbewuchs zusätzliche biologische Emissionen freigesetzt werden (Street et al. 1997: 366) oder indirekt durch eine Verhinderung der Luftdurchmischung in stark bebauten Gebieten (Beckröge 1999: 90; Gromke und Ruck 2007: 3301). Eine Konzentrationserhöhung kann bei ungünstiger Anordnung der Vegetation im Straßenraum auftreten.

Für die Schadstoffminderung des Feinstaubes gibt es nach den Ausführungen von Thönnessen (2013) mehrere Möglichkeiten. Zunächst erfolgt die Ablagerung der Feinstäube durch Impaktion, beispielsweise eignen sich hierfür raue, behaarte und klebrige Blätter von Laubbäumen. Auch sind große Blattoberflächen kleineren Blattoberflächen aufgrund der höheren Aufnahmekapazität vorzuziehen. Stickoxide werden von der Pflanze über Spaltöffnungen absorbiert und angelagert. Um eine größtmögliche Anzahl an Schadstoffen aufzunehmen, werden daher flache und breite Blätter von Laubbäumen empfohlen. (Thönnessen et al. 2013: 15, 28) Bruse (2003: 68) weist jedoch darauf hin, dass der Einfluss von Bäumen auf die Luftschadstoffbelastung von gasförmiger Verbindung gering ist und eher auf andere Faktoren, wie die Beeinflussung der Windströmungen durch entsprechende geringe Permeabilität zurückzuführen ist.

Wie bei der Randbebauung dargestellt, führt eine Durchmischung der Luft im Stadtraum zu einer guten Luftqualität. Wird jedoch diese Durchmischung, durch strömungsrelevante Hindernisse im

Straßenraum behindert, kann ein sogenannter Tunneleffekt (Bruse 2013: 68) entstehen, der einen Austausch zwischen verschiedenen Luftschichten verhindert. Ein solches Hindernis können großvolumige Baumkronen darstellen. Den beschriebenen **Tunneleffekt** beobachtete Gromke (2009) in seiner Arbeit zum Einfluss von Bäumen auf die Durchlüftung von innerstädtischen Straßenschluchten. Er stellte fest, dass die Konzentrationswerte bei nicht-paralleler Anströmung in Straßenschluchten mit alleinartiger Baumbepflanzung insgesamt höher liegen, als die Werte in Straßenschluchten ohne nennenswerte Vegetation. (Gromke 2009: 75-77)

Zusammenfassend lässt sich ein gewisser **Einfluss der Vegetation** auf die Luftschadstoffbelastung zweifelsfrei feststellen. Insbesondere die Schadstoffkonzentration des Feinstaubes kann durch eine kluge und vorausschauende Anpflanzung von Vegetation im Straßenraum reduziert werden. Es ist aber anzumerken, dass der Einfluss der Vegetation auf die Luftschadstoffbelastung zum einen nicht räumlich unbegrenzt (Thönnessen et al. 2013: 20) ist und zum anderen nur ein Teilaspekt (Gorbachevskay et al. 2007: 9) bei der Stärkung der Lufthygiene sein kann.

2.6.4 Verkehrliche Einflussfaktoren

Wie in Kapitel 2.5 zu den Luftschadstoffen beschrieben, besitzt der Verkehr bei der Erzeugung und Beeinflussung der Luftschadstoffe eine übergeordnete Bedeutung. Grundsätzlich geht ein **erhöhtes Verkehrsaufkommen** mit einer **erhöhten Luftschadstoffbelastung** einher. Allerdings ist das reine Verkehrsaufkommen nicht das einzige wichtige Kriterium. Je nach Verkehrssituation können unterschiedliche Belastungsintensitäten bei ähnlichem Verkehrsaufkommen auftreten. Luftschadstoffe im Verkehr entstehen primär durch emittierte Abgase, die je nach Betriebszustand des Motors unterschiedlich ausfallen können. Nicht jede Antriebsart erzeugt Schadstoffe in gleichen Maßen, ebenso wie die Geschwindigkeit des Fahrzeugs und der Verkehrszustand auf der Strecke zu unterschiedlichen Belastungsphasen des Motors und dementsprechend zu einem variierenden Ausstoß von Abgasen führen können. Die verkehrlichen Einflussfaktoren auf die im Folgenden näher eingegangen werden soll, sind zusammengefasst:

- Geschwindigkeit
- Verkehrsfluss
- Verkehrszusammensetzung

Geschwindigkeit

Die Bedeutung des Einflusses der Geschwindigkeit auf die Luftschadstoffbelastung wird bereits bei der Betrachtung der in Abbildung 14 dargestellten Formel zur Berechnung der Verkehrsemissionen auf Basis der Fahrzeuggeschwindigkeit und dem Kraftstoffverbrauch deutlich:

$$E_{(v)} = C_0 + C_1 * V^2 + \frac{C_2}{V} \left[\frac{g}{Kfz * km} \right]$$

E = Emission,

v = Geschwindigkeit,

C = Regressionskoeffizient zur Berücksichtigung von Schadstoffen, Kraftstoffkonzept und Fahrzeugart

Abb. 14: Vereinfachte Formel zur Berechnung der Verkehrsemissionen
Quelle: Cerwenka 1997

Es gilt der Grundsatz, dass je höher die Fahrzeuggeschwindigkeit, desto höher der jeweilige Kraftstoffverbrauch und je höher der Kraftstoffverbrauch, desto höher die Anzahl der ausgestoßenen Schadstoffe. Es ist allerdings zu beachten, dass die Motordrehzahl und Motorbelastung ebenfalls wichtige Kenngrößen darstellen (Topp 2014: 28).

Evelyn Schulze beobachtete eine Korrelation zwischen der Fahrzeuggeschwindigkeit und der Schadstoffbelastung auf unterschiedlichen Fahrstreifen. Demnach ergeben höhere Fahrzeuggeschwindig-

keiten eine höhere Schadstoffbelastung auf den inneren Fahrstreifen (Schulze 2002: 93). Das österreichische Emissionsmodell NEMO zeigt eine Übersicht zur durchschnittlichen Fahrzeugemission basierend auf den Werten der österreichischen Flotte. In Tabelle 4 ist zu erkennen, dass die jeweiligen Schadstoffwerte mit zunehmender Geschwindigkeit steigen. Allerdings ist zu beachten, dass diese Werte sich auf höhere Geschwindigkeiten und freie Streckenverläufe beziehen. Im städtischen Umfeld gelten andere Geschwindigkeitsgrenzen und Verkehrsabläufe.

Tab. 4: Absolute Änderung der Emissionen (g/km) der österreichischen Flotte 2018 für Tempolimits 100, 130 und 140 km/h bei ebener und freier Strecke
Quelle: Umweltbundesamt Österreich 2018

Tempolimit	Stickoxide (NO _x) [g/km]	Feinstaub (PM ₁₀) [g/km]	Kohlenstoffdioxid (CO ₂) [g/km]
100 km/h	0,458	0,008	138
130 km/h	0,566	0,008	154
140 km/h	0,657	0,010	170

Im Umkehrschluss zu den vorgestellten Erkenntnissen bedeutet dies, dass eine Reduktion der Fahrgeschwindigkeit zu einer Reduzierung der Schadstoffbelastung führen muss. In Deutschland lässt sich dies am einfachsten mit der zunehmenden Anzahl an Geschwindigkeitsbegrenzungsmaßnahmen im innerörtlichen Gebiet überprüfen. Bereits im Jahr 2002 wurden im Zuge des EU-Projekts HEAVEN (Healthier Environment through Abatement of Vehicle Emissions and Noise) zur Verminderung von Schadstoffemissionen, ein temporäres Tempolimit auf einer Teststrecke ausprobiert. Die Ergebnisse dazu sind in Tabelle 5 dargestellt.

Tab. 5: Darstellung der Wirkung einer Geschwindigkeitssenkenden Maßnahme in Berlin
Quelle: Berliner Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz 2020

Schadstoff	Lkw-Verbot	Tempo 30
Ruß	- 7 ± 3%	- 3 ± 3%
Feinstaub (PM₁₀)	- 7 ± 5%	-2 ± 3%
Stickoxide	-20 ± 10%	-3 ± 2%

Mehrere Untersuchungen legen den Schluss nahe, dass die Schadstoffbelastung im innerstädtischen Bereich eher von Fahrverläufen abhängt als primär von der Fahrtgeschwindigkeit (Steven 2012: 32). Eine Reduzierung der Fahrtgeschwindigkeit von Tempo 50 km/h auf 30 km/h reduziert zwar die Beschleunigungsanteile, vernachlässigt aber gleichzeitig die Vorteile einer Konstantfahrt auf Tempo 50 km/h (Topp 2014: 28). Da diese Faktoren sowohl die Motordrehzahl als auch die Motorbelastung beeinflussen, heben sich die fahrdynamischen Vor- und Nachteile auf. Die Schlussfolgerung ist, dass eine Reduzierung der Fahrtgeschwindigkeit nur dann zu einem spürbaren Effekt der Schadstoffreduktion führt, wenn gleichzeitig das Niveau des Verkehrsflusses an die neue Richtgeschwindigkeit angepasst bzw. verbessert wird.

Verkehrsfluss

Der Verkehrsfluss beschreibt den Ablauf des Verkehrs an einem Straßenabschnitt, gemessen an der Anzahl der Fahrzeuge, welche diesen in einer bestimmten Zeiteinheit durchquert. Neben der Geschwindigkeit beeinflussen sowohl fahrzeugspezifische (Antrieb, Masse), als auch betriebsspezifische Faktoren (Fahrverhalten, Wahl des Gangs) die emittierten Abgasemissionen eines Fahrzeugs (VDI 2018: 8). Je nach Verkehrszustand können diese Faktoren variieren. Basierend auf den Angaben des

Handbuchs für Emissionsfaktoren (HBEFA) ergeben sich insgesamt vier Verkehrszustände (Infas 2019):

- **Flüssig:** Der Verkehrsablauf ist ungebunden oder teilgebunden. Die Verkehrsteilnehmer*innen behindern sich in der Regel nicht gegenseitig. Die Reisegeschwindigkeit orientiert sich an der Richtgeschwindigkeit.
- **Dicht:** Der Verkehrsablauf ist gebunden und die Verkehrsteilnehmer*innen sind in ihrer Reisegeschwindigkeit weitgehend an das vorausfahrende Fahrzeug gebunden. Dies führt zu niedrigeren Reisegeschwindigkeiten, aber noch nicht zu einer starken Senkung der mittleren Geschwindigkeit.
- **Gesättigt:** Der Verkehrsablauf ist gebunden und die Verkehrsteilnehmer*innen sind in ihrer Reisegeschwindigkeit an das vorausfahrende Fahrzeug angepasst. Das führt zu einer Senkung der mittleren Geschwindigkeit.
- **Stop-and-Go:** Der Verkehrsablauf ist gebunden und die Verkehrsteilnehmer*innen sind in ihrer Reisegeschwindigkeit vollständig an das vorausfahrende Fahrzeug angepasst. In diesem Verkehrszustand ereignen sich längere Standzeiten und häufiges Anfahren und Bremsen. Die mittlere Geschwindigkeit ist dementsprechend deutlich reduziert.

Je nach Verkehrszustand treten nach Berechnungen des Handbuchs für Emissionsfaktoren unterschiedliche Belastungsszenarien auf. In Abbildung 15 ist der Stickoxid-Ausstoß in g/km je nach Verkehrszustand für Hauptverkehrsstraßen und einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h dargestellt.

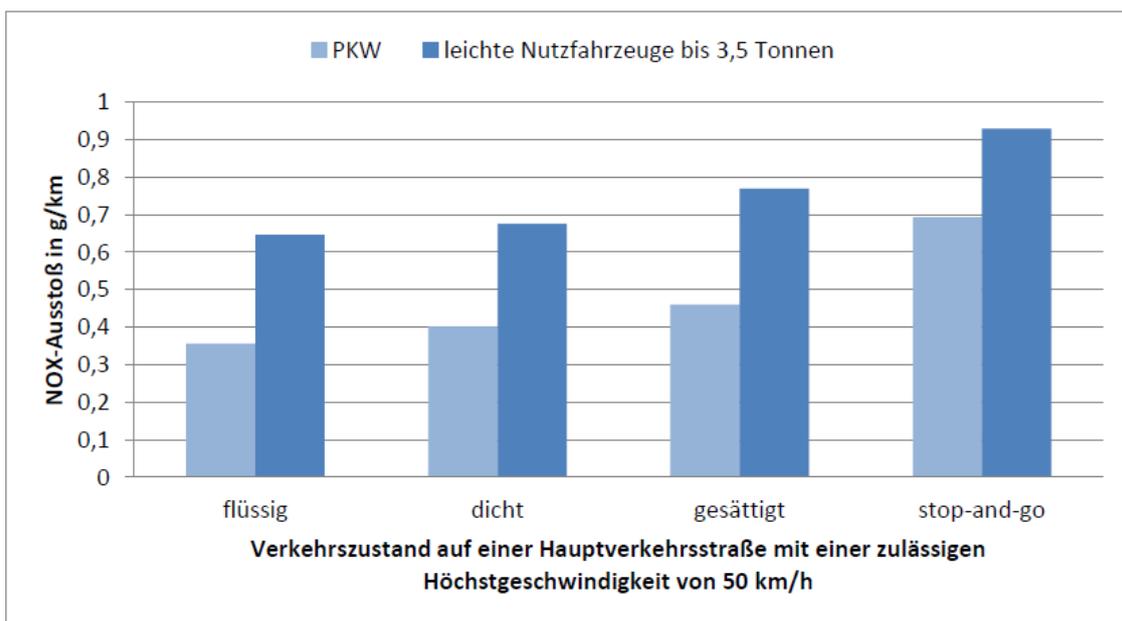


Abb. 15: NO_x-Ausstoß je Fahrzeugkategorie nach HBEFA¹
Quelle: VDI 2018: 28

Der Verkehrszustand Stop-and-Go, der durch häufige Anfahr- und Bremsvorgänge geprägt ist, ist demnach zu vermeiden, um eine höhere Luftqualität zu gewährleisten. Dementsprechend ist eine Verbesserung der Verkehrsqualität eine wesentliche Maßnahme zur Verbesserung der Luftqualität.

¹ für die Verkehrssituation "Hauptverkehrsstraße/zulässige Höchstgeschwindigkeit 50 km/h" nach Verkehrszuständen

Verkehrszusammensetzung

Der Einflussfaktor Verkehrszusammensetzung setzt sich aus der Fahrzeugart und der Antriebsart zusammen. Die Antriebsart Dieselmotor steht seit einigen Jahren bezüglich des hohen Ausstoßes von Stickoxiden in der öffentlichen Diskussion. Deutlich wird der hohe Anteil des Diesels und des Schwerververkehrs an der Luftschadstoffbelastung bei der Betrachtung der motorbedingten Emissionen auf Grundlage des Handbuchs für Emissionsfaktoren (s. Abb. 16, Abb. 17).

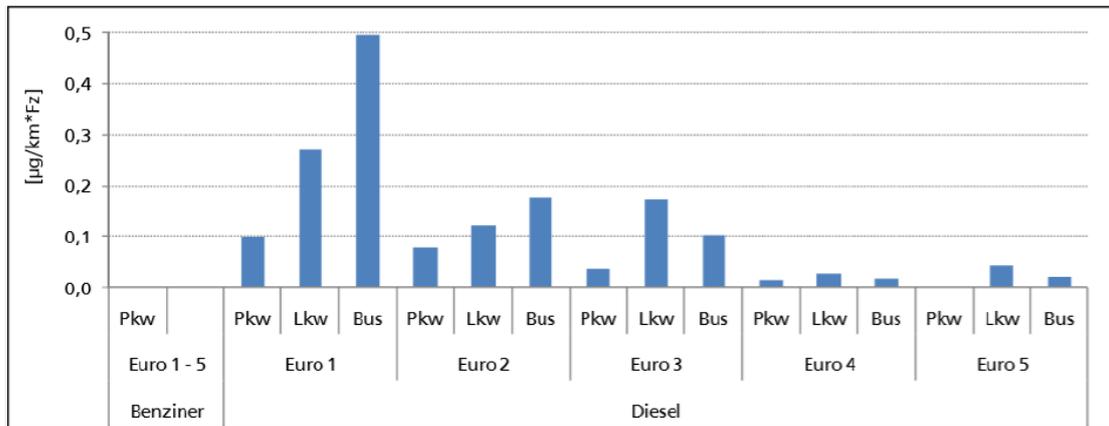


Abb. 16: Feinstaub-Emissionen in $\mu\text{g}/\text{km}$ pro Fahrzeug für verschiedene Fahrzeugarten, Kraftstoffkonzepte und Schadstoffklassen

Quelle: Darstellung übernommen von Kohoutek (2011): 19. Datengrundlage nach HBEFA 3.1 (Infas 2010) für das Bezugsjahr 2008 für die Verkehrssituation „gesättigte Hauptverkehrsstraße Innerorts“

Abbildung 17 zeigt einen sehr vernachlässigbaren Anteil des Benzin-PKWs an den motorbedingten Partikel-Emissionen. Gerade ältere Diesel-Motoren stoßen einen hohen Anteil an den Partikel-Schadstoffen aus. Der Anteil des Schwerververkehrs liegt höher als der Anteil der PKWs. Ein ähnliches Bild zeigt die Darstellung der motorbedingten NO_x -Emissionen. Der Anteil des Benzin-PKWs an den motorbedingten Emissionen liegt zwar höher als beim Feinstaub, der Diesel-Schwerverkehr dominiert aber auch diesen Emissionsfaktor.

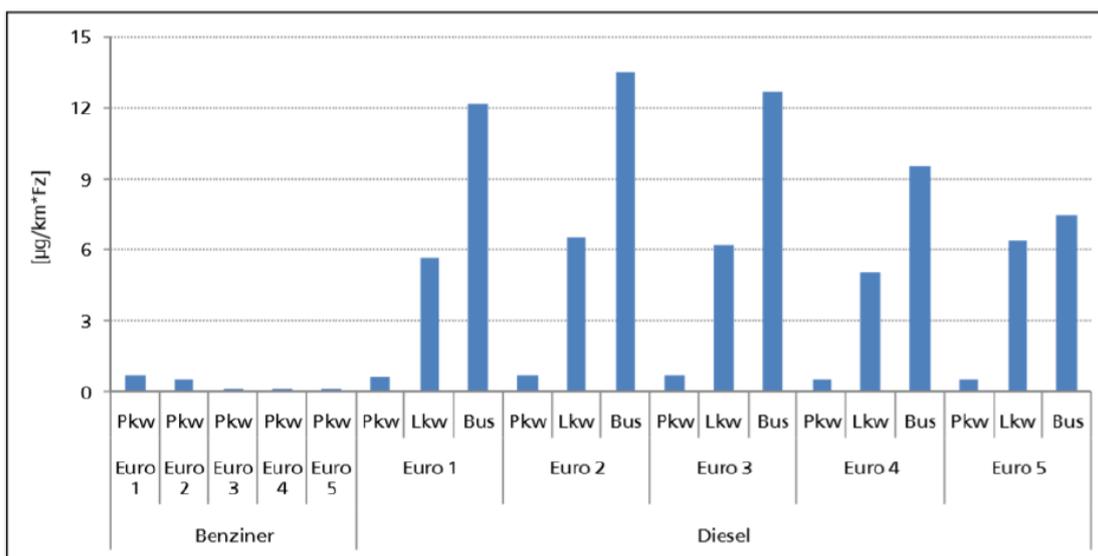


Abb. 17: Stickoxid-Emissionen in $\mu\text{g}/\text{km}$ pro Fahrzeug für verschiedene Fahrzeugarten, Kraftstoffkonzepte und Schadstoffklassen.

Quelle: Darstellung übernommen von Kohoutek (2011): 19. Datengrundlage nach HBEFA 3.1 (Infas 2010) für das Bezugsjahr 2008 für die Verkehrssituation „gesättigte Hauptverkehrsstraße Innerorts“

Im Vergleich zu den motorbedingten Partikel-Emissionen liegen die Werte für die motorbedingten NO_x-Emissionen für alle Fahrzeugarten und Antriebsarten deutlich höher. Das liegt bei der Antriebsart Diesel am Antriebskonzept, da höhere Temperaturen im Motorraum die Entwicklung von Stickoxiden begünstigen (Tschöke et al. 2018: 102), ist aber auch darin begründet, dass Feinstaubpartikel zu einem großen Teil von der Fahrbahnoberfläche aufgewirbelt werden (Lohmeyer et al. 2004: 9-10). Dieser Aufwirbelungsfaktor wird nicht zu den motorbedingten Partikel-Emissionen hinzugezählt. Zusammengefasst lässt sich für die beiden Luftschadstoffe Feinstaub und Stickoxide ein dominierender Anteil der Dieselmotoren und des Schwerverkehrs feststellen.

2.7 Planerische Maßnahmen und strategische Ansätze mit Gesundheitseffekt

Wie dargestellt wurde, können Stadt- und Verkehrsplanung sowohl einen Beitrag zum Schutz der Gesundheit vor schädlichen Umwelteinwirkungen leisten als auch aktiv zur Förderung der Gesundheit und des Wohlbefindens der Stadtbewohner*innen beitragen, da Gesundheit primär im Alltag der Menschen und nicht durch das Gesundheitswesen hergestellt wird (Fehr et al. 2012: 597; Hornberg und Pauli 2012: 130). Stadt- und Verkehrsplanung können damit sowohl präventiv und auf die Abwehr von Gefahren als auch gesundheitsfördernd wirken (Claßen et al. 2012: 113; Minh-Chau et al. 2010: 1109; Waller 2006: 114). Dabei wirken die Veränderungen der räumlichen Verhältnisse auf zweifache Weise: Zum einen dadurch, dass die räumlichen Verhältnisse selber positiv auf die Gesundheit wirken und zum anderen, indem die räumlichen Verhältnisse zu gesünderen Verhaltensweisen führen. Veränderungen der Verhältnisse durch räumliche Planung können indirekt auf das personenbezogene Gesundheitsverhalten wirken und gesundheitsförderliche Verhaltensweisen ermöglichen. (Kühn 1957: 562–563; Minh-Chau et al. 2010: 1112) „Stadtentwicklung besitzt einen hohen Einfluss auf die Determinanten von Gesundheit. Sie bietet mit sektorenübergreifenden Ansätzen hohes Potenzial zur Integration gesundheitlicher Belange. [...] Die spezifischen Aktivitäten räumlicher Planung können als wichtiger Beitrag zu einer gesundheitsfördernden Stadtentwicklung verstanden werden“ (Sieber 2017: 75-76). Die nachfolgende Tabelle greift die Determinanten aus Kapitel 4.3.2 auf und ordnet ihnen beispielhafte Interventionsmöglichkeiten durch Stadt- und Verkehrsplanung zu. Des Weiteren wird eine grobe Einschätzung zum Grad des Einflusses auf die einzelnen Determinanten gegeben.

Tab. 6: Übersicht der Determinanten und Interventionsmöglichkeiten
 Quelle: Eigene Darstellung nach Baumgarten 2012: 75-80; Claßen et al. 2012: 113-115; Fehr et al. 2012: 594; Hermansen et al. 2019: 118; Sieber 2017: 44; Waller 2006: 63-64

	Determinanten	Interventionsmöglichkeiten, u.a.	Einfluss
Individuelle Determinanten	Prädisponierend		Keiner
	Physisch	- Schaffung von Grün- und Bewegungsräumen	Indirekt
	Psychisch	- Gestaltung des Wohnumfeldes - Schaffung öffentlicher Räume (u.a. Förderung zwischenmenschlicher Kommunikation)	Indirekt
	Sozial	- Gestaltung des Wohnumfeldes und die Förderung von Nachbarschaften	Indirekt
	Verhaltensweisen und Lebensstile	- Schaffung von Bewegungsräumen und Freiflächen - Anlage von Radwegen oder anderen Verkehrsinfrastrukturen	Indirekt
	Ökonomisch, materiell		Keiner
Systembedingte Determinanten	Gesellschaftliche Verhältnisse	- Erreichbarkeitssicherung von Versorgungs- und Bildungsinfrastruktur sowie Erholungsräumen	Schwach, indirekt
	Rechtliche Rahmenbedingungen		Keiner
	Natürliche Umwelt	- Schutz natürlicher Lebensräume - Durchführung von Umweltprüfungen (beinhaltet das Schutzgut Mensch bzw. menschliche Gesundheit)	Mittel
	Gebaute Umwelt	- Steuerung von Bebauung (u.a. Lage, Anordnung, Art und Maß der baulichen Nutzung) - Anlage und Gestaltung von Freiräumen - Gestaltung des Zugangs zu relevanter Infrastruktur (Verkehr, Versorgung)	Groß
	Gesundheitswesen	- Sicherstellung des Zugangs zu Einrichtungen des Gesundheitswesens	Schwach, indirekt
	Lebens- und Arbeitsbedingungen	- Steuerung von Bebauung (u.a. Lage, Anordnung, Art und Maß der baulichen Nutzung) - Gestaltung von Straßenräumen und Parkanlagen - Schaffung von Grün- und Bewegungsräumen - Freiraumvernetzung - räumliche Trennung sich beeinträchtigender/störender Nutzungen - Verkehrsanbindung und Erreichbarkeit - Reduktion von negativen Umweltauswirkungen	Groß
	Wohnbedingungen	- Ausweisung von Wohngebieten - Gestaltung des Wohnumfeldes und die Förderung von Nachbarschaften - Zugang zu Grünräumen - räumliche Trennung sich beeinträchtigender/störender Nutzungen - Reduktion von negativen Umweltauswirkungen	Groß

„Mögliche Handlungsfelder eines Leitbildes für eine gesundheitsfördernde Stadt sind neben baulich-physischen Faktoren wie beispielsweise Grün- und Erholungsflächen, Wohnumfeld und Verkehrsinfrastruktur auch soziale Faktoren wie die Integration in soziale Netzwerke, Mobilität, Versorgungsstruktur und Dienstleistungen“ (Kistemann und Ritzinger 2018: 66). Neben den in Kapitel 2.6 genannten städtebaulichen Faktoren auf die Luftschadstoffbelastung können noch weitere Aspekte aus der Stadtplanung und dem Städtebau ergänzt werden, die die Aussagen aus der Tabelle spezifizieren:

- abgestimmte Anordnung von Nutzungsarten, Verkehrsnetzen und bauliche Strukturen zu einer kompakten und nutzungsgemischten Stadt (s. Kap. 2.2.1)
- Nutzung der Abhängigkeiten zwischen Stadtentwicklungs- und Verkehrsentwicklungsplanung für einen stadtverträglicheren Verkehr (s. Kap. 2.2.1)
- Begrünungsmaßnahmen und Freiräume (s. Kap. 2.2.1)
- Fußgänger- und radfahrfreundliche Gestaltung, mit Ausbau der Netze für aktive Mobilität und den ÖPNV (Baumeister et al. 2019: 37-38; Umweltbundesamt 2017b: 30)
- aktivierendes Stadtdesign: Städtebau für mehr Gesundheit und Bewegung (Hornberg et al. 2018: 54-55)
- Sicherung und Weiterentwicklung der grünen und blauen Strukturen bezüglich der städtischen Belüftungssituation (s. Kap. 2.2.1)

Eine detaillierte Untersuchung der Wirkungszusammenhänge zwischen Stadt, Verkehr und Gesundheit erfolgt in Kapitel 3. Die unterschiedlichen Maßnahmen werden dann in Kapitel 7.5 wieder aufgegriffen. Aus den Gesundheitswissenschaften können für eine gesundheitsorientierte Stadtentwicklung besonders diese Maßnahmen und Strategien herangezogen werden:

- **Health Impact Assessment (HIA):** Ein HIA, auch als Gesundheitsverträglichkeitsprüfung bezeichnet, erlaubt eine Beurteilung möglicher gesundheitlicher Auswirkungen von Planungen, Maßnahmen, Programmen und Projekten und bietet dadurch einen Orientierungsrahmen für Entscheidungsprozesse. Zum einen kann das HIA, ähnlich wie eine Strategische Umweltverträglichkeitsprüfung (SUP) oder Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP), eine eigenständige Prüfung darstellen oder zum anderen in vorhandene Umweltprüfungen, die das Schutzgut Mensch behandeln, integriert werden. Insgesamt führt die Formulierung von Handlungsalternativen und -empfehlungen im Rahmen des Prüfverfahrens zu einer stärkeren Einbeziehung des Aspektes Gesundheit in Entscheidungen. (Bunge 2012: 180; Nowacki und Mekel 2012: 283-285)
- **Fachplan Gesundheit:** Der Fachplan Gesundheit ist ein sektorales informelles Instrument auf örtlicher wie auf überörtlicher Ebene des Fachressorts (z.B. Gesundheitsamt). Zielsetzung eines solchen Plans ist das Aufzeigen von Potenzialen und Problemen im Bereich Gesundheit, um auf dieser Basis Strategien zu entwickeln und vorzubereiten. Durch die Bündelung gesundheitsfachlicher Belange und deren Einbringung in andere integrierte Planungen ist der Fachplan Gesundheit ein Beitrag zur besseren Integration von Gesundheitsbelangen in öffentliches Handeln und in öffentliche Diskussionen sowie zur Stärkung des fachlichen Austausches der unterschiedlichen Ressorts. (Baumgart 2013: 50-54; Baumgart 2012: 279; LIGA.NRW 2011: 13-14)
- **Kommunale Gesundheitsberichterstattung (GBE):** Die kommunale GBE hat das Beobachten und die empirische Erfassung des Krankheitsgeschehens (z.B. Gesundheitsbefragungen) als Aufgabe und dient damit als Grundlage für Prävention, Gesundheitsförderung und Gesundheitsschutz sowie einem planvollen Ressourceneinsatz und der Koordination der gesundheitlichen Versorgung. Sie ähnelt damit planungsbezogenen Datenbanken und Informationssystemen der kommunalen Umweltbehörden. (LIGA.NRW 2011: 23-27)

Weitere Ansätze bietet zum einen das 2015 verabschiedete **Präventionsgesetz** als Teil des Fünften Sozialgesetzbuches, das die finanzielle Unterstützung des Setting-Ansatzes Kommune regelt und den gesundheitsförderlichen Lebenswelten eine hohe Bedeutung zuweist (Hornberg et al. 2018: 38; Rauland et al. 2018: 238-239) sowie zum anderen die Strategie **„Health in All Policies“** oder **„Gesundheit in allen Politikbereichen“**, „die besagt, dass Prävention, Gesundheitsförderung und gesund-

heitliche Versorgung nicht allein Aufgaben des Gesundheitssektors sind, sondern in allen Themenfeldern öffentlichen Handelns verfolgt werden sollten“ (Köckler und Fehr 2018: 70). Mit Policy wird, im Sinne der Politikwissenschaften, öffentliches Handeln in einem Themenfeld verstanden (Köckler und Fehr 2018: 71). Da es sich bei Gesundheit demzufolge um ein Querschnittsthema bzw. eine interdisziplinäre Aufgabe handelt (Baumgarten 2012: 82; Sterdt und Walter 2012: 33), können Grundsätze einer Zusammenarbeit identifiziert werden, die sich positiv auf eine bessere Berücksichtigung der Gesundheit auswirken können:

- **Bewusstseinsbildung** für die Gesundheitsauswirkungen von Luftschadstoffbelastung innerhalb des Gesundheitssektors und den planenden Disziplinen (WHO Regional Office for Europe 2019: 6)
- **integriertes Verwaltungshandeln** mit fachübergreifender Zusammenarbeit unterschiedlicher Ressorts, der Einbeziehung verschiedener sektoraler Handlungsfelder und Fachplanungen sowie der Bündelung von Ressourcen, der Vernetzung mit Akteuren außerhalb von Politik und Verwaltung und der Verknüpfung unterschiedlicher räumlicher Ebenen (Böhme et al. 2018: 135; Wékel 2018: 2437)
- **Expertise-Netzwerke** aus Stadt- und Verkehrsplanung sowie Gesundheit aufbauen und verstetigen (Baumgart et al. 2018a: 427)
- ausreichende **Ressourcen**: Sachmittel, Know-how, Finanzierung von Maßnahmen (Böhme et al. 2018: 138)
- gesellschaftliche, d.h. politische, **Legitimation** der Ansätze der Gesundheitsförderung, damit sie als verwaltungsinterne Argumentationsbasis ihre Wirkung entfalten (Kistemann und Ritzinger 2018: 66)

Diese sind ebenfalls wichtige Bausteine für die ausreichende Berücksichtigung des Belanges Gesundheit bei planerischen Entscheidungen.

2.8 Gewichtung der Gesundheit bei planerischen Entscheidungen

Es gibt unterschiedliche Möglichkeiten auf Belastungssituationen zu reagieren oder diese zu verringern. Jedoch sind bei allen planerischen Entscheidung über die räumliche Entwicklung vielfältige Interessen und Möglichkeiten abzuwägen. Hierbei stellt sich die Frage der relativen Gewichtung des Belanges Gesundheit gegenüber anderen Belangen. Die Gewichtung ist in der Stadtentwicklung immer Teil eines politischen Aushandlungsprozesses. (Köckler und Fehr 2018: 85) Da gesundheitliche Belange oftmals zu wenig oder zu später berücksichtigt werden, wird gefordert „dem Thema »Gesundheit« bereits vorausschauend ein stärkeres Gewicht zu geben - auch mit dem Ziel, den bislang unerledigten Übergang zu einer »Nachhaltigen StadtGesundheit« zu schaffen“ (Fehr und Hornberg 2018d: 97). In der Literatur lassen sich unterschiedliche Ansätze finden, die zur Frage der Gewichtung des Aspektes Gesundheit herangezogen werden können:

- **Rechtlicher Stand der Gesundheit** und die Stellung von Gesundheit sowie Lebensqualität in den unterschiedlichen politischen Dokumenten und Beschlüssen (Leipzig Charta, Ziele für nachhaltige Entwicklung der Vereinten Nationen, ...) als **normative Orientierung** heranziehen (BBSR 2019: 12; Böhm et al. 2020: 428).
- **Richt- und Grenzwerte**, die die Umweltqualität in den Städten verbessert haben, sollten in den Planungen strikt beachten (Adrian et al. 2018: 38; Kries et al. 2018: 10) und ggf. in einem politischen Prozess, der auf wissenschaftliche Erkenntnissen zu Konzentrationswerten beruht, unter denen keine signifikanten Gesundheitseffekte zu beobachten sind, angepasst werden (Umweltbundesamt 2019c: 15).
- Das **Ziel der bestmöglichen Umwelt- bzw. Luftqualität** aus § 1 Abs. 6 Nr. 7h BauGB verfolgen.
- Der politische Wille, die Prioritätensetzungen bei Abwägungsprozessen sowie die lokalen Aushandlungsprozesse spielen eine wichtige Rolle (Stevenson et al. 2016: 2925; Tsourus 2019: 81).
- Eine Sensibilisierung aller Akteure durch u.a. eine gute Zusammenarbeit der Disziplinen sowie Maßnahmen der **Bewusstseinsbildung** sind notwendig (Adrian et al. 2018: 38).

- Die **Evidenzbasis** im Bereich der öffentlichen Gesundheit muss eine wichtigere Rolle bei der Unterstützung von Planungsentscheidungen spielen, aber dazu müssen die Evidenzerkenntnisse weiterentwickelt werden, um den Bedürfnissen der Praktiker*innen gerecht zu werden (Carmichael et al. 2019: 160-161).
- **No-Regret-Ansatz** und Anwendung der **gesundheitlichen Folgenabschätzung (HIA, s. Kap. 2.6)** können ebenfalls herangezogen werden.

Nachfolgenden werden diejenigen Ansätze, die für die Fragestellungen von SHOTUP relevant sind, weiter beschrieben.

Rechtlicher Stand von Gesundheit

Mit dem Art. 2 Abs. 2 S. 1 GG ist zunächst das Grundrecht auf Leben und körperliche Unversehrtheit garantiert. Aus dieser Schutzpflicht zusammen mit dem Staatsziel aus Art. 20a GG, dem Schutz der natürlichen Lebensgrundlage, auch für künftige Generationen, wurde das **Prinzip der Nachhaltigkeit** gesetzlich verankert (Fehr und Hornberg 2018e: 18). Diese Artikel binden die staatlichen Gewalten, indem sie umweltschonendes Verhalten der Menschen zu fördern haben. Der Schutz der natürlichen Lebensgrundlage ist des Weiteren der Kernauftrag des Umweltrechts, zu dem der Immissionsschutz gehört. Rechtlich gibt es weitere Überschneidungen z.B. mit dem Gesundheitsschutz. (Baumeister et al. 2019: 58) Beide Artikel des GG zielen auf ein ökologisches **Existenzminimum** und eine Bewahrung. Damit sind sie ein **Untermaßverbot** und keine Verpflichtung zum Unmöglichen. So kann der meist präventive Charakter der Planungsdisziplinen in formellen Verfahren erklärt werden. Diese wichtigen Regelungen des Grundgesetzes können als Interpretationshilfe bei der Bestimmung des Schutzzumfangs herangezogen werden und werden darüber hinaus in den betreffenden Gesetzen aus dem Umweltbereich (u.a. BauGB, BImSchG) weiter konkretisiert. Sie besitzen wiederum starke Auswirkungen auf den planerischen Alltag in den Städten.

Bauleitplanung und Immissionsschutz - Ziel der bestmöglichen Umwelt- bzw. Luftqualität

Zunächst müssen Bauleitpläne nach § 1 Abs. 5 BauGB eine nachhaltige städtebauliche Entwicklung gewährleisten, die die sozialen, wirtschaftlichen und umweltschützenden Anforderungen auch in Verantwortung gegenüber künftigen Generationen miteinander in Einklang bringt. Das bedeutet die Sicherung einer menschenwürdigen Umwelt sowie den Schutz und die Entwicklung der natürlichen Lebensgrundlage. (Baumeister et al. 2019: 47; Kistemann und Ritzinger 2018: 64) Die Gewährleistung einer **nachhaltigen städtebaulichen Entwicklung** impliziert, dass die zukünftigen Entwicklungen nicht gesundheitsschädlich sein dürfen, da sie sonst nicht nachhaltig wären. Ebenso beinhaltet die Sicherung einer menschenwürdigen Umwelt gesundheitliche Aspekte, da eine Umwelt nur als menschenwürdig betrachtet werden kann, wenn sie der menschlichen Gesundheit zumindest nicht schadet. Dementsprechend sind die Belange von Gesundheit bereits über § 1 Abs. 5 BauGB im Rahmen der Bauleitplanung vielfach zu berücksichtigen. Ein Auftrag zur Gesundheitsförderung lässt sich aus § 1 Abs. 5 BauGB dagegen nicht ableiten. Grundsätzlich ist festzustellen, dass es im öffentlichen Baurecht keine Definition von Gesundheit gibt. Es handelt sich um einen unbestimmten Rechtsbegriff, der einer wertenden Konkretisierung im Einzelfall bedarf (Auslegung im konkreten Einzelfall) und so den Planer*innen einen expliziten Handlungsspielraum einräumt (Adrian et al. 2018: 71; Lamker und Rüdiger 2018: 410; Löhr 2012: 38-39). Busse kommt 1994 zu der Schlussfolgerung, dass der Belang Gesundheit „in der Diskussion über die Ziele der Stadtentwicklung und der Stadtplanung letztendlich in seiner Gänze nicht präzise zu beschreiben und dementsprechend als unbestimmter Rechtsbegriff schwer handhabbar“ (Busse 1994: 87) ist.

Diese allgemeinen Ziele werden in der nicht abschließenden Aufzählung der sogenannten **Planungsleitlinien** in § 1 Abs. 6 BauGB konkretisiert. Der Katalog gibt den Kommunen Hinweise und Anhaltspunkte, welche Belange bei der Ermittlung des Abwägungsmaterials heranzuziehen sind. Diese insbesondere zu berücksichtigenden Belange sind dann über das zentrale Prinzip der Planung, dem Abwägungsgebot in § 1 Abs. 7 BauGB, gegeneinander und untereinander abzuwägen. Der Gesetzgeber sieht hierbei keinen Vorrang für einzelne Belange, weder für private noch öffentliche, und auch keine

Reihenfolge, sondern vor allem die Ermittlung und Gewichtung der einzelnen Gesichtspunkte der Belange, u.a. innerhalb der Beteiligungsverfahren, sind essentiell. (Baumeister et al. 2019: 45; 257; Sieber 2017: 36) „Dies kann dazu führen, dass einzelne der Planungsleitlinien »weggewogen« werden [...]. Dennoch [wird] dem Schutz der Gesundheit insbesondere durch die breite Diskussion rechtlicher Fragen in Bezug auf die ausreichende Berücksichtigung von Umweltbelangen in der Bauleitplanung Rechnung getragen“ (Knieling und Kretschmann 2018: 209). Die menschliche Gesundheit im Bauplanungsrecht besitzt mit den allgemeinen Anforderungen an gesunde Wohn- und Arbeitsverhältnisse und den umweltbezogenen Auswirkungen auf den Menschen und seine Gesundheit in § 1 Abs. 6 Nr. 1 bzw. Nr. 7c BauGB eine prominente Stellung als regelmäßig zu berücksichtigende Belange.

Bei der Auflistung der zu berücksichtigenden Belange finden sich ebenso einige der Determinanten der Gesundheit (s. Kap. 2.3.2), z.B. die Umweltqualität oder Wohnbedürfnisse, wieder. Da der Aspekt der Gesundheit durch gleich mehrere Planungsleitlinien gesichert und gefördert wird, zeigt den hohen Stellenwert, den Gesundheit als Belang im Rahmen der Bauleitplanung einnimmt (Löhr 2012: 40-41). Weitere Bezüge zu Gesundheit finden sich im BauGB sowie in verschiedenen Fachplanungsgesetzen, wie dem BImSchG. „Die Erkenntnis, dass gesundheitliche Belange zu berücksichtigen sind, schlägt sich [...] bereits seit Längerem in den gesetzlichen Regelungen der stadtprägenden Planungsdisziplinen nieder. Somit existieren grundlegende Voraussetzungen dafür, dass Gesundheit auch in das Handwerkszeug und die praktische Arbeit der Planung - d.h. die planerischen Instrumente, Methoden und Verfahren - Eingang finden kann“ (Sieber 2017: 2).

Für das Einbringen von gesundheitlichen Aspekten sind die gesetzlich vorgeschriebenen Beteiligungen vorgesehen, bei denen die Träger der öffentlichen Belange sich aktiv beteiligen und ihre Belange einbringen können. Eine Beteiligung auch bei informellen Planungen ist oftmals ebenso möglich und vorgesehen. (Baumeister et al. 2019: 47-48) Des Weiteren können erkannte lufthygienische Problemlagen einen konkreten **Planungsanlass** zur Bauleitplanung darstellen und menschliche Gesundheit ist ebenfalls Teil der Umweltprüfung, die allerdings auch nur ein Belang in der Abwägung darstellt (Sieber 2017: 38, 287). Hierbei helfen zentrale Regelungen sowie Richt- und Grenzwerte im Bereich der Luftbelastung (s. Kap. 2.5) sowie eine ausreichende Datenlage, die in den Abwägungsprozess, z.B. mithilfe eines Fachplans Gesundheit oder der kommunalen Gesundheitsberichterstattung, eingebracht werden kann (s. Kap. 2.6; Baumgart 2020: 219). Eingeschränkt können auch Festsetzungen in Bebauungsplänen bezüglich Luftschadstoffen, wie Luftreinhaltegebiete (Nr. 23a), Schutzflächen und Immissionsschutz (Nr. 24), getroffen werden (Battis et al. 2016: § 1 Rn. 125-144). Darüber hinaus gilt nach § 1 Abs. 6 Nr. 7h BauGB der „Grundsatz, dass bei der Abwägung der betroffenen Belange die Erhaltung der **bestmöglichen Luftqualität** als Belang zu berücksichtigen ist“ (Adrian et al. 2018: 72). Die Vermeidung von Immissionen ist ein zu berücksichtigender Belang, der unter dem Gebot der Wahrung der allgemeinen Anforderungen an gesunde Wohn- und Arbeitsverhältnisse sowie dem Umweltschutz subsumiert ist. Außerdem hat die Bauleitplanung die **immissionsschutzrechtlichen Vorgaben** zu beachten und kann zu deren Umsetzung beitragen. Luftreinhaltung ist jedoch zunächst Aufgabe des Immissionsschutzes. (Adrian et al. 2018: 74; Lamker und Rüdiger 2018: 408-409; Louis 2019: 26)

Normative Orientierung und Legitimation

Neben den rechtlichen Vorgaben bezüglich der Berücksichtigung von Gesundheitsaspekten wirken sich bestehende Leitbilder, Strategien, Empfehlungen oder sonstige informelle Dokumente auf das Planungshandeln und damit auf die Anwendung und Umsetzung von Rechtsvorschriften aus (Lamker und Rüdiger 2018: 403). „Um das Thema Gesundheit stärker in der Stadtplanung und im Städtebau zu verankern, müssen abstrakte Themen wie Gesundheitsförderung, Chancengleichheit, nachhaltige Mobilität oder Klimaanpassung Eingang in Leitbilder und daraufhin in Stadtstrukturen und räumlich-bauliche Maßnahmen finden“ (Kistemann und Ritzinger 2018: 62). Anschließend ist noch die gesellschaftliche Legitimation für die politische Umsetzbarkeit notwendig. Durch rechtliche Vorgaben, wie im Bauplanungsrecht, und einem gesellschaftlichen Willen können Gesundheitsaspekte faktisch in

der stadtplanerischen Praxis an Gewicht gewinnen. (Kistemann und Ritzinger 2018: 66-67) Wie wirksam eine solche Legitimation ist, wurde bei den Themen Nachhaltigkeit oder Klimaschutz bzw. -anpassung sichtbar, die schon Eingang ins Baurecht gefunden haben.

Evidenz als Grundlage

Das Bewusstsein für Gesundheitsaspekte hat in den letzten Jahren in der Stadt- und Verkehrsplanung zugenommen. Allerdings werden sie insgesamt noch zu wenig berücksichtigt. (Tran 2018: 287) Zu deren Berücksichtigung müssen diese und die Zusammenhänge zwischen Gesundheit und gebauter Umwelt zunächst erkannt werden. Eine wichtige Basis sind **evidente Erkenntnisse**, auf denen Entscheidungen aufbauen können. Zwar zeigen „zahlreiche umweltepidemiologische Studien [...] auf, wie stark die Gesundheit sowohl von Individuen als auch unterschiedlicher Bevölkerungsgruppen von der sozialen und bebauten Umwelt abhängt“ (Baumgart und Rüdiger 2019: 831). Jedoch bestehen in der Evidenzbasis noch große Lücken. Es können keine wirklichen kausalen Beziehungen nachgewiesen werden oder die Evidenz ist nicht ausreichend für eine Einschätzung im Sinne welche Veränderungen haben welche Wirkungen. Die meisten Studien sind auch nicht darauf ausgelegt **Kausalitäten** zuzuordnen, da die Bedingungen des Versuchsaufbaus, wie Messungen nicht unter Laborbedingungen, sondern in der realen Umwelt, nicht für die Ermittlung von Kausalitäten ausgelegt sind. (Braubach und Grant 2010: 68) „Der Begriff Evidenz bedeutet zunächst die höchste Gewissheit eines Sachverhalts. Wie man zu Gewissheit kommt, wird in verschiedenen philosophischen und erkenntnistheoretischen Denkrichtungen allerdings unterschiedlich gesehen. [...] Im Bereich der Gesundheitsförderung kann nach Learmont von Evidenzbasierung gesprochen werden, wenn eine **Intervention auf validen und relevanten Kenntnissen** basiert. Gesundheitsförderung erfordert einen Evidenzbegriff, der die multidimensionalen Aspekte von Gesundheitsförderung erfasst und die holistische Sicht von Gesundheit berücksichtigt“ (Elkeles und Broesskamp-Stone 2015).

Die Evidenzbasis muss auf allen Gebieten der Gesundheitsförderung weiter verbessert werden, damit diese epidemiologischen Erkenntnisse zu gesundheitsfördernden und -erhaltenden Umwelten umfassend in der Stadtplanung, z.B. im Rahmen einer HIA bei der Bauleitplanung oder anderer Maßnahmen, genutzt werden können (Bolte 2018: 129-130; Elkeles und Broesskamp-Stone 2015). Des Weiteren ist eine wirksame Umsetzung der gewonnenen Erkenntnisse oftmals schwierig. Während die Forschung über die Beziehung zwischen der baulichen Umwelt und der Gesundheit zunimmt, wird sie nur selten von politischen Entscheidungsträger*innen oder Praktiker*innen aufgegriffen. Es entsteht eine Lücke zwischen Forschungsergebnissen und deren Umsetzung. Die Erkenntnisse müssen für die Umsetzung aufbereitet werden. Hierbei ist jedoch ebenfalls die Evidenzbasis ein Problem. Die Beziehung zwischen der baulichen Umwelt und der Gesundheit ist komplex, kontextspezifisch und dynamisch. Die Evidenz vermittelt diese Komplexität oft nicht effektiv, so dass die Entscheidungsträger*innen nur ein **unvollständiges Verständnis** haben. Dies erschwert die Umsetzung der Erkenntnisse in angemessene und wirksame Maßnahmen. Während sich die Forschung darauf konzentriert hat zu verstehen, wie sich Merkmale der Stadt- und Verkehrsplanung auf die Gesundheit auswirken, wurde nur wenig über geeignete und wirksame politische Maßnahmen geforscht. (Lamker und Rüdiger 2018: 412-417; Riley und Nazelle 2019: 644)

Stadt- und Verkehrsplanung müssen daher als **politischer Prozess** verstanden werden, der nicht neutral ist, sondern Entscheidungen darüber beinhaltet, welche Informationen als relevant erachtet werden, welche Interessen Vorrang haben sollten und wie Ressourcen, z.B. Land, zugewiesen und genutzt werden sollten. Die Entscheidungsfindung im Gesundheitsbereich findet in diesem politischen Kontext statt. (Riley und Nazelle 2019: 644-645) Ein Hindernis ist, dass die Gesundheit bei der Regulierung der Flächennutzung keine zentrale Rolle spielt. Zwar gibt es immer mehr Leitlinien für den Aufbau einer gesünderen städtischen Umwelt, doch die rechtlichen Vorschriften sind eher schwach. Die Natur des politischen Handelns und der Mangel an politischem Willen sowie Führung stellen zusätzliche Herausforderungen dar. (Riley und Nazelle 2019: 645-646) Gesundheitsförderung ist immer eine **Machtfrage**, die sich in den Aushandlungsprozessen zwischen den unterschiedlichen öffentlichen und privaten Belangen zeigt (Baumgart 2018a: 7). „Ein weiterer Grund der schwierigen

Handhabbarkeit liegt in der Aufgabe des Gesetzgebers, bei störenden oder gefährlichen Belastungen die Bandbreite von Erkenntnissen oder unklare Einordnungen von Wirkungen justiziabel zu machen. In der Regel sind mit rechtlichen Normen Aussagen verbunden, die Maßnahmen ausschließen oder zulassen, also klare Vollzugsregeln beinhalten. [...] Gerade durch die vielfältige, nicht immer quantifizierbare Art des Zusammenwirkens verschiedener Umwelttoxinen entsteht also meist eine große Lücke in der praktischen Handhabung“ (Kühling und Kawe 2018: 273). Für die Praxis ist daher die rechtlich wirksame **Vorsorge**, die auf weniger starke Evidenz aufbauen kann, aktuell ein Aufgabenbereich, die zum Beispiel im Bereich der Bauleitplanung Anwendung findet. (Kühling und Kawe 2018: 273)

No-Regret-Ansatz und HIA

Im Themenfeld des Umgangs mit dem Klimawandel hat sich ein **entscheidungsunterstützender Ansatz** entwickelt, der No-Regret-Ansatz. „Die Originaldefinition von No-Regret geht auf den 4th Assessment Report des IPCC [Intergovernmental Panel on Climate Change] zurück: “A policy that would generate net social and/or economic benefits irrespective of whether or not anthropogenic climate change occurs.” (IPCC 2007: S. 58) [...] Bezogen auf Raumplanung bedeutet "No-Regret", dass nur solche Raumnutzungen bzw. bauliche Nutzungen in der Abwägung Bestand haben sollten, bei denen trotz der mit dem Klimawandel verbundenen Unsicherheiten davon ausgegangen werden kann, dass der Nutzen auch langfristig zumindest überwiegt“ (BMVBS 2013: 18). Ein Beispiel hierfür sind Maßnahmen der Klimaadaptation, wie die Schaffung und Aufwertung innerstädtischer Grünflächen, die positive Auswirkungen auf die Gesundheit haben, indem sie Bewegungsräume darstellen und die Luftqualität verbessern. Maßnahmen wie diese, die unabhängig vom Eintritt der Klimaänderungen positive Effekte haben, werden als No-Regret-Maßnahmen bezeichnet. Sie gewinnen vor dem Hintergrund **bestehender Unsicherheiten** über den Eintritt von Klimawandelfolgen an Bedeutung, da ihnen in der planerischen Abwägung größeres Gewicht beigemessen werden kann. (BMVBS 2013: 18; BMVBS und BBSR 2012: 5) „Low- and No-regret-Strategien, also solche, meist kostengünstige Maßnahmen, die auch unter veränderten Rahmenbedingungen kaum bzw. keine negativen Auswirkungen entfalten, verweisen auf normativ zu diskutierende Ziele für Lebensqualität in Quartier, Stadt und Region und damit auf die räumliche Planung ergänzenden lebensräumlichen Betrachtungen auf evidenzbasierten Grundlagen“ (Rüdiger und Baumgart 2016: 20).

Im Zusammenhang mit Gesundheit besteht somit die Möglichkeit bei planerischen Entscheidungen durch den No-Regret-Ansatz, ohne absolute Sicherheit der Wirkungszusammenhänge zur Luftschadstoffbelastung, weitere positive Effekte auf die Gesundheit oder Lebensqualität in die Entscheidungen einzubeziehen. Beispielsweise zeigen Begrünung und kurze Wege positive Gesundheitseffekte bezüglich der Luftqualität und gleichzeitig auf das Bewegungsverhalten (s. Kap. 2.1.1) Denkbar sind ebenso weitere positive Effekte der Maßnahmen aus anderen Bereichen. Es ist jedoch zu beachten, dass der Kern der Raumplanung das Ausbalancieren und Abwägen verschiedener räumlicher Nutzungsansprüche und damit die Steuerung der Raumnutzungen ist (Baumgart 2012: 274). D.h. der Belang Gesundheit ist nicht per se wichtiger als andere Belange, sondern soll bestmöglich in den Prozess der Abwägung und Entscheidung eingebracht werden. Hierbei kann außerdem die **Health Impact Assessment** (s. Kap. 2.4) helfen. Zum Beispiel kann die Entwicklung von nachhaltigen No-Regret-Konzepten durch die Überprüfung der Auswirkungen über den Planungsprozess unterstützt werden (WHO Regional Office for Europe 2018: 36). Außerdem können die Priorisierungskriterien aus dem HIA bei der Gewichtung herangezogen werden (Linden und Töppich 2016):

- Stärke von gesundheitlichen Maßnahmenfolgen
- Wahrscheinlichkeit des Auftretens
- Zahl der Betroffenen
- Zeitspanne (kurz-/mittel-/langfristig)
- Ungleichheit der Auswirkungen
- Aspekte von besonderer lokaler oder regionaler Bedeutung
- Umsetzbarkeit

3 Analyse der Wirkungszusammenhänge zwischen Stadt, Verkehr und Gesundheit

Im Folgenden werden die Zusammenhänge der einzelnen Einflussbereiche und Einflussfaktoren der drei Fachdisziplinen Stadt-, Verkehrsplanung und Gesundheitswissenschaften dargestellt. Aufgrund der hohen Relevanz und des großen Potenzials, mit stadt- und verkehrsplanerischen Einflussfaktoren die negativen gesundheitlichen Auswirkungen zu reduzieren, werden die Wirkungszusammenhänge genauer betrachtet.

3.1 Analyse der Wirkungszusammenhänge

Die drei Fachdisziplinen Stadtplanung, Verkehrsplanung und Verkehrstechnik sowie Gesundheitswissenschaften sind über eine Vielzahl von Wirkungszusammenhängen miteinander verbunden (s. Abb. 18). Die Stadtplanung ist durch die Einflussbereiche Stadtstruktur und Flächennutzung definiert. Die Fachdisziplin Verkehrsplanung und Verkehrstechnik gliedert sich in die Einflussbereiche Verkehrsnachfrage, Verkehrsangebot und Verkehrsablauf. In der Fachdisziplin Gesundheitswissenschaften können die Einflussbereiche Exposition sowie deren Wirkungen auf den Menschen unterschieden werden.

Verschiedene Einflussfaktoren der Stadtplanung haben Auswirkungen auf die Verkehrsnachfrage und das Verkehrsangebot sowie umgekehrt. Zudem gibt es direkte Einflüsse der Stadtplanung auf die Exposition von Menschen gegenüber gesundheitsrelevanten Faktoren. Bestehende Angebote und Nachfrage im Verkehr beeinflussen den Verkehrsfluss. Diese drei Einflussbereiche verursachen eine unterschiedliche gesundheitsbezogene Exposition von Verkehrsteilnehmer*innen und Anwohner*innen. Im städtischen Umfeld ist die Bevölkerung verschiedenen positiven als auch negativen Effekten des Verkehrs ausgesetzt, woraus sich verschiedene gesundheitliche Auswirkungen ergeben. Die dargestellten Wirkungszusammenhänge wurden in den ersten beiden Expertenworkshops, die in Vietnam und Deutschland durchgeführt wurden, validiert und mit den Teilnehmer*innen diskutiert.

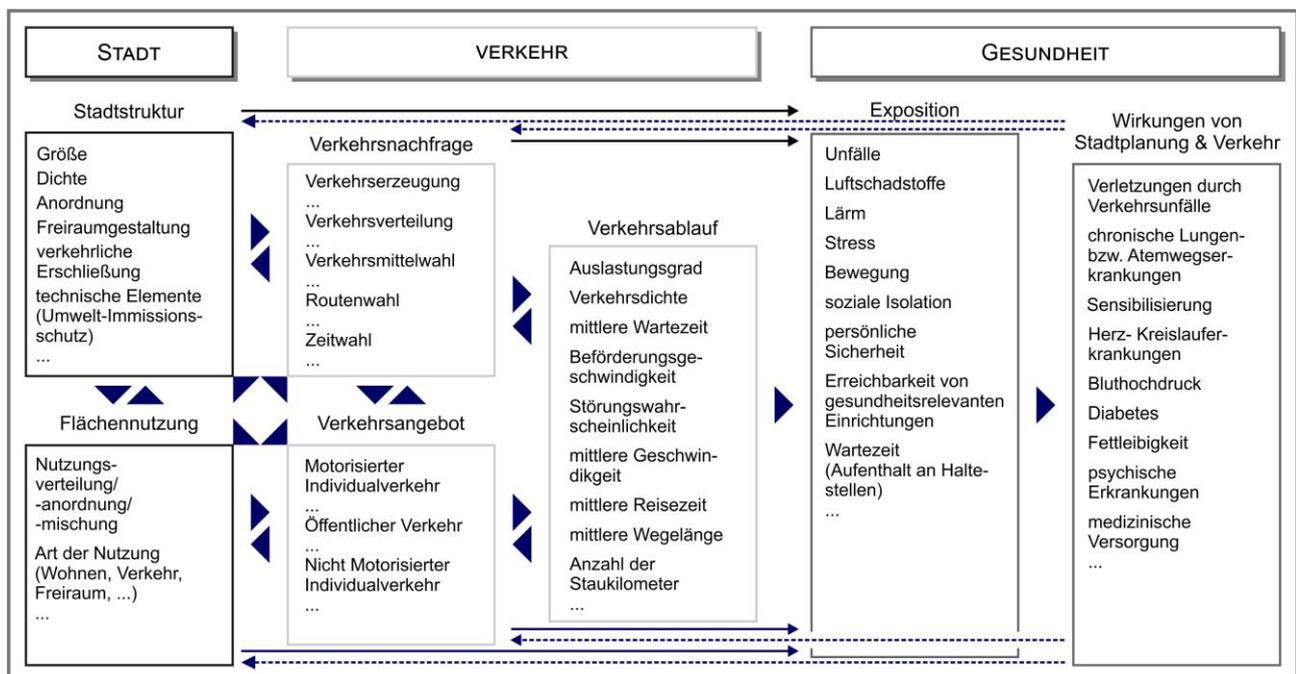


Abb. 18: Wirkungszusammenhänge zwischen Stadt, Verkehr und Gesundheit
Quelle: Eigene Darstellung

3.2 Wechselwirkungen zwischen Stadt, Verkehr und Gesundheit

3.2.1 Zwischen Stadt und Verkehr

Verschiedene Faktoren der Stadtplanung beeinflussen sowohl das Verkehrsangebot als auch die Verkehrsnachfrage und haben somit Einfluss auf die Gesundheit der Verkehrsteilnehmer*innen und Bevölkerung (s. Kap. 2.1; Ewing et al. 2010) Die Dichte einer Stadt wirkt sich beispielsweise auf die zur Erreichung eines bestimmten Ziels zurückzulegende Strecke und damit auf die Verkehrsmittelwahl aus, da kürzere Strecken leichter mit dem Fahrrad oder zu Fuß zurückgelegt werden können. Vielfalt ist ein Maß für die Flächennutzung. Die Nutzungsverteilung verschiedener Nutzungsarten wie Wohngebäude, Einkaufsmöglichkeiten, Schulen und Arbeitsplätze hat ebenfalls Auswirkungen auf die Verkehrsmittelwahl. Befinden sich in der Nähe des Wohnorts mehrere Geschäfte, müssen die Menschen kürzere Strecken zurücklegen, sind weniger vom motorisierten Individualverkehr abhängig und haben eine größere Wahlfreiheit bei der Verkehrsmittelwahl. (Schneider et al. 2018) Eine kompakte Stadt zeichnet sich durch eine hohe Dichte, eine hohe Flächennutzung und eine gute Erreichbarkeit des öffentlichen Nahverkehrs aus. Dies führt zu einer Änderung des Modal Splits mit einer Verringerung des Anteils der Fahrten, die mit dem motorisierten Individualverkehr zurückgelegt werden und einer Verlagerung auf öffentliche Verkehrsmittel, Fahrrad und zu Fuß gehen. Dies führt zu einer Reduzierung der Luftschadstoffbelastung und wirkt sich positiv auf die Gesundheit der Bevölkerung aus. (Stevenson et al. 2016)

Ebenso kann die verkehrliche Erschließung als Teil der Stadtstruktur über verschiedene Gestaltungsarten wie lineare, radiale, Ring-, Gitter- und versetzte Netze den Modal Split und insbesondere die Anzahl der mit dem motorisierten Verkehr zurückgelegten Kilometer beeinflussen. (Snellen et al. 2002) Die Bebauung kann aufgrund der Belüftung, die von unterschiedlichen Gebäudetypen abhängt, einen direkten Einfluss auf die Exposition haben. Beispielsweise trägt eine hohe geschlossene Bebauung zu einer schlechteren Belüftung bei, verglichen mit einer niedrigen offenen Bebauung. (s. Kap. 2.1.1; Karanasiou et al. 2014)

3.2.2 Zwischen Stadt und Gesundheit

Angesichts des weltweiten Bevölkerungswachstums und der voranschreitenden Urbanisierung kann die Stadtplanung Lösungen für verschiedene nachteilige Auswirkungen auf die Gesundheit bieten. Neben der Beeinflussung der Gesundheit durch stadtplanerische Maßnahmen, die Auswirkungen auf die Verkehrsplanung und Verkehrstechnik haben, gibt es Möglichkeiten der Stadtplanung, die Gesundheit direkt zu beeinflussen. Laut der Weltgesundheitsorganisation ist Bewegungsmangel ein großes Risiko für die öffentliche Gesundheit. (WHO 2009) Eine Vergrößerung der Grünflächen und eine bessere Erreichbarkeit von Grünflächen können die Luftqualität und die körperliche Aktivität beeinflussen, was zu besseren Gesundheitsbedingungen für die Stadtbewohner*innen führt. Coppel und Wüstemann untersuchten in Berlin die gesundheitlichen Auswirkungen städtischer Grünflächen. Sie stellten fest, dass die Abdeckung solcher Flächen und die Entfernung vom Wohnort zu Grünflächen das subjektive Wohlbefinden der Bewohner*innen beeinflusst. (Coppel und Wüstemann 2017)

Neben Grünflächen kann sich die Ausrichtung der Straßen in Bezug auf die Windrichtung auf die Luftqualität auswirken (s. Kap. 2.5.3). Die höchsten Luftschadstoffbelastungen treten auf, wenn der Wind senkrecht zur Straßenachse und zu Gebäuden weht, da die Belüftung der Straße verringert wird. Wenn die Windrichtung parallel zur Straßenrichtung verläuft, wird eine bessere Belüftung erzielt und es werden etwa 50% weniger Luftschadstoffe festgestellt. Bei der Erstellung eines Bebauungsplans und der damit verbundenen Festlegung der Fahrbahnausrichtung wird daher städtebaulich empfohlen, die Straßen zur besseren Belüftung parallel zur Hauptwindrichtung auszurichten. (Karanasiou et al. 2014)

3.2.3 Zwischen Verkehr und Gesundheit

Verschiedene Elemente der Fachdisziplin Verkehr beeinflussen das Ausmaß der Exposition und damit die gesundheitlichen Wirkungen des Verkehrs auf Einwohner*innen und Verkehrsteilnehmer*innen. In vielen Städten ist der MIV nach wie vor das Hauptverkehrsmittel, und der öffentliche Raum wird vom MIV dominiert. Mit verschiedenen Einflussfaktoren des Verkehrsangebots, wie einem attraktiven öffentlichen Verkehrssystem mit dichtem Streckennetz und enger Taktung oder einem gut ausgebauten Radwegenetz, kann die Verkehrsnachfrage beeinflusst und das Ausmaß von Umweltbelastungen, zum Beispiel die Luftverschmutzung, reduziert werden. Ein gut ausgebautes Netz mit Ladeinfrastruktur könnte zu einem erhöhten Anteil an Elektrofahrzeugen führen, was zukünftig zu einem Rückgang der motorenbedingten Emissionen führt. Gerade in Ballungsräumen mit hohen Fahrzeugdichten sind die vor- und nachmittägliche Spitzenstunden in der Regel Zeitspannen mit hohen Luftschadstoffbelastungen. Gerade Pendler*innen sind somit auf ihrem Arbeitsweg hohen Belastungen durch Emissionen ausgesetzt. Es gibt mehrere Studien, die den Einfluss der Verkehrsmittelwahl auf die Exposition von Verkehrsteilnehmer*innen gegenüber Luftschadstoffen untersuchen. (Snellen et al. 2002)

Boogaard et al. untersuchen die Exposition von Autofahrer*innen und Radfahrer*innen gegenüber ultrafeinen Partikeln, feinen Partikeln und Lärm auf verschiedenen Strecken in elf niederländischen Städten. (Karanasiou et al. 2014) Rank et al. hat eine ähnliche Studie in Kopenhagen durchgeführt, in der die Exposition von Radfahrer*innen und Autofahrer*innen auf verschiedenen Strecken untersucht wurde. (Ragetti et al. 2013) Beide Studien haben ergeben, dass die Exposition von Autofahrern höher war als die von Personen, die mit dem Fahrrad fahren. Andere bisher veröffentlichte Expositionsstudien kamen zu dem gleichen Ergebnis: Die Exposition gegenüber einer bestimmten Stoffkonzentration von Radfahrerpendler*innen ist im Vergleich zur Konzentration in Fahrzeugen geringer. (Boogaard et al. 2009; Rojas-Rueda et al. 2011) Neben dem geringeren Anteil der Luftverschmutzung wirkt sich das Radfahren des Weiteren positiv auf die Gesundheit aus. Obwohl aktiver Verkehr wie Radfahren oder zu Fuß gehen die Aufnahme von Umweltverschmutzung erhöht, ist der Nutzen immer noch größer als die negativen Auswirkungen. (Tainio et al. 2016; Rojas-Rueda et al. 2012)

Ein weiterer zu beobachtender Effekt sind die positiven gesundheitlichen Auswirkungen einer Verlagerung des Verkehrs auf den öffentlichen Verkehr und den Radverkehr. Rojas-Rueda et al. untersuchten die Auswirkungen der zunehmenden Nutzung öffentlicher Verkehrsmittel und des Radverkehrs in Barcelona. In verschiedenen Szenarien wurde die Veränderung von Morbidität und Luftverschmutzung erforscht. (Rojas-Rueda et al. 2012; WHO 2009) Neben der Verkehrsmittelwahl spielen die Routen- und Zeitwahl eine Rolle. Aufgrund unterschiedlicher Verkehrsbelastungen und andere Faktoren ist die Exposition von Verkehrsteilnehmer*innen auf verschiedenen Strecken und im Laufe des Tages unterschiedlich. Beispielsweise kann der Anteil der UFP-Exposition deutlich reduziert werden, wenn beim Pendeln mit dem Fahrrad Hauptstraßen vermieden werden. Untersuchungen haben gezeigt, dass die Exposition gegenüber ultrafeinen Partikeln während der morgendlichen Spitzenstunde für die Nutzer*innen aller Verkehrsmittel am höchsten ist. (Rojas-Rueda et al. 2011) Um die persönliche tägliche Belastung durch Luftschadstoffe zu verringern, ist es sinnvoll, die Zeitspanne, während der ein Weg zurückgelegt wird nicht nur im Hinblick auf einen verbesserten Verkehrsfluss, sondern auch unter Gesundheitsaspekten anzupassen.

3.3 Einfluss von Gesundheitseffekten auf Stadt und Verkehr - Integrierter Ansatz von Stadt, Verkehr und Gesundheit

Die große Relevanz des Themas Gesundheit bei der Bevölkerung und das zunehmende Bewusstsein für die gesundheitlichen Auswirkungen von Stadtplanung sowie Verkehrsplanung und Verkehrstechnik sollte sich in Zukunft auf die Planung Städten und Verkehrssystemen auswirken. Derzeit werden die gesundheitlichen Wirkungen des Verkehrs in den Fachdisziplinen Stadtplanung sowie Verkehrsplanung und Verkehrstechnik nicht in ausreichendem Maße berücksichtigt. Durch geeignete Maßnahmen müssen die Möglichkeiten, die negativen Auswirkungen der städtischen Form und des städtischen Verkehrs auf die Gesundheit der Bürger*innen und Verkehrsteilnehmer*innen zu reduzieren, genutzt und positive Effekte wie die aktive Mobilität und die Nutzung von Grünflächen gefördert werden. Ziel sollte es sein, die gesundheitlichen Auswirkungen als wichtiges Kriterium in die Stadt- und Verkehrsplanung einzubeziehen. Darüber hinaus sollten Gesundheitsaspekte auch auf der Ebene der individuellen Entscheidungen der Verkehrsteilnehmer*innen in Bezug auf die Verkehrsnachfrage eine Rolle spielen. So sollten die Wahl der Route und die Zeitwahl unter Berücksichtigung der Luftschadstoffexposition getroffen werden.

4 Trends und ihre Auswirkungen auf den urbanen Raum

In Deutschland und Vietnam wirken auf die Stadt- und Verkehrsentwicklung verschiedene globale wie auch spezifische Trends, die für zukünftige Planungen berücksichtigt werden müssen. „Als Trend kann man zunächst [...] eine Entwicklung in eine bestimmte Richtung bezeichnen, man könnte auch sagen eine Veränderungsbewegung in eine bestimmte Richtung“ (BBSR 2019: 17). Nach Sammlung der Trends werden die relevanten Trends in einer Übersicht dargestellt. Die Identifikation der Trends war des Weiteren Ausgangssituation für zwei Expertenworkshops, in denen diese und ihre Relevanz für eine gesundheitsorientierte Stadt- und Verkehrsplanung diskutiert wurden. Aus den diskutierten Trends konnten Szenarien einer zukünftigen Stadtentwicklung generiert werden, die eine Basis der Strategien einer gesundheitsorientierten und nachhaltigen Stadtentwicklung darstellen.

4.1 Vorgehen bei der Trendsammlung

Die Sammlung der Trends und deren Auswirkungen auf das Setting Stadt soll möglichst umfassend, kompakt, interdisziplinär und übersichtlich dargestellt werden. Eine vertiefte Auseinandersetzung mit (Mega-)Trends finden sich u.a. in der BBSR-Studie „Nachdenken über die Stadt von übermorgen“ (BBSR 2019) sowie beim Zukunftsinstitut (Zukunftsinstitut 2021a). Betrachtet wurden Trends in der nachfolgenden Trendsammlung, die

- räumlich,
- global,
- urban,
- tiefgreifend und
- mittelfristig (fünf bis zehn Jahren)

wirksam sind und so für die Entwicklung der beiden Untersuchungsräume Frankfurt am Main und HCMC herangezogen werden konnten. Die Auseinandersetzung mit den unterschiedlichen Entwicklungen ist eine wichtige Grundlage für Planung und planerische Entwicklungen. Denn diese sind ohne Annahmen über die Zukunft undenkbar. (Scholles 2008a: 358) Besonders bei der Betrachtung der gesundheitsorientierten und nachhaltigen Stadtentwicklung besteht eine Vielzahl von Bezügen zwischen menschlicher Gesundheit und den Maßnahmen, die ergriffen werden können (s. Kap. 3).

4.2 Globale Megatrends

Wenn ein Trend nicht nur saisonale Relevanz besitzt, sondern generationenübergreifende Zeitspannen umfasst, weiträumig zu beobachten ist und tiefgreifende Auswirkungen hat, kann er als gesellschaftlicher Megatrend bezeichnet werden (BBSR 2019: 17). Megatrends wirken fast alle indirekt oder direkt auf urbane Räume weltweit. Alle Stadtakteure sollten sich auf diese einstellen und sie in ihren Entscheidungen beachten. Weitere Trend bzw. Auswirkungen auf andere strukturelle Räume, werden in dieser Übersicht nicht berücksichtigt. Diese können teilweise entgegengesetzte Wirkungen oder Entwicklungen als urbane Räume zeigen. Aktuell werden die in Tabelle 7 dargestellten Megatrends für Großstädte diskutiert. Diese Trends sind oft in Verbindung miteinander zu sehen und besitzen eine breite Akzeptanz in der Fachwelt.

Tab. 7: Urbane Megatrends

Quelle: Eigene Darstellung nach u.a. Baumeister et al. 2019: 11; BBSR 2019: 17-49; Burmeister und Rodenhäuser 2016: 9-28; Claßen et al. 2013: 135; Dangschat 2020: 32-55; Holz-Rau und Scheiner 2020b: 95; Nieuwenhuijsen und Khreis 2019: 5; Nobis und Kuhnimhof 2018: 123-130; Randelhoff 2015; WHO 2013: 54, 147; Zukunftsinstitut 2021b-d

Megatrend	Charakterisierung	Wirkungen im urbanen Raum, u.a.
Urbanisierung	<ul style="list-style-type: none"> - Bevölkerungswachstum in Städten und Metropolregionen weltweit - Verstädterung weltweit und Bildung von Megacities, v.a. in Afrika und Asien - Urbane Lebensweise 	<ul style="list-style-type: none"> - Verdichtung der Städte und steigende Nutzungskonflikte/Stress - angespannte Immobilienmärkte - Zunahme des Verkehrsaufkommens - Notwendigkeit von neuen Lösungen für Megacities - Polarisierung innerhalb und zwischen Städten, Ländern - Wachstumsschmerzen
Demografischer Wandel	<ul style="list-style-type: none"> - Nebeneinander von Schrumpfung und Wachsen - Alterung der Gesellschaft, v.a. in den Industrienationen - mittelfristig stagnierende bzw. sinkende Bevölkerungszahl in Deutschland / bis 2050 jährlich um 1 % steigende Bevölkerungszahl in Vietnam, danach stagnierend bzw. sinkend - kulturelle Vielfalt - internationale Migration - Veränderungen in der Haushaltsstruktur 	<ul style="list-style-type: none"> - neue, differenziertere Ansprüche durch veränderte Gesellschaft - neue programmatische, gestalterische und technische Anforderungen an die Stadt - zunehmende Motorisierung (v. a. bei Älteren als Kohorteneffekt)
Wirtschaftswachstum/-wandel	<ul style="list-style-type: none"> - Wirtschaftswachstum (in Metropolen) - Rückkehr urbane Produktion - Wohlstandsgewinne und damit Zunahme der Motorisierung, der Nachfrage nach Fläche, ... - leere Kassen auf öffentlicher Seite bei gleichzeitig hohem Investitionsstau/-notwendigkeit - Entwicklung von der Industrie- zur Wissensgesellschaft 	<ul style="list-style-type: none"> - Nutzungskonflikte um Fläche nehmen stark zu - Privatisierung öffentlicher Güter und Aufgaben - zunehmende Kooperation mit Privaten - zunehmendes Verkehrsaufkommen und in Teilen zunehmende Motorisierung - steigender Wohlstand, aber auch Polarisierung
Globalisierung	<ul style="list-style-type: none"> - globale Vernetzung und Mobilität von Informationen, Personen und Waren - Multilokalität und Konnektivität - Verlagerung ökonomischer Zentren weltweit und globalisierte Wirtschaft - Ausweitung der regionalen, überregionalen und weltweiten Interaktionen 	<ul style="list-style-type: none"> - Erfordernis effizienter und leistungsfähiger Systeme der Mobilität und Logistik - steigende Distanzen (Ausweitung der Aktionsräume) - zunehmende weltweite Abhängigkeiten und Vernetzung

Digitalisierung & technische Neuerungen	<ul style="list-style-type: none"> - digitale Transformation verändert Lebensgewohnheiten und Geschäftsmodelle - Durchdringung mit Informations- und Kommunikationstechniken - steigende Kompetenzen in der Informationsbeschaffung - Digitalisierung von Prozessen und Verarbeitung großer Datenmengen - Zunahme der Fahrzeugvielfalt (Antriebstechniken, Verkehrsträger, autonomes Fahren, ...) & technische Innovationen 	<ul style="list-style-type: none"> - Ausbau der digitalen Infrastruktur ist notwendig - Smart Cities, Buildings und Mobility (Digitalisierung städtischer Systeme, intelligente Verkehrssteuerung, ...) - multimodale und flexible Verkehrsnutzung durch digitale Tools und Mobilität als Service - Neuerungen in der Fahrzeugtechnik
Klimawandel	<ul style="list-style-type: none"> - steigende klimatische Belastungen für die Bevölkerung und erhöhte Vulnerabilität - langfristige Auswirkungen auf die Umwelt und die menschliche Gesundheit 	<ul style="list-style-type: none"> - Vermeidungs- und Minderungsstrategien sowie Anpassungsmaßnahmen nötig - bedarfsorientierter Ausbau der erneuerbaren Energien und Anpassung der Infrastruktur - raumverträgliche Umsetzung der Energiewende (Bauen und Mobilität energieeffizienter, ...) - Effekte auf die menschliche Gesundheit und Umwelt sichtbar
Umweltprobleme	<ul style="list-style-type: none"> - steigende Umweltbelastung bei fast aller Umweltmedien und Umweltgefahren in urbanen Räumen - steigende Mobilität erhöht Umweltbelastung in der Stadt 	<ul style="list-style-type: none"> - intensivierter Umwelt- und Klimaschutz - Reduzierung der Flächenneuanspruchnahme nötig - Planung und Umsetzung von Gegenmaßnahmen (Umweltschutz, Nachhaltigkeitskonzepte, ...) - steigende Gesundheitslasten
Gesellschaftlicher Wandel	<ul style="list-style-type: none"> - Ausdifferenzierung und Heterogenisierung von Familien- und Lebensstilen - Änderung der Werte und Einstellungen (Individualisierung, ...) - steigendes Umwelt- und Gesundheitsbewusstsein und deren Auswirkungen auf die Lebensweise - veränderte Verkehrsnachfrage und Mobilitätsstile 	<ul style="list-style-type: none"> - Auswirkungen auf die quantitative und qualitative Wohnraum- und Gewerbenachfrage - Auswirkungen auf die Verkehrsnachfrage (z.B. in Deutschland: erhöhte Nutzung des Umweltverbundes, Pkw kein Statussymbol mehr; in Vietnam: Pkw als Ausdruck für Wohlstand) - Lebensqualität und gesunde Umwelt als wichtiger Standortfaktor - Trend zu mehr Sharing - Verschiebungen von Entscheidungs- und Gestaltungsmacht - Nachfrage nach Bewegungsräumen und mehr Grün in der Stadt - Wunsch nach gesundheitsförderlichen Lebenswelten und Forderung dieser als neuer Normalzustand - Forderung nach und Umsetzung einer Vielfalt an Mobilitätsformen

Zu dieser Übersicht muss angemerkt werden, dass „die Anzahl der Wechselwirkungen zwischen Trends sowie ihrer Wirkung auf die Vielfalt urbaner Räume [...] sich analytisch und empirisch nicht vollständig beschreiben [lässt]. Zudem verfügt jede Stadt über ganz eigene Kapazitäten, um sich auf Trends vorzubereiten. Angesichts dieser Komplexität sind pauschale Antworten zur Entwicklung der Stadt von übermorgen weder möglich noch hilfreich“ (BBSR 2019: 51). Die Trends verdeutlichen, dass die Siedlungs- und Verkehrsentwicklung insbesondere von der Bevölkerungs-, Wirtschafts- und Technikentwicklung abhängt sowie von den Kosten und der Qualität des Siedlungs- und Verkehrsangebotes. Außerdem wirken alle Megatrends räumlich und aufgrund der vielfältigen Wirkungszusammenhänge (s. Kap. 3) ebenfalls auf die menschliche Gesundheit. Gegenwärtig sind die Gesellschaften „weltweit von einem raschen, intensiven und vielschichtigen Wandel geprägt, der zunehmend mit dem Begriff „Transformation“ bezeichnet wird“ (Dangschat 2020: 34.) Diese Transformationsprozesse und die steigende Sensibilität gegenüber Umweltproblematiken bieten neue Chancen für eine nachhaltige Umorientierung in der Mobilität und Stadtentwicklung (Bukow und Yildiz 2020: 183).

4.3 Zusammenfassung und Diskussion der Trends

Als Grundlage der Trendübersicht wurde die Darstellung der beiden Autoren von Mörner und Boltze (2018: 6) verwendet, die auf die betreffende Fragestellung und den Kontext des Projekts SHOTUP angepasst wurde (s. Abb. 19) Um die absehbaren Veränderungen der Angebots- und Nachfragesituation im urbanen Raum in die weitere Arbeit einfließen zu lassen, wurden sechs gesellschaftliche Megatrends (M1 bis M6) identifiziert, die sich auf den Alltag der urbanen Bevölkerung auswirken werden und somit Aufgaben für die Stadt- und Verkehrsplanung sind. Aus diesen Megatrends wurden Trends in der Nachfrage- (N1 bis N7) und in der Angebotsituation (A1 bis A8) identifiziert bzw. spezifiziert.

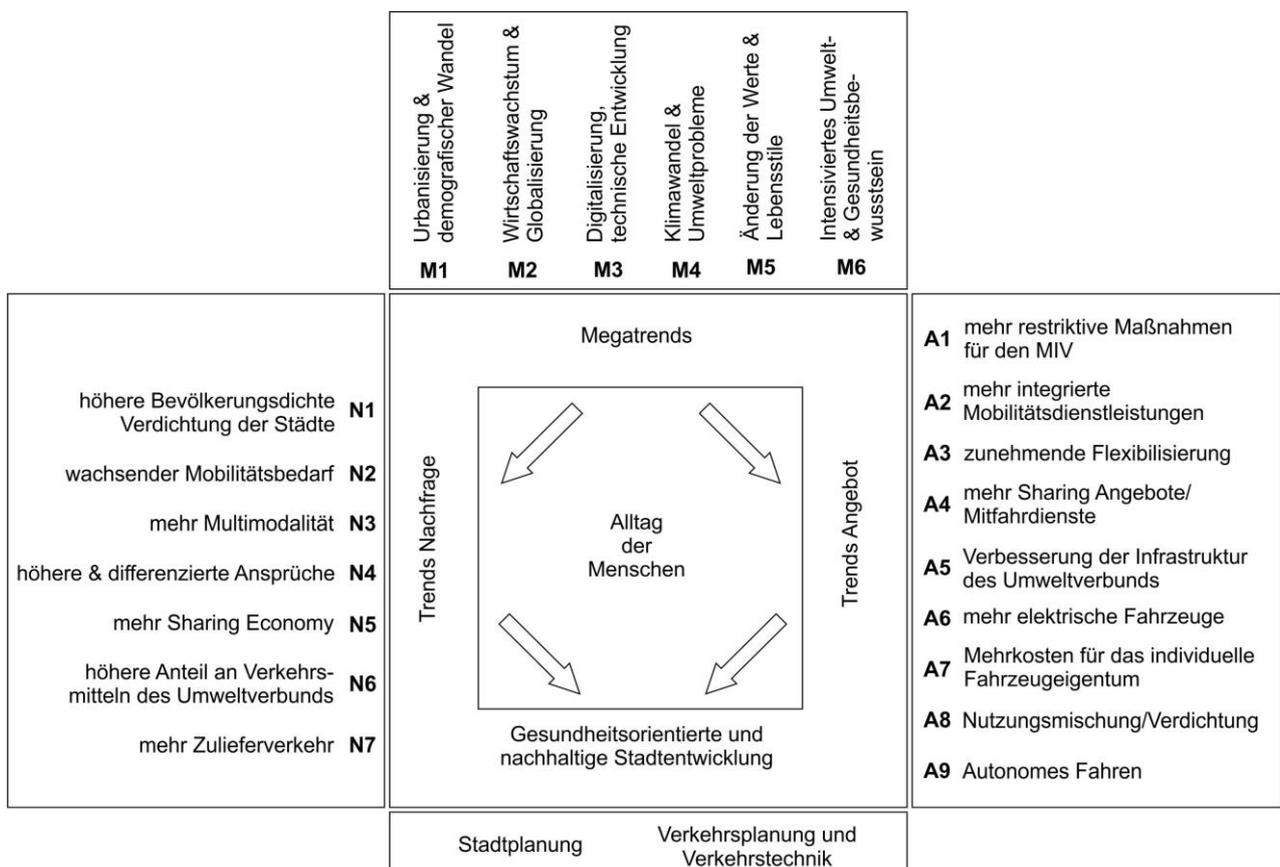


Abb. 19: Übersicht der Trends im urbanen Raum
Quelle: Geänderte und ergänzte Darstellung nach von Mörner und Boltze 2018: 6



Folgende Megatrends aus Kapitel 4.1 wurden aggregiert und ausgewählt sowie auf ihre Auswirkungen auf die Angebots- und Nachfrageseite (als Wirkungen auf urbane Räume) konkretisiert:

- **M1:** Urbanisierung & demografischer Wandel
- **M2:** Wirtschaftswachstum & Globalisierung
- **M3:** Digitalisierung, technische Entwicklung
- **M4:** Klimawandel & Umweltprobleme
- **M5:** Änderung der Werte & Lebensstile
- **M6:** Intensiviertes Umwelt- & Gesundheitsbewusstsein

Tab. 8: Identifizierte Auswirkungen und Trends auf Angebots- und Nachfrageseite im urbanen Raum
 Quelle: Eigene Darstellung

Nachfrageseite		
N1:	Höhere Bevölkerungsdichte & Verdichtung der Städte	<ul style="list-style-type: none"> - Zunahme der Nutzungskonflikte - Beeinflussung der Verkehrsmittelwahl durch kürzere Wege - Auswirkung auf die Belüftungssituation - Stress im Alltag nimmt zu
N2:	Wachsender Mobilitätsbedarf	<ul style="list-style-type: none"> - Zunahme der interstädtischen Mobilität (u.a. Wirtschaft, Tourismus), - Zunahme an Pendlerbewegungen
N3:	Mehr Multimodalität	<ul style="list-style-type: none"> - aufgrund der verstärkten Angebote und der digitalen Möglichkeiten
N4:	Höhere & differenzierte Ansprüche	<ul style="list-style-type: none"> - an die Attraktivität der Verkehrsmittel → gestiegener Gestaltungsanspruch - an die Umwelt - an die Stadt als Lebenswelt
N5:	Mehr Sharing Economy	<ul style="list-style-type: none"> - gesellschaftliche Entwicklungen führen zu einer erhöhten Nachfrage an Sharing-Angeboten
N6:	Höhere Anteile an Verkehrsmitteln des Umweltverbundes	<ul style="list-style-type: none"> - aus den urbanen Mobilitätsstilen erfolgt eine Zunahme an nachgefragten Verkehrsformen
N7:	Mehr Zulieferverkehr	<ul style="list-style-type: none"> - Einkaufen im Internet - globale Lieferketten
Angebotsseite		
A1:	Mehr restriktiv Maßnahmen für den MIV	<ul style="list-style-type: none"> - Umgestaltungen im öffentlichen Raum - Citymaut und Straßensperrungen
A2:	Mehr integrierte Mobilitätsdienstleistungen	<ul style="list-style-type: none"> - ermöglicht durch Digitalisierung und technische Neuerungen - Angebot für eine Vielfalt an Mobilitätsformen
A3:	Zunehmende Flexibilisierung	<ul style="list-style-type: none"> - adaptive Lösungen und Systeme werden entwickelt
A4:	Mehr Sharing Angebote/ Mitfahrdienste	<ul style="list-style-type: none"> - Umsetzung von Carsharing-Angeboten
A5:	Verbesserung der Infrastruktur des Umweltverbundes	<ul style="list-style-type: none"> - Ausbau der Infrastrukturen in Umsetzung und in Planung - innerhalb der Städte, aber auch zwischen den Regionen
A6:	Mehr elektrische Fahrzeuge	<ul style="list-style-type: none"> - steigendes Angebot an Fahrzeugen - Ausbau der dafür nötigen Infrastruktur
A7:	Mehrkosten für das individuelle Fahrzeugeigentum	<ul style="list-style-type: none"> - steigende Energiekosten
A8:	Nutzungsmischung und Verdichtung	<ul style="list-style-type: none"> - mehr vielfältige Wohn-, Freizeit- und Arbeitsangebote
A9:	Autonomes Fahren	<ul style="list-style-type: none"> - durch aktuelle Entwicklungen wird das autonome Fahren auch in der Praxis umgesetzt werden

Diese Übersicht wurde mit Expert*innen am 29.10.2019 in HCMC und am 19.02.2020 in Darmstadt diskutiert, ergänzt, und die relevantesten Trends wurden identifiziert (s. Abb. 20).



Abb. 20: Expertenworkshops in HCMC (links) und Darmstadt (rechts)
Quelle: Eigene Aufnahmen

Die Aussagen können allerdings aufgrund der Anzahl an Teilnehmer*innen an der Abstimmung von 18 Personen in Vietnam und 14 Personen in Deutschland lediglich unterstützend herangezogen werden. Als die beiden relevantesten Megatrends wurden in beiden Workshops von den drei Disziplinen die Urbanisierung und der demografische Wandel sowie der Klimawandel und die Umweltprobleme gewählt. Der zweite Trend wurde insbesondere von den Expert*innen aus der Verkehrsplanung favorisiert. Auf der Nachfrageseite war die Verdichtung der Städte der wichtigste Trend in beiden Ländern und zeigt die Relevanz der aktuellen Herausforderungen, die mit der Urbanisierung in Verbindung gebracht werden.

Auf der Angebotsseite wurde eindeutig die Verbesserung der Infrastruktur des Umweltverbunds am relevantesten für Deutschland gewählt. In Vietnam waren die Disziplinen bei der Abstimmung uneinig: Hier nannte Teilnehmer*innen aus der Fachdisziplin Stadtplanung ebenfalls die Verbesserung der Infrastruktur des Umweltverbunds, die Teilnehmer*innen aus dem Bereich des Verkehrs nannten jedoch den Anstieg des Anteil an E-Fahrzeugen und Teilnehmer*innen aus dem Sektor der Gesundheitswissenschaften den ergänzten Trend, mehr Angebote im ÖPNV. Diese Ergänzung in Kombination mit der Tatsache, dass im Umweltverbund der ÖPNV enthalten ist, kann zum einen auf den aktuell umfangreichen Ausbau des ÖPNV in HCMC oder auf unterschiedliche Begriffsverständnisse hindeuten. Diese ergänzte Trend wird daher als Teil des Umweltverbundes belassen. Ergänzt wurde in Deutschland das autonome Fahren, das allerdings aufgrund der nicht absehbaren Umsetzung in den Städten, im weiteren Verlauf nicht berücksichtigt werden soll. Insgesamt wurde die erarbeitete Übersicht als zweckmäßig bewertet, sodass sie als Grundlage der weiteren Arbeit verwendet werden kann. Die Auswertung der Abstimmung findet sich in Anhang 1.

4.4 Szenarien zur zukünftigen Entwicklung von Großstädten

Für die aus der Literatur und den ergänzenden Diskussionen innerhalb der SHOTUP-Expertenworkshops identifizierten Trends wurden nachfolgend Szenarien für eine zukünftige Stadt- und Verkehrsplanung entwickelt. Szenarien sind sprachlich ausformulierte und hypothetische Zukunftsbilder in Bezug auf eine bestimmte Fragestellung (BMVBS und BBSR 2009: 23). Dabei soll der Fokus auf europäischen und südostasiatischen Großstädten liegen. Es „sollen realistische Entwicklungsmöglichkeiten bzw. -korridore in vergleichsweise ferner Zukunft und bei relativ großer Unsicherheit innerhalb eines bestimmten Rahmens und unter bestimmten Annahmen systematisch aufgezeigt werden“ (Scholles 2008b: 380).

Aus den vorgestellten Trends, der Trendübersicht und der Diskussion mit den Expert*innen lassen sich folgende Zukunftsbilder und Szenarien für Großstädte festhalten. Urbane Räume weltweit werden

- kompakte-adaptive Systeme,
- heterogener, dichter, bunter und gemischter,
- eine Energie- und Mobilitätswende einleiten und umsetzen,
- einen schonenden und nachhaltigen Umgang mit Ressourcen und Kreislaufwirtschaft umsetzen,
- öffentliche Räume, insbesondere blaue und grüne Strukturen, erhalten und verbessern sowie insgesamt grüner werden,
- eine nachhaltige Bestandsentwicklung und Neuplanung mit höchsten Nachhaltigkeitsstandard erleben,
- mit Klimaschutz und -anpassung den Auswirkungen des Klimawandels begegnen,
- trotz bzw. wegen des steigenden Wohlstands die Disparitäten abbauen und
- gesundheitliche Belastungen aufgrund ergriffener planerischer und baulicher Maßnahmen verringern.

Diese Punkte gilt es bei zukünftigen Planungen und Entscheidungen zu berücksichtigen, und sie stehen im Einklang mit nationalen und internationalen Zielen, wie den UN-Nachhaltigkeitszielen sowie den Zielsetzungen der Bundesregierung (Bundesregierung 2021; UN 2015). Es „geht [...] nicht darum, die zukünftige Entwicklung möglichst präzise vorauszusagen, sondern das Spektrum der realistischen Möglichkeiten sowie das Wirken von und die Zusammenhänge zwischen Unsicherheiten aufzuzeigen und Planungen oder andere Entscheidungen auf ihre Anpassungsfähigkeit in verschiedenen möglichen Zukunftsentwicklungen zu prüfen“ (Scholles 2008b: 381-382). Daher waren die Erkenntnisse dieses Kapitels die Grundlage für die Entwicklung der Strategie einer gesundheitsorientierten und nachhaltigen Stadtentwicklung (s. Kap. 8).

5 Untersuchungsräume: Deutschland und Vietnam

*Im folgenden Kapitel werden die für die Felduntersuchung ausgewählten Untersuchungsräume in Deutschland und Vietnam vorgestellt. Hierfür werden jeweils die verkehrliche Situation sowie die Belastung durch Luftschadstoffe im Stadtgebiet erläutert. Es wird davon ausgegangen, dass Rahmenbedingungen deutscher Großstädte wie Frankfurt am Main als gewählter Untersuchungsraum den Leser*innen bekannt sind, daher wird der Schwerpunkt in diesem Kapitel auf die Erläuterungen zu Ho Chi Minh City gelegt. Die Informationen über die Stadt Frankfurt am Main wurden im Rahmen der unveröffentlichten Masterarbeit von Pascal Renner zum Thema „Autofreie Großstadt – Am Beispiel Frankfurt a. M.“, die am Fachgebiet Raum- und Infrastrukturplanung angefertigt wurde, erarbeitet und sind nach Prüfung in dieses Kapitel eingeflossen. Die Beschreibungen zum Untersuchungsraum Ho Chi Minh City in Vietnam basieren auf der Dissertation von Dr.-Ing. Huong Le Thi zum Thema „Improving Transport-related Health Impacts by Promoting Active and Public Transport“ (DOI: 10.26083/tuprints-00019666), die am Institut für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik verfasst wurde.*

5.1 Deutschland – Frankfurt am Main

Für die Felduntersuchung in Deutschland wurde die Stadt Frankfurt am Main ausgewählt. Sie ist mit 752.321 Einwohner*innen (Stand: 30.06.2019, Stadt Frankfurt am Main Bürgeramt, Statistik und Wahlen 2019) sowohl die größte Stadt Hessens als auch Herz der Metropolregion sowie des Regionalverbands FrankfurtRheinMain. Durch die zentrale Lage ist Frankfurt am Main sowohl national als auch international ein wichtiger Verkehrsknoten.

5.1.1 Verkehrliche Situation

Straßennetz

Das Straßennetz Frankfurts umfasst insgesamt eine Länge von 1.456 Kilometern. Den Großteil machen Gemeindestraßen aus, sie decken mit 1.068,4 Kilometern Länge 73 % des Netzes ab. Landes- und Kreisstraßen umfassen eine Länge von 189,4 Kilometern und haben damit einen Anteil von 13 % am Straßennetz. Der Anteil der Bundesstraßen liegt bei 6,3 % und umfasst eine Länge von 92,3 Kilometern. Abgesehen von Privatstraßen, haben die Bundesautobahnen mit einer Länge von 71,4 Kilometern den geringsten Anteil am Frankfurter Straßenverkehrsnetz von 4,9 %. Seit dem Jahr 2000 ist das Frankfurter Straßennetz um 8,5% gewachsen, die größten Zuwächse gab es in dem Zeitraum bei Gemeindestraßen, die Bundesautobahnen sind dagegen von ihrer Länge nahezu gleichgeblieben. Am Frankfurter Autobahnkreuz treffen sich die Bundesautobahnen A3 und A5, die als Fernverbindungen fungieren. Es wird täglich von mehr als 370.000 Fahrzeugen befahren und ist somit eines der meist befahrenen Straßenknotenpunkte Europas (Hessen Mobil o. J.). Die übrigen Autobahnen dienen der Anbindung an die Region. Die A66 verbindet Frankfurt in westlicher Richtung mit der hessischen Landeshauptstadt Wiesbaden und dem Rheingau, in östlicher Richtung führt die A66 an der Stadt Hanau vorbei bis nach Fulda. Der Osten Frankfurts ist durch die A661 an die Bundesautobahnen A3 und A5 angebunden. Die Bundesstraßen B3, B40, B43 und B44 verbinden Frankfurt am Main mit den umliegenden Kommunen.

In Abbildung 21 ist das Netz der durch Frankfurt am Main führenden Bundesautobahnen und Bundesstraßen dargestellt. Hauptstraßen und größere Straßen verbinden die Stadtteile Frankfurts mit den Bundesautobahnen bzw. den Bundesstraßen sowie die Stadtteile untereinander. Diese Straßenverkehrs-Hauptachsen sind dementsprechend mehrspurig, um ein hohes Verkehrsaufkommen zu ermöglichen. Um eine übersichtliche Darstellung zu gewährleisten, sind in Abbildung 21 lediglich die Fernverbindungen und die innerstädtischen Hauptachsen abgebildet. Innerhalb der Stadtteile bilden kleinere Straßen ein dichtes Netz, das häufig in Einbahnstraßensystemen geführt wird, um den Kfz-Verkehr in den innerstädtischen Wohngebieten gering zu halten.

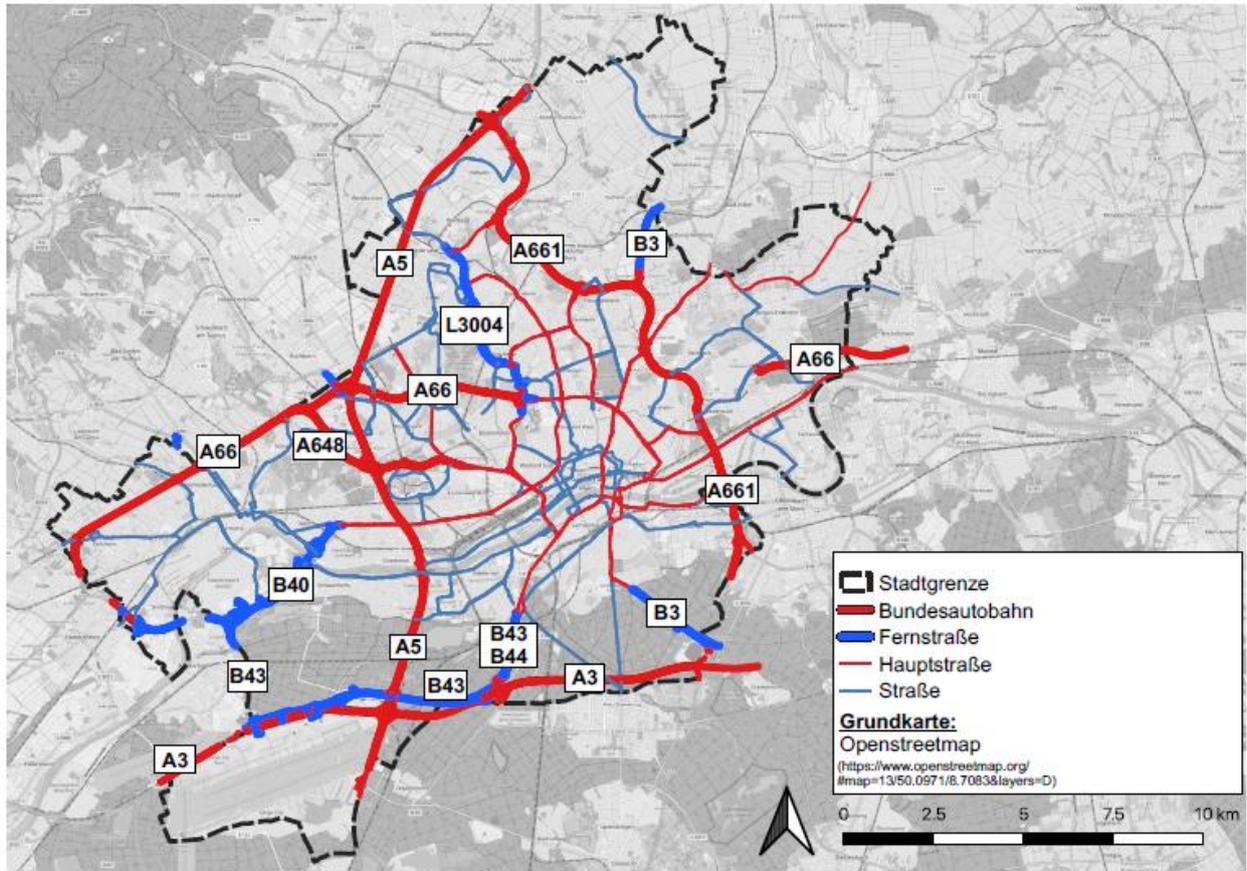


Abb. 21: Straßennetz Frankfurt am Main
Quelle: Renner 2020: 43

Kraftfahrzeugbestand

Im Jahr 2018 waren in Frankfurt am Main insgesamt 385.701 Kraftfahrzeuge gemeldet, 87% dieser Kfz waren Pkw. Lkw und sonstige Fahrzeuge entsprachen einem Anteil von 7 %, Krafträder 6% (Stadt Frankfurt am Main 2019: 232). In den vergangenen Jahren ist der Bestand an Kfz analog zur Einwohnerzahl gestiegen. 2007 lebten in Frankfurt am Main 636.746 Menschen, 2018 waren es 747.848, die Einwohnerzahl ist in dem Zeitraum um 17,4% gestiegen (Stadt Frankfurt am Main 2019: 17), der Kfz-Bestand stieg um 16,2%. Der Pkw-Bestand ist dabei um 15,1 %, der Bestand an Krafträdern um 24,9% und der Bestand an Lkw um 24,0% gewachsen. Aufgrund des ähnlichen Anstiegs der Einwohnerzahl und des Kfz-Bestands hat sich der auf 1.000 Einwohner*innen bezogene Kfz-Bestand kaum verändert. Der Pkw-Bestand lag im Jahr 2018 bei 450 Pkw pro 1.000 Einwohner*innen und liegt damit unter dem bundesweiten Durchschnitt von 527 Pkw pro 1.000 Einwohner*innen (Nobis und Kuhnimhof 2018: 69). Im Vergleich deutscher Metropolen weist Frankfurt am Main einen erhöhten einwohnerbezogenen Pkw-Bestand auf, in westdeutschen Metropolen kommen auf 1.000 Einwohner*innen im Schnitt 394 Pkw (Nobis und Kuhnimhof 2018: 69).

ÖPNV-Angebot

Neben dem dichten Straßennetz, das primär für den MIV zur Verfügung steht, verfügt Frankfurt am Main über ein ÖPNV-Netz, das sich über das gesamte Stadtgebiet erstreckt und das Zentrum des Netzes des Rhein-Main-Verkehrsverbundes darstellt. Am Frankfurter Hauptbahnhof sind täglich 450.000 Reisende und Besucher*innen unterwegs, er ist damit einer der am stärksten frequentierten Bahnhöfe Deutschlands (Verkehrsdezernat Stadt Frankfurt am Main, 2015: 6). Neben der Funktion als wichtiger nationaler und internationaler Verkehrsknoten für den **Schienerfernverkehr** spielt der Hauptbahnhof auch eine zentrale Bedeutung für den **Regionalverkehr**. Der Großteil der Bahnlinien

verläuft über den Frankfurter Hauptbahnhof, als wichtigster Umsteigepunkt verbindet er so das gesamte Verbundgebiet. Über zwei U-Bahn-Linien, sieben Straßenbahnlinien und vier Buslinien ist der Hauptbahnhof in das städtische ÖPNV-Netz eingebunden (Rhein-Main-Verkehrsverbund GmbH: 2019). Am Hauptbahnhof befinden sich zudem Bikesharing-Stationen, der Fernbus-Bahnhof und zwei Taxi-Stände. Das Frankfurter ÖPNV-Netz umfasst neben den neun RMV-S-Bahnlinien zehn Straßenbahn- und neun U-Bahnlinien sowie 53 Tagbus- und elf Nachtbuslinien. Der städtischen Nahverkehrsgesellschaft traffiQ zufolge erstreckt sich das Liniennetz des Frankfurter Nahverkehrs auf 795 Kilometer und beinhaltet 849 Haltestellen. Jährlich werden 247 Millionen Fahrgäste innerhalb Frankfurts befördert, dabei wird eine Verkehrsleistung von 1.053 Personenkilometern erzielt.

Der **Busverkehr** hat den größten Anteil am städtischen ÖPNV-Netz, ca. drei Viertel der Linien und Haltestellen entfallen auf Busse. Ebenso ist der Fahrzeugeinsatz im Busverkehr am größten, dennoch wird nur knapp ein Viertel der Fahrgäste in Bussen befördert. **Straßenbahnen** befördern einen geringfügig höheren Anteil der Fahrgäste. Mehr als die Hälfte der Fahrgäste nutzen Frankfurts U-Bahnen. Die durchschnittliche zurückgelegte Strecke je Fahrgast und Fahrt unterscheidet sich zwischen den drei Verkehrsmitteln nur kaum, in Bussen beträgt sie 3,67 Kilometer, in Straßenbahnen 3,86 Kilometer und in U-Bahnen 3,97 Kilometer, entsprechend hängen die Anzahl der Fahrgäste und die zurückgelegten Personenkilometer nahezu linear voneinander ab. Betrachtet man hingegen das Verhältnis zwischen Personenkilometern und Nutzkilometern, zeigen sich große Unterschiede zwischen den drei Verkehrsmitteln. Im Durchschnitt werden in Bussen 13,26 Personen befördert, in Straßenbahnen 36,71 Personen und in U-Bahnen 72,84 Personen.

Die **U-Bahn** ist die tragende Säule der Mobilität der Massen, insbesondere auf der nördlichen Seite des Mains bilden die U-Bahnlinien Verkehrsachsen, die sich bis zu den Stadträndern erstrecken. Den Straßenbahnen kommt eine ähnliche Funktion zu. Dennoch sind der Fahrzeugeinsatz und somit auch die Zahl der beförderten Personen in U-Bahnen mehr als doppelt so groß. Die Vielzahl der Buslinien und die große Linienlänge ist darauf zurückzuführen, dass die Busse die Bereiche zwischen den U- und Straßenbahnlinien abdecken. Mit 717 Bus-Haltestellen und einer Gesamtfläche von 248,31 Quadratkilometern des Stadtgebiets wird eine Dichte von 2,89 Haltestellen pro Quadratkilometer erreicht. Der Busverkehr hat damit im städtischen ÖPNV-Netz die größte Dichte und ist für die kleinräumige Erschließung zuständig, zudem ist durch den Busverkehr der Anschluss an die übrigen Verkehrsmittel möglich.

Verkehrsverhalten

Im Zuge der Studie Mobilität in Deutschland 2017 hat der Regionalverband FrankfurtRheinMain wie auch in den Jahren 2002 und 2008 eine Zusatzstichprobe erhoben, um das Verkehrsverhalten in der Region zu erfassen. Abbildung 22 zeigt den Modal Split des Verkehrsaufkommens. Dieser wird für den gesamten Regionalverband sowie für Frankfurt/Offenbach und die übrigen Kommunen des Regionalverbands dargestellt. Der **MIV** nimmt im Regionalverband mit 45% den größten Anteil der Wege ein, in Frankfurt/Offenbach ist dieser Anteil deutlich geringer, sodass die Frankfurter und Offenbacher Bürger*innen knapp drei Viertel ihrer Wege im Umweltverbund aus ÖPNV, Rad- und Fußverkehr zurücklegen. Der größte Unterschied gegenüber dem Rest des Regionalverbands ist im Bereich Bus und Bahn zu erkennen, was auf das **gut ausgebaute ÖPNV-Netz** in Frankfurt und Offenbach zurückzuführen ist. Zudem zeigt sich im Vergleich zwischen 2002 und 2017 ein Rückgang des MIV-Anteils in Frankfurt/Offenbach von 46% auf 27%. Der Anteil des **Fußverkehrs** ist in dem Zeitraum weitgehend konstant geblieben, Bus und Bahn sind auf das Eineinhalbfache angestiegen, den stärksten Zuwachs verzeichnete der **Radverkehr**. In den weiteren Kommunen ist dieser Zuwachs nicht aufgetreten, stattdessen ist der Radverkehrs-Anteil dort sogar gegenüber 2002 gesunken.

Aufteilung der täglichen Wege auf die Verkehrsmittel (Modal Split)

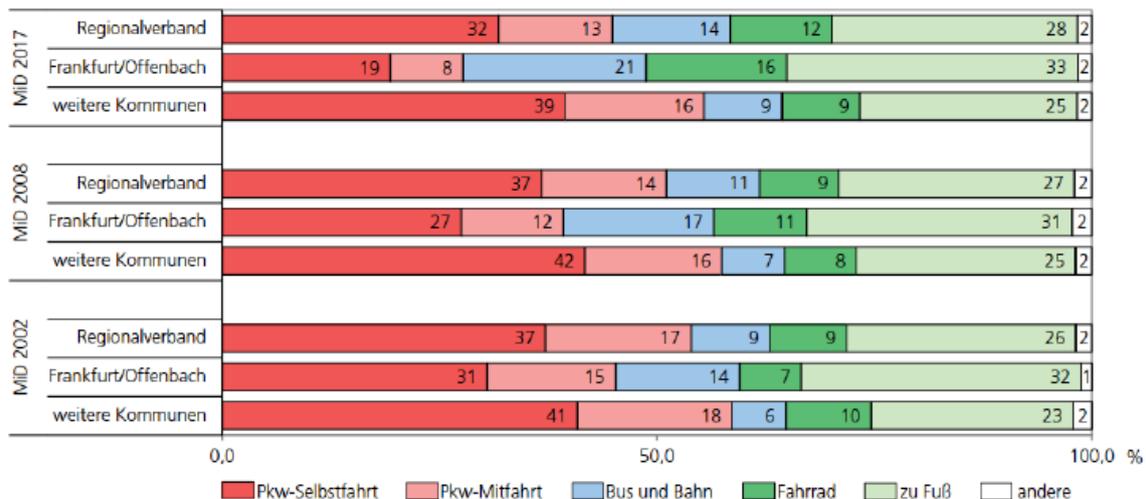


Abb. 22: Modal-Split nach Verkehrsaufkommen im Regionalverband FrankfurtRheinMain
Quelle: Regionalverband FrankfurtRheinMain 2019: 50

Mit der im MiD 2017 für Metropolen angegebenen durchschnittlichen Wegeanzahl von 3,2 Wegen pro Person und Tag (Nobis und Kuhnimhof 2018: 28) und der Einwohnerzahl kann das tägliche Verkehrsaufkommen der Einwohner*innen Frankfurts bestimmt werden. Unter der Annahme, dass die Einwohnerzahl seit Juni 2019 unverändert ist, werden von den 752.321 Einwohner*innen täglich 2.407.427 Wege bewältigt. Mit Hilfe des Modal Splits (s. Abb. 22) lässt sich das verkehrsmittelspezifische Verkehrsaufkommen berechnen. Die Kategorie „andere“ wird dabei vernachlässigt, die Anteile ändern sich entsprechend (s. Tab. 9).

Tab. 9: Tägliches Verkehrsaufkommen und Modal Split für die Einwohner*innen von Frankfurt am Main 2020
Quelle: Eigene Darstellung nach Regionalverband FrankfurtRheinMain 2019: 50

	Gesamt	MIV	ÖPNV	Fahrrad	Fußverkehr
Verkehrsaufkommen [Wege/Tag]	2.407.427	670.109	521.196	397.101	819.022
Anteil	100%	27,8%	21,6%	16,5%	34,0%

Der Regionalverband FrankfurtRheinMain hat im Rahmen des MiD 2017 die Wegezwecke für das Verbandgebiet untersucht (s. Abb. 23).

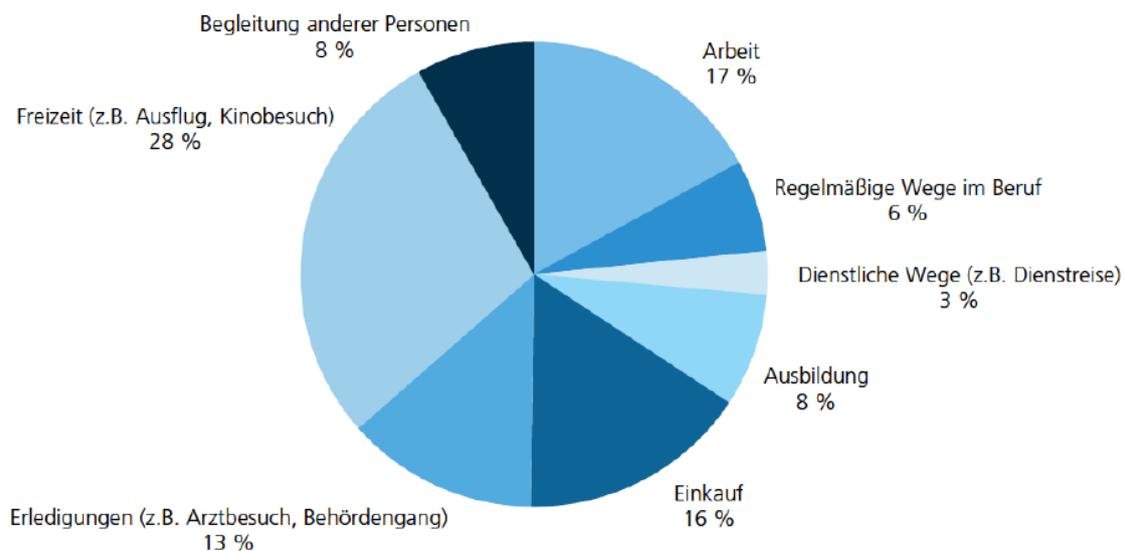


Abb. 23: Modal Split nach Wegezweck im Regionalverband FrankfurtRheinMain
Quelle: MiD 2017; Berechnungen des Regionalverbands

Für die drei **Wegezwecke** mit den größten Anteilen am Modal Split Arbeit, Einkauf und Freizeit wurde untersucht, welche Verkehrsmittel für die Wege gewählt werden, dabei treten je nach Zweck deutliche Unterschiede auf (s. Abb. 24). Auf Arbeitswegen ist der Pkw mit 51% das beliebteste Verkehrsmittel im Regionalverband. Die Anteile der Pkw-Selbstfahrer*innen und der Pkw-Mitfahrer*innen zeigen, dass die meisten Pendler*innen allein in ihrem Pkw sitzen. Etwas mehr als ein Viertel der Arbeitswege werden mit dem ÖPNV zurückgelegt, lediglich 12% bzw. 10% mit dem Rad oder zu Fuß. Die Verteilung lässt darauf schließen, dass der Großteil der Beschäftigten Entfernungen zwischen Wohn- und Arbeitsort zu überwinden hat, die zu Fuß oder mit dem Rad nicht erschließbar sind.

Auf Einkaufswegen zeigt sich ein deutlich anderes Bild, mehr als die Hälfte der Wege werden zu Fuß oder mit dem Rad bewältigt. 42% der Einkaufswegen erfolgen mit dem Pkw, etwa ein Fünftel sind Mitfahrer. Mit 6% ist der ÖPNV-Anteil sehr gering. Der große Anteil des Fußverkehrs bei Einkaufswegen zeigt zudem, dass Einkaufsmöglichkeiten im nahen Wohnumfeld bestehen. Pkw-Fahrten sind vermutlich auf größere Einkaufstouren zu am Stadtrand gelegenen Einkaufszentren und auf den Transport sperriger oder schwerer Waren zurückzuführen.

Auf Freizeitwegen ist die Verteilung ausgewogener. Mehr als die Hälfte der Wege werden mit dem Umweltverbund bewältigt. Bei den Pkw-Fahrten zeigt sich eine nahezu ausgeglichene Verteilung zwischen Selbst- und Mitfahrer*innen, was auf einen höheren Pkw-Besetzungsgrad als auf Arbeits- oder Einkaufswegen schließen lässt. Die ausgewogene Verteilung auf die Verkehrsmittel zeigt auch, wie vielfältig Freizeitverkehr sein kann, er reicht vom Spaziergang zur nächstgelegenen Naherholungsfläche bis hin zum Urlaub mit der Familie.

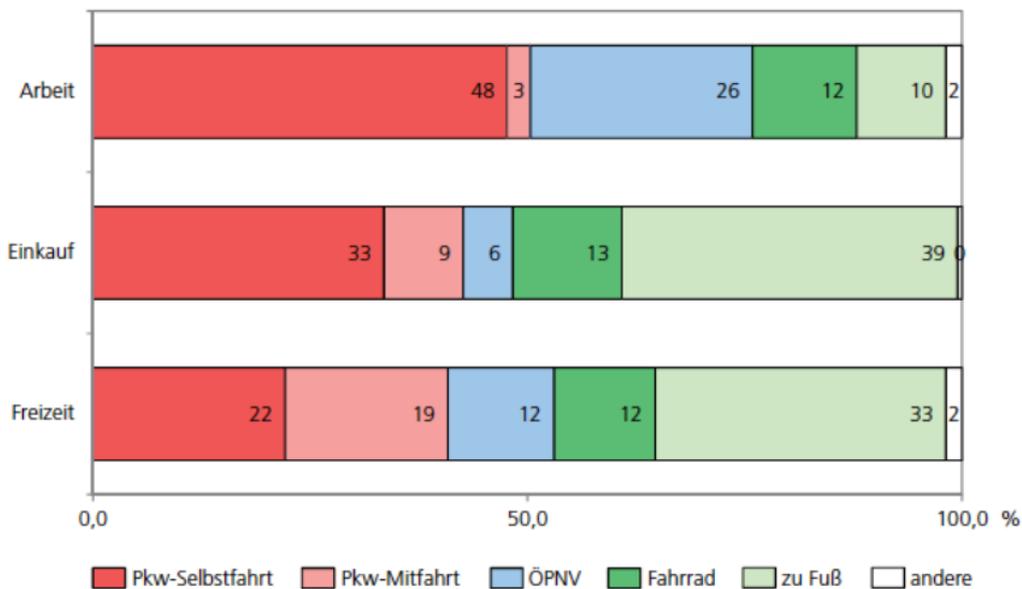


Abb. 24: Verkehrsmittelnutzung nach Fahrtzweck im Regionalverband FrankfurtRheinMain
Quelle: MiD 2017; Berechnungen des Regionalverbands

Die **Nutzungshäufigkeit** der Verkehrsmittel Pkw, ÖPNV und Fahrrad zeigt, welche Bedeutung die einzelnen Verkehrsmittel für die Bevölkerung im Regionalverband haben (s. Abb. 25). Der Pkw wird von knapp 70% regelmäßig, also mindestens einmal pro Woche genutzt, bei 43% ist er (fast) täglich im Einsatz. Lediglich 23% der Bevölkerung nutzen einen Pkw seltener als einmal im Monat. 35% der ÖPNV-Nutzer*innen nehmen das Angebot regelmäßig wahr. Fast die Hälfte der Befragten im Regionalverband nutzt den ÖPNV nie oder nur selten. Dem Fahrrad fällt unter den drei Verkehrsmitteln die geringste Bedeutung zu. Ein Drittel der Befragten nutzt es regelmäßig, mit 16% ist der Anteil der Personen, die das Fahrrad (fast) täglich nutzen, geringer als im MIV und ÖPNV. Dagegen ist mit 38% der Anteil der Nichtnutzer*innen am stärksten, weitere 15 % nutzen das Rad seltener als einmal im Monat.

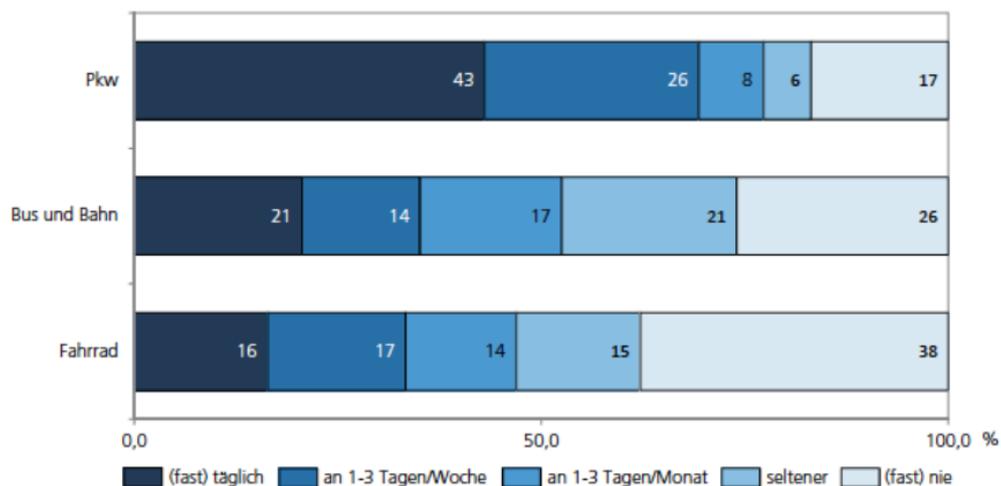


Abb. 25: Verkehrsmittelwahl und Häufigkeit der Nutzung im Regionalverband FrankfurtRheinMain
Quelle: MiD 2017; Berechnungen des Regionalverbands

Pendlerhauptstadt Frankfurt am Main

Der Pkw ist im Regionalverband das Verkehrsmittel, das am regelmäßigsten genutzt wird, ebenso ist er für die Bewältigung von täglichen Wegen zur Arbeit am häufigsten im Einsatz. Dies wird unter anderem durch das dichte Straßennetz in und um Frankfurt am Main begünstigt (s. Abb. 21) und führt dazu, dass Frankfurt am Main gemessen an der Einwohnerzahl Pendlerhauptstadt Deutschlands ist (Initiative PERFORM Zukunftsregion FrankfurtRheinMain 2018: 7). Die Bundesagentur für Arbeit stellt auf ihrer Internetseite einen Pendleratlas zur Verfügung, der eine Übersicht der Wohn- und Arbeitsorte aller sozialversicherungspflichtig Beschäftigten in Deutschland bietet. Daraus lassen sich Pendlerverflechtungen der Stadt Frankfurt am Main mit den zehn umliegenden Kreisen erfassen, in denen die Pendlerzahlen am größten sind. In Frankfurt am Main sind insgesamt 602.033 Personen sozialversicherungspflichtig beschäftigt (Datenstand Juni 2019). Der Großteil dieser Beschäftigten wohnt jedoch nicht in Frankfurt am Main, sondern in einem der umliegenden Kreise. So pendeln täglich 387.518 Beschäftigte aus anderen Kreisen in die Stadt. Gleichzeitig haben von den 315.445 in Frankfurt am Main wohnhaften sozialversicherungspflichtig Beschäftigten 100.930 Personen einen Arbeitsplatz außerhalb der Mainmetropole und pendeln in andere Kreise. Die übrigen 214.515 Personen haben sowohl ihren Wohn- als auch ihren Arbeitsort in Frankfurt am Main und sind Binnenpendler. Die Gesamtzahl der Ein- und Auspendler*innen beläuft sich auf 488.448, der Saldo aus Ein- und Auspendler*innen für Frankfurt am Main beträgt dabei 286.588 (Bundesagentur für Arbeit, kein Datum). Nicht alle dieser Beschäftigten arbeiten in Vollzeit und pendeln täglich zur Arbeit. In Frankfurt am Main kommen auf 100 Erwerbstätige 86,4 Vollzeitäquivalente (Stadt Frankfurt am Main 2019: VII). Bezieht man dies auf sozialversicherungspflichtig Beschäftigte, pendeln demnach täglich 607.361 Personen arbeitsbedingt im Raum Frankfurt am Main. Dabei pendeln 334.816 Personen nach Frankfurt am Main und 87.204 aus der Stadt in andere Kreise. Die Zahl der täglich zur Arbeit pendelnden Personen innerhalb der Stadt liegt bei 185.341. Da sowohl der Weg zum Arbeitsort als auch der Weg zurück nach Hause von jedem der Pendler*innen täglich bewältigt wird, entspricht das Verkehrsaufkommen dem doppelten Wert der Pendler*innen. Im Statistischen Bericht 2019 der Stadt Frankfurt am Main wird die durchschnittliche Strecke der Ein und -auspendler*innen zwischen Wohn- und Arbeitsort genannt. Einpendler*innen legen im Schnitt 25,6 Kilometer zurück, Auspendler*innen 19,1 Kilometer (Stadt Frankfurt am Main - Der Magistrat - Bürgeramt, Statistik und Wahlen 2019: 122).

5.1.2 Schadstoffbelastungen

Der Verkehr in Frankfurt am Main verursacht wie in anderen Großstädten Luftschadstoffbelastungen, die schädlich für Mensch und Umwelt sein können. Um negative gesundheitliche Auswirkungen zu minimieren, ist die Einhaltung der gesetzlichen Grenzwerte zu gewährleisten. Aus diesem Grund werden die Konzentrationen ausgewählter Luftschadstoffe in der Stadt gemessen. Im statistischen Jahrbuch der Stadt Frankfurt am Main sind die Messwerte der letzten zehn Jahre von drei Messstationen in der Stadt sowie Vergleichswerte der Wasserkuppe zu finden (Stadt Frankfurt am Main, 2019: 246 ff.).

Es ist zu erkennen, dass an den drei Messstationen in Frankfurt-Höchst, -Ost und an der Friedberger Landstraße die Konzentrationen an NO_2 und NO_x in den letzten zehn Jahren rückläufig waren. So überschritt bis zum Jahr 2014 die mittlere Jahreskonzentration von NO_2 in Höchst den Grenzwert von $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Seit 2018 ist dieser Wert nicht mehr überschritten worden. Berechnungen des Hessischen Landesamtes für Naturschutz, Umwelt und Geologie stützen diesen Trend. Den Berechnungen zufolge kam es im Jahr 2017 an 116 Straßen in Frankfurt am Main zu Überschreitungen des Grenzwertes, 2018 waren es nur noch 80 Straßen (Dauber und Leclerc 2019). Trotz sinkender Konzentrationen ist auch im Jahr 2018 der Grenzwert an der Friedberger Landstraße überschritten worden. 2019 kam es zu Grenzwertüberschreitungen an fünf Messstationen, weshalb der Stadt Frankfurt am Main Ende 2019 Fahrverbote für Diesel-Fahrzeuge drohten. Durch das Urteil des Hessischen Verwaltungsgerichtshofes vom Dezember 2019 blieb die Stadt bis zum Jahr 2021 vorerst von Fahrverboten ver-

schont. Durch die Corona-Pandemie ist die Diskussion um ein Diesel-Fahrverbot erstmal in den Hintergrund gerückt. Dennoch müssen Stadt und Land weiterhin prüfen, ob die NO_x-Grenzwerte eingehalten werden. Ist dies nicht der Fall, könnte ein Fahrverbot als letztes Mittel greifen. Die Luftverschmutzung durch Feinstaub der Partikelgröße PM₁₀ ist weniger akut als die durch Stickstoffdioxid. Der Jahresmittelwert von 40 µg/m³ ist an keiner der drei aufgeführten Messstationen in den letzten zehn Jahren überschritten worden. Die Anzahl der Überschreitungen des 24-h-Mittelwertes liegt ebenfalls an allen drei Messstationen unterhalb dem in der Richtlinie EG2008/50/EG bzw. 39. BImSchV festgelegten Wert von 35 µg/m³. Dies bedeutet jedoch nicht, dass durch die Feinstaubbelastungen in Frankfurt am Main keine Gesundheitsschädigungen ausgehen können. Denn sowohl die Jahresmittelwerte als auch die Anzahl der Überschreitungen des 24-Stunden-Mittelwertes liegen über den Empfehlungen der WHO.

5.2 Vietnam - Ho Chi Minh City

5.2.1 Geografische Lage, Bevölkerungsentwicklung und Wirtschaft

Die Felduntersuchungen in Vietnam wurden in Ho Chi Minh City (HCMC) im Süden von Vietnam durchgeführt. Die Stadt hat eine Gesamtfläche von 2.095 km² (das entspricht 0,6 % der Gesamtfläche des Landes). HCMC ist, gemessen an der Einwohnerzahl und der wirtschaftlichen Entwicklung die größte Stadt Vietnams und gilt als das **Wirtschafts- und Finanzzentrum** Vietnams. Die Stadt ist das Herzstück der südlichen Wirtschaftszone und trägt wesentlich zur wirtschaftlichen Entwicklung der Region bei und trägt etwa ein Viertel zum nationalen Bruttoinlandsprodukt (BIP) bei. Der Industrie- und der Dienstleistungssektor sind die wichtigsten Wirtschaftsmotoren der Stadt. (PSO.HCMC 2020)

Im Jahr 2019 lebten rund 9 Millionen Menschen in HCMC, was 9,3 % der nationalen Bevölkerung entspricht. Die Stadt hat mit durchschnittlich 4.363 Einwohner*innen pro km² auch die höchste Bevölkerungsdichte (PSO.HCMC 2020). Allerdings ist die Bevölkerung ungleichmäßig über die Stadt verteilt: Einige Bezirke haben eine hohe Bevölkerungsdichte, z. B. die Bezirke 3, 4, 5, 10, 11 mit einer Bevölkerungsdichte von über 37.000 Einwohner*innen pro km², andere Gebiete wie der Bezirk Can Gio haben nur eine Dichte von 102 Einwohner*innen pro km². Im Jahr 2019 waren 75,5 % der Bevölkerung der Stadt im erwerbsfähigen Alter (15-64 Jahren). Tabelle 10 zeigt den Bevölkerungszuwachs in HCMC im Zeitraum 1999-2019. Zuwanderung und natürliches Wachstum waren die Gründe des **Bevölkerungswachstums** in HCMC. Zwischen 1989 und 2009 wurden im Zuge der Stadterweiterung sechs neue Bezirke gegründet. Dies trug zum Anstieg der städtischen Bevölkerung bei. Der prozentuale Anteil der Stadtbevölkerung sank von 2009 bis 2019 von 83,24 % auf 79,23 %, während diese Zahl im ländlichen Raum von 16,76 % auf 20,77 % anstieg. In absoluten Zahlen stieg die Bevölkerung in HCMC jedoch um 1.157.109 Einwohner*innen im städtischen Gebiet und nur um 673.109 Einwohner*innen in ländlichen Gebieten. Die Geburtenrate im ländlichen Gebiet ist höher als im städtischen Gebiet. Diese Zahlen zeigen, dass die Verstädterung in HCMC sowohl in den städtischen als auch in den ländlichen Gebieten weiter voranschreitet.

Tab. 10: Gesamtbevölkerung und Bevölkerungsverteilung nach Gebiet und Geschlecht in HCMC (1989-2019)
Quelle: Ho Chi Minh statistics office 1989, 1999, 2009, 2019

Jahr		1999		2009		2019	
Einwohnerzahl		5.037.155	100%	7.123.340	100%	8.993.082	100%
Nach Gebiet	Urban	4.204.662	83,47%	5.929.479	83,24%	7.125.493	79,23%
	Ländlich	832.493	16,53%	1.193.861	16,76%	1.867.589	20,77%
Nach Geschlecht	Männlich	2.424.415	48,13%	3.425.925	48,09%	4.381.242	48,72%
	Weiblich	2.12.740	51,87%	3.697.415	51,91%	4.611.840	51,28%

5.2.2 Städtebauliche Entwicklung

HCMC ist von Zersiedelung betroffen, die Stadt dehnt sich entlang des Saigoner Flussufers aus. Während der französischen Besatzung (1860-1945) war die Stadt in einem Raster mit spezifischen Bereichen für Verwaltung, Handel und Wohnen gegliedert. Als die Amerikaner kamen und die Franzosen ablösten (1954-1975), kam es zu einer massiven Abwanderung aus den ländlichen Gebieten in die Stadt, hauptsächlich zu militärischen Zwecken. In die Stadt wurden enorme Investitionen für den Bau von Luxushotels, Hochhäusern, modernen Fabriken usw. getätigt, und das Straßennetz wurde umfassend ausgebaut (Nguyen 2010). Nach der Wiedervereinigung des Landes im Jahr 1975 begann die Stadt, sich von den Folgen des Krieges zu erholen und die wirtschaftliche Entwicklung hatte oberste Priorität. Die Umsetzung von Doi Moi (Wirtschaftsreform in Vietnam 1986) hatte spürbare Auswirkungen auf die sozioökonomische Entwicklung, und die Wohnungswirtschaft reagierte auf die Nachfrage nach Wohnraum. (Van 2018) Abbildung 26 zeigt das Städtewachstum der Stadt HCMC von 1989 bis 2006.

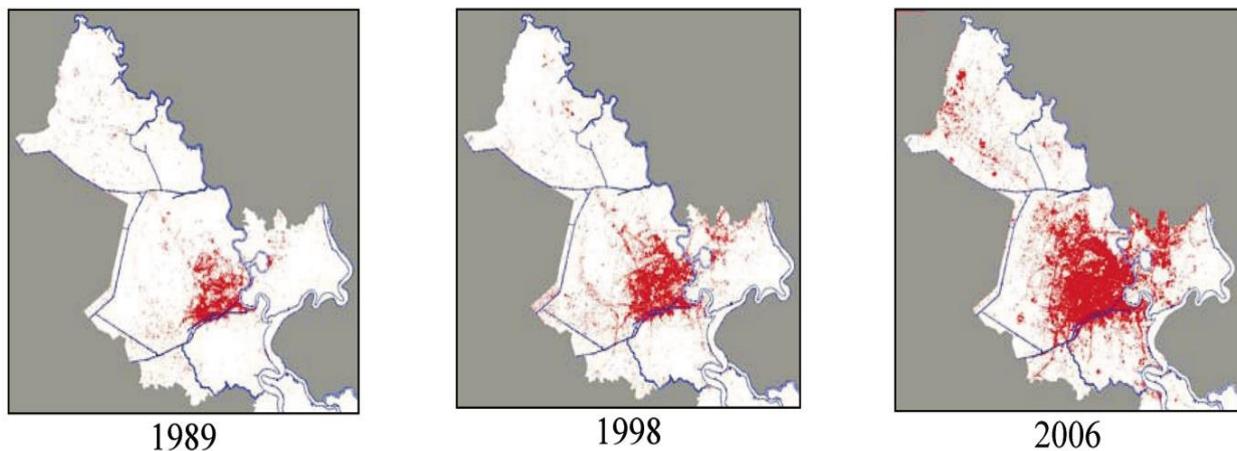


Abb. 26: Stadtwachstum in HCMC
Quelle: Nguyen 2010

In Ho Chi Minh City schritt die Urbanisierung in den letzten Jahrzehnten so stark voran, dass die Verwaltung nicht Schritt halten konnte. Die für die Stadtplanung zuständigen Behörden verfügen nicht über ausreichende Informationen und Kapazitäten, um die kommenden Veränderungen für Ho Chi Minh City zu prognostizieren und Pläne für die Verwaltung und Entwicklung der Stadt auszuarbeiten. Die rasche Verstädterung hat die Flächennutzungsmuster von HCMC erheblich verändert. Landwirtschaftliche Flächen werden in Bauland umgewandelt, und die ländlichen Gebiete gehen in städtische Gebiete über. Tabelle 11 zeigt die Veränderung der Flächennutzung in HCMC im Zeitraum 2000 bis 2010. Die landwirtschaftlich genutzte Fläche ging in diesem Zeitraum um 6% zurück, während die nicht landwirtschaftlich genutzte Fläche um 8% zunahm.

Tab. 11: Flächennutzungsänderung in HCMC (2000-2010)
Quelle: HCMC Department of Natural Resource and Environment

Flächennutzung	2000		2005		2010	
	ha	%	ha	%	ha	%
Landwirtschaft	130.720	62,4%	123.517	59,0%	118.052	56,4%
Nicht landwirtschaftliche Fläche	74.294	35,5%	83.774	40,0%	90.868	43,4%
• Wohnbauland	16.686	8,0%	20.521	9,8%	23.666	11,3%
• Öffentliches Flächen	19.602	9,4%	28.535	13,6%	32.974	15,7%
• Andere Flächen	38.006	18,1%	34.718	16,6%	34.864	16,6%
Ungenutzte Flächen	4.415	2,1%	2.264	1,1%	636	0,3%
Gesamt	209.429	100,0%	209.555	100,0%	209.556	100,0%

5.2.3 Verkehrliche Situation

Tabelle 12 zeigt einige Kennwerte zur Entwicklung des Straßennetzes in HCMC im Zeitraum 2011-2017. Die Straßeninfrastruktur wurde jedes Jahr erweitert. So stieg beispielsweise die Straßenlänge von 3.850 km im Jahr 2011 auf 4.202 km im Jahr 2017. Allerdings sind nur 14% des Straßennetzes breiter als 12 Meter, eine Breite, die für den Busbetrieb erforderlich ist. 51% der Straßen haben eine Breite von 7-12 Metern, die von Pkws befahren werden können und 35% der Straßen haben eine Breite von weniger als 7 Metern, in denen ein großer Teil der städtischen Bevölkerung lebt (MOT 2017). Obwohl Straßen mit einer Breite von mehr als 7 Metern für Pkw zugänglich sind, besitzt der Großteil der Bevölkerung aufgrund des Mangels an Parkplätzen und den Kosten (Anschaffungs- und Betriebskosten) keinen eigenen Pkw. Die Merkmale des Straßennetzes sind einer der Hauptgründe für den hohen Motorradanteil in der Stadt.

Tab. 12: Indikatoren zur Entwicklung des Straßenverkehrsnetzes in HCMC (2011-2017)

Quelle: HCMC Department of Transport

Kennwert	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Straßenlänge (km)	3.851	3.895	3.950	3.981	4.044	4.155	4.203
Straßendichte (km/km ²)	1,84	1,86	1,88	1,9	1,93	1,98	2,01

Abbildung 27 zeigt die Anzahl von Motorrädern und Pkws sowie den Anteil an Motorrad- und Pkw-Eigentum in HCMC im Zeitraum 2010-2017. Im Jahr 2017 gab es in der Stadt fast 7,5 Millionen Motorräder, wobei die Motorradeigentumsrate 861 Fahrzeuge pro 1.000 Einwohner*innen betrug. Motorräder sind für mehr als 80% der Verkehrsnachfrage in der Stadt verantwortlich. HCMC ist eine der Städte mit dem höchsten Motorradeigentumsanteil weltweit. Tabelle 13 zeigt den Modal Split, die durchschnittliche Reisedistanz und die durchschnittliche Fahrzeit je Weg in HCMC. Im Gegensatz dazu sind die Anzahl der Pkw und die Pkw-Eigentumsrate mit nur 33 Pkw pro 1.000 Einwohner*innen relativ niedrig. Allerdings nimmt das private Pkw-Eigentum in letzter Zeit schneller zu als das Eigentum von Motorrädern, was auf das gestiegene Einkommensniveau zurückzuführen ist. Denn das Eigentum eines Pkw wird für viele Bürger*innen erschwinglich. Trotz des Anstiegs des Pkw-Eigentums werden Motorräder von den Pkw-Eigentümer*innen in HCMC immer noch für tägliche Fahrten gewählt. (VGTRC 2018)

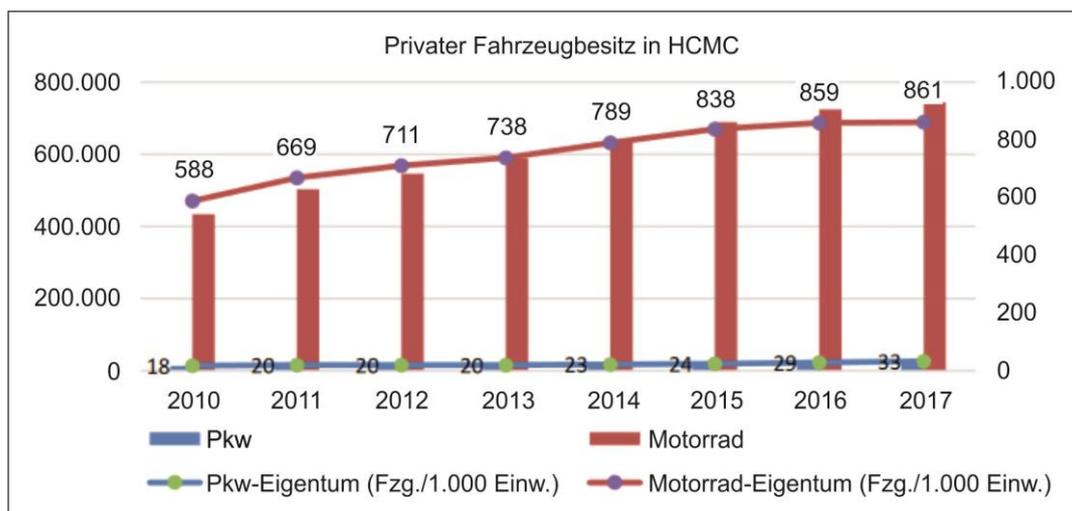


Abb. 27: Private motorisierte Fahrzeuge in HCMC (2010-2017)

Quelle: Erhoben aus den jährlichen Berichten der Verkehrspolizei in HCMC (Anmerkung: Pkw mit weniger als 9-Sitzen)

Tab. 13: Indikatoren für die Verkehrsnachfrage in HCMC
 Quelle: Eigene Darstellung nach VGTRC 2016

Verkehrsmittel	Modal Split/Weg (%)	Ø zurückgelegte Strecke/Weg [km]	Ø Reisezeit/Weg [min]
Motorrad	83	3,3	17
Pkw	5,3	6,8	29
Bus	6,3	7,1	11
Fahrrad	2,8	1,9	15
Weitere	2,6	N/A	N/A

Die Verkehrszusammensetzung in HCMC wird von **Motorrädern** dominiert. Bei der derzeitigen Straßeninfrastruktur und dem städtischen Verkehrssystem ist das Motorrad das effektivste Verkehrsmittel. Aufgrund der geringen Größe und der hohen Wendigkeit ist die Nutzung des Straßenraums durch Motorräder effizienter als durch Pkws. Daher ist die Straßenkapazität für motorisierte Verkehrsteilnehmer höher. Busse und Taxis sind seit langem die beiden wichtigsten öffentlichen Verkehrsmittel in HCMC im **öffentlichen Nahverkehr** und decken schätzungsweise 8 bis 10% der gesamten Verkehrsnachfrage in der Stadt ab. Im Jahr 2016 gab es in der Stadt 142 Buslinien mit 2.985 Fahrzeugen. 75% dieser Buslinien wurden vom Staat subventioniert. Es wurden viele Maßnahmen ergriffen, um den öffentlichen Nahverkehr in HCMC zu verbessern, darunter die Erneuerung der Busflotte, die Bereitstellung von Echtzeitinformationen für Fahrgäste und die Verbesserung von Bushaltestellen und Busbahnhöfen. Dennoch sind die öffentlichen Verkehrsmittel nach wie vor für einen Großteil der Bevölkerung unattraktiv und die Zahl der Fahrgäste ist nach wie vor gering.

Zu Fuß gehen und **Radfahren** sind in HCMC keine gängigen Fortbewegungsmittel. Der Anteil am Modal Split dieser Verkehrsträger ist sehr gering. Einrichtungen für den Radverkehr, wie Fahrradwege und -straßen, sind nicht vorhanden. Die Fußgängerinfrastruktur, wie Gehwege und Querungsmöglichkeiten an Knotenpunkten, ist oft von schlechter Qualität und unzureichend ausgestattet. Gehwege sind häufig durch Straßenhändler, parkende Fahrzeuge, fahrende Motorräder und andere Hindernisse belegt, die Fußgänger dazu zwingen, auf der Straße zu gehen, was zu einem erhöhten Unfallrisiko beiträgt. Diese Bedingungen machen das Zufußgehen und Radfahren zu unbeliebten Verkehrsmitteln in der Bevölkerung, was zu einem Rückgang ihres Anteils am Verkehrsaufkommen führt. Darüber hinaus kann dies dazu beitragen, dass die Zahl der Busnutzer*innen sinkt, da die Erreichbarkeit von Bushaltestellen und Bahnhöfen wegen der schlechten Infrastruktur für den Fuß- und Radverkehr erschwert ist.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Straßeninfrastruktur und das Angebot an öffentlichen Verkehrsmitteln in HCMC trotz der Verbesserungen nach wie vor unzureichend sind und nicht mit dem Anstieg der Nachfrage nach motorisiertem Individualverkehr Schritt halten können. Abbildung 28 zeigt einige Indikatoren für die Verkehrsentwicklung in HCMC im Zeitraum 2011 bis 2016. So ist beispielsweise die Zahl der Pkw und Motorräder um das 7- bzw. 5-fache gestiegen, verglichen mit den Entwicklungen der Straßenlänge. Es wird prognostiziert, dass das Eigentum privater motorisierter Fahrzeuge, insbesondere von Pkw, in der Stadt aufgrund des Bevölkerungs- und Einkommenswachstums weiter zunehmen wird. In der Zwischenzeit hat die Stadt bereits mit erheblichen Verkehrsstaus, Verkehrsunfällen, Luftverschmutzung und Lärmbelästigung zu kämpfen. Obwohl das städtische Verkehrssystem in HCMC mit vielen Herausforderungen konfrontiert ist, gibt es enorme Möglichkeiten zur Verbesserung der Situation durch die Verbesserung des öffentlichen Verkehrssystems, die Einschränkung des motorisierten Individualverkehrs und die Förderung des nichtmotorisierten Verkehrs. Dies erfordert ein starkes Engagement und die Unterstützung sowohl der Stadt als auch der Öffentlichkeit.

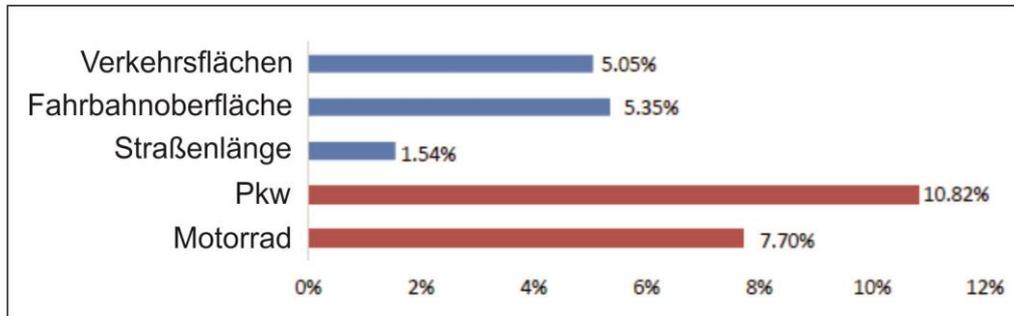


Abb. 28: Indikatoren für die Verkehrsentwicklung in HCMC (2011-2016)
Quelle: MOT 2017

5.2.4 Schadstoffbelastungen

Daten zur Luftqualität in HCMC sind nur eingeschränkt verfügbar. Die zuverlässigste Quelle für Informationen über die Luftqualität ist derzeit die Messstation des US-Konsulats, die die Luftqualität in Echtzeit überwacht und deren Daten öffentlich zugänglich sind. An dieser Station wird die stündliche $PM_{2,5}$ -Konzentration gemessen um den Luftqualitätsindex (AQI) zu berechnen, der auf der AQICN-Website veröffentlicht wird (AQI 2021). Abbildung 29 zeigt ein Beispiel für einen Echtzeit-Luftqualitätsindex in HCMC. Es ist wichtig zu beachten, dass die Luftqualitätsdaten dieser Station den aktuellen Status der Luftqualität der gesamten Stadt nicht vollständig widerspiegeln kann. Dennoch gilt sie den Bürger*innen von HCMC als gute Referenzquelle für die Luftverschmutzung.

Die Messgeräte befinden sich im Inneren des US-Konsulats und nicht in unmittelbarer Nähe von Straßen. Daher ist die gemessene Luftverschmutzung niedriger als an verkehrsnahen Messstellen, aber höher als die Hintergrundbelastung. Im Jahr 2018 betrug die an der Messstation im US-Konsulat gemessene durchschnittliche Jahreskonzentration von $PM_{2,5}$ $26,4 \mu g/m^3$ und die Luftqualität wurde als „mäßig“ eingestuft (Thu et al. 2019). Dieser Wert ist etwas höher als der in den Vietnamesischen Richtlinien festgelegte Grenzwert ($25 \mu g/m^3$), aber 2,6-mal höher als der WHO-Richtwert ($10 \mu g/m^3$). Im Vergleich zu Hanoi ist die Luftqualität in HCMC jedoch besser. Der Jahresdurchschnitt der $PM_{2,5}$ -Konzentration in Hanoi an der Station der US-Botschaft lag 2018 bei $40,6 \mu g/m^3$.

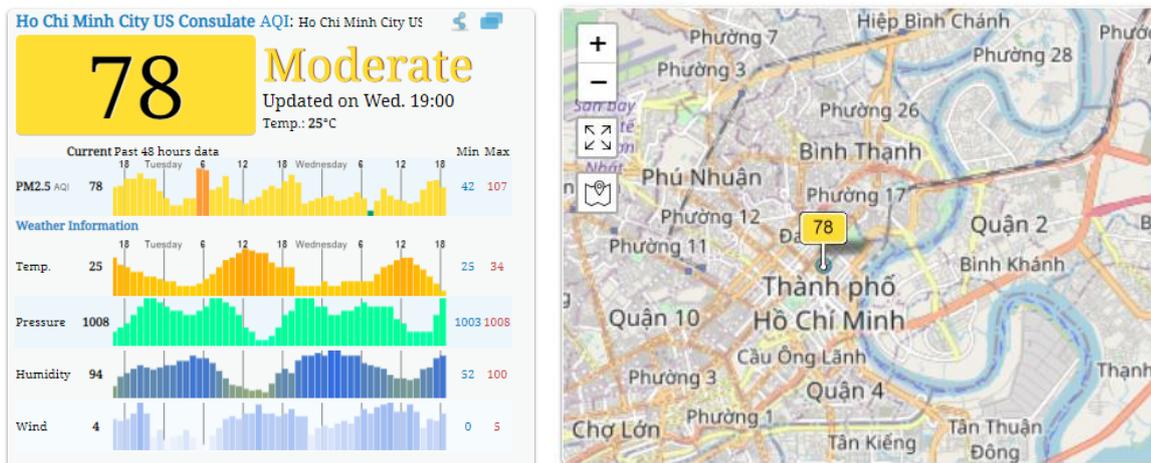


Abb. 29: Beispiel für den Echtzeit-Luftqualitätsindex in HCMC, Daten vom US-Konsulat
Quelle: AQI 2021

Eine weitere Quelle für Informationen zur Luftqualität in HCMC sind die von der Stadt betriebenen 20 fest installierte Messstationen, darunter Hintergrundstationen, Verkehrstationen, Industriestationen und Stationen für Wohngebiete. Zu den gesammelten Daten gehören Schwebstoffe insgesamt (TPS), PM_{10} , CO, SO_2 , NO_2 , Lärmpegel, Temperatur, Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Luftfeuchtigkeit. Allerdings werden nicht alle diese Daten an allen Messstationen erfasst und die Daten

sind für die Öffentlichkeit nicht zugänglich. Die Daten zur Luftqualität werden hauptsächlich mit manuellen Methoden alle paar Stunden pro Tag und mehrere Tage pro Monat erhoben. (CEMHCM 2018) TPS wird in der nationalen Luftqualitätsnorm Vietnams als Partikel mit einem Durchmesser von weniger als 100 μm definiert. Dieser Indikator gilt als einer der wichtigsten Indikatoren zur Beurteilung der Luftqualität in der Stadt. Was die gesundheitlichen Auswirkungen angeht, so haben die vorhandenen Erkenntnisse gezeigt (s. Kap. 2.5.2), dass $\text{PM}_{2,5}$ und O_3 viele schädliche Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit haben können. Diese Schadstoffe wurden vom HCMC-Überwachungssystem nicht erfasst.

Laut dem Bericht des HCMC Centre for Natural Resources and Environmental Monitoring lagen die jährlichen Konzentrationen von NO_2 , PM_{10} und TBS alle über den Grenzwerten (Vietnam Air Quality Standard) (CEMHCM 2018). Die Konzentrationen der Luftverschmutzung schwankten im Zeitraum 2014 bis 2017 zwischen 48 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ und 104 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ für PM_{10} , zwischen 37,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ und 230 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ für NO_2 und zwischen 244 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ und 810 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ für TBS. Die gemeldete TBS-Konzentration lag mit dem 2,5- bis 8-fachem deutlich über dem Grenzwert. (CEMHCM 2018). Tabelle 14 zeigt die Grenzwerte für verschiedene Luftverunreinigungen auf der Grundlage der AQG der WHO und der vietnamesischen Luftqualitätsnorm.

Tab. 14: Luftqualitätsnormen verschiedenen Vorschriften

Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von WHO 2021; QCVN 05:2009/BTNMT

Luftschadstoff		WHO-Richtwerte [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Vietnamesische Grenzwerte [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
$\text{PM}_{2,5}$	Jahresmittelwert	5	25
	Tagesmittelwert	15	50
PM_{10}	Jahresmittelwert	15	50
	Tagesmittelwert	45	150
NO_2	Jahresmittelwert	10	40
	Tagesmittelwert	-	100
	1-Stunden-Mittelwert	200	200
SO_2	Jahresmittelwert	-	50
	Tagesmittelwert	20	125
	1-Stunden-Mittelwert	-	350
	10-Minuten-Mittelwert	500	-
O_3	1-Stunden-Mittelwert	-	200
	8-Stunden-Mittelwert	100	120
CO	1-Stunden-Mittelwert	30.000	30.000
	8-Stunden-Mittelwert	10.000	10.000

Blau: Vietnamesischer Grenzwert liegt hinter WHO-Empfehlung

Seit 2018 stellen mehrere Organisationen über ihre Websites und mobilen Anwendungen Informationen zur Luftqualität in HCMC in Echtzeit zur Verfügung. Die Zuverlässigkeit dieser Luftqualitätsdaten ist aber nicht gesichert. Allerdings werden diese Daten veröffentlicht und sind für jedermann zugänglich. Dies trägt dazu bei, das Bewusstsein der Bevölkerung in HCMC für die Auswirkungen des Verkehrs auf die Luftschadstoffbelastung zu schärfen. Die wichtigsten veröffentlichten verkehrsbedingten Luftschadstoffe sind TPS, O₃, CO, SO₂, NO_x und VOC (flüchtiger organischer Kohlenstoff), die schädliche Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit haben können (MONRE 2016). Einem Bericht des HCMC Centre for Natural Resources and Environmental Monitoring zufolge waren die NO₂-, PM₁₀- und TPS-Werte an verkehrsnahen Stationen höher als an Hintergrundstationen und überschritten die in den vietnamesischen Luftqualitätsnormen (QCVN 05:2013/BTNMT) festgelegten Grenzwerte. Abbildung 30 zeigt ein Beispiel für die monatliche PM₁₀- und NO₂-Konzentration an einer Verkehrsstation und einer Hintergrundstation in HCMC im Jahr 2017. Die Diagramme zeigen deutlich, dass die PM₁₀- und NO₂-Konzentration an der Verkehrsstation deutlich höher waren als an der Hintergrundstation und als die Grenzwerte.

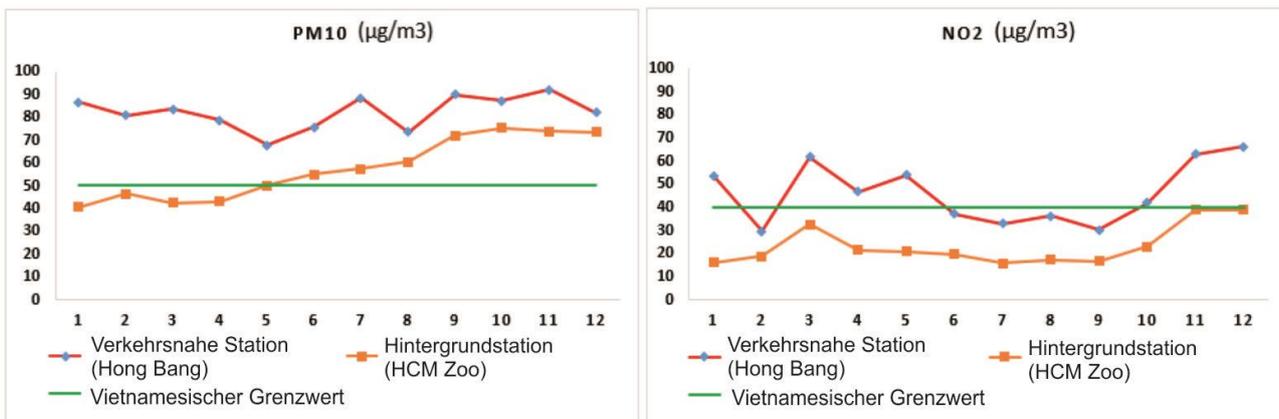


Abb. 30: PM₁₀- und NO₂-Konzentration an Verkehrs- und Hintergrundmessstationen in HCMC 2017
Quelle: HCMC Centre for Natural Resources and Environmental Monitoring

Motorräder sind für die meisten Verkehrsemissionen in HCMC verantwortlich. Im Jahr 2019 belief sich der Gesamtbestand an motorisierten Fahrzeugen in der Stadt auf mehr als 8 Millionen, darunter etwa 7,3 Millionen Motorräder. Die Stadt wies mit rund 810 Motorrädern/1000 Einwohner*innen die höchste Motorradeigentumsrate pro 1.000 Einwohner*innen im Land auf. Tabelle 6 zeigt den Anteil der Motorräder an den gesamten Verkehrsemissionen in einigen ausgewählten asiatischen Städten. In HCMC trugen Motorräder zu 90% der VOC-Emissionen und zu 70% der CO-Emissionen des Gesamtverkehrs bei. VOC sind das Ergebnis von Dämpfen, die aus dem Kraftstoffsystem des Fahrzeugs entweichen, wenn das Fahrzeug betrieben und geparkt wird, und die mit Stickoxiden (NO_x) und Kohlenmonoxid (CO) unter Sonneneinstrahlung reagieren und bodennahes Ozon (O₃) bilden. Daher lässt sich schlussfolgern, dass die O₃-Konzentration in HCMC relativ hoch ist.

Tab. 15: Anteil der Motorräder an den gesamten Verkehrsemissionen in ausgewählten asiatischen Städten
Quelle: Meszler 2007

Stadt	VOC	CO	PM	NO _x	CO ₂
Ho Chi Minh City, Vietnam	90%	70%	-	12%	40%
Delhi, India	70%	50%	-	-	-
Bangkok, Thailand	70%	32%	4%	<1%	-
Dhaka, Bangladesh	60%	26%	42%	4%	-

Einige Studien haben die Emissionen des Verkehrssektors in HCMC geschätzt. So wurde in einer Studie festgestellt, dass der Straßenverkehr den größten Anteil an den Gesamtemissionen des Verkehrssektors hat und für 88% der NO_x -, 99% der CO-, 79% der SO_2 - und 88% der PM-Emissionen verantwortlich ist (Ho et al. 2020). In einer anderen Studie wurden die $\text{PM}_{2,5}$ -Konzentrationen an einigen Straßenstandorten in HCMC gemessen. Das Ergebnis zeigte, dass die durchschnittliche $\text{PM}_{2,5}$ -Konzentration pro Tag $97 \mu\text{g}/\text{m}^3$ betrug, was deutlich über dem von der WHO festgelegten Grenzwert von $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ lag. (Huong Giang und Kim Oanh 2014)

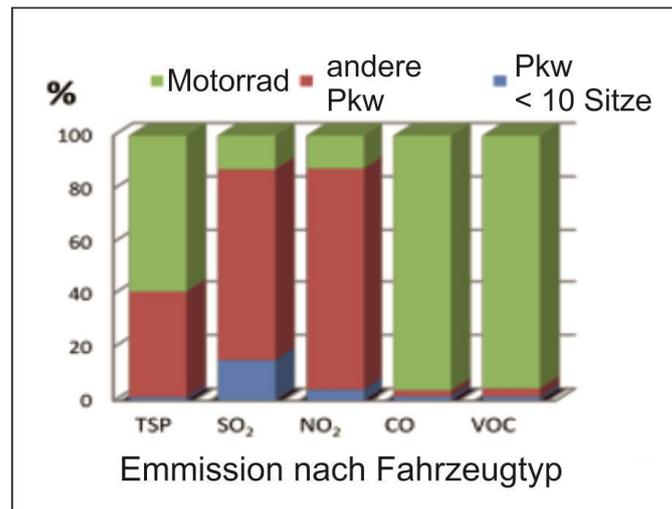


Abb. 31: Verkehrsbedingte Luftverschmutzung in Vietnam 2014 (Anmerkung: TSP-Total suspended particle)
Quelle: MONRE 2016

Insgesamt sind die Daten zur Luftqualität in HCMC begrenzt und können nicht den Zustand der Luftqualität in der gesamten Stadt wiedergeben. Die vorhandenen Daten zeigen jedoch, dass sich die Luftqualität in der Stadt auf einem alarmierenden Niveau befindet, insbesondere an den Straßenrändern. Die Hauptverursacher der Luftverschmutzung in HCMC sind der Verkehr, das Baugewerbe, die Industrie und die Aktivitäten der Bewohner*innen. Es ist schwierig, den Beitrag dieser Quellen zur Luftverschmutzung in der Stadt genau zu bestimmen und abzuschätzen. Was jedoch den Beitrag des Verkehrs betrifft, so gibt es einige Hauptgründe, warum der Verkehr eine der Hauptquellen der Luftverschmutzung in der Stadt ist, die im Folgenden aufgeführt werden:

- Eine große Anzahl an Motorrädern und Pkws ist täglich in der Stadt unterwegs.
- Niedrige Abgasnormen für motorisierte Fahrzeuge, insbesondere für Motorräder. Eine Studie ergab, dass eine große Anzahl an Motorrädern nicht mit einem Katalysator ausgestattet war: 47% der Flotte entsprachen der EURO-2-Norm, 18% der Flotte entsprachen der EURO-3-Norm, und 35% der Flotte entsprachen keiner EURO-Norm (Kim Oanh et al. 2012). Es wird angenommen, dass die motorradbedingte Luftverschmutzung erheblich zurückgehen würde, wenn der gesamte Motorradbestand die EURO-3-Norm einhalten würde.
- Mangels Inspektions- und Wartungsvorschriften für Motorräder wird eine große Anzahl von Motorrädern nicht regelmäßig überprüft und gewartet.
- Eine große Anzahl alter Fahrzeuge ist noch auf den Straßen unterwegs. Etwa 800.000 Motorräder, die älter als zehn Jahre sind, sind noch auf den Straßen unterwegs. Diese Fahrzeuge sind möglicherweise für einen großen Teil der Luftverschmutzung in der Stadt verantwortlich. Eine von Hassani und Hosseini durchgeführte Studie ergab, dass die Alterung eines 125-cm^3 -Motorrads um ein Jahr zu einem Anstieg der CO-Emissionen um 6% und des Kraftstoffverbrauchs um 2% führt (Hassani und Hosseini 2016).

6 Felduntersuchungen

Im folgenden Kapitel werden Grundlagen zur verwendeten Messtechnik für die Erfassung der untersuchten Luftschadstoffe sowie die Technik zur Erfassung relevanter Einflussfaktoren erläutert. Anschließend wird auf die in Deutschland und Vietnam angewendete Methodik eingegangen. Hierfür wird zuerst das methodische Vorgehen in Bezug auf mobile und stationäre Messungen und anschließend die Felduntersuchung im Rahmen der Datenerhebung dargestellt. In zwei weiteren Kapiteln werden die Datenaufbereitung sowie die Datenanalyse erläutert. Dabei stammen die gewonnenen Daten sowie die Ergebnisse aus der Datenanalyse für Vietnam vorwiegend aus der Dissertation von Dr. Huong Le Thi.

6.1 Messtechnik

Bei der Auswahl der zu untersuchenden Luftschadstoffe wurde, wie in Kapitel 2 beschrieben der Fokus auf ultrafeine Partikel, Partikel der Größenfraktionen $PM_{2,5}$ und PM_{10} sowie Stickoxide gelegt. Im Folgenden wird die für die Messungen der jeweiligen Luftschadstoffe eingesetzte Messtechnik erläutert.

6.1.1 Ultrafeine Partikel (UFP)

Zur Messung der Anzahl ultrafeiner Partikel in der Luft können zwei unterschiedliche Funktionsprinzipien zum Einsatz kommen. Zum einen Kondensationspartikelzähler und zum anderen Diffusionspartikelzähler. Die Funktionsweise der unterschiedlichen Messprinzipien ist in Anhang 2 näher erläutert.

Für die Messung von UFP wurde der Partector 2, ein Diffusionspartikelzähler der Firma Naneos Particle Solutions GmbH für die Durchführung der Messungen gewählt. Durch seine Eigenschaften wie ein geringes Gewicht und kompakte Maße sowie eine lange Batterielaufzeit, ist das Gerät für den Einsatz bei mobilen Messungen sehr gut geeignet. Die aufgezeichneten Messgrößen sind Partikelanzahl, -masse, -oberfläche, durchschnittlicher Partikeldurchmesser sowie der Anteil der luftgetragenen Oberflächenkonzentration, der sich im alveolaren oder tracheobronchialen Bereich der menschlichen Lunge bei Inhalation deponieren würde (lung deposited surface area, LDSA). (Naneos Particle Solutions GmbH 2016) Das Gerät kann Messdaten mit einem Messintervall von einer Sekunde erfassen, wodurch die Daten in einer sehr hohen Auflösung aufgezeichnet werden. Durch eine zusätzliche Erfassung von GPS-Koordinaten mittels eines GPS-Trackers wurden die Messwerte der Luftschadstoffe der mobilen Messungen des Weiteren dem jeweiligen Aufenthaltsort zugewiesen werden.

6.1.2 Partikel der Größenfraktionen $PM_{2,5}$ und PM_{10}

Für die Messung der Partikel der Größenfraktionen $PM_{2,5}$ und PM_{10} wurde das tragbare Aerosolspektrometer Modell 11-D der Firma Grimm Aerosoltechnik gewählt. Durch das eingesetzte Messprinzip, die Streulichtdetektion von Einzelpartikeln mit einer sehr hohen Größenauflösung, können Partikel in 31 Größenkanälen ($0,253 \mu\text{m}$ bis $35,15 \mu\text{m}$) in einer zeitlichen Auflösung von sechs Sekunden erfasst werden. Die Messwerte können als Partikelanzahlkonzentration (Partikel/Liter) angegeben oder anschließend an die Messung auf Grundlage der gemessenen Anzahl- und Größenverteilung in neun Staubmassenfraktionen ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) umgerechnet werden. An das Gerät kann ein zusätzlicher GPS-Sensor angeschlossen werden, um die gemessenen Luftschadstoffbelastungen bei den mobilen Messungen dem jeweiligen Standort zuordnen zu können. (Grimm Aerosol Technik: 14ff)

6.1.3 Stickoxide NO_x / NO / NO_2

Zur Messung der NO_x bzw. NO_2 -Konzentration wurde das Modell 405 nm der Firma Envilyse verwendet. Das Messprinzip basiert nicht auf dem nach der 39. Bundesimmissionschutzverordnung (BImSchV) vorgesehenen Referenzverfahren der Chemilumineszenz, sondern nutzt die Lichtabsorption für eine direkte NO_2 -Messung (s. Anhang 3). Wohingegen das Chemilumineszenz-Verfahren die bei einer Reaktion auftretende elektro-magnetische Strahlung nutzt, um auf die

Konzentration des Stickoxids im eingesogenen Luftstrom zu schließen. Das Gerät Modell 405 nm misst hingegen das NO₂ durch Absorption bei einer Wellenlänge von 405 nm. Hierzu wird das Probegas über eine interne Pumpe in das Instrument gepumpt. Ein sogenanntes NO₂-Scrubber-Ventil ermöglicht die Messung der Lichtintensität des Probegas mit und ohne NO₂, indem es das Probegas abwechselnd durch eine Umleitung oder einen NO₂-Scrubber pumpt, um das NO₂ in der Probe zu entfernen. Auf Basis des Beer-Lambertsche Gesetzes wird daraufhin die Konzentration an NO₂ durch den Vergleich beider Proben gemessen.

Nach einem Bericht zur Eignungsprüfung des TÜV Rheinland ist das Modell 405 nm gemäß der DIN EN 14211 als Alternative zum Chemilumineszenz Verfahren geeignet (TÜV Rheinland 2019: 15). Die Mittelungszeit für die Datenspeicherung ist variabel einstellbar (5 s, 1 min, 5 min, 1 h).

6.1.4 Erfassung verkehrlicher und meteorologischer Einflussfaktoren

Neben der Erfassung der genannten Luftschadstoffe kamen weitere Geräte zur Aufnahme relevanter Einflussfaktoren zum Einsatz. Zur Erfassung der Verkehrsstärke und Verkehrszusammensetzung wurde eine Actioncam genutzt, deren Aufzeichnungen im Anschluss an die Messungen ausgewertet wurden. Meteorologische Einflussfaktoren wie Temperatur und relative Luftfeuchte wurden durch die Messgeräte der Luftschadstoffmessungen aufgezeichnet. Zur Erfassung der Windgeschwindigkeit und Windrichtung wurde ein zusätzlicher Windgeschwindigkeit- und Windrichtungsensor (WGWR 55) der Firma Reinhardt System- und Messelectronic GmbH genutzt.

Tab. 16: Erhobene Kenngrößen mit zugehörigen Messverfahren, Einheiten und zeitlicher Auflösung
Quelle: Eigene Darstellung

Gruppe	Erfasste Kenngröße	Messverfahren	Einheit	Zeitliche Auflösung
Schadstoff- kenngrößen	UFP	optisch Diffusionspartikel- zähler	LDSA $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$, Anzahl $\#/\text{cm}^3$, Masse $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Größe nm	1 s
	PM _{2,5} / PM ₁₀	optisch Lichtstreuung an Einzelpartikeln mittels Laserdiode	Anzahl $\#/\text{cm}^3$, Masse $\mu\text{g}/\text{m}^3$	6 s
	NO _x / NO / NO ₂	optisch Lichtabsorption	ppb	5 s
Meteorologische Kenngrößen	Temperatur	Lokale Sensoren	[°C]	1 s
	Rel. Luftfeuchte		[%]	1 s
	Windgeschwindigkeit		[m/s]	10 s
	Windrichtung		[°]	10 s
Verkehrs- kenngrößen	Verkehrsstärke	Beobachtung durch Videoanalyse	[Fz/Zeit]	1 min
	Verkehrszusammensetzung		[Motorrad, Pkw, Lkw, Lz]	1 min
	Verkehrsfluss			1 min

6.2 Methodisches Vorgehen in Deutschland

Zur Untersuchung ausgewählter Wirkungszusammenhänge zwischen Stadt, Verkehr und Gesundheit wurden für die Untersuchungen in Deutschland zwei methodische Ansätze gewählt (mobile und stationäre Messungen) und empirische Untersuchungen in Frankfurt am Main durchgeführt. Nach der Datenerhebung folgte die Datenaufbereitung zur Aggregation der Daten, der Überprüfung auf Ausreißer und die Auswertung der Videoaufzeichnungen zur Ermittlung der Verkehrsstärke und der Identifikation von städtebaulichen sowie verkehrlichen Einflussfaktoren. Anschließend wurden im Rahmen der Datenanalyse statistische Kennwerte ermittelt und Detailuntersuchungen im Radverkehr sowie im ÖPNV durchgeführt. Abschließend wurden die Messergebnisse interpretiert. Abbildung 34 zeigt die Arbeitsschritte, die im Rahmen der Felduntersuchung durchgeführt wurden.

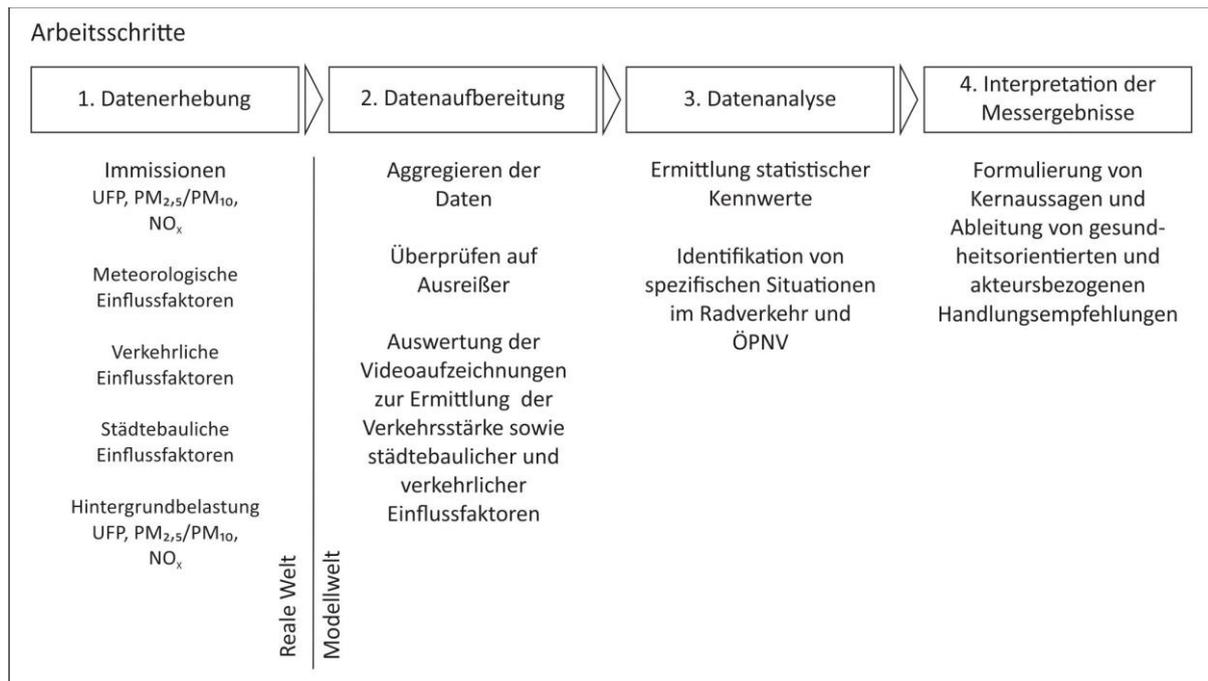


Abb. 32: Arbeitsschritte im Rahmen der Felduntersuchung
Quelle: Eigene Darstellung

6.2.1 Mobile Messungen

Ziel der mobilen Messungen war es, Zusammenhänge aus dem Bereich der Verkehrsnachfrage (Verkehrsmittel-, Routen- und Zeitwahl) und der Exposition von Verkehrsteilnehmer*innen gegenüber Luftschadstoffen detailliert zu untersuchen. Hierfür wurden Luftschadstoffmessungen bei der Nutzung verschiedener Verkehrsmittel (Pkw_{Neu}, Pkw_{Alt}, Fahrrad, S-Bahn, Bus, U-Bahn und Tram) auf zuvor festgelegten Routen durchgeführt. Die Routen verliefen vom im Westen von Frankfurt gelegenen Frankfurt-Rödelheim nach Frankfurt-Ostend (s. Abb. 35). Für die Messungen bei der Nutzung des MIV und des Fahrrads wurde der nordwestliche Ortseingang über die Lorscher Straße gewählt. Für die Messungen bei der Nutzung des ÖPNV diente die Haltestelle „Frankfurt-Rödelheim“ als Ausgangspunkt. Die Messungen mit allen drei Verkehrsmittel endeten in Höhe bzw. an der Haltestelle „Frankfurt-Ostendstraße“. Aufgrund der Handhabbarkeit kamen bei den mobilen Messungen nur die tragbaren Geräte zur Bestimmung der Luftschadstoffbelastung durch UFP, die Partikelfractionen PM_{2,5} und PM₁₀ sowie die Actioncam zur Dokumentation der Verkehrssituation und der städtebaulichen Gegebenheiten zum Einsatz. Neben der Erfassung der Partikelanzahl (Partikel/m³) und der Partikelmasse (µg/m³) der Feinstaubpartikel verschiedener Größenfraktionen wurde zur Analyse der Exposition der Verkehrsteilnehmer*in in Abhängigkeit der Verkehrsmittel-,

Routen- und Zeitwahl die Dosis der eingeatmeten Luftschadstoffe unter Zuhilfenahme des spezifischen Atemvolumens ermittelt.

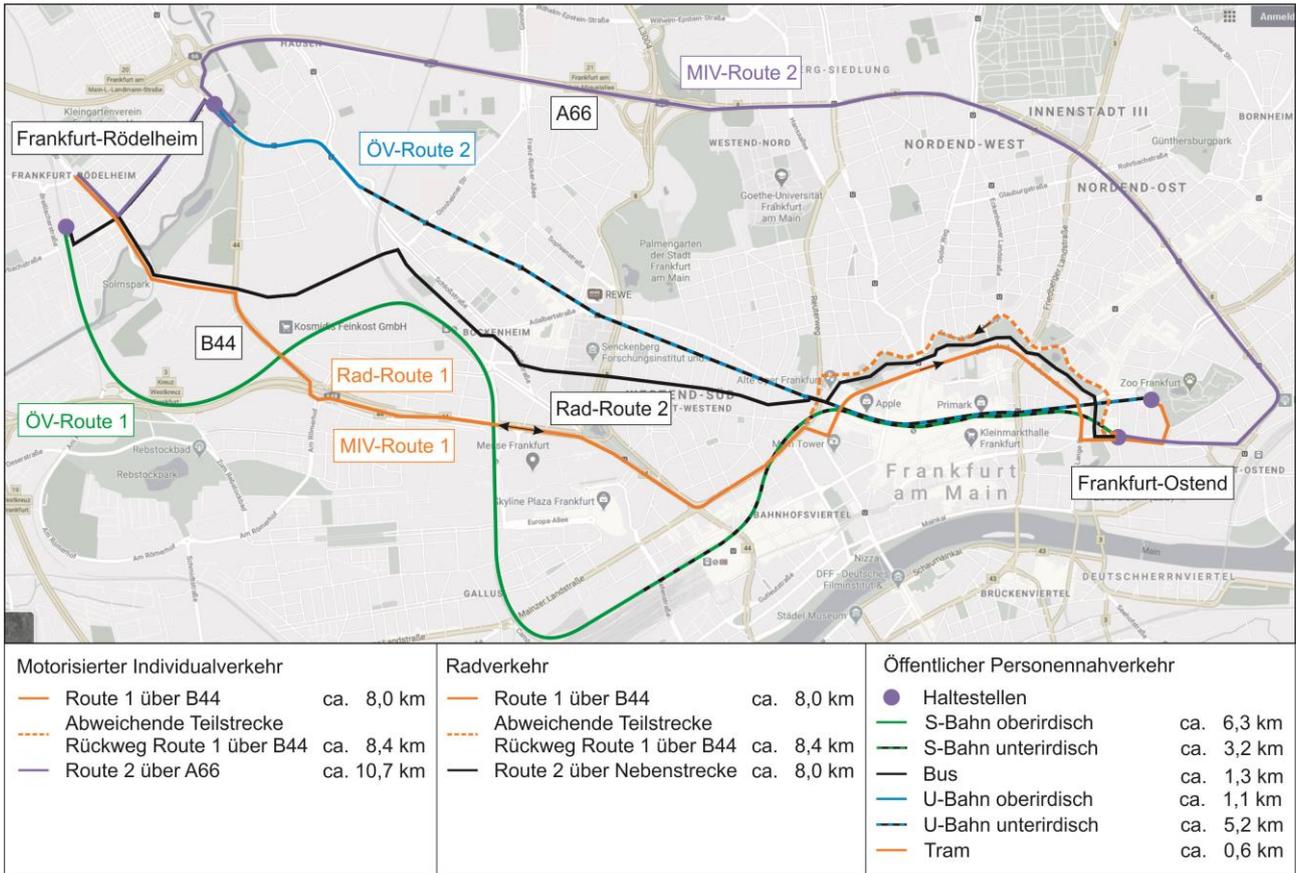


Abb. 33: Übersicht der Routen der mobilen Messungen in Frankfurt am Main
Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von Google Maps

Messungen MIV

Zur Analyse des spezifischen Einflusses einzelner Fahrzeuge auf die Luftschadstoffbelastung im Inneren des Pkw wurden die Messungen mit zwei verschiedenen Pkw durchgeführt. Bei dem einen Fahrzeug handelte es sich um einen Pkw neueren Baujahrs (Baujahr: 2019, Modell: Opel Adam, Kraftstoffart: Benzin). Im Folgenden werden die Messungen mit diesem Pkw als Pkw_{Neu} bezeichnet. Zum Vergleich der Luftschadstoffbelastung im Fahrzeuginnenraum wurden weitere Messungen mit einem weiteren Fahrzeug älteren Modells (Baujahr: 2007, Modell: Skoda Octavia, Kraftstoffart: Diesel) durchgeführt. Diese Messungen werden im Folgenden als Pkw_{Alt} bezeichnet. Bei beiden Fahrzeugen waren während der Fahrten die Fenster geschlossen und die Lüftung auf niedriger Stufe eingeschaltet. Das Messgerät zur Erfassung der UFP wurde an der Kopfstütze des Beifahrersitzes montiert. Das Gerät zur Messung von PM_{2,5} und PM₁₀ wurde etwas unterhalb des Geräts zur Erfassung der UFP montiert, sodass sich beide Lufteinlässe der Geräte in etwa auf Atemhöhe der Fahrzeuginsassen befanden.

Für die Messungen wurden zwei verschiedene Routen gewählt, um den Einfluss der Routenwahl auf die Exposition der Fahrzeuginsass*innen zu untersuchen. Die gewählten Routen sind in Abbildung 33 dargestellt. MIV-Route 1 (im Folgenden B44 genannt) hat eine Streckenlänge von ca. 8,0 km und führt vom außerhalb des Frankfurter Stadtzentrums liegenden Frankfurt-Rödelheim über die B44, die Mainzer Landstraße und anschließend direkt am nördlichen Rand der Frankfurter Innenstadt (südliche der Bockenheimer, Eschenheimer und Friedberger Anlage) entlang zur ÖPNV Haltestelle „Frankfurt-Ostendstraße“. Aufgrund des bestehenden Einbahnstraßensystems führt die MIV-Route

auf dem Rückweg nördlich der Bockenheimer, Eschenheimer und Friedberger Anlage zurück zur Mainzer Landstraße und dann über die B44 nach Frankfurt-Rödelheim. MIV-Route 2 (im Folgenden A66 genannt, ca. 10,7 km lang) führt durch Frankfurt-Rödelheim und anschließend über einen angrenzend nicht baulich genutzten Autobahnabschnitt der A66, um über die Stadtteile Nordend-West und Nordend-Ost wieder durch ein städtisches Gebiet zur Haltestelle „Frankfurt-Ostendstraße“ zu gelangen.

Messungen Radverkehr

Das Gerät zur Messung der UFP wurde am Rucksack der Messperson befestigt, sodass sich der Lufteinlass ungefähr in Atemhöhe der Radfahrer*in befand. Zur Erfassung der gröberen Partikelfraktionen wurde das Messgerät am Lenker des Fahrrads befestigt. Der Lufteinlass befand sich somit einige Zentimeter unterhalb der Atemhöhe der Radfahrer*in. Dieser geringe Unterschied wurde für die weitere Auswertung der Daten und deren Aussagekraft als nicht relevant eingestuft.

Bei den Messungen im Radverkehr wurden ebenfalls zwei verschiedene Routen ausgewählt. Rad-Route 1 entspricht der MIV-Route 1. Rad-Route 2 (ca. 8,0 km Länge) startet am selben Punkt wie Rad-Route 1. Der Verlauf geht dann entlang weniger vom MIV belasteter Strecken in Bockenheim, Westend, vorbei an der Alten Oper und im weiteren Streckenverlauf durch die Parkanlagen der Bockenheimer, Eschenheimer und Friedberger Anlage, um am Ende am selben Punkt wie Rad-Route 1 zu enden. Durch die beiden Streckenverläufe entlang einer MIV-Hauptstrecke (Rad-Route 1) und einer MIV-Nebenstrecke (Rad-Route 2) kann die Exposition von Radfahrer*innen gegenüber Luftschadstoffen in Abhängigkeit der Routenwahl analysiert werden. Durch den identischen Streckenverlauf der MIV-Route 1 sowie der Rad-Route 1 können somit Aussagen über die Luftschadstoffbelastungen in Abhängigkeit der Verkehrsmittelwahl getroffen werden.

Messungen ÖPNV

Wie bei den Messungen im Radverkehr wurde das Messgerät zur Erfassung der UFP am Rucksack der Messperson befestigt. Das Gerät zur Erfassung der gröberen Partikel wurde mithilfe eines Gurts um den Oberkörper getragen, sodass sich der Lufteinlass etwas unterhalb der Atemhöhe befand. Wie bei den Messungen im Radverkehr wurden diese geringen Unterschiede bei der Höhe des Lufteinlasses als nicht relevant eingeschätzt.

Die Messungen im ÖPNV führen alle von der Haltestelle „Frankfurt-Rödelheim“ zur Haltestelle „Frankfurt-Ostendstraße“. Bei ÖV-Route 1 wird die ca. 9,5 km lange Strecke mit der S-Bahn ohne Umstieg zurückgelegt. Mit ca. 6,3 km Länge verläuft der größere Teil der Strecke, von „Frankfurt-Rödelheim“ bis kurz vor die Haltestelle „Frankfurt (Main) Hauptbahnhof“, oberirdisch auf einer vom MIV unabhängig geführten Trasse. Der weitere, ca. 3,2 km lange Streckenabschnitt verläuft unterirdisch. Die ÖV-Route 2 (ca. 8,2 km Länge) wird mit Bus, U-Bahn und Tram zurückgelegt, wodurch auf dieser Strecke zwei Umstiege notwendig sind. Die Streckenabschnitte mit dem Bus, der Tram sowie ein kleiner Teil des U-Bahn-Abschnittes werden oberirdisch zurückgelegt (ca. 3,0 km Länge der Gesamtstrecke). Der Großteil des U-Bahn-Teilschnitts (ca. 5,2 km Länge) verläuft unterirdisch.

Die Haltestelle zu Beginn der Messungen befindet sich in Frankfurt-Rödelheim an einem Busbahnhof in einer Nebenstraße in unmittelbarer Nähe zum S-Bahnhof „Frankfurt-Rödelheim“. Für die Fahrtrichtung „Frankfurt-Rödelheim“ nach „Frankfurt-Ostendstraße“ erfolgt der Umstieg vom Bus auf die U-Bahn oberirdisch, zwischen den jeweils zweiseitigen Richtungsfahrbahnen einer Hauptverkehrsstraße. Für den Umstieg von der U-Bahn auf die Tram wird eine oberirdisch liegende Haltestelle genutzt, die sich an einer gering durch den MIV belasteten Nebenstraße befindet. In der Gegenrichtung, von „Frankfurt-Ostendstraße“ nach „Frankfurt-Rödelheim“ beginnt die Messung an der Haltestelle „Ostendstraße“, die in Mittellage an einer Hauptverkehrsstraße liegt. Der Wartevorgang beim Umstieg von der Tram in die U-Bahn erfolgt an einer unterirdischen Haltestelle.

Beim Umstieg von der U-Bahn in den Bus erfolgt der Wartevorgang an einer Bushaltestelle, die sich in einer Nebenstraße in unmittelbarer Nähe zur Hauptverkehrsstraße befindet.

Berücksichtigung des Atemvolumen

Das Atemvolumen ist die Menge an Luft, die bei der Ein- und Ausatmung in die Lunge hinein- bzw. heraus transportiert wird. (Akademie für Sport und Gesundheit 2021). Im Allgemeinen ist das Atemvolumen mit dem metabolischen Sauerstoffbedarf des Körpers verbunden, der hauptsächlich von individuellen Merkmalen (z.B. Alter, Geschlecht, Gesundheitszustand), Art der Aktivitäten (z.B. Arbeiten, Sitzen, Radfahren) und Umweltbedingungen (z.B. Temperatur) abhängig ist. Zur Schätzung des Atemminutenvolumens werden fünf gängige Methoden verwendet:

1. Methoden, die (körperliche) Aktivitätstypen verwenden,
2. Methoden basierend auf Energieverbrauch, METs (metabolische Äquivalente der Aufgabe) und Sauerstoffverbrauch,
3. Methoden basierend auf Herzfrequenz oder
4. Atemvolumen und
5. Methoden, die Herz- und Atemvolumen kombinieren (Dons et al. 2017).

Unterschiede des Atemvolumens in Abhängigkeit der Aktivitäten während des Pendelns beeinflussen die Dosis der eingeatmeten Luftschadstoffe der Verkehrsteilnehmer*in und wirken sich unterschiedlich auf ihre Gesundheit aus. In mehreren Studien wurden die Atemvolumen verschiedener Aktivitäten gemessen, einschließlich des Pendelns mit verschiedenen Verkehrsmitteln. Die Ergebnisse der Messung des Atemvolumens variieren jedoch in diesen Studien aufgrund unterschiedlicher Messdesigns, verwendeter Geräte, persönlicher Merkmale und Umgebungsbedingungen. Für die weiteren Berechnungen wurde auf die Annahmen von Huong Le Thi (Le Thi 2021: 138ff) zurückgegriffen. Sie hat mehrere Studien überprüft, die das Atemminutenvolumen beim Pendeln mit verschiedenen Verkehrsmitteln gemessen haben. Auf der Basis der Ergebnisse dieser Studien hat sie anschließend das durchschnittliche Atemvolumen berechnet und mit diesen Werten die eingeatmeten Luftschadstoffdosen für verschiedene Pendlergruppen abgeschätzt. Tabelle 17 zeigt die für diese Studie verwendeten, geschätzten durchschnittlichen Atemvolumen.

Tab. 17: Atemvolumen von Pendler*innen

Quelle: Le Thi 2021: 139 nach Int Panis et al. 2010; Zuurbier et al. 2009, Nyhan et al. 2013; de Nazelle et al. 2012; Huang et al. 2012; O'Donoghue et al. 2007; Ramos et al. 2016; Beals et al. 1996; Shimer et al. 1995; Alexander Y. Bigazzi und Miguel A. Figliozzi 2014

Aktivität	Atemvolumen [l/min]	Bemerkungen
Pkw fahren	12,5	
Bus fahren (ohne Wartevorgänge, reiner Fahrtvorgang)	13,7	
Fahrrad fahren	37,3	
Zu Fuß gehen	25,6	
Warten an der Bushaltestelle	9,0	Durchschnittswert zwischen Sitzen und Stehen

Schätzungen zur inhalierten Dosis von Luftschadstoffen

Die inhalierten Luftschadstoffdosen wurden in Abhängigkeit des genutzten Verkehrsmittels berechnet, indem die durchschnittliche Konzentration der Luftschadstoffe während der Fahrt mit der Fahrtdauer und dem Atemvolumen multipliziert wurde. Diese Methode wurde in vielen Studien verwendet, um die inhalierten Dosen von Luftschadstoffen (wie UFP, PM_{2,5} und PM₁₀) für verschiedene Verkehrsmittel zu vergleichen (Apparicio et al. 2018; de Nazelle et al. 2012; Ham et al. 2017; Huang et al. 2012; Okokon et al. 2017b; Zuurbier et al. 2010). Die folgenden Formeln wurden verwendet, um die durchschnittliche Partikelanzahl- und Massenkonzentration an UPF und größeren Partikeln zu berechnen, die Pendler*innen während ihrer Fahrten inhalieren. Die erste Formel (Gleichung 1) wurde verwendet, um die inhalierte Dosis von Pendler*innen zu berechnen, die mit Pkw, ÖPNV (im Fahrzeug), Motorrad (nur für Vietnam), Fahrrad und zu Fuß unterwegs sind. Nutzer*innen des ÖPNV müssen jedoch in der Regel von ihrem Ausgangspunkt zu einer Haltestelle und/oder von der Haltestelle zu ihren Zielen laufen und an den Haltestellen warten. Daher sind auch Nutzer*innen des ÖPNV beim Gehen und Warten Luftschadstoffbelastungen ausgesetzt. Mit der zweiten Formel (Gleichung 2) wurde die Inhalationsdosis der Nutzer*innen des ÖPNV pro Fahrt berechnet. Die durchschnittlichen Partikelanzahl- sowie die Massenkonzentration der betrachteten Luftschadstoffe wurden aus den Messungen gewonnen. Die Werte des Atemminutenvolumens, auch Inhalationsrate (inhalierte Luftmenge pro Minute) genannt, wurden anhand der Literatur abgeschätzt.

$$\text{Inhalierte Dosis}_{\text{Fahrt}} = LSB_{\phi, i} * AV_i * Z_i \quad (\text{Gleichung 1})$$

$$\text{Inhalierte Dosis}_{\text{gesamte Busfahrt}} = LSB_{\phi, i} * AV_i * Z_i + LSB_{\phi, \text{Warten}} * AV_{\text{Warten}} * Z_{\text{Warten}} + LSB_{\phi, \text{Fuß}} * Z_{\text{Fuß}} \quad (\text{Gleichung 2})$$

Mit:	LSB _{ϕ, i}	ϕ UFP, PM _{2,5} oder PM ₁₀ Konzentration des Verkehrsmittels i (#/cm ³ oder µg/m ³)
	LSB _{ϕ, Warten}	ϕ UFP, PM _{2,5} oder PM ₁₀ Konzentration während Wartevorgang (#/cm ³ oder µg/m ³)
	LSB _{ϕ, Fuß}	ϕ UFP, PM _{2,5} oder PM ₁₀ Konzentration während Fußwegen (#/cm ³ oder µg/m ³)
	AV _i	Atemvolumen in Abhängigkeit des Verkehrsmittels i (l/min)
	AV _{Warten}	Atemvolumen während Wartevorgang (l/min)
	AV _{Fuß}	Atemvolumen während Fußweg (l/min)
	Z _i	ϕ Fahrzeit in Abhängigkeit des Verkehrsmittels i (min)
	Z _{Warten}	ϕ Wartezeit von Fahrgästen an Bushaltestellen (min)
	Z _{Fuß}	ϕ Gehzeit von Busfahrgästen, inklusive Gehzeit vom Startpunkt zur Bushaltestelle und von der Bushaltestelle zum Endpunkt (min)

6.2.2 Stationäre Messungen

Auswahl der Messquerschnitte

Ziel der stationären Messungen war es, den Zusammenhang zwischen ausgewählten städtebaulichen sowie verkehrlichen und meteorologischen Einflussfaktoren mit der Luftschadstoffbelastung zu untersuchen. Für die Auswahl der Straßenquerschnitte wurden in Anlehnung an die in Kapitel 2.6 beschriebenen Einflussfaktoren auf die Luftschadstoffbelastung die im morphologischen Kasten dargestellten Kriterien verwendet (s. Tab. 18). Als Grundlage für die Unterteilung einzelner Kriterien diente die Richtlinie für die Anlage von Stadtstraßen (FGSV 2008) sowie die Erkenntnisse aus Kapitel 2 bezüglich der städtebaulichen Einflussfaktoren auf die Luftschadstoffbelastung.

Tab. 18: Morphologischer Kasten – Kriterien Straßentypen
Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von FGSV 2008

Verkehrswegekategorie	angebaute Hauptverkehrsstraßen					Erschließungsstraßen			
	Ortsdurchfahrten, innergemeindliche Hauptverkehrsstraßen					Quartiersstraße	Sammelstraßen		Anliegerstraßen
zul. Geschwindigkeit	Schrittgeschwindigkeit 30 km/h					50 km/h			
Einrichtungsverkehr	Ja					Nein			
Anzahl Fahrbahnen	1					2			
Anzahl Fahrstreifen pro Richtung	1					2			
Parken	kein Parken		Parken auf dem Gehweg			separater Parkstreifen			
ÖPNV	kein ÖPNV			Linienbusverkehr		Straßenbahnverkehr			
Randbebauung	einseitig					beidseitig			
	offene Bauweise					geschlossene Bauweise			
	1 und 2 geschossig		3 und 4 geschossig			5 geschossig und höher			
Straßenraumbreiten	≥ 12 m	≥ 17 m	≥ 20,5 m	≥ 21,2 m	≥ 23,0 m	≥ 26,2 m	≥ 28,2 m	≥ 30,2 m	
Verhältnis von Schluchthöhe und Schluchtbreite (Bebauungshöhe/Straßenraumbreite)	0,7			1,0			1,3		
Begrünung	keine		bodennahe		Bäume einseitig	Bäume beidseitig		fahrbahnübergreifende	
Ausrichtung der Straßenzüge	parallel zur Hauptwindrichtung					senkrecht zur Hauptwindrichtung			
Straßenlängsneigung	-6%	-4%	-2%	0%	+2%	+4%	+6%		
Zustand der Fahrbahnoberfläche	gut			mittel			schlecht		
Material der Fahrbahnoberfläche	Asphalt					Beton		Pflaster	

Aufgrund der komplexen Interdependenzen der verschiedenen Einflussfaktoren wurde der Fokus bei der Analyse der städtebaulichen Einflussfaktoren auf den Einfluss der Randbebauung gelegt, die in eine offenen und geschlossene Bauweise unterschieden werden kann. Zusätzlich wurde die Straßenraumbreite als Auswahlkriterium definiert. Hier wurde zwischen breitem und schmalen Straßenraum unterschieden. Zur Analyse der verkehrlichen Einflussfaktoren wurden die Verkehrsstärke und -zusammensetzung mittels Videokamera aufgenommen und im Anschluss an die Messungen ausgewertet. Der Verkehrsfluss, als weitere verkehrliche Einflussgröße, wurde bei der Analyse weitestgehend ausgeschlossen, da bei der Auswahl der Straßenquerschnitte darauf geachtet wurde die Messstellen so auszuwählen, das der Verkehrsfluss weitestgehend ungehindert und somit frei war. Falls der Verkehrsfluss dennoch gestört war, wurden diese Messzeiträume bei der Analyse ausgeschlossen (s. Kap. 6.3.2). Für die Messungen wurden zwei Straßenquerschnitte in Frankfurt-Rödelheim (Q1 und Q2) und zwei weitere Querschnitte im Stadtteil Westend (Q3 und Q4) ausgewählt (s. Abb. 34). In Anhang 4 können die Kriterien zur Auswahl der untersuchten Straßenquerschnitte entnommen werden.

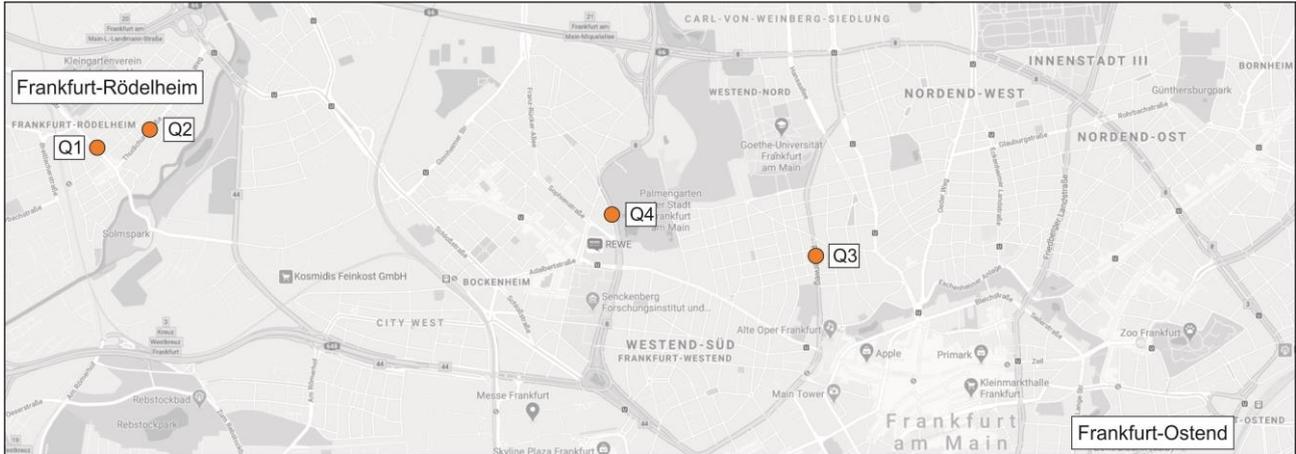


Abb. 34: Lage der Messstellen bei stationären Messungen
 Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von Google Maps

Die Messquerschnitte Q1 und Q2 wurden aufgrund ihrer Vergleichbarkeit ausgewählt. Bei beiden Querschnitten handelt es sich um Straßenräume mit einer geringen Breite und einer hohen, geschlossenen Randbebauung. Allerdings unterscheiden sich beide Straßen in der Windausrichtung, da die Lorscher Straße (Q1) in Richtung Südost-Nordwest verläuft und die Thudichumstraße (Q2) in Richtung Nordost-Südwest. Zur Veranschaulichung der Querschnitte sind diese in Abbildung 35 dargestellt.



Abb. 35: Messstellen Q1: Lorscher Straße (links) und Q2: Thudichumstraße (rechts)
 Quelle: Eigene Aufnahmen

Die Querschnitte Q3 und Q4 wurden wegen ihrer ähnlichen Straßenraumbreite mit jeweils zwei Fahrspuren je Fahrtrichtung und einer unterschiedlichen Randbebauung als Messpunkte gewählt. Q3 ist von der Randbebauung vergleichbar mit Q1 und Q2 und weist eine hohe, geschlossene Randbebauung auf. Die Randbebauung von Q4 wird durch eine offene Bebauung auf der westlichen Seite und dem Palmgarten, einem großen, öffentlichen Park, auf der östlichen Seite charakterisiert (s. Abb. 36).



Abb. 36: Messstellen Q3: Reuterweg (links) und Q4: Miquelallee (rechts)
Quelle: Eigene Aufnahmen

Auswertung der Verkehrsdaten

Zur Berücksichtigung der Auswirkungen der Verkehrsbelastung auf die gemessenen Schadstoffimmissionen wurde im Rahmen der unveröffentlichten Masterarbeit von Fabian Schecker zum Thema „Analyse der Feinstaubexposition von Fußgängern in Abhängigkeit verschiedener Straßenraumtypen“, die am Institut für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik verfasst wurde, ein Feinstaub-Emissionsfaktor ermittelt. Ziel war es mithilfe dieses Faktors die durchschnittlichen Emissionen der einzelnen Fahrzeugarten bei der Auswertung zu berücksichtigen. Im Anhang 5 ist das Vorgehen zur Berechnung der einzelnen Emissions-Faktoren detailliert beschrieben. Für die Auswertung wurden die in Tabelle 19 dargestellten Faktoren berücksichtigt.

Tab. 19: Emission-Faktoren nach Fahrzeugart
Quelle: Schecker 2020: 62

Fahrzeugart	Emissions-Faktor
Pkw	1,0
Lkw	10,0
Bus	5,0
Motorrad	1,0
Rad	0,0

Hintergrundbelastung

Zur Analyse der Hintergrundbelastung wurde auf die Messdaten im städtischen Hintergrund vom Hessischen Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) zurückgegriffen. Die Luftmessstation, deren Daten für die Auswertung der Hintergrundbelastung verwendet wurden, befindet sich in Frankfurt in der Nähe der Straße „Am Niedwald“ und ist ca. 1,8 km Luftlinie südwestlich vom Start- und Endpunkt der Pkw- und Fahrradmessungen in Frankfurt-Rödelheim entfernt. Über diese Station kann die Hintergrundbelastung von UFP, PM_{2,5}, PM₁₀ und NO₂ berücksichtigt werden.

6.3 Methodisches Vorgehen in Vietnam

Aufgrund der unbeständigen Wetterverhältnisse (sehr windig, teilweise regnerisch) während der Feldarbeit vom 21. bis 25. Oktober 2019 in Ho Chi Minh City konnten durch die stationären Messungen zur Untersuchung des Einflusses städtebaulicher Faktoren auf die Luftschadstoffbelastung keine verwendbaren Daten gewonnen werden. Der Fokus der Analyse liegt somit auf den mobilen Messungen zur Untersuchung der Luftschadstoffbelastung durch UFP, die zwischen dem 4. und 19. November 2019 gemessen wurden. Das methodische Vorgehen in Vietnam ähnelt dem Vorgehen in Deutschland und es wurden die Arbeitsschritte analog zu den in Abbildung 32 aus Kapitel 6.2 aufgezeigten Punkten bearbeitet.

6.3.1 Mobile Messungen

Wie bei den Messungen in Frankfurt am Main wurde durch die mobilen Messungen der Einfluss verschiedene verkehrlicher Faktoren auf die Exposition der Verkehrsteilnehmer*innen gegenüber Luftschadstoffen untersucht. Die Messungen, die sich in Vietnam auf die Erfassung UFP beschränken, wurden mit fünf Verkehrsmitteln (Pkw, Bus, Motorrad, Fahrrad und zu Fuß) auf zwei ausgewählten Routen in Ho Chi Minh City durchgeführt (s. Abb. 39). Bei beiden Routen handelt es sich um typische Pendelrouten von Verkehrsteilnehmer*innen in HCMC. Route 1 (ca. 5,4 km lang) ist eine der Hauptstrecken, die District 2, 9 und Thu Duc mit dem Stadtzentrum verbindet. Bei Route 2 (ebenfalls ca. 5,4 km lang) handelt es sich um eine Hauptverkehrsstraße vom Stadtzentrum zu District 2, 9, Thu Duc, der Provinz Binh Duong und der Provinz Dong Nai. Beide Routen haben nahezu denselben Start- und Endpunkt. Route 1 startet an der Bushaltestelle „HUTECH“ vor der Ho Chi Minh University of Technology (HUTECH) und endet an der Bushaltestelle „Ham Nghi“. Route 2 startet an der Bushaltestelle „Hang Xanh“ (ungefähr 500 m von der Bushaltestelle „HUTECH“ entfernt) und endet ebenfalls an der Bushaltestelle „Ham Nghi“. Der Busbahnhof „Ham Nghi“ ist mit mehr als 30 Buslinien der größte Busbahnhof im Stadtzentrum. Entlang der ausgewählten Routen sind viele Universitäten, Schulen und Unternehmen angesiedelt. Daher ist die Verkehrsbelastung auf beiden Strecken relativ hoch, wodurch es vor allem während der Spitzenstunden zu Behinderungen im Verkehrsfluss kommt.

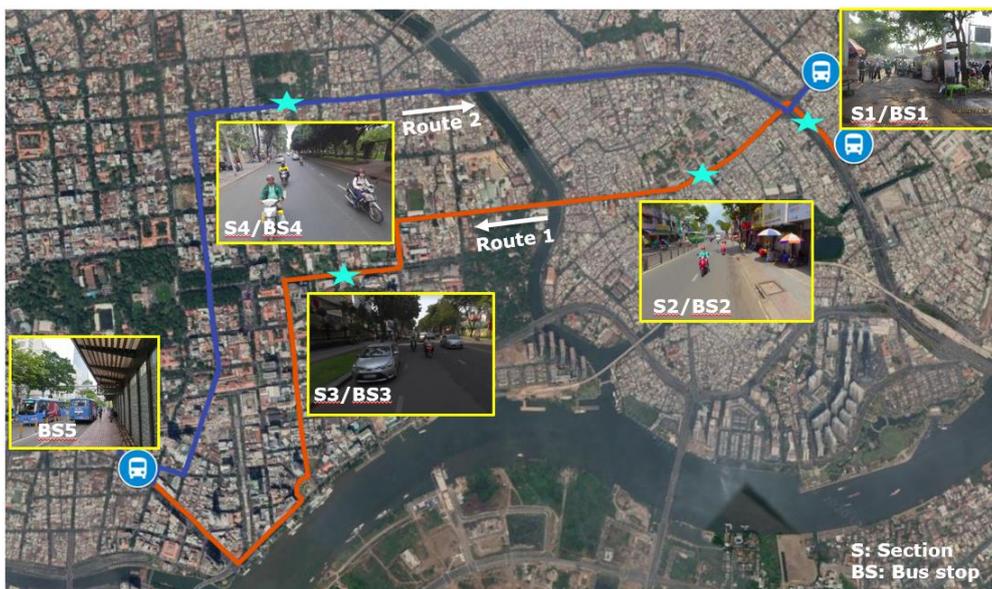


Abb. 37: Untersuchungsgebiet mobile Messungen Ho Chi Minh City
Quelle: Eigene Darstellung auf Kartengrundlage Google Maps

Messungen Pkw

Für die Messungen zur Erfassung der Luftschadstoffbelastungen im Inneren von Pkw wurden verschiedene Taxis über den Carsharing-Dienst (Grab) gemietet. Das Messgerät zur Messung der UFP wurde auf dem Beifahrersitz platziert. Alle Fahrzeuge waren maximal drei Jahre alt und wurden mit

Benzin betrieben. Während der Fahrt waren die Fenster stets geschlossen und die Klimaanlage in Betrieb.

Messungen Motorrad, Fahrrad und Bus

Bei den Messungen auf Motorrädern, Fahrrädern und im Bus wurde das Messgerät für UFP wie bei den Messungen in Deutschland am Rucksack der Messperson befestigt. Somit hat sich der Luftpfeinlass ungefähr auf Atemhöhe der Verkehrsteilnehmer*in befunden. Im Bus wurde je nach Verfügbarkeit ein beliebiger Sitz- oder Stehplatz gewählt. Alle Busse waren relativ neuen Baujahrs und wurden mit Erdgas (CNG) betrieben. Wie auch im MIV waren die Fenster geschlossen und die Klimaanlage eingeschaltet.

Neben den mobilen Messungen wurden des Weiteren die Belastungen an fünf Bushaltestellen entlang der zwei untersuchten Routen erfasst. Ziel war es, die Luftschadstoffbelastung der Fahrgäste während der Wartevorgänge an den Haltestellen zu messen. Die Lage der Haltestellen ist ebenfalls in Abbildung 37 dargestellt.

Messungen zu Fuß

Da die gesamte Strecke mit ca. 5,4 km für Messungen zu Fuß zu lang war, wurden vier Straßenabschnitte entlang der beiden Routen ausgewählt, um die Belastung durch Luftverschmutzung für Fußgänger*innen zu analysieren. Die Abschnitte für die Messungen zu Fuß betragen etwa 500 bis 1.000 m (ca. 10 bis 15 min Gehzeit). Abschnitt 1 befand sich vor der HUTECH Universität. In diesem Abschnitt gab es eine hohe Dichte an Garküchen, an denen Speisen vor Ort gekocht und verkauft wurden. Zum Betrieb der Kochstellen werden Gas und Kohle verwendet. Die Kochaktivitäten fanden auf diesem Straßenabschnitt den ganzen Tag während der Messungen statt. Auch entlang des Abschnitts 2 sind einige Garküchen vorzufinden, jedoch in geringerer Anzahl als in Abschnitt 1. Zudem waren diese Garküchen nur morgens geöffnet. Durch den schmaleren Gehweg in Abschnitt 2 bewegen sich Fußgänger*innen näher am Verkehr, wodurch deren Exposition gegenüber Luftschadstoffen beeinflusst werden kann. Abschnitt 3 befindet sich entlang der Straße Le Duan, an der keine Garküchen vorhanden sind. Straße und Gehweg sind in diesem Bereich durch einen kleinen Grünstreifen getrennt. Dieser Abschnitt wies in den morgendlichen Spitzenstunden ein höheres Verkehrsaufkommen auf als während der Spitzenstunden am Nachmittag. Abschnitt 4 befand sich entlang der Dien Bien Phu Straße, auch hier gibt es keine Garküchen. Eine Besonderheit bei diesem Abschnitt ist ein Park, der sich entlang der einen Straßenseite befindet. Die Lage der vier beschriebenen Abschnitte ist in Abbildung 37 markiert (Sterne Türkis). Wie bei den Messungen auf dem Motorrad, Fahrrad und im Bus wurde hier das Messgerät am Rucksack der Messperson befestigt.



Abb. 38: Ausgewählte Abschnitte für Fußgängermessungen
Quelle: Eigene Aufnahmen/Huong Le Thi

Berücksichtigung des Atemvolumens und Schätzungen zur inhalierten Dosis von Luftschadstoffen

Die Methodik zur Berücksichtigung des Atemvolumens in Abhängigkeit des genutzten Verkehrsmittels ist vergleichbar mit dem Vorgehen, das bei den Messungen in Deutschland angewendet wurde. Zusätzlich zu den in Frankfurt am Main untersuchten Verkehrsmitteln wurde in Ho Chi Minh City die Schadstoffbelastung während der Nutzung des Motorrads analysiert, sodass hierfür das Atemvolumen ermittelt werden musste. Es gibt keine Studien über das Atemvolumen während der Nutzung des Motorrads. Aufgrund der Wetterbedingungen in Ho Chi Minh City und dem häufigen Stop-and-Go-Verkehr wird für Fahrten mit dem Motorrad ein höheres Atemvolumen angenommen als für Fahrten mit dem Pkw. Für die weitere Analyse wurde daher angenommen, dass das Atemvolumen während Fahrten mit dem Motorrad dem Atemvolumen von Fahrten mit dem Bus entsprechen, daher wird es ebenfalls auf 13,7 l/min festgelegt. Die Berechnungen zur inhalierten Dosis an Luftschadstoffen in Abhängigkeit des genutzten Verkehrsmittels wurde analog zu den Berechnungen in Deutschland durchgeführt (s. Kap. 6.2.1).

Hintergrundbelastung

Die Hintergrundbelastung konnte bei der Auswertung der Messungen in Ho Chi Minh City nicht berücksichtigt werden, da keine Daten zur Luftschadstoffbelastung im städtischen Hintergrund zur Verfügung stehen.

6.4 Untersuchungen in Deutschland

6.4.1 Datenerhebung

Mobile Messungen

Die Felduntersuchungen im Rahmen der mobilen Messungen wurden an zehn Werktagen zwischen dem 24.08.2020 und 11.09.2020 durchgeführt. Um den Einfluss der Zeitwahl zu analysieren wurden die Abfahrtszeiten zwischen 07:00 Uhr und 18:30 Uhr gewählt. Insgesamt sind 124 Routen mit einer Gesamtlänge von ca. 1.125 km erfasst worden. Die nachfolgende Tabelle zeigt die Anzahl an Wegen je Route, die gefahrenen Kilometer sowie die Messzeiten, die je Verkehrsmittel erfasst wurden. Eine genaue Auflistung der durchgeführten Messungen kann Anhang 6 entnommen werden.

Tab. 20: Übersicht mobile Messungen

Quelle: Eigene Darstellung

Verkehrsmittel	Anzahl Weg je Verkehrsmittel	Verteilung	Anzahl Wege je Route	Gefahrene Kilometer	Wege je Messzeiten (VM*/NM**)	
Pkw	72	Pkw, Bj. 2019 (Opel Adam, Benzin)	B44	18	150,9 km	10/8
		= Pkw _{Neu}	A66	18	200,6 km	10/8
		Pkw, Bj. 2007 (Skoda Octavia, Diesel)	B44	18	146,8 km	10/8
		= Pkw _{Alt}	A66	18	197,4 km	10/8
Fahrrad	23		B44	11	89,52 km	5/6
			Nebenstrecke	12	96,32 km	6/6
ÖPNV	29		S-Bahn	16		5/6
			Bus/ U-Bahn/Tram	13		5/6

* VM: Messungen am Vormittag (7:00 Uhr bis 12:00 Uhr)

** NM: Messungen am Nachmittag (12:00 Uhr bis 18:30 Uhr)

Stationäre Messungen

Die stationären Messungen wurden an acht Werktagen im August und September 2020 durchgeführt. Die erste Messreihe, bestehend aus Messungen an vier Werktagen, fand täglich vom 04.08.2020 bis 07.08.2020 und somit in den hessischen Sommerferien, in denen mit einer geringeren Verkehrsbelastung zu rechnen war, statt. Die außerhalb der Schulferien liegende zweite Messreihe wurden täglich vom 15.09.2020 bis 18.09.2020 durchgeführt. Bei beiden Messreihen wurden die Daten jeweils in fünfständigen Zeiträumen zwischen 8:00 Uhr und 13:00 Uhr und von 14:00 Uhr bis 19:00 Uhr erfasst. Eine genaue Auflistung zu den durchgeführten stationären Messungen kann Anhang 7 entnommen werden. Für die Durchführung der Messungen wurden die zur Verfügung stehenden Messgeräte an einen Fahrradanhänger montiert, um somit einen sicheren Stand zu gewährleisten und die Geräte von einem Messquerschnitt zum anderen transportieren zu können. Abbildung 39 zeigt den Aufbau der Messgeräte während der stationären Messungen.



Abb. 39: Aufbau der Messgeräte während stationärer Messungen
Quelle: Eigene Aufnahmen

6.4.2 Datenaufbereitung

Nach der Erhebung der Daten wurden diese aufbereitet. Die **mobilen Messungen** wurden in ihrer hohen Auflösung von 1s-Messwerten bei der Erfassung der UFP und 6s-Messwerten bei der Erfassung von $PM_{2,5}$ und PM_{10} beibehalten und auf Plausibilität überprüft.

Bei den **stationären Messungen** musste die Vielzahl an Daten aus den verschiedenen Quellen zusammengeführt, zweckmäßig aggregiert und auf Plausibilität überprüft werden. Hierfür wurden die Messwerte der verschiedenen Messungen (UFP, $PM_{2,5}$ und PM_{10} , NO, NO_2 und meteorologische Daten) für die weitere Analyse zu 15-Minutenwerte aggregiert. Anschließend wurden die Zeitreihen auf Ausreißer überprüft und diese in Einzelfällen für die weitere Analyse aus dem Datensatz entfernt. Die zur Analyse der verkehrlichen Einflussfaktoren angefertigten Videoaufnahmen wurden als Verkehrsstärke in 1-Minutenintervallen ausgewertet und anschließend für die weitere Analyse in 15-Minutenintervalle zusammengefasst. Zudem war es durch die Aufnahme der Verkehrssituation möglich, Störungen wie beispielsweise das Anhalten eines Lieferfahrzeugs unmittelbar vor der Messstelle zu identifizieren und entsprechende Zeiträume bei der Auswertung auszuschließen.

6.4.3 Datenanalyse

Mobile Messungen

Aus den erfassten 1-Sekundenwerten der UFP sowie den 6-Sekundenwerten der groberen Partikel wurden mithilfe der Darstellung von Boxplots statistische Kennwerte ermittelt und interpretiert. Zur detaillierteren Untersuchung wurden die gewonnenen Daten auf den Einfluss verschiedener Bereiche der Verkehrsnachfrage untersucht. Hierzu zählen die Einflussfaktoren Verkehrsmittel-, Routen- und Zeitwahl. Die Ergebnisse werden in Kapitel 6.6 beschrieben.

Vergleich Verkehrsmittelwahl

Zur Untersuchung des Einflusses der Verkehrsmittelwahl auf die Luftschadstoffbelastung von Verkehrsteilnehmer*innen wurden die Messungen getrennt nach den Verkehrsmitteln (PkW_{Neu} , PkW_{Alt} , Fahrrad, Bus-U-Bahn-Tram und S-Bahn) analysiert. In diesem ersten Schritt der Auswertung

blieb die Routenwahl noch unberücksichtigt und es wurden in einem ersten Schritt die Mittelwerte aus allen gesammelten Daten je Verkehrsmittel gebildet.

Vergleich Routenwahl

In einem weiteren Schritt wurde die Analyse erweitert, indem neben der Verkehrsmittelwahl zusätzliche der Einfluss der Routenwahl auf die Luftschadstoffbelastung untersucht wurde. Bei den Messungen im MIV wurden hierfür die zwei Routen entlang der B44 bzw. A66 unterschieden. Im NMIV wurden die im Radverkehr gemessenen Routen entlang der B44 als Hauptstrecke und entlang der Nebenstrecke analysiert. Für den ÖPNV wurde die Strecke, die mit der S-Bahn zurückgelegt wurde, der Strecke mit Bus, U-Bahn und Tram gegenübergestellt. Neben den Aussagen zur Routenwahl bei gleichen Verkehrsmitteln konnten so Aussagen über die Auswirkungen der Verkehrsmittelwahl je Route getroffen werden.

Vergleich Zeitwahl

Um die Auswirkungen der Zeitwahl auf die Luftschadstoffbelastungen der Verkehrsteilnehmer*innen zu untersuchen, wurden die Messungen in verschiedene Zeitfenster unterteilt. Hierfür wurden die Belastungen während der vormittäglichen Spitzenstunde zwischen 8:00 Uhr und 9:00 Uhr, der nachmittäglichen Spitzenstunde zwischen 16:30 Uhr und 17:30 Uhr sowie außerhalb der Spitzenstunden untersucht.

Hintergrundbelastung

Bei den für die Hintergrundbelastung zur Verfügung stehenden Daten handelt es sich um Halbstundenmittelwerte. Für die Auswertung des Einflusses der Hintergrundbelastung auf die Exposition gegenüber Luftschadstoffen wurde der entsprechende Halbstundenwert zu Beginn der jeweiligen Messungen verwendet und von dem Mittelwert der Luftschadstoffbelastung abgezogen.

Messungen Radverkehr

Zur genaueren Untersuchung der Messungen im Radverkehr wurden verschiedene Verkehrssituationen an Lichtsignalanlagen (LSA) identifiziert. Anschließend wurde die Exposition der Radfahrer*innen gegenüber Luftschadstoffen während dieser Situation analysiert (s. Tab. 21). Die Situation „Warten an LSA in erster Position“ beinhaltet neben der Belastung während des Wartevorgangs auch die Belastungen während des Vorbeifahrtvorgangs an bereits wartenden Kfz, um als Fahrradfahrer*in an erste Position der Warteschlange zu gelangen.

Tab. 21: Auswertungskategorien Radverkehr

Quelle: Eigene Darstellung

Verkehrssituation	Codierung
Warten an LSA in erster Position	LSA_Beginn
Warten an LSA in folgender Position	LSA_Mitte/Ende
Anfahrtvorgang LSA nach Warten in erster Position	LSA_Anf_Beginn
Anfahrtvorgang LSA nach Warten in folgender Position	LSA_Anf_Mitte/Ende
Warten an LSA auf Radweg	LSA_Rad

Messungen ÖPNV

Neben der Auswertung der mittleren Belastung während der Fahrten im ÖPNV wurden verschiedene Situationen definiert und gesondert ausgewertet. Bei den Fahrten mit der S- bzw. U-Bahn wurden die gesammelten Daten getrennt nach Wartevorgängen an ober- bzw. unterirdischen Haltestellen analysiert. Zusätzlich wurde bei der Analyse der Fahrt unterschieden, ob sich das Fahrzeug auf einem ober- bzw. unterirdischen Streckenabschnitt befand. Auch die Messungen in Bus und Tram wurden nach Fahrt und Wartevorgängen analysiert. Bei den Wartevorgängen der Busfahrten wurde zwischen den Haltestellen an der Hauptverkehrsstraße und am Busbahnhof unterschieden. Die Haltestellen bei der Nutzung der Tram befanden sich an einer Hauptverkehrsstraße und an einer Nebenstraße. Die nachfolgende Tabelle zeigt als Übersicht die verschiedenen Kategorien, die im ÖPNV detaillierter ausgewertet wurden.

Tab. 22: Auswertungskategorien ÖPNV
Quelle: Eigene Darstellung

Verkehrsmittel	Kategorie, Beschreibung	Codierung
S-Bahn	Warten am Bahnsteig – oberirdisch	S_Warten_ober
	Warten am Bahnsteig – unterirdisch	S_Warten_unter
	Fahrt – unterirdisch (von Einstieg bis Ausstieg)	S_Fahrt_ober
	Fahrt – unterirdisch (von Einstieg bis Ausstieg)	S_Fahrt_unter
U-Bahn	Warten am Bahnsteig – oberirdisch	U_Warten_ober
	Warten am Bahnsteig -unterirdisch	U_Warten_unter
	Fahrt - unterirdisch	U_Fahrt_ober
	Fahrt - unterirdisch	U_Fahrt_unter
Bus	Warten an Haltestelle – Hauptverkehrsstraße	Bus_Warten_Haupt
	Warten an Haltestelle – Busbahnhof	Bus_Warten_Busbhf
	Fahrt im Bus (von Einstieg bis Ausstieg)	Bus_Fahrt
Tram	Warten an Haltestelle – Hauptverkehrsstraße	Tram_Warten_Haupt
	Warten an Haltestelle – Nebenstraße	Tram_Warten_Neben
	Fahrt in der Tram (von Einstieg bis Ausstieg)	Tram_Fahrt

Städtebauliche Auswertung

Zur Analyse städtebaulicher Einflussfaktoren auf die Luftschadstoffbelastung anhand mobiler Messungen wurden die im Radverkehr gewonnenen Daten verwendet. Im Vergleich zu den Messungen im Pkw war hier zu erwarten, dass der Einfluss der Bebauung von größerer Bedeutung ist, da die Erfassung der Luftschadstoffe direkter erfolgt verglichen zu den Messungen im Pkw. In einem ersten Schritt wurden städtebauliche Charakteristika definiert. Eine Übersicht über die städtebaulichen Eigenschaften ist in Anhang 8 dargestellt. Anschließend wurden die beiden mit dem Fahrrad zurückgelegten Routen analysiert und in Blöcke mit gleichbleibenden städtebaulichen Eigenschaften eingeteilt (s. Abb. 40). Abbildung 41 zeigt einen Detailausschnitt der ausgewählten Blöcke. Durch die Erfassung

von GPS-Daten parallel zur Messung der Luftschadstoffbelastungen konnten anschließend in einem Geoinformationssystem die Einzelwerte georeferenziert den zuvor definierten Blöcken zugeordnet werden. Damit erhielt jeder Messpunkt städtebauliche Eigenschaften, die anschließend differenziert analysiert werden konnten.

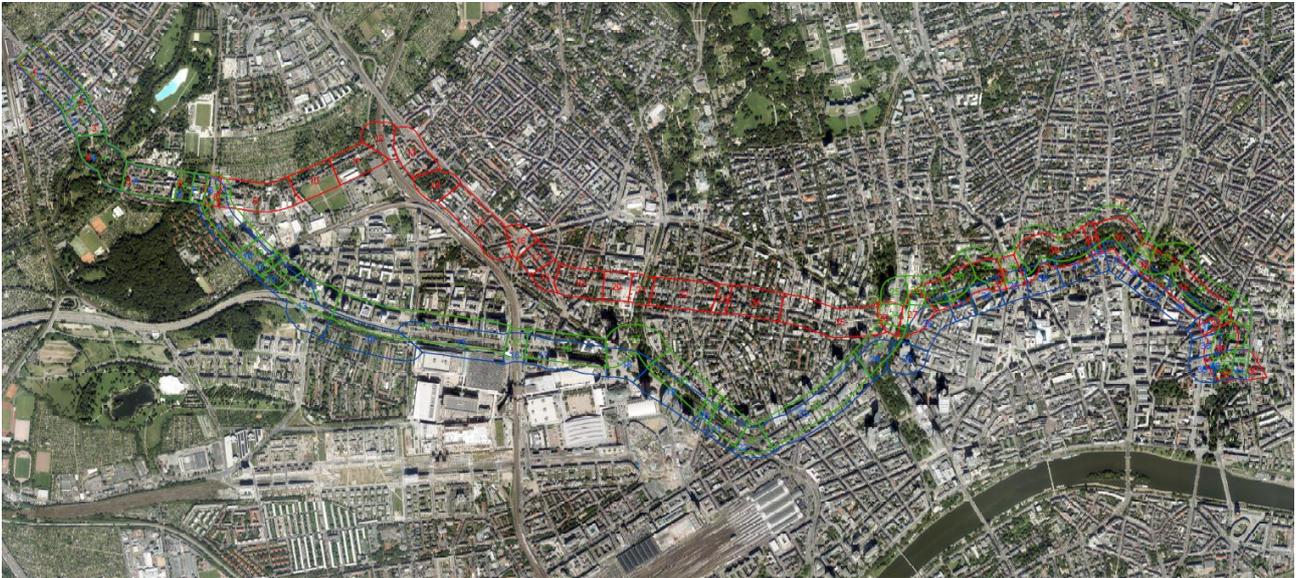


Abb. 40: Einteilung der Fahrradrouten in städtebauliche Blöcke
Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von Luftbildern des HVBG

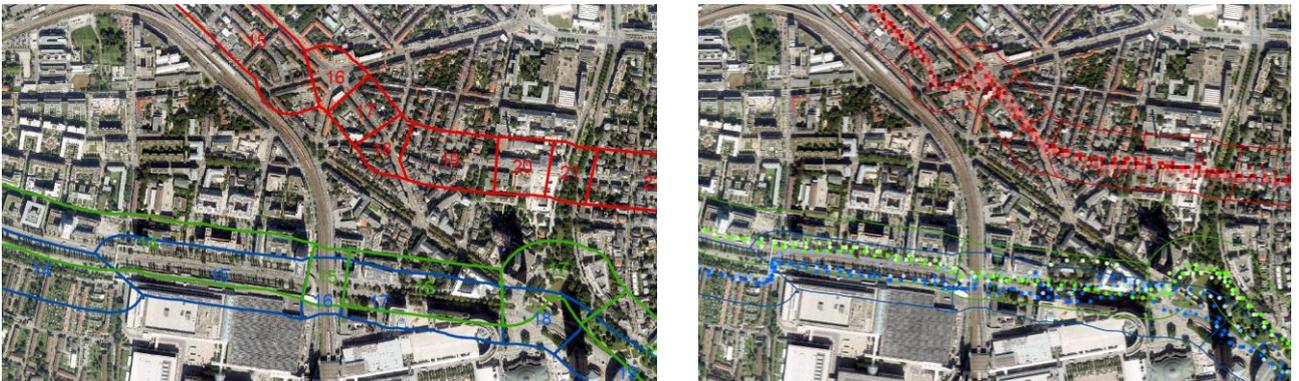


Abb. 41: Auszug Detail städtebauliche Blöcke
Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von Luftbildern des HVBG
(links: Einteilung städtebauliche Blöcke, rechts: Blöcke inklusive GPS-Messwerten)

Aufgrund der Komplexität der zuvor definierten städtebaulichen Eigenschaften und der vielfältigen Wirkungszusammenhänge zwischen den städtebaulichen Elementen, Verkehr und Luftschadstoffbelastungen wurde sich für die weitere Analyse auf die Untersuchung von drei Zusammenhänge fokussiert. In Tabelle 23 sind diese ausgewählten städtebaulichen Charakteristika dargestellt, die für die weitere Analyse herangezogenen wurden.

Tab. 23: Für Analyse ausgewählte städtebauliche Charakteristika
 Quelle: Eigene Darstellung

Städtebau	Codierung
Streckenverlauf	Freie Strecke, Kreuzung
Bauweise	keine Bebauung, offen, halboffen, geschlossen
Nutzung	Verkehr, Grünflächen/Park, Fußgängerzone, Baustelle

Stationäre Messungen

Die in der Datenaufbereitung aggregierten 15-Minutenwerte wurden in der Datenanalyse qualitativ anhand grafischer Darstellungen interpretiert. Anschließend wurden mittels Korrelationsanalyse die Ausprägungen statistischer Zusammenhänge zwischen Immissionskenngrößen und Verkehrsbelastung, sowie zwischen Immissionskenngrößen und meteorologischen Kenngrößen untersucht. Das Ergebnis der Korrelationsanalyse ist der Korrelationskoeffizient als Maß für den Grad des linearen Zusammenhangs zwischen zwei Kenngrößen.

6.5 Untersuchungen in Vietnam

6.5.1 Datenerhebung

Die Messungen wurden je nach Verkehrsmittel an zwei bis vier Messtagen im November 2019 durchgeführt. Um den Einfluss der Zeitwahl auf die Exposition gegenüber Luftschadstoffen zu analysieren, wurden die Daten sowohl während der Hauptverkehrszeiten (06:30-9:00 und 16:30-19:00) als auch während der weniger stark belasteten Zeiten (10:00-12:00 oder/und 14:00-16:00) erhoben. Insgesamt wurden im Erhebungszeitraum 145 Fahrten durchgeführt und eine Fahrtstrecke von insgesamt ca. 783 km erfasst. Aufgrund von Wetterbedingungen (regnerisch) und Geräteproblemen (Batterien leer) wurden vier Fahrten während der Messungen abgebrochen und somit von der Datenanalyse ausgeschlossen. Daher wurden 141 Fahrten für die weitere Analyse verwendet. Tabelle 24 zeigt die Anzahl der Wege, die je Verkehrsmittel durchgeführt wurden.

Tab. 24: Übersicht der mobilen Messungen Ho Chi Minh City
 Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von Le Thi 2021

Verkehrsmittel	Anzahl Weg je Verkehrsmittel	Anzahl Wege je Route	Wege je Messzeiten			
			VMS*	NVZ**	NMS***	
Pkw (Taxi)	29	Route 1	15	5	6	4
		Route 2	14	5	6	3
Motorrad	38	Route 1	19	6	7	6
		Route 2	19	6	7	6
Bus	36	Route 1	18	4	8	6
		Route 2	18	4	8	6
Fahrrad	38	Route 1	19	6	6	7
		Route 2	19	6	6	7
Zu Fuß	53	Abschnitt 1	17	3	9	5
		Abschnitt 2	12	4	5	3
		Abschnitt 3	12	4	5	3
		Abschnitt 4	12	4	4	4

* VMS: Vormittagsspitze (06:30 Uhr – 09:00 Uhr)

** NVZ: Nebenverkehrszeiten (10:00 Uhr – 12:00 Uhr und 14:00 Uhr – 16:00 Uhr)

*** NMS: Nachmittagsspitze (16:30 Uhr – 19:00 Uhr)

6.5.2 Datenaufbereitung

Die erhobenen Daten zur Belastung durch UFP wurden in ihren 1-Sekundenmesswerten beibehalten und auf Plausibilität überprüft. Anschließend wurden sie mit den parallel erfassten GPS-Daten zusammengesetzt. Hierdurch wird eine Verortung der Messwerte entlang der Strecken ermöglicht, um mögliche Einflussfaktoren zu identifizieren.

6.5.3 Datenanalyse

Aus den erfassten 1-Sekundenmesswerten der UFP wurden statistische Kennwerte ermittelt, mithilfe von Boxplots dargestellt und interpretiert. Zur Analyse verkehrlicher Einflussfaktoren wie die Verkehrsmittelwahl und Zeitwahl wurden die Messungen getrennt nach Verkehrsmittel (Pkw, Motorrad, Bus, Fahrrad und zu Fuß) und Fahrtzeitpunkt (während oder außerhalb der Spitzenstunden) analysiert.

6.6 Ergebnisse der Messungen in Deutschland

6.6.1 Analyse Fahrtzeiten

Die Analyse der Daten hat ergeben, dass die Strecke mit der S-Bahn (ca. 22 min, inklusive Wartezeiten) am schnellsten zurückgelegt werden kann. Mit dem Pkw (Pkw_{Neu} und Pkw_{Alt} gemeinsam) werden, unabhängig von der Routenwahl ca. 24 Minuten Fahrtzeit für die Strecke benötigt. Wird die Strecke mit dem Fahrrad zurückgelegt hat die Routenwahl einen geringen Einfluss. Bei Nutzung der Hauptstrecke (B44) werden durchschnittlich ca. 34 Minuten benötigt. Für die Nebenstrecke werden

mit dem Fahrrad knapp 38 Minuten Fahrtzeit und somit 3:30 Minuten mehr Zeit benötigt verglichen mit der Hauptstrecke. Mit fast 40 Minuten Fahrtzeit wird für die Strecke mit Bus, U-Bahn und Tram am meisten Zeit benötigt. Die durchschnittlichen Fahrtzeiten in Abhängigkeit der Verkehrsmittel- und Routenwahl können Tabelle 25 entnommen werden.

Tab. 25: Durchschnittliche Fahrtzeiten in Abhängigkeit der Verkehrsmittel- und Routenwahl
Quelle: Eigene Darstellung

Verkehrsmittel	durchschnittliche Fahrtzeiten [min]
Pkw (gesamt)	24:38
Pkw B44	24:25
Pkw A66	24:50
Fahrrad (gesamt)	36:05
Fahrrad Hauptstrecke (B44)	34:15
Fahrrad Nebenstrecke	37:45
S-Bahn	22:13
Bus, U-Bahn, Tram	39:48

6.6.2 Hintergrundbelastung

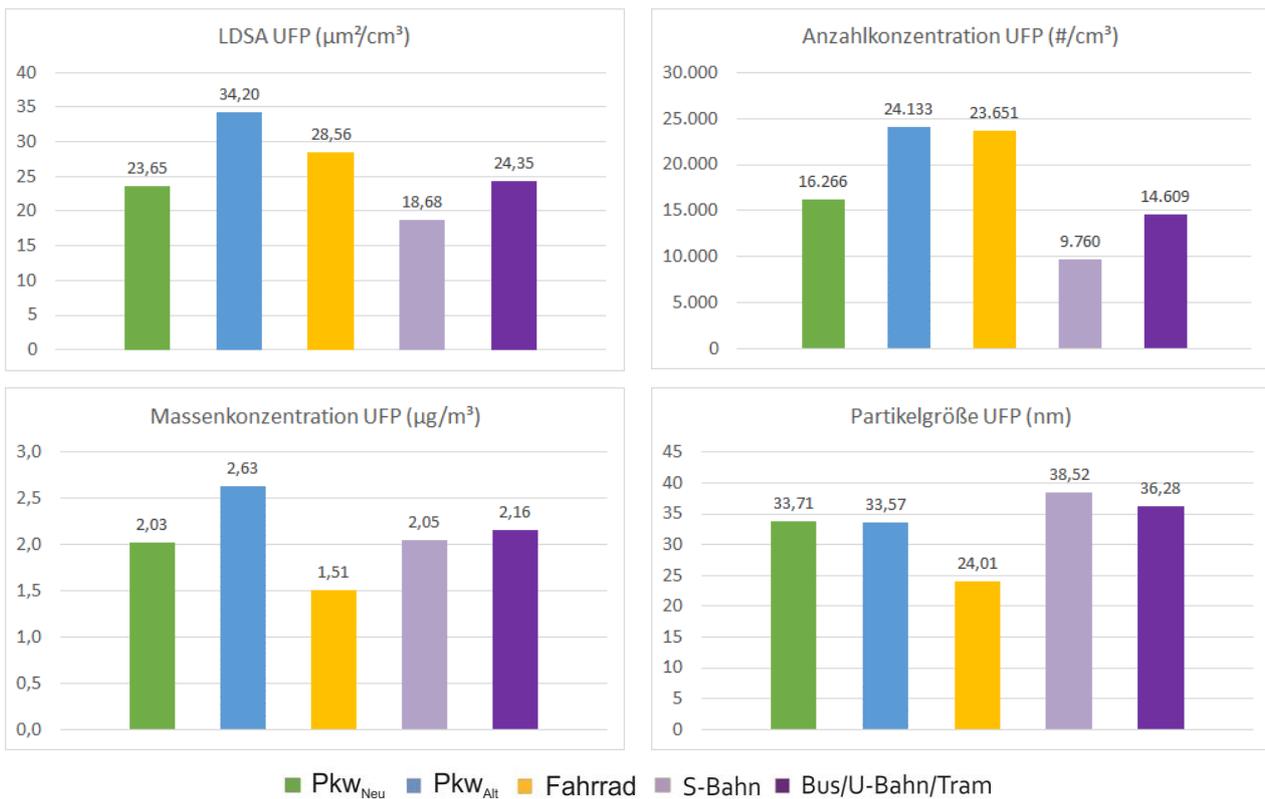
Da die Messungen im Stadtgebiet von Frankfurt am Main über mehrere Tage verteilt stattfanden, sollte die städtische Hintergrundbelastung in die Auswertung einfließen, um eine bessere Vergleichbarkeit der Daten zu gewährleisten. Bei der Analyse der Daten stellte sich allerdings heraus, dass die Hintergrundbelastung zu manchen Zeiten ein höheres Niveau aufwies, als es bei den während der Messungen gewonnenen Daten der Fall war. Es wird angenommen, dass der Grund hierfür unter anderem Toleranzen bei den Messgenauigkeiten der Geräte sind. Mit einem weiteren Satz an Messgeräten wären eigene Messungen im städtischen Hintergrundstation möglich gewesen. Durch die Ermittlung eines Korrekturfaktors zwischen einem Messgerät für die mobilen bzw. stationären Messungen und einem Messgerät zur Erfassung der städtischen Hintergrundbelastung wären Messungenauigkeiten der Geräte und die Auswirkungen der Hintergrundbelastungen ausgeglichen worden und die Hintergrundbelastung hätte mit in die Auswertung einfließen können. Eine Korrektur der Daten durch Schwankungen der Hintergrundbelastung konnte somit nicht berücksichtigt werden.

Bei der Datenerfassung wurde allerdings darauf geachtet, dass die Messungen für die jeweiligen Verkehrsmittel nicht nur an einem Tag durchgeführt wurden. So wurden beispielsweise Daten für den ÖPNV am Vormittag erfasst und am Nachmittag Messungen im Radverkehr durchgeführt und an einem anderen Messtag in anderer Reihenfolge. Durch diese Streuung der Messungen soll der Einfluss der Hintergrundbelastung verringert und trotzdem aussagekräftige Daten zur Verkehrsmittel- und Routenwahl gewonnen werden.

6.6.3 Exposition gegenüber Luftschadstoffen in Abhängigkeit der Verkehrsmittelwahl

Analyse UFP

Um die Auswirkungen der Verkehrsmittelwahl auf die Exposition gegenüber Luftschadstoffen zu analysieren, wurden die Messungen in Bezug auf die LDSA-Konzentration, d.h. dem Anteil der luftgetragenen Oberflächenkonzentration, der im alveolaren oder tracheobronchialen Bereich der menschlichen Lunge bei Inhalation deponiert werden würde, die Partikelanzahlkonzentration und Massenkonzentration sowie die Partikelgröße UFP untersucht. In einem ersten Schritt wurde die durchschnittliche Belastung aller Wege in Abhängigkeit der Verkehrsmittelwahl ermittelt (s. Abb. 44). Hierbei wurde keine Unterscheidung der genutzten Routen vorgenommen.



Stichprobenumfang n:

Pkw _{Neu}	36	S-Bahn	16
Pkw _{Alt}	36	Bus/U-Bahn/Tram	13
Fahrrad	23		

Abb. 42: Durchschnittliche Exposition gegenüber UFP in Abhängigkeit der Verkehrsmittelwahl
Quelle: Eigene Darstellung

LDSA-Konzentrationen

Die höchste durchschnittliche Belastung wurde bei den Fahrten mit dem Pkw_{Alt} mit $34,20 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ erreicht. Somit war sie fast 1,5-mal höher als die LDSA im Fahrzeuginnenraum des Pkw_{Neu} ($23,65 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$). Die durchschnittliche LDSA beim Fahrrad lag mit $28,56 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ ebenfalls über den Werten des Pkw_{Neu}. Die geringste LDSA-Konzentration an UFP wurde bei der Nutzung der S-Bahn gemessen. Hier lag die Belastung mit $18,68 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ etwa 20% unter der LDSA-Konzentration des Pkw_{Neu}. Die durchschnittliche Belastung auf der Strecke, die mit Bus, U-Bahn und Tram zurückgelegt wurde, ist mit $24,35 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ in etwa mit der im Fahrzeuginnenraum des Pkw_{Neu} zu vergleichen.

Partikelanzahlkonzentration UFP

Wie bei der LDSA-Konzentration wiesen die Fahrten mit der S-Bahn (9.760 Partikel/cm³) die geringste durchschnittliche Partikelanzahl auf. Im Fahrzeuginnenraum der beiden Pkw sind auch in Bezug auf die Partikelanzahlkonzentration deutliche Unterschiede zu erkennen. So war im Pkw_{Alt} die durchschnittliche Anzahl an UFP mit 24.133 Partikeln/cm³ ca. 1,5-mal höher verglichen zu dem durchschnittlichen Wert im Pkw_{Neu}. Ebenso lag die Belastung auf dem Fahrrad mit 23.651 Partikeln/cm³ fast 50% über dem Wert der Messungen im Pkw_{Neu}. Mit 14.609 Partikeln/cm³ lag die Belastung auf der Strecke, die mit Bus, U-Bahn und Tram zurückgelegt wurde, 10% unter der Belastung im Pkw_{Neu}.

Massenkonzentration UFP

Bei der Massenkonzentration UFP wurde die geringste durchschnittliche Konzentration bei den Fahrten mit dem Fahrrad (1,51 µg/cm³) gemessen. Dies ist dadurch zu erklären, dass auch die geringste Partikelgröße bei den Messungen mit dem Fahrrad festgestellt wurde (s. Absatz *Partikelgröße UFP*). Die höchste Massenkonzentration wiesen mit 2,63 µg/cm³ die Fahrten mit dem Pkw_{Alt} auf. Bei den Verkehrsmitteln Pkw_{Neu} (2,03 µg/cm³), S-Bahn (2,05 µg/cm³) und U-Bahn (2,16 µg/cm³) wurden ähnliche Massenkonzentrationen erfasst.

Partikelgröße UFP

Bei der Auswertung der Daten in Bezug auf die Partikelgröße UFP konnte festgestellt werden, dass bei den Fahrten mit dem Fahrrad die durchschnittlich kleinsten Partikel eingeatmet wurden (24,01 nm). Bei den Messungen in den beiden Pkw wurden keine Unterschiede bei der durchschnittlichen Partikelgröße festgestellt (Pkw_{Neu}:33,71 nm und Pkw_{Alt}: 33,57 nm). Bei der Nutzung des ÖPNV waren die durchschnittlichen Partikelgrößen mit 38,52 nm bei den Fahrten mit der S-Bahn und 36,28 nm bei der Strecke mit U-Bahn, Bus und Tram etwas größer verglichen mit den Messungen in dem Pkw. Im Anhang 9 sind die durchschnittlichen Belastungswerte (LDSA, Partikelanzahl- und Massenkonzentration sowie Partikelgröße) für die untersuchten Verkehrsmittel übersichtlich zusammengestellt.

Analyse PM_{2,5} und PM₁₀

Neben der Auswertung der Belastung durch UFP wurde die Exposition der Verkehrsteilnehmer*innen gegenüber größeren Partikeln in Abhängigkeit der Verkehrsmittelwahl untersucht. Als Kenngrößen wurden hier für alle Verkehrsmittel die durchschnittliche Partikelmasse von PM_{2,5} und PM₁₀ analysiert. Abbildung 43 zeigt die durchschnittlichen Partikelmassen von PM_{2,5} und PM₁₀ in Abhängigkeit der Verkehrsmittelwahl. Im Anhang 10 sind die ermittelten durchschnittlichen Partikelmassen übersichtlich zusammengestellt. Neben der Gegenüberstellung der Auswirkungen der Verkehrsmittelwahl auf die Exposition gegenüber größeren Partikeln ist durch die Ermittlung dieser Partikelmassen ein Vergleich mit den WHO-Richtwerten möglich. Da die EU-Grenzwerte für Jahresmittelwerte mit 20 µg/m³ für PM_{2,5} und 40 µg/m³ für PM₁₀ deutlich über den erfassten Werten liegen, sind diese nicht in der Abbildung enthalten.



Stichprobenumfang n:

Pkw _{Neu}	36	S-Bahn	16
Pkw _{Alt}	36	Bus/U-Bahn/Tram	13
Fahrrad	23		

--- WHO-Richtwerte für Jahresmittelwerte: PM_{2,5} = 10 µg/m³; PM₁₀ = 20 µg/m³

Abb. 43: Durchschnittliche Exposition gegenüber PM_{2,5} und PM₁₀ in Abhängigkeit der Verkehrsmittelwahl
Quelle: Eigene Darstellung

Partikelmasse PM_{2,5}

Die Berechnungen der durchschnittlichen Partikelmasse von PM_{2,5} je Verkehrsmittel haben ergeben, dass bei der Nutzung der S-Bahn die durchschnittlich höchste Belastung vorlag. Sie war mit 14,97 µg/m³ ca. 3,5-mal höher als die Werte im Fahrzeuginnenraum beider Pkw, bei denen die Messungen mit 4,22 µg/m³ (Pkw_{Neu}) und 4,40 µg/m³ (Pkw_{Alt}) relativ gleiche Partikelmassen von PM_{2,5} ergaben. Die Belastungen auf dem Fahrrad waren mit 7,03 µg/m³ mehr als 1,5-mal so hoch wie mit einem Pkw. Wurde die Strecke mit Bus, U-Bahn und Tram zurückgelegt, lag die Belastung mit 11,59 µg/m³ zwar unterhalb der Belastung mit der S-Bahn. Im Vergleich zum Pkw_{Neu} ist sie allerdings immer noch ca. 2,75-mal so hoch. Bei der Nutzung des ÖPNV lagen die durchschnittlichen Belastungen durch PM_{2,5} jeweils deutlich über den Jahresmittelwerten der WHO-Richtwerte. Auch bei der Nutzung des Fahrrads wird der Richtwert der WHO für PM_{2,5} überschritten.

Partikelmasse PM₁₀

Auch bei der Betrachtung der durchschnittlichen Partikelmasse bezogen auf PM₁₀ ergab sich ein ähnliches Bild. Mit 27,00 µg/m³ waren die Fahrten mit der S-Bahn am höchsten belastet. Die Belastung in Bus, U-Bahn und Tram waren mit 21,93 µg/m³ etwas geringer, lagen aber noch um mehr als 2,5-mal höher als die Belastungen im Pkw_{Neu}. Die Belastungen auf dem Fahrrad waren mit 15,95 µg/m³ fast doppelt so hoch wie im Fahrzeuginnenraum des Pkw_{Neu}. Bei der Fahrt mit einem Pkw sind Verkehrsteilnehmer*innen den geringsten Partikelmassen von PM₁₀ ausgesetzt. Hierbei ist die Belastung im Pkw_{Alt} allerdings etwa 30% geringer im Vergleich zu Pkw_{Neu}. Wie bei der Analyse der durchschnittlichen Partikelmasse von PM_{2,5} lagen auch die durchschnittlichen Belastungen von PM₁₀ im ÖPNV deutlich über den Jahresmittelwerten der WHO-Richtwerte. Die Belastungen während der Messungen im Radverkehr liegen sehr gering über den Richtwerten der WHO für PM₁₀.

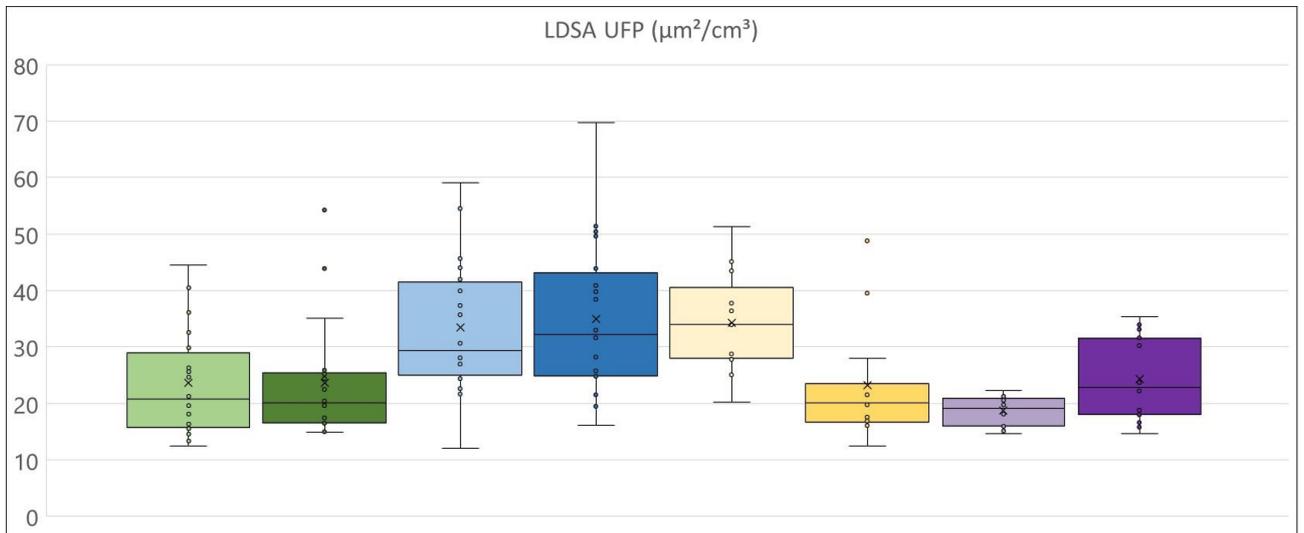
6.6.4 Exposition gegenüber Luftschadstoffen in Abhängigkeit der Verkehrsmittel- und Routenwahl

Analyse UFP

In einem weiteren Schritt wurden die Auswirkungen der Verkehrsmittel- und Routenwahl auf die Exposition von Verkehrsteilnehmer*innen gegenüber UFP analysiert. Wie bei der reinen Analyse der Verkehrsmittelwahl wurden für die zusätzliche Untersuchung der Auswirkungen der Routenwahl die Kenngrößen LDSA, Partikelanzahlkonzentration, Massenkonzentration und Partikelgröße herangezogen.

LDSA-Konzentrationen

Abbildung 44 zeigt die LDSA in Abhängigkeit der Verkehrsmittel- und Routenwahl. Aus der Abbildung geht hervor, dass vor allem bei der Nutzung des Fahrrads die Routenwahl einen deutlichen Einfluss hat. Die durchschnittliche Belastung entlang der Hauptstrecke (B44) liegt mit $34,34 \mu\text{m}^2/\text{m}^3$ ca. 32% über der Belastung entlang der Nebenstrecke ($23,26 \mu\text{m}^2/\text{m}^3$). Die Messungen mit dem Pkw_{Alt} entlang der B44 haben mit $33,45 \mu\text{m}^2/\text{m}^3$ eine ähnlich hohe Belastung ergeben wie die Belastungen auf dem Fahrrad entlang der gleichen Strecke. Bei der Nutzung der Pkw hatte die Routenwahl kaum einen Einfluss auf die Belastung im Fahrzeuginnenraum. Im Pkw_{Alt} lag sie mit $33,45 \mu\text{m}^2/\text{m}^3$ entlang der B44 und $34,95 \mu\text{m}^2/\text{m}^3$ entlang der A66 deutlich über dem Niveau der Messungen mit dem Pkw_{Neu} (B44: $23,62 \mu\text{m}^2/\text{m}^3$ und A66: $23,68 \mu\text{m}^2/\text{m}^3$). Die Messungen im ÖPNV ergaben in Bezug auf die LDSA ähnliche Messungen wie im Fahrzeuginnenraum des Pkw_{Neu} und lagen bei $18,68 \mu\text{m}^2/\text{m}^3$ bei der Strecke mit der S-Bahn und $24,35 \mu\text{m}^2/\text{m}^3$, wenn die Strecke mit Bus, U-Bahn und Tram zurückgelegt wurde. Im Anhang 11 sind die durchschnittlichen Belastungswerte sowie die prozentualen Unterschiede zwischen den jeweiligen Routen in Abhängigkeit des Verkehrsmittels dargestellt.



■ Pkw_{Neu} - B44 ■ Pkw_{Neu} - A66 ■ Pkw_{Alt} - B44 ■ Pkw_{Alt} - A66 ■ Fahrrad - B44 ■ Fahrrad - Nebenst. ■ S-Bahn ■ Bus/U-Bahn/Tram

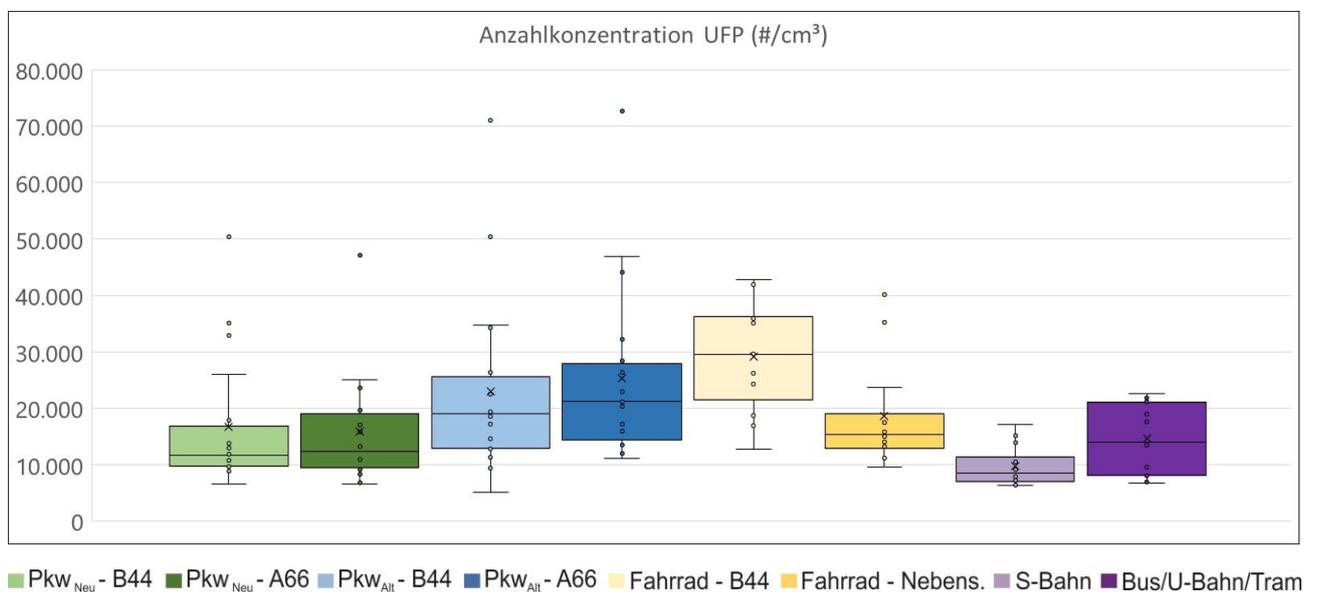
Stichprobenumfang n:

Pkw _{Neu} - B44	18	Fahrrad - B44	11
Pkw _{Neu} - A66	18	Fahrrad - Nebenstrecke	12
Pkw _{Alt} - B44	18	S-Bahn	16
Pkw _{Alt} - A66	18	Bus/U-Bahn/Tram	13

Abb. 44: Durchschnittliche LDSA UFP in Abhängigkeit der Verkehrsmittel- und Routenwahl
Quelle: Eigene Darstellung

Partikelanzahlkonzentration UFP

Wie in Abbildung 45 zu sehen, ist die Partikelanzahlkonzentration UFP bei den Messungen mit dem Fahrrad entlang der Hauptstrecke (B44) mit 29.173 Partikeln/cm³ am höchsten. Nutzen Fahrradfahrer*innen die Nebenstrecke, sind sie mit 18.589 Partikeln/cm³ ca. 36% weniger Partikeln ausgesetzt im Vergleich zur Hauptstrecke. Beim Vergleich der Messungen der beiden Pkw liegt die Anzahlkonzentration UFP im Pkw_{Alt} auf beiden Strecken (B44: 22.975 Partikel/cm³; A66: 25.290 Partikel/cm³) über den Werten des Pkw_{Neu} (16.686 Partikel/cm³; A66: 15.845 Partikel/cm³). Dies ergibt ein Plus von 38% entlang der B44 und 60% entlang der A66 im Fahrzeuginnenraum von Pkw_{Alt} verglichen mit Pkw_{Neu}. Die Messungen im ÖPNV ergaben eine Belastung von 9.760 Partikeln/cm³ in der S-Bahn und 14.609 Partikel/cm³, wenn die Strecke mit Bus, U-Bahn und Tram zurückgelegt wurde. Das bedeutet im Vergleich zum Pkw_{Neu} entlang der B44 eine um 42% geringere Belastung bei der S-Bahn und eine um 12% geringere Belastung bei Bus, U-Bahn und Tram. Im Anhang 11 ist die durchschnittlichen Partikelanzahl UFP je Verkehrsmittel und Route sowie einige prozentuale Änderungen in Bezug auf ausgewählte Verkehrsmittel und Routen übersichtlich zusammengefasst.



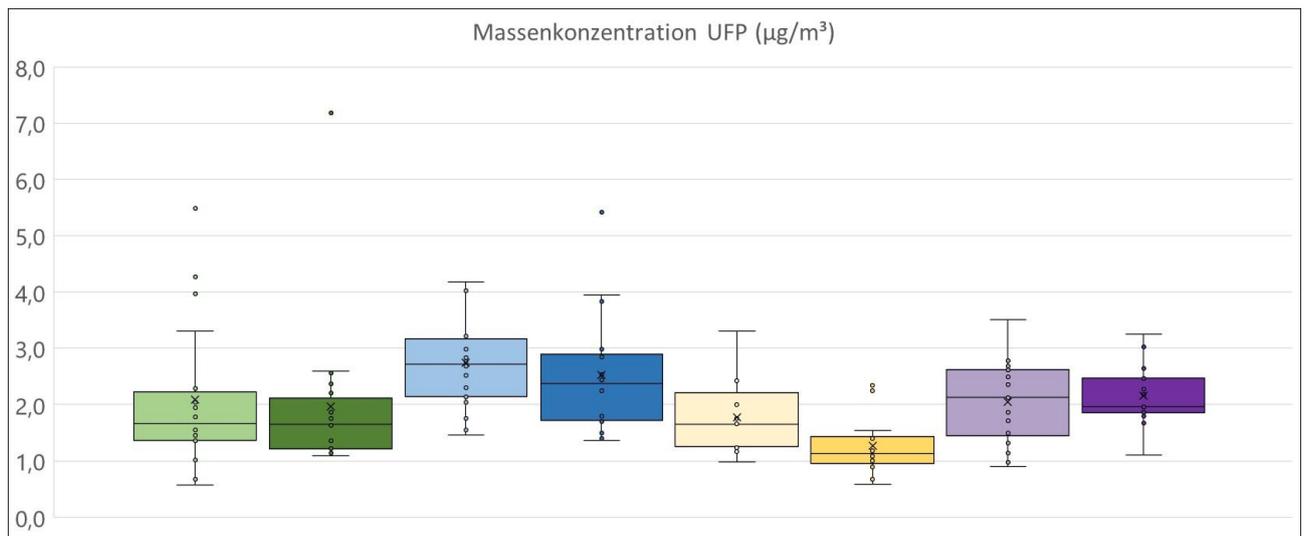
Stichprobenumfang n:

Pkw _{Neu} – B44	18	Fahrrad – B44	11
Pkw _{Neu} – A66	18	Fahrrad - Nebenstrecke	12
Pkw _{Alt} – B44	18	S-Bahn	16
Pkw _{Alt} – A66	18	Bus/U-Bahn/Tram	13

Abb. 45: Durchschnittliche Anzahlkonzentration UFP in Abhängigkeit der Verkehrsmittel- und Routenwahl
Quelle: Eigene Darstellung

Massenkonzentration UFP

Aus Abbildung 46 geht hervor, dass die höchsten Massenkonzentrationen UFP bei den Messungen mit dem Pkw_{Alt} (B44: 2,75 µg/m³; A66: 2,52 µg/m³) aufgetreten sind. Diese Belastungen sind 32% (B44) bzw. 29% (A66) höher als die im Pkw_{Neu} gemessenen Werte (B44: 2,09 µg/m³; A66: 1,96 µg/m³). Die durchschnittliche Massenkonzentration bei den Messungen mit dem Fahrrad fallen etwas geringer aus und betragen 1,77 µg/m³ entlang der B44 und 1,26 µg/m³ entlang der Nebenstrecke. Im Vergleich zu den Belastungen im Pkw_{Neu} bzw. Pkw_{Alt} entlang der B44 ist die Massenkonzentration bei der Nutzung des Fahrrads um 15% bzw. 36% geringer. Im ÖPNV sind die Massenkonzentrationen vergleichbar mit den Belastungen im Pkw_{Neu} und weisen 2,05 µg/m³ (S-Bahn) bzw. 2,16 µg/m³ (Bus, U-Bahn, Tram) auf. In Anhang 11 sind die durchschnittlichen Massekonzentrationen UFP übersichtlich in einer Tabelle zusammengefasst.



■ Pkw_{Neu} - B44
 ■ Pkw_{Neu} - A66
 ■ Pkw_{Alt} - B44
 ■ Pkw_{Alt} - A66
 ■ Fahrrad - B44
 ■ Fahrrad - Nebenst.
 ■ S-Bahn
 ■ Bus/U-Bahn/Tram

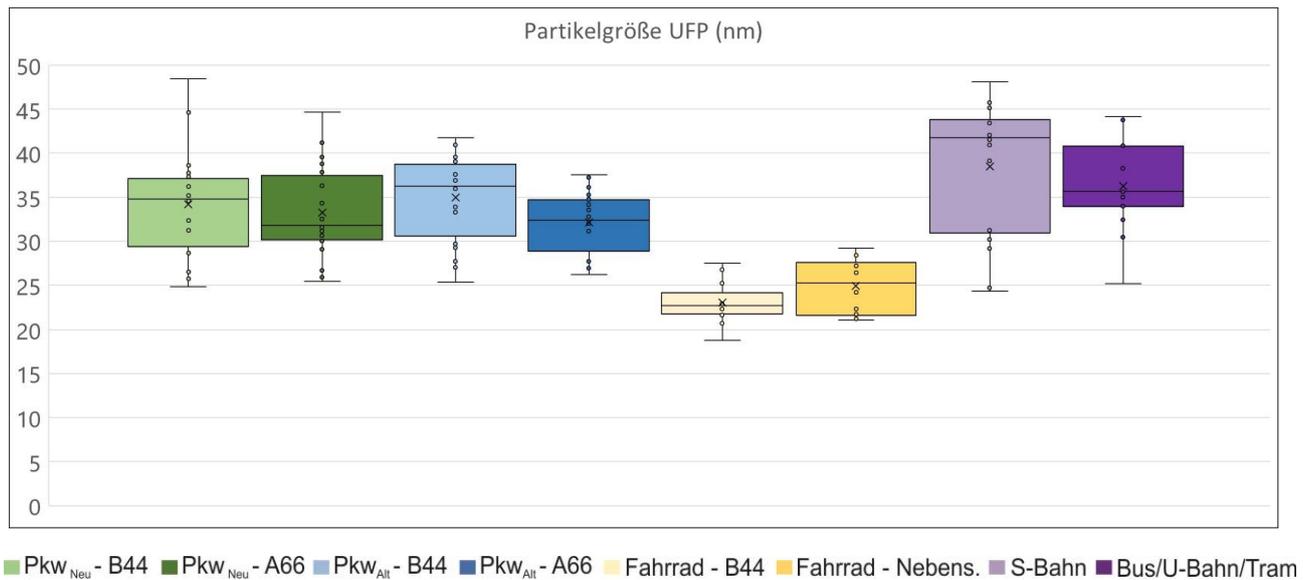
Stichprobenumfang n:

Pkw _{Neu} – B44	18	Fahrrad – B44	11
Pkw _{Neu} – A66	18	Fahrrad - Nebenstrecke	12
Pkw _{Alt} – B44	18	S-Bahn	16
Pkw _{Alt} – A66	18	Bus/U-Bahn/Tram	13

Abb. 46: Durchschnittliche Massenkonzentration UFP in Abhängigkeit der Verkehrsmittel- und Routenwahl
Quelle: Eigene Darstellung

Partikelgröße UFP

Die geringsten durchschnittlichen Partikelgrößen wurden bei den Messungen mit dem Fahrrad erfasst (s. Abb. 47). Die Routenwahl hatte hierbei nur einen geringen Einfluss auf die Belastung. Die durchschnittliche Partikelgröße betrug entlang der B44 23,03 nm und entlang der Nebenstrecke 24,91 nm. Die durchschnittliche Partikelgröße war während der Fahrten mit den Pkw (Pkw_{Neu}- B44: 34,17 nm und A66: 33,26 nm; Pkw_{Alt}- B44: 34,97 nm und A66: 32,17 nm) sehr ähnlich und unterschied sich nur um 2-3% je nach Route (s. Abb. 47). Die größten durchschnittlichen Partikelgrößen wurden im ÖPNV und hier vor allem bei den Fahrten mit der S-Bahn (38,52 nm) erfasst. Bei den Fahrten auf der Strecke, die mit Bus, U-Bahn und Tram zurückgelegt wurde lag der Wert bei 36,28 nm. Anhang 11 sind die durchschnittlichen Partikelgrößen UFP zu entnehmen.



Stichprobenumfang n:

Pkw _{Neu} – B44	18	Fahrrad – B44	11
Pkw _{Neu} – A66	18	Fahrrad - Nebenstrecke	12
Pkw _{Alt} – B44	18	S-Bahn	16
Pkw _{Alt} – A66	18	Bus/U-Bahn/Tram	13

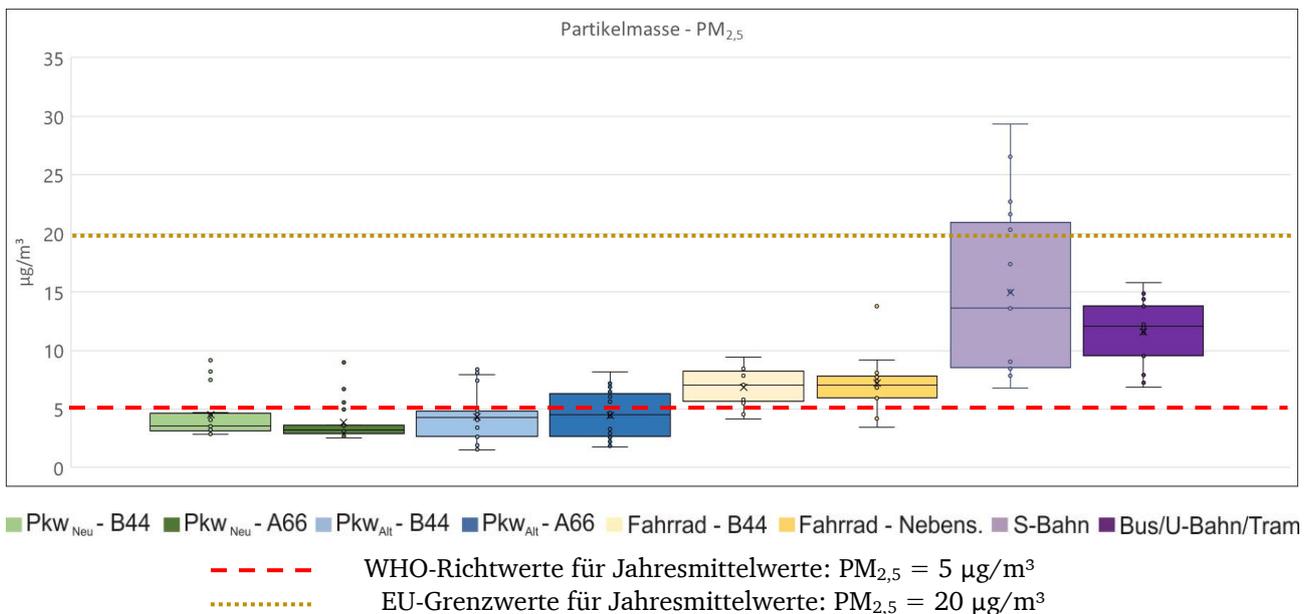
Abb. 47: Durchschnittliche Partikelgröße UFP in Abhängigkeit der Verkehrsmittel- und Routenwahl
Quelle: Eigene Darstellung

Analyse PM_{2,5} und PM₁₀

Partikelmasse PM_{2,5}

Abbildung 48 zeigt die durchschnittlichen Partikelmassen von PM_{2,5} in Abhängigkeit der Verkehrsmittel- und Routenwahl. Vor allem bei der Nutzung des ÖPNV sind hohe Belastungen durch PM_{2,5} zu verzeichnen. Mit 14,97 µg/m³ bei der S-Bahn und 11,59 µg/m³ beim Zurücklegen der Strecke mit Bus, U-Bahn und Tram liegen die Werte fast 3,5-mal (S-Bahn) bzw. mehr als 2,5-mal (Bus, U-Bahn, Tram) so hoch im Vergleich zu den Belastungen im Pkw_{Neu} entlang der B44 (4,54 µg/m³). Die Belastungen bei den Messungen im Pkw_{Neu} und Pkw_{Alt} bewegen sich zwischen 3,88 µg/m³ und 4,54 µg/m³ und somit auf einem ähnlichen Niveau. Bei den Messungen im Radverkehr ist die Belastung entlang der B44 mit 6,84 µg/m³ ähnlich zu der Belastung entlang der Nebenstrecke (7,21 µg/m³; 5% im Vergleich zur B44). Verglichen mit der Belastung im Pkw_{Neu} entlang der B44 ergibt sich bei den Messungen auf dem Fahrrad auf gleicher Strecke eine ca. 1,5-mal so hohe Belastung durch die Partikelmasse von PM_{2,5}.

Der Vergleich mit dem Richtwert der WHO zeigt, dass die durchschnittlichen Belastungen im ÖPNV deutlich und im Radverkehr etwas über dem Jahresmittelwert von 5 µg/m³ lag. Der durchschnittliche EU-Grenzwert von 20 µg/m³ wurde bei der mittleren Belastung aller Verkehrsmittel eingehalten. Im Anhang 12 sind die entsprechenden Partikelmassen für PM_{2,5} tabellarisch dargestellt.



Stichprobenumfang n:

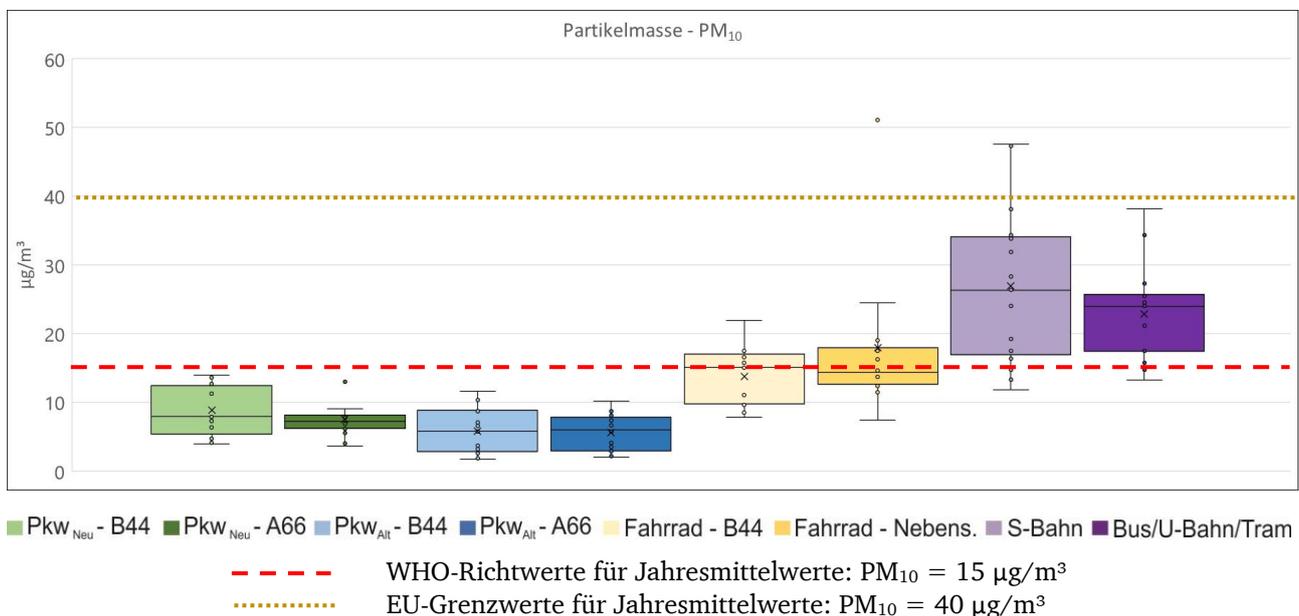
Pkw _{Neu} - B44	18	Fahrrad - B44	11
Pkw _{Neu} - A66	18	Fahrrad - Nebenstrecke	12
Pkw _{Alt} - B44	18	S-Bahn	16
Pkw _{Alt} - A66	18	Bus/U-Bahn/Tram	13

Abb. 48: Durchschnittliche Partikelmasse PM_{2,5} in Abhängigkeit der Verkehrsmittel- und Routenwahl
Quelle: Eigene Darstellung

Partikelmasse PM_{10}

Wie bei der Partikelmasse von $PM_{2,5}$ wurden die höchsten Belastungen bei PM_{10} bei der Nutzung des ÖPNV gemessen. Die Partikelmasse in der S-Bahn lag mit $27,00 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ca. 23% über den Belastungen in Bus, U-Bahn und Tram ($21,93 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Bei den Messungen im Radverkehr war die Nebenstrecke mit $17,93 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 30% stärker belastet als die Hauptstrecke entlang der B44, auf der eine durchschnittliche Partikelmasse von $PM_{2,5}$ von $13,79 \mu\text{g}/\text{m}^3$ gemessen wurde. Die Belastung im Pkw_{Alt} war mit $5,80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (B44) bzw. $5,57 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (A66) um 35% bzw. 26% geringer als die entsprechenden Belastungen im Pkw_{Neu} mit $8,92 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (B44) und $7,51 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (A66). Abbildung 49 zeigt die durchschnittliche Partikelmasse PM_{10} in Abhängigkeit der Verkehrsmittel- und Routenwahl.

Die durchschnittlichen Belastungen durch die Partikelmasse von PM_{10} lag bei den Messungen in der S-Bahn sowie auf der Strecke, die mit U-Bahn, Bus und Tram zurückgelegt wurde deutlich über dem WHO-Richtwert. Die Belastungen während der Messungen mit dem Fahrrad befinden sich in etwa auf den Niveau des Richtwerts oder etwas darüber (Messungen entlang der Nebenstrecke). Der durchschnittliche EU-Grenzwert von $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ wurde bei der mittleren Belastung aller Verkehrsmittel eingehalten. Eine zusätzliche tabellarische Übersicht der Partikelmassen ist Anhang 12 zu entnehmen.



Stichprobenumfang n:

Pkw_{Neu} – B44	18	Fahrrad – B44	11
Pkw_{Neu} – A66	18	Fahrrad - Nebenstrecke	12
Pkw_{Alt} – B44	18	S-Bahn	16
Pkw_{Alt} – A66	18	Bus/U-Bahn/Tram	13

Abb. 49: Durchschnittliche Partikelmasse PM_{10} in Abhängigkeit der Verkehrsmittel- und Routenwahl
Quelle: Eigene Darstellung

6.6.5 Exposition gegenüber Luftschadstoffen in Abhängigkeit der Zeitwahl

Die Untersuchung der Auswirkungen der Zeitwahl auf die Luftschadstoffbelastung der Verkehrsteilnehmer*innen in Abhängigkeit der Verkehrsmittel- und Routenwahl wurde für die morgendliche Spitzenstunde zwischen 8:00 Uhr und 9:00 Uhr, die abendliche Spitzenstunde zwischen 16:30 Uhr und 17:30 Uhr sowie für die Stunden außerhalb der Spitzenstunden (7:00 Uhr bis 8:00 Uhr, 9:00 Uhr bis 16:30 Uhr sowie ab 17:30 Uhr) durchgeführt. Die Analyse ergab, dass keine ausreichende Streuung der Messfahrten über die verschiedenen Stundengruppen vorliegt. Aufgrund der relativ langen Fahr-

zeit von ca. 30 Minuten pro Strecke und den kurzen 1-Stundenzeiträumen der Spitzenstunden konnten nicht ausreichend Daten innerhalb der Spitzenstunden gesammelt werden und der Anteil der Fahrten außerhalb der Spitzenstunden überwiegt. Aus den Daten sind die Auswirkungen von Spitzenstunden auf die Exposition der Verkehrsteilnehmer*innen gegenüber Luftschadstoffen somit nicht eindeutig ableitbar.

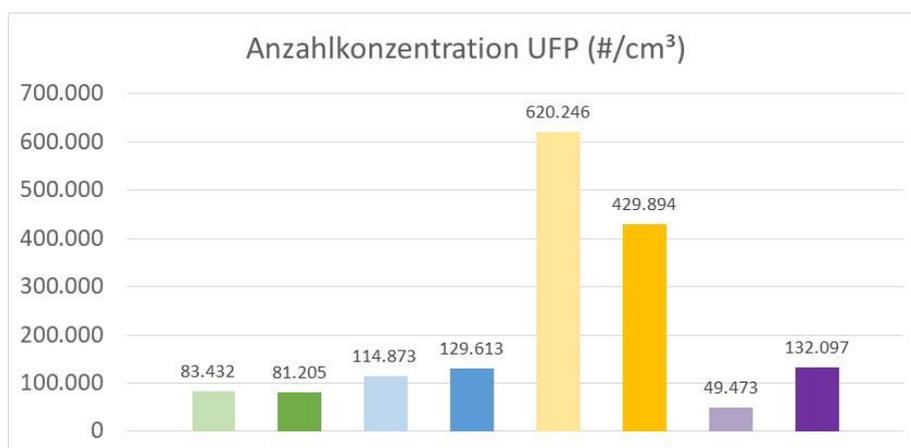
6.6.6 Inhalierete Dosis der Anzahlkonzentration UFP und der Massenkonzentration UFP in Abhängigkeit der Verkehrsmittel- und Routenwahl

Die Methode zur Berechnung der inhalierten Schadstoffdosis für die verschiedenen Verkehrsteilnehmer*innen wurden bereits im Kapitel 6.2.1 erläutert. Für die Analyse der inhalierten Dosis an Luftschadstoffen im ÖPNV wird neben der durchschnittlichen Belastung im Fahrzeug die Belastung an der Haltestelle mit einbezogen. Hierfür wird ein Durchschnittswert der gemessenen Belastungen an den verschiedenen Haltestellen sowie eine durchschnittliche Wartezeit von fünf Minuten angenommen. Bei dem Wartevorgang an den Haltestellen wird als Atemvolumen ein Durchschnittswert zwischen Stehen und Sitzen verwendet.

Analyse UFP

Partikelanzahlkonzentration UFP

In Abbildung 50 ist die durchschnittliche Partikelanzahlkonzentration UFP in Abhängigkeit der Verkehrsmittel- und Routenwahl unter Berücksichtigung des Atemvolumens je Aktivität und der jeweiligen Fahrdauer dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass Radfahrer*innen entlang der Hauptstrecke (B44) mit durchschnittlich 620.246 Partikeln/cm³ den höchsten Belastungen ausgesetzt sind. Die Belastungen entlang der Nebenstrecke sind mit 429.894 Partikeln/cm³ ca. 31% geringer im Vergleich zur Anzahlkonzentration UFP entlang der Hauptstrecke. Die geringste durchschnittliche Anzahlkonzentration UFP wurde bei der Nutzung der S-Bahn gemessen. Diese war mit 49.473 Partikeln/cm³ um ca. 63% geringer verglichen mit den Werten bei der Nutzung von Bus, U-Bahn und Tram. Bei dem Vergleich der Belastungen im Fahrzeuginnenraum der Pkw waren die Belastungen im Pkw_{Alt} je nach Routenwahl um ca. 38% (B44) bzw. ca. 63% (A66) höher verglichen zu den Belastungen im Pkw_{Neu}. Anhang 13 sind die durchschnittlichen Partikelanzahlkonzentrationen UFP zu entnehmen.



■ Pkw_{Neu} - B44
 ■ Pkw_{Neu} - A66
 ■ Pkw_{Alt} - B44
 ■ Pkw_{Alt} - A66
 ■ Fahrrad - B44
 ■ Fahrrad - Nebenstrecke
 ■ S-Bahn
 ■ Bus/U-Bahn/Tram

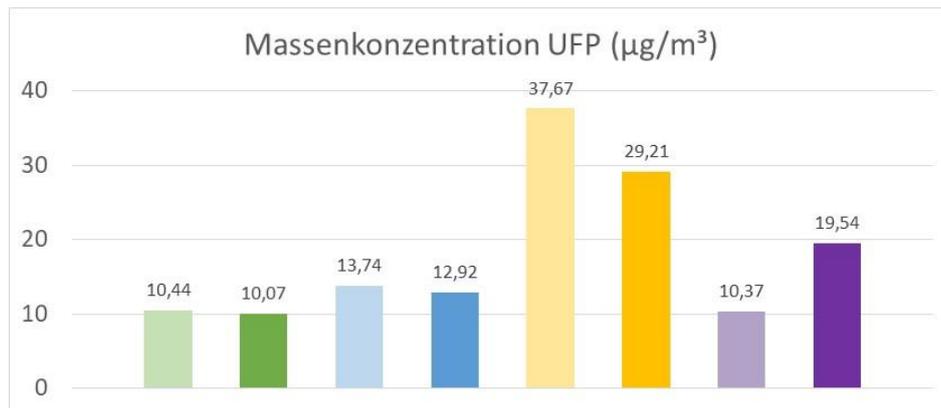
Stichprobenumfang n:

Pkw _{Neu} - B44	18	Fahrrad - B44	11
Pkw _{Neu} - A66	18	Fahrrad - Nebenstrecke	12
Pkw _{Alt} - B44	18	S-Bahn	16
Pkw _{Alt} - A66	18	Bus/U-Bahn/Tram	13

Abb. 50: Inhalierete Dosis der Anzahlkonzentration UFP in Abhängigkeit der Verkehrsmittel- und Routenwahl
Quelle: Eigene Darstellung

Massenkonzentration UFP

Bei der Betrachtung der inhalierten Dosis in Bezug auf die Massenkonzentration UFP ergibt sich ein sehr ähnliches Bild (s. Abb. 51) wie bei der Partikelanzahlkonzentration. Mit 37,67 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ist die Belastung mit dem Fahrrad entlang der B44 am höchsten. Verglichen mit der Belastung entlang der Nebenstrecke liegt sie um 29% höher. Bei der Betrachtung des ÖPNV ist die durchschnittliche Belastung in der S-Bahn mit 10,37 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 47% unterhalb der Belastung der Strecke mit Bus, U-Bahn und Tram. Wie bei der inhalierten Dosis der Anzahlkonzentration UFP sind die Belastungen im Pkw_{Alt} etwas höher verglichen zu den Messungen im Pkw_{Neu}. Es handelt sich hierbei um ein Plus von ca. 32% (B44) bzw. ca. 28% (A66). Eine zusätzliche tabellarische Übersicht der Partikelmassen UFP ist Anhang 13 zu entnehmen.



■ Pkw_{Neu} - B44
 ■ Pkw_{Neu} - A66
 ■ Pkw_{Alt} - B44
 ■ Pkw_{Alt} - A66
 ■ Fahrrad - B44
 ■ Fahrrad - Nebenst.
 ■ S-Bahn
 ■ Bus/U-Bahn/Tram

Stichprobenumfang n:

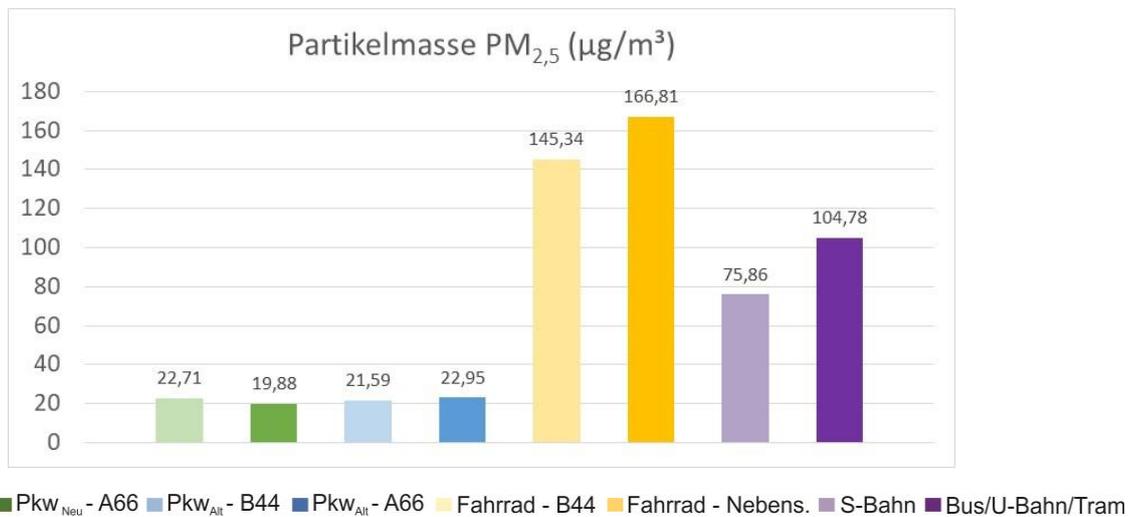
Pkw _{Neu} - B44	18	Fahrrad - B44	11
Pkw _{Neu} - A66	18	Fahrrad - Nebenstrecke	12
Pkw _{Alt} - B44	18	S-Bahn	16
Pkw _{Alt} - A66	18	Bus, U-Bahn, Tram	13

Abb. 51: Inhalierte Dosis der Massenkonzentration UFP in Abhängigkeit der Verkehrsmittel- und Routenwahl
Quelle: Eigene Darstellung

Analyse PM_{2,5} und PM₁₀

Partikelmasse PM_{2,5}

Abbildung 52 zeigt die durchschnittliche inhalierte Dosis der Partikelmasse von PM_{2,5} in Abhängigkeit der Verkehrsmittel- und Routenwahl. Die höchste Belastung tritt bei der Nutzung des Fahrrads entlang der Nebenstrecke auf. Sie liegt mit 166,81 µg/m³ ca. 15% über der durchschnittlichen Belastung entlang der Hauptstrecke (145,34 µg/m³). Beim ÖPNV liegt die Belastung in Bus, U-Bahn und Tram bei 104,78 µg/m³ und ist somit 38% höher zu der Belastung in der S-Bahn, die bei 75,86 µg/m³ liegt. Den geringsten Belastungen waren die Verkehrsteilnehmer*innen bei der Nutzung des Pkw ausgesetzt. Hier befindet sich die durchschnittliche Partikelmasse von PM_{2,5} zwischen 19,88 µg/m³ und 22,95 µg/m³ und somit auf einem relativ ähnlichen Niveau unabhängig von der Nutzung des Pkw_{Alt} oder Pkw_{Neu} und unabhängig von der gewählten Route. In Anhang 13 ist die jeweilige Partikelmasse in Abhängigkeit der Verkehrsmittel- und Routenwahl tabellarisch zusammengefasst.



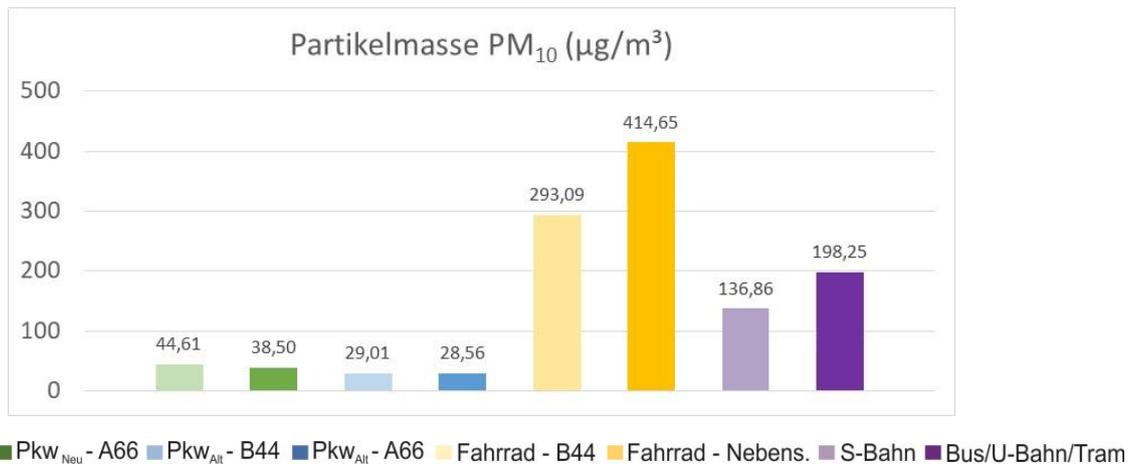
Stichprobenumfang n:

Pkw _{Neu} – B44	18	Fahrrad – B44	11
Pkw _{Neu} – A66	18	Fahrrad - Nebenstrecke	12
Pkw _{Alt} – B44	18	S-Bahn	16
Pkw _{Alt} – A66	18	Bus/U-Bahn/Tram	13

Abb. 52: Inhalierte Dosis der Partikelmasse PM_{2,5} in Abhängigkeit der Verkehrsmittel- und Routenwahl
Quelle: Eigene Darstellung

Partikelmasse PM₁₀

Die durchschnittlich inhalierte Dosis der Partikelmasse PM₁₀ ist in Abbildung 53 zu sehen. Die Belastungssituation ist vergleichbar mit der Belastung durch die Größenfraktion PM_{2,5}. Auch bei PM₁₀ sind Radfahrer*innen entlang der Nebenstrecke den höchsten Belastungen ausgesetzt. Mit 414,65 µg/m³ übersteigt sie die Belastung entlang der Hauptstrecke (293,09 µg/m³) um 41%. Im ÖPNV liegt die inhalierte Dosis der Partikelmasse von PM₁₀ bei der Nutzung von U-Bahn, Bus und Tram mit 198,25 µg/m³ ca. 45% über dem Wert bei der Nutzung der S-Bahn (136,86 µg/m³). Bei der Nutzung des Pkws sind die Belastungen im Fahrzeuginnenraum des Pkw_{Alt} 35% (B44) bzw. 26% (A66) geringer verglichen mit dem Pkw_{Neu}. Im Anhang 13 sind die entsprechenden Partikelmassen für PM₁₀ tabellarisch dargestellt.



Stichprobenumfang n:

Pkw _{Neu} - B44	18	Fahrrad - B44	11
Pkw _{Neu} - A66	18	Fahrrad - Nebenstrecke	12
Pkw _{Alt} - B44	18	S-Bahn	16
Pkw _{Alt} - A66	18	Bus/U-Bahn/Tram	13

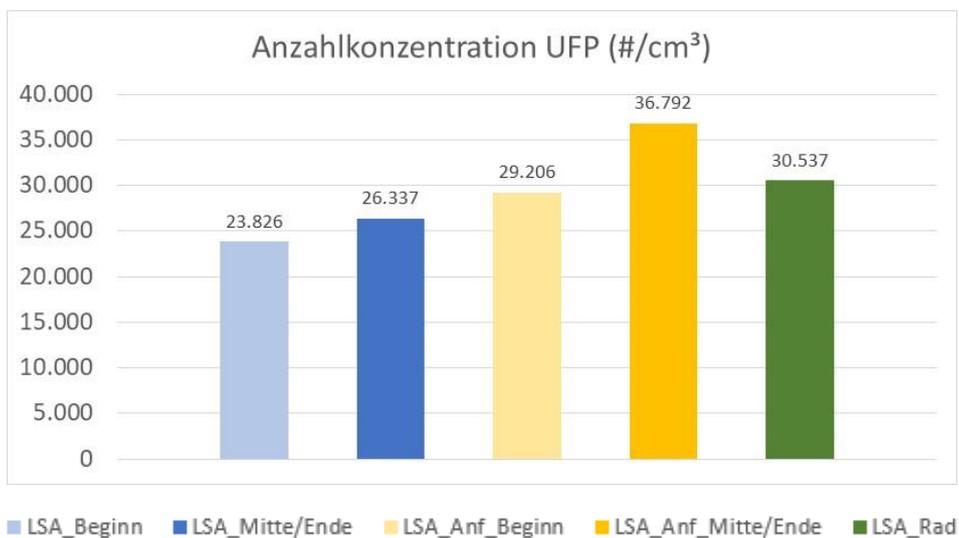
Abb. 53: Inhalierte Dosis der Partikelmasse PM₁₀ in Abhängigkeit der Verkehrsmittel- und Routenwahl
Quelle: Eigene Darstellung

6.6.7 Detailanalyse Messungen Radverkehr

Für die detaillierte Analyse der Exposition von Radfahrer*innen gegenüber Luftschadstoffen wurden die Belastungen in Abhängigkeit der zuvor definierten Situationen getrennt für die Strecke entlang der B44 und die Nebenstrecke ausgewertet (s. Kap. 6.4.3). Für die Analyse der Auswirkungen auf die Belastung durch UFP wurde die durchschnittliche Partikelanzahlkonzentration analysiert. Die Untersuchungen von PM_{2,5} und PM₁₀ beziehen sich auf die jeweils während der definierten Situationen durchschnittliche Partikelmasse.

Analyse UFP

In Abbildung 54 ist die durchschnittliche Partikelanzahlkonzentration UFP in Abhängigkeit verschiedener Situationen an Lichtsignalanlagen entlang der B44 dargestellt. Aus dem Diagramm geht hervor, dass die Belastung durch UFP während Wartevorgänge an LSA vor der Warteschlange des Kfz-Verkehrs (23.826 UFP/cm³) ca. 10% geringer sind als bei Wartevorgängen, bei denen Radfahrer*innen in der Mitte oder am Ende der Warteschlange des Kfz-Verkehrs wartet (26.337 UFP/cm³). Auch bei den Anfahrvorgängen gibt es Unterschiede bei der durchschnittlichen Anzahlkonzentration UFP in Abhängigkeit der Aufstellposition während Wartevorgängen. Während Anfahrvorgängen in der Mitte oder am Ende der Warteschlange an einer LSA liegt die Belastung mit durchschnittlich 36.792 UFP/cm³ ca. 25% über den Belastungen während Anfahrvorgängen nach dem Warten in erster Position der Warteschlange (29.206 UFP/cm³). Die Belastung während Wartevorgängen auf gesonderten Radwegen an LSA liegt mit durchschnittlich 30.537 Partikeln/cm³ über dem Niveau der anderen Wartevorgänge. Dies ist wahrscheinlich durch die hohe Anzahl vorbeifahrender Kfz zu begründen.



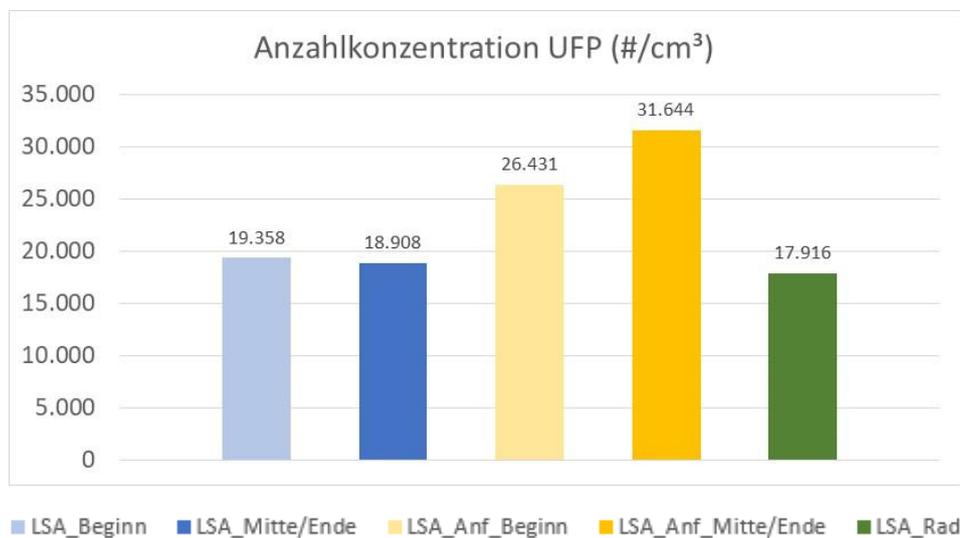
Stichprobenumfang n*:

LSA_Beginn	68	LSA_Anf_Beginn	64	LSA_Rad	40
LSA_Mitte/Ende	45	LSA_Anf_Mitte/Ende	45		

* Der Stichprobenumfang n bezieht sich auf die Anzahl der analysierten Situationen, die während der insgesamt 11 Wege, die mit dem Fahrrad entlang der B44 zurückgelegt wurden, erfasst wurden.

Abb. 54: Anzahlkonzentration UFP nach Situationen im Radverkehr
Quelle: Eigene Darstellung

Neben der Detailanalyse der Messungen entlang der B44 wurden die entlang der Nebenstrecke gesammelten Daten genauer analysiert. Abbildung 55 ist die Auswertung der verschiedenen Situationen zu entnehmen. Mit durchschnittlich 19.358 Partikeln/cm³ liegt die Belastung während der Wartevorgängen an LSA vor dem Kfz-Verkehr auf einem ähnlichen Niveau verglichen zu den Wartevorgängen in der Mitte oder am Ende der Warteschlange (18.908 Partikel/cm³). Die Begründung hierfür wird in den geringeren Verkehrsbelastungen entlang der Nebenstrecke und somit auch im Bereich der LSA gesehen. Bei den Anfahrvorgängen wurden, wie auch entlang der B44 unterschiedliche Belastungen in Abhängigkeit der Warteposition an LSA festgestellt. Bei Anfahrvorgängen nach den Wartevorgängen in der Mitte oder am Ende der Warteschlange des Kfz-Verkehrs lag die Belastung mit durchschnittlich 31.644 Partikeln/cm³ um fast 20% über der Belastung nach Wartevorgängen an erster Position der Warteschlange (26.431 Partikel/cm³). Die Belastung während der Wartevorgänge an LSA entlang gesondert geführten Radwegen ist mit 17.916 Partikeln/cm³ wesentlich geringer verglichen zu den Belastungen während Wartevorgängen auf Radwegen, die sich entlang der B44 befinden.



Stichprobenumfang n*:

LSA_Beginn	31	LSA_Anf_Beginn	28	LSA_Rad	102
LSA_Mitte/Ende	19	LSA_Anf_Mitte/Ende	20		

* Der Stichprobenumfang n bezieht sich auf die Anzahl der analysierten Situationen, die während der insgesamt 12 Wege, die mit dem Fahrrad entlang der Nebenstrecke zurückgelegt wurden, erfasst wurden.

Abb. 55: Anzahlkonzentration UFP nach Situationen im Radverkehr
Quelle: Eigene Darstellung

Analyse PM_{2,5} und PM₁₀

Die Auswertung der Messdaten der Partikelgrößen PM_{2,5} und PM₁₀ hat ergeben, dass die Daten unzureichend sind, um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten. Dies ist auf das Erfassungsintervall bei der Messung von PM_{2,5} und PM₁₀ zurückzuführen. Die Daten werden in einem 6s-Intervall erfasst, sodass je nach betrachteter Situation teilweise nur ein Messwert vorhanden ist, was am Ende zu einer unzureichenden Datenlage für die Auswertung nach Situationen führt.

6.6.8 Detailanalyse Messungen ÖPNV

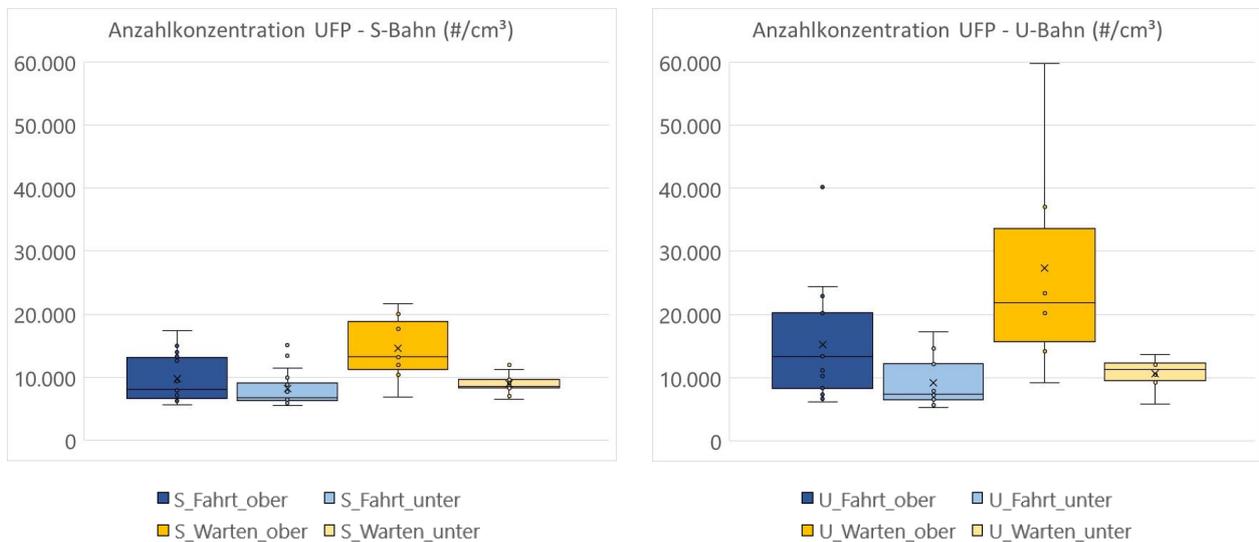
Für die in Kapitel 6.4.3 definierten Situationen im ÖPNV wurden die Belastungen durch UFP, PM_{2,5} und PM₁₀ untersucht. Für die Exposition gegenüber UFP wurde die durchschnittliche Partikelanzahlkonzentration während der Fahrt ober- bzw. unterirdisch sowie während ober- bzw. unterirdischer Wartevorgänge ausgewertet. Die Untersuchungen von PM_{2,5} und PM₁₀ haben sich auf die jeweils während der definierten Situationen durchschnittliche Partikelmasse bezogen.

Analyse UFP

Die durchschnittlichen Partikelanzahlkonzentrationen UFP während der ober- bzw. unterirdischen Fahrt- und Wartevorgänge sind für die S-Bahn sowie die Fahrten mit U-Bahn Abbildung 56 zu entnehmen. Bei einem ersten Vergleich der verschiedenen Situationen zwischen S-Bahn und U-Bahn kann festgestellt werden, dass die Belastungen durch UFP in der S-Bahn geringer ausfallen verglichen mit der Belastung in der U-Bahn.

Beim Vergleich der verschiedenen Situationen bei der Nutzung der S-Bahn ergibt sich, dass bei Fahrten im Verlauf des unterirdischen Streckenabschnitts die durchschnittliche Anzahl UFP mit 8.144 Partikel/cm³ ca. 17% unter der durchschnittlichen Belastung während Fahrten entlang des oberirdischen Streckenabschnitts (9.788 Partikeln/cm³) liegt. Bei den Wartevorgängen ist die Belastung an unterirdischen Haltestellen mit 8.943 Partikeln/cm³ ca. 38% geringer verglichen mit den Belastungen während Wartevorgängen an oberirdischen Haltestellen mit 14.537 Partikeln/cm³.

Bei der Analyse der Situationen der Fahrten mit der U-Bahn zeigt sich, dass die Fahrten mit unterirdischem Verlauf mit 9.148 Partikeln/cm³ um ca. 40% geringer sind als Fahrten, die entlang des oberirdischen Streckennetzes verlaufen (15.287 Partikel/cm³). Die Belastungen während Wartevorgängen an unterirdischen Haltestellen liegen mit 10.618 Partikeln/cm³ ca. 61 % unter den Belastungen an oberirdischen Haltestellen (27.299 Partikel/cm³).



Stichprobenumfang n

S_Fahrt_ober	16
S_Fahrt_unter	16
S_Warten_ober	7
S_Warten_unter	9

Stichprobenumfang n

U_Fahrt_ober	13
U_Fahrt_unter	13
U_Warten_ober	7
U_Warten_unter	6

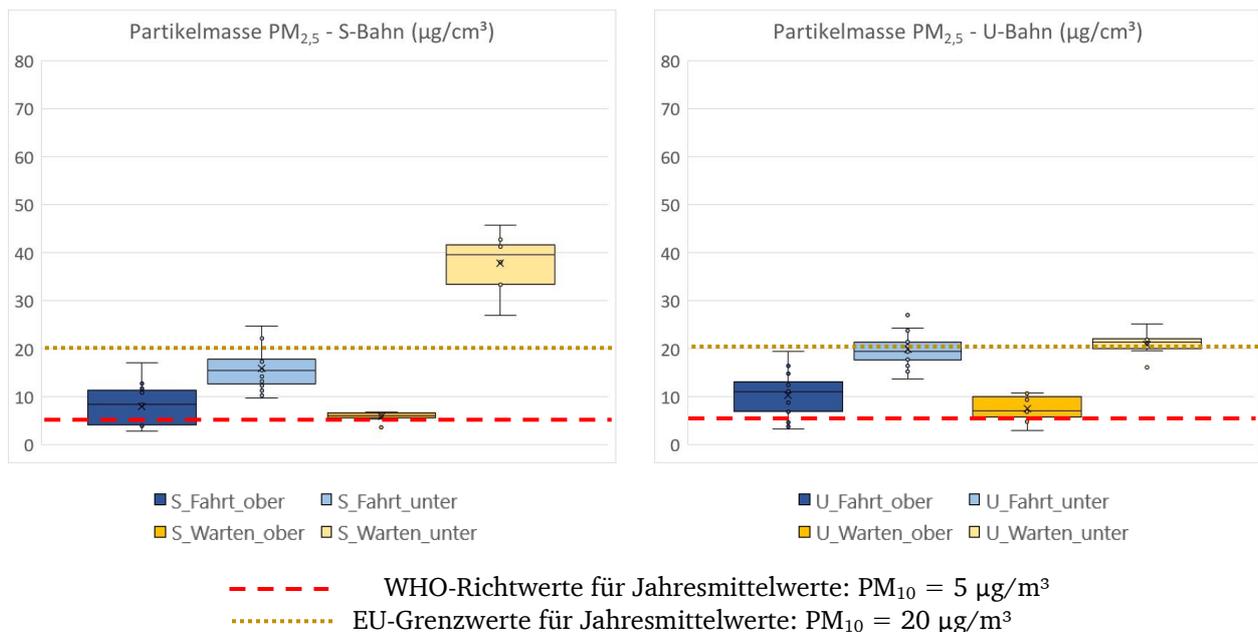
Abb. 56: Durchschnittliche Anzahlkonzentrationen UFP nach Situationen im ÖPNV
Quelle: Eigene Darstellung

Analyse PM_{2,5} und PM₁₀

Partikelmasse PM_{2,5}

Abbildung 57 zeigt die durchschnittliche Partikelmasse PM_{2,5} während verschiedener Situationen bei der Fahrt mit der S-Bahn und U-Bahn. Während der oberirdischen Fahrt mit der S-Bahn ist die Belastung durch PM_{2,5} mit 7,94 µg/cm³ um knapp die Hälfte geringer als bei unterirdischen Fahrten, die eine durchschnittliche Belastung von 16,00 µg/cm³ aufweisen. Bei den Wartevorgängen wurde an unterirdischen Haltestellen ebenfalls eine höhere Partikelmasse von PM_{2,5} gemessen. Hier lag die durchschnittliche Belastung mit 37,87 µg/cm³ während Wartevorgängen an unterirdischen Haltestellen sogar fast um das 6,5-fache über dem Niveau an oberirdischen Haltestellen (5,87 µg/cm³).

Auch bei der Analyse der Messungen in der U-Bahn zeigt sich, dass die Belastung durch PM_{2,5} während der unterirdischen Fahrt- und Wartevorgänge höher sind als während vergleichbarer oberirdischer Situationen. Die Belastung im Fahrzeug waren entlang des unterirdischen Streckenverlaufs mit 19,86 µg/cm³ ca. 92% höher verglichen mit der Belastung während oberirdischer Fahrten (10,35 µg/cm³). Während der Wartevorgänge können vergleichbare Unterschiede festgestellt werden. Die durchschnittliche Belastung liegt an unterirdischen Haltestellen (20,99 µg/cm³) fast 2,8-mal über der Belastung an unterirdischen Haltestellen mit 7,55 µg/cm³.



Stichprobenumfang n:

S_Fahrt_ober	16
S_Fahrt_unter	16
S_Warten_ober	7
S_Warten_unter	9

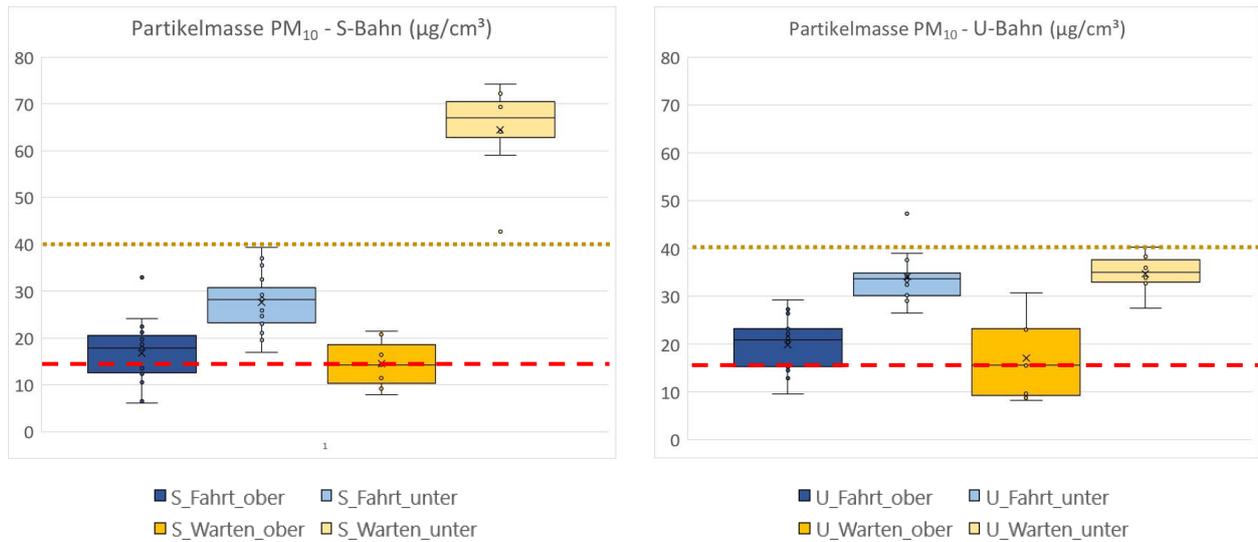
Stichprobenumfang n:

U_Fahrt_ober	13
U_Fahrt_unter	13
U_Warten_ober	7
U_Warten_unter	6

Abb. 57: Durchschnittliche Partikelmasse PM_{2,5} nach Situationen im ÖPNV
Quelle: Eigene Darstellung

Partikelmasse PM₁₀

Die durchschnittliche Partikelmasse von PM₁₀ abhängig von ober- bzw. unterirdischen Warte- und Fahrtvorgängen in S- und U-Bahn ist in Abbildung 58 dargestellt. Bei PM₁₀ ist die Belastung ebenfalls während der oberirdischen Fahrt geringer verglichen mit der Fahrt entlang des unterirdischen Streckenverlaufs. Bei der oberirdischen S-Bahnfahrt liegt sie mit 16,74 µg/cm³ ca. 65% unter der Belastung von unterirdischen S-Bahn-Fahrten (27,60 µg/cm³). Während der Wartevorgänge auf die S-Bahn ist die Belastung an unterirdischen Haltestellen mit 65,54 µg/cm³ ca. 4,5-mal höher als die Belastung an oberirdischen Haltestellen (14,53 µg/cm³). Bei den Fahrten mit der U-Bahn wurden oberirdisch 19,94 µg/cm³ gemessen und somit ca. 42% weniger als bei den unterirdischen Fahrten mit 34,09 µg/cm³. Bei den Wartevorgängen ist die Belastung unterirdisch mit 34,80 µg/cm³ doppelt so hoch als während der oberirdischen Wartevorgänge (17,12 µg/cm³).



--- WHO-Richtwerte für Jahresmittelwerte: PM₁₀ = 15 µg/m³

..... EU-Grenzwerte für Jahresmittelwerte: PM₁₀ = 40 µg/m³

Stichprobenumfang n:

S_Fahrt_ober	16
S_Fahrt_unter	16
S_Warten_ober	7
S_Warten_unter	9

Stichprobenumfang n:

U_Fahrt_ober	13
U_Fahrt_unter	13
U_Warten_ober	7
U_Warten_unter	6

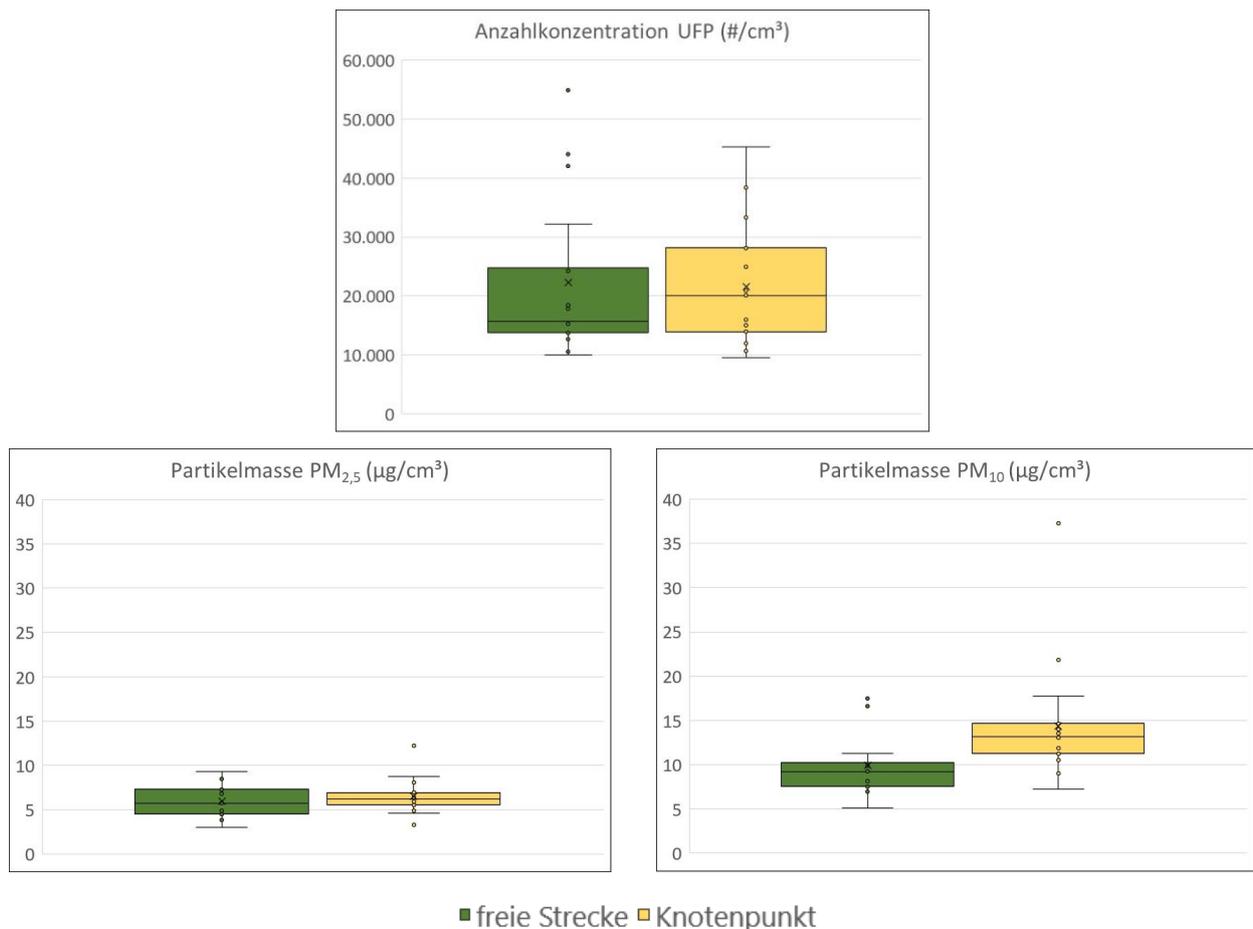
Abb. 58: Durchschnittliche Partikelmasse PM₁₀ nach Situation im ÖPNV
Quelle: Eigene Darstellung

6.6.9 Städtebauliche Auswertung der Messdaten

Für die Analyse der Auswirkungen städtebaulicher Einflussfaktoren auf die Luftschadstoffbelastung wurden die Belastungen durch die Partikelanzahlkonzentration UFP sowie die Partikelmasse von $PM_{2,5}$ und PM_{10} analysiert. Aufgrund der Komplexität der städtebaulichen Charakteristika wurde sich auf den Streckenverlauf (freie Strecke/Knotenpunkt), die Bauweise (keine Bebauung/offen/halboffen/geschlossen) sowie die Nutzung (Verkehr/Grünfläche /Fußgängerzone/Baustelle) beschränkt. Im Folgenden werden die Ergebnisse der jeweiligen Analyse dargestellt.

Analyse Streckenverlauf

Bei der Analyse des Streckenverlaufs wurden die Messwerte getrennt nach den Kategorien „freie Strecke“ und „Knotenpunkt“ ausgewertet (siehe Abbildung 59). Bei der Betrachtung der durchschnittlichen Anzahl UFP ist bei den beiden Kategorien kein wesentlicher Unterschied in der Belastung zu erkennen (freie Strecke: 22.290 Partikel/ cm^3 und Knotenpunkt: 21.538 Partikel/ cm^3). Auch die durchschnittlichen Belastungen durch die Partikelmasse $PM_{2,5}$ liegt bei den Messungen entlang der freien Strecke mit $5,94 \mu g/cm^3$ etwa 10% niedriger als an Knotenpunkten mit $6,56 \mu g/cm^3$. Bei der Betrachtung der durchschnittlichen Belastungen durch die Partikelmasse PM_{10} fällt auf, dass die Belastungen am Knotenpunkt mit $14,37 \mu g/cm^3$ etwa 45% über der Belastung auf der freien Strecke ($9,92 \mu g/cm^3$) liegen. Verantwortlich für die höheren Belastungen durch gröbere Partikel an Knotenpunkten könnten Brems- und Beschleunigungsvorgängen sein.



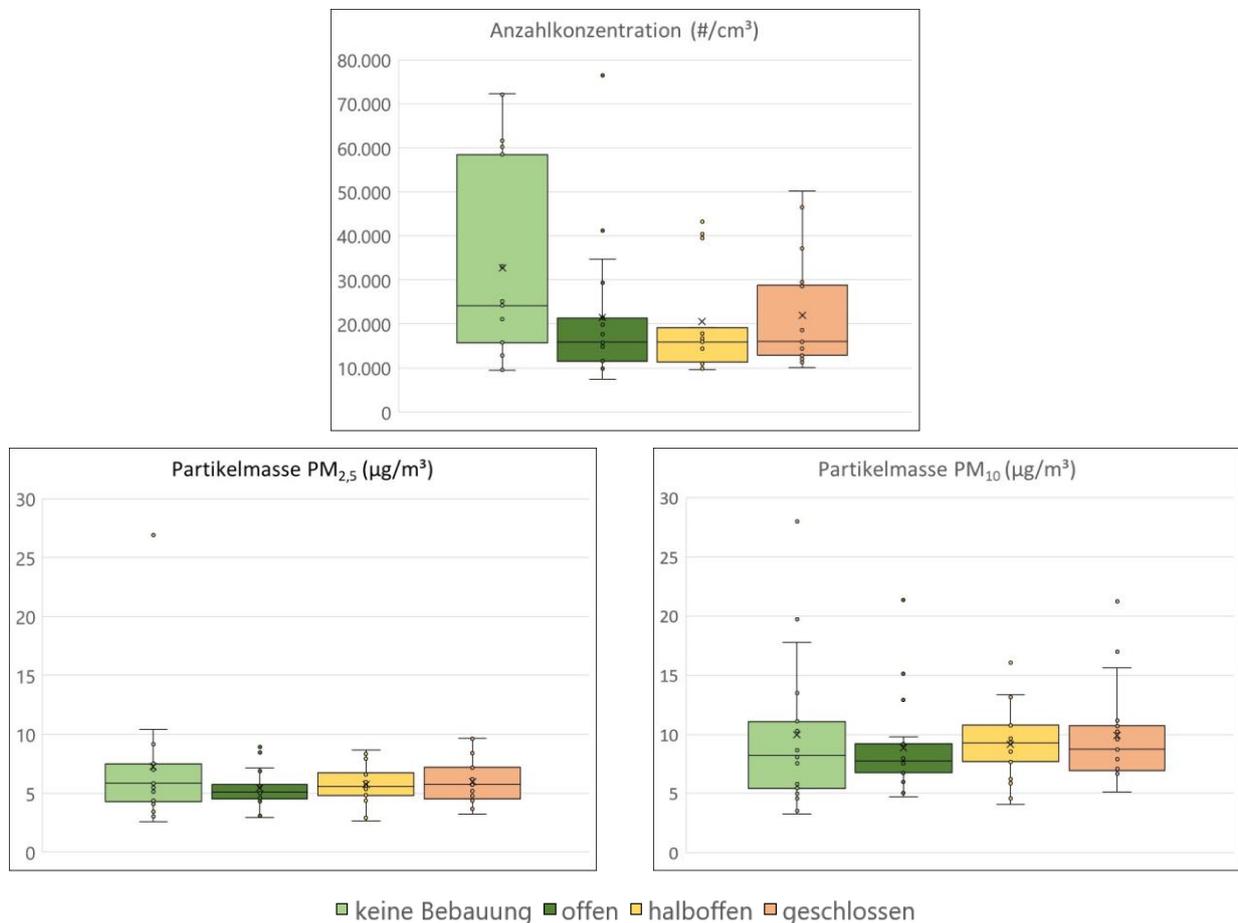
Stichprobenumfang n: 17

Abb. 59: Analyse städtebaulicher Einflüsse - Streckenverlauf
Quelle: Eigene Darstellung

Analyse Bauweise

Für die Analyse der Bauweise wurden die Belastungen in den Kategorien „keine Bebauung“, „offene“, „halboffene“ und „geschlossene“ Randbebauung untersucht. Die Analyse der Anzahl UFP in Abhängigkeit der Bebauung hat ergeben, dass die offene (21.445 Partikel/cm³), halboffene (20.561 Partikel/cm³) und geschlossene Bebauung (22.216 Partikel/cm³) alle auf ähnlichem Niveau liegen. Mit durchschnittlich 32.746 Partikel/cm³ ist die Anzahl UFP bei der Kategorie „keine Bebauung“ am höchsten. Dies ist allerdings höchstwahrscheinlich nicht auf die Bauweise, sondern auf die höhere Verkehrsbelastung auf anbaufreien Straßen zurückzuführen.

Die Auswertung der Daten der größeren Partikel haben ergeben, dass durch die gewählte Untersuchungsmethode der mobilen Messungen keine nennenswerten Unterschiede der Belastung durch die Bebauung erkennbar sind (PM_{2,5}: keine Bebauung – 7,25 µg/cm³; offene Bebauung – 5,46 µg/cm³; halboffene Bebauung – 5,75 µg/cm³; geschlossene Bebauung – 6,01 µg/cm³; PM₁₀: keine Bebauung – 9,97 µg/cm³; offene Bebauung – 8,84 µg/cm³; halboffene Bebauung – 9,18 µg/cm³; geschlossene Bebauung – 9,91 µg/cm³). Abbildung 60 zeigt die Belastungen für die Partikelanzahlkonzentration UFP sowie die Partikelmassen der größeren Partikel.



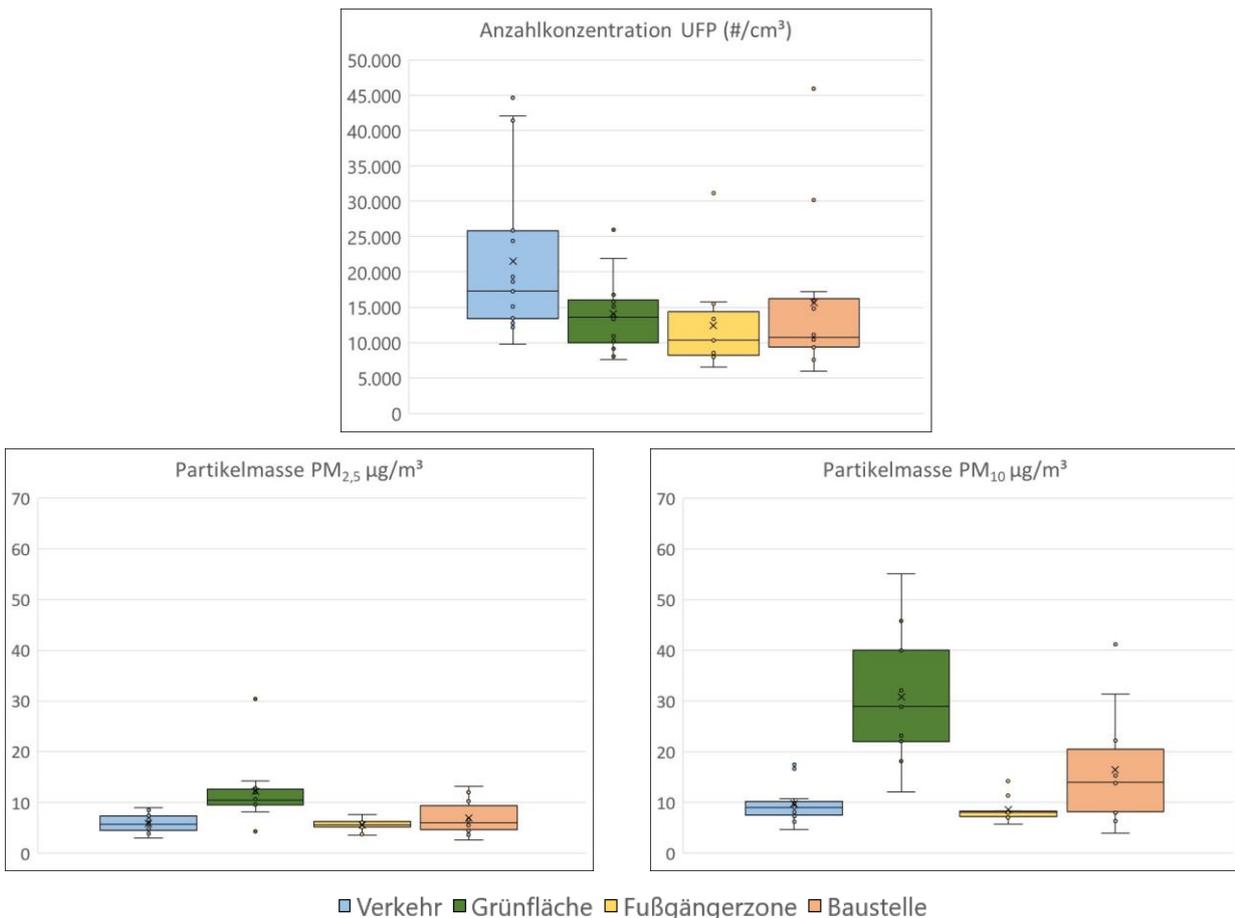
Stichprobenumfang n: 17

Abb. 60: Analyse städtebaulicher Einflüsse - Bauweise
Quelle: Eigene Darstellung

Analyse Nutzung

Für die Untersuchung der Auswirkungen verschiedener Nutzungen auf die Luftschadstoffbelastung wurden die Messdaten den Kategorien „Verkehr“, „Grünfläche“, „Fußgängerzone“ und „Baustelle“ zugeordnet. Die Ergebnisse der Analyse sind in Abbildung 61 dargestellt. Bei der Betrachtung der durchschnittlichen Anzahl UFP zeigte sich, dass der Wert bei den als „Verkehr“ definierten Messwerten erhöht ist (durchschnittlich 21.550 Partikel/cm³). Bei den Nutzungen „Grünfläche“, „Fußgängerzone“ und „Baustelle“ befindet sich die durchschnittliche Anzahl UFP mit 14.058 Partikel/cm³, 12.375 Partikel/cm³ und 15.646 Partikel/cm³ auf einem relativ ähnlichen Niveau.

Die Belastung durch die Partikelfraktion PM_{2,5} liegt bei den Nutzungen „Verkehr“ (5,88 µg/cm³), „Fußgängerzone“ (5,56 µg/cm³) und „Baustelle“ (6,99 µg/cm³) ähnlich hoch. Bei der Nutzung „Grünfläche“ ist die Belastung durch PM_{2,5} mit 12,19 µg/cm³ etwas höher, verglichen mit den anderen Nutzungen. Bei der Auswertung der Belastung von PM₁₀ fällt die mit 30,82 µg/cm³ hohe durchschnittliche Belastung bei der Nutzung „Grünfläche“ auf. Grund hierfür könnten die trockenen Wetterverhältnisse und damit verbundene Staubaufwirbelungen entlang der unbefestigten Rad- und Fußwege durch die Grünflächen sein. Mit 16,49 µg/cm³ scheint auch eine große Baustelle am Streckenverlauf der Nebenstrecke des Radverkehrs Auswirkungen auf die Belastung durch PM₁₀ zu haben. Die Nutzungen „Verkehr“ (9,73 µg/cm³) und „Fußgängerzone“ (8,57 µg/cm³) sind ähnlich hoch belastet.



Stichprobenumfang n: 17

Abb. 61: Analyse städtebaulicher Einflüsse - Nutzung
Quelle: Eigene Darstellung

6.6.10 Stationäre Messungen

Bei den stationären Messungen wurden für die Analyse der verkehrlichen, städtebaulichen und meteorologischen Einflussfaktoren auf die Luftschadstoffbelastung in einem ersten Schritt die Summe der Verkehrsbelastung über die Messdauer von fünf Stunden, die durchschnittliche Anzahl UFP, die durchschnittliche Partikelmasse $PM_{2,5}/PM_{10}$, die durchschnittliche Masse von NO und NO_2 sowie die durchschnittliche Windgeschwindigkeit an den jeweiligen Messtagen ermittelt (s. Tab. 26). Bei der Erfassung der Daten zu den Stickoxiden kam es häufig zu technischen Problemen, wie beispielsweise zu geringer Spannung durch die externe Stromversorgung oder Probleme mit dem Druck oder Ozonfluss innerhalb des Geräts, wodurch Daten verloren gingen und die Aussagekraft in Bezug auf die Belastungen durch Stickoxide eingeschränkt ist. Die genauen Messzeiten, zu denen Stickoxide erfasst wurden können Anhang 15 entnommen werden. Mithilfe einer Korrelationsanalyse wurde die Ausprägung des statistischen Zusammenhangs zwischen Immissionskenngrößen und Verkehrsbelastungen bzw. meteorologischen Werten ermittelt. Der Korrelationskoeffizient kann hierbei Werte zwischen $+1$ und -1 annehmen. Liegt der Koeffizient bei ± 1 handelt es sich um einen sehr starken Zusammenhang, wobei bei negativem Wert die Merkmalsausprägungen gegenseitig verlaufen. Bei einem Korrelationskoeffizienten von $0,5$ liegt eine starke, bei einem Wert von $0,3$ eine moderate und bei einem Wert von $0,1$ liegt nur noch eine schwache Korrelation vor. Bei einer ersten Gegenüberstellung der Summe der Fahrzeuge mit den verschiedenen Luftschadstoffbelastungen liegt für den Zusammenhang zwischen der durchschnittlichen Anzahl an UFP und der Verkehrsbelastung keine Korrelation vor. Für die Partikelmassen von $PM_{2,5}$ und PM_{10} kann mit jeweils einem Korrelationskoeffizienten von $+0,5$ ein starker Zusammenhang zwischen den der Luftschadstoffbelastung und der Verkehrsbelastung nachgewiesen werden.

Tab. 26: Durchschnittliche Verkehrs- und Luftschadstoffbelastungen während der stationären Messungen
Quelle: Eigene Darstellung

Datum	Erhebungszeit	Messstelle	Summe Fz ¹⁾	Anzahl UFP (#/cm ³)	Masse PM _{2,5} (µg/cm ³)	Masse PM ₁₀ (µg/cm ³)	Masse NO (µg/cm ³)	Masse NO ₂ (µg/cm ³)	Ø V _{wind} (km/h)
04.08.	08:00 – 13:00	Lorscher Str.	3.010	6.617	4,4	9,3	13,06	17,9	5,79
	14:00 – 19:00	Thudichumstr.	2.825	7.960	5,4	13,8	12,27	15,5	3,58
05.08.	08:00 – 13:00	Thudichumstr.	2.794	34.403	14,0	26,0	- ²⁾	- ²⁾	4,07
	14:00 – 19:00	Lorscher Str.	2.928	11.391	6,3	11,3	- ²⁾	- ²⁾	6,03
06.08.	08:00 – 13:00	Reuterweg	5.081	12.024	9,0	19,7	26,5	33,2	4,98
	14:00 – 19:00	Miquelallee	10.140	10.201	5,3	10,7	16,0	23,9	4,23
07.08.	08:00 – 13:00	Miquelallee	6.634	11.982	12,3	27,5	- ²⁾	- ²⁾	3,14
	14:00 – 19:00	Reuterweg	5.564	7.521	8,3	14,4	- ²⁾	- ²⁾	5,22
15.09.	08:00 – 13:00	Reuterweg	3.016	21.495	16,2	29,3	- ²⁾	- ²⁾	4,39
	14:00 – 19:00	Reuterweg	6.580	12.691	13,0	24,0	- ²⁾	- ²⁾	6,03
16.09.	08:00 – 13:00	Miquelallee	10.078	19.624	24,7	51,6	46,0	52,7	- ³⁾
	14:00 – 19:00	Miquelallee	11.146	24.822	15,4	31,9	22,9	55,2	- ³⁾
17.09.	08:00 – 13:00	Lorscher Str.	4.015	7.258	12,3	24,3	14,6	14,7	7,12
	14:00 – 19:00	Thudichumstr.	3.010	8.835	5,9	14,6	23,4	22,5	5,43
18.09.	08:00 – 13:00	Thudichumstr.	3.206	23.325	6,2	20,5	- ²⁾	- ²⁾	4,85
	14:00 – 19:00	Lorscher Str.	3.876	23.356	7,4	17,0	-	-	6,00

¹⁾ Fz-Einheiten nach Emissionen

²⁾ Keine Daten zur Stickoxidbelastung vorhanden

³⁾ Keine Daten zur Windgeschwindigkeit vorhanden

Blau: Überschreitung der WHO-Richtwerte für Jahresmittelwerte
(PM_{2,5} = 5 µg/m³; PM₁₀ = 15 µg/m³; NO₂ = 10 µg/m³)

In einem weiteren Schritt wurden die Zusammenhänge durch Betrachtung der 15-Minuten-Messintervalle detaillierter analysiert. Tabelle 27 zeigt, dass bei dieser Betrachtung nur bei wenigen Messungen die Zusammenhänge zwischen der Verkehrsbelastung und der Luftschadstoffbelastung durch eine Korrelationsanalyse darstellbar sind (in der Tabelle fett geschriebene Korrelationskoeffizienten).

Tab. 27: Ergebnisse der Korrelationsanalyse zwischen Luftschadstoffen und Verkehrsbelastung
 Quelle: Eigene Darstellung

Datum	Erhebungszeit	Messstelle	Korellationskoeffizienten für Analyse zwischen Luftschadstoffen und Verkehrsbelastung		
			Ø Anzahl UFP	Ø Masse PM _{2,5}	Ø Masse PM ₁₀
04.08.	08:00 – 13:00	Lorscher Str.	0,02	0,01	0,09
	14:00 – 19:00	Thudichumstr.	-0,10	0,34	0,51
05.08.	08:00 – 13:00	Thudichumstr.	0,14	-0,36	-0,15
	14:00 – 19:00	Lorscher Str.	-0,33	-0,11	0,09
06.08.	08:00 – 13:00	Reuterweg	0,77	0,70	0,63
	14:00 – 19:00	Miquelallee	0,41	-0,27	-0,35
07.08.	08:00 – 13:00	Miquelallee	0,00	0,57	0,54
	14:00 – 19:00	Reuterweg	-0,33	-0,09	-0,11
15.09.	08:00 – 13:00	Reuterweg	-0,27	-0,27	-0,22
	14:00 – 19:00	Reuterweg	0,19	0,22	0,21
16.09.	08:00 – 13:00	Miquelallee	0,78	-0,34	-0,65
	14:00 – 19:00	Miquelallee	0,57	-0,52	-0,39
17.09.	08:00 – 13:00	Lorscher Str.	0,45	0,24	0,22
	14:00 – 19:00	Thudichumstr.	0,05	-0,28	-0,26
18.09.	08:00 – 13:00	Thudichumstr.	0,10	-0,39	-0,23
	14:00 – 19:00	Lorscher Str.	0,02	-0,20	-0,24

Um den Einfluss des jeweiligen Straßenraumtyps zu untersuchen wurde der Quotient aus der Luftschadstoffbelastung durch UFP, PM_{2,5} und PM₁₀ sowie der Verkehrsbelastung gebildet. Somit konnten Aussagen über die Immissionen pro Fahrzeug getroffen werden, um anschließend analysieren zu können, ob sich Unterschieden bei den Immissionen in Abhängigkeit des Straßentyps ergeben. Bei dem Vergleich der verschiedenen Straßenraumtypen fällt vor allem der Betrachtung der Belastungen durch UFP auf, dass die Lorscher Straße und die Thudichumstraße (hohe, geschlossene Bebauung; geringe Breite) eine größere Streuung der Luftschadstoffbelastungen im Vergleich zu den Belastungen im Reuterweg und der Miquelallee vorweisen (s. Abb. 62-65). In der Thudichumstraße liegen noch etwas höhere Werte vor verglichen zur Lorscher Straße, was an der unterschiedlichen Belüftungssituation liegen kann. Die geringste Streuung der Werte liegt wurde in der Miquelallee festgestellt. Dies kann auf die offene Bauweise und den sehr breiten Straßenquerschnitt zurückzuführen sein. Die Belastungen durch die Partikelmasse von PM_{2,5} und PM₁₀ je Fahrzeug an den jeweiligen Messquerschnitten können den Abbildungen in Anhang 16 und 17 entnommen werden.

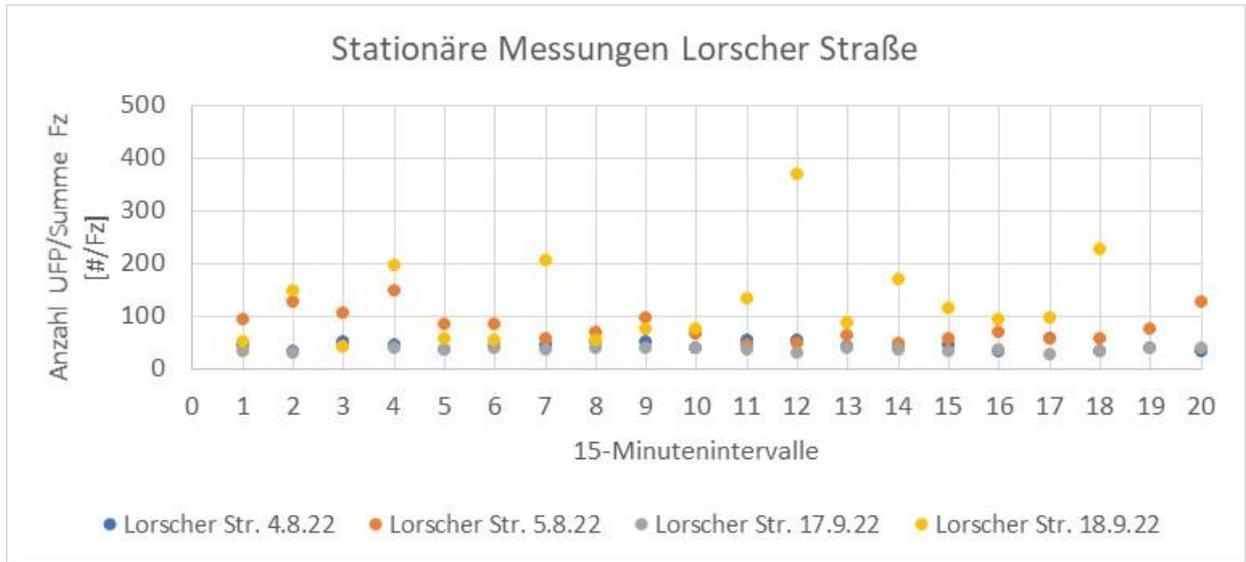


Abb. 62: Ergebnisse stationäre Messungen UFP Loscher Straße
Quelle: Eigene Darstellung

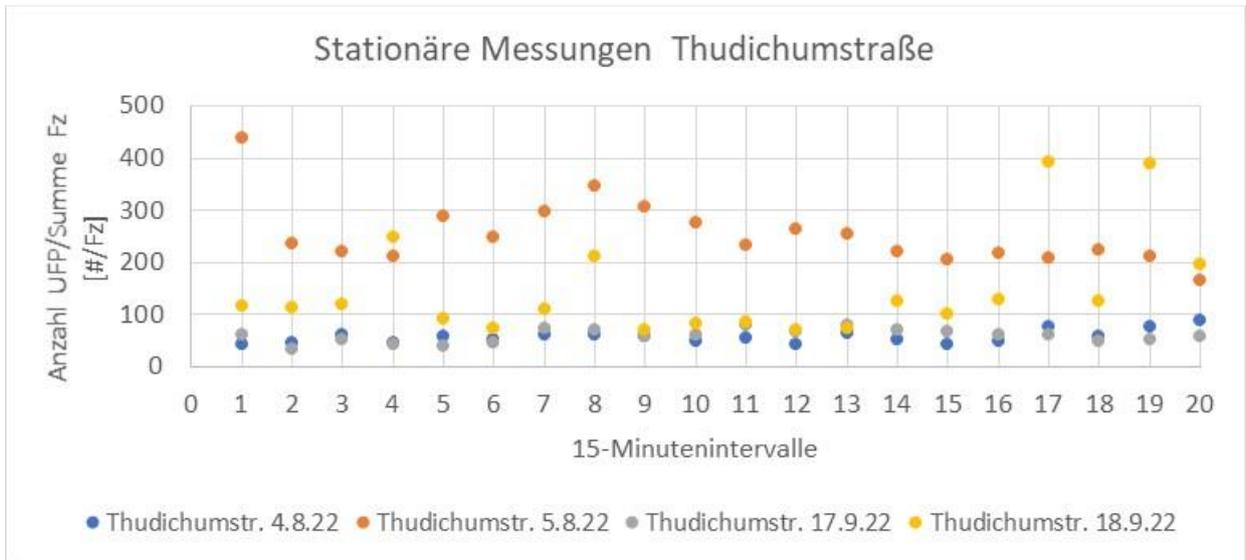


Abb. 63: Ergebnisse stationäre Messungen UFP Thudichumstraße
Quelle: Eigene Darstellung

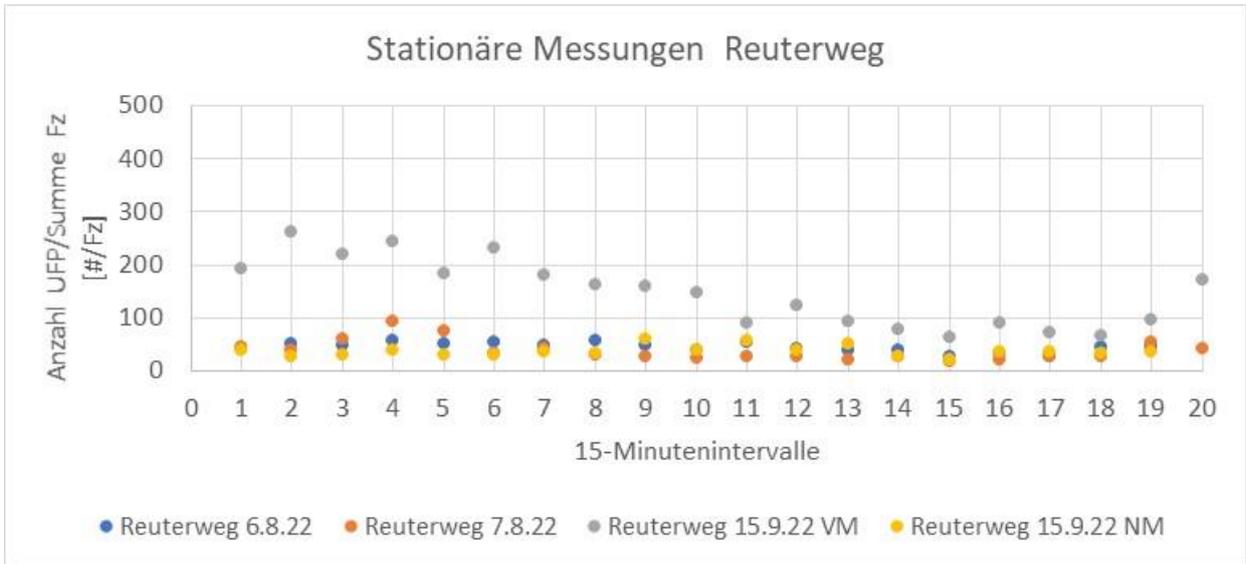


Abb. 64: Ergebnisse stationäre Messungen UFP Reuterweg
Quelle: Eigene Darstellung

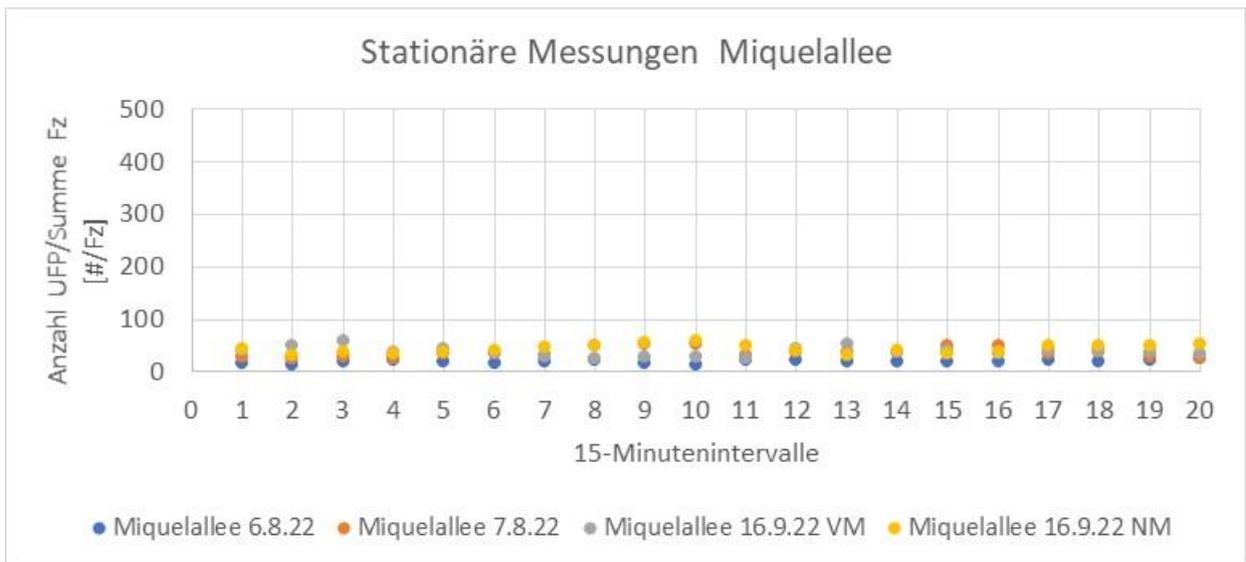


Abb. 65: Ergebnisse stationäre Messungen UFP Miquelallee
Quelle: Eigene Darstellung

6.7 Ergebnisse der Messungen in Vietnam

6.7.1 Analyse Fahrtzeiten

Die Analyse der gesammelten Daten aus Vietnam hat in Bezug auf die Fahrtzeit ergeben, dass bei gleichen Strecken und ähnlichen Verkehrsbedingungen das Motorrad mit einer durchschnittlichen Fahrtzeit von 22 Minuten pro Fahrt das schnellste Verkehrsmittel ist. Bei der Fahrt mit dem Pkw, Bus (nur Fahrtzeit im Fahrzeug ohne Wartezeiten) und Fahrrad wurde mit 29 Minuten jeweils die gleiche Fahrtzeit benötigt. Bei der Betrachtung der drei Messzeiten dauerte die Fahrt während der Hauptverkehrszeiten am Nachmittag für alle Verkehrsträger am längsten. Mit durchschnittlich 43 Minuten pro Fahrt wurde mit dem Pkw für die Strecke während der nachmittäglichen Spitzenstunde am meisten Zeit benötigt.

6.7.2 Exposition gegenüber Luftschadstoffen in Abhängigkeit der Verkehrsmittelwahl

Die gewonnenen Daten wurden auf die Auswirkungen der Verkehrsmittelwahl auf die Exposition der Verkehrsteilnehmer*innen gegenüber Luftschadstoffen untersucht. Abbildung 66 zeigt die durchschnittliche LDSA, die Partikelanzahlkonzentrationen, die Massenkonzentrationen und die durchschnittliche Partikelgröße UFP aller zurückgelegten Wege in Abhängigkeit der Verkehrsmittelwahl. Insgesamt waren Pkw- und Buspendler*innen den niedrigsten Konzentrationen von LDSA sowie Anzahl- und Massenkonzentration UFP ausgesetzt. Im Gegensatz dazu waren die Belastungen bei der Nutzung des Motorrads bzw. Fahrrads am höchsten. Auch während der Wartevorgänge an den Bushaltestellen bei den Messungen zu Fuß war die Luftverschmutzung relativ hoch. Im Anhang 14 sind die entsprechenden Belastungswerte UFP (LDSA, Partikelanzahlkonzentration, Partikelmassenkonzentration und Partikelgröße) tabellarisch zusammengefasst.

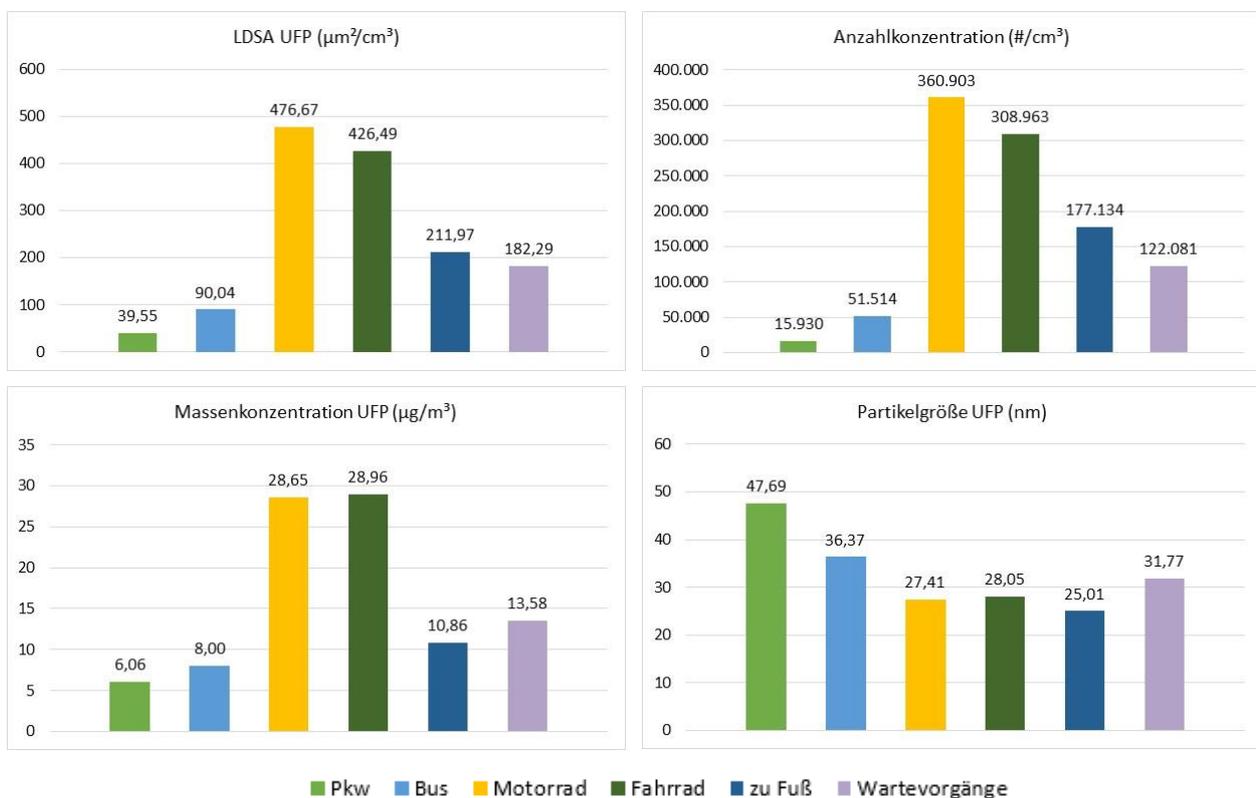


Abb. 66: Durchschnittliche Exposition gegenüber Luftschadstoffen in Abhängigkeit der Verkehrsmittelwahl
Quelle: Eigene Darstellung

LDSA-Konzentration UFP

Die durchschnittliche LDSA-Konzentration betrug beim Pendeln mit dem Pkw $39,55 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$. Im Vergleich dazu waren die Belastungen mit dem Bus mit $90,04 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ ca. 2,3-mal, mit dem Motorrad mit $476,67 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ ca. 12-mal, bei der Nutzung des Fahrrads mit $426,49 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ ca. 11-mal, bei den Messungen zu Fuß mit $211,9 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ ca. 5-mal und bei Wartevorgängen an Bushaltestellen mit $182,29 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ ca. 4,6-mal so hoch.

Anzahlkonzentration UFP

Motorradfahrer*innen und Radfahrer*innen waren während ihrer Fahrten mit gut 360.000 Partikeln/cm³ bzw. 308.000 Partikeln/cm³ den höchsten Partikelanzahlkonzentrationen an UFP ausgesetzt. Diese Belastungen waren 23- bzw. 19-mal höher als die Belastung bei Fahrten mit dem Pkw (knapp 16.000 Partikeln/cm³). Bei der Nutzung von Bussen wurde mit etwa gut 51.00 Partikeln/cm³ eine relativ geringe Anzahlkonzentration von UFP zu beobachtet. Fußgänger*innen waren mit gut 177.00 Partikeln/cm³ im Vergleich zu Busfahrgästen einer 3,4-fach höheren Partikelanzahlkonzentration UFP ausgesetzt.

Massenkonzentration UFP

Personen, die mit dem Pkw oder Bus fuhren waren der niedrigsten Massenkonzentration UFP (Pkw: $6,06 \mu\text{g}/\text{m}^3$ bzw. Bus: $8,00 \mu\text{g}/\text{m}^3$) ausgesetzt. Gefolgt von Fußgänger*innen mit einer durchschnittlichen Belastung von $10,86 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Bei Fahrten mit dem Motorrad oder Fahrrad waren ähnlichen Massenkonzentration UFP feststellbar, die etwa 5-mal höher war als bei der Nutzung von Pkw.

Die genutzten Busse und Pkw waren relativ neu und wurden während der Messfahrten mit geschlossenen Fenstern und Klimaanlage betrieben. So wurden Autofahrer*innen und Fahrgäste in Bussen durch die Fahrzeuge vor Luftschadstoffen geschützt. Dies könnte erklären warum die Werte von LDSA, Partikelanzahl- und Massenkonzentration UFP in Pkw und Bussen im Vergleich zu Motorrädern und Fahrrädern erheblich niedriger waren. Die LDSA, Anzahl- und Massenkonzentration ist im Fahrzeuginnenraum von Bussen tendenziell höher als im Inneren von Pkws. Ein möglicher Grund für diesen Unterschied ist, dass die Fenster des Pkw während der gesamten Fahrt geschlossen blieben, dies führte zu einem geringeren Eindringen von Partikeln aus der Umgebungsluft in das Innere der Fahrzeuge. Auch der Filter in der Klimaanlage kann dazu beitragen das Eindringen von Partikeln zu verhindern. Busse hingegen müssen an Bushaltestellen die Türen öffnen, um den Ein- und Aussteigevorgang zu ermöglichen, wodurch ein Eindringen von Luftschadstoffen aus der Außenluft in die Fahrzeuge möglich ist. Die durchschnittlichen Belastungen durch LDSA, Partikelanzahl- und Massenkonzentration UFP waren beim Pendeln mit Motorrädern und Fahrrädern deutlich höher als bei den Fahrten mit Pkw und Bussen. Der Hauptgrund für diesen Unterschied ist, dass Radfahrer*innen und Motorradfahrer*innen oft von anderen Fahrzeugen (Bussen, Pkw, anderen Motorrädern) umgeben sind und sich in unmittelbarer Nähe zu den Emissionsquellen befinden. Sie sind direkt den Emissionen von Fahrzeugen und Luftschadstoffen durch weitere Emissionsquellen, wie Garküchen entlang der Straßen ohne den physischen Schutz durch ein Fahrzeug ausgesetzt. In HCMC gibt es keine gesonderten Radwege oder Radfahrstreifen und Radfahrer*innen müssen den Straßenraum mit den motorisierten Fahrzeugen nutzen. Das erklärt, warum sie einer ähnlichen Belastung durch Luftschadstoffe ausgesetzt sind wie Motorradfahrer*innen. Die Konzentrationen von LDSA und Partikelanzahlkonzentration UFP beim Pendeln mit dem Fahrrad waren jedoch etwas niedriger als beim Motorrad. Dies kann durch das Fahrverhalten der Radfahrer*innen erklärt werden. Sie neigen dazu, auf dem rechten Fahrstreifen zu fahren, der sich näher am Gehweg befindet und dadurch möglicherweise geringere Luftschadstoffbelastungen aufweist.

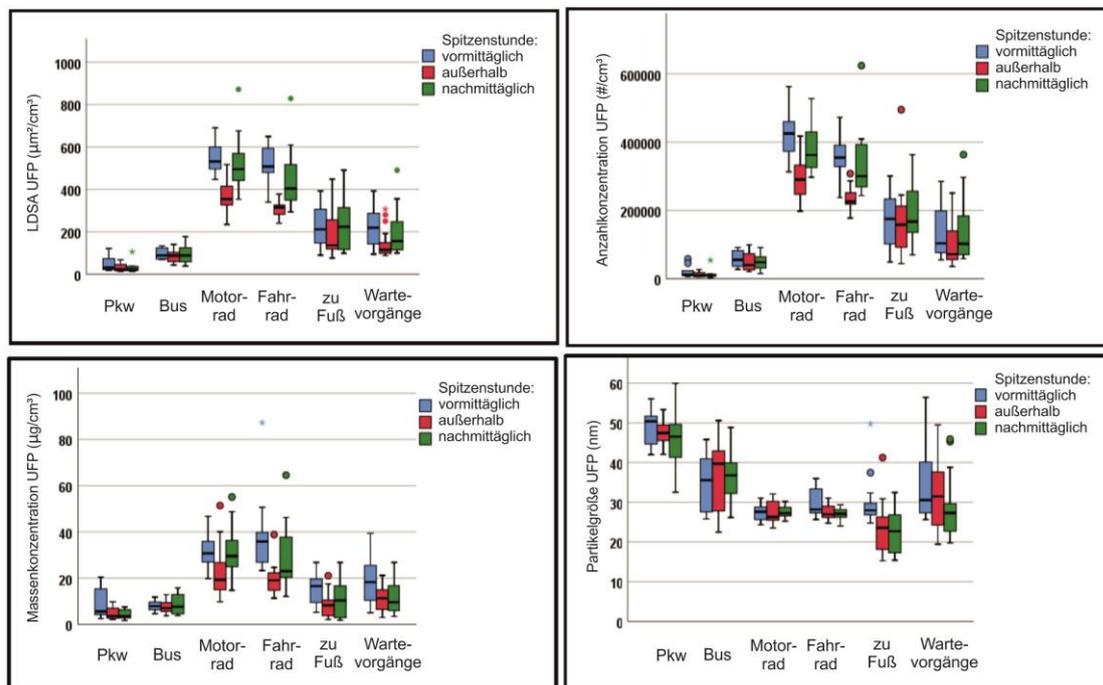
Partikelgröße UFP

Die durchschnittliche Partikelgröße bei Fahrten mit den verschiedenen Verkehrsmitteln lag zwischen 25 nm und 48 nm. Die durchschnittlichen Durchmesser UFP weisen einen gegenläufigen Trend mit der Partikelanzahlkonzentration UFP auf: Größere durchschnittliche Partikelgrößen wurden bei der

Nutzung von Verkehrsmitteln mit niedrigeren Partikelanzahlkonzentrationen UFP gemessen und umgekehrt. Dieses Ergebnis ähnelt der Studie von (Ham et al. 2017; Ragetti et al. 2013). Motorradfahrer*innen und Radfahrer*innen sind im Vergleich zu Pkw- und Busnutzer*innen kleineren Partikelgrößen ausgesetzt. Dies wird durch die Nähe von Fahrrad- und Motorradfahrer*innen zum Verkehr erklärt. Aufgrund der geringen Größe können sich UFP leichter in der Luft verteilen, bevor sie in Pkw oder Busse eindringen können. In HCMC waren Radfahrer*innen, Motorradfahrer*innen und Fußgänger*innen während ihrer Wege einer wesentlich höheren Partikelanzahlkonzentration von UFP ausgesetzt, die eine geringere durchschnittliche Partikelgröße aufweisen als Personen, die mit dem Pkw oder Bus unterwegs waren. Infolgedessen können die negativen gesundheitlichen Auswirkungen der Luftverschmutzung bei Rad-, Motorradfahrer*innen und Fußgänger*innen größer sein als bei Personen, die den Pkw oder Bus nutzen.

6.7.3 Exposition gegenüber Luftschadstoffen in Abhängigkeit der Zeitwahl

Abbildung 67 zeigt die LDSA, die Anzahlkonzentrationen, die Massenkonzentration und die durchschnittlichen Partikelgrößen UFP in Abhängigkeit der Verkehrsmittel- und Zeitwahl. Aus Beobachtungen während der Messkampagne war das Verkehrsaufkommen in den Spitzenzeiten deutlich höher als außerhalb der Spitzenzeiten. Pkw- und Busnutzer*innen waren jedoch unabhängig von Hauptverkehrszeiten und verkehrlich weniger belasteten Zeitspannen relativ ähnlichen Belastungen durch Luftschadstoffen ausgesetzt. Dies bedeutet, dass ihre Exposition gegenüber Luftschadstoffen nur geringfügig von der Zeitwahl beeinflusst wurde. Eine ähnliche Situation zeigte sich auch bei Fußgänger*innen und Fahrgästen während der Wartevorgänge an den Bushaltestellen. Im Gegensatz dazu waren Motorradfahrer*innen und Radfahrer*innen während der Hauptverkehrszeiten einer deutlich höheren Luftschadstoffbelastung ausgesetzt als außerhalb der Spitzenstunden. Daran lässt sich erkennen, dass ihre Belastung durch die Luftschadstoffe stark von der Zeitwahl beeinflusst wurde.



Stichprobenumfang n:

Pkw	29	Fahrrad	38
Bus	36	Zu Fuß	53
Motorrad	38	Wartevorgänge	54

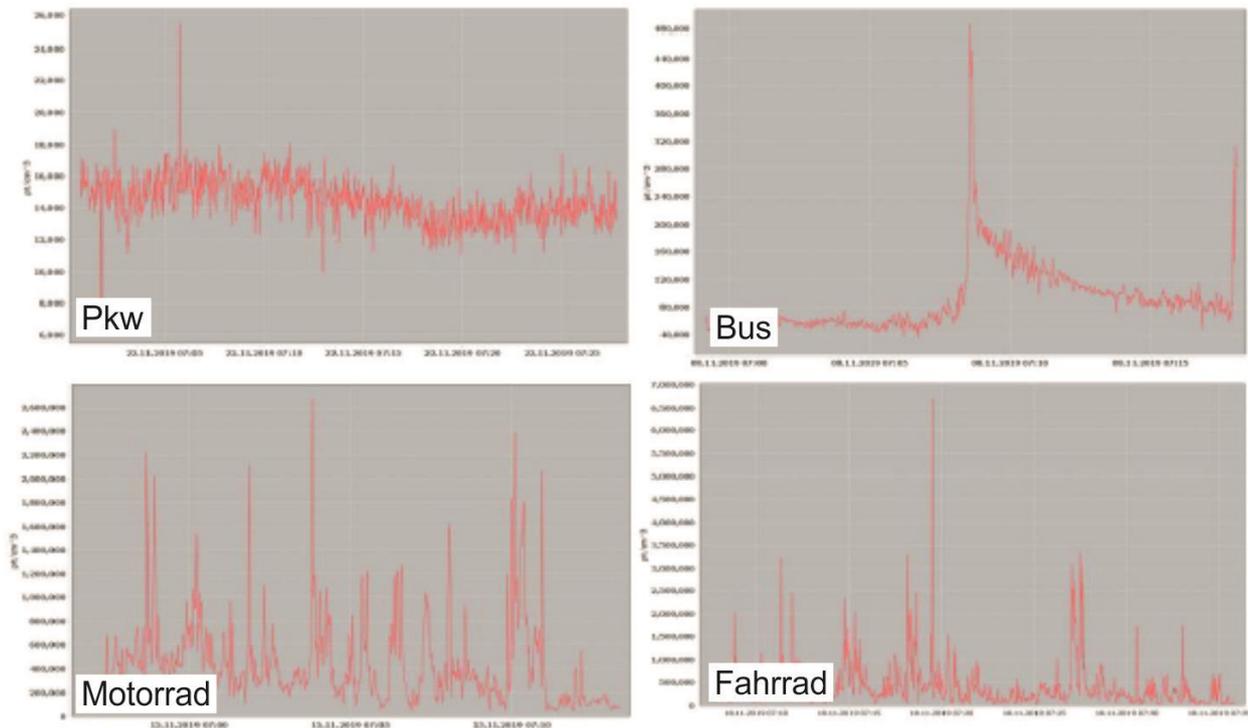
Abb. 67: Durchschnittliche Exposition gegenüber Luftschadstoffen in Abhängigkeit der Verkehrsmittelwahl und Zeitwahl

Quelle: Eigene Darstellung

Zudem schwankten die LDSA und Anzahlkonzentrationen UFP beim Pendeln mit Motorrädern und Fahrrädern stark. Bei den Messungen in Pkw und Bussen waren diese Werte dagegen stabiler. Abbildung 68 zeigt ein Beispiel für die Schwankungen der Anzahlkonzentration UFP beim Pendeln mit Pkw, Bus, Motorrad und Fahrrad. Motorradfahrer*innen und Radfahrer*innen waren bei der Anzahlkonzentration UFP häufiger Spitzenwerten ausgesetzt. Hier kam es wiederholt zu Spitzenwerten von über 1.000.000 Partikel/cm³. Dies bestätigt, dass die Luftschadstoffbelastung von Motorradfahrer*innen und Radfahrer*innen stark von den Verkehrsbedingungen beeinflusst wurde, da sie oft von anderen Fahrzeugen mit unterschiedlichen Eigenschaften umgeben waren. Auch andere Studien fanden einen ähnlichen Trend: Ihre erfassten Spitzenwerte waren jedoch deutlich niedriger als in dieser Studie (Boogaard et al. 2009; Int Panis et al. 2010). Um die Ursachen für hohe Luftschadstoffspitzenwerte bei Motorrad- und Fahrradfahrten herauszufinden, wurden die während der Fahrten aufgezeichneten Verkehrsdaten und Luftschadstoffdaten mit GPS-Daten überprüft. Die Ergebnisse zeigen, dass diese Spitzenwerte häufig in folgenden Situationen auftraten:

- Warten an Lichtsignalanlagen,
- Fahren in der Nähe von alten Fahrzeugen,
- Überholen von Fahrzeugen mit mobilen Garküchen,
- Bewegen im Stop-and-Go-Verkehr,
- Fahren in der Nähe von Lkw und Bussen.

Fahrgäste von Bussen waren teilweise auch hohen Spitzenwerten von Luftschadstoffbelastungen ausgesetzt, die vor allem durch lange Wartezeiten an Bushaltestellen bei geöffneten Bustüren verursacht wurden.



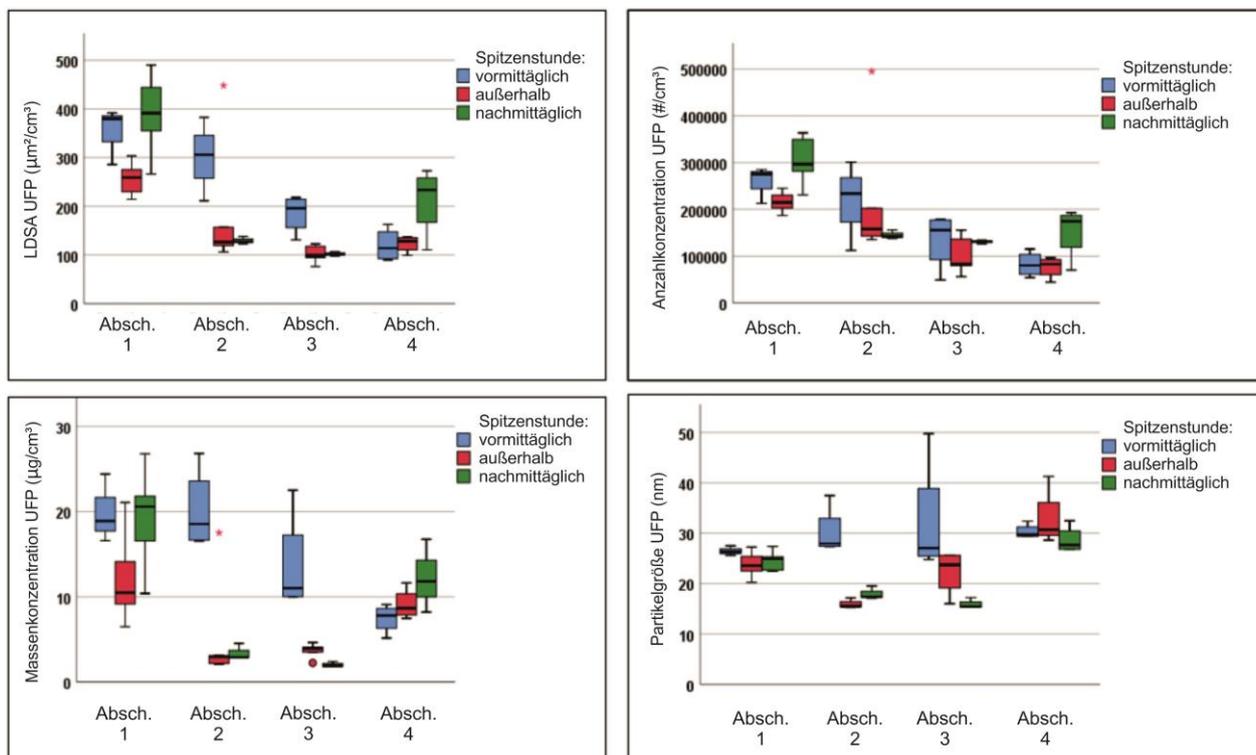
Hinweis: Die Abbildung dient nur der Veranschaulichung

Abb. 68: Beispiel für Schwankungen der Partikelanzahlkonzentration UFP in Abhängigkeit der Verkehrsmittelwahl

Quelle: Eigene Darstellung

6.7.4 Exposition von Fußgänger*innen gegenüber Luftschadstoffen in Abhängigkeit der städtebaulichen und verkehrlichen Gegebenheiten

Abbildung 69 zeigt die durchschnittliche Exposition von Fußgänger*innen gegenüber LDSA, Partikelanzahlkonzentration, Massenkonzentration und Partikelgröße UFP an vier verschiedenen Straßenabschnitten, gemessen während der vormittäglichen und nachmittäglichen Spitzenstunden sowie außerhalb der Hauptverkehrszeiten. Das Ergebnis zeigte, dass die höchsten Konzentrationen an LDSA, Anzahlkonzentration und Massenkonzentration UFP im Straßenabschnitt 1 lagen, gefolgt von den Abschnitten 2 und 4. Bei den Messungen entlang des Straßenabschnitts 3 wurden die geringsten Luftschadstoffbelastungen aufgezeichnet. Verkehrsbedingungen, Garküchen am Straßenrand und der Abstand zwischen Gehweg und Straße hatten einen starken Einfluss auf die Belastung der Fußgänger*innen durch Luftschadstoffe. Die Messungen im Abschnitt 1 wurden entlang einer Straße mit großem Querschnitt durchgeführt (zwei Richtungen, drei Fahrstreifen je Richtung) zudem wurde im Verlauf der Messungen ein großer Knotenpunkt überquert (Kreuzung Hang Xanh). Aufgrund der Verbindungsfunktion dieser Strecke zwischen Vororten und dem Stadtzentrum ist das Verkehrsaufkommen hier normalerweise während der vormittäglichen und nachmittäglichen Spitzenstunden hoch. An den Knotenpunkten gibt es oft lange Warteschlangen und Stop-and-Go-Verkehr in allen Richtungen. Außerdem befindet sich Abschnitt 1 vor der HUTECH Universität. In diesem Abschnitt gibt es eine hohe Dichte an Garküchen, die ihre Speisen und Getränke auf dem Gehweg kochen und verkaufen. Dies erklärt die hohen Konzentrationen von UFP in den Morgen- und Nachmittagsstunden verglichen mit den Belastungen außerhalb der Hauptverkehrszeiten.



Stichprobenumfang n: Summe aller Wege 53

Abb. 69: Durchschnittliche Exposition von Fußgängern gegenüber Luftschadstoffen in Abhängigkeit städtebaulicher Eigenschaften und Zeitwahl

Quelle: Eigene Darstellung

Abschnitt 2 hat ebenfalls einige Kochaktivitäten, aber viel weniger als Abschnitt 1. Zusätzlich fanden die Kochaktivitäten hier nur am Morgen statt. Allerdings ist dort der Gehweg relativ schmal und Fußgänger*innen bewegen sich somit näher am Verkehr und damit auch an der Emissionsquelle. Auch

im Abschnitt 2 ist das Verkehrsaufkommen in den morgendlichen Spitzenstunden höher als in den nachmittäglichen Hauptverkehrszeiten. Daher waren die Luftschadstoffkonzentrationen während der Vormittagsspitze deutlich höher als in durch den Verkehr weniger belasteten Nebenzeiten und Nachmittagsspitzen. Abschnitt 3 befindet sich entlang der Le Duan Street an der es keine Garküchen gibt. Gehweg und Fahrbahn sind außerdem durch einen Grünstreifen voneinander getrennt. Dieser Abschnitt weist in den morgendlichen Hauptverkehrszeiten ein höheres Verkehrsaufkommen auf als während der Nachmittagsspitze. Somit waren die gemessenen Luftschadstoffkonzentrationen in den morgendlichen Spitzenstunden höher als während der anderen Messzeiten.

Entlang der Dien Bien Phu Street befindet sich Abschnitt 4. Dies ist eine Einbahnstraße in der es keine Garküchen gibt. Das Verkehrsaufkommen in diesem Straßenabschnitt war in den nachmittäglichen Hauptverkehrszeiten sehr hoch und es kam häufig zu Stop-and-Go-Verkehr. Dies erklärt die hohen Luftschadstoffbelastungen während der nachmittäglichen Spitzenstunden. Frühere Studien beschrieben Faktoren, die die Luftverschmutzung in der Nähe von Straßen beeinflussen. Hierzu zählen verschiedenen verkehrliche, städtebauliche und meteorologische Einflussfaktoren. (Boarnet et al. 2011; Ragetti et al. 2013) Bisher gibt es allerdings noch keine Studien, die die Auswirkungen von Garküchen am Straßenrand, wie sie häufig in asiatischen Ländern vorkommen, untersuchten. Die Analyse der im Rahmen dieser Untersuchung durchgeführten Messungen zeigen, dass Garküchen entlang des Straßenrandes die Höhe der Luftverschmutzungskonzentrationen signifikant beeinflussen.

6.7.5 Inhalierete Dosis der Anzahlkonzentration UFP und der Massenkonzentration UFP in Abhängigkeit der Verkehrsmittelwahl

Abbildung 70 zeigt die durchschnittliche Belastung der Partikelanzahl- und Massekonzentration UFP, die die verschiedenen Verkehrsteilnehmer*innen in Abhängigkeit der Verkehrsmittelwahl während ihrer Fahrten eingeatmet haben. Zur Berechnung der Inhalationsdosis des gesamten Wegs mit dem Bus werden die Fußwege vom Ausgangspunkt bis zur Haltestelle und von der Haltestelle zum Ziel sowie die Wartezeit an der Haltestelle berücksichtigt. Für die Wartezeiten sowie die Länge der Fußwege wurde auf die Ergebnisse einer Haushaltsbefragung in Ho Chi Min City zurückgegriffen, bei der 209 Busnutzer*innen befragt wurden. (Le Thi 2021) Im Durchschnitt waren Fahrgäste 12 Minuten zu Fuß unterwegs, und die Wartezeit an den Haltestellen betrug im Durchschnitt 10 Minuten. Anzahl- und Massenkonzentration UFP, denen Fahrgäste während der Wartezeit an Bushaltestellen ausgesetzt sind, stammen aus den Messungen an den fünf Bushaltestellen und stellen Durchschnittswerte dar.

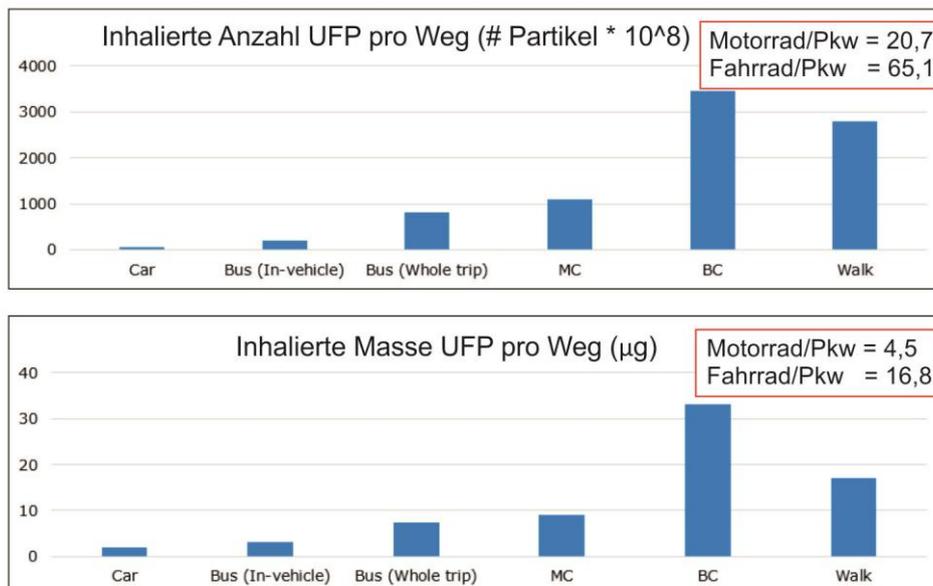


Abb. 70: Durchschnittliche Dosis inhalierter Luftschadstoffe je Fahrt in Abhängigkeit des Verkehrsmittels
Quelle: Eigene Darstellung

Bei der Analyse der Belastungen im Fußverkehr wird eine Gehgeschwindigkeit von 5 km/h angenommen. Bei der Gesamtstrecke von 5,4 km ergibt sich eine Gehzeit von 65 Minuten. Für die durchschnittliche Anzahl- und Massenkonzentration UFP wird der Mittelwert aus den Messungen zu Fuß entlang der Abschnitte 1 bis 4 verwendet. Die Methoden zur Berechnung der inhalierten Schadstoffdosis für die verschiedenen Verkehrsteilnehmer*innen wurden bereits im Kapitel 6.2.1 methodisch erläutert. Berücksichtigt man die Fahrtzeiten und das Atemvolumen, atmeten die Radfahrer*innen aufgrund der längsten Fahrzeit und des höchsten Atemvolumens die meisten Luftschadstoffe ein. Die Anzahl- und Massenkonzentration UFP, die Radfahrer*innen einatmeten, waren 65- bzw. 16-mal höher als die der Verkehrsteilnehmer*innen, die den Pkw nutzten. Am zweit stärksten waren Fußgänger*innen belastet. Sie inhalierten fast 53- bzw. 9-mal höhere Anzahl- und Massekonzentrationen als Pkw-Fahrer*innen. Personen, die mit dem Pkw pendeln, haben die geringste Menge an Luftschadstoffen eingeatmet. Buspassagiere und Motorradfahrer*innen atmeten etwa gleich viel Luftschadstoffe ein.

7 Diskussion der Erkenntnisse

Nach der Vorstellung der Ergebnisse aus der Feldunteruchung werden nun die gesammelten Erkenntnisse aus der Literatur, den Workshops und den Messungen anhand der vier Forschungsfelder und der aufgestellten Forschungsfragen diskutiert (s. Kap. 1.3). Damit wird die Grundlage für die abschließenden Handlungsempfehlungen (s. Kap. 8) gelegt.

7.1 Forschungsfeld 1 - Wirkzusammenhänge und Zielkonflikte

Wie in Kapitel 3 dargelegt, existieren gesundheitsbezogene Zielkonflikte und vielfältige Wirkzusammenhänge zwischen den Fachdisziplinen der Stadtentwicklung. Im Folgenden werden die einzelnen Forschungsfragen zu Wirkungszusammenhängen und Zielkonflikte nacheinander diskutiert.

Forschungsfrage 1.1: Welche Wirkzusammenhänge bestehen zwischen den Fachdisziplinen Stadt, Verkehr und Gesundheit?

Die Fachdisziplinen Stadtplanung, Verkehrsplanung und Verkehrstechnik sowie Gesundheitswissenschaften sind über eine Vielzahl von Wirkungszusammenhängen miteinander verbunden (s. Abb. 18). Die Stadtplanung ist insbesondere durch die Einflussbereiche Stadtstruktur und Flächennutzung definiert. Die Fachdisziplin Verkehrsplanung und Verkehrstechnik gliedert sich in die Einflussbereiche Verkehrsnachfrage, Verkehrsangebot und Verkehrsablauf. In der Fachdisziplin Gesundheitswissenschaften können die Einflussbereiche Exposition sowie deren Wirkungen auf den Menschen unterschieden werden. Gesundheitliche Wirkungen der gebauten Umwelt werden durch die Stadt- und Verkehrsplanung sowie die Verkehrstechnik, die in einer engen Abhängigkeit zueinanderstehen, maßgeblich beeinflusst. Beispielsweise kann die Siedlungsentwicklung durch eine Siedlungsentwicklung entlang der Schiene, eine Nutzungsmischung, keine große Flächenausdehnung und die Vermeidung von Zersiedelung verkehrsvermeidend gestaltet werden. (Beckröge 1999: 92; Gertz 2020: 369; Hoffmann 2019: 431) Insgesamt beeinflussen verschiedene Faktoren der Stadtplanung sowohl das Verkehrsangebot als auch die Verkehrsnachfrage und haben somit Einfluss auf die Gesundheit der Verkehrsteilnehmer*innen und Bevölkerung (s. Kap. 3.2.1).

Zwischen den Fachdisziplinen Stadt-, Verkehrsplanung und Verkehrstechnik sowie Gesundheitswissenschaften besteht eine Vielzahl an Wirkungszusammenhängen, die es im Sinne einer gesundheitsorientierten Stadtentwicklung² zu nutzen gilt.

Forschungsfrage 1.2: Was sind Zielkonflikte zwischen den Fachdisziplinen Stadt, Verkehr und Gesundheit?

Ein beispielhafter **Zielkonflikt** resultiert durch die Umsetzung von sogenannten kurzen Wegen im Zuge der innerörtlichen Verdichtung. Auf der einen Seite können sie zur Reduktion von verkehrsbedingten Emissionen beitragen. Auf der anderen Seite resultieren daraus negative Auswirkungen auf das Wohnen durch Einschränkungen in der Durchlüftung, einer hohen Luftverschmutzung, Stress, Lärm, die zusammen als störend von den sich dort aufhaltenden Menschen empfunden werden. (Khreis et al. 2019: 589; Umweltbundesamt 2017b: 11). Diese lassen sich in Teilen z.B. durch eine abgestimmte Anordnung und Wahl der Flächennutzungen oder einer angemessenen Dichte vermindern sowie durch eine **integrierte Planung** mit Beteiligung verschiedener Ressorts entschärfen (LANUV 2011: 162).

² Unter Stadtentwicklung werden alle Veränderungen und Aktivitäten im Bereich der Siedlungs- und Verkehrsentwicklung verstanden.

Die Wirkungszusammenhänge spiegeln sich in unterschiedlichen Zielkonflikten im städtischen Raum wider. Diese bedürfen einer engen Zusammenarbeit bei der Gemeinschaftsaufgabe Stadtentwicklung².

Forschungsfrage 1.3: Welche Konsequenzen haben die Erkenntnisse der Wirkungszusammenhänge auf die Gewichtung des Belanges Gesundheit bei planerischen Entscheidungen und wie kann der Belang ein höheres Gewicht erhalten?

Im zweiten SHOTUP-Expertenworkshop wurde nach Möglichkeiten gefragt, wodurch eine höhere Gewichtung der Gesundheit neben den anderen Zielen innerhalb der Stadtentwicklung erreicht werden kann (s. Abb. 71). Dabei stand lediglich eine Antwort im Zentrum: Durch mehr und intensive Forschung und damit einhergehenden neuen Erkenntnissen kann laut den Teilnehmenden eine höhere Gewichtung erreicht werden. Das stützt sich mit den Erkenntnissen aus Kapitel 2.7: Eine **Evidenzbasis** für planerischen Entscheidungen wird benötigt (Bolte 2018: 130). Zum Beispiel wurden aufgrund wissenschaftlicher Evidenz aus epidemiologischen Studien Grenzwerte weltweit angepasst (Schneider et al. 2014: 4-5). Ebenfalls können Erkenntnisse zu Wirkungszusammenhänge (s. Kap. 3) und deren quantifizierbaren Effekte sowie der politische Wille zur höheren Gewichtung der Gesundheit neben anderen Zielen beitragen: „The well-being, health and happiness of the citizens depends on politicians’ willingness to give priority to the choices that address equity and the determinants of health. Ultimately health is a political choice that should match the values and aspirations for protecting and constantly improving the health and well-being of all citizens“ (Tsourus 2019: 81).

Wodurch könnte eine höhere Gewichtung der Gesundheit neben anderen Zielen erreicht werden?



16

Abb. 71: Abstimmung über Gewichtung von Gesundheit beim 2. Expertenworkshop
Quelle: Eigene Darstellung

Weitere Maßnahmen, die im Workshop genannt wurden, zielen auf die Messung von Gesundheitswirkungen, die **Bewusstseinsbildung** bzw. Sensibilisierung und einer verbesserten Zusammenarbeit (s. Kap. 2.7). Um Gesundheitsaspekte bestmöglich in planerische Entscheidungen einzubringen, gibt es unterschiedliche Ansätze der Gewichtung (s. Kap. 2.9). Trotz der bislang wichtigen Stellung der Gesundheit im Bauplanungsrecht, das jedoch die Prävention fokussiert, kann durch eine **rechtliche Stärkung** der Gesundheitsförderung ein Mehrwert für die gesundheitsorientierte Stadtentwicklung erreicht werden (Sieber 2017: 39, 310-311). Denkbar sind eine Ergänzung des Themas Gesundheitsförderung bei den zu berücksichtigenden Belangen in § 1 Abs. 5 BauGB oder der Integration von

Gesundheitsförderung in die Auslegung von § 1 Abs. 6 Nr. 1 BauGB. Hierbei sind besonders konkrete Handlungsanweisungen und Vorgaben aus weiteren Gesetzen und Verordnungen hilfreich. Weitere relevante Maßnahmen sind der Ausbau der Evidenzgrundlage und deren Kommunikation mit den planenden Disziplinen und der Politik (Elkeles und Broesskamp-Stone 2015) sowie die Berücksichtigung des **No-Regret-Ansatzes** bei Planung und Wahl von Maßnahmen der Stadtentwicklung. Außerdem ringt Gesundheit „mit anderen Themen wie Nachhaltigkeit, demographischem Wandel oder sozialer Ungleichheit um mediale und politische Aufmerksamkeit. Aus dieser Konkurrenz ergibt sich aber auch eine Chance, wenn es gelingt, über bestehende inhaltliche Zusammenhänge Gesundheit mit den anderen „Themen unserer Zeit“ zu verknüpfen bzw. die Problembearbeitung zu integrieren und so die Aufmerksamkeit und Bearbeitungsressourcen zu bündeln“ (Böhm et al. 2020: 430-431)

Durch eine gesetzliche Stärkung, die Nutzung des No-Regret-Ansatzes sowie den Ausbau und die Vermittlung der Evidenz kann der Belang Gesundheit bei planerischen Entscheidungen eine höhere Berücksichtigung erlangen.

7.2 Forschungsfeld 2 - Einflussfaktoren der Wirkzusammenhänge

Die Wirkzusammenhänge zwischen Stadt, Verkehr und Gesundheit sind abhängig von beeinflussbaren und nichtbeeinflussbaren rahmenbildenden Faktoren. In SHOTUP konnten unterschiedliche Wirkzusammenhänge identifiziert werden (s. Kap. 3).

Forschungsfrage 2.1: Welchen rahmenbildenden Faktor der Wirkzusammenhänge lassen sich identifizieren?

Die in Forschungsfrage 1.1. genannten **Einflussbereiche** (Stadtstrukturen, Flächennutzung, Verkehrsnachfrage, Verkehrsangebot, Verkehrsablauf, Exposition und Gesundheit) sind durch eine Vielzahl von Einflussfaktoren gekennzeichnet die für Wechselwirkungen zwischen den Einflussbereichen verantwortlich sind. Abbildung 18 in Kapitel 3.1 zur Analyse der Wirkungszusammenhänge zeigt diese Einflussfaktoren. Ein Beispiel einer Wirkungskette solcher Einflussfaktoren beginnt mit der Nutzungsmischung im Einflussbereich der Flächennutzung, die die Verkehrsmittelwahl im Bereich der Verkehrsnachfrage beeinflusst. Daraus resultieren Einflüsse auf die **Exposition** gegenüber gesundheitsrelevanten Faktoren wie beispielsweise Unfälle und Luftschadstoffe. Diese wiederum rufen gesundheitliche Wirkungen durch Stadt- und Verkehrsplanung wie Verletzungen durch Verkehrsunfälle oder chronische Lungenerkrankungen durch hohe Luftschadstoffbelastungen hervor.

In den jeweiligen Einflussbereichen von Stadt, Verkehr und Gesundheit lassen sich eine Vielzahl von Einflussfaktoren identifizieren. Durch Wirkungsketten, wie beispielsweise den Einfluss der Nutzungsmischung auf die Verkehrsmittelwahl und damit die Luftschadstoffbelastungen mit den daraus resultierenden chronischen Lungenerkrankungen, können Wirkungszusammenhänge auf Ebene der Einflussfaktoren dargestellt werden.

Forschungsfrage 2.2: Können die rahmenbildenden Faktoren in beeinflussbar und nichtbeeinflussbar unterteilt werden?

Zunächst ist wichtig zu beachten, dass „Entscheidungen über die baulich-räumlichen Rahmenbedingungen städtischen Lebens [...] grundsätzliche Entscheidungen über das „gesundheitliche Belastungssetting“ und die angestrebte Lebensqualität“ (Baumgart 2020: 213) sind. Bei den in Kapitel 3.1 dargestellten **Einflussfaktoren** handelt es sich um, nach Abwägung verschiedener Ziele, beeinflussbare Faktoren im Bereich Stadt und Verkehr. Bei weiterer Betrachtung der Wirkungen von Stadt und Verkehr gibt es nichtbeeinflussbare Faktoren, die Einfluss auf gesundheitliche Auswirkungen haben. Sowohl das Regenbogenmodell von Dahren und Whitehead von 1991 als auch die darauf aufbauende Health Map von Barton und Grant aus dem Jahr 2006 stellen die Einflüsse auf Gesundheit systema-

tisch und bildlich dar (s. Kap. 2.3.2). In beiden Modellen werden die Einflussfaktoren auf verschiedenen Ebenen dargestellt, wobei sich das Individuum mit seinen personenbezogenen und nahezu nicht veränderbaren Merkmalen, wie Geschlecht, Alter und Erbfaktoren, im Zentrum befindet. Die weiteren Einflussfaktoren - in beiden Modellen ringförmig um das Zentrum angeordnet - sind hingegen mehr oder weniger durch menschliche Intervention veränderbar. In beiden Modellen folgen im ersten bzw. zweiten Ring der Bereich der individuellen Lebensweise, der u.a. das Ess-, Trink-, und Rauchverhalten einer Person beinhaltet, und der Bereich der sozialen Kontakte und Unterstützung durch andere, auf die eine Person zurückgreifen kann. Im Regenbogenmodell folgen auf der dritten Ebene strukturelle Faktoren, wie die Wohnverhältnisse, der Zugang zu Bildung und die Arbeitsbedingungen. Darüber stehen noch jene Faktoren, die auf ganze Gesellschaften einwirken (WHO 1997: 21), dazu zählen beispielsweise die wirtschaftliche Lage und übergeordnete Umweltgegebenheiten, wie der Naturraum, in dem ein Land liegt. Diese beiden Modelle stellen gut die beeinflussbaren und nicht beeinflussbaren Determinanten dar.

Die rahmenbildenden Faktoren können in beeinflussbar (Maßnahmen im Bereich der Fachdisziplinen Stadt und Verkehr) und nicht beeinflussbar (Geschlecht, Alter und Erbfaktoren) unterteilt werden. Hierbei helfen Erkenntnisse aus den Gesundheitswissenschaften.

Forschungsfrage 2.3: Welche Trends wirken auf die Einflussfaktoren der Wirkzusammenhänge und welche Zukunftsbilder sind zu erwarten?

In Kapitel 4 wurden die Megatrends und ihre Auswirkungen auf den urbanen Raum, d.h. auf die Angebots- und Nachfragesituation in Städten, diskutiert und besonders die **Urbanisierung**, der Klimawandel und die Digitalisierung als maßgeblich für die weitere Stadtentwicklung identifiziert. Zusammen haben deren Auswirkungen eine große Wirkung auf die Gesundheit und daraus resultierend ein gesteigertes Gesundheitsbewusstsein. Weitere gesellschaftliche Entwicklungen weisen auf einen gesellschaftlichen Wandel hin, der für die **Transformationsprozesse** im Bereich Energie, Mobilität und Stadtentwicklung hin zu mehr Nachhaltigkeit benötigt wird. Die urbane Bevölkerung ist zeitgleich Verursacher sowie Betroffener der globalen Umweltveränderungen. Fehr und Hornberger stellen hierzu fest, dass sowohl Wachstumsgrenzen spürbar werden als auch Impulse sozialökologischer Transformation entstehen. (Fehr und Hornberg 2018e: 21)

„Lebensqualität und gesunde Wohnumgebung werden zu einem wichtigen Standortfaktor für den Wettbewerb der erfolgreichen Metropolen von morgen. Wichtige Faktoren der gesunden Stadt sind die Emissionsarmut und ein ausreichendes Angebot an Bewegungsmöglichkeiten - sowie exzellente Angebote der Gesundheitsversorgung und -vorsorge“ (BBSR 2019: 22). Eine Konsequenz dieser Aussage ist, dass so ein weiterer **Anreiz für Akteure** der Stadtentwicklung existiert, ihre Kommune gesundheitsorientiert weiterzuentwickeln. Die Tatsache, dass Leben und Arbeiten in Städten beeinflusst werden kann, führt zusammen mit den identifizierten Trends dazu, dass Stadt- und Verkehrsplanung sich auf die möglichen Zukünfte einstellen muss, sie aber gleichzeitig auch kontinuierlich mitgestalten können und sollen (BBSR 2019: 80). So kann sich der Aussage von Kaltenbrunner und Jakobowski angeschlossen werden: „Wir sind mithin der Auffassung, dass man es sich so bequem nicht machen darf. Denn Zukunft entsteht nicht einfach - sie wird bereitet und hergestellt. Mit anderen Worten: Je mehr Fehler wir begehen, desto schlechter werden wir morgen und übermorgen dastehen. Und umgekehrt, je mehr richtige Entscheidungen wir treffen, desto größer sind die Chancen auf eine brauchbare Zukunft, die uns und unseren Nachkommen auskömmlichen Wohlstand und Lebensfreude bietet“ (Kaltenbrunner und Jakobowski 2018: 328). Die vielfältigen Erkenntnisse können zu einem **Zukunftsbild** zusammengeführt werden, das als Wunsch oder Ziel der Stadtentwicklung gelten kann (s. Kap. 4.3) und sich teilweise auch in der aktuellen Diskussion um städtebauliche Leitbilder wiederfinden lässt (u.a. Göpel 2012; Knieling und Kretschmann 2016). Festgehalten werden kann, dass **lebenswerte Städte** gesunde Städte sind und eine wichtige Aufgabe der Stadtentwicklung darstellen.

Das Querschnittsthema Gesundheit findet sich ebenfalls in vielen aktuellen Trends wieder, wie dem Klimawandel, den Migrationsprozessen oder dem demografischen Wandel. (Baumgart 2018b: 5)

Besonders die Urbanisierung und die damit verbundenen räumlichen Entwicklungen stellen eine aktuelle Herausforderung im Bereich der gesundheitsorientierten Stadtentwicklung³ dar. Deren Bewältigung ist Ziel der Stadtentwicklung.

7.3 Forschungsfeld 3 - Verkehrsplanerische Aspekte

Durch Messungen von Luftschadstoffbelastungen in Frankfurt am Main und Ho Chi Minh City wurden verschiedene Einflussfaktoren der Fachdisziplin Verkehr näher untersucht. Die Erkenntnisse der Analyse der gewonnenen Daten (s. Kap. 6) liefern Antworten auf die gestellten Forschungsfragen, die im Folgenden diskutiert werden.

Forschungsfrage 3.1: Kann die Luftschadstoffbelastung von Verkehrsteilnehmer*innen durch die Verkehrsmittelwahl beeinflusst werden?

Zur Untersuchung der Exposition von Verkehrsteilnehmer*innen gegenüber Luftschadstoffen in Abhängigkeit der Verkehrsmittelwahl wurden in Frankfurt am Main UFP und Partikel der Größenfraktionen $PM_{2,5}$ und PM_{10} erfasst. (s. Kap. 6) Zur Beurteilung der gesamten Luftschadstoffbelastung wurde ein teilformalisiertes Bewertungsverfahren angewendet. Hierfür wurden in einem ersten Schritt die vier Kriterien zur Bestimmung der Belastung durch UFP genauer untersucht. Die Größe des Einflusses der verschiedenen Kriterien wurde über die **Gewichtung** vorgenommen. Hierbei wird angenommen, dass die Kriterien LDSA⁴, Anzahl UFP und Größe UFP die gleiche Relevanz besitzen und alle mit dem Faktor 0,3 in die Berechnung eingehen. Grund hierfür ist, dass die LDSA und die Größe UFP beide Aufschluss über die Lungengängigkeit der Partikel geben. Auch die Anzahl UFP beeinflusst die gesundheitlichen Auswirkungen der UFP in hohen Maßen. Der Masse wird eine geringere Gewichtung beigemessen, da sie aus der Kombination von Anzahl und Größe bereits Berücksichtigung findet sowie der Einfluss dieses Kriteriums auf die gesundheitlichen Wirkungen von UFP als geringer eingeschätzt wurde. Anschließend werden den durch die Felduntersuchung erfassten durchschnittlichen Belastungen **Nutzwerte** zugewiesen. Bei den Kriterien LDSA, Partikelanzahlkonzentration UFP und Massekonzentration UFP steht ein Nutzwert von eins für die geringste Belastung und ein Nutzwert von fünf für die größte Belastung mit entsprechenden Abstufungen dazwischen. Da bei der Größe UFP kleinere Partikel negativere Auswirkungen haben als größere, werden hier die Nutzwerte in umgekehrter Reihenfolge zugewiesen. Der geringsten Partikelgröße wird hier mit fünf der höchste Nutzwert zugewiesen und der größten Größe der niedrigste Nutzwert.

Bei der reinen Betrachtung der UFP ergibt sich die in Tabelle 28 dargestellte Bewertung. Am geringsten ist die **Belastung durch UFP** bei den Fahrten mit der S-Bahn. Etwa höher ist die Belastung bei den Fahrten, die mit Bus, U-Bahn und Tram zurückgelegt wurden. Bei Fahrten mit dem PkW_{Neu} sind Verkehrsteilnehmer*innen einer Belastung im mittleren Bereich ausgesetzt. Die höchsten Belastungen wirken bei der Wahl von Fahrrad und PkW_{Alt} . Eine Begründung für die geringen Belastungen bei der Nutzung des ÖPNV könnte darin liegen, dass der Ursprung UFP hauptsächlich auf Verbrennungsprozesse zurückzuführen ist. Da die Strecken der S- und U-Bahn teilweise unterirdisch verlaufen, weisen die Fahrten im ÖPNV daher geringere Belastungen auf. Der Unterschied zwischen den Belastungen bei der S-Bahn und den Fahrten mit Bus, U-Bahn und Tram ist damit zu erklären, dass die S-Bahn über einen vom MIV getrennten Streckenverlauf geführt wird und somit geringere Belastungen

³ Unter Stadtentwicklung werden alle Veränderungen und Aktivitäten im Bereich der Siedlungs- und Verkehrsentwicklung verstanden.

⁴ Anteil der luftgetragenen Oberflächenkonzentration, der sich im alveolaren oder tracheobronchialen Bereich der menschlichen Lunge bei Inhalation deponieren würde (lung deposited surface area, LDSA)

durch UFP gemessen wurden, verglichen zur Strecke, die mit Bus, U-Bahn und Tram zurückgelegt wird, die während der oberirdischen Streckenabschnitte mit dem MIV zusammengeführt wird.

Tab. 28: Bewertung der Belastung durch UFP in Abhängigkeit der Verkehrsmittelwahl

Quelle: Eigene Darstellung

Verkehrsmittel	LDSA [$\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$]	Nutzwert	Anzahl UFP [$\#/\text{cm}^3$]	Nutz-Massewert [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Nutzwert	Größe UFP [nm]	Nutzwert	Bewertung
PkW _{Neu}	23,65	2	16.266	2,03	2	33,71	3	2,3
PkW _{Alt}	34,20	4	24.133	2,63	3	33,57	3	3,6
Fahrrad	28,56	3	23.651	1,51	1	24,01	5	3,7
S-Bahn	18,68	1	9.760	2,05	2	38,52	2	1,4
Bus/U-Bahn/Tram	24,35	2	14.609	2,16	2	36,28	2	2
Gewichtung	0,3		0,3		0,1		0,3	

In einem nächsten Schritt wurden zur **Bewertung die Belastungen durch PM_{2,5} und PM₁₀** hinzugezogen. Durch eine unterschiedliche Gewichtung der untersuchten Luftschadstoffe wurde der Einfluss auf die Belastung festgelegt. Hierbei wurde sich an der Eindringtiefe in den menschlichen Körper in Abhängigkeit der Partikelgröße orientiert. Die geringste Gewichtung wurde PM₁₀ zugeordnet, da diese Partikel bereits im Nasen- und Rachenraum oder den oberen Bronchien verbleiben. PM_{2,5} dringen in die feiner verästelten Bronchien ein, können somit negativere Auswirkungen auf die Gesundheit haben und werden daher etwas stärker gewichtet als PM₁₀. Wie bei den UFP wurde der geringsten Belastung der geringste und der höchsten Belastung der höchste Nutzwert zugeordnet.

Die Bewertung der Belastungen durch PM_{2,5} und PM₁₀ ist in der nachfolgenden Tabelle dargestellt. Die geringste Belastung erfahren Verkehrsteilnehmer*innen bei der Nutzung des PkW_{Alt}. Nutzer*innen des PkW_{Neu} und des Fahrrads sind etwas höheren Belastungen ausgesetzt. Die höchsten Belastungen durch größere Partikel wurden bei den Messungen im ÖPNV festgestellt, wobei die Belastungen bei Fahrten mit der S-Bahn über denen der Strecke mit Bus, U-Bahn und Tram lagen. Eine Erklärung hierfür könnten die Wartevorgänge an den unterirdischen Haltestellen sein. Die Endhaltestelle bei Fahrten mit der S-Bahn war die unterirdische Haltestelle „Frankfurt-Ostendstraße“. An Werktagen wird diese Haltestelle durch acht S-Bahn-Linien (S1, S2, S3, S4, S5, S6, S8 und S9) bedient. Insgesamt kommt es während der Messzeiten im gesamten Haltestellenbereich zu 48 an- bzw. abfahrenden S-Bahnen innerhalb einer Stunde. Der Umstieg zwischen Tram und U-Bahn erfolgte an der unterirdischen Haltestelle „Frankfurt Zoo“. Im gesamten Bereich dieser Haltestelle verkehren an Werktagen während der Messzeiten innerhalb einer Stunde 32 an- bzw. abfahrende U-Bahnen der Linien U6 und U7. Die Haltestelle der S-Bahn ist somit deutlich höher frequentiert, sodass die größere Anzahl an Ein- und Ausfahrtvorgängen (beispielsweise durch Aufwirbelungen und Bremsvorgänge) der S-Bahn zu höheren Belastungen führen können.

Tab. 29: Bewertung der Belastung durch PM_{2,5} und PM₁₀ in Abhängigkeit der Verkehrsmittelwahl
Quelle: Eigene Darstellung

Verkehrsmittel	PM _{2,5} [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Nutzwert	PM ₁₀ [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Nutzwert	Bewertung
PkW _{Neu}	4,22	1	8,24	2	1,4
PkW _{Alt}	4,40	1	5,69	1	1,0
Fahrrad	7,03	2	15,95	3	2,4
S-Bahn	14,97	5	27	5	5,0
Bus/U-Bahn/Tram	11,59	4	21,93	4	4,0
Gewichtung	0,6		0,4		

Abschließend wurden die Bewertungen der UFP und der größeren Partikel zu einer Gesamtbewertung der Belastung in Abhängigkeit der Verkehrsmittelwahl zusammengefasst, die in Tabelle 30 dargestellt ist. Bei der Gewichtung der gesundheitlichen Auswirkungen von Luftschadstoffbelastungen wird den UFP aufgrund ihrer größeren Lungengängigkeit eine stärkere Bedeutung zugeordnet, verglichen zu den größeren Partikeln. Die Bewertung zeigt, dass im Fahrzeuginnenraum des PkW_{Neu} die geringsten Belastungen vorliegen. Am zweit höchsten ist die Belastung im Fahrzeuginnenraum des PkW_{Alt}. Während der Fahrten mit der S-Bahn und der Fahrten mit Bus, U-Bahn und Tram werden die Belastungen als etwas höher bewertet. Als Höchstes werden die Belastungen bei den Fahrten mit dem Fahrrad bewertet.

Tab. 30: Gesamtbewertung der Luftschadstoffbelastung in Abhängigkeit der Verkehrsmittelwahl
Quelle: Eigene Darstellung

Verkehrsmittel	UFP	PM _{2,5} und PM ₁₀	Gesamtbewertung
PkW _{Neu}	2,3	1,4	1,9
PkW _{Alt}	3,6	1,0	2,6
Fahrrad	3,7	2,4	3,2
S-Bahn	1,4	5	2,8
Bus/U-Bahn/Tram	2	4	2,8
Gewichtung	0,6	0,4	

Bei den Messungen in Vietnam wurden nur die Belastung durch UFP erfasst, daher ist zur Bewertung dieser Messergebnisse die Anwendung eines teilformalisierten Bewertungsverfahrens nicht notwendig. Die Messungen haben ergeben, dass die Exposition von Verkehrsteilnehmer*innen gegenüber Luftschadstoffen bei der Nutzung des Motorrads und des Fahrrads am höchsten ist. Etwas geringer sind die Belastungen bei der Nutzung des ÖPNV oder wenn Strecken zu Fuß zurückgelegt werden und die geringsten Belastungen wurden bei der Nutzung des MIV gemessen.

Die Messungen in beiden Ländern ergeben, dass die Exposition von Verkehrsteilnehmer*innen gegenüber Luftschadstoffen von der Verkehrsmittelwahl abhängt und hierüber von ihnen beeinflusst werden kann.

Forschungsfrage 3.2: Können Verkehrsteilnehmer*innen durch die Routenwahl ihre persönliche Exposition gegenüber Luftschadstoffen beeinflussen?

Die Bewertung für die Messungen in Deutschland wurde in Anlehnung an die Bewertung der Verkehrsmittelwahl durchgeführt, es werden nun zusätzlich die untersuchten Routen bewertet (s. Kap. 6.6.4). Durch ein teilformalisiertes Bewertungsverfahren werden erst die Belastungen getrennt nach UFP und größeren Partikeln bewertet und anschließend in einer Gesamtbewertung zusammengefügt. Die **Bewertung der UFP** (s. Tab. 31) hat ergeben, dass die Fahrten mit dem ÖPNV in Bezug auf die Belastung durch UFP am besten abschneiden. Die Fahrten mit dem Pk_{WNeu} werden im Vergleich zum ÖPNV etwas schlechter eingeschätzt. Am wenigsten gut werden die Fahrten mit Pk_{WAlt} und Fahrrad bewertet. Vor allem bei den Fahrten mit dem Fahrrad hat die Routenwahl einen großen Einfluss auf die Exposition gegenüber UFP. Bei einem Streckenverlauf entlang stark belasteter MIV Routen wird die Belastung durch UFP am schlechtesten bewertet. Wie auch andere Forschungen gezeigt haben, kann der Anteil der UFP-Exposition deutlich reduziert werden, wenn beim Pendeln mit dem Fahrrad Hauptstraßen vermieden werden (s. Kap. 3.2.3).

Tab. 31: Bewertung der Belastung durch UFP in Abhängigkeit der Verkehrsmittel- und Routenwahl
Quelle: Eigene Darstellung

Verkehrsmittel	Route	LDSA [$\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$]	Nutzwert	Anzahl UFP [$\#/ \text{cm}^3$]	Nutzwert	Masse UFP [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Nutzwert	Größe UFP [nm]	Nutzwert	Bewertung
Pk _{WNeu}	B44	23,62	2	16.686	3	2,09	2	32,17	3	2,6
	A66	23,68	2	15.845	3	1,96	2	33,26	3	2,6
Pk _{WAlt}	B44	33,45	4	22.975	5	2,75	4	34,97	3	4,0
	A66	34,95	4	25.290	5	2,52	4	32,17	3	4,0
Fahrrad	B44	34,34	4	29.173	6	1,77	1	23,03	5	4,6
	Neben	23,26	2	18.589	4	1,26	1	24,91	5	3,4
S-Bahn		18,68	1	9.760	1	2,05	2	38,52	2	1,4
Bus/U-Bahn/Tram		24,35	2	14.609	2	2,16	2	36,28	2	2,0
Gewichtung		0,3		0,3		0,1		0,3		

Tabelle 32 zeigt das Ergebnis der **Bewertung der Belastung durch größere Partikel**. Hier ergibt sich ein etwas anderes Bild. Am besten werden die Fahrten mit dem Pk_{WAlt} und dem Pk_{WNeu} bewertet. Die Belastung durch größere Partikel liegen bei Fahrten mit dem Fahrrad zwischen denen mit dem MIV und ÖPNV. Auch hier sind wieder Unterschiede zwischen der Haupt- und Nebenstrecke erkennbar. Am schlechtesten wird die Belastung bei Fahrten mit der S-Bahn und bei der Strecke, die mit Bus, U-Bahn und Tram zurückgelegt wird, bewertet.

Tab. 32: Bewertung der Belastung durch PM_{2,5} und PM₁₀ in Abhängigkeit der Verkehrsmittel- und Routenwahl
 Quelle: Eigene Darstellung

Verkehrsmittel	Route	PM _{2,5} [μg/m ³]	Nutzwert	PM ₁₀ [μg/m ³]	Nutzwert	Bewertung
Pkw _{Neu}	B44	4,54	1	8,92	2	1,4
	A66	3,88	1	7,51	2	1,4
Pkw _{Alt}	B44	4,32	1	5,8	1	1,0
	A66	4,48	1	5,57	1	1,0
Fahrrad	B44	6,84	2	13,79	3	2,4
	Neben	7,21	2	17,93	4	2,8
S-Bahn		14,97	4	27,00	5	5,0
Bus/U-Bahn/Tram		11,59	4	21,93	5	4,0
Gewichtung			0,3		0,3	

In der folgenden Tabelle werden die Bewertungen der UFP sowie von PM_{2,5} und PM₁₀ abschließend zu einer **Gesamtbewertung** zusammengefasst. Insgesamt wird die Exposition gegenüber Luftschadstoffen bei der Nutzung des Pkw_{Neu} als am geringsten eingestuft. Die Belastungen bei der Nutzung des Pkw_{Alt} und des ÖPNV liegen auf einem ähnlichen Niveau. Am höchsten sind die Belastungen für Radfahrer*innen, wobei diese ihre Exposition gegenüber Luftschadstoffen durch die Wahl einer Nebenstrecke reduzieren können. Damit zeigen die Ergebnisse, dass Verkehrsteilnehmer*innen durch die Routenwahl ihre persönliche Exposition gegenüber Luftschadstoffbelastungen beeinflussen können. Generell ist zu bedenken, dass sich im aktiven Verkehr wie beim Radfahren oder zu Fuß gehen die Aufnahme von Luftschadstoffen erhöht, jedoch der **gesundheitliche Nutzen** immer noch größer als die negativen Auswirkungen ist (s. Kap. 3.2.3).

Tab. 33: Gesamtbewertung der Luftschadstoffbelastung in Abhängigkeit der Verkehrsmittel- und Routenwahl
 Quelle: Eigene Darstellung

Verkehrsmittel	Route	UFP	PM _{2,5} und PM ₁₀	Gesamtbewertung
Pkw _{Neu}	B44	2,6	1,4	2,1
	A66	2,6	1,4	2,1
Pkw _{Alt}	B44	4,0	1,0	2,8
	A66	4,0	1,0	2,8
Fahrrad	B44	4,6	2,4	3,7
	Neben	3,4	2,8	3,2
S-Bahn		1,4	5,0	2,8
Bus-U-Bahn-Tram		2,0	4,0	2,8
Gewichtung		0,6	0,4	

Die Messungen in Deutschland ergeben, dass vor allem Radfahrer*innen durch die Routenwahl die Luftschadstoffbelastungen, denen sie ausgesetzt sind, beeinflussen können. Bei der Nutzung des Pkw hat die Routenwahl einen geringeren Einfluss.

Forschungsfrage 3.3: Können Verkehrsteilnehmer*innen durch die Zeitwahl ihre persönliche Exposition gegenüber Luftschadstoffbelastungen beeinflussen?

Aus den während der Messungen in Deutschland gewonnenen Daten konnte kein Einfluss der **Zeitwahl** auf die Exposition von Verkehrsteilnehmer*innen gegenüber Luftschadstoffen festgestellt werden (s. Kap. 6.6.5). Dies liegt zum einen daran, dass nicht ausreichend Messfahrten während der Spitzenstunden stattgefunden haben. Zum anderen waren die Spitzenstunden während des Erhebungszeitraums aufgrund der Auswirkungen der Corona-Pandemie auf die Verkehrsnachfrage nicht so ausgeprägt, wie es vor der Pandemie der Fall war (Lenz et al. 2020: 99-100).

Bei den Messungen in Vietnam (s. Kap. 6.7.3) wurden während der Spitzenzeiten deutlich höhere Verkehrsbelastung wahrgenommen, verglichen mit den Zeiten außerhalb der **Spitzenstunden**. Die Messungen haben ergeben, dass die Zeitwahl vor allem bei Fahrten mit dem Motorrad und Fahrrad einen Einfluss auf die Exposition gegenüber Luftschadstoffen hat. Motorradfahrer*innen und Radfahrer*innen sind während der Spitzenstunden deutlich höheren Luftschadstoffbelastungen ausgesetzt, verglichen zu den Zeiträumen außerhalb der Spitzenstunden. Bei Pkw- und Busnutzer*innen beeinflusst die Zeitwahl weniger die Exposition gegenüber Luftschadstoffen.

Die Messungen in Vietnam zeigen, dass die Zeitwahl vor allem bei der Nutzung des Motorrads und des Fahrrads einen Einfluss auf die Exposition von Verkehrsteilnehmer*innen gegenüber Luftschadstoffen hat. Entsprechend können Verkehrsteilnehmer*innen ihre Exposition über die Zeitwahl beeinflussen.

Forschungsfrage 3.4: In welchen Situationen sind Radfahrer*innen besonders hohen Luftschadstoffbelastungen ausgesetzt?

Die Auswertung der Messungen verschiedener **Situationen im Radverkehr** in Bezug auf die Anzahlkonzentration UFP hat ergeben, dass Radfahrer*innen vor allem bei **Wartevorgängen an LSA** hohen Belastungen ausgesetzt sind, wenn der Wartevorgang sowie der anschließende **Anfahrtsvorgang** in der Mitte oder am Ende der Warteschlange des Kfz-Verkehrs stattfindet. Ist es Radfahrer*innen unter Abwägung der Verkehrssicherheit möglich, sich an LSA vor der Warteschlange des Kfz-Verkehr aufzustellen, sind sie geringeren Luftschadstoffbelastungen durch UFP ausgesetzt. (s. Kap. 6.6.7)

Radfahrer*innen sind vor allem während Wartevorgängen an LSA, die in der Mitte oder am Ende der Warteschlange des Kfz-Verkehrs stattfinden, sowie bei den anschließenden Anfahrtsvorgängen hohen Luftschadstoffbelastungen ausgesetzt.

Forschungsfrage 3.5: In welchen Situationen sind Nutzer*innen des ÖPNV besonders hohen Luftschadstoffbelastungen ausgesetzt?

Die Analyse der Belastungen während verschiedener Situationen bei der Nutzung des ÖPNV hat ergeben, dass in Bezug auf UFP vor allem **Wartevorgänge** an oberirdischen Haltestellen in unmittelbarer Nähe zu durch den motorisierten Verkehr stark belasteten Straßen hohe Belastungen aufweisen (s. Kap. 6.6.8). Zu dieser Erkenntnis kommen ebenfalls Bonn et al. bei mobilen Messungen in Berlin (Bonn et al. 2016: 7795). Warten Nutzer*innen des ÖPNV an Haltestellen mit geringerer Belastung durch den motorisierten Verkehr oder an unterirdischen Haltestellen sind sie geringeren Luftschadstoffbelastungen durch UFP ausgesetzt. Grund hierfür ist, dass UFP hauptsächlich bei Verbrennungsvorgängen entstehen und die Belastungsintensität somit unter anderem vom motorisierten Verkehr abhängig ist. An durch den motorisierten Verkehr gering belasteten Straßen und an unterirdischen Haltestellen ist somit der Einfluss des Verkehrs auf die Luftschadstoffbelastung durch UFP geringer.

Bei der Auswertung der Belastungen durch $PM_{2,5}$ und PM_{10} während verschiedener Situationen im ÖPNV zeigt sich, dass vor allem die unterirdischen Wartevorgänge extrem hohe Belastungsintensitäten aufweisen. Grund hierfür sind vor allem Bremsvorgänge sowie Aufwirbelungen von Partikeln während der An- und Abfahrtvorgänge der Bahnen im unterirdischen Streckennetz.

Bei der Betrachtung von UFP sind Nutzer*innen des ÖPNV vor allem während Wartevorgängen an Hauptverkehrsstraßen hohen Belastungen ausgesetzt. Bei der Betrachtung größerer Partikel werden bei den Wartevorgängen an unterirdischen Haltestellen sehr hohe Belastungen verzeichnet.

7.4 Forschungsfeld 4 - Stadtstrukturelle Aspekte

Neben den gezeigten verkehrsplanerischen Aspekten haben insbesondere auch städtebauliche Strukturen Auswirkungen auf die Belastungssituation, denn „unsere Gesundheit ist untrennbar verbunden mit der Qualität und der Gestaltung der (natürlichen, gebauten, sozialen und kulturellen) Umwelt, in der wir leben“ (Baumeister et al. 2019: 79). Allerdings sind generelle Aussagen über die **Effekte planerischer Eingriffe** auf die gesamte Stadt nicht möglich, sondern können nur für einzelne Standorte und Planungen bewertet und abgewogen werden (Anders 2018: 31). Hinweise zu stadtstrukturellen Aspekten ließen sich jedoch aus der Literatur und den Messungen identifizieren. Abbildung 72 zeigt beispielhaft das Belastungsniveau der Partikelanzahlkonzentration UFP. Der Darstellung ist zu entnehmen, dass Stadtstruktur und Nutzungsart, wie hier die Grünfläche, Unterschiede in der Luftschadstoffbelastung aufweisen.

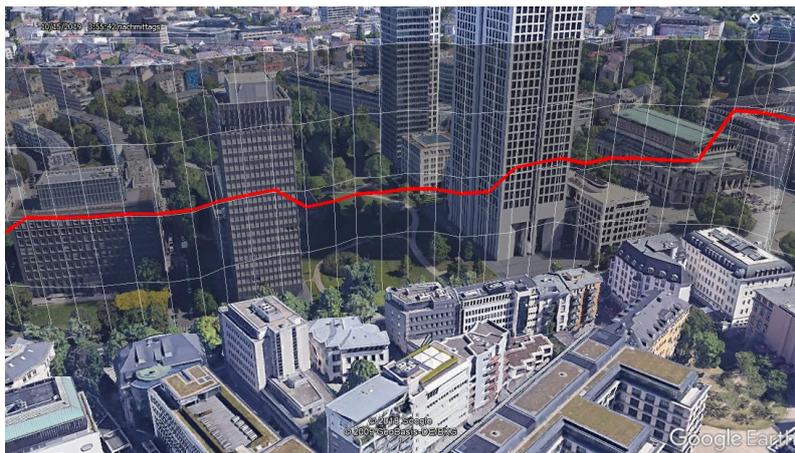


Abb. 72: Beispielhafte Darstellung der Luftschadstoffbelastung durch UFP entlang eines Streckenverlaufs in Frankfurt am Main

Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage Google Earth

Forschungsfrage 4.1: Welche Erkenntnisse bezüglich städtebaulicher Strukturen und deren Auswirkung auf die Luftqualität sind festzustellen?

Zunächst einmal lassen sich aus der Literatur Gesundheitsrisiken, wie eine hohe Luftschadstoffbelastung, zumindest zum Teil auf bauliche Elemente zurückführen, die durch Stadt- und Verkehrsplanung beeinflussbar sind (Grant 2019: 234; s. Kap. 3). Wichtige Erkenntnisse sind z.B. die Relevanz der baulichen Strukturen. Baumassen sowie Gebäudegestaltung wirken auf die Durchlüftung und die Lufthygiene, insbesondere bei einem hohen Grad an Bebauung und Versiegelung sowie einer räumlichen Nähe zu Luftschadstoffquellen. Bei geschlossenen und hohen Bebauungsformen besteht ein Konflikt zwischen hochbelasteten Straßenräume mit ruhigen und weniger belasteten Innenhöfen, d.h. Orte mit einer hohen Aufenthaltsqualität für die Bewohner*innen. Dieser Konflikt muss in planerischen Entscheidung standortspezifisch abgewogen werden. (Merbitz 2013: 66; Umweltbundesamt 2017b: 9) Des Weiteren müssen die Hauptwindrichtung und die lokale Belastungssi-

tuation in die Planungen einbezogen werden. Jedoch sind „die Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Klimaelementen wie Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit oder Wind und einer Stadt [...] so komplex, dass man die Folgen von baulichen oder anderen Veränderungen in einem Stadtviertel nicht ohne weiteres abschätzen kann. Sollen Auswirkungen einer beabsichtigten Veränderung der Stadtstruktur vorausgesagt werden, ist der Einsatz eines numerischen Simulationsmodells eine sinnvolle Lösung“ (LANUV 2011: 163). Bezüglich der Stadtstruktur haben sich folgende Erkenntnisse herauskristallisiert (s. Kap. 2.1.1; Martins et al. 2012: 65; Umweltbundesamt 2019a: 6; Umweltbundesamt 2017b: 10).

- Kurze Wege sowie eine fußgänger- und radfahrerfreundliche Umgebung können sich auf den Modal Split sowie das multimodale Verkehrsverhalten und damit positiv auf die verkehrsbedingten Emissionen auswirken.
- Durch eine kompakte,utzungsgemischte Stadtstruktur mit kurzen Wegen kann die Verkehrsmittelwahl beeinflusst und Verkehr vermieden werden.
- Eine wichtige Basis ist die Vermeidung von Zersiedlung infolge von ungeordneter Stadterweiterung.
- Hohe Dichte in Kombination mit hoher Gestaltungsqualität führt zu einer hohen Aufenthaltsqualität und sozialer Interaktion, die wiederum eine Voraussetzung für vielfältige Nutzungsmischung und eine hohe ÖPNV-Qualität darstellen.
- Die Abhängigkeiten zwischen Stadtentwicklungs- und Verkehrsentwicklungsplanung sollen für einen stadtverträglicheren Verkehr genutzt werden.
- Gute Verbindungen in und zwischen den Verkehrsnetzen führt zu einer guten Erreichbarkeit und Zugänglichkeit.

Als besonders fußgängerfreundlich gelten Baublöcke mit einer Ausdehnung von 70 m Breite und 120-140 m Länge sowie Entfernungen von 400-500 m mit rasterförmig angelegten Straßen. Ebenfalls relevant sind der Straßenbelag, die Straßenbreite, separate Fuß- und Radwege, die Vermeidung von Sackgassen für Fuß- und Radverkehr sowie die Qualität von Straßenräumen. (Baumeister et al. 2019: 37-38, 68; Gehl 2015: 143) Gleichzeitig können solche Strukturen damit die körperlichen Aktivitäten unterstützen und Effekte in weiteren Sektoren (z.B. Energie) generieren. Daher sollten Netze für aktive Mobilität weiter ausgebaut werden. (Giles-Corti et al. 2016: 2919; Umweltbundesamt 2017a: 30)

Weltweit haben viele Städte mit verkehrlichen Herausforderungen (ruhender und fließender Verkehr) zu kämpfen, die mit der Urbanisierung sowie weiteren Trends mit Auswirkungen auf die Verkehrsnachfrage zusammenhängen (Stevenson und Gleeson 2019: 282). Jedoch sind planerische Möglichkeiten zur Beeinflussung der Immissionsbelastung begrenzt und es müssen insbesondere auch emissionsmindernde Maßnahmen umgesetzt werden, wie die Förderung von emissionsarmen Verkehrsmitteln und dem Umweltverbund (AGGSE 2020: 5; Baumüller 1999a: 169). Diese Ausführungen weisen auf vielfältige Zielkonflikte hin, die einer ausgewogenen standortspezifischen Lösung bedürfen.

Die Luftqualität lässt sich durch zweckmäßige Anordnung von Funktionen und Nutzungsarten, eine angemessene Dichte und kleinteilige Nutzungsmischung sowie durch ausreichende Freiflächen und durch Nutzung der engen Abhängigkeiten zwischen Stadt- und Verkehrsplanung verbessern.

Forschungsfrage 4.2: Sind Unterschiede in der Luftschadstoffbelastung verschiedener städtebaulichen Situationen durch Messungen nachweisbar?

Zunächst einmal zeigten die Messungen, dass Unterschiede zwischen verschiedenen städtebaulichen Strukturen vorliegen. Zum Beispiel konnte bei mobilen Messungen der negative Effekt von Garküchen auf die Luftschadstoffbelastung (s. Kap. 6.7.4), von Kontenpunkten im Vergleich zur freien Strecke bei den PM₁₀-Messungen sowie von unbefestigten Rad- und Fußwegen beim Fahrradfahren

festgestellt werden (s. Kap. 6.6.9). Jedoch hat die Analyse weiterer städtebaulicher Situationen wie Bebauung und Nutzung ergeben, dass der Einfluss auf die Luftschadstoffbelastung nur teilweise quantifizierbar ist. Grund hierfür wird in der Komplexität der Zusammenhänge und der Vielzahl von Einflussfaktoren auf die Luftschadstoffbelastung gesehen. Des Weiteren überwiegt der Einfluss des Verkehrsaufkommens (s. Kap. 6.6.10). Zum einen ist eine gewisse Luftschadstoffbelastung notwendig um die Effekte der städtebaulichen Situation überhaupt sichtbar zu machen und zum anderen sollte diese recht konstant vorliegen damit einzelner Emissionsquellen die Messungen nicht dominieren. Dies machen auch die Ergebnisse der stationären Messungen deutlich (s. Kap. 6.6.10). In der Miquelallee zeigte sich der Effekt, dass sich die Emissionen im Straßenraum umso mehr verteilen und die Belastungen umso konstanter sind je offener die Randbebauung und je breiter der Straßenquerschnitt ist. Dies wurde durch die geringe Streuung der aufgenommenen Messwerte festgestellt. (s. Kap. 6.6.10). Für detaillierte Wirkzusammenhänge zwischen der baulichen Gestalt und der Luftschadstoffbelastung sind entweder ein anderes Untersuchungsdesign oder Simulationen notwendig.

Die mobilen und stationären Messungen zeigen, dass der Einfluss städtebaulicher Situationen nur teilweise zu beobachten ist.

Forschungsfrage 4.3: Welche messbaren Effekte hat die Gestaltung von Straßenquerschnitten inklusive städtebauliche Randbebauung auf die Belastungssituation?

Bei der Analyse der stationären Messungen wurde der Einfluss von offenen und geschlossenen sowie von geringen und großen Straßenraumbreiten untersucht. Die Analyse hat ergeben, dass bei einigen Messungen eine Korrelation zwischen Luftschadstoffen und Verkehrsbelastungen nachgewiesen werden konnte. Den Einfluss der Straßenbreite und Randbebauung bestätigen Erkenntnisse aus anderen Untersuchungen (s. Kap. 2.5.3) Zudem zeigt sich, dass eine offene Bebauung ein konstanteres Niveau der Luftschadstoffbelastungen zur Folge hat, verglichen mit geschlossener Bebauung (s. Kap. 6.6.10). In Vietnam zeigt sich, dass Verkehrsbedingungen, Garküchen am Straßenrand und der Abstand zwischen Gehweg und Straße einen starken Einfluss auf die Belastung der Fußgänger*innen durch Luftschadstoffe hat (s. Kap. 6.7.4). Aus der Literatur lassen sich noch weitere messbare Effekte identifizieren:

- Die Luftschadstoffkonzentration liegt im Allgemeinen auf der Lee-Seite auf einem höheren Niveau als auf der Luv-Seite (s. Kap. 2.5.2)
- Die höchsten Luftschadstoffbelastungen treten auf, wenn der Wind senkrecht zur Straßenachse und zu Gebäuden weht, da die Belüftung der Straße verringert wird. Bei der Erstellung eines Bebauungsplans und der damit verbundenen Festlegung der Fahrbahnausrichtung wird daher städtebaulich empfohlen, die Straßen zur besseren Belüftung parallel zur Hauptwindrichtung auszurichten. (s. Kap. 3.2.2)
- Im offenen bzw. aufgelockerten Umfeld wird die Ausbreitung von Emissionen hauptsächlich von Windrichtung und Windgeschwindigkeit bestimmt (s. Kap. 2.5.3).
- Je nach Windrichtung und baulichen Gegebenheiten können verschiedene Ausbreitungsmöglichkeiten der Luftschadstoffe auftreten. Die Emissionen des Kraftverkehrs werden in niedriger Höhe an die Umwelt abgegeben. (s. Kap. 2.5.3)

Daraus resultiert eine hohe Bedeutung der jeweiligen Bebauungsform für die Beeinflussung der Luftschadstoffbelastung. Besonders bei der Gestaltung von Knotenpunkten und Wartebereichen sollte behutsam und mit Berücksichtigung der Erkenntnisse bei der Verkehrswegegestaltung geplant werden. Allgemein sollten Aufenthaltsorte draußen in der Nähe von stark frequentierten Straßen aus Sicht der Luftschadstoffbelastung vermieden und damit sollte der Flächenverteilung ein besonderes Augenmerk geschenkt werden. (s. Kap. 6.6.9) Diese Erkenntnisse müssen in der Neuplanung und der Umplanung von Quartieren, wenn möglich, berücksichtigt werden.

Die stationären Messungen ergeben, dass eine offene Randbebauung ein konstanteres Niveau der Luftschadstoffbelastungen zur Folge hat als eine geschlossene Randbebauung. Dies ergänzt bestehende Erkenntnisse über den Zusammenhang von Bebauung und Luftqualität.

Forschungsfrage 4.4: Sind Grünflächen innerhalb von Stadtgebieten Rückzugsräume mit geringerer Luftschadstoffbelastung?

Der Beitrag von Grün- und Freiflächen, insbesondere bezogen auf den Luftaustausch und die kleinräumliche Luftverbesserung sowie als Bewegungsraum (Sport- und Freizeitflächen usw.), ist allgemein anerkannt (AGGSE 2020: 6; LANUV 2011: 165; Merbitz und Schneider 2012: 147). Zentrale Bedeutung haben sie für das Stadtklima und die Verbesserung der Luft- sowie der Lebensqualität der Bevölkerung (Fehr und Hornberg 2018a: 344; Umweltbundesamt 2019a: 10). Damit können vor allem große Grünflächen Rückzugsorten mit geringer Luftschadstoffbelastung darstellen. Dies wird auch in der Luftschadstoffbelastung der durchgeführten Messungen sichtbar (s. Abb. 733). Bonn et al. kommen bei ihren Untersuchungen zu dem Ergebnis, dass begrünte Flächen einen höheren positiven Einfluss aufweisen, je näher sie an den Emissionsquellen liegen (Bonn et al. 2016: 7798). Solche Grün- und Freiräume mit ihren sozialen sowie ökologischen, ökonomischen und kulturellen Funktionen sollten der Bevölkerung verstärkt in einem ausreichenden Maß und innerhalb einer vertretbaren Entfernung zur Verfügung gestellt werden (Umweltbundesamt 2017a: 26). Allerdings zeigen die mobilen Messungen auch, dass bei der Wegegestaltung auf die Materialien geachtet werden sollte. Wege mit unbefestigten Oberflächen sind bei trockener Witterung, besonders beim Fahrradfahren, mit einer hohen Belastung an groben Partikeln verbunden (s. Kap. 6.6.9).

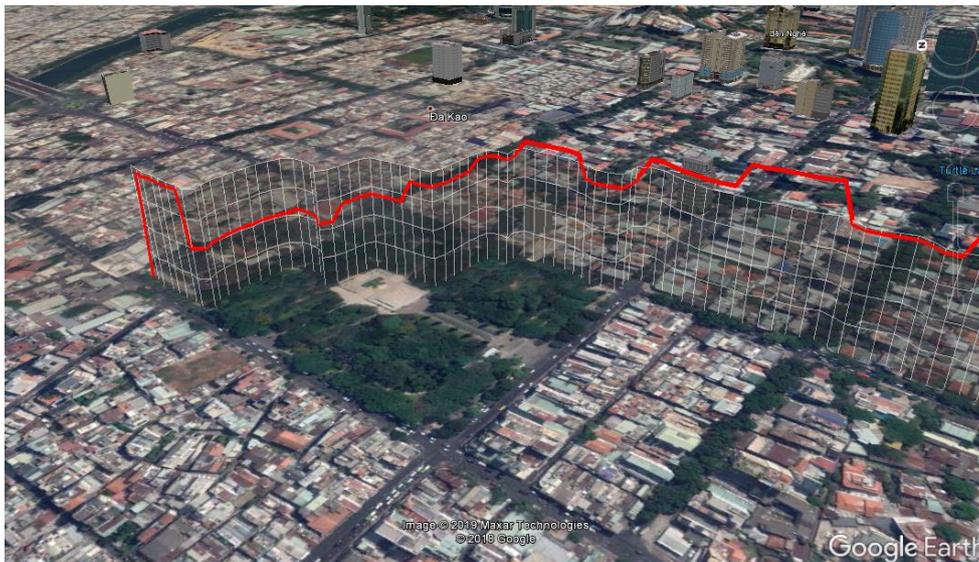


Abb. 73: Beispielhafte Darstellung der Luftschadstoffbelastung durch UFP entlang eines Streckenverlaufs in HCMC

Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage Google Earth

Urbane Grünflächen stellen durch ihre geringe Luftschadstoffbelastung wichtige Rückzugsräume in der Stadt dar und können sich des Weiteren positiv auf die Gesundheit auswirken.

Forschungsfrage 4.5: Welche Wirkungen hat eine straßenbegleitende Begrünung auf die Belastungssituation durch Luftschadstoffe?

Zunächst einmal sind Pflanzen, von Bäumen bis zu Moosen, wirksame Filter für Luftschadstoffe und für weitere positive Gesundheitseffekte verantwortlich (Merbitz 2013: 143; Säumel et al. 2016: 76). Folgende Wirkungen sind bei straßenbegleitender Begrünung zu beachten:

- Nur aufgelockerte Anpflanzungen erzeugen kleinräumige Luftströmungen, die für eine wirkungsvolle Staubabscheidung benötigt werden.
- Nicht nur Straßenbäume, sondern auch Sträucher, Kletterpflanzen und krautige Bepflanzung sind wirksam.
- Begrünungen in der Randbebauung können die Luftverbesserung weiter unterstützen.
- Straßenbegleitende Begrünung kann nicht per se als gut oder schlecht für die lufthygienische Situation im Straßenraum gewertet werden. Beispielsweise führt ein geschlossenes Baumkronendach in einer Straßenschlucht durch verminderten Luftaustausch zu einer Anreicherung von Luftschadstoffen im unteren Straßenraum.
- Die Wahl der Art der Bepflanzung und deren Standort muss anhand der jeweiligen Belüftungs- und Belastungssituation bewusst, gegebenenfalls unterstützt durch eine Modellierung, erfolgen.
- Die Pflege der Begrünung ist für deren Wirksamkeit ausschlaggebend.

(s. Kap. 2.5; Gromke 2019: 109-110; LANUV 2011: 169, 173; Merbitz 2013: 143; Säumel et al. 2016: 75-76)

Straßenbegleitende Begrünung kann sowohl positive wie auch negative Wirkungen auf die Belastungssituation durch Luftschadstoffe besitzen und muss daher standortspezifisch geplant werden.

7.5 Forschungsfeld 5 - Potentielle Maßnahmen

Es existieren städtebauliche und verkehrliche Lösungen bzw. Lösungsansätze zur Luftverbesserung bzw. zum Schutz vor Luftschadstoffbelastung, die für eine verbesserte Gesundheits- und Lebensqualität in urbanen Räumen umgesetzt werden können. An dieser Stelle werden nun die Forschungsfragen des fünften Forschungsfeldes diskutiert. Potentielle Maßnahmen wurden ebenfalls bei den beiden ersten SHOTUP-Expertenworkshops gesammelt. Deren Ergebnisse sind in die folgende Diskussion eingeflossen. Mit der „Healthy Urban Development Checklist“ (NSW Department of Health 2020), die für Deutschland im „Leitfaden Gesunde Stadt“ (Baumeister et al. 2019) konkretisiert wurde, und „Shaping Neighbourhood“ (Barton et al. 2006) stehen vielfältige Hinweise für die planerische Praxis zur Verfügung, die wichtige Hinweise zur Stärkung einer gesundheitsorientierten Stadtentwicklung geben.

Forschungsfrage 5.1: Welche strategischen und regulatorischen Maßnahmen aus den drei Fachdisziplinen können potenziell die menschliche Gesundheit positiv unterstützen?

Als effektive Maßnahme wird die Senkung der urbanen Emissionen, insbesondere des Straßenverkehrs, genannt. Daneben sind auf Ebene der strategischen und regulatorischen Maßnahme noch die Förderung der Ventilation durch z.B. Frischluftschneisen oder der Anpflanzung geeigneter Vegetation denkbar. (Merbitz 2013: 147; Säumel et al. 2016: 74). Eine abgestimmte Flächennutzungs- und Verkehrsentwicklung sowie eine Sicherung von Grünflächen sind ebenso Grundvoraussetzung (s. Kap. 7.4) und sollte durch die Abschätzung der Gesundheitseffekte der Planungen (z.B. durch eine HIA oder deren Integration in Umweltverträglichkeitsprüfungen) und Evaluation begleitet werden (Baumgart 2012: 271). Als Voraussetzung für Planungsmaßnahmen in einer Stadt sollten Kenntnisse über die Wirkungen von Luftverunreinigungen auf die Umweltgüter gehören. Negative Wirkungen durch Verunreinigungen sollten durch vorbeugende Maßnahmen vermieden werden. (Koch 1999: 272) Mit-

hilfe einer integrierten Planung von Raum und Verkehr sowie der Beachtung des Health in All Policies-Ansatz, kann über einen langen Zeitraum mit konsistenten Einzelentscheidungen ein Grundverständnis sowie eine wirksame Weichenstellung erreicht werden (AGGSE 2020: 3; Gertz 2020: 368).

Der **Straßenverkehr** kann beispielsweise durch intermodale Angebotskonzepte, eine multimodale Orientierung, Sharing-Angebote, Förderung der aktiven Mobilität, Innovationen durch Digitalisierung und neue Fahrzeug- und Antriebskonzepten sowie dem Parkraum- und Mobilitätsmanagement einen wichtigen Beitrag leisten (s. Kap. 2.3; Aichinger und Klein-Hitpaß 2020: 20; Agora Verkehrswende 2018: 25; Beckmann 2020a: 6-7). Für eine umweltfreundliche und gesunde Mobilität kann sich laut Becker und Gerlach die Verkehrspolitik „nicht mehr auf eine nachsorgende Anpassungsplanung beschränken, sondern muss aktiv und tatsächlich gestaltend auf die Verkehrsentstehung und deren Ursachen einwirken“ (Becker und Gerlach 2020: 203).

Im Bereich der **Bauleitplanung** können Grundprinzipien einer gesundheitsorientierten Stadtentwicklung, wie u.a. ein durchlässiges und sicheres Straßennetz für alle Verkehrsteilnehmer*innen mit angemessener Gestaltung des Straßenraumes, optimiertes Netz an zugänglichen Freiräumen, Schutz und Ausweitung ruhiger und wenig belasteter Bereiche in der Stadt oder eine Wohnungsdichte und -vielfalt für sich ändernde Bedürfnisse, strategisch vorbereitet werden (Umweltbundesamt 2017b: 28-29; Western Australian Planning Commission 2015: 6). Um diese strategischen und regulatorischen Maßnahmen effektiv umsetzen zu können, sind eine frühzeitige und kontinuierliche Einbindung aller relevanten Akteure, eine adressatenspezifische Aufarbeitung von Daten und Material über gesundheitsbezogene Themenstellungen zur Bewusstseinsbildung, eine interdisziplinäre Zusammenarbeit sowie die dafür erforderliche Ressourcenausstattung notwendig (Baumgart 2012: 277; Baumgarten 2012: 82; Böhm et al. 2020: 431-432; Bunzel et al. 2007: 21-26). Ebenso müssen geeignete Rahmenbedingungen im Verkehrswege- und Verkehrsrecht sowie im Bauplanungs- und -ordnungsrecht geschaffen werden (Agora Verkehrswende 2018; Beckmann 2020a: 6). Letztendlich funktionieren solche Prozesse außerdem nur mithilfe der Zivilgesellschaft (Polinna 2021: 134).

Die Grundvoraussetzungen für eine gesundheitsorientierte Stadtentwicklung werden durch eine Vielzahl an strategischen und regulatorischen Maßnahmen geschaffen. Gleichzeitig dienen diese zur Vorbereitung und Abstimmung der baulichen Maßnahmen.

Forschungsfrage 5.2: Mit welchen baulichen (und technischen) Maßnahmen können die Erkenntnisse aus den Forschungsfeldern 3 und 4 umgesetzt werden?

Besonders die strategischen Ansätze bilden den Rahmen und Ausgangspunkt für die konkrete Anwendung der Gesundheitsförderung durch bauliche und technische Maßnahmen. Denn „die Wechselwirkungen zwischen Siedlung und Verkehr betreffen sowohl die strategischen Siedlungs-/Stadt- und Verkehrsplanungen als auch deren operative Umsetzung durch Bau, Betriebsformen und Nutzungsregelungen. [...] Die Wirkungen sind empirisch auch deswegen schwierig nachzuweisen, weil es starke wechselseitige Bedingtheiten sowie vielfältige Einflüsse aus Sozial- und Bevölkerungsstruktur, Wirtschaftssystem, Technologieentwicklung u. ä. gibt“ (Beckmann 2020b: 273). Bauliche Maßnahmen mit folgender Zielsetzung sollten umgesetzt werden:

- Schaffung eines physischen Umfelds, das alle Menschen zum Gehen und zu anderen körperlichen Aktivitäten ermutigt. (Eitler et al. 2013: 11)
- Umsetzung der Bebauungsstruktur in so einer Form, dass der Luftaustausch nicht zu stark vermindert wird. (Kipsch 2014: 3) Zu lösen ist noch die Frage, ob durch eine geschlossene Bebauung in Richtung der Emissionsquelle geschützte Räume auf die Hinterseite der Gebäude bei gleichzeitig höherer Belastung im Straßenraum eine denkbare Vorgehensweise sein kann.
- Quantitative und qualitative Aufwertung von Grünflächen, da diese nachweislich verschiedene Aspekte der menschlichen Gesundheit unterstützten (Adrian et al. 2018: 32; Säumel und Butenschön 2018: 322, 330)

-
- Angepasste und gute Gestaltung der öffentlichen Freiräume als Erholungs-, Bewegungs- und Aufenthaltsräume. (Adler 2012: 72; Western Australian Planning Commission 2015: 99)
 - Bauliche Umsetzung von intermodalen Angebots- und Sharingkonzepten sowie einem guten Angebot des Umweltverbundes, z.B. durch ÖPNV-Haltestellen in fußläufiger Entfernung, d.h. 300-400 m. (Beckmann 2020a: 6-7; Western Australian Planning Commission 2015: 14, 37)
 - Kompakte und gemischte Stadtstrukturen, die eine Verlagerung des Verkehrs vom motorisierten Individualverkehr auf den Fuß- und Radverkehr sowie den öffentlichen Nahverkehr fördern (u.a. dichtes Streckennetz und enge Taktung), bei gleichzeitig hoher Umwelt- und Aufenthaltsqualität durch ein passendes Verhältnis zwischen bebauten und unbebauten Flächen und deren Anordnung (Adrian et al. 2018: 32; Sallis et al. 2016: 2936).
 - Ein gut ausgebautes Netz mit Ladeinfrastruktur könnte zu einem erhöhten Anteil an Elektrofahrzeugen führen und damit zukünftig einen Rückgang der motorbedingten Emissionen bewirken (s. Kap. 3.2).

Des Weiteren werden technische Lösungen zur Verbesserung der Luftqualität von verschiedenen Firmen angeboten und könnten zumindest im Nahbereich eine senkende Wirkung auf die Luftschadstoffbelastung entwickeln. Sie haben auch weitere positive Effekte auf das Mikroklima oder je nach Gestaltung auf die Aufenthaltsqualität im öffentlichen Raum (s. Tab. 34).

Tab. 34: Beispiele für technische Maßnahmen zur Luftreinhaltung
 Quelle: Eigene Darstellung sowie Bildquellen in Tabelle

**Filterlösungen
 der Firma
 Mann+Hummel**



<https://airfiltration.mann-hummel.com/de/unsere-segmente/public-air/public-air-solutions/>

**BioUrban der
 Firma Biomitech**



BioUrban 1.0

<http://biomitech.org/>

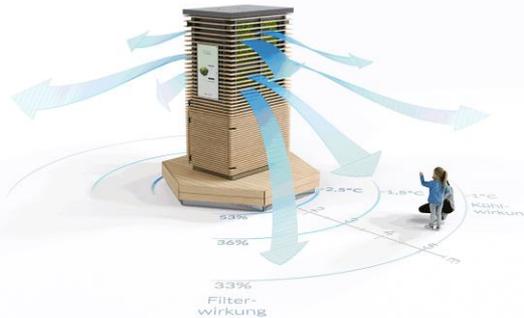


BioUrban 2.0



BioUrban 3.0

**City-Tree der
 Firma greencity
 solutions**



<https://greencitysolutions.de/produkte/city-tree/>

**Pflanzsysteme
 der Firma Helix**



<https://www.helix-pflanzen.de/pflanzensysteme/produkte/mobiles-gruenes-zimmer>
<https://www.helix-pflanzen.de/pflanzensysteme/projekte/gruene-haltestelle-frankfurt-be-gruenter-fahrgastunterstand>

Das Ziel einer gesunderen Umwelt in Städten kann nur durch die konkrete Umsetzung von Maßnahmen erreicht werden. Stadt- und Verkehrsplanung schaffen durch Änderungen der gebauten Umwelt Angebote, die wiederum von den Bürger*innen angenommen werden müssen. Erst mit den persönlichen Entscheidungen der Individuen kann dann indirekt Einfluss auf die Verhaltensweisen und Lebensgewohnheiten der Städter*innen genommen werden. (Busse 1994: 96; Hopfner und Zakrzewski 2012: 51) Holz-Rau und Scheiner kommen zu der Schlussfolgerung, dass meist „die planerische Diskussion die Wirksamkeit von Interventionen in die gebaute Umwelt deutlich [überschätzt]. Dies relativiert die Hoffnungen, die sich an raumstrukturelle Maßnahmen und Konzepte zur Verkehrsvermeidung knüpfen“ (Holz-Rau und Scheiner 2020: 79).

Das Ziel einer gesundheitsorientierten Stadtentwicklung bedarf der konkreten Umsetzung im städtischen Raum. Dafür stehen unterschiedliche bauliche und technische Maßnahmen zur Verfügung, wie Wahl der Gebäudeform, angepasste Nutzungskonzepte, Gestaltung der öffentlichen Räume oder Luftfilter.

Forschungsfrage 5.3: Kann durch eine angepasste Straßenraumgestaltung Einfluss auf die Luftschadstoffbelastung genommen werden?

Aus der Literatur und den Messungen wurde deutlich, dass nicht alleine das Verkehrsgeschehen Einfluss auf die Luftschadstoffbelastung innerhalb der Straßenräumen besitzt (s. Kap. 6.6.10), sondern auch die in Kapitel 2.5 identifizierten Faktoren Wirkungen entfalten können. Daher sind bei Neugestaltung und Umgestaltung von Straßenräumen inkl. Randbebauung gewisse Aspekte zu berücksichtigen. So sollte zunächst bei der Flächenanordnung des Straßenraums für alle Verkehrsträger und den ruhenden Verkehr sowie die weiteren Nutzungen des öffentlichen Raums bestmöglich ausbalanciert werden. Neben ausreichend breiten Geh- und Fahrradwegen gehören dazu eine Radwegeplanung mit Berücksichtigung der Verkehrsstärke, der Funktion der Straße, dem verfügbaren Platz und den angrenzenden Funktionen (z.B. geschützter Radweg ab einer täglichen Verkehrsstärke von 3.000 Fahrzeugen und in der Nähe von Schulen). In der Praxis lassen sich positive Auswirkungen durch eine stärkere Berücksichtigung des Rad- und Fußverkehrs in Städten durch Flächenumverteilung und Straßenraumgestaltungen zugunsten dieser Verkehrsarten beobachten. (Engler et al. 2020: 14-16; Western Australian Planning Commission 2015: 34-36) „Für lebenswerte Städte braucht es eine Flächenaufteilung, die stärker die gesamte Stadtbevölkerung mit ihren vielfältigen Bedürfnissen in den Mittelpunkt rückt und nicht allein die Bedürfnisse der Autobesitzenden berücksichtigt“ (Aichinger und Klein-Hitpaß 2020: 22). Attraktive Angebote für Alternativen zum privaten Pkw benötigen Platz im Straßenraum: Abstellen von Sharing-Fahrzeugen, Mobilitätszentralen, Busspuren, Rad- und Gehwege (Aichinger und Klein-Hitpaß 2020: 20). Die Straßenlängsneigung sowie die Straßenoberfläche besitzen ebenfalls einen messbaren Einfluss auf die Luftschadstoffbelastung. Das liegt zum einen an der Überwindung diverser Fahrwiderstände für den Vorantrieb des jeweiligen Verkehrsmittels und zum anderen an der Bindewirkung der Oberflächenmaterialien für Luftschadstoffe. (s. Kap. 2.5.3)

Bei der Randbebauung muss das Gebäudehöhe-Straßenbreite-Verhältnis, die Art der Bebauung und die Unterschiede zwischen den Straßenseiten je nach Windverhältnissen beachtet werden (s. Kap. 2.5; Gromke 2009: 66). Jedoch sind die Wechselwirkungen so komplex, dass man die Folgen von baulichen oder anderen Modifikationen nicht ohne weiteres abschätzen kann. Diese sollten mithilfe einer Simulation konkret abgebildet werden. (LANUV 2011: 163) Daher ist ein Luftqualitätsmanagement in besonders schlecht belüfteten Straßen notwendig (Pugh et al. 2012: 7692). Dies kann beispielsweise eine abgestimmte Bepflanzung beinhalten. Die Verringerung der Schadstoffkonzentration hängt stark von deren Verweildauer in den Straßenschluchten und damit von der Windgeschwindigkeit ab. In einer idealisierten Stadt mit gleichmäßigen Straßenschluchten mit $h/w = 1$ wurden bei Pugh et al. die jährlichen Durchschnittskonzentrationen von NO_2 und PM_{10} in den Straßenschluchten durch eine Begrünung der Fassaden in großen Bereichen der Straßenschluchten um 9 % und 13 % reduziert. Die Begrünung innerhalb des Straßenraumes zeigte dort insgesamt den größten Nutzen, z.B. im Vergleich zu Dachbegrünung. Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass eine Bepflanzung des

Straßenraums die Luftqualität erheblich verbessern kann. (Pugh et al. 2012: 7696-7697) Gleichzeitig müssen die negativen Auswirkungen von Baumpflanzungen auf die Belüftung von Straßenschluchten berücksichtigt werden. Ohne Berücksichtigung des Standortes kann pauschal keine Erhöhung der Begrünung empfohlen werden. Bei der Auswahl der Straßenbäume sind die Art des Kronendachs, da eine geschlossene Baumkrone in einer engen Straßenschlucht mit signifikanten Emissionsquellen durch verminderten Luftaustausch zu einer Anreicherung von Luftschadstoffen im unteren Straßenraum führen kann, sowie die Wahl einer standortgerechten, verkehrssicheren und klimaresilienten Baumart wichtig (LANUV 2011: 169-170). Des Weiteren können Bauwerksbegrünung, d.h. Begrünung von Dächern und Fassaden, einen weiteren Beitrag zur lufthygienischen Situation leisten (LANUV 2011: 173, 176).

Mit einer angepassten Straßenraumgestaltung kann auf die Luftqualitätssituation Einfluss genommen werden. Dafür müssen Randbebauung, Bepflanzung, Flächenaufteilung und -nutzung optimal aufeinander abgestimmt werden.

Im nächsten Kapitel werden die diskutierten Erkenntnisse zu Handlungsempfehlungen für eine gesundheitsorientierte Stadtentwicklung aufgearbeitet.

8 Kernaussagen und Handlungsempfehlungen für eine gesundheitsorientierte Stadtentwicklung

Die in diesem Kapitel formulierten Kernaussagen basieren auf den gesammelten und in Kapitel 7 diskutierten Erkenntnissen aus der Literatur, den Messungen und den Expertenworkshops. Abgeleitet aus den Erkenntnissen werden anschließend Handlungsempfehlungen gegeben, die bei der Umsetzung einer gesundheitsorientierten Stadtentwicklung herangezogen werden können. Der Fokus liegt dabei auf konkreten baulichen sowie strategischen Maßnahmen auf Quartiers- bzw. Straßenraumebene, die positive Effekte auf die Belastungssituation haben und gesundheitsfördernd wirken können.

8.1 Grundlagen der Handlungsempfehlungen

Zur Einteilung der erarbeiteten Handlungsempfehlungen wurden **vier Handlungsfelder** identifiziert: Gesundheit in allen Politikbereichen, Flächennutzungs- und Verkehrsentwicklungsplanung, Verkehrsplanung und Verkehrstechnik sowie Stadtstrukturen. Dies verdeutlicht den Fokus auf die **räumliche Struktur** (inkl. bauliche und nichtbauliche Maßnahmen), die wiederum in einen institutionellen Rahmen eingebettet werden muss, der eine gesundheitsorientierte Stadt- und Verkehrsplanung begünstigt. Des Weiteren konzentrieren sich die Handlungsempfehlungen auf gesundheitsorientierte Maßnahmen, die die **Luftschadstoffbelastung** beeinflussen können (s. Kap. 2). Neben gesundheitsbezogenen Handlungsempfehlungen werden akteursbezogene Handlungsempfehlungen erstellt, die folgende für die Umsetzung einer gesundheitsorientierten Stadtentwicklung relevanten Akteursgruppen betreffen können:

Tab. 35: Akteure der akteursbezogenen Handlungsempfehlungen
Quelle: Eigene Darstellung

Symbol	Akteur
	Politik und Gesetzgeber
	Automobilhersteller
	Stadt- und Verkehrsplanung
	ÖPNV-Betreiber/ Verkehrsunternehmen
	Verkehrsteilnehmer*innen
	Bevölkerung

Die nachfolgende Abbildung zeigt die identifizierten Handlungsempfehlungen aus den vier Handlungsfeldern übersichtlich und in Schlagwörtern. Dabei können die ersten beiden Handlungsfelder als strategisch-konzeptionell und die beiden letzten Handlungsfelder als konkret-gestalterisch bezeichnet werden.

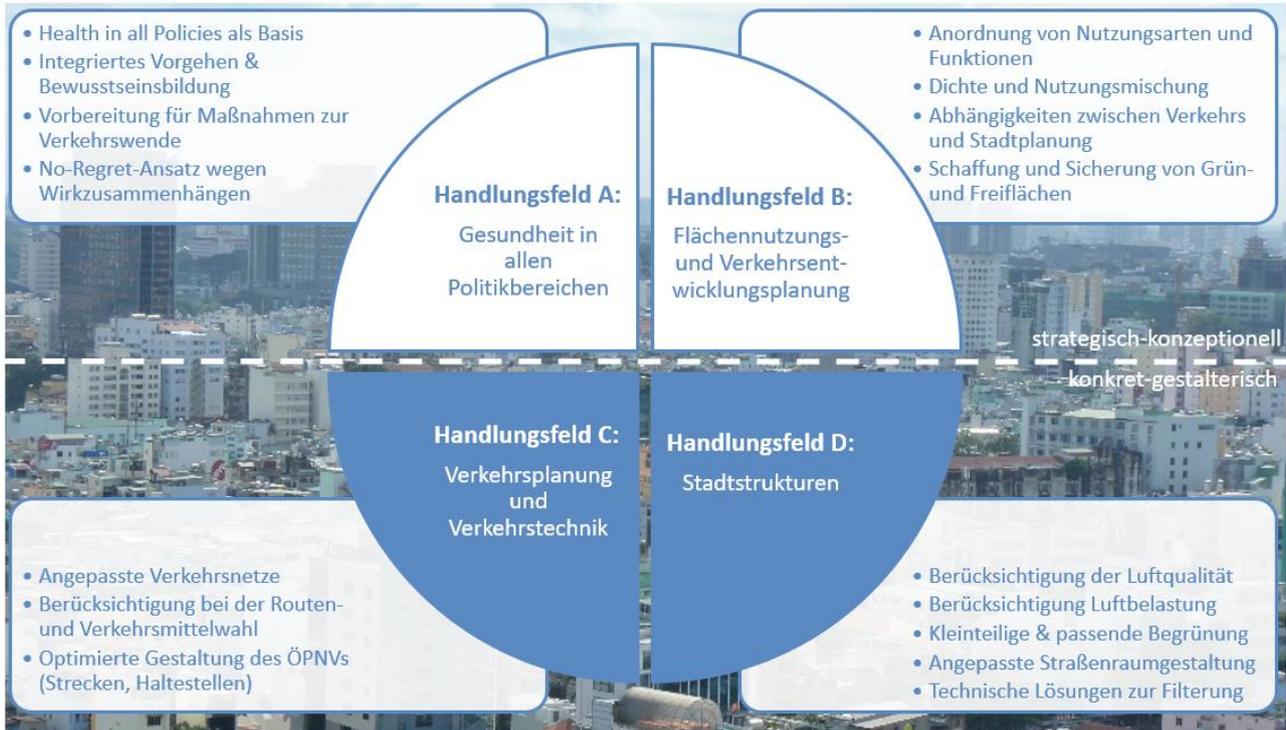


Abb. 74: Übersicht der Handlungsempfehlungen
Quelle: Eigene Darstellung

Bei einem Expertenworkshop am 08.04.2021, der digital durchgeführt wurde, sind **20 Kernaussagen** sowie die ersten Ansätze der Handlungsempfehlungen mit verschiedenen Expert*innen aus den drei Fachdisziplinen diskutiert worden. Nach der Validierung durch die Teilnehmer*innen konnten schlussendlich **gesundheitsbezogene sowie akteursbezogene Handlungsempfehlungen** formuliert werden. In den folgenden Kapiteln werden die Kernaussage und Handlungsempfehlungen jeweils als Abschluss übersichtlich in einer Abbildung dargestellt.

8.2 Handlungsfeld A: Gesundheit in allen Politikbereichen

Die Erkenntnisse aus SHOTUP zeigen, dass eine gesundheitsorientierte Stadtentwicklung eine komplexe und herausfordernde Aufgabe für Stadt- und Verkehrsplanung darstellt. Dafür ist ein gemeinschaftlicher Wille in allen Themenfeldern des öffentlichen Handelns sowie der Gesellschaft notwendig. Dieser Wille stellt die Basis und die Voraussetzung einer gesundheitsorientierten Stadtentwicklung dar.

A 1: GESUNDHEIT IST IN ALLEN THEMENFELDERN ÖFFENTLICHEN HANDELNS EIN GRUNDLEGENDES ZIEL FÜR JEDE PLANERISCHE ENTSCHEIDUNG UND GILT ALS RICHTSCHRUR DER STADTENTWICKLUNG.

Handlungsempfehlungen zu A 1 - Erläuterung

Stadtentwicklung bildet ein politisches Themenfeld öffentlichen Handelns, das sich zweifelsohne sowohl für die Förderung und den Erhalt menschlicher Gesundheit als auch für die gesundheitliche Versorgung anbietet (s. Kap. 2.3.3, 7.1). „Gesundheitliche Belange zu berücksichtigen, muss nicht als zusätzliche Aufgabe verstanden werden. Vielmehr ist „Health in All Policies“ ein Weg, gemeinsam herauszufinden, wie sich die Akteure in der Verfolgung ihrer jeweils eigenen Ziele gegenseitig unterstützen können. Viele Politikbereiche und engagierte Vertreter*innen der Zivilgesellschaft sind konkret damit befasst, die (gesundheitsbezogene) Lebensqualität der Menschen in ihrem Einflussgebiet zu erhöhen - dabei zusammen zu arbeiten, sollte jeweils (auch) der Verfolgung der eigenen Ziele und Belange dienen“ (Bräunling et al. 2020: 5). Dafür benötigen die umsetzenden Akteure Hilfestellung durch Versorgungsstandards (z.B. für Grünraumversorgung) oder verlässliche Bewertungsansätze, auch zu den Wirkzusammenhängen (Umweltbundesamt 2017b: 27; WHO 2016: 19). Daraus resultieren die in Abbildung 75 dargestellten Handlungsempfehlungen mit dem Fokus auf den Anstoß eines gesellschaftlichen Diskurses und einer verstärkten Verfolgung des Zieles der Gesundheitsförderung in (politischen) Entscheidungen bezüglich der zukünftigen Entwicklung der Städte.

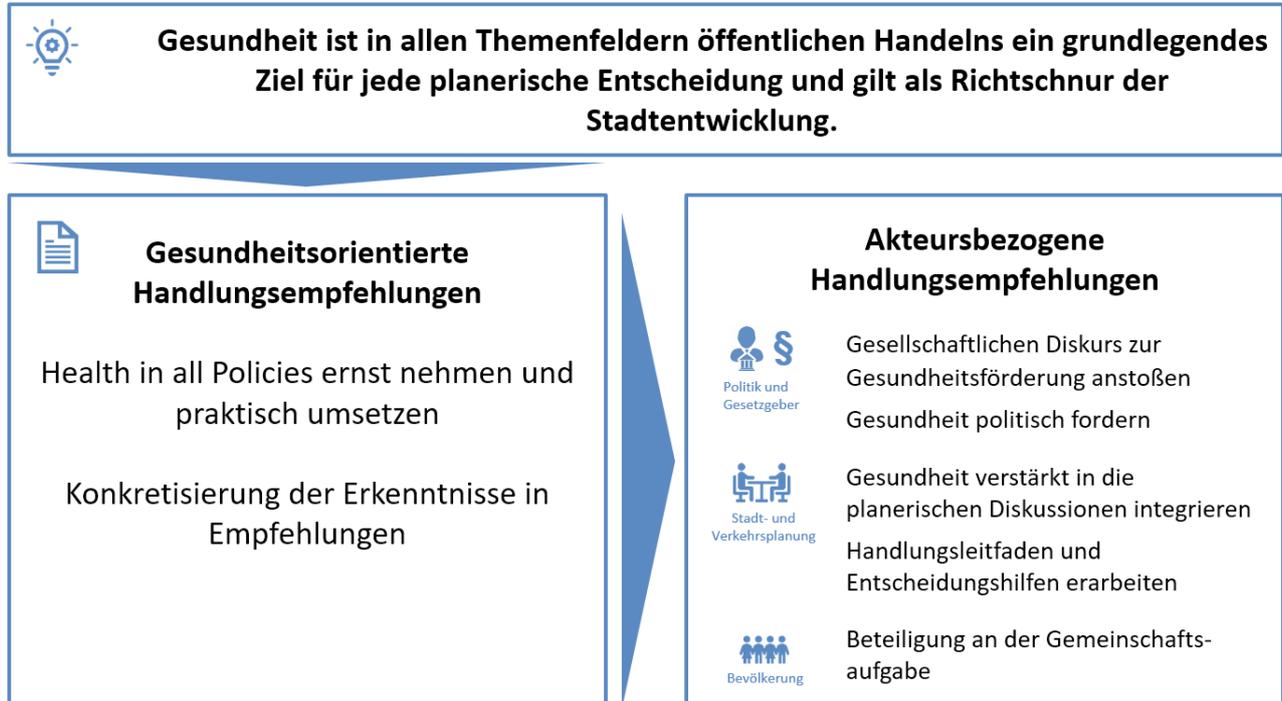


Abb. 75: Health in all Policies als Basis (A 1)
Quelle: Eigene Darstellung

A 2: FÜR EINE GESUNDHEITSORIENTIERTE STADTENTWICKLUNG IST EIN INTEGRIERTES UND INTERDISZIPLINÄRES VORGEHEN ZU WÄHLEN. EIN BEWUSSTSEIN ÜBER DIE GESUNDHEITSWIRKUNGEN WIRD ZUR SCHAFFUNG EINES POLITISCHEN/GESELLSCHAFTLICHEN WILLENS BENÖTIGT.

Handlungsempfehlungen zu A 2 - Erläuterung

Gesundheitsorientierte Stadtentwicklung benötigt integriertes und interdisziplinäres Vorgehen sowie eine Bewusstseinsbildung aller zur Schaffung eines politischen und gesellschaftlichen Willens (AG-GSE 2020: 7; Baumgart et al. 2018: 423; Tsourus 2019: 81). „Durch eine integrierte Zusammenarbeit der verschiedenen Planungsbereiche zu einem möglichst frühen Zeitpunkt der Maßnahmenplanung besteht die Möglichkeit, die verschiedenen Belange frühzeitig zu bündeln, besser untereinander abzuwägen und möglichst in Einklang zu bringen. [...] Mögliche Zielkonflikte von Maßnahmen können durch eine integrierte Planung mit Beteiligung verschiedener Ressorts entschärft werden, Synergien aufgedeckt und genutzt werden“ (LANUV 2011: 162). Zur Bewusstseinsbildung können neben Maßnahmen zur Bewusstseinsbildung bei allen Akteuren der Stadtentwicklung (s. Kap. 2.6) des Weiteren das Erkennen und Interpretieren von Trends und deren Auswirkungen hilfreich sein (s. Kap. 4). Weitere Maßnahmen sind z.B. Frühwarnsysteme für hohe Belastungen (Schneider et al. 2014: 6) oder eine verbesserte Aufbereitung der Information, z.B. durch Umrechnung der Exposition in die Anzahl von passiv gerauchten Zigaretten (van der Zee et al. 2016: 480). Gefordert ist außerdem eine stärkere institutionelle Verankerung der Zusammenarbeit und des Belanges menschlicher Gesundheit inkl. der Ermittlung der Gesundheitsbelange durch die Abschätzung der Wirkungen von Planungen sowie Maßnahmen, deren Gewichtung und die Evaluation der Zielerreichung (Sieber 2017: 282, s. Kap. 2.6). Ein gemeinsamer Wille zur Verfolgung einer gesundheitsorientierten Stadtentwicklung muss in zukunftsgerichtete und mutige Entscheidungen für deren Umsetzung münden (s. Abb. 766).



Für eine gesundheitsorientierte Stadtentwicklung ist ein integriertes und interdisziplinäres Vorgehen zu wählen. Ein Bewusstsein über die Gesundheitswirkungen wird zur Schaffung eines politischen/gesellschaftlichen Willens benötigt.



Gesundheitsorientierte Handlungsempfehlungen

Expertise aus weiteren Fachdisziplinen einfordern und in Planungen integrieren

Bewusstsein für Wirkzusammenhänge und Notwendigkeit schaffen

Gesundheitswirkungen der Maßnahmen abschätzen (HIA, ...)

Akteursbezogene Handlungsempfehlungen



Politik und Gesetzgeber

zukunftsgerichtete und mutige Entscheidungen treffen

Zusammenarbeit gesetzlich normieren



Stadt- und Verkehrsplanung

Gutachten in Auftrag geben für eine verbesserte Entscheidungsgrundlage

Maßnahmen zur Bewusstseinsbildung für Politik und Bevölkerung initiieren

Interdisziplinär mit den relevanten Akteure zusammenarbeiten

Abb. 76: Integriertes Vorgehen & Bewusstseinsbildung (A 2)
Quelle: Eigene Darstellung

A 3: NACHDEM DIE NOTWENDIGKEIT DER VERKEHRSWENDE ERKANNT IST, MÜSSEN MAßNAHMEN ERGRIFFEN WERDEN, UM DIESE STRATEGISCH ZU VERFOLGEN UND EINE UMSETZUNG VORZUBEREITEN.

Handlungsempfehlungen zu A 3 - Erläuterung

Das Umweltbundesamt stellte 2017 fest, dass besonders durch eine klima-, umwelt- und sozialverträgliche Umgestaltung der Verkehrssysteme mehr Platz zum Leben und somit eine erhöhte urbane Lebensqualität erreicht werden kann (Umweltbundesamt 2017b: 13). Die Notwendigkeit einer Verkehrswende, vor allem die Reduktion des motorisierten Individualverkehrs sowie die Förderung von emissionsarmen Antriebsformen, wird auch von weiteren Autor*innen gefordert (Hoffmann 2019: 437; Mueller et al. 2017: 94). „Mobilitäts- und Verkehrswende haben einen erheblichen Einfluss auf individuelle und gesellschaftliche Lebens- und Verhaltensweisen. Geeignete Maßnahmen zur Umsetzung sind in intensiven gesellschaftlichen Dialogen auszuhandeln sowie frühzeitig und konsistent zu entscheiden. Dies sind zentrale Voraussetzungen der angestrebten „Großen Transformation“ der Mobilitäts-, Verkehrs- und Transportsysteme. Dabei gibt es kaum „Patentrezepte“, aber doch bewährte und geeignete Handlungsstrategien und Maßnahmen - unter konsequenter Vermeidung kontraproduktiver Wirkungen“ (Beckmann 2020a: 7). Dafür werden eine restriktivere Verkehrspolitik in Verbindung mit einer weiteren Stärkung des Umweltverbundes durch u.a. Optimierung der Netze, der Dienstleistungen und insgesamt der Qualität benötigt (Adrian et al. 2018: 321; Umweltbundesamt 2017a: 18). Handlungsansätze beziehen sich meist auf die Antriebsaggregate sowie die Digitalisierung, Vernetzung und Automatisierung der Verkehrsvorgänge (Beckmann 2020a: 6). In der Studie über das Umweltbewusstsein in Deutschland wird ebenfalls deutlich, dass auch die Bevölkerung die Notwendigkeit einer Verkehrswende anerkennt. Allerdings ist zurzeit deren Umsetzung im Verkehrsverhalten nur geringfügig wahrnehmbar. (Umweltbundesamt 2019b: 10-11) Daher sind neben der politischen und planerischen Umsetzung der Verkehrswende des Weiteren die Annahme der geschaffenen Angebote durch Verhaltensänderungen in der Mobilitätsnutzung der städtischen Bewohner*innen relevant (s. Abb. 777).

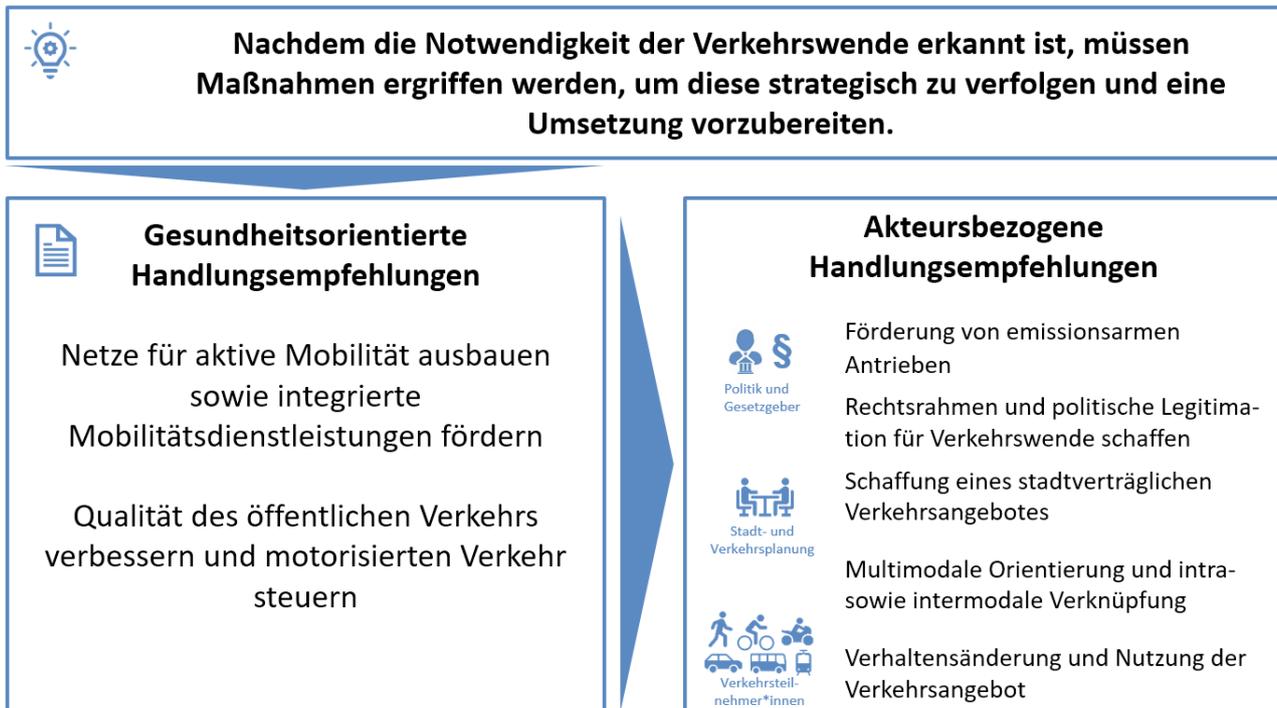


Abb. 77: Vorbereitung für Maßnahmen zur Verkehrswende (A 3)

Quelle: Eigene Darstellung

A 4: AUFGRUND KOMPLEXER WECHSELWIRKUNGEN UND FEHLENDER EINDEUTIGER ZUSAMMENHÄNGE ZWISCHEN GESUNDHEIT UND STÄDTISCHER UMWELT, SOLLTE DER NO-REGRET-ANSATZ AUF ENTSCHEIDUNGEN ANGEWENDET WERDEN.

Handlungsempfehlungen zu A 4 - Erläuterung

Aufgrund der Komplexität der Wirkungszusammenhänge (s. Kap. 3) zusammen mit den offenen Fragen zur Gewichtung sowie der teilweise fehlenden Evidenzgrundlage und Stringenz, kann der No-Regret-Ansatz bei planerischen Entscheidungen herangezogen werden (s. Kap. 2.7). Damit können die komplexen Wechselwirkungen und Nebenwirkungen sogar positiv für eine Verbesserung der städtischen Lebensqualität genutzt werden. Das bedeutet, wenn der Zusammenhang mit Luftschadstoffbelastung nicht eindeutig epidemiologisch belegt ist, können weitere klarere Gesundheitseffekte der angedachten Maßnahme herangezogen werden. Gleichzeitig sollte die Politik mit einem gewissen Maß an Unsicherheit umgehen können. Des Weiteren „sind Anforderungen an Planungen unter Unsicherheit zu bedenken, dazu gehören Zukunftsorientierung, Anpassungsfähigkeit, Flexibilität und planerische Steuerung, wo es erforderlich ist, aber auch das Offenhalten von Optionen, wo es sinnvoll und möglich ist“ (Baumgart 2018a: 6-7). Für eine Vielzahl an urbanen Problemstellungen sind isolierte Lösungen nicht erfolversprechend, Akteure der Stadtentwicklung sollten vielmehr in Ansätzen denken, mit denen mehrere Probleme gelöst werden (Fehr und Hornberg 2018e: 27-28). Weitere Maßnahmen sind die Schaffung einer ausreichenden Evidenzbasis, die verstärkte Integration von Gesundheitsförderung in das Bauplanungsrecht, z.B. in die Auslegung von § 1 Abs. 6 Nr. 1 BauGB oder als Ergänzung von § 1 Abs. 5 BauGB um den Aspekt Förderung der Gesundheit (s. Kap. 2.7 und 7.1).

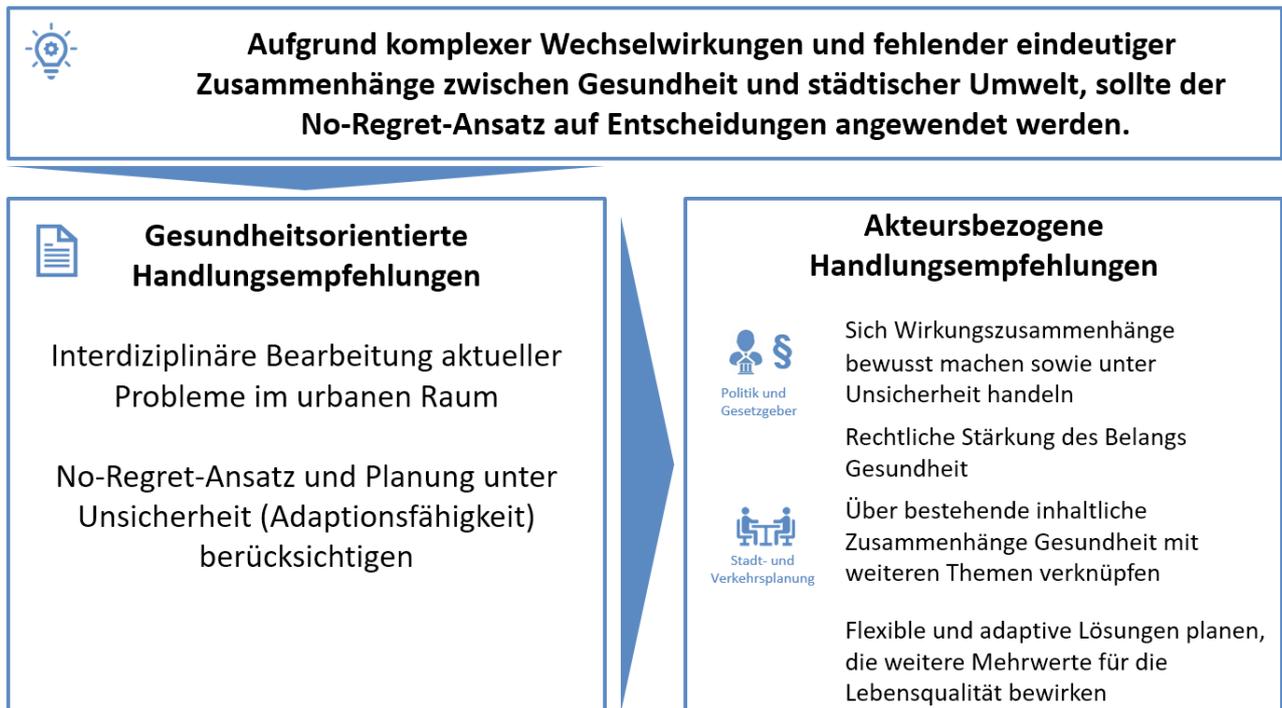


Abb. 78: No-Regret-Ansatz wegen Wirkzusammenhängen (A 4)

Quelle: Eigene Darstellung

8.3 Handlungsfeld B: Flächennutzungs- und Verkehrsentwicklungsplanung

Ausgehend von der Feststellung, dass eine gesundheitsorientierte Flächennutzung die räumlichen Grundbedingungen für die urbane Bevölkerung schaffen kann, konnten die folgenden vier Kernaussagen (B 1-B 4) für den Bereich von strategischen Maßnahmen, z.B. bei der Flächennutzungsplanung, erarbeitet werden. Diese sind insbesondere auf stadtregio­neraler und städtischer Ebene eine Grundvoraussetzung für die spätere bauliche Umsetzung auf Quartiersebene (s. Kap. 8.5).

B 1: DIE MENSCHLICHE GESUNDHEIT LÄSST SICH DURCH DIE ANORDNUNG VON FUNKTIONEN UND NUTZUNGSARTEN (AUF STADTREGIONALER EBENE) BEEINFLUSSEN.

Handlungsempfehlungen zu B 1 - Erläuterung

Auf regionaler und gesamtstädtischer Ebene wird eine integrierte Standort- und Verkehrsplanung benötigt, die die Ausweisung von Funktionen und Nutzungsarten, die Festlegung von Dichten (s. B 2), die Gestaltung der Verkehrsinfrastruktur und das Mobilitätsmanagement beinhaltet (Holz-Rau und Scheiner 2020b: 79). Dabei hängt „eine erfolgreiche Umsetzung der gesundheitsfördernden Stadtteilentwicklung [...] wesentlich davon ab, inwieweit es gelingt, Ziele, Maßnahmen und Projekte des stadtteilbezogenen Handlungskonzepts mit der gesamtstädtischen Entwicklungspolitik zu verknüpfen und gesamtstädtische Wirkungszusammenhänge nicht aus dem Blick zu verlieren“ (Böhme und Reimann 2012: 203). Im Kontext mit dem Leitbild einer Stadt der kurzen Wege, die sich positiv auf die Luftqualität auswirken kann, ist diese übergeordnete Planung der Nutzungsanordnung und -vernetzung grundlegend. Dabei müssen gesellschaftlich benötigte stark emittierende Nutzungen ebenfalls vorausschauend angeordnet und mit entsprechenden Abständen zu sensiblen Nutzungen versehen werden. (s. Kap. 2.1, 7.4) Planerische Interventionen betreffen generell die beeinflussbaren rahmenbildenden Faktoren der menschlichen Gesundheit, wie die gebaute und natürliche Umwelt (s. Kap. 7.2). Durch die individuelle Nutzung von Flächen kann des Weiteren jeder Einzelne, soweit möglich, Belastungen vermeiden und zukünftig solche wenig belasteten Orte fordern (s. Abb. 79).



Die menschliche Gesundheit lässt sich durch die Anordnung von Funktionen und Nutzungsarten (auf stadtregio­neraler Ebene) beeinflussen.



Gesundheitsorientierte Handlungsempfehlungen

- Stark emittierende Anlagen von sensiblen Nutzungen räumlich trennen
- Abgestimmte Nutzungsanordnung für kurze Wege in der Stadt schaffen
- Grundlegende Nutzungen stadtw­eit vorsehen und vernetzen

Akteursbezogene Handlungsempfehlungen



- Rechtlichen Rahmen vorgeben
- Integrierte Siedlungsentwicklung auf allen Planungsebenen fordern
- Ausreichend Abstände und Pufferbereiche einplanen
- Nutzungsanordnung für kurze Wege im alltäglichen Leben strategisch vorbereiten (z.B. Bauleitplanung)
- Wenig belastete Aufenthaltsorte nutzen und fordern

Abb. 79: Anordnung von Funktionen und Nutzungen (B 1)
Quelle: Eigene Darstellung

B 2: DIE GESUNDHEIT WIRD DURCH EINE ANGEMESSENE DICHTHE UND KLEINTEILIGE NUTZUNGSMISCHUNG POSITIV BEEINFLUSST. DIES IST AUF EBENE DER QUARTIERE UND ZWISCHEN DEN QUARTIEREN ABZUSTIMMEN.

Handlungsempfehlungen zu B 2 - Erläuterung

Da Quartiere nicht isoliert voneinander funktionieren und agieren, müssen die Funktionen der Quartiere innerhalb der Gesamtstadt strategisch vorbereitet werden. Die Wirkungen der Baumassen und der Gebäudegestaltung sind auf Quartiersebene untereinander abzustimmen, da sie ausschlaggebend für die Durchlüftung und die Lufthygiene sind (Umweltbundesamt 2017b: 9). Die Anordnung der Funktionen auf stadtreionaler Ebene bedarf außerdem einer Konkretisierung und Ausgestaltung in den Quartieren (s. B 1), um die Idee einer funktionsgemischten und kompakten Stadt weiter zu verfolgen. Dabei wird „die planerische Gestaltung nutzungsgemischter und kompakter Standortstrukturen auf kommunaler und regionaler Ebene [...] allerdings überlagert von gesellschaftlichen und räumlichen Entwicklungen, für die großräumige Mobilität politisch erwünscht oder strukturell notwendig ist“ (Holz-Rau und Scheiner 2020: 76). Besonders auf der Ebene des Quartiers und der Einzelmaßnahme zeigt sich, aufgrund der steigenden Konkretisierung, die Komplexität der Wirkzusammenhänge. Zur Lösung der auftretenden Zielkonflikte sind Handreichungen, Richtwerte etc. nötig (s. Abb. 80).



Die Gesundheit wird durch eine angemessene Dichte und kleinteilige Nutzungsmischung positiv beeinflusst. Dies ist auf Ebene der Quartiere und zwischen den Quartieren abzustimmen.



Gesundheitsorientierte Handlungsempfehlungen

- Kompakte und funktionsgemischte Quartiere vorbereiten
- Attraktive öffentliche Räume schaffen
- Gesamtstadt in den Blick nehmen

Akteursbezogene Handlungsempfehlungen



Politik und Gesetzgeber

Festlegung von Dichtewerten und Orientierungswerten für Nutzungsmischung



Stadt- und Verkehrsplanung

Gesundheit in den formellen und informellen Planungen durch Maßnahmen konkret integrieren

Gestaltungsrichtlinie für öffentliche Räume erarbeiten und umsetzen

Angemessene Dichte und hohe Nutzungsmischung bei Neuplanungen und Bestandsentwicklung vorsehen

Abb. 80: Abstimmung zwischen Dichte und Nutzungsmischung (B 2)

Quelle: Eigene Darstellung

B 3: DURCH NUTZUNG DER ENGEN ABHÄNGIGKEITEN ZWISCHEN STADT- UND VERKEHRSPLANUNG KANN ZUR GESUNDHEITSORIENTIERTEN UND STADTVERTRÄGLICHEREN ABWICKLUNG DES VERKEHRS BEIGETRAGEN WERDEN.

Handlungsempfehlungen zu B 3 - Erläuterung

Siedlungs- und Verkehrsentwicklung sind stark voneinander abhängig und können sich gegenseitig negativ wie auch positiv beeinflussen (s. Kap. 2.1.1). Gemeinsam können sie aktuelle Verkehrsprobleme durch eine stadtverträgliche Abwicklung des Verkehrs mindern. Dafür sollte das städtische Verkehrs- und Mobilitätssystem multimodal, effizient, klimaneutral, verlässlich, bezahlbar und sicher sein. Neben einer verkehrsvermeidenden Siedlungsentwicklung sind aktive und emissionsarme Fortbewegungsformen zu fördern. (EU 2020: 6) Effekte einer verkehrssparsamen Raumstruktur sind erst langfristig spürbar, müssen aber dennoch frühzeitig umgesetzt werden. (Beckmann 2020a: 6; Umweltbundesamt 2017a: 16) Das Wissen darüber, wie aktive Mobilität durch Maßnahmen der Flächennutzungs- und Verkehrsplanung gefördert werden kann, ist umfangreich und konsistent. Grundsätzlich besteht Konsens darüber, dass die Förderung von gemischten Flächennutzungen mit hoher Dichte, einer guten Straßenanbindung und vielen Grünflächen sehr effektiv ist, um die physische Mobilität zu erhöhen. Diese Erkenntnisse werden als robust genug angesehen, um in verschiedenen demografischen, geografischen und kulturellen Umgebungen anwendbar zu sein. (Ferreira 2019: 327) Dies zeigt, dass das Wissen über Maßnahmen meistens vorhanden ist. Jedoch muss dieses Wissen von den Akteuren der Stadtentwicklung angewendet, konkretisiert und umgesetzt werden. (s. Abb. 81)

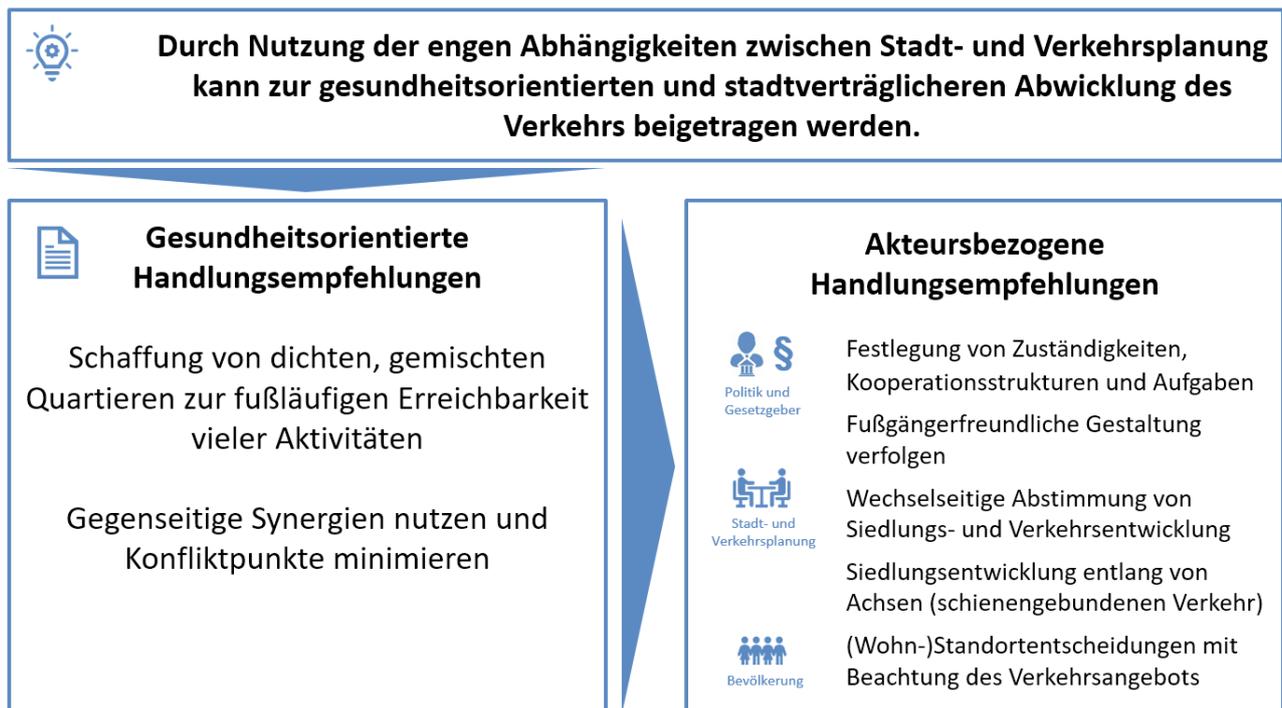


Abb. 81: Abhängigkeit zwischen Stadt- und Verkehrsplanung (B 3)
Quelle: Eigene Darstellung

B 4: MIT DER SCHAFFUNG UND DER SICHERUNG VON GRÜN- UND FREIFLÄCHEN KANN EIN BESSERER STÄDTISCHER LUFTAUSTAUSCH SOWIE BEWEGUNGSRAUM ZUR GESUNDHEITSFÖRDERUNG ERREICHT WERDEN.

Handlungsempfehlungen zu B 4 - Erläuterung

Da neben den kleinräumigen Auswirkungen der bebauten und unbebauten Umwelt auf die Belüftungssituation regionale und stadtstrukturelle Rahmenbedingungen wichtig sind, sollen Freiräume gesichert, vernetzt und geschaffen werden (s. Kap. 2.1.1). Je größer und je vernetzter städtische Grünstrukturen sind, desto stärker werden Biodiversität, klimatische sowie lufthygienische Ausgleichsfunktionen, das soziale Miteinander und die aktive Mobilität gefördert. Außerdem sollten im Umland und Randbereichen der Städte ausreichende Freiflächen für den Luftaustausch mit der Innenstadt vorhanden sein. (LANUV 2011: 165-167, 182; Säumel und Butenschön 2018: 321-322) Zur Umsetzung dieser Ziele sind die planungsrechtliche Sicherung, gesetzliche und gesellschaftliche Forderungen sowie eine interdisziplinäre Zusammenarbeit hilfreich (s. Kap. 7.4 und 7.5, Abb. 82).



Mit der Schaffung und der Sicherung von Grün- und Freiflächen kann ein besserer städtischer Luftaustausch sowie Bewegungsraum zur Gesundheitsförderung erreicht werden.



Gesundheitsorientierte Handlungsempfehlungen

Sicherung der gesundheitsförderlichen Flächen auf regionaler und städtischer Ebene (Luftleitbahnen etc.)

Großräumige Vernetzung der Flächen für mehr Luft- und Bewegungsqualität



Politik und Gesetzgeber



Stadt- und Verkehrsplanung



Bevölkerung

Akteursbezogene Handlungsempfehlungen

Festlegung von Mindestanforderung Grundraumausstattung (quantitativ und qualitativ)

Sicherung der Flächen in Regional- und Flächennutzungsplänen

Zusammenarbeit und Abstimmung der beteiligten Ämter und Akteure

Forderung nach einer ausreichenden Ausstattung mit Grün- und Freiräumen

Abb. 82: Schaffung und Sicherung von Grün- und Freiflächen (B 4)
Quelle: Eigene Darstellung

8.4 Handlungsfeld C: Verkehrsplanung und Verkehrstechnik

Auf Grundlage der durch die Messungen gewonnenen Erkenntnisse können die folgenden sieben Kernaussagen (C 1-C 7) im Handlungsfeld Verkehrsplanung und Verkehrstechnik formuliert werden.

C 1: RADFAHRER*INNEN UND FUSSGÄNGER*INNEN SIND IM STADTVERKEHR STÄRKER LUFTSCHADSTOFFBELASTUNGEN AUSGESETZT ALS NUTZER*INNEN DES MIV.

Handlungsempfehlungen zu C 1 - Erläuterung

Die Messungen UFP sowie gröberer Partikel in Deutschland und Vietnam haben ergeben, dass Radfahrer*innen stärker Luftschadstoffbelastungen ausgesetzt sind als Pkw-Nutzer*innen (s. Kap. 6.6.3 und 7.3). Die Luftschadstoffbelastungen von Fußgänger*innen wurde aufgrund der Streckenlänge der untersuchten Routen in beiden Ländern nicht komplett erfasst. Dennoch ist durch die gleiche Routenwahl sowie der unmittelbaren Nähe zum Verkehr als Emissionsquelle ebenfalls von starken Belastungen auszugehen. Durch die Reduzierung von Luftschadstoffemissionen im Stadtgebiet kann die Exposition von Radfahrer*innen und Fußgänger*innen gegenüber Luftschadstoffen reduziert werden. Die Förderung emissionsarmer Antriebe sowie die Umsetzung geeigneter Maßnahmen zur Verkehrsvermeidung, Verkehrsverlagerung und Verkehrslenkung können hierbei einen Beitrag zur Verbesserung der Luftqualität in Städten leisten. Abbildung 83 können gesundheitsorientierte sowie akteursbezogene Handlungsempfehlungen entnommen werden.

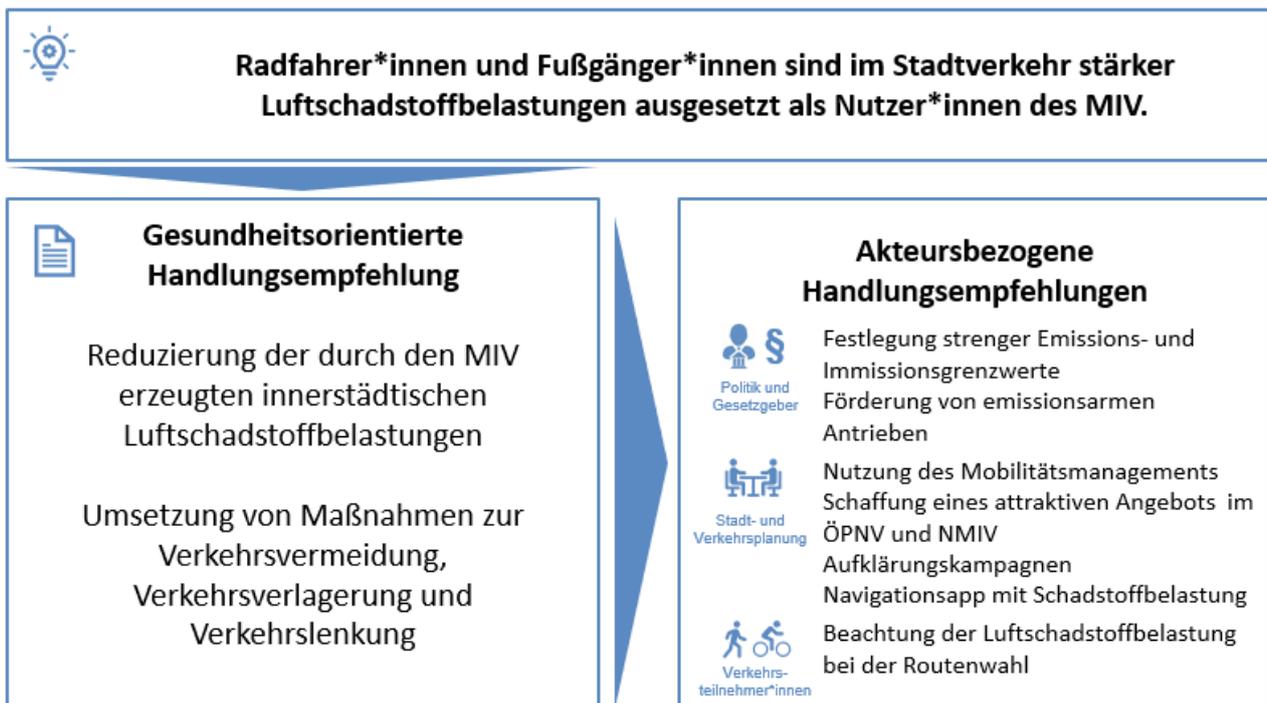


Abb. 83: Luftschadstoffbelastungen von Radfahrer*innen und Fußgänger*innen (C 1)
Quelle: Eigene Darstellung

C 2: RADFAHRER*INNEN UND FUßGÄNGER*INNEN KÖNNEN IHRE PERSÖNLICHE EXPOSITION GEGENÜBER LUFTSCHADSTOFFEN DURCH DIE ROUTENWAHL BEEINFLUSSEN.

Handlungsempfehlungen zu C 2 - Erläuterung

Bei der Analyse der in Deutschland gesammelten Messdaten konnte ein Unterschied bei der Exposition von Radfahrer*innen gegenüber UFP entlang der Kfz-Hauptstrecke und der Kfz-Nebenstrecke festgestellt werden (s. Kap. 6.6.4 und 7.3). Radfahrer*innen und Fußgänger*innen, die hauptsächlich entlang von Kfz-Nebenstrecken unterwegs sind, sind wesentlich geringeren Luftschadstoffbelastungen durch ultrafeine Partikel ausgesetzt verglichen zur Nutzung von Kfz-Hauptstrecken. Ursache hierfür wird darin gesehen, dass der motorisierte Verkehr einer der Hauptemittenten von UFP ist, wodurch die Luftschadstoffbelastung durch geringere Verkehrsbelastungen entlang der Strecke reduziert werden kann. Da gröbere Partikel der Größenfraktion $PM_{2,5}$ und PM_{10} neben dem Verkehr von weiteren Emittenten ausgestoßen werden, ist der Effekt der Routenwahl bei der Betrachtung dieser Partikelgrößen weniger relevant. Zur Vermeidung hoher Luftschadstoffbelastungen wird Radfahrer*innen und Fußgänger*innen daher empfohlen Strecken abseits stark durch den MIV belasteter Strecken zu wählen. Abbildung 84 sind gesundheitsorientierte und akteursbezogene Handlungsempfehlungen zur Reduzierung der Exposition von Radfahrer*innen gegenüber Luftschadstoffen zu entnehmen.

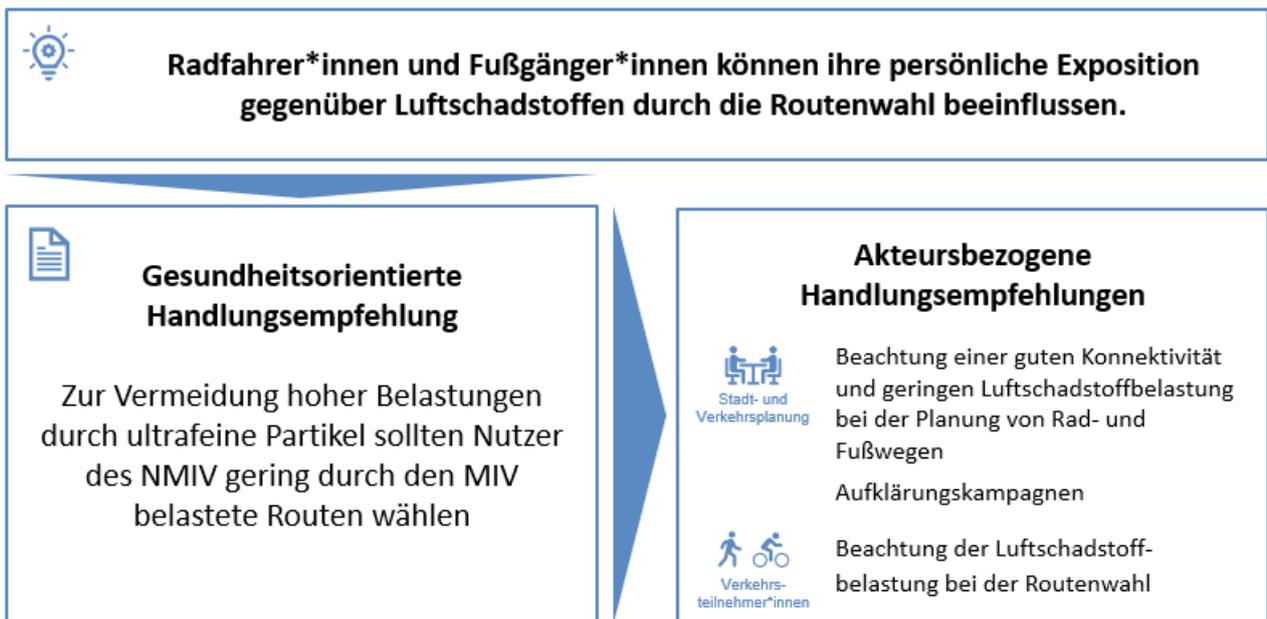


Abb. 84: Einfluss der Routenwahl auf die Luftschadstoffbelastung (C 2)
Quelle: Eigene Darstellung

C 3: WARTEN RADFAHRER*INNEN AN LICHTSIGNALANLAGEN VOR DEM MIV, SIND SIE GERINGEREN LUFTSCHADSTOFFBELASTUNGEN AUSGESETZT IM VERGLEICH ZU RADFAHRER*INNEN, DIE IN DER MITTE ODER AM ENDE DER WARTESCHLANGE DES MIV WARTEN.

Handlungsempfehlungen zu C 3 - Erläuterung

Bei den in Deutschland gesammelten Daten wurden verschiedene Situationen im Radverkehr ausgewertet. Besonders während Halte- und Anfahrtsvorgängen an Lichtsignalanlagen waren Radfahrer*innen höheren Luftschadstoffbelastungen ausgesetzt (s. Kap. 6.6.7 und 7.3). Es wird daher empfohlen, dass Radfahrer*innen sich unter Berücksichtigung der Verkehrssicherheit möglichst vor der Warteschlange des MIV aufstellen sollen, um somit die Exposition gegenüber Luftschadstoffen zu reduzieren. In Abbildung 85 sind die Kernaussage dieser Detailuntersuchung sowie Handlungsempfehlungen aufgeführt.

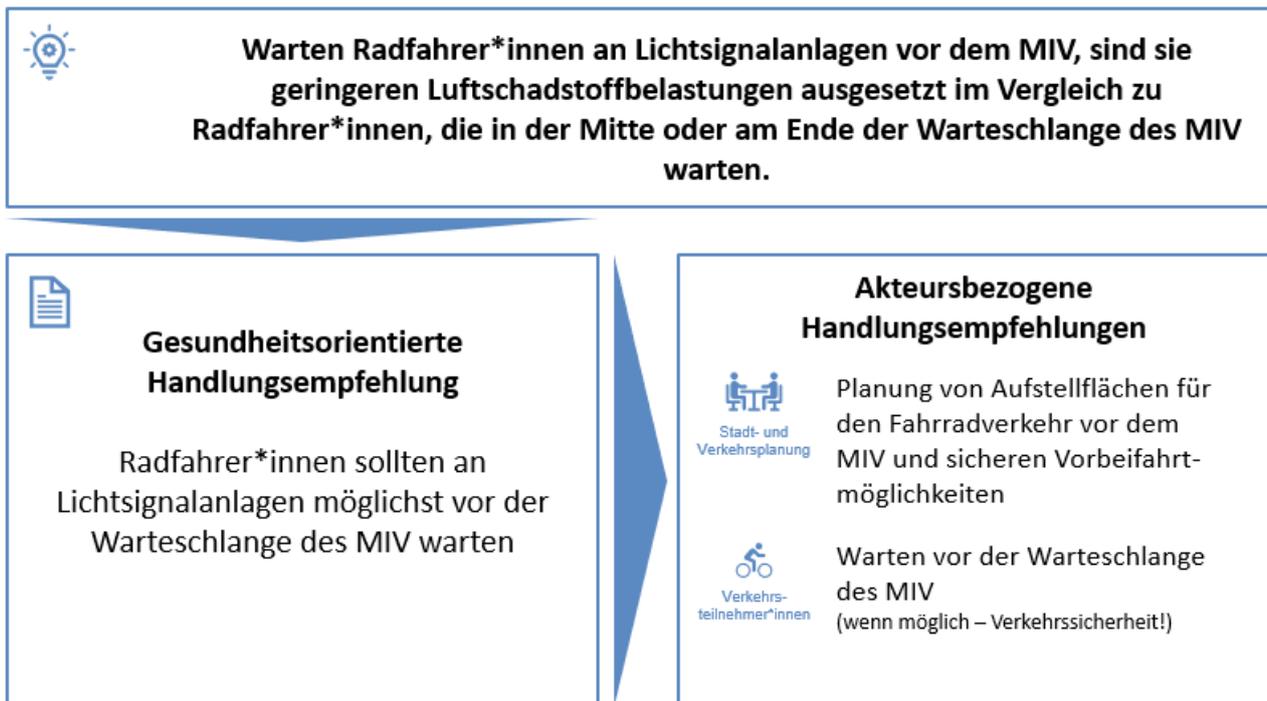


Abb. 85: Luftschadstoffbelastung von Radfahrer*innen an Lichtsignalanlagen (C 3)
Quelle: Eigene Darstellung

C 4: BEI DER NUTZUNG DES PKW HAT DIE LÜFTUNGSANLAGE EINEN EINFLUSS AUF DIE LUFTSCHADSTOFFBELASTUNG IM FAHRZEUGINNENRAUM.

Handlungsempfehlungen zu C 4 - Erläuterung

Die in Deutschland im MIV durchgeführten Messungen wurden mit zwei verschiedenen Pkw vorgenommen, um den Einfluss des Fahrzeugs auf die Luftschadstoffbelastungen im Fahrzeuginnenraum zu untersuchen. Hierbei wurde festgestellt, dass sich die Luftschadstoffbelastung im Innenraum der Fahrzeuge, vor allem bei der Betrachtung von ultrafeinen Partikeln, je nach genutztem Pkw unterscheidet (s. Kap. 6.6.3 und 7.3). Bei der Betrachtung von Belastungen durch Feinstaub der Größenfraktion $PM_{2,5}$ und PM_{10} spielt die Lüftungsanlage des Fahrzeugs eine geringere Rolle. Die Höhe der Luftschadstoffbelastung im Fahrzeuginnenraum wird auf die Qualität der Lüftungsanlage im Fahrzeug zurückgeführt. Durch effektive Lüftungsanlagen sowie einen technischen einwandfreien Zustand der Lüftungsanlage kann die Belastung im Fahrzeug reduziert werden. (s. Abb. 86)

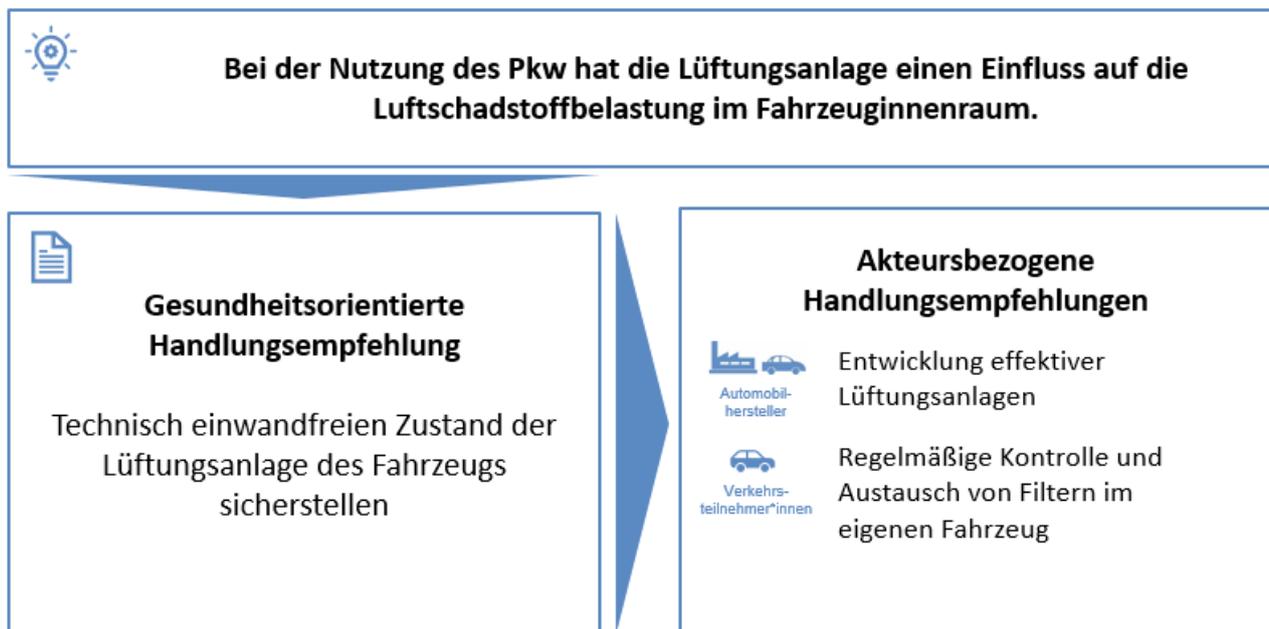


Abb. 86: Einfluss der Lüftungsanlage auf die Luftschadstoffbelastung im Fahrzeuginnenraum (C 4)
Quelle: Eigene Darstellung

C 5: DER STRECKENVERLAUF DES ÖPNV KANN DIE LUFTSCHADSTOFFBELASTUNG IM FAHRZEUGINNENRAUM BEEINFLUSSEN.

Handlungsempfehlungen zu C 5 - Erläuterung

Die Detailuntersuchung der Messungen im ÖPNV in Deutschland haben ergeben, dass je nach betrachteter Größenfraktion unterschiedliche Belastungen bei der Nutzung des ÖPNV zu verzeichnen sind (s. Kap. 6.6.8 und 7.3). Wichtiger Faktor ist hierbei, ob der ÖPNV ober- bzw. unterirdisch verkehrt. Nutzer*innen des teilweise unterirdisch verkehrenden ÖPNV sind niedrigeren Belastungen durch UFP ausgesetzt als Nutzer*innen des NMIV oder MIV. Die Belastung durch Partikel der Größenfraktionen $PM_{2,5}$ und PM_{10} sind jedoch deutlich höher. Durch eine Verbesserung der Lüftungsanlagen im unterirdischen Streckennetz und in den Fahrzeugen kann die Belastungssituation verbessert werden. Zusätzliche Handlungsempfehlungen können der folgenden Abbildung entnommen werden.

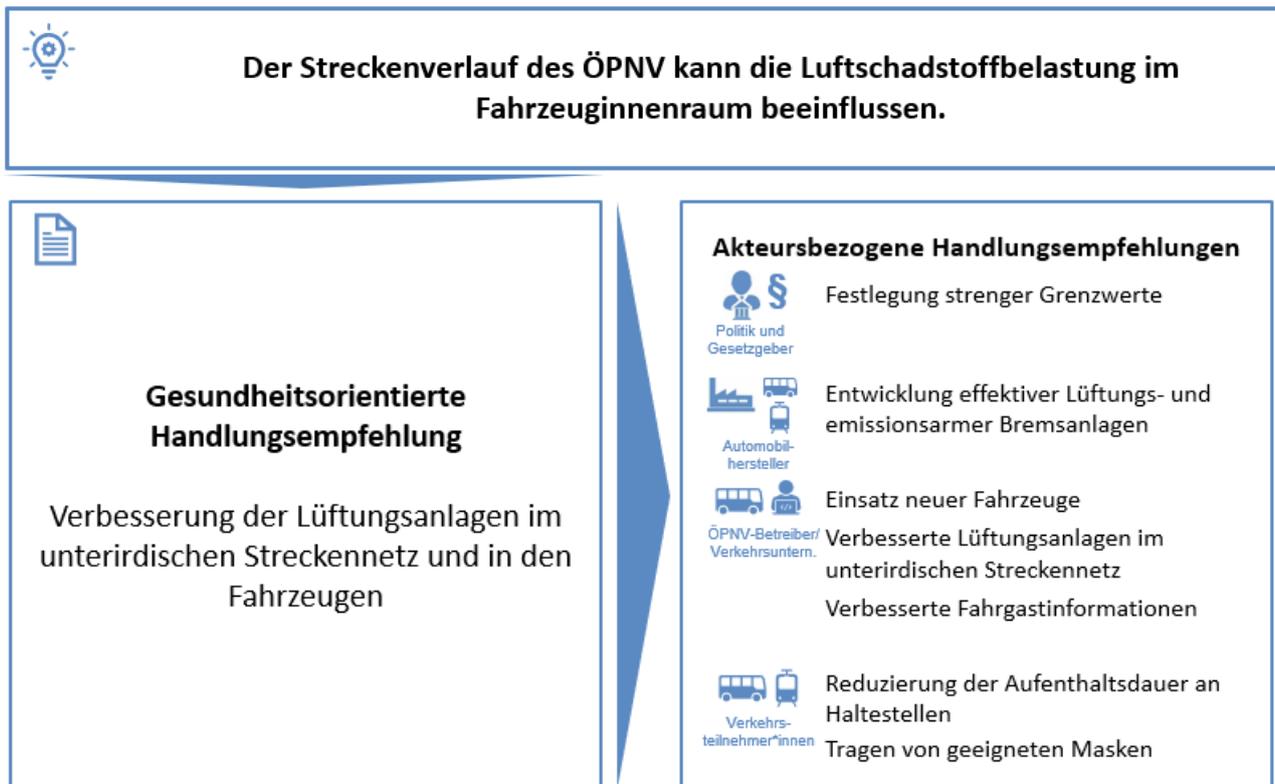


Abb. 87: Luftschadstoffbelastungen in Abhängigkeit des Streckenverlaufs des ÖPNV (C 5)
Quelle: Eigene Darstellung

C 6: DIE LAGE DER HALTESTELLE BEEINFLUSST DIE EXPOSITION VON NUTZER*INNEN DES ÖPNV GEGENÜBER LUFTSCHADSTOFFEN WÄHREND WARTEVORGÄNGEN.

Handlungsempfehlungen zu C 6 - Erläuterung

Die Analyse der Messdaten aus Deutschland hat ergeben, dass die Belastungssituation durch Luftschadstoffe während Wartevorgängen von der Lage der Haltestelle abhängig ist (s. Kap. 6.6.8 und 7.3). Bei der Betrachtung von UFP sind Nutzer*innen des ÖPNV bei Wartevorgängen an oberirdischen Haltestellen im Vergleich zu Wartevorgängen an unterirdischen Haltestellen teilweise höheren Luftschadstoffbelastungen ausgesetzt (s. Kapitel 6.6.8). Die Begründung wird hier in der Nähe zum MIV als einen der Hauptverursacher der Emissionen von UFP gesehen. Daher sind auch beim Vergleich der Luftschadstoffbelastungen an Haltestellen an Hauptverkehrsstraßen mit den Belastungen an Haltestellen an Nebenstraßen die Haltestellen an Nebenstraßen geringer durch Luftschadstoffe belastet. Die Belastung durch Feinstaub der Größenfraktion PM_{2,5} und PM₁₀ ist an unterirdischen Haltestellen deutlich höher verglichen zu Belastungen an oberirdischen Haltestellen. Grund hierfür sind Beschleunigungs- und Bremsvorgänge sowie Aufwirbelungen größerer Partikel im unterirdischen Streckennetz. Nutzer*innen des ÖPNV wird geraten für Wartevorgänge oberirdische Haltestellen an wenig durch den MIV belasteten Straßen zu bevorzugen. (s. Abb. 88)

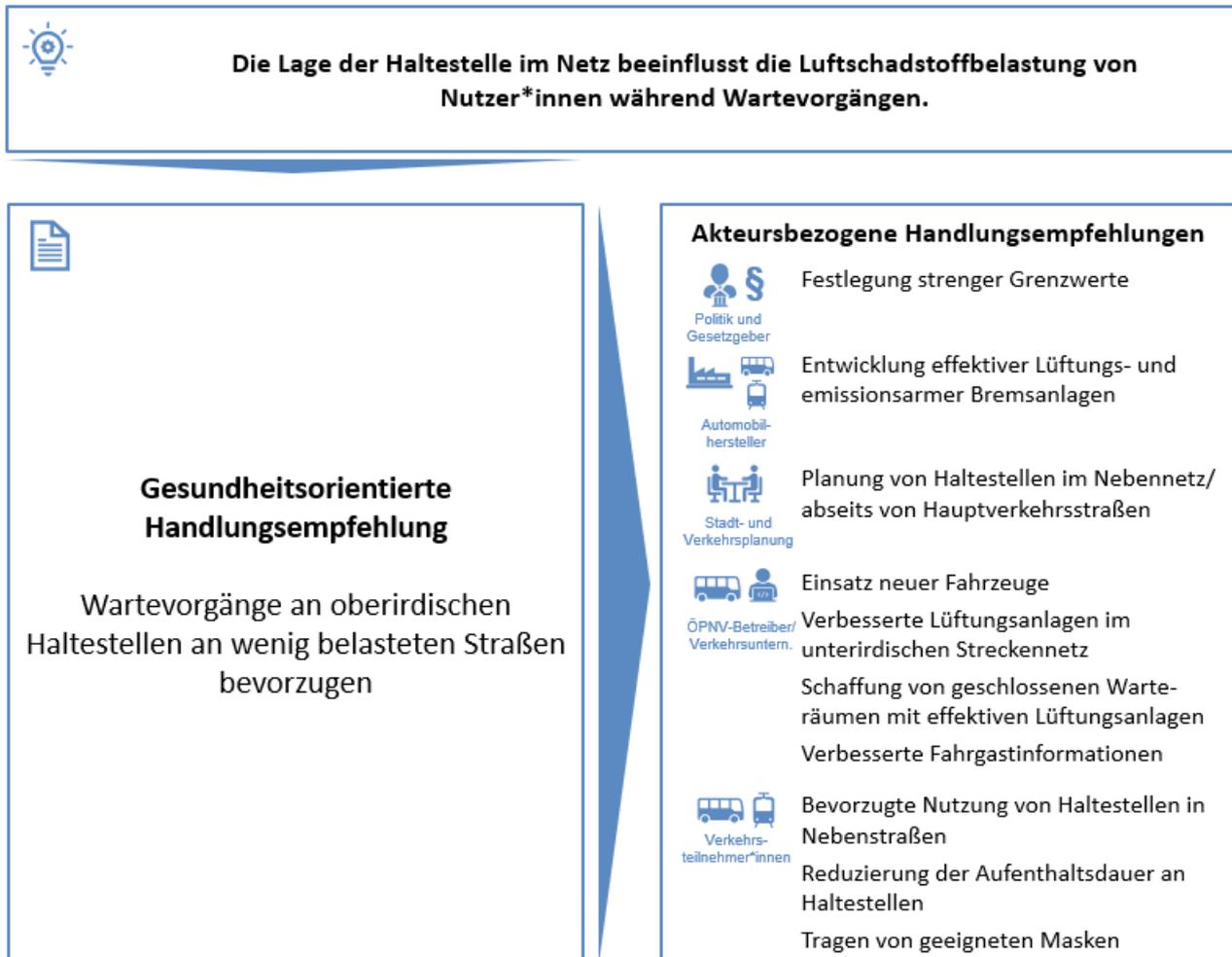


Abb. 88: Luftschadstoffbelastungen in Abhängigkeit der Lage der ÖPNV-Haltestelle (C 6)
Quelle: Eigene Darstellung

C 7: DIE LUFTSCHADSTOFFBELASTUNG AUßERHALB VON SPITZENSTUNDEN IST AUFGRUND VON GERINGEREN BELASTUNGEN IM MIV GERINGER ALS DIE BELASTUNG WÄHREND DER SPITZENSTUNDEN.

Handlungsempfehlungen zu C 7 - Erläuterung

Die Messungen in Vietnam haben ergeben, dass vor allem Radfahrer*innen und Fußgänger*innen durch die Zeitwahl ihre Exposition gegenüber Luftschadstoffen beeinflussen können (s. Kap. 6.7.3). Werden Strecken während durch den MIV stark belasteter Spitzenstunden zurückgelegt, lassen sich höhere Luftschadstoffbelastungen messen, verglichen mit außerhalb der Spitzenstunden. Da in Deutschland durch die Auswirkungen der Corona-Pandemie auf das Verkehrsgeschehen keine ausgeprägte Spitzenstunde festgestellt wurde und der Stichprobenumfang der Messungen innerhalb der eigentlichen Spitzenstunden zu gering war, konnte aufgrund der Messungen kein Unterschied der Belastungssituationen in Abhängigkeit der Zeitwahl festgestellt werden. Da höhere Verkehrsstärken im MIV mit höheren Luftschadstoffbelastungen einhergehen, ist jedoch anzunehmen, dass sich eine Vermeidung der Spitzenstunden positiv auf die Luftschadstoffbelastung von Verkehrsteilnehmer*innen auswirkt. Abbildung 89 zeigt die Kernaussage und Handlungsempfehlungen zum Thema Zeitwahl.



Abb. 89: Einfluss der Zeitwahl auf die Luftschadstoffbelastung (C 7)
Quelle: Eigene Darstellung

8.5 Handlungsfeld D: Stadtstrukturen

Ausgehend von der Feststellung, dass Stadtstrukturen die Flächennutzungsplanung verfeinern und die Lebensbedingungen formen, konnten fünf Kernaussagen (D 1-D 5) aus der Forschungsarbeit in diesem letzten Handlungsfeld gezogen werden.

D 1: BEI ENTWURF UND WEITERENTWICKLUNG VON BAULICHEN STRUKTUREN MUSS DEREN EINFLUSS AUF DIE LUFTQUALITÄT BERÜCKSICHTIGT WERDEN.

Handlungsempfehlungen zu D 1 - Erläuterung

Die bebaute Umwelt hat Auswirkungen auf die Gesundheit und kann planerisch beeinflusst werden (Baumeister et al. 2019: 35-36; Grant 2019: 234). Eine wichtige Basis ist hierbei eine standortgenaue Analyse der Luftqualität sowie Untersuchungen der Auswirkungen von städtebaulichen Maßnahmen, wie neuer Bebauung oder der Anordnung von verschiedenen Nutzungen zueinander. Dies gilt insbesondere bei Bestandsentwicklung, da „gerade bei gewachsenen Bestandsquartieren [...] die mangelhafte Belüftung [...] eine Rolle [spielt]. Die dichte Bebauung, geschlossene Gebäudekubaturen, hohe Gebäudekörper mit zu geringen Abstandsflächen und der oftmals geringe Grünanteil erschweren die Durchlüftung [...]. Sie haben damit auch einen direkten Einfluss auf die Schadstoffbelastung der Luft in diesen Quartieren“ (Umweltbundesamt 2017a: 9). Für die Analyse und deren weiteren Beachtung in der Planung ist eine enge Abstimmung mit der Stadtklimatologie notwendig. Diese Informationen können auch zur Bewusstseinsbildung der verschiedenen Akteure, vor allem auch der Bevölkerung, genutzt werden (s. A 2). Ziel der Weiterentwicklung der Städte sollten der Schutz und die Schaffung von ruhigen und wenige belasteten Räumen sein. (s. Abb. 90)



Bei Entwurf und Weiterentwicklung von baulichen Strukturen muss deren Einfluss auf die Luftqualität berücksichtigt werden.



Gesundheitsorientierte Handlungsempfehlungen

Analyse der Belüftungssituation durchführen und berücksichtigen

Enge Zusammenarbeit und Abstimmung mit der Stadtklimatologie

Schutz und Schaffung von ruhigen und wenig belasteten Räumen in den Städten



Politik und Gesetzgeber



Stadt- und Verkehrsplanung



Bevölkerung

Akteursbezogene Handlungsempfehlungen

Stärkung des Belanges Gesundheit, vor allem auch Luftschadstoffe

Erarbeitung und Berücksichtigung kleinteiliger Belüftungssituation

Identifizierung von Lösungen zum Umgang mit Luftschadstoffbelastung

Beachtung Luftschadstoffbelastung im Alltag (Aufenthaltsorte usw.)

Abb. 90: Berücksichtigung der Luftqualität (D 1)
Quelle: Eigene Darstellung

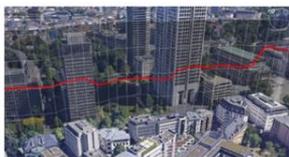
D 2: EINE STÄDTEBAULICHE STRUKTUR MIT BERÜCKSICHTIGUNG DER BELÜFTUNGSSITUATION SOLLTE GENUTZT WERDEN, UM DIE SCHADSTOFFBELASTUNG IN STÄDTEN ZU STEUERN.

Handlungsempfehlungen zu D 2 - Erläuterung

Die Randbebauung, d.h. die angrenzenden städtebaulichen Strukturen, entscheidet mit über die städtische Belastungssituation. In den Messungen wurden bei der Bauweise und bei der Anordnung von Nutzungen und Strukturen keine Unterschiede in der Belastung deutlich. Lediglich an Kreuzungsbereichen konnten erhöhte Werte festgestellt werden, so dass besonders in diesen Situationen vorsichtig bei der städtebaulichen Planung vorgegangen werden muss. Es zeigte sich, dass sich die komplexen Wechselwirkungen der gebauten Umwelt auf die Luftschadstoffbelastung nicht durch die durchgeführten Messungen widerspiegeln lassen (s. Kap. 6.6.9, 7.4). Entweder sind komplexer und größer angelegte Messungen oder Simulationen bzw. Windkanalmessungen zur weiteren Analyse notwendig. Folgende Hinweise aus der Literatur sind zu dieser Kernaussage jedoch möglich:

- Besonders fußgängerfreundlich und damit verkehrsvermeidend gelten Baublöcke mit einer Ausdehnung von 70 m Breite und 120-140 m Länge (Baumeister et al. 2019: 68).
- Bei einer Verdoppelung der Straßenbreite kann von einer Halbierung der Immissionsbelastung ausgegangen werden (MVI BW 2012: 242).
- Im Neubau können Konflikte bezüglich baulicher Dichte planerisch-konzeptionell weitgehend vermieden werden (Umweltbundesamt 2017a: 10).

Weitere Ergebnisse aus der Analyse der Messungen und Ansätze aus der Literatur, wie den Unterschieden zwischen den Straßenseiten (s. Kap. 2.5.2) können herangezogen werden, aber insgesamt sind allgemeine Hinweise im Bereich der städtebaulichen Aspekte wegen der Komplexität und der dadurch nicht möglichen eindeutigen Rückschlüsse limitiert. Diese müssen an den jeweiligen Standorten detailliert analysiert und modelliert werden. Dadurch besteht des Weiteren die Möglichkeit, dass der Belang Gesundheit, v.a. Beeinträchtigungen durch Luftschadstoffbelastungen, stärker in planerischen Verfahren, z.B. in der Bauleitplanung, berücksichtigt werden kann (s. Abb. 91).



Eine städtebauliche Struktur mit Berücksichtigung der Belüftungssituation sollte genutzt werden, um die Schadstoffbelastung in Städten zu steuern.



Gesundheitsorientierte Handlungsempfehlungen

Stadt- und verkehrsplanerische Entscheidungen im Sinne einer Verbesserung oder Sicherung der jeweiligen Luftbelastung treffen

Städtebauliche Reaktion auf Luftbelastung



Stadt- und Verkehrsplanung

Akteursbezogene Handlungsempfehlungen

Kenntnisse über Zusammenhänge erarbeiten und diese berücksichtigen

Steuerung in der Bauleitplanung



Bevölkerung

Erkenntnisse auch in privaten Baumaßnahmen umsetzen

Abb. 91: Berücksichtigung Belüftungssituation (D 2)
Quelle: Eigene Darstellung

D 3: DURCH KLEINTEILIGE BEGRÜNUNG SOWIE DIE GESTALTUNG DER GRÜNFLÄCHEN UND STRAßENRÄUME KANN DIE GESUNDHEIT GEFÖRDERT WERDEN.

Handlungsempfehlungen zu D 3 - Erläuterung

Für die umfassende Nutzung der Gesundheitseffekte einer Begrünung ist eine angepasste und bewusste Begrünung des Straßenraumes auf öffentlichen und privaten Flächen, d.h. mit Berücksichtigung der Straßenseite, der Lage und Art der Baumpflanzung, und ihre Auswirkungen auf die Höhe der Belastung im Straßenraum, nötig (Gromke 2009; Merbitz und Schneider 2012: 145; s. Kap. 7.4):

- Kleinräumigen Bepflanzung zur Filterung von Luftschadstoffen, v.a. Laubbäume und Sträucher, und zur Erreichung weiterer positiver Gesundheitseffekte, allerdings eingeschränkt in Straßenräumen bei geschlossenem Kronendach, als ein Bestandteil der gesundheitsorientierten Stadtentwicklung umsetzen (Merbitz und Schneider 2012: 148).
- Gestaltung der Freiräume mit Hinblick verschiedene Zielgruppen und Funktionen von Freiflächen (Zugänglichkeit, Ästhetik, Sicherheit, ...) kann Gesundheitswirkung unterstützen (Baumeister et al. 2019: 92).

Generell sollte ein Mehr an Grün im urbanen Raum geschaffen werden, das neben der Verbesserung der lufthygienischen Situation auch eine Steigerung der Aufenthaltsqualität für die Bewohner*innen im Blick behält. Neben der Schaffung sind die Nutzung und die Pflege relevant. (s. Abb. 92)



Durch kleinteilige Begrünung sowie die Gestaltung der Grünflächen und Straßenräume kann die Gesundheit gefördert werden.



Gesundheitsorientierte Handlungsempfehlungen

Maßvolle kleinteilige Begrünung, um die Luftschadstoffbelastung zu senken

Lufthygienisch positive wie negative Effekte von Begrünung berücksichtigen

Attraktive und aktivierende Gestaltung der Freiräume (priv. und öffentl.)

Mehr Grün in die Stadt

Akteursbezogene Handlungsempfehlungen



Politik und Gesetzgeber

rechtliche und finanzielle Förderung von Begrünung



Stadt- und Verkehrsplanung

gesundheitsorientierte Gestaltung und Pflege der Begrünung
bewusster Einsatz von Begrünung im öffentlichen Raum



Bevölkerung

Umsetzung privater Begrünung

achtsame und pflegliche Nutzung der Grün- und Freiflächen

Abb. 92: Kleinteilige und passende Begrünung (D 3)
Quelle: Eigene Darstellung

D 4: MITHILFE EINER OPTIMIERTEN STRAßENRAUMGESTALTUNG UND STRAßENRAUMAUFTEILUNG SOLLTE DIE INDIVIDUELLE BELASTUNGSSITUATION POSITIV BEEINFLUSST WERDEN.

Handlungsempfehlungen zu D 4 - Erläuterung

Besonders Maßnahmen im Straßenraum können die Nutzung des Umweltverbunds fördern und damit gleichzeitig die allgemeine Luftbelastung verringern. Unter Beachtung der Bepflanzung im Straßenraum (s. D 3) und den Empfehlungen in Handlungsfeld C kann die individuelle Belastungssituation beeinflusst werden. Bei der Flächenaufteilung innerhalb des Straßenraumes sollten alle Nutzer*innen berücksichtigt werden: „Complete Streets is a transportation policy that provides safe access for all road users - pedestrians, cyclists, public transit users, and motorists -of all ages and abilities. It requires that transportation agencies routinely design and operate the entire right of way to enable safe access for all users and engage the public to identify the most desired and active transportation solutions“ (Eitler et al. 2013: 10). Dafür gilt es, Kompromisslösungen, teilweise temporäre Lösungen, zu finden und jeweils Gelegenheiten in Stadtentwicklungsprozesse zur Optimierung des Straßenraumes zu nutzen (Engler et al. 2020: 15). Sensible Nutzungen, d.h. wenn Menschen lange den Luftschadstoffen ausgesetzt sind, sollten bewusst geplant und im Straßenraum angeordnet werden. Denn die Emissionen des Kraftverkehrs werden in niedriger Höhe an die Umwelt abgegeben und sind abhängig vom Wind, dem Verhältnis zwischen Straßenraumbreite und Gebäudehöhe sowie der Art der Randbebauung (s. Kap. 2.5.3). In den Messungen wurde deutlich, dass neben dem eindeutigen Zusammenhang zwischen Verkehrsbelastung und Luftschadstoffbelastung noch die Vermutung besteht, dass eine große Straßenbreite und angrenzende offene Bauweise zu einem kontanten Niveau der Belastung beiträgt (s. Kap. 6.6.10). Die Umsetzung dieser Maßnahmen sollte durch eine rechtliche und finanzielle Förderung begleitet werden sowie durch die Nutzung der geschaffenen Angebote durch die Bevölkerung (s. Abb. 93).



Mithilfe einer optimierten Straßenraumgestaltung und Straßenraumaufteilung sollte die individuelle Belastungssituation positiv beeinflusst werden.



Gesundheitsorientierte Handlungsempfehlungen

Abgestimmte Straßengestaltung für alle Verkehrsteilnehmer*innen

Ausreichend Flächen für die verschiedenen Verkehrsarten

Umsetzung von kleinräumigen und temporären Maßnahmen zur Stärkung des Umweltverbundes und der Aufenthaltsqualität



Politik und Gesetzgeber



Stadt- und Verkehrsplanung



Verkehrsteilnehmer*innen

Akteursbezogene Handlungsempfehlungen

rechtliche und finanzielle Förderung von Maßnahmen im Straßenraum

Abwägung der Ansprüche der Verkehrsteilnehmer*innen
attraktive Gestaltung des öffentlichen Raums

Angebote des Umweltverbundes wahrnehmen, um die Belastungen zu minimieren

Abb. 93: Angepasste Straßenraumgestaltung (D 4)
Quelle: Eigene Darstellung

D 5: DER EINSATZ VON TECHNISCHEN LÖSUNGEN SOLLTE GENUTZT WERDEN, UM WÄHREND DER VERKEHRSWENDE DIE BELASTUNGSSITUATION ZU MINDERN.

Handlungsempfehlungen zu D 5 - Erläuterung

An sehr belasteten städtischen Räumen sollten technische Filteranlagen bzw. Lösungen eingesetzt werden, um beim Einhalten der Grenzwerte zu unterstützen und positive Effekte auf die Gesundheit der sich dort aufhaltenden Menschen zu erreichen. Zu den sehr belasteten Räumen können neben Hauptverkehrsstraßen auch Tunnelsituationen gehören, z.B. unterirdische Haltestelle im ÖPNV. Als temporäre Lösungen können technische Möglichkeiten den Transformationsprozess im Mobilitätsbereich (Verkehrswende) unterstützen sowie die bei emissionsarmen Fahrzeugen bestehenbleibenden Feinstäube durch u.a. Reifenabrieb auch zukünftig verringern. Neben den bestehenden urbanen Luftreinigungssystemen (s. Kap. 7.5) sind weitere Innovationen in diesem sowie anderen technischen Bereichen zu erwarten. Technische Lösung, wie Filteranlagen oder auch technische Begrünung, können damit insbesondere im Bestand als Überbrückung eingesetzt werden, weil die baulichen Strukturen sich nur teilweise kurzfristig veränderbar sind. Begleitend zum Einsatz solcher technischen Lösungen im urbanen Raum sind Verbesserungen an den Emissionsquellen, z.B. durch verbesserte Fahrzeugkonstruktionen und -technik, denkbar. Die akteursbezogenen Handlungsempfehlungen sind ebenfalls in Abbildung 94 zu finden.



Der Einsatz von technischen Lösungen sollte genutzt werden, um während der Verkehrswende die Belastungssituation zu mindern.



Gesundheitsorientierte Handlungsempfehlungen

Einsatz technischer Filteranlagen bzw. Lösungen, um positive Effekte auf die Gesundheit der sich dort aufhaltenden Menschen zu erreichen

Verbesserte Fahrzeugkonstruktionen und -technik



Politik und Gesetzgeber

Festlegung strengerer Grenzwerte & Förderung dieser temporären Lösungen



Stadt- und Verkehrsplanung

Integration der Filter in den öffentlichen Raum

Identifikation von belasteten Räumen



Bevölkerung

Forderung und Akzeptanz solcher Lösungen

Abb. 94: Technische Lösungen zur Luftfilterung an Stellen mit hoher Belastung und Exposition (D 5)
Quelle: Eigene Darstellung

8.6 Folgerungen und Konkretisierung für virtuelle Quartiere

Aus den knapp über 20 Kernaussagen konnten im Zuge der Forschungsarbeit in SHOTUP **Folgerungen** gezogen werden, die für eine gesundheitsorientierte Stadtentwicklung und die zukünftige Arbeit an der Gemeinschaftsarbeit Stadt gelten:

- Die Relevanz der gesundheitlichen Beeinträchtigungen ist gegeben sowie durch Stadt- und Verkehrsplanung mit zu beeinflussen.
- Integrierte Planung mit verstärkter Gesundheitsorientierung ist notwendig (Health in All Policies).
- Es gibt eine ganze Reihe von konkreten Handlungsempfehlungen, die zur Verbesserung der Gesundheit beitragen können, diese sind in die Gesamtabwägung einzubeziehen.
- Für die praktische Umsetzung sind diese Handlungsempfehlungen weiter zu konkretisieren und zu untersuchen, um den Praktiker*innen Hilfestellung auf Quartiersebene zu geben.

Im Kontext der Forschungsarbeit wurde die Notwendigkeit einer gesundheitsorientierten Gesamtplanung über alle Ebenen, vor allem bei der Umsetzung in den Quartieren und im Straßenraum, deutlich. Die Handlungsempfehlungen sollen nun konkret auf einen **Straßenraum** („virtuelles Quartier“) angewendet werden. Dafür wird dieser in fünf Bereiche unterteilt, in denen Maßnahmen zur Umsetzung einer gesundheitsorientierten Stadtentwicklung durchgeführt werden können: Randbebauung, öffentlicher Raum, Straßenraum, Flächen für Vegetation und für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik (s. Abb. 95).

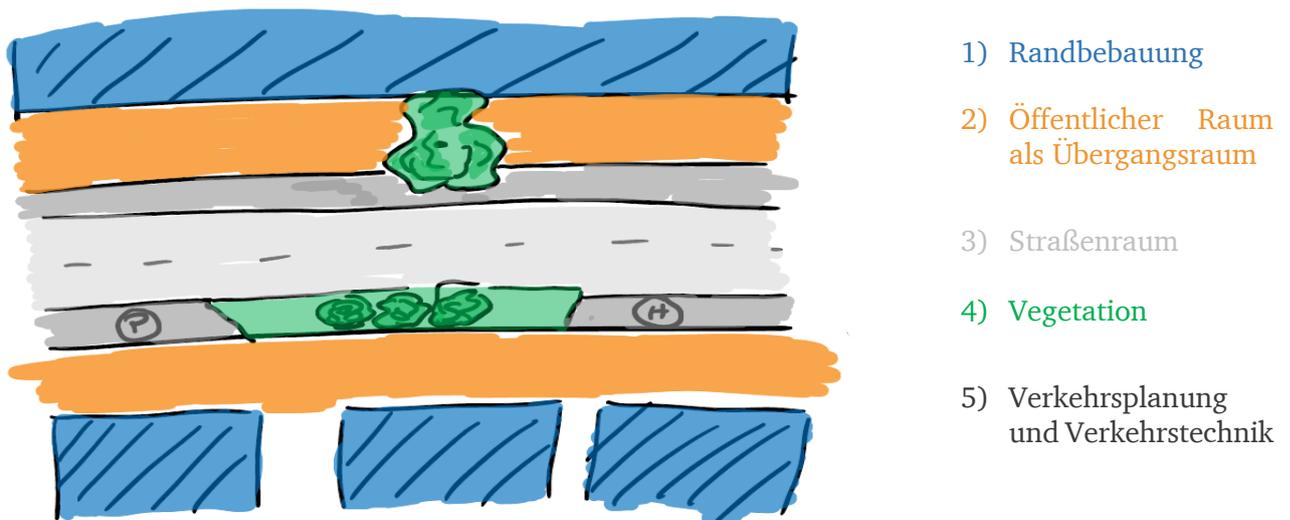


Abb. 95: Virtueller Straßenquerschnitt eines Quartiers
Quelle: Eigene Darstellung

Um eine bestmögliche, gesunde Umwelt für die städtische Bevölkerung zu erreichen, müssen frühzeitig konkrete Maßnahmen und Anpassungen an den städtischen Strukturen vorgenommen werden. Als Zielvorstellung können Leitbilder möglicher urbaner Zukünfte dienen (s. Kap. 4.4). Urbane Räume weltweit müssen sich weiter verändern zu **kompakte-adaptive Systeme** und heterogener, dichter, bunter und gemischer werden. Diese Entwicklungen benötigen eine angemessene vorausschauende städtebauliche Reaktion. Des Weiteren müssen Maßnahmen **einer Energie- und Mobilitätswende**, zum Klimaschutz und zur Klimaanpassung sowie des ressourcenschonenden Umganges mit der Umwelt eingeleitet und umgesetzt werden. In der Bestandsentwicklung und Neuplanung von Quartieren muss ein hoher Nachhaltigkeitsstandard angestrebt werden. In der nachfolgenden Übersicht werden beispielhaft denkbare Maßnahmen als nächster Schritt genannt, die sich zwischen der Weiterentwicklung des Bestandes und des Neubaus unterscheiden und in Kapitel 7.5 diskutiert wurden:

Tab. 36: Maßnahmen in virtuellen Quartieren
 Quelle: Eigene Darstellung

Aufgabenbereich Stadtentwicklung	Bereich des Straßenraumes	Beispiele für Maßnahmen
Bestand/ Weiterentwicklung	Randbebauung	<ul style="list-style-type: none"> - Berücksichtigung der Belüftungssituation bei baulicher Nachverdichtung (optimierte städtebauliche Gestalt) - Begrünung der Gebäude - Anordnung der Funktionen und Nutzungen mit Berücksichtigung der Luftschadstoffbelastung (z.B. keine Aufenthaltsorte an stark befahrenen Straßen)
	Öffentlicher Raum	<ul style="list-style-type: none"> - Aktivierende und attraktive Gestaltung - Öffentliche Nutzungen fördern (Belebung) - Straßensperrungen für einzelne Verkehrsträger (Verkehrsberuhigung) - Parkraumbewirtschaftung und Parkplätze umwidmen - Intermodale Verkehrsstationen initiieren
	Straßenraum	<ul style="list-style-type: none"> - Flächenkonkurrenz lösen bzw. minimieren - Gleichrangige Aufteilung für die verschiedenen Verkehrsarten anstreben - Urbane Luftreinigungssysteme integrieren
	Vegetation	<ul style="list-style-type: none"> - Ergänzung passender kleinteiliger Bepflanzung - Sicherung und Aufwertung bestehender Vegetation
	Verkehrsplanung und Verkehrstechnik	<ul style="list-style-type: none"> - Förderung des Umweltverbundes: z.B. durch Ausbau des Radwegenetzes, Förderung von Intermodalität durch geeignete Fahrradabstellanlagen an Haltestellen, attraktive Gestaltung von Fußwegen - Förderung alternativer Antriebe zur Reduzierung motorbedingter Emissionen: z.B. durch den Ausbau der Ladeinfrastruktur für E-Fahrzeuge - Mobility Pricing: z.B. City-Maut, Parkraumbewirtschaftung - Kampagnen zur Bewusstseinsbildung: z.B. für Nutzer*innen des MIV und des NMIV - Nutzung digitaler Möglichkeiten: z.B. zur Bewusstseinsbildung, Fahrgastinformation)
Neubau	Randbebauung	<ul style="list-style-type: none"> - Für den jeweiligen Standort Randbebauung im Entwurf modellieren und optimale Lösung umsetzen, u.a. Gebäudehöhe-Straßenbreite-Verhältnis, Randbebauung und Belüftungsverhältnisse beachten (s. Kap. 7.5).
	Öffentlicher Raum	<ul style="list-style-type: none"> - Attraktive Aufenthaltsräume neben den stark belasteten Räumen vorsehen - Qualitative hochwertige Räume, die sich aktivierend auf die Bevölkerung auswirken, schaffen
	Straßenraum	<ul style="list-style-type: none"> - Flächenaufteilung, die allen Verkehrsteilnehmer*innen ausreichend Fläche gibt (Kompromisslösungen erreichen)
	Vegetation	<ul style="list-style-type: none"> - Neben großen Freiflächen eine auf die lufthygienische Situation abgestimmte Begrünung der Quartiere schaffen. - Wahl einer passenden Pflanzenart (s. Kap. 7.5)
	Verkehrsplanung und Verkehrstechnik	<ul style="list-style-type: none"> - Auf Umweltverbund optimiertes Angebot schaffen: z.B. durch attraktiv gestaltete Fuß- und Radwege - Mobility Pricing: z.B. Flächen für Parkraummanagement vorsehen - Steigender Nachfrage am Umweltverbund gerecht werden, z.B. durch ausreichend Flächen im Straßenraum und im Quartier

9 Schluss

Das anschließende Fazit gibt einen Überblick über die Forschungsarbeiten in SHOTUP. Im Ausblick wird der weitere Forschungsbedarf zum Thema nachhaltige und gesundheitsorientierte Verkehrs- und Stadtplanung aufgezeigt. Zudem wird die Fortführung des SHOTUP-Projekts durch die vietnamesische Partneruniversität, die Vietnamese-Germany-University (VGU), die im Anschluss an das deutsche Projekt ihre Arbeit innerhalb von SHOTUP aufnimmt, dargestellt.

9.1 Fazit der durchgeführten Untersuchungen

Die Zahl der Menschen, die in Städten leben, steigt weltweit kontinuierlich. Ergänzend zu den Vorteilen der Urbanisierung müssen negative Aspekte, wie erhöhte **Gesundheitsrisiken**, vermehrt in den Blick genommen werden. Die hohe Luftverschmutzung in Städten als Folge der Urbanisierung fordert jährlich etwa 6,5 Mio. vorzeitige Todesfälle (WHO Regional Office for Europe 2018). Die Luftverschmutzung wird zu einem großen Teil durch bestehende Fahrzeugtechnologien sowie begrenzten Luftaustausch aufgrund ungeeigneter Gebäudestrukturen verursacht. Durch eine Vielzahl von **Wirkungszusammenhängen** zwischen den drei Fachdisziplinen Stadt, Verkehr und Gesundheit ist es möglich, aktiv in die Gestaltung von Städten einzugreifen und durch eine gesundheitsorientierte Stadtentwicklung den negativen Auswirkungen der Urbanisierung entgegenzuwirken. Dabei sind Städte und ihre Bevölkerung Verursacher und Betroffene zugleich, wodurch urbane Wachstumsgrenzen spürbar werden und Impulse für Transformationsprozesse entstehen. (Fehr und Hornberg 2018e: 21) Diese Wachstumsgrenzen und das Fehlen konkreter Empfehlungen auf Quartiersebene waren Anlass zur detaillierten Untersuchung ausgewählter Wirkungszusammenhänge zwischen der gebauten Umwelt, verkehrlichen Einflussfaktoren und der menschlichen Gesundheit.

Zur Untersuchung der ausgewählten Wirkungszusammenhänge wurden **mobile und stationäre Messungen** von ultrafeinen und gröberen Partikeln in Frankfurt am Main und Ho Chi Min City durchgeführt. Neben der Analyse der Auswirkungen der Einflussfaktoren Verkehrsmittelwahl, Routenwahl und Zeitwahl aus dem Einflussbereich der Verkehrsnachfrage auf die Luftschadstoffbelastung wurden in Deutschland zusätzlich Detailuntersuchungen verschiedener Situationen im Radverkehr und ÖPNV durchgeführt. Zudem wurden die in Frankfurt am Main gesammelten Daten der mobilen Luftqualitätsmessungen auf ihre Beeinflussung durch stadtplanerische Faktoren wie Streckenverlauf, Bauweise und Nutzung analysiert. Weiteren Aufschluss über den Einfluss der Randbebauung sowie der Straßenraumbreite gaben stationäre Messungen in Deutschland.

Zur Untersuchung des Einflusses der **Verkehrsmittelwahl** auf die Luftschadstoffbelastung von Verkehrsteilnehmer*innen wurden in Deutschland Messungen für unterschiedliche Verkehrsmittel durchgeführt (Pkw, Fahrrad, S-Bahn, Bus/U-Bahn/Tram). Die Ergebnisse der Messungen zeigen, dass die Luftschadstoffbelastung durch die Partikelgröße UFP oder gröbere Partikel wie $PM_{2,5}$ und PM_{10} in Abhängigkeit der Verkehrsmittelwahl variiert.

- So sind Verkehrsteilnehmer*innen bei der Nutzung des MIV höheren Belastungen durch UFP ausgesetzt, verglichen mit Nutzer*innen des teilweise unterirdisch verkehrenden ÖPNV. Bei der Analyse der Belastungen durch $PM_{2,5}$ und PM_{10} ergibt sich ein gegenläufiges Bild. Hier sind die Belastungen durch gröbere Partikel im teilweise unterirdisch verkehrenden ÖPNV um ein Vielfaches (bis zu einem Faktor von 3,5) höher, verglichen mit den Belastungen im MIV.
- Bei der Gesamtbewertung der Belastungssituation durch UFP und gröbere Partikel hat sich gezeigt, dass Nutzer*innen des ÖPNV aufgrund der extrem hohen Belastungen durch Feinstaub der Größenfraktion $PM_{2,5}$ und PM_{10} insgesamt höheren gesundheitlichen Belastungen ausgesetzt sind als Nutzer*innen des MIV.
- Bei der Analyse der Auswirkungen der Verkehrsmittelwahl auf die Luftschadstoffbelastung wurde zusätzlich die Belastung im Fahrzeuginnenraum von zwei verschiedenen Pkw betrachtet. Die Ergebnisse verdeutlichen den Vorteil bei der Nutzung eines neuen Pkw im Vergleich zum ÖPNV.

Der Grund hierfür wird bei den Unterschieden der Lüftungsanlagen moderner und älterer Pkw gesehen.

- Neben dem motorisierten Verkehr wurden auch die Luftschadstoffbelastungen von Radfahrer*innen untersucht. Bei der Gesamtbetrachtung UFP und größerer Partikel ergab sich bei der Nutzung des Fahrrads eine höhere Belastung, verglichen zur Nutzung des MIV und ÖPNV.
- Auch die Auswertung der in Vietnam gesammelten Daten zeigten, dass die Verkehrsmittelwahl einen Einfluss auf die Luftschadstoffbelastung von Verkehrsteilnehmer*innen hat. Hier sind vor allem Motorradfahrer*innen extrem hohen Luftschadstoffbelastungen ausgesetzt. Ebenso lagen die Luftschadstoffbelastungen bei Fahrten mit dem Fahrrad auf einem ähnlich hohen Niveau. Die geringsten Belastungen wurden bei der Nutzung des MIV festgestellt.

Neben der Verkehrsmittelwahl wurde anhand der Daten aus den Messungen in Deutschland der Einfluss der **Routenwahl** auf die Exposition von Verkehrsteilnehmer*innen gegenüber Luftschadstoffen untersucht. Hier ergaben sich vor allem bei der Betrachtung der Belastungen im Radverkehr Unterschiede je nachdem, ob die Strecke entlang der MIV-Hauptstrecke oder entlang der MIV-Nebenstrecke zurückgelegt wurde. Radfahrer*innen können somit ihre persönliche Exposition gegenüber Luftschadstoffen durch die Wahl weniger durch den MIV belasteter Strecken reduzieren. Ein weiterer Einflussfaktor der Luftschadstoffbelastung ist die **Zeitwahl**. So zeigten die Messungen in Ho Chi Minh City, dass Motorradfahrer*innen und Radfahrer*innen während der Hauptverkehrszeiten deutlich höheren Luftschadstoffbelastungen ausgesetzt sind. Bei der Nutzung des MIV und von Bussen waren jedoch kaum Unterschiede in den Luftschadstoffbelastungen in Abhängigkeit der Zeitwahl festzustellen. Durch die **Position bei Wartevorgängen** entsteht ein weiterer wichtiger Einfluss:

- Für den **Radverkehr** haben die für die Messungen in Deutschland durchgeführten Detailanalysen ergeben, dass Radfahrer*innen vor allem entlang von Hauptverkehrsstraßen durch die Aufstellung während Wartevorgängen an Lichtsignalanlagen ihre Exposition gegenüber Luftschadstoffen beeinflussen können. Radfahrer*innen, die sich während der Wartevorgänge unter Beachtung der Verkehrssicherheit vor der Warteschlange des Kfz-Verkehrs aufstellen, sind geringeren Luftschadstoffbelastungen ausgesetzt im Vergleich zu Radfahrer*innen, die während des Wartevorgangs an der LSA in der Mitte bzw. am Ende der Warteschlange des Kfz-Verkehrs stehen.
- Die Detailanalysen der Messungen im **ÖPNV** haben sich auf ober- bzw. unterirdische Fahrt- und Wartevorgänge bezogen und zeigten, dass Nutzer*innen des ÖPNV an oberirdischen Haltestellen, die sich an Hauptverkehrsstraßen befinden, höheren Belastungen durch UFP ausgesetzt sind. Finden Wartevorgänge an unterirdischen Haltestellen statt, waren extrem hohe Belastungen durch größere Partikel der Fraktionen $PM_{2,5}$ und PM_{10} zu verzeichnen.

Diese Erkenntnisse sollten in die weitere Planung von Radverkehrsanlagen, die ÖPNV-Planung sowie die Gestaltung der öffentlichen Räume miteinbezogen werden. Neben der Untersuchung verkehrsplanerischer Einflussfaktoren wurden die in Deutschland gesammelten mobilen Messdaten des Weiteren hinsichtlich der Auswirkungen **städtebaulicher Einflussfaktoren** untersucht. Hierfür wurden die gemessenen Luftschadstoffbelastungen mit GPS-Daten kombiniert und mithilfe eines Geoinformationssystems räumlich analysiert. Die Analyse ergab, dass Zusammenhänge zwischen städtebaulichen Einflussfaktoren und Luftschadstoffbelastungen mithilfe mobiler Messungen teilweise, aber nicht in Gänze nachgewiesen werden können:

- Die Analyse zur Luftschadstoffbelastung im **Streckenverlauf** (freie Strecke, Knotenpunkte) konnte zwar etwas höhere Belastungen durch Partikel der Größenfraktion PM_{10} an den Knotenpunkten, zurückzuführen auf Brems- und Beschleunigungsvorgänge, feststellen. Allerdings wären ebenfalls höhere Belastungen im Bereich der UFP zu erwarten gewesen, da erhöhte motorbedingte Emissionen in Knotenpunktbereichen vorliegen könnten.
- Die Betrachtung der Belastungssituationen in Abhängigkeit der **Bauweise** (keine Bebauung, offen, halboffen, geschlossen) hat bei den durchgeführten Messungen keine erklärbaren Unterschiede in den Luftschadstoffbelastungen gezeigt. Daher werden mobile Messungen für diese Untersuchung als eher ungeeignet eingeschätzt.

-
- Die Zusammenhangsanalyse zwischen **Nutzung** (Verkehr, Grünfläche, Fußgängerzone und Baustelle) und der Luftschadstoffbelastung hat eine erhöhte Anzahl an UFP im Bereich der als „Verkehr“ (Fahrtverlauf entlang von Haupt- und Nebenstrecken ohne Besonderheiten) definierten Nutzung ergeben. Dies ist aufgrund der Anwesenheit von Kraftfahrzeugen entlang der Strecken plausibel. In Bezug auf PM_{2,5} und PM₁₀ sind im Bereich der Grünfläche höhere bzw. deutlich höhere Belastungen zu verzeichnen, die auf Aufwirbelungen von Partikeln entlang der trockenen und unbefestigten Wege zurückzuführen sind. Ebenso im Bereich der Baustellen entlang der Nebenstrecke des Radverkehrs sind etwas höhere Belastungen durch PM₁₀ gemessen worden.

Neben den mobilen Messungen wurden zusätzlich **stationäre Messungen** in ausgewählten Straßenquerschnitten mit offener bzw. geschlossener Randbebauung und geringer bzw. großer Straßenraumbreite durchgeführt.

- Bei der Analyse der Messdaten konnte teilweise eine Korrelation zwischen der Verkehrsstärke und der Luftschadstoffbelastung nachgewiesen werden.
- Zudem wurde gezeigt, dass eine offene Bebauung verglichen mit geschlossenen Bebauungen ein sichtbar konstanteres Niveau der Luftschadstoffbelastungen zur Folge hat.

Die Analyse der mobilen Messungen in Bezug auf den Einfluss ausgewählter verkehrlicher Einflussfaktoren hat sich als gut geeignet erwiesen. Vor allem bei der Verkehrsmittel- und Routenwahl konnten aussagekräftige Ergebnisse erzielt werden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Zusammenhang zwischen den entsprechenden Einflussfaktoren und der Luftschadstoffbelastung eindeutig herzustellen ist. Auch wenn externe Einflüsse wie Meteorologie und Hintergrundbelastung die Luftschadstoffbelastung beeinflussen, konnte der Einfluss dieser externen Faktoren durch die Verteilung der Messungen auf verschiedene Tage und Uhrzeiten geringgehalten werden. Die Ursache für die Probleme des eindeutigen Nachweises der Kausalität von städtebaulichen Faktoren und der Luftschadstoffbelastung wird in den komplexen Wechselwirkungen zwischen städtebaulichen, verkehrlichen und meteorologischen Einflüssen auf die Luftschadstoffbelastung gesehen. Für eine **weiterführende Analyse** der Zusammenhänge ausgewählter Faktoren könnte eine Simulation der Luftschadstoffbelastung hilfreich sein. Durch den Aufbau eines geeigneten Modells ist es möglich, nur ausgewählte Einflussfaktoren zu verändern und alle weiteren Faktoren konstant zu lassen, um somit eindeutige Aussagen über bestimmte Einflussfaktoren treffen zu können. Der Aufwand zur Entwicklung eines solchen Modells ist allerdings erheblich.

Die gesammelten Erkenntnisse aus Literaturrecherche und der Analyse der Messungen sind schließlich in **Handlungsempfehlungen für eine gesundheitsorientierte Stadtentwicklung** eingeflossen. Diese bieten Praktiker*innen eine Hilfestellung in der täglichen Praxis und Anlass für weitere Forschungsarbeiten. Im Kontext dieser Forschungsarbeit wurde die Notwendigkeit einer gesundheitsorientierten Gesamtplanung über alle Ebenen, vor allem bei der Umsetzung in den Quartieren und im Straßenraum, deutlich. Für eine gesundheitsorientierte Stadtentwicklung sind eine integrierte Planung mit verstärkter Gesundheitsorientierung (Health in All Policies), eine angemessene Einbringung des Belanges Gesundheit in planerische Entscheidungen sowie die praktische Umsetzung durch Maßnahmen der Stadt- und Verkehrsplanung auf Quartiersebene relevant. Denn die Zukunftsfähigkeit und Lebensqualität einer wachsenden Stadt hängt von der Gestaltung dieses Wachstums, insbesondere des Mobilitätswachstums, ab (Polinna 2021: 131). „Zukunftsfähige Gesundheitsförderung kann mittels innovativer, kreativer Strategien Antworten auf aktuelle gesellschaftliche Problemlagen und gesundheitspolitische Herausforderungen bereitstellen“ (Hornberg et al. 2018: 55). Dafür sind keineswegs revolutionäre Erfindungen notwendig, sondern viele Ansätze und Instrumente sind schon vorhanden und müssen ‚lediglich‘ umgesetzt werden. Dafür sind gesellschaftlicher Wille und Mut zu Veränderungen bei den vielfältigen Herausforderungen ausschlaggebend. (Adler 2012: 112-113)

9.2 Reflexion zur Corona-Pandemie als aktuelle Herausforderung

Die derzeitige Corona-Pandemie zeigt, welche Auswirkungen **Veränderungen im Verkehrsverhalten** auf die Luftschadstoffbelastung besitzen können. „Seit über die Verkehrswende diskutiert wird, ist der Treibhausgasausstoß im Verkehrssektor praktisch unverändert geblieben. Erst die verschiedenen intensiv ausgefallenen Lockdowns im Zuge der Corona-Pandemie führten zu einer spürbaren Abnahme. Sie geben einen Eindruck davon, welche Intensität die Verkehrswende annehmen kann, wird sie sehr kurzfristig und abrupt vollzogen“ (Stein 2021: 115). Neben der Abnahme des Verkehrsaufkommens aufgrund veränderter räumlicher und zeitlicher Aktivitätsmuster, mit Ausnahme des Lieferverkehrs, waren unter anderem noch eine steigende Nutzung des Fahrrades, sinkende Nachfrage im ÖPNV und nach Carsharing-Angeboten sowie das Fehlen der täglichen Verkehrsspitzen zu beobachten (Engler et al. 2020: 14; Lenz et al. 2020: 99-104). Im Sinne einer **Verkehrswende** weisen diese Entwicklungen unterstützende und gleichzeitig den Zielen gegenläufige Tendenzen auf.

Vertiefende Untersuchungen zeigen, dass die Veränderungen meist innerhalb des Rahmens **bestehender individueller Verhaltensmuster** stattfanden und **kein grundlegendes Umdenken** zu beobachten ist. Ergebnisse der jüngsten nationalen Mobilitätsstudie „Mobilität in Deutschland“ zeigen kaum Veränderungen der Verkehrsmittelwahl zu den Vorgängererhebungen aus den Jahren 2008 und 2002. (Lenz et al. 2020: 100, 104). Dies weist daraufhin, dass vorgeschriebene Einschränkungen alleine nicht effektiv sind, sondern ein **gesellschaftliches Umdenken** notwendig ist. „Gleichzeitig zeigt sich, dass **Multimodalität** eine wesentliche Voraussetzung ist, um Alltagsmobilität auch in Krisenzeiten ohne Brüche und starke individuelle Restriktionen zu ermöglichen“ (Lenz et al. 2020: 104). Diese sollte zukünftig weiter gefördert und in den Planungen umgesetzt werden. Das Umweltbundesamt kommt nach der Analyse des deutschlandweiten Messnetzes zu folgender Schlussfolgerung: „Die Maßnahmen im Frühjahr 2020 zur Eindämmung der Corona-Pandemie hatten grundsätzlich einen positiven Effekt auf die Luftqualität. Die an verkehrsnahen Messstationen in Städten gemessenen NO₂-Konzentrationen sanken im Zeitraum des Lockdowns, der Rückgang wurde jedoch durch ungünstige Ausbreitungsbedingungen gebremst“ (Umweltbundesamt 2021b: 32). Die Auswirkungen auf die Luftschadstoffbelastung waren ebenfalls auf Satellitenaufnahmen sichtbar (Umweltbundesamt 2021b: 20).

„COVID-19 hat das öffentliche Leben und damit auch die Mobilität in voller Fahrt ausgebremst und uns alle in ein vor kurzem noch nicht für möglich gehaltenes „Reallabor“ versetzt“ (Lenz et al. 2020: 96). Es war ein Praxistest für umfassende Umbrüche und Maßnahmen, die für eine Verkehrswende benötigt werden. Gleichzeitig erlangte das Bewusstsein für die Wichtigkeit des Themas Gesundheit und gesunder sowie hochwertiger Lebensräume in den Städten einen höheren Stellenwert. Die Pandemie macht die **Auswirkungen der kontinuierlichen Luftschadstoffbelastung auf den Gesundheitszustand** der betroffenen Bevölkerung teilweise sichtbar. Durch die negativen Effekte einer schlechten lufthygienischen Situation war in diesen Gegenden die Sterblichkeit durch eine Corona-Erkrankung erhöht (Müller-Lang 2020; Reuning 2020). Nach Bräunling et al. benötigt eine nachhaltige Reaktion der Corona-Pandemie ein am Health in All Policies-Ansatz orientiertes Vorgehen. Denn es wurde deutlich, dass gesundheitliche Herausforderungen nur als **gesamtgesellschaftliche Aufgabe** zu bewältigen sind. Viele verschiedene Akteure müssen koordiniert zusammenarbeiten, auch weil die Pandemie alle Lebensbereiche betrifft. (Bräunling et al. 2020: 13)

9.3 Ausblick

In der neuen Leipzig Charta wird an die transformativen Kräfte der Städte appelliert, um zum Kampf gegen die Erderwärmung, zu einer hohen Umweltqualität und nachhaltigen Flächennutzung beizutragen (EU 2020: 5). „Was also definiert eine lebenswerte Stadt der Zukunft? Wie können Faktoren der Lebensqualität entschlüsselt werden, wenn Effizienz und eine gute Infrastruktur allein die Bewohner weder gesund noch glücklich machen? [...] Und wie verändert die Forderung nach Lebensqualität die künftige Gestalt unserer Städte? Das alles führt zur wichtigsten Frage: Wie wollen wir in Zukunft leben?“ (Zukunftsinstitut 2020e).

Diese Frage muss die städtische Bevölkerung beantworten, und aktuell steht die Diskussion dazu erst am Anfang. Somit ergeben sich für die Fortführung des SHOTUP-Projekts durch die vietnamesische Seite vielfältige zukünftige Forschungsthemen. Des Weiteren können die mit diesem Bericht dokumentierten Erkenntnisse angereichert und validiert werden. Dazu sind Simulationen der kleinskaligen, zeitabhängigen Effekte unter Berücksichtigung der gebauten Umwelt denkbar.

Weiterer **Forschungsbedarf** besteht basierend auf der Literaturrecherche unter anderem bei den folgenden Themen:

- Eine effektive Nutzung der Erkenntnisse über gesundheitliche Auswirkungen der Stadt- und Verkehrsplanung wird gefordert (Sallis et al. 2016: 2936), aber eindeutige Hinweise und klare Antworten für deren **praktische Anwendung** bleiben weiter schwierig (Baumgart 2012: 275-276) und müssen daher erarbeitet und weiter konkretisiert werden.
- Die aktuelle **Entwicklungsdynamik**, vor allem in Vietnam, muss auch zukünftig weiter erforscht werden, und **nachhaltige Lösungen im Sinne einer gesundheitsorientierten Stadtentwicklung** müssen gefunden werden. Denn „beide Entwicklungsdynamiken - die Urbanisierung wie auch die Mobilisierung der asiatischen Gesellschaften - erinnern in mancherlei Hinsicht an die Industrialisierung Europas im 19. Jahrhundert. Allerdings sehen sich die asiatischen Länder mit ganz anderen zeitlichen und räumlichen Dimensionen der Stadt- und Verkehrsentwicklung konfrontiert als ehemals Europa“ (Schöller-Schwedes und Rammler 2012: 134). Diese Prozesse sollten durch Erkenntnisse einer gesundheitsorientierten Stadtentwicklung unterstützt werden.
- Die Forschung muss sich stärker auf die **Gesundheitskosten einer schlechten Stadtgestaltung** konzentrieren und neue Modelle zur Prüfung der nachhaltigen Tragfähigkeit anbieten. Der Nachweis der Marktfähigkeit von gesundem Design könnte ein Schlüssel dazu sein, den privaten Sektor davon zu überzeugen, dass es sich lohnt, darin zu investieren. (Carmichael et al. 2019: 161)
- Eindeutig besteht ein Bedarf an mehr Forschung bezüglich der **Auswirkungen der Güterverkehrspolitik auf Luftqualität und öffentliche Gesundheit**. Trotz erster Erkenntnisse, dass der Güterverkehr wesentlich zu den lokalen und regionalen Luftqualitätsproblemen beiträgt, ist in diesem Bereich weitere Forschung, u.a. zu den unterstützenden Maßnahmen und Lösungswegen, nötig. (Khreis et al. 2019: 597)

Des Weiteren zeigt sich, dass:

- weiterhin Forschungsbedarf zu den Wirkungszusammenhängen besteht. Vor allem die Einbringung der Erkenntnisse in die planerische und die politische Diskussion muss verstärkt werden. Die Evidenzbasis muss weiter ausgebaut und für die politische Diskussion aufbereitet werden.
- durch mobile Messungen Aussagen zum Einfluss verkehrlicher Aspekte auf die Luftschadstoffbelastung getroffen werden können. Neben der Analyse stationär gewonnener Daten könnten durch Simulationen weitere Wirkungszusammenhänge zwischen Stadt, Verkehr und Gesundheit untersucht werden.
- die Untersuchung der Effekte eines Lockdowns des öffentlichen Lebens und der räumlichen Entwicklungen, die mit der Corona-Pandemie einhergingen und einhergehen ein weiteres zukünftiges Forschungsfeld darstellt.
- die Implementierung der in interdisziplinären Workshops mit Expert*innen aus den Fachdisziplinen Stadt, Verkehr und Gesundheit diskutierten Handlungsempfehlungen gestartet werden muss.

10 Quellenverzeichnis

39. BImSchV: Neununddreißigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen – 39. BImSchV). Ausfertigungsdatum 02.08.2010
- Adams, H.-S.; Nieuwenhuijsen, M.-J.; Colvile, R.N. 2001: Determinants of fine particle (PM_{2.5}) personal exposure levels in transport microenvironments, London, UK. In: Atmospheric Environment, 35: 4557-4566
- Adler, Michael 2012: Generation Mietwagen: Die neue Lust an einer anderen Mobilität. München: Oekom Verlag
- Adli, Mazda 2017: Stress and the City: Warum Städte uns krank machen. Und warum sie trotzdem gut für uns sind. München: C. Bertelsmann
- Adrian, Luise; Bunzel, Arno; Frerichs, Stefan; Küpper, Christoph; Noky, Bernd; Pätzold, Ricarda; Simon, André 2018: Umwelt- und Aufenthaltsqualität in kompakt-urbanen und nutzungsgemischten Stadtstrukturen: Analysen, Fallbeispiele, Handlungsansätze unter Nutzung und Weiterentwicklung des Bauplanungs- und Umweltrechts. Online verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-01-29_texte_06-2018_stadtstrukturen.pdf (zuletzt geprüft: 24.09.2021)
- Agora Verkehrswende 2018: Öffentlicher Raum ist mehr wert: Ein Rechtsgutachten zu den Handlungsspielräumen in Kommunen. Online verfügbar unter: https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2018/Oeffentlicher_Raum_ist_mehr_wert/Agora_Verkehrswende_Rechtsgutachten_oeffentlicher_Raum.pdf (zuletzt geprüft: 24.09.2021)
- Ahrens, Gerd-Axel 2018: Verkehrsplanung, In: ARL – Akademie für Raumforschung und Landesplanung (Hrsg.): Handwörterbuch der Stadt- und Raumentwicklung, ARL – Akademie für Raumforschung und Landesplanung, Hannover, 2805-2815
- Aichinger, Wolfgang; Klein-Hitpaß, Anne 2020: Parkraummanagement: Schlüssel zur urbanen Verkehrswende. In: PlanerIn, H. 4: 20-22
- Akademie für Sport 2021: Atemvolumina. Online verfügbar unter: <https://www.akademie-sport-gesundheit.de/lexikon/atemvolumina.html> (zuletzt geprüft: 15.09.2021)
- Anders, Stephan 2018: Mehrwert nachhaltiger Stadtquartiere. In: Bott, Helmut; Grassl, Gregor C.; Anders, Stephan (Hrsg.): Nachhaltige Stadtplanung: Lebendige Quartiere - Smart cities - Resilienz. Edition DETAIL. München: Edition DETAIL, 28-31
- AGGSE (Arbeitsgruppe Gesundheitsfördernde Gemeinde- und Stadtentwicklung) 2020: Empfehlungen für eine gesundheitsfördernde und nachhaltige Stadtentwicklung. Online verfügbar unter: https://difu.de/sites/default/files/archiv/projekte/aggse_thesen_2020-03-09.pdf (zuletzt geprüft: 24.09.2021)
- AQI (Air Quality Index) 2021: Ho Chi Minh City US Consulate, Vietnam Air Pollution: Real-time Air Quality Index. Online verfügbar unter: <https://aqicn.org/city/vietnam/ho-chi-minh-city/us-consulate> (zuletzt geprüft: 27.09.2021)
- Bär, Gesine; Reimann, Bettina; Böhme, Christa 2009: Kinder- und jugendbezogene Gesundheitsförderung im Stadtteil. Difu-Arbeitshilfe. Berlin: Difu
- Barton, Hugh; Grant, Marcus; Guise, Richard 2006: Shaping Neighbourhoods: A Guide For Health, Sustainability and Vitality. Hoboken: Taylor and Francis
- Battis, Ulrich; Krautzberger, Michael; Löhr, Rolf-Peter: Baugesetzbuch 13. Auflage 2016, München: Verlag C.H.BECK
- Baugesetzbuch (BauGB) in der Fassung der Bekanntmachung vom 03.11.2017 (BGBl. I S. 3634), zuletzt geändert durch Artikel 17 G des Gesetzes vom 15.09.2021 (BGBl. I S. 4147, 4151)
- Baum, A.; Becker, R.; Hasskelo, H.; Weidner, W. 2006: PM_X-Belastungen an BAB. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Band V137. Bergisch-Gladbach: Bundesanstalt für Straßenwesen
- Baum, A. 2008: Einfluss meteorologischer und verkehrlicher Parameter auf die Partikelbelastung an BAB. Fachtagungsband Luftqualität an Straßen. Bergisch-Gladbach: Bundesanstalt für Straßenwesen

Baumeister, Hendrik; Rüdiger, Andrea; Köckler, Heike; Claßen, Thomas; Hamilton, Jacqueline; Riweler, Mareike; Şahin, Charlotte; Baumgart, Sabine; Hornberg, Claudia 2019: Leitfaden Gesunde Stadt: Hinweise für Stellungnahmen zur Stadtentwicklung aus dem Öffentlichen Gesundheitsdienst. Bielefeld: Landeszentrum Gesundheit Nordrhein-Westfalen

Baumgart, Sabine 2020: Stadtentwicklung: Eine kommunalpolitische Querschnittsaufgabe. In: Böhm, Katharina; Bräunling, Stefan; Geene, Raimund; Köckler, Heike (Hrsg.): Gesundheit als gesamtgesellschaftliche Aufgabe. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 209-222

Baumgart, Sabine 2018a: Gesundheitsfördernde Städte: Ergebnisse Und Empfehlungen des ARL-Arbeitskreises. In: PlanerIn, 5: 5-7

Baumgart, Sabine 2018b: Räumliche Planung und öffentliche Gesundheit - Eine historische Verknüpfung. In: Baumgart, Sabine; Köckler, Heike; Ritzinger, Anne; Rüdiger, Andrea (Hrsg.): Planung für gesundheitsfördernde Städte. Forschungsberichte der ARL, Bd. 8. Hannover: Akademie für Raumforschung und Landesplanung Leibniz-Forum für Raumwissenschaften, 20-36

Baumgart, Sabine 2013: Ein Fachplan "Gesundheit"? - Ziele und Anwendungsbeispiele in einer Pilotphase in Nordrhein-Westfalen. In: UVP-report, Jg. 27, 1+2: 50-54

Baumgart, Sabine 2012: Schutzgut Mensch - Überlegungen zur strategischen Verankerung von Gesundheitsbelangen in der Umweltprüfung. In: Bolte, Gabriele; Bunge, Christiane; Hornberg, Claudia; Köckler, Heike; Mielck, Andreas (Hrsg.): Umweltgerechtigkeit: Chancengleichheit bei Umwelt und Gesundheit: Konzepte, Datenlage und Handlungsperspektiven. Verlag Hans Huber, Programmbereich Gesundheit. Bern: Verlag Hans Huber, 271-282

Baumgart, Sabine; Böhme, Christa; Claßen, Thomas; Dilger, Ulrich; Fehr, Rainer; Kawe, Christiane; Kistemann, Thomas; Köckler, Heike; Kühling, Wilfried; Quilling, Eike; Rauland, Horst; Ritzinger, Anne; Rüdiger, Andrea; Spies, Gabriele; Tran, Minh-Chau; Weber, Dieter 2018a: Planung für gesundheitsfördernde Städte - Ein Ausblick. In: Baumgart, Sabine; Köckler, Heike; Ritzinger, Anne; Rüdiger, Andrea (Hrsg.): Planung für gesundheitsfördernde Städte. Forschungsberichte der ARL, Bd. 8. Hannover: Akademie für Raumforschung und Landesplanung Leibniz-Forum für Raumwissenschaften, 422-428

Baumgart, Sabine; Rüdiger, Andrea 2019: Gesundheit in der Raumplanung. In: Raumforschung und Landesplanung, Akademie für (Hrsg.): Handwörterbuch der Stadt- und Raumentwicklung. Hannover: Akademie für Raumforschung und Landesplanung, 829-835

Baumgarten, Heiner 2012: Gesundheit und Freiraumplanung - am Beispiel der Stadt Hamburg. In: Böhme, Christa; Kliemke, Christa; Reimann, Bettina; Süß, Waldemar (Hrsg.): Handbuch Stadtplanung und Gesundheit. Bern: Verlag Hans Huber, 75-83

Baumüller, Jürgen 1999a: Emission von Luftschadstoffen. In: Helbig, Alfred; Baumüller, Jürgen; Kerschgens, Michael J. (Hrsg.): Stadtklima und Luftreinhaltung. Berlin: Springer, 168-189

Baumüller, Jürgen 1999b: Immissionen. In: Helbig, Alfred; Baumüller, Jürgen; Kerschgens, Michael J. (Hrsg.): Stadtklima und Luftreinhaltung. Berlin: Springer, 206-230

Baumüller, Jürgen 1999c: Inversionen und Luftbelastung. In: Helbig, A.; Baumüller, J.; Kerschgens, Michael J. (Hrsg.): Stadtklima und Luftreinhaltung. Berlin: Springer

BBSR (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung) 2019: Nachdenken über die Stadt von übermorgen. BBSR-Online-Publikation. Online verfügbar unter: https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/bbsr-online/2019/bbsr-online-11-2019-dl.pdf;jsessionid=E0B31020084A25EE21E4EFB06EEE6E9C.live21322?__blob=publicationFile&v=1 (zuletzt geprüft: 27.09.2021)

Becker, Thilo; Gerlach, Julia 2020: Mobilität und Verkehr: Die Integration von Gesundheitsaspekten in die Verkehrsplanung – Status Quo und ein Ausblick. In: Böhm, Katharina; Bräunling, Stefan; Geene, Raimund; Köckler, Heike (Hrsg.): Gesundheit als gesamtgesellschaftliche Aufgabe. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 192-207

Becker, U.; Clarus, E.; Schmidt, W.; Winter, M. 2009: Stickoxide, Partikel und Kohlendioxid: Grenzwerte, Konflikte und Handlungsmöglichkeiten kommunaler Luftreinhaltung im Verkehrsbereich. Dresden: Technische Universität, Fakultät Verkehrswissenschaften

- Beckmann, Klaus 2020a: Verkehrswende: Eine trügerische Hoffnung? In: *PlanerIn*, 4: 5-7
- Beckmann, Klaus 2020b: Beispiele einer gelungenen Integration von Raum- und Verkehrsentwicklung. In: Reuter, Ulrike; Holz-Rau, Christian; Albrecht, Janna; Hülz, Martina (Hrsg.): *Wechselwirkungen von Mobilität und Raumentwicklung im Kontext gesellschaftlichen Wandels*. Forschungsberichte der ARL, Bd. 14. Hannover: ARL - Akademie für Raumentwicklung in der Leibniz-Gemeinschaft, 270-289
- Beckröge, W. 1999: Windfeld. In: Helbig, Alfred; Baumüller, Jürgen; Kerschgens, Michael J. (Hrsg.): *Stadtklima und Luftreinhaltung*. Berlin: Springer, 53-94
- Berghmans, P.; Bleux, N.; Int Panis, L.; Mishra, V.K.; Torfs, R.; Van Poppel, M. 2009: Exposure assessment of a cyclist to PM10 and ultrafine particles. In: *Science of the total Environment*, 407: 1286-1298
- Berliner Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz 2020: EU-Umweltprojekt HEAVEN. Online verfügbar unter: <https://www.berlin.de/sen/uvk/umwelt/luft/luftreinhaltung/archiv/eu-projekt-heaven/> (zuletzt geprüft: 14.09.2021)
- Bigazzi, A.-Y.; Figliozzi, M.-A. 2014: Review of Urban Bicyclists' Intake and Uptake of Traffic-Related Air Pollution. In: *Transport Reviews*, 34: 221-224
- Bigi, A. und R.M. Harrison 2010: Analysis of the air pollution climate at a central urban background site. In: *Atmospheric Environment*, 44: 2004-2012
- BImSchG (Bundes-Immissionsschutzgesetz) in der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Mai 2013 (BGBl. I S. 1274; 2021 I S. 123), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 24. September 2021 (BGBl. I S. 4458) geändert worden ist. Online verfügbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/bimSchG/_3.html (zuletzt geprüft: 13.07.2022)
- BMVBS (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung); BBSR (Bundesministerium für Bau-, Stadt- und Raumforschung) 2013: *Stadtklima: Kommunale Strategien und Potenziale zum Klimawandel: Expertisen*. Online verfügbar unter: https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/exwost/39/exwost39_4.pdf;jsessionid=5C319CEBC05EF0D3DF3A60C1FF9A1529.live11293?__blob=publicationFile&v=1 (zuletzt geprüft: 24.09.2021)
- BMVBS (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung); BBSR (Bundesministerium für Bau-, Stadt- und Raumforschung) 2012: *Stadtklima: Kommunale Strategien und Potenziale zum Klimawandel. Ergebnisse Modellprojekte (39/3)*. Online verfügbar unter: https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/exwost/39/exwost39_3.pdf;jsessionid=5C319CEBC05EF0D3DF3A60C1FF9A1529.live11293?__blob=publicationFile&v=1 (zuletzt geprüft: 24.09.2021)
- BMVBS (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung); BBSR (Bundesministerium für Bau-, Stadt- und Raumforschung) 2009: *Klimawandelgerechte Stadtentwicklung: „Climate-Proof Planning“*. Online verfügbar unter: https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/bbsr-online/2009/DL_ON262009.pdf;jsessionid=A52D638F0791FBAD146905326920E315.live11291?__blob=publicationFile&v=1 (zuletzt geprüft: 27.09.2021)
- Böhm, Katharina; Lahn, Kanina; Köckler, Heike; Geene, Raimund; Bräunling, Stefan 2020: Health in All Policies: Wo stehen wir und was braucht es für die weitere Entwicklung? In: Böhm, Katharina; Bräunling, Stefan; Geene, Raimund; Köckler, Heike (Hrsg.): *Gesundheit als gesamtgesellschaftliche Aufgabe*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 427-434
- Böhme, Christa; Reimann, Bettina 2012: *Gesundheitsfördernde Stadtteilentwicklung: mehr Gesundheit im Quartier*. In: Böhme, Christa; Kliemke, Christa; Reimann, Bettina; Süß, Waldemar (Hrsg.): *Handbuch Stadtplanung und Gesundheit*. Bern: Verlag Hans Huber, 199-209
- Bolte, Gabriele 2018: *Epidemiologische Methoden und Erkenntnisse als eine Grundlage für Stadtplanung und gesundheitsfördernde Stadtentwicklung*. In: Baumgart, Sabine; Köckler, Heike; Ritzinger, Anne; Rüdiger, Andrea (Hrsg.): *Planung für gesundheitsfördernde Städte*. Forschungsberichte der ARL, Bd. 8. Hannover: Akademie für Raumforschung und Landesplanung Leibniz-Forum für Raumwissenschaften, 118-134
- Bolte, Gabriele; Bunge, Christiane; Hornberg, Claudia; Köckler, Heike; Mielck, Andreas 2012: *Umweltgerechtigkeit durch Chancengleichheit bei Umwelt und Gesundheit: Eine Einführung in die Thematik und Zielsetzung*

- dieses Buches. In: Bolte, Gabriele; Bunge, Christiane; Hornberg, Claudia; Köckler, Heike; Mielck, Andreas (Hrsg.): Umweltgerechtigkeit: Chancengleichheit bei Umwelt und Gesundheit: Konzepte, Datenlage und Handlungsperspektiven. Verlag Hans Huber, Programmbereich Gesundheit. Bern: Verlag Hans Huber, 15-37
- Boltze, Manfred 1996: Verkehrsmanagement in Frankfurt am Main. Ergebnisse des Projektes FRUIT und Hemmnisse bei der Umsetzung. In: Zeitschrift für Verkehrssicherheit, 42: 16-23
- Boltze, Manfred 2015: Planung und Umsetzung von Strategien im dynamischen Verkehrsmanagement. Ringvorlesung „Kooperatives Verkehrsmanagement“. Braunschweig 2015
- Bonn, Boris; Schneidemesser, Erika von; Andrich, Dorota; Quedenau, Jörn; Gerwig, Holger; Lüdecke, Anja; Kura, Jürgen; Pietsch, Axel; Ehlers, Christian; Klemp, Dieter; Kofahl, Claudia; Nothard, Rainer; Kerschbaumer, Andreas; Junkermann, Wolfgang; Grote, Rüdiger; Pohl, Tobias; Weber, Konradin; Lode, Birgit; Schönberger, Philipp; Churkina, Galina; Butler, Tim M.; Lawrence, Mark G. 2016: BAERLIN2014 – the influence of land surface types on and the horizontal heterogeneity of air pollutant levels in Berlin. In: Atmospheric Chemistry and Physics, 12: 7785-7811
- Boogaard, Hanna; Borgman, Frank; Kamminga, Jaap; Hoek, Gerard 2009: Exposure to ultrafine and fine particles and noise during cycling and driving in 11 Dutch cities. In: Atmospheric Environment 43, 27: 4234-4242
- Bott, Helmut 2018: Das Quartier. In: Bott, Helmut; Grassl, Gregor C.; Anders, Stephan (Hrsg.): Nachhaltige Stadtplanung: Lebendige Quartiere - Smart cities - Resilienz. Edition DETAIL. München: Edition DETAIL, 21-24
- Bracke, D.; Reznik, G.; Mölleken, H.; Berteilt, W.; Schmidt, E. 2010: Einfluss von Straßenrandbegrünung auf die PM10-Belastung. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Band V204. Bergisch-Gladbach: Bundesanstalt für Straßenwesen
- Braubach, Matthias; Grant, Marcus 2010: Urban planning, environment and health: From evidence to policy action. Online verfügbar unter: http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0004/114448/E93987.pdf (zuletzt geprüft: 27.09.2021)
- Bräunling, Stefan; Böhm, Katharina; Köckler, Heike; Geene, Raimund 2020: Einleitung. In: Böhm, Katharina; Bräunling, Stefan; Geene, Raimund; Köckler, Heike (Hrsg.): Gesundheit als gesamtgesellschaftliche Aufgabe. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 1-14
- Bruse, M. 2003: Stadtgrün und Stadtklima. Wie sich Grünflächen auf das Mikroklima in Städten auswirken. In: Stadtklima, 28: 66-70
- Buchholz S. 2006: Einfluss meteorologischer und luftchemischer Parameter auf die NO₂-Immissionskonzentration am Beispiel von ausgewählten Luftmessstationen in Baden-Württemberg. Diplomarbeit. Trier (Fachbereich Geographie/Geowissenschaften)
- Bukow, Wolf-Dietrich; Yildiz, Erol 2020: Von einer synchronen Quartierentwicklung zur Mobilitätswende. In: Berding, Nina; Bukow, Wolf-Dietrich (Hrsg.): Die Zukunft gehört dem urbanen Quartier: Das Quartier als eine alles umfassende kleinste Einheit von Stadtgesellschaft. Wiesbaden: Springer VS, 183-200
- Bundesagentur für Arbeit (kein Datum): Pendleratlas (Datenstand Juni 2019). Online verfügbar unter: <https://statistik.arbeitsagentur.de/Navigation/Statistik/Statistische-Analysen/Interaktive-Visualisierung/Pendleratlas/Pendleratlas-Nav.html> (zuletzt geprüft: 21.02.2020)
- Bundesregierung 2021: Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie. Online verfügbar unter: <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/974430/1940716/6a4acf041217d39bac6a81cce971381f/2021-07-26-gsds-en-data.pdf?download=1> (zuletzt geprüft: 02.09.2021)
- Bunge, Christiane 2012: Potenziale für mehr Umweltgerechtigkeit - Handlungsfelder und Instrumente einer integrierten Strategie. In: Bolte, Gabriele; Bunge, Christiane; Hornberg, Claudia; Köckler, Heike; Mielck, Andreas (Hrsg.): Umweltgerechtigkeit: Chancengleichheit bei Umwelt und Gesundheit: Konzepte, Datenlage und Handlungsperspektiven. Verlag Hans Huber, Programmbereich Gesundheit. Bern: Verlag Hans Huber, 175-189
- Bunzel, Arno; Lorke, Vera; Rösler, Cornelia 2007: Berücksichtigung von Umwelt- und Gesundheitsbelangen in Planungsverfahren durch optimierte Zusammenarbeitsstrukturen zwischen Kreisen und kreisangehörigen Städten und Gemeinden: Aktionsprogramm Umwelt und Gesundheit Nordrhein-Westfalen. Online verfügbar unter:

<https://www.umwelt-und-gesundheit.nrw.de/fileadmin/redaktion/PDF-Dateien/Zusammenarbeitsstrukturen.pdf> (zuletzt geprüft: 27.09.2021)

Bürgerschaft Hamburg 2009: Drucksache 19/3652. Rahmenprogramm Integrierte Stadtteilentwicklung (RISE). Online verfügbar unter:

<http://www.hamburg.de/contentblob/3363156/f40934040d2f98c67f6175f1f8f07b76/data/download-drucksache-raahmenprogramm-rise.pdf> (zuletzt geprüft: 24.09.2021)

Burmeister, Klaus; Rodenhäuser, Ben 2016: Stadt als System: Trends und Herausforderungen für die Zukunft urbaner Räume. München: Oekom Verlag

Busse, Carl-Heinrich 1994: Vom Reißbrett in die Realität: Stadtplanung für eine gesündere Zukunft. In: Stumm, Brigitte; Trojan, Alf (Hrsg.): Gesundheit in der Stadt: Modelle - Erfahrungen - Perspektiven. Fischer Taschenbücher, Bd. 11193. Frankfurt am Main: Fischer-Taschenbuch-Verlag, 87-99

Carmichael, Laurence; Townshend, Tim G.; Fischer, Thomas B.; Lock, Karen; Petrokofsky, Carl; Sheppard, Adam; Sweeting, David; Ogilvie, Flora 2019: Urban planning as an enabler of urban health: Challenges and good practice in England following the 2012 planning and public health reforms. In: Land Use Policy, 84: 154-162

CEMHCM 2018: Hiện trạng chất lượng không khí tại thành phố hồ chí minh

Cerwenka, P. 1997: Anwendungsorientierte Ermittlung von Kraftstoffverbrauch und Schadstoffemissionen des Kraftfahrzeugverkehrs in Deutschland für die Neufassung der RAS-W (EWS). In: Straßenverkehrstechnik, 1: 17-25

Cho, Hee-Sun; Choi, Mack 2014: Effects of Compact Urban Development on Air Pollution: Empirical Evidence from Korea. In: Sustainability, 6, 9: 5968-5982

Claßen, Thomas; Heiler, Angela; Brei, Björn 2012: Urbane Grünräume und gesundheitliche Chancengleichheit - längst nicht alles im "grünen Bereich". In: Bolte, Gabriele; Bunge, Christiane; Hornberg, Claudia; Köckler, Heike; Mielck, Andreas (Hrsg.): Umweltgerechtigkeit: Chancengleichheit bei Umwelt und Gesundheit: Konzepte, Datenlage und Handlungsperspektiven. Verlag Hans Huber, Programmbereich Gesundheit. Bern: Verlag Hans Huber, 113-123

Clos, Joan; Surinach, Rosa 2019: Health, Sustainable Development Goals and the New Urban Agenda. In: Nieuwenhuijsen, Mark; Khreis, Haneen (Hrsg.): Integrating human health into urban and transport planning: A framework. Cham, Switzerland: Springer, 17-30

Coppel, Gero; Wüstemann, Henry 2017: The impact of urban green space on health in Berlin, Germany: Empirical findings and implications for urban planning. In: Landscape and Urban Planning, 167: 410-418

Dangschat, Jens S. 2020: Gesellschaftlicher Wandel, Raumbezug und Mobilität. In: Reutter, Ulrike; Holz-Rau, Christian; Albrecht, Janna; Hülz, Martina (Hrsg.): Wechselwirkungen von Mobilität und Raumentwicklung im Kontext gesellschaftlichen Wandels. Forschungsberichte der ARL, Bd. 14. Hannover: ARL - Akademie für Raumentwicklung in der Leibniz-Gemeinschaft, 32-75

Dauber, Gregory; Leclerc, Florian 2019: Fahrverbote frühestens ab 2021. Frankfurt Rundschau. Online verfügbar unter: <https://www.fr.de/frankfurt/frankfurt-diesel-fahrverbote-fruehestens-2021-13285889.html> (zuletzt geprüft: 27.09.2021)

de Nazelle, A.; Fruin, S.; Westerdahl, D.; Martinez, D.; Ripoll, A.; Kubesch, N.; Nieuwenhuijsen, M. 2012: A travel mode comparison of commuters' exposures to air pollutants in Barcelona. In: Atmospheric Environment, 59: 151-159

DGP (Deutsche Gesellschaft für Pneumologie und Beatmungsmedizin e.V.) 2018: Atmen: Luftschadstoffe und Gesundheit. Berlin

Deutsche Umwelthilfe e.V. 2021a: Deutsche Umwelthilfe e.V.: Feinstaub verpestet Ihre Luft! Online verfügbar unter: <https://www.duh.de/feinstaub/> (zuletzt geprüft: 15.09.2021)

Deutsche Umwelthilfe e.V. 2021b: Deutsche Umwelthilfe e.V.: Stickoxide. Online verfügbar unter: <https://www.duh.de/themen/luftqualitaet/schadstoffe/stickoxid/> (zuletzt geprüft: 15.09.2021)

Duden 2021: <https://www.duden.de/rechtschreibung/Verkehr> (zuletzt geprüft: 27.09.2021)

- Düring, I.; Lohmeyer, A.; Moldenhauer, A.; Knörr, W.; Kutzner, F.; Becker, U. J.; Richter, F.; Schmidt, W. 2008: Einfluss von Straßenzustand, meteorologischen Parametern und Fahrzeuggeschwindigkeit auf die PM_x-Belastung an Straßen. Band V174. Bergisch-Gladbach: Bundesanstalt für Straßenwesen
- Eckardt, Frank 2014: Stadtforschung: Gegenstand und Methoden. Wiesbaden: Springer VS
- Eitler, Thomas W.; McMahon, Edward; Thoerig, Theodore 2013: Ten principles for building healthy places. Washington, DC: Urban Land Institute
- Elkeles, Thomas; Broesskamp-Stone, Ursel 2015: Evidenzbasierte Gesundheitsförderung. Online verfügbar unter: <https://leitbegriffe.bzga.de/alphabetisches-verzeichnis/evidenzbasierte-gesundheitsfoerderung/> (zuletzt geprüft: 27.09.2021)
- Engler, Philip; Franke, Markus; Thiemann-Linden, Jörg 2020: Mehr Platz fürs Fahrrad: Reflexion aktueller Forderungen und Debatten. In: PlanerIn, 4: 14-16
- EU (Europäische Union) 2008: Richtlinie 2008/50/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Mai 2008 über Luftqualität und saubere Luft für Europa. Online verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0050&qid=1419250736800&from=DE> (zuletzt geprüft: 18.08.2021)
- EU (Europäische Union) 2020: Neue Leipzig Charta. Online verfügbar unter: https://www.bmi.bund.de/Shared-Docs/downloads/DE/veroeffentlichungen/2020/eu-rp/gemeinsame-erklarungen/neue-leipzig-charta-2020.pdf;jsessionid=BFDB31EE862E29B123862DEA85804391.2_cid373?__blob=publicationFile&v=6 (zuletzt geprüft: 27.09.2021)
- Fehr, Rainer; Hornberg, Claudia; Wichmann, Heinz-Erich 2012: Umwelt und Gesundheit. In: Hurrelmann, Klaus; Razum, Oliver 2012: Handbuch Gesundheitswissenschaften. Weinheim: Beltz, 573-608
- Fehr, Rainer; Hornberg, Claudia 2018a: Folgerungen und Ausblick. In: Fehr, Rainer; Hornberg, Claudia (Hrsg.): Stadt der Zukunft - gesund und nachhaltig: Brückenbau zwischen Disziplinen und Sektoren. Edition nachhaltige Gesundheit in Stadt und Region, Band 1. München: oekom, 335-351
- Fehr, Rainer; Hornberg, Claudia 2018b: Gesundheit: Definitionen und Blickwinkel. In: Fehr, Rainer; Hornberg, Claudia (Hrsg.): Stadt der Zukunft - gesund und nachhaltig: Brückenbau zwischen Disziplinen und Sektoren. Edition nachhaltige Gesundheit in Stadt und Region, Band 1. München: oekom, 55-76
- Fehr, Rainer; Hornberg, Claudia 2018c: Nachhaltige StadtGesundheit als "Blickfelderweiterung" und "Brückenbau". In: Fehr, Rainer; Hornberg, Claudia (Hrsg.): Stadt der Zukunft - gesund und nachhaltig: Brückenbau zwischen Disziplinen und Sektoren. Edition nachhaltige Gesundheit in Stadt und Region, Bd. Band 1. München: oekom, 131-167
- Fehr, Rainer; Hornberg, Claudia 2018d: Nachhaltige StadtGesundheit: Bearbeitungsmotive und Konzeptelemente. In: Fehr, Rainer; Hornberg, Claudia (Hrsg.): Stadt der Zukunft - gesund und nachhaltig: Brückenbau zwischen Disziplinen und Sektoren. Edition nachhaltige Gesundheit in Stadt und Region, Band 1. München: oekom, 97-130
- Fehr, Rainer; Hornberg, Claudia 2018e: Urbanisierung und Nachhaltigkeit in humanökologischer Perspektive. In: Fehr, Rainer; Hornberg, Claudia (Hrsg.): Stadt der Zukunft - gesund und nachhaltig: Brückenbau zwischen Disziplinen und Sektoren. Edition nachhaltige Gesundheit in Stadt und Region, Band 1. München: oekom, 11-31
- Fehr, Rainer; Neus, Hermann; Heudorf, Ursel 2005: Fachliche Einführung. In: Fehr, Rainer; Neus, Hermann; Heudorf, Ursel (Hrsg.): Gesundheit und Umwelt: Ökologische Prävention und Gesundheitsförderung. Bern: Hans Huber, 13-22
- Ferreira, António 2019: (Un)healthy Bodies and the Transport Planning Profession: The (Im)mobile Social Construction of Reality and Its Consequences. In: Nieuwenhuijsen, Mark; Khreis, Haneen (Hrsg.): Integrating human health into urban and transport planning: A framework. Cham, Switzerland: Springer, 325-344
- FGSV (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen) 2008: Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen. Ausgabe 2006. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. Köln

- FGSV (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen) 2018: Hinweise zu Energie, luftbezogenen Emissionen und Immissionen im Straßenverkehr. Ausgabe 2018. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. Köln
- Flassak, T.; Bächlin, W.; Böisinger, R.; Blazek, R.; Schädler, G.; Lohmeyer, A. 1996: Einfluss der Eingangsparameter auf berechnete Immissionswerte für Kfz-Abgase: Sensitivitätsanalyse. Karlsruhe: Forschungszentrum Karlsruhe
- Franzkowiak, Peter 2015: Gesundheitswissenschaften / Public Health. Online verfügbar unter: <https://leitbegriffe.bzga.de/alphabetisches-verzeichnis/gesundheitswissenschaften-public-health/> (zuletzt geprüft: 27.09.2021)
- Fraport AG (kein Datum). Verkehrszahlen. Online verfügbar unter: <https://www.fraport.com/de/konzern/ueber-uns/zahlen--daten-und-fakten1.html> (zuletzt geprüft: 03.02.2020)
- Friedrichs, Jürgen 2018: Stadtentwicklung. In: ARL (Akademie für Raumforschung und Landesplanung) (Hrsg.): Handwörterbuch der Stadt- und Raumentwicklung. Hannover, 2421-2433
- Garben, M.; Lehming, B. 1992: KFZ-Belastbarkeitsstudie der Berliner Innenstadt : Kurzfassung: Luft- und Lärmbelastung, Zusammenstellung des Berliner Luftgüte-Messnetzes (BLUME) mit Stichprobenmessungen der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umweltschutz und des Technischen Überwachungsvereins Berlin-Brandenburg. Berlin: Kulturbuch-Verlag
- Gehl, Jan 2015: Städte für Menschen. 4. Auflage. Berlin: Jovis
- Gerlinger, Thomas 2018: Präventionsgesetz. Online verfügbar unter: <https://leitbegriffe.bzga.de/alphabetisches-verzeichnis/praeventionsgesetz/> (zuletzt geprüft: 27.09.2021)
- Gertz, Carsten 2020: Umsetzung einer integrierten Raum- und Verkehrsplanung und -politik. In: Reutter, Ulrike; Holz-Rau, Christian; Albrecht, Janna; Hülz, Martina (Hrsg.): Wechselwirkungen von Mobilität und Raumentwicklung im Kontext gesellschaftlichen Wandels. Forschungsberichte der ARL, Bd. 14. Hannover: ARL - Akademie für Raumentwicklung in der Leibniz-Gemeinschaft, 366-379
- Gertz, Carsten; Holz-Rau, Christian 2020: Ziele, Strategien und Maßnahmen einer integrierten Verkehrsplanung – Planungsverständnis des Arbeitskreises. In: Reutter, Ulrike; Holz-Rau, Christian; Albrecht, Janna; Hülz, Martina (Hrsg.): Wechselwirkungen von Mobilität und Raumentwicklung im Kontext gesellschaftlichen Wandels, 18-31
- Gertz, Carsten 2021a: Planungsgrundlagen. In Vallée, Dirk; Engel, Barbara; Vogt, Walter: Stadtverkehrsplanung Band 1. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1-45
- Gertz, Carsten 2021b: Verkehrsplanung. In Gertz, Carsten (Hrsg.): Verkehrsplanung, Bau und Betrieb von Verkehrsanlagen. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 1-21
- GG (Grundgesetz für die Bundesrepublik Deutschland) in der im Bundesgesetzblatt Teil III, Gliederungsnummer 100-1, veröffentlichten bereinigten Fassung, zuletzt geändert durch Artikel 1 und 2 Satz 2 des Gesetzes vom 29.09.2020 (BGBl. I S. 2048)
- Giebel, J. 1996: Ausbreitung von Kft-Emissionen. In: Dreyhaupt, F.J. (Hrsg.): VDI-Taschenlexikon Immissionsschutz. Düsseldorf
- Giffinger, Rudolf; Haindlmaier, Gudrun 2015: Smart City: Innovationspotenziale für eine wettbewerbsfähige und nachhaltige Stadtentwicklung? In: Fritz, Judith; Tomaschek, Nino (Hrsg.): Die Stadt der Zukunft: Aktuelle Trends und zukünftige Herausforderungen. University - society - industry, Band 4. Münster, New York: Waxmann, 137-152
- Giles-Corti, Billie; Vernez-Moudon, Anne; Reis, Rodrigo; Turrell, Gavin; Dannenberg, Andrew L.; Badland, Hannah; Foster, Sarah; Lowe, Melanie; Sallis, James F.; Stevenson, Mark; Owen, Neville 2016: City planning and population health: a global challenge. In: The Lancet, 388, 10062: 2912-2924
- Goenka, Shifalika; Andersen, Lars Bo 2016: Urban design and transport to promote healthy lives. In: The Lancet, 388, 10062: 2851-2853

- Göpel, Eberhard 2012: Internationale Leitlinien und Konzepte für Gesundheit und Stadtentwicklung. In: Böhme, Christa; Kliemke, Christa; Reimann, Bettina; Süß, Waldemar (Hrsg.): Handbuch Stadtplanung und Gesundheit. Bern: Verlag Hans Huber, 49-58
- Gorbachevskaya O.; Schreiter, H.; Kappis, C. 2007: Wissenschaftlicher Erkenntnisstand über das Feinstaubfilterungspotenzial von Pflanzen (qualitativ und quantitativ). Berlin: Institut für Agrar- und Stadtökologische Projekte
- Grant, Marcus 2019: Planning for Healthy Cities. In: Nieuwenhuijsen, Mark; Khreis, Haneen (Hrsg.): Integrating human health into urban and transport planning: A framework. Cham, Switzerland: Springer, 221-250
- Grimm Aerosol Technik: Tragbares Aerosolspektrometer MODELL 11-D
- Gromke, C.; Ruck, B. 2007: Influence of trees on the dispersion of pollutants in an urban street canyon—Experimental investigation of the flow and concentration field. In: Atmospheric Environment, 41: 3287-3302
- Gromke, Christof 2009: Einfluss von Bäumen auf die Durchlüftung von innerstädtischen Straßenschluchten. Online verfügbar unter: <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000010154/688205> (zuletzt geprüft: 27.09.2021)
- Grunert, Dustin; Schmitt, Angelina 2017: Feinstaub und Stickoxide: Gefährdung nicht unterschätzen. In: Deutsches Ärzteblatt Online. Online verfügbar unter: <https://www.aerzteblatt.de/archiv/195373/Feinstaub-und-Stickoxide-Gefaehrdung-nicht-unterschaetzen> (zuletzt geprüft: 07.01.2022)
- Hassani, A.; Hosseini, V. 2016: An assessment of gasoline motorcycle emissions performance and understanding their contribution to Tehran air pollution. In: Transportation Research Part D: Transport and Environment, 47: 1-12
- Heller, S.; Köhler, M.; Schniering, A. 2005: Ergänzung der Bewertung des Straßenzustandes freier Stecken um eine gleichwertige Bewertung von Ortsdurchfahrten von Bundesstraßen. Forschungsberichte aus dem Forschungsprogramm des BMV, Bau- und Wohnungswesen und der FGSV e.V., Heft 909/2005
- Hessen Mobil (kein Datum): 60 Jahre Frankfurter Kreuz. Online verfügbar unter: <https://mobil.hessen.de/ueber-uns/60-jahre-frankfurter-kreuz> (zuletzt geprüft: 09.03.2020)
- HLNUG (Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie) 2017: Feinstaub PM10. Online verfügbar unter: https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/luft/faltblaetter/PM10_2017_Web.pdf (zuletzt geprüft: 21.07.2021)
- HLNUG (Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie) 2021a: Luftschadstoffe | Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie. Online verfügbar unter: <https://www.hlnug.de/themen/luft/luftqualitaet/luftschadstoffe> (zuletzt geprüft: 08.09.2021)
- HLNUG (Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie) 2021b: Messwerte Luftschadstoffe. Online verfügbar unter: <https://www.hlnug.de/messwerte/luft> (zuletzt geprüft: 08.09.2021)
- Ho, Q. B.; Vu, H. N. K.; Nguyen, T. T.; Nguyen, T. T. H. 2020: Traffic air emission inventory and measures to reduce air pollution in Ho Chi Minh City, Vietnam. In: Journal of Urban Environment, 38: 29-38
- Hoffmann, Barbara 2019: Air Pollution in Cities: Urban and Transport Planning Determinants and Health in Cities. In: Nieuwenhuijsen, Mark; Khreis, Haneen (Hrsg.): Integrating human health into urban and transport planning: A framework. Cham, Switzerland: Springer, 425-441
- Holz-Rau, Christian; Scheiner, Joachim 2020: Raum und Verkehr – ein Feld komplexer Wirkungsbeziehungen. Können Interventionen in die gebaute Umwelt klimawirksame Verkehrsemissionen wirklich senken? In: Reuter, Ulrike; Holz-Rau, Christian; Albrecht, Janna; Hülz, Martina (Hrsg.): Wechselwirkungen von Mobilität und Raumentwicklung im Kontext gesellschaftlichen Wandels. Forschungsberichte der ARL, Bd. 14. Hannover: ARL - Akademie für Raumentwicklung in der Leibniz-Gemeinschaft, 76-101
- Hopfner, Karin; Zakrzewski, Philipp 2012: Nachhaltige Quartiersentwicklung im Bestand: Zur Übertragbarkeit von Konzepten nachhaltiger Stadtentwicklung auf Bestandsquartiere. In: Drilling, Matthias; Schnur, Olaf (Hrsg.): Nachhaltige Quartiersentwicklung: Positionen, Praxisbeispiele und Perspektiven. VS Research. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften/Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH Wiesbaden, 45-67

- Hornberg, Claudia; Liebig-Gonglach, Michael; Pauli, Andrea 2018: Gesundheitsförderung - Ein Konzept und seine Entwicklung in Deutschland. In: Baumgart, Sabine; Köckler, Heike; Ritzinger, Anne; Rüdiger, Andrea (Hrsg.): Planung für gesundheitsfördernde Städte. Forschungsberichte der ARL, Bd. 8. Hannover: Akademie für Raumforschung und Landesplanung Leibniz-Forum für Raumwissenschaften, 37-58
- Hornberg, Claudia; Pauli, Andrea 2012: Soziale Ungleichheit in der umweltbezogenen Gesundheit als Herausforderung für Stadtplanung. In: Böhme, Christa; Kliemke, Christa; Reimann, Bettina; Süß, Waldemar (Hrsg.): Handbuch Stadtplanung und Gesundheit. Bern: Verlag Hans Huber, 129-138
- Huang, J.; Deng, F.; Wu, S.; Guo, X. 2012: Comparisons of personal exposure to PM_{2.5} and CO by different commuting modes in Beijing, China. In: Science of the Total Environment, 425: 52–59
- Huong Giang, N. T.; Kim Oanh, N. T. 2014: Roadside levels and traffic emission rates of PM_{2.5} and BTEX in Ho Chi Minh City, Vietnam. In: Atmospheric Environment, 94: 806-816
- Hurrelmann, Klaus; Franzkowiak, Peter 2015: Gesundheit. Online verfügbar unter: <https://leitbe-griffe.bzga.de/alphabetisches-verzeichnis/gesundheit/> (zuletzt geprüft: 27.09.2021)
- Infras 2019: Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs 4.1. HBEFA. Bern
- Initiative PERFORM Zukunftsregion Frankfurt/Rhein/Main 2018: Stau- und Pendlerstudie 2018. Frankfurt am Main.
- Int Panis, L.; de Geus, B.; Vandenbulcke, G.; Willems, H.; Degraeuwe, B.; Bleux, N.; Meeusen, R. 2010: Exposure to particulate matter in traffic: A comparison of cyclists and car passengers. In: Atmospheric Environment, 44, 19: 2263-2270
- Jian, L.; Zhao, Y.; Zhu, Y.-P.; Zhang; M.-B.; Bertolatti, D. 2012: An application of arima model to predict sub-micron particle concentrations from meteorological factors at a busy roadside in Hangzhou, China. In: Science of the Total Environment 426: 336–345
- Kälker, Tobias 2020: Methoden zur quantitativen Untersuchung des Einflusses von Straßenraumtypen auf die Belastungsintensität durch Luftschadstoffe. Unveröffentlichte Masterarbeit. Darmstadt
- Kaltenbrunner, Robert; Jakubowski, Peter 2018: Die Stadt der Zukunft: Wie wir leben wollen. Berlin: Aufbau
- Kagerbauer, Martin 2021: Multimodalität. In: Vallée, Dirk; Engel, Barbara; Vogt, Walter: Stadtverkehrsplanung Band 1. Berlin, Heidelberg: Springer, 179-197
- Kaminski, U. 2005: Minderung von Feinstaub in der Luft: Was können Dieselfilter beitragen? In: Global Atmosphere Watch: Brief des Deutschen Wetterdienstes, Nr. 28. Meteorologisches Observatorium Hohenpeißenberg
- Kantamaneni, R.; Adams, G.; Bamesberger, L.; Allwine, E.; Westberg, H.; Lamb, B.; Claiborn, C. 1996: The measurement of roadway PM₁₀ emission rates using atmospheric tracer ratio techniques. In: Atmospheric Environment, 30: 4209-4223
- Kappis, C.; Endlicher, W. 2007: Studie zum wissenschaftlichen Erkenntnisstand über das Feinstaubfilterungspotential (Qualitativ und Quantitativ) von Pflanzen. Berlin: Institut für Agrar- und Stadtökologische Projekte
- Karanasiou, Angeliki; Viana, Mar; Querol, Xavier; Moreno, Teresa; Leeuw, Frank de 2014: Assessment of personal exposure to particulate air pollution during commuting in European cities- recommendations and policy implications. In: The Science of the total environment, 490: 785-797
- Kastner-Klein, P. 1999: Experimentelle Untersuchung der strömungs-mechanischen Transportvorgänge in Straßenschluchten. Dissertation. Karlsruhe: Technische Hochschule, Institut für Hydromechanik
- Kayes I.; Shahriar, S.A.; Hasan, K.; Akhter, M.; Kabir, M.M.; Salam, M.A. 2019: The relationships between meteorological parameters and air pollutants in an urban environment. In: Global Journal of Environmental Science and Management, 3: 265-278
- Keller, M.; Heldstab, J. 1995: Luftschadstoff-Emissionen des Strassenverkehrs: 1950-2010. Dokumentationsdienst, BUWAL. Bern

- Khreis, Haneen; Sudmant, Andrew; Gouldson, Andy; Nieuwenhuijsen, Mark 2019: Transport Policy Measures for Climate Change as Drivers for Health in Cities. In: Nieuwenhuijsen, Mark; Khreis, Haneen (Hrsg.): Integrating human health into urban and transport planning: A framework. Cham, Switzerland: Springer, 583-608
- Kim Oanh, N. T.; Thuy Phuong, M. T.; Permadi, D. A. 2012: Analysis of motorcycle fleet in Hanoi for estimation of air pollution emission and climate mitigation co-benefit of technology implementation. *Atmospheric Environment*, 59; 438-448
- Kipsch, Frieso 2014: Systematische Windkanaluntersuchungen zur Charakterisierung des Einflusses der urbanen Bebauungsstruktur hinsichtlich der Stadtdurchlüftung. Hamburg: Staats- und Universitätsbibliothek Hamburg
- Kistemann, Thomas; Ritzinger, Anne 2018: Leitbilder einer gesundheitsfördernden Stadtenwicklung. In: Baumgart, Sabine; Köckler, Heike; Ritzinger, Anne; Rüdiger, Andrea (Hrsg.): Planung für gesundheitsfördernde Städte. Forschungsberichte der ARL, Bd. 8. Hannover: Akademie für Raumforschung und Landesplanung Leibniz-Forum für Raumwissenschaften, 59-69
- Klingner, M.; Sähn, E.; Anke, K.; Holst, T.; Rost, J.; Mayer, H.; Ahrens, D. 2006: Reduktionspotenziale verkehrsbeschränkender Maßnahmen in Bezug zu meteorologisch bedingten Schwankungen der PM10- und NO_x-Immissionen. In: *Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft*, H. 7-8: 326-334
- Knieling, Jörg; Kretschmann, Nancy 2016: Nachhaltige Stadtentwicklung im 21. Jahrhundert - klimaangepasst, smart, postfossil? In: Freeden, Willi; Rummel, Reiner (Hrsg.): *Handbuch der Geodäsie*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1-45
- Knieling, Jörg; Kretschmann, Nancy 2018: Stadtplanung und Gesundheit. In: Fehr, Rainer; Hornberg, Claudia (Hrsg.): *Stadt der Zukunft - gesund und nachhaltig: Brückenbau zwischen Disziplinen und Sektoren*. Edition nachhaltige Gesundheit in Stadt und Region, Band 1. München: oekom, 201-220
- Köckler, Heike 2017: Umweltbezogene Gerechtigkeit: Anforderungen an eine zukunftsweisende Stadtplanung. *Stadtentwicklung Urban development*, Bd. Band 2. Frankfurt am Main: PL Academic Research
- Köckler, Heike; Fehr, Rainer 2018: Health in All Policies: Gesundheit als integrales Thema von Stadtplanung und -entwicklung. In: Baumgart, Sabine; Köckler, Heike; Ritzinger, Anne; Rüdiger, Andrea (Hrsg.): Planung für gesundheitsfördernde Städte. Forschungsberichte der ARL, Bd. 8. Hannover: Akademie für Raumforschung und Landesplanung Leibniz-Forum für Raumwissenschaften, 70-86
- Kohoutek, Sven 2011: Quantifizierung der Wirkungen des Straßenverkehrs auf Partikel- und Stickoxid-Immissionen. Dissertation. Darmstadt (Technische Universität, Institut für Verkehrsplanung)
- Kries, Anja; Luick, Rainer; Megerle, Heidi Elisabeth 2018: Stadtgrün und Gesundheit in der Stadtplanung: Ursachen der oft unzureichenden Berücksichtigung von Stadtgrün in Abwägungsprozessen. In: *PlanerIn*, H. 5: 8-11
- Kühling, Wilfried; Kawe, Christiane 2018: Berücksichtigung von Mehrfachbelastungen bei der planerischen Abwägung. In: Baumgart, Sabine; Köckler, Heike; Ritzinger, Anne; Rüdiger, Andrea (Hrsg.): Planung für gesundheitsfördernde Städte. Forschungsberichte der ARL, Bd. 8. Hannover: Akademie für Raumforschung und Landesplanung Leibniz-Forum für Raumwissenschaften, 268-280
- Kühn, Erich 1957: Erste städtebauliche Hilfestellung. In: Vogler, Paul; Kühn, Erich (Hrsg.): *Medizin und Städtebau: Ein Handbuch für gesundheitlichen Städtebau*. München, Wien, Berlin: Verlag von Urban & Schwarzenberg, 562-566
- Kuttler, Wilhelm 1998: Stadtklima. In: Sukopp, Herbert; Wittig, Rüdiger (Hrsg.): *Stadtökologie: Ein Fachbuch für Studium und Praxis*. Stuttgart, Jena, Lübeck, Ulm: G. Fischer Verlag, 125-167
- Lamker, Christian; Rüdiger, Andrea 2018: Einflussfaktoren auf kommunales Planungshandeln - Ansatzpunkte zum verbesserten Umgang mit schleichenden Gesundheitsrisiken. In: Baumgart, Sabine; Köckler, Heike; Ritzinger, Anne; Rüdiger, Andrea (Hrsg.): Planung für gesundheitsfördernde Städte. Forschungsberichte der ARL, Bd. 8. Hannover: Akademie für Raumforschung und Landesplanung Leibniz-Forum für Raumwissenschaften, 402-421
- Langner, M. 2006: Exponierter innerstädtischer Spitzahorn (*Acer platanoides*) - eine effiziente Senke für pm10? Dissertation. Karlsruhe (Institut für Geographie und Geoökologie)

LANUV (Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW) 2011: Handbuch Stadtklima: Maßnahmen und Handlungskonzepte für Städte und Ballungsräume zur Anpassung an den Klimawandel. Langfassung. Online verfügbar unter: <https://e-pflicht.ub.uni-duesseldorf.de/download/pdf/80418?originalFilename=true> (zuletzt geprüft: 27.09.2021)

Last, John M. 1995: A dictionary of epidemiology. New York: Oxford University Press

Leisen, P. 1978: Abgasimmissionsbelastungen durch den Kraftfahrzeugverkehr in Ballungsgebieten und im Nahbereich verkehrsreicher Strassen: Kolloquiumsbericht. TÜV Rheinland. Köln: Verlag TÜV Rheinland

Lenz, Babara; Nobis, Claudia; Eisenmann, Christine 2020: Wie wirkt sich die Krise auf das Mobilitätsverhalten aus? In: Informationen zur Raumentwicklung, 4: 96-105

LIGA.NRW (Landesinstitut für Gesundheit und Arbeit des Landes Nordrhein-Westfalen) 2011: Vorarbeiten zum lokalen Fachplan Gesundheit. LIGA.Praxis, Nr. 9. Düsseldorf. Online verfügbar unter: http://www.lzg.gc.nrw.de/_media/pdf/liga-praxis/Fachplan_Gesundheit_Exzerpt.pdf (zuletzt geprüft: 27.09.2021)

Linden, Susanne; Töppich, Jürgen 2016: Health Impact Assessment (HIA) / Gesundheitsverträglichkeitsprüfung. Online verfügbar unter: <https://leitbegriffe.bzga.de/alphabetisches-verzeichnis/health-impact-assessment-hia-gesundheitsfolgenabschaetzung-gfa/> (zuletzt geprüft: 27.09.2021)

Löhr, Rolf-Peter 2012: Das Recht der kommunalen Bauleitplanung und gesundheitliche Belange. In: Böhme, Christa; Kliemke, Christa; Reimann, Bettina; Süß, Waldemar (Hrsg.): Handbuch Stadtplanung und Gesundheit. Bern: Verlag Hans Huber, 37-48

Lohmeyer, A.; Düring, I.; Nitzsche, E.; Moldenhauer, A.; Stockhause, M. 2004: Berechnung der Kfz-bedingten Feinstaubemissionen infolge Aufwirbelung und Abrieb für das Emissionskataster Sachsen. Arbeitspakete 1 und 2. Dresden: Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie

Lopez, Russell 2012: The built environment and public health. San Francisco: Jossey-Bass/Wiley

Louis, Hans Walter 2019: Raumrelevantes Umweltrecht. In: Zilch, Konrad; Diederichs, Claus Jürgen; Beckmann, Klaus J.; Gertz, Carsten; Malkwitz, Alexander; Moormann, Christian; Urban, Wilhelm; Valentin, Franz (Hrsg.): Handbuch für Bauingenieure: Technik, Organisation und Wirtschaftlichkeit. Handbuch für Bauingenieure. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden; Springer Vieweg, 1-28

LUBW (Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg) 2021: Relevante Luftschadstoffe. Online verfügbar unter: <https://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/luft/relevante-luftschadstoffe> (zuletzt geprüft: 21.07.2021)

Malberg, H. 2007: Meteorologie und Klimatologie. Eine Einführung. 5. Auflage. Berlin: Springer Verlag

Martins, Helena; Miranda, Ana; Borrego, Carlos 2012: Urban Structure and Air Quality. In: Haryanto, Budi (Hrsg.): Air Pollution - A Comprehensive Perspective, 27-72

Merbitz, Hendrik 2013: Untersuchung und Modellierung der raumzeitlichen Variabilität urbaner und regionaler Feinstaubkonzentrationen. Online verfügbar unter: <http://publications.rwth-aachen.de/record/229273/files/4724.pdf> (zuletzt geprüft: 27.09.2021)

Merbitz, Hendrik; Schneider, Christoph 2012: Stadtplanung und Luftreinhaltung. In: Böhme, Christa; Kliemke, Christa; Reimann, Bettina; Süß, Waldemar (Hrsg.): Handbuch Stadtplanung und Gesundheit. Bern: Verlag Hans Huber, 139-150

Mertens, Indra 2010: Gesundheitsfördernde Stadtteilentwicklung: Akteure, Programme, Vernetzung - Praxisanalyse in einem Sanierungsgebiet in München. Dortmunder Beiträge zur Raumplanung, Bd. 134. 1. Aufl. Dortmund: Institut für Raumplanung (IRPUD)

Meszler, D. 2007: Air Emissions Issues Related to Two- and Three-Wheeled Motor Vehicles. International Council on Clean Transportation

Minh-Chau, Tran; Kessl, Fabian; Moebus, Susanne; Schmidt, Alexander 2010: Gesunde Stadt? Eine interdisziplinäre Perspektive auf gesundheitliche Einflüsse in Essener Stadtteilen: Paper internationale Tagung REAL-CORP. 18.-20.05.10. Wien

MONRE 2016: BÁO CÁO HIỆN TRẠNG MÔI TRƯỜNG QUỐC GIA 2016 CHUYÊN ĐỀ: MÔI TRƯỜNG ĐÔ THỊ

MOT (Ministry of Transport) 2017: Báo cáo đề án: Tăng cường vận tải hành khách công cộng kết hợp kiểm soát sử dụng phương tiện cá nhân tham gia giao thông nhằm giảm ùn tắc giao thông và ô nhiễm trên địa bàn thành phố HCM. Ho Chi Minh City

MVI BW (Ministerium für Verkehr und Infrastruktur Baden-Württemberg) 2012: Städtebauliche Klimafibel: Hinweise für die Bauleitplanung. Online verfügbar unter: <https://www.staedtebauliche-klimafibel.de/pdf/Klimafibel-2012.pdf> (zuletzt geprüft: 27.09.2021)

Mueller, Natalie; Rojas-Rueda, David; Basagaña, Xavier; Cirach, Marta; Cole-Hunter, Tom; Dadvand, Payam; Donaire-Gonzalez, David; Foraster, Maria; Gascon, Mireia; Martinez, David; Tonne, Cathryn; Triguero-Mas, Margarita; Valentín, Antònia; Nieuwenhuijsen, Mark 2017: Urban and Transport Planning Related Exposures and Mortality: A Health Impact Assessment for Cities. In: *Environmental health perspectives*, 125, 1: 89–96

Müller-Lang, Joachim 2020: Verschärft schmutzige Luft das Pandemie-Desaster? In: *Frankfurter Allgemeine Zeitung* vom 17.04.2020

Naneos Particle Solutions GmbH 2016: Partector 2 Aerosol Dosimeter Operation Manual. Online verfügbar unter: https://www.naneos.ch/pdf/naneos_partector2_operation_manual.pdf (zuletzt geprüft: 27.09.2021)

Neuhaus, Birgit 2002: Die Gesunde-Städte-Bewegung in Europa. In: Geene, Raimund; Graubner, Sebastian; Papies-Winkler, Ingrid; Stender, Klaus-Peter 2002: *Gesundheit - Umwelt - Stadtentwicklung: Netzwerke für Lebensqualität*. Berlin: b_books, 40-45

Nguyen, T. H.; Tang, H. K.; Kelly, P.; Van Der Ploeg, H. P.; Dibley, M. J. 2010: Association between physical activity and metabolic syndrome: A cross sectional survey in adolescents in Ho Chi Minh City, Vietnam. *BMC Public Health*, 10

Nieuwenhuijsen, M.J.; Schenker, M.B. 1998: Determinants of personal dust exposure during field crop operations in California agriculture. In: *American Industrial Hygiene Association Journal*, 59: 9-13

Nieuwenhuijsen, Mark; Khreis, Haneen 2019: Urban and Transport Planning, Environment and Health. In: Nieuwenhuijsen, Mark; Khreis, Haneen (Hrsg.): *Integrating human health into urban and transport planning: A framework*. Cham, Switzerland: Springer, 3-16

Noack, R. Horst 1996: Public Health, Salutogenese und Gesundheitsförderung. In: Lobnig, Hubert 1996: *Gesundheitsförderung in Settings: Gemeinde, Betrieb, Schule und Krankenhaus: Eine österreichische Forschungsbilanz*. Reihe Gesundheitswissenschaften, Gesundheitsförderung, Bd. Bd. 2. Wien: Facultas-Univ.-Verl, 26-38

Nobis, Claudia; Kuhnimhof, Tobias 2018: Mobilität in Deutschland - MiD Ergebnisbericht. Studie von infas, DLR, IVT und infas 360 im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (FE-Nr. 70.904/15). Online verfügbar unter: http://www.mobilitaet-in-deutschland.de/pdf/MiD2017_Ergebnisbericht.pdf (zuletzt geprüft: 27.09.2021)

Nowacki, Julia; Mekel, Odile 2012: Health Impact Assessment und Umweltgerechtigkeit. In: Bolte, Gabriele; Bunge, Christiane; Hornberg, Claudia; Köckler, Heike; Mielck, Andreas (Hrsg.): *Umweltgerechtigkeit: Chancengleichheit bei Umwelt und Gesundheit: Konzepte, Datenlage und Handlungsperspektiven*. Verlag Hans Huber, Programmbereich Gesundheit. Bern: Verlag Hans Huber, 283-293

NSW Department of Health 2020: Healthy built environment checklist. Online verfügbar unter: <https://www.health.nsw.gov.au/urbanhealth/Publications/healthy-built-enviro-check.pdf> (zuletzt geprüft: 27.09.2021)

Pahl-Weber, Elke; Schwartze, Frank 2018: Stadtplanung. In: ARL (Akademie für Raumforschung und Landesplanung) (Hrsg.): *Handwörterbuch der Stadt- und Raumentwicklung*. Hannover, 2509-2520

Peters, J.; Van den Bossche, J.; Reggente, M.; Van Poppel, M.; De Baets, B.; Theunis, J. 2014: Cyclist exposure to UFP and BC on urban routes in Antwerp, Belgium. In: *Atmospheric Environment*, 92: 31-43

Polinna, Cordelia 2021: Wohin nur mit dem ganzen Verkehr?: Hauptstraßen als Bühne der Verkehrswende - ein Blick nach Berlin. In: *vhw FWS*, 3: 131-134

Predrag, I.; Zoran, P.; Gotovac-Atlagic, S. 2019: Effects of meteorological variables on nitrogen dioxide variation. In: *Archives for Technical Sciences*, 20: 65-72

PSO.HCMC. 2020: *Thực trạng dân số thành phố Hồ Chí Minh*

- Pugh, Thomas A. M.; Mackenzie, A. Robert; Whyatt, J. Duncan; Hewitt, C. Nicholas 2012: Effectiveness of green infrastructure for improvement of air quality in urban street canyons. In: *Environmental science & technology*, 46, 14: 7692-7699
- Ragetti, Martina S.; Corradi, Elisabetta; Braun-Fahrlander, Charlotte; Schindler, Christian; Nazelle, Audrey de; Jerrett, Michael 2013: Commuter exposure to ultrafine particles in different urban locations, transportation modes and routes. In: *Atmospheric Environment*, 77: 376-384
- Randelhoff, Martin 2015: Stadtplaner Jan Gehl über die gesunde Stadt » Zukunft Mobilität.: <https://www.zukunft-mobilitaet.net/101043/umwelt/jan-gehl-stadtplanung-verkehr-ideal-menschen/> (zuletzt geprüft: 31.01.2020)
- Rauland, Horst; Böhme, Christa; Köckler, Heike 2018: Das Präventionsgesetz und seine Potenziale für eine gesundheitsfördernde Stadtentwicklung. In: Baumgart, Sabine; Köckler, Heike; Ritzinger, Anne; Rüdiger, Andrea (Hrsg.): *Planung für gesundheitsfördernde Städte*. Forschungsberichte der ARL, Bd. 8. Hannover: Akademie für Raumforschung und Landesplanung Leibniz-Forum für Raumwissenschaften, 238-251
- Regionalverband FrankfurtRheinMain. (06 2019). Regionales Monitoring 2019 - Daten und Fakten zum Regionalverband FrankfurtRheinMain. Online verfügbar unter: https://www.region-frankfurt.de/media/custom/3255_44_1.PDF?1565006922 (zuletzt geprüft: 20.01.2020)
- Reicher, Christa 2017: *Städtebauliches Entwerfen*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden
- Renner, Pascal 2020: *Autofreie Großstadt – Am Beispiel Frankfurt a.M.* Unveröffentlichte Masterarbeit. Darmstadt
- Reuning, Arndt 2020: Wie Luftverschmutzung die Sterblichkeit durch COVID-19 erhöht. In: Deutschlandradio vom 06.11.2020. Abgerufen von https://www.deutschlandfunk.de/feinstaubbelastung-wie-luftverschmutzung-die-sterblichkeit.676.de.html?dram:article_id=487063 (zuletzt geprüft: 08.11.2020)
- Rhein-Main-Verkehrsverbund GmbH 2019: *Busse und Bahnen Kompakt 2020*. Online verfügbar unter: https://www.rmv.de/c/fileadmin/ln/traffiq/Dokumente/Infomaterial/RMVFrankfurt_Busse_und_Bahnen_Kompakt_2020.pdf (zuletzt geprüft: 09.03.2020)
- Riley, Rosie; Nazelle, Audrey de 2019: Barriers and Enablers of Integrating Health Evidence into Transport and Urban Planning and Decision Making. In: Nieuwenhuijsen, Mark; Khreis, Haneen (Hrsg.): *Integrating human health into urban and transport planning: A framework*. Cham, Switzerland: Springer, 641-654
- Rodenstein, Marianne 1988: "Mehr Licht, mehr Luft": Gesundheitskonzepte im Städtebau seit 1750. Zugl.: Berlin, Techn. Univ., Habil.-Schr. Frankfurt: Campus Verlag
- Rojas-Rueda, David; Nazelle, Audrey de; Tainio, Marko; Nieuwenhuijsen, Mark J. 2011: The health risks and benefits of cycling in urban environments compared with car use: health impact assessment study. In: *BMJ (Clinical research ed.)* 343
- Rojas-Rueda, D.; Nazelle, A. de; Teixidó, O.; Nieuwenhuijsen, M. J. 2012: Replacing car trips by increasing bike and public transport in the greater Barcelona metropolitan area: a health impact assessment study. In: *Environment international* 49: 100-109
- Rüdiger, Andrea; Baumgart, Sabine 2016: Planungsinstrumente für eine gesundheitsfördernde Stadtentwicklung: Rückblick auf 30 Jahre Baugesetzbuch. In: *RaumPlanung*, 4: 14-21
- Sallis, James F.; Bull, Fiona; Burdett, Ricky; Frank, Lawrence D.; Griffiths, Peter; Giles-Corti, Billie; Stevenson, Mark 2016: Use of science to guide city planning policy and practice: how to achieve healthy and sustainable future cities. In: *The Lancet*, 388, 10062: 2936-2947
- Säumel, Ina; Butenschön, Sylvia 2018: *HealthyLiving: Strategie und Planungsinstrument für gesundheitsförderndes Wohnumfeldgrün in der Stadt der Zukunft*. In: Fehr, Rainer; Hornberg, Claudia (Hrsg.): *Stadt der Zukunft - gesund und nachhaltig: Brückenbau zwischen Disziplinen und Sektoren*. Edition nachhaltige Gesundheit in Stadt und Region, Band 1. München: oekom, 321-333
- Schecker, Fabian 2020: *Analyse der Feinstaubexposition von Fußgängern in Abhängigkeit verschiedener Straßenraumtypen*. Unveröffentlichte Masterarbeit am Institut für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik an der TU Darmstadt

- Schlicht, Wolfgang 2017: Urban Health: Erkenntnisse zur Gestaltung einer „gesunden Stadt. essentials. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden
- Schlums, C. 1998: Charakterisierung der Quellgruppenbeiträge zur Immission von Ruß und anderen verkehrsrelevanten Schadstoffen an Hauptverkehrsstraßen. Dissertation. Berlin (Technische Universität).
- Schnabel, Werner; Lohse, Dieter 2011a: Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung Band 1 Straßenverkehrstechnik. Berlin: Beuth Verlag GmbH, Bonn: Kirschbaum Verlag GmbH
- Schnabel, Werner; Lohse, Dieter 2011b: Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung Band 2 Verkehrsplanung. Berlin: Beuth Verlag GmbH, Bonn: Kirschbaum Verlag GmbH
- Schneider, Alexandra; Breitner, Susanne; Ruckerl, Regina; Peters, Annette 2014: Gesundheitliche Bedeutung von Luftschadstoffen. In: IPP-INFO, 10: 4-6
- Schneider, A., Cyrys, J., Breitner, S., Kraus, U., Peters, A., Diegmann, V., Neunhäuserer, L. 2018: Quantifizierung von umweltbedingten Krankheitslasten aufgrund der Stickstoffdioxid-Exposition in Deutschland. Umweltbundesamt 1/2018
- Schnur, Olaf 2008: Quartiersforschung im Überblick: Konzepte, Definitionen und aktuelle Perspektiven. In: Schnur, Olaf (Hrsg.): Quartiersforschung. Zwischen Theorie und Praxis. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 19-51
- Schöller-Schwedes, Oliver; Rammner, Stephan 2012: Mobile Cities: Dynamiken weltweiter Stadt- und Verkehrsentwicklung. Mobilität und Gesellschaft, Berlin: LIT
- Scholles, Frank 2008a: Prognosen. In: Fürst, Dietrich; Scholles, Frank (Hrsg.): Handbuch Theorien und Methoden der Raum- und Umweltplanung. Dortmund: Rohn, 358-374
- Scholles, Frank 2008b: Szenariotechnik. In: Fürst, Dietrich; Scholles, Frank (Hrsg.): Handbuch Theorien und Methoden der Raum- und Umweltplanung. Dortmund: Rohn, 380-392
- Schultz, Konrad; Petro, Wolfgang 1998: Pneumologische Umweltmedizin (zuletzt geprüft: 21.07.2021)
- Schulze, E. 2002: Räumliche und zeitliche Analyse von kontinuierlichen Luftschadstoffmessungen in Berlin. Einfluss von Regen und Luftfeuchtigkeit auf die PM10-Emission und -Immission. Diplomarbeit. Dresden (Technische Universität, Institut für Geographie)
- Sieber, Raphael 2017: Gesundheitsfördernde Stadtentwicklung: Eine Untersuchung stadtplanerischer Instrumente unter Einbeziehung des Setting-Ansatzes der Gesundheitsförderung. Online verfügbar unter: https://el-dorado.tu-dortmund.de/bitstream/2003/36776/1/Dissertation_Sieber.pdf (zuletzt geprüft: 27.09.2021)
- Snellen, Danielle; Borgers, Aloys; Timmermans, Harry 2002: Urban Form, Road Network Type, and Mode Choice for Frequently Conducted Activities: A Multilevel Analysis Using Quasi-Experimental Design Data. In: Environ Plan A 34, 7: 1207-1220
- Stadt Frankfurt am Main 2019: Statistisches Jahrbuch Frankfurt am Main. Online verfügbar unter: [https://www.frankfurt.de/sixcms/detail.php?id=3877&_ffmpar\[_id_eltern\]=2811](https://www.frankfurt.de/sixcms/detail.php?id=3877&_ffmpar[_id_eltern]=2811) (zuletzt geprüft: 21.01.2020)
- Stadt Frankfurt am Main Bürgeramt, Statistik und Wahlen 2019: Frankfurt Statistik Aktuell. Online verfügbar unter: [https://www.frankfurt.de/sixcms/detail.php?id=3876&_ffmpar\[_id_inhalt\]=54680](https://www.frankfurt.de/sixcms/detail.php?id=3876&_ffmpar[_id_inhalt]=54680) (zuletzt geprüft: 20.01.2020)
- Stadt Frankfurt am Main - Der Magistrat - Bürgeramt, Statistik und Wahlen 2019: Frankfurter Statistische Berichte 2019. Frankfurt am Main
- Stein, Axel 2021: Zeit für die Verkehrswende. In: vhw FWS, 3: 115-119
- Sterdt, Elena; Walter, Ulla 2012: Ansätze und Strategien der Prävention und Gesundheitsförderung im Kontext von Stadtplanung. In: Böhme, Christa; Kliemke, Christa; Reimann, Bettina; Süß, Waldemar (Hrsg.): Handbuch Stadtplanung und Gesundheit. Bern: Verlag Hans Huber, 27-36
- Steven, H. 2012: Fachtagung Tempo 30 - Chancen, Hindernisse, Erfahrungen. Schadstoff- und CO2-Emissionen bei Tempo 30. Fachvortrag. Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/377/dokumente/steven-veroeffentlichung.pdf> (zuletzt geprüft: 11.05.2020)

- Stevenson, Mark; Thompson, Jason; Sá, Thiago Hérick de; Ewing, Reid; Mohan, Dinesh; McClure, Rod et al. 2016: Land use, transport, and population health: estimating the health benefits of compact cities. In: *The Lancet* 388, 10062: 2925-2935
- Stevenson, Mark; Gleeson, Brendan 2019: *Complex Urban Systems: Compact Cities, Transport and Health*. In: Nieuwenhuijsen, Mark; Khreis, Haneen (Hrsg.): *Integrating human health into urban and transport planning: A framework*. Cham, Switzerland: Springer, 271-285
- Stevenson, Mark; Thompson, Jason; Sá, Thiago Hérick de; Ewing, Reid; Mohan, Dinesh; McClure, Rod; Roberts, Ian; Tiwari, Geetam; Giles-Corti, Billie; Sun, Xiaoduan; Wallace, Mark; Woodcock, James 2016: Land use, transport, and population health: estimating the health benefits of compact cities. In: *The Lancet*, 388, 10062: 2925-2935
- Street, R.A.; Duckham, S.C.; Boissard, C.; Hewitt, C.N. 1997: Emissions of VOCs from Stressed and Unstressed Vegetation. In: Slanina, S. (Hrsg.): *Biosphere - Atmosphere Exchange of Pollutants and Trace Substances*, 366-378
- Tainio, Marko; Nazelle, Audrey J. de; Götschi, Thomas; Kahlmeier, Sonja; Rojas-Rueda, David; Nieuwenhuijsen, Mark J. 2016: Can air pollution negate the health benefits of cycling and walking? In: *Preventive medicine*, 87: 233-236
- Thönnessen, M.; Beckröge, W.; Bauer, J. 2013: *Bäume und Pflanzen lassen Städte atmen*. Köln
- Thu, N. T. A.; Hang, T. V. D.; Blume, L. 2019: *Air Quality Report 2018*. Green Innovation and Development Center (GreenID). Vol. 234
- Topp, H. 2014: Tempo 30 auf Hauptverkehrsstraßen mit Wohnnutzung. In: *Straßenverkehrstechnik*, 1: 23-30
- Traistă, E.; Madalina, I.; Vlad, C.; Ovidiu, B. 2003: Correlations between the air pollution and the rainfall composition in Jiului Valley area. In: *Studia UBB Geologia*, 48: 95-100
- Tran, Minh-Chau 2018: *Walkability als ein Baustein gesundheitsförderlicher Stadtentwicklung und -gestaltung*. In: Baumgart, Sabine; Köckler, Heike; Ritzinger, Anne; Rüdiger, Andrea (Hrsg.): *Planung für gesundheitsfördernde Städte*. Forschungsberichte der ARL, Bd. 8. Hannover: Akademie für Raumforschung und Landesplanung Leibniz-Forum für Raumwissenschaften, 284-296
- Trojan, Alf 1994: *Gesundheit und Stadterneuerung*. In: Stumm, Brigitte; Trojan, Alf (Hrsg.): *Gesundheit in der Stadt: Modelle - Erfahrungen - Perspektiven*. Fischer Taschenbücher, Bd. 11193. Frankfurt am Main: Fischer-Taschenbuch-Verlag, 9-33
- Tschöke, H.; Mollenhauer, K.; Maier R. 2018: *Handbuch Dieselmotoren*. 4. Auflage. Berlin: Springer Verlag
- Tsourus, Agis D. 2019: *Healthy Cities: A Political Movement Which Empowered Local Governments to Put Health and Equity High on Their Agenda*. In: Nieuwenhuijsen, Mark; Khreis, Haneen (Hrsg.): *Integrating human health into urban and transport planning: A framework*. Cham, Switzerland: Springer, 7-88
- Umweltbundesamt 2017a: *Die Stadt für Morgen: Umweltschonend mobil - lärmarm - grün - kompakt - durchmisch*. Online verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/421/publikationen/20170505_stadt_von_morgen_2_auflage_web.pdf (zuletzt geprüft: 27.09.2021)
- Umweltbundesamt 2017b: *Umwelt- und Aufenthaltsqualität in urbanen Quartieren: Empfehlungen zum Umgang mit Dichte und Nutzungsmischung*. Online verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/fachbroschuere_umwelt-aufenthaltsqualitaet_urbane-quartiere.pdf (zuletzt geprüft: 27.09.2021)
- Umweltbundesamt 2019a: *Innenentwicklung in städtischen Quartieren: Die Bedeutung von Umweltqualität, Gesundheit und Sozialverträglichkeit*. Online verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-01-13_hgp_innenentwicklung_umweltqualitaet_gesundheit_sozialvertraeglichkeit_final_bf.pdf (zuletzt geprüft: 27.09.2021)
- Umweltbundesamt 2019b: *Umweltbewusstsein in Deutschland 2018: Ergebnisse einer repräsentativen Bevölkerungsumfrage*. Online verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/ubs2018_-_m_3.3_basisdatenbroschuere_barrierefrei-02_cps_bf.pdf (zuletzt geprüft: 27.09.2021)

- Umweltbundesamt 2019c: Gesunde Luft. Online verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2546/publikationen/sp_1-2019_web.pdf (zuletzt geprüft: 27.09.2021)
- Umweltbundesamt 2021a: Kommunale Verkehrsplanung. Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/verkehrsplanung/kommunale-verkehrsplanung#nachhaltige-siedlungsstrukturen-kurze-wege> (zuletzt geprüft: 13.05.2021)
- Umweltbundesamt 2021b: Luftqualität 2020. Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/luftqualitaet-2020-nur-noch-wenige-staedte-ueber> (zuletzt geprüft: 27.09.2021)
- Umweltbundesamt 2021c: Quellen der Luftschadstoffe. Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/emissionen-von-luftschadstoffen/quellen-der-luftschadstoffe> (zuletzt geprüft: 25.08.2021)
- Umweltbundesamt 2021d: Luftschadstoff-Emissionen in Deutschland. Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/luft/luftschadstoff-emissionen-in-deutschland#entwicklung-der-luftschadstoffbelastung-> (zuletzt geprüft: 25.08.2021)
- Umweltbundesamt 2021e: Trend der Luftschadstoff-Emissionen. Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/emissionen-von-luftschadstoffen/trend-der-luftschadstoff-emissionen> (zuletzt geprüft: 25.08.2021)
- Umweltbundesamt 2021f: Luftschadstoffe im Überblick. Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschadstoffe-im-ueberblick> (zuletzt geprüft: 25.08.2021)
- Umweltbundesamt 2021g: Was ist Feinstaub? Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/service/uba-fragen/was-ist-feinstaub> (zuletzt geprüft: 25.08.2021)
- Umweltbundesamt Österreich 2018: Höhere Geschwindigkeit führt zu höherer Umweltbelastung. Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.at/umweltthemen/mobilitaet/mobilitaetsdaten/tempo> (zuletzt geprüft: 14.09.2021)
- UN (United Nations) 2018: The World's Cities in 2018. Data Booklet. Online verfügbar unter: https://www.un.org/en/events/citiesday/assets/pdf/the_worlds_cities_in_2018_data_booklet.pdf (zuletzt geprüft: 12.04.2020)
- UN (United Nations) 2015: Transforming our World. The 2030 Agenda for sustainable Development. Online verfügbar unter: <https://sdgs.un.org/sites/default/files/publications/21252030%20Agenda%20for%20Sustainable%20Development%20web.pdf> (zuletzt geprüft: 02.09.2021)
- Urban, Susanna 2010: Charakterisierung der Quellverteilung von Feinstaub und Stickoxiden in ländlichem und städtischem Gebiet. Zugl.: Wuppertal, Univ., Diss. Jülich: Forschungszentrum Jülich (Schriften des Forschungszentrums Jülich Reihe Energie & Umwelt, Bd. 84)
- van der Zee, Saskia C.; Fischer, Paul H.; Hoek, Gerard 2016: Air pollution in perspective: Health risks of air pollution expressed in equivalent numbers of passively smoked cigarettes. In: Environmental research, 148: 475-483
- Van, N. T. C. 2018: Strategies for Integrated Transport and Urban Development in Asian Developing Countries.
- Vardoulakis, S.; Fisher, B.; Pericleous, K.; Gonzalez-Flesca, N. 2014: Modelling air quality in street canyons: a review. Online verfügbar unter: https://hal-ineris.archives-ouvertes.fr/file/index/docid/961872/file-name/2003-002_post-print.pdf (zuletzt geprüft: 11.05.2020)
- VDI (Verein Deutscher Ingenieure) 2018: VDI 3782. Umweltmeteorologie - Kfz-Emissionsbestimmung – Luftbeimengungen. Blatt 7. Berlin: Beuth Verlag
- Verkehrsdezernat Stadt Frankfurt am Main 2015: Mobilitätsstrategie Frankfurt am Main – Statusbericht Juli 2015. Frankfurt am Main
- VGTRC (Vietnamese-German Transport Research Center) 2016: Nguyên nhân tai nạn giao thông liên quan đến trẻ em và giải pháp cho thành phố hồ chí minh

- VGTRC (Vietnamese-German Transport Research Center) 2018: Vai trò của xe máy trong hiện tại và tương lai tại Việt Nam
- von Mörner, Moritz; Boltze, Manfred 2018: Sammelverkehr mit Autonomen Fahrzeugen im ländlichen Raum. Zur Zukunft des ÖPNV in dünn besiedelten Gebieten. In: Der Nahverkehr, 11: 6-13
- Waibel, Michael 2013: Ho Chi Minh MEGA City: Eine Einführung. In: Waibel, Michael (Hrsg.): Ho Chi Minh MEGA City. Pazifik Forum, Bd. 14. Berlin: regiospectra Verlag, 9-28
- Wang, J.; Xie, X.; Fang, C. 2019: Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Atmospheric Particulate Matter (PM10 and PM2.5) in Changchun and Analysis of Its Influencing Factors. In: Atmosphere, 10: 17 Seiten
- Waller, Heiko 2006: Gesundheitswissenschaft: Eine Einführung in Grundlagen und Praxis. Stuttgart: Kohlhammer
- Weeber, Rotraut 2012: Wohnen und Gesundheit. In: Böhme, Christa; Kliemke, Christa; Reimann, Bettina; Süß, Waldemar (Hrsg.): Handbuch Stadtplanung und Gesundheit. Bern: Verlag Hans Huber, 61-73
- Wékel, Julian 2018: Stadtentwicklungsplanung. In: ARL (Akademie für Raumforschung und Landesplanung) (Hrsg.): Handwörterbuch der Stadt- und Raumentwicklung. Hannover, 2435-2439
- Western Australian Planning Commission 2015: Liveable Neighbourhoods. Online verfügbar unter: https://www.wa.gov.au/sites/default/files/2021-05/FUT-LiveableNeighbourhoods_2015.pdf (zuletzt geprüft: 27.09.2021)
- WHO (World Health Organization) 1946: Constitution of the world health organization. Online verfügbar unter: <http://apps.who.int/gb/bd/PDF/bd47/EN/constitution-en.pdf> (zuletzt geprüft: 24.09.2021)
- WHO (World Health Organization) 1986: Ottawa-Charta zur Gesundheitsförderung. Online verfügbar unter: http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0006/129534/Ottawa_Charter_G.pdf (zuletzt geprüft: 24.09.2021)
- WHO (World Health Organization) 1997: City planning for health and sustainable development: European Sustainable Development and Health Series: 2. Online verfügbar unter: https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0008/101060/wa38097ci.pdf (zuletzt geprüft: 27.09.2021)
- WHO (World Health Organization) 2009: Global health risks. Mortality and burden of disease attributable to selected major risks. Geneva, Switzerland: World Health Organization
- WHO (World Health Organization) 2013: Gesundheit 2020: Rahmenkonzept und Strategie der Europäischen Region für das 21. Jahrhundert. Online verfügbar unter: https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0009/215757/Health2020-Long-Ger.pdf (zuletzt geprüft: 27.09.2021)
- WHO (World Health Organization) 2016: Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease. Online verfügbar unter: <https://apps.who.int/iris/rest/bitstreams/1061179/retrieve> (zuletzt geprüft: 27.09.2021)
- WHO (World Health Organization) Regional Office for Europe 2018: Gesunde Umwelt für gesündere Menschen. Online verfügbar unter: https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0009/367191/eceh-ger.pdf (zuletzt geprüft: 27.09.2021)
- WHO (World Health Organization) Regional Office for Europe 2019: Noncommunicable Diseases and Air Pollution. Online verfügbar unter: https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0005/397787/Air-Pollution-and-NCDs.pdf (zuletzt geprüft: 27.09.2021)
- WHO (World Health Organization) European Centre for Environment and Health 2021: WHO global air quality guidelines. Particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Bonn, Germany: WHO European Centre for Environment and Health. Online verfügbar unter: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK574594/> (zuletzt geprüft: 28.09.2021)
- Zink, Annkatrin 2013: Ho Chi Minh Megacity - Stadt der (Mega-)Möglichkeiten?: Perspektiven der jungen Generation. In: Waibel, Michael (Hrsg.): Ho Chi Minh MEGA City. Berlin: regiospectra Verlag, 96-120
- Zukunftsinstitut 2020a: Startseite. <https://www.zukunftsinstitut.de/> (zuletzt geprüft: 24.09.2021)

Zukunftsinstitut 2020b: Gesundheit Glossar. <https://www.zukunftsinstitut.de/artikel/megatrend-glossar/gesundheit-glossar/> (zuletzt geprüft: 24.10.2020)

Zukunftsinstitut 2020c: Megatrend-Glossar. <https://www.zukunftsinstitut.de/artikel/megatrend-glossar/> (zuletzt geprüft: 24.10.2020)

Zukunftsinstitut 2020d: Urbanisierung Glossar. <https://www.zukunftsinstitut.de/artikel/megatrend-glossar/urbanisierung-glossar/> (zuletzt geprüft: 24.10.2020)

Zukunftsinstitut 2020e: Metropolen von morgen: Gesunde Städte. <https://www.zukunftsinstitut.de/artikel/metropolen-von-morgen-gesunde-staedte/> (zuletzt geprüft: 24.10.2020)

Zuurbier, M.; Hoek, G.; Oldenwening, M.; Lenters, V.; Meliefste, K.; van den Hazel, P.; Brunekreef, B. 2010: Commuters' exposure to particulate matter air pollution is affected by mode of transport, fuel type, and route. In: Environmental Health Perspectives, 118, 6; 783-789

11 Kurzfassung

Das Forschungsvorhaben ‚Sustainable and Health-Oriented Transport Planning and Urban Planning‘ (SHOTUP) wurde von April 2019 bis September 2021 in Kooperation der Technischen Universität Darmstadt und der Vietnamesisch-Deutschen Universität in Ho Chi Minh City durchgeführt. Anlässe zur Forschung waren aktuelle gesellschaftliche Entwicklungen sowie die weltweite gesundheitliche Belastungssituation aufgrund von Luftschadstoffen in Städten, die eine nachhaltige und gesundheitsorientierte Weiterentwicklung der urbanen Räume erfordern.

Die Zahl der Menschen, die in Städten wohnen, steigt weltweit kontinuierlich. Seit 2007 lebt die Weltbevölkerung mehrheitlich in Städten und der Anteil wird nach Schätzungen der UN bis 2030 auf über 60 Prozent ansteigen. Diese Verstädterung ist einer der wichtigsten globalen Trends, der die Städte unweigerlich verändern wird. (Clos und Surinach 2019) Ergänzend zu den Vorteilen der Urbanisierung müssen negative Aspekte, wie erhöhte Gesundheitsrisiken, vermehrt in den Blick genommen werden (WHO Regional Office for Europe 2018). Hohe lokale Luftverschmutzungskonzentrationen werden hauptsächlich durch bestehende Fahrzeugtechnologien im motorisierten privaten und öffentlichen Verkehr und durch begrenzten Luftaustausch aufgrund ungeeigneter Gebäudestrukturen in vielen Stadtvierteln verursacht. Die aktuelle Planung von Quartieren findet daher in einem Spannungsfeld zwischen nachhaltiger Stadtentwicklung im Sinne des Klimaschutzes einerseits und der Gesundheit der Bewohner*innen und Nutzer*innen städtischer Infrastruktur andererseits statt. Bei der Stadt- und Verkehrsplanung ist auch zu berücksichtigen, dass in Bezug auf die Verkehrstechnologien und das Verkehrsverhalten (z.B. automatisiertes Fahren, emissionsarme Fahrzeuge, Sharing-Dienste, aktiver Verkehr) große Veränderungen aktuell stattfinden. Um eine nachhaltige Entwicklung zu ermöglichen, müssen solche Veränderungen bei der Entwicklung der städtischen Struktur und der Verkehrsinfrastruktur sorgfältig berücksichtigt werden.

Stadt- und Verkehrsplanung haben vielfältige Interaktionen und können die Gesundheit der städtischen Bevölkerung entscheidend beeinflussen. Wesentliche Einflüsse des Verkehrs auf die Gesundheit ergeben sich entweder direkt aus Verkehrssicherheitsaspekten oder aus der individuellen Schadstoffbelastung sowie indirekt aus dem Klimawandel. Die Stadtplanung beeinflusst die Gesundheit unter anderem über Bebauungsdichten und -strukturen sowie über Grün- und Freiflächen zur Belüftung von Siedlungsgebieten. Die in diesem Projekt untersuchten Einflussfaktoren Verkehrsmittelwahl, Routenwahl und Zeitwahl können nachweislich Einfluss auf die Exposition der Verkehrsteilnehmer*innen gegenüber Luftschadstoffen haben. Hingegen konnten bei der Untersuchung der Auswirkungen städtebaulicher Einflussfaktoren auf die Luftschadstoffbelastung durch mobile Messungen kombiniert mit GPS-Daten und darauf aufbauender räumlicher Analyse mit Hilfe eines Geoinformationssystems die Zusammenhänge teilweise, aber nicht in Gänze nachgewiesen werden. Es wird angenommen, dass dies aufgrund der Komplexität der Wirkungszusammenhänge durch Messungen eher unzureichend untersucht werden kann. Schlussendlich konnten die gesammelten Erkenntnisse aus Literatur und Messungen in Handlungsempfehlungen für eine gesundheitsorientierte Stadtentwicklung gebündelt werden. Diese soll Praktiker*innen eine Hilfestellung sowie der Anlass für weitere Forschungsarbeit sein. Im Kontext der Forschungsarbeit wurde die Notwendigkeit einer gesundheitsorientierten Gesamtplanung über alle Ebenen, vor allem bei der Umsetzung in den Quartieren und im Straßenraum, deutlich. Für eine gesundheitsorientierte Stadtentwicklung sind eine integrierte Planung mit verstärkter Gesundheitsorientierung (Health in All Policies), eine angemessene Einbringung des Belanges Gesundheit in planerische Entscheidungen sowie vor allem die praktische Umsetzung durch Maßnahmen der Stadt- und Verkehrsplanung auf Quartiersebene relevant. Denn die Zukunftsfähigkeit und Lebensqualität einer wachsenden Stadt hängt von der Gestaltung dieses Wachstums, insbesondere des Mobilitätswachstums, ab.





12 Anhang

Anhang 1: Trendauswertung Expertenworkshops	iii
Anhang 2: Funktionsweisen der Messprinzipien zur Messung UFP	iv
Anhang 3: Funktionsweisen des Messgeräts Modell 405 nm zur Erfassung von Stickoxiden	vi
Anhang 4: Kriterien für die Auswahl der Straßenquerschnitte in Frankfurt am Main.....	vii
Anhang 5: Vorgehen zur Berechnung der Emissionsfaktoren nach Fahrzeugart.....	ix
Anhang 6: Mobile Messungen im Rahmen der Felduntersuchungen in Deutschland.....	xi
Anhang 7: Stationäre Messungen im Rahmen der Felduntersuchungen in Deutschland	xiv
Anhang 8: Städtebauliche Eigenschaften	xv
Anhang 9: Durchschnittliche Belastungswerte UFP in Abhängigkeit der Verkehrsmittelwahl (Deutschland)	xvi
Anhang 10: Durchschnittliche Partikelmasse PM _{2,5} und PM ₁₀ in Abhängigkeit der Verkehrsmittelwahl (Deutschland)	xvi
Anhang 11: Durchschnittliche Belastungswerte UFP in Abhängigkeit der Verkehrsmittel- und Routenwahlwahl (Deutschland)	xvii
Anhang 12: Durchschnittliche Partikelmassen PM _{2,5} und PM ₁₀ in Abhängigkeit der Verkehrsmittel- und Routenwahl (Deutschland)	xvii
Anhang 13: Durchschnittliche inhalierte Dosis UFP und Partikelmassen PM _{2,5} und PM ₁₀ für die einzelnen Verkehrsmittel und Routen (Deutschland)	xviii
Anhang 14: Durchschnittliche Belastungswerte UFP in Abhängigkeit der Verkehrsmittelwahl (Vietnam).....	xviii
Anhang 15: Erfassung von Stickoxiden während stationärer Messungen.....	xix
Anhang 16: Ergebnisse stationärer Messungen PM _{2,5}	xx
Anhang 17: Ergebnisse stationärer Messungen PM ₁₀	xxii
Quellenverzeichnis - Anhang	xxiv

Anhang 2: Funktionsweisen der Messprinzipien zur Messung UFP

Kondensationspartikelzähler (CPC)

Die üblichen optischen Messmethoden zur Bestimmung der Feinstaubimmissionen versagen, wenn die Partikelgröße unter $1\ \mu\text{m}$ fällt. Die Technik der Kondensationspartikelzählung kann als Transformationsmethode bezeichnet werden, um Partikel kleiner als $1\ \mu\text{m}$ mit herkömmlichen optischen Techniken zu erkennen. Die Kondensation bezieht sich auf die Kondensation eines übersättigten Gases (mit einem Partialdruck höher als der Dampfdruck), bei dem die kleinen Partikel als Kondensationskern dienen, wodurch es zu einer Vergrößerung der Partikel kommt, die dann leicht mit optischen Techniken erkannt werden können. Die mit der Sättigungsflüssigkeit beschichteten Partikel werden mittels Laseroptik detektiert und die erfassten Reaktionen können dann entsprechend aufgezeichnet werden. Der Gesamtprozess lässt sich also in drei Schritten zusammenfassen: Übersättigung von Wasser oder einer anderen alkoholischen Arbeitsflüssigkeit, Wachstum der Partikel durch Kondensation und Nachweisphase. Gerätespezifisch liegt der untere Schwellenwert für CPC bei $2,5\ \text{nm}$, während die meisten tragbaren CPC einen unteren Schwellenwert von etwa $10\ \text{nm}$ haben (Kulkarni, Baron, and Willeke 2011). Abbildung 2 zeigt schematisch das Funktionsprinzip eines Kondensationspartikelzählers.

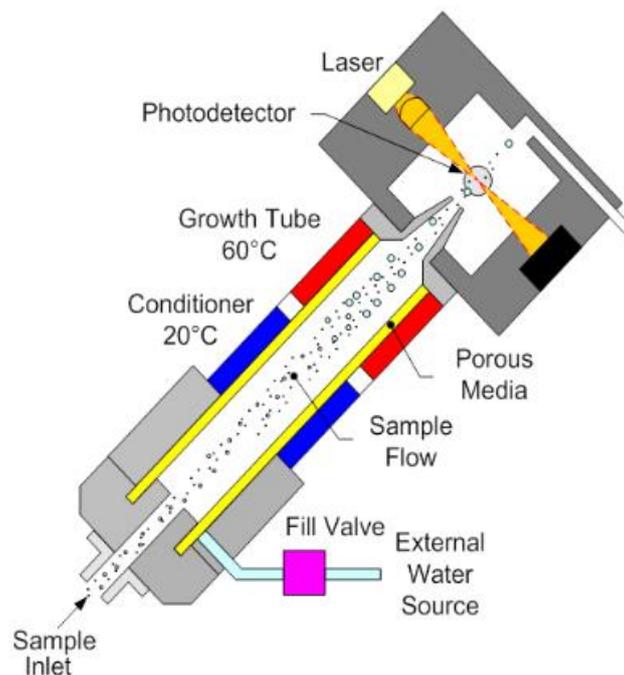


Abbildung 2: Schematische Darstellung eines Kondensationspartikelzählers

Quelle: TSI o. J. a

Diffusionspartikelzähler

Diffusionsbasierte Partikelzähler nutzen das Spannungssignal das von einem Strom geladener Partikel erzeugt wird, um die Partikelkonzentration abzuschätzen. Die angesaugte Probe mit UFP-beladener Luft wird in zwei Komponenten aufgeteilt. Der eine Teil wird direkt in die Diffusionskammer geführt, während der andere Teil des Luftstroms durch eine Reihe von Filtern und dann durch die Corona-Nadelkammer geleitet wird, um positiv geladene Ionen zu erzeugen, die dann zur Aufladung der UFP-beladenen Luft verwendet werden. Nach der Diffusionsaufladung der Partikel werden die Partikel in das Detektorsystem geleitet, das dann Schätzungen der Anzahlkonzentration, der Oberfläche und der Verteilung der Partikeldurchmesser in Abhängigkeit von der Leistungsfähigkeit des verwendeten Geräts liefert. Das durch den Partikelstrom erzeugte Spannungssignal ist direkt proportional zur Oberfläche der Partikel im Strom und den Kalibrierungsfaktoren oder den Koeffizienten abhängig von der spezifischen Konfiguration des Geräts.

Das Spannungssignal wird von einem Faraday-Cup-Elektrometer erfasst, der die von den Partikeln in der Metallabschirmung getragene Ladung isoliert und eine Ladung erhält, die der von den Partikeln getragenen Ladung entspricht. Anhand dieser Ladung, des Gasdurchsatzes und des erzeugten Stroms lässt sich die Partikelanzahl Konzentration bestimmen (Kulkarni, Baron und Willeke 2011). Abbildung 3 zeigt schematisch das Funktionsprinzip von Diffusionspartikelzählern.

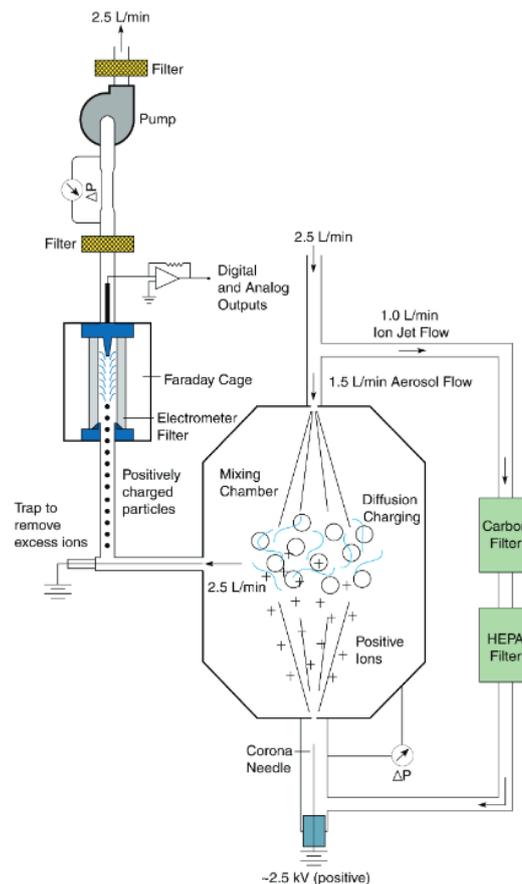


Abbildung 3: Schematische Darstellung eines Diffusionspartikelzählers

Quelle: TSI o. J. b

Anhang 3: Funktionsweisen des Messgeräts Modell 405 nm zur Erfassung von Stickoxiden

„Das Messgerät Modell 405 nm („Nanometer“ bzw. „NO_x Monitor“) wird für die Erfassung von atmosphärischem NO₂, NO und NO_x eingesetzt. In diesem Messgerät wird das NO₂ direkt durch Absorption bei einer Wellenlänge von 405nm gemessen. NO wird vor der Messung durch die hochselektive Reaktion mit Ozon in NO₂ umgewandelt. NO_x erhält man dann durch Addition von NO und NO₂. Im Gegensatz zu Chemilumineszenz-Analysatoren, bei denen NO₂ durch Molybdän- oder Photolysekonverter mit unterschiedlichen Effizienzen vor der Messung zu NO konvertiert werden muss, wird im 405 nm das NO₂ direkt durch Absorption – wie bei einem Ozonmonitor – gemessen. Da NO₂ einen wesentlich geringeren Absorptionsquerschnitt als Ozon hat, wird eine gefaltete und mit Spiegeln versehene Messzelle verwendet. Diese erzeugt eine ca. 2m lange Absorptionsstrecke, so dass im 405 nm für NO₂ eine ähnliche Empfindlichkeit wie in UV-Photometern für Ozon erreicht wird. Die Wellenlänge von 405nm wurde ausgewählt, da in diesem Bereich keine anderen Umgebungsluftkomponenten eine signifikante Absorption aufweisen. Somit ist das Modell 405 nm extrem selektiv für NO₂ bei Umgebungsluftmessungen.

Die interne Pumpe saugt das Probengas kontinuierlich mit einer Durchflussrate von ca. 2 L/min durch das Messgerät. Durch das „Scrubber“-Ventil wird die Probe alternierend über den NO₂ Scrubber oder daran vorbei geleitet. Somit wird die Messung der Lichtintensität ohne NO₂ (I₀) und mit NO₂ (I) ermöglicht. Durch das Beer-Lambertsche Gesetz wird die Konzentration an NO₂ durch I und I₀ berechnet. Bei der NO Messung wird das Gas am NO₂ Scrubber vorbei geleitet, und die Lichtintensität wird abwechselnd mit Ozon (I) und ohne Ozon (I₀) gemessen. Hierbei wird die Umwandlung von NO zu NO₂ durch Ozonzugabe gemäß folgender Reaktion genutzt: $\text{NO} + \text{O}_3 \rightarrow \text{NO}_2 + \text{O}_2$ Eventuelle Feuchteinflüsse auf die Messung von I und I₀ werden durch ein DewLine™ System eliminiert. NO_x wird aus der Summe von NO₂ und NO berechnet. Das Messgerät kann im NO₂ Modus, im NO Modus oder im alternierenden NO₂ /NO Modus betrieben werden.“ (Envilyse o. J.)

Abbildung 4 zeigt den schematischen Aufbau des Messgeräts Modell 405 nm.

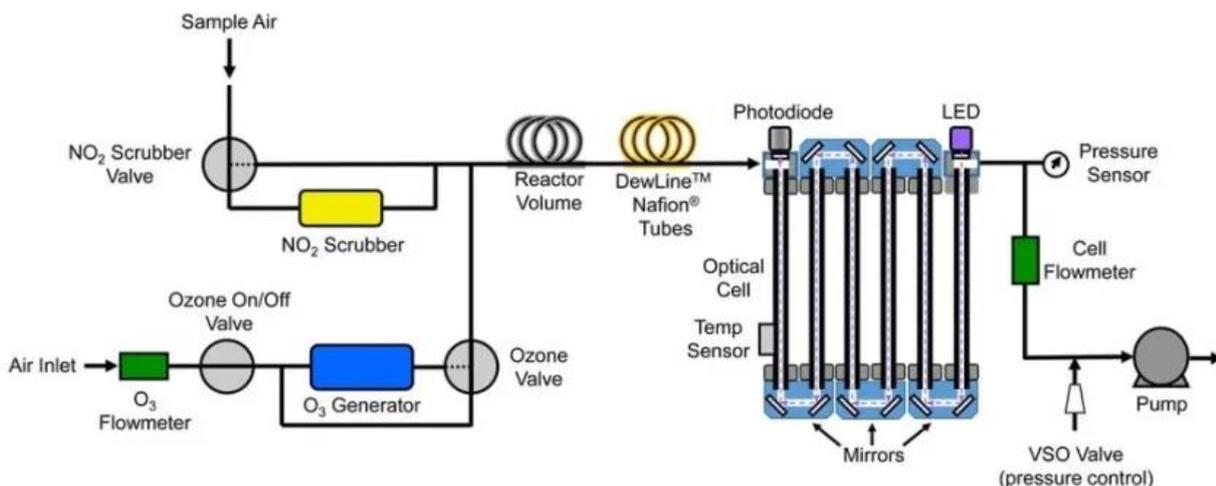


Abbildung 4: Aufbau des Messgeräts Modell 405nm

Quelle: Envilyse o. J.

Anhang 4: Kriterien für die Auswahl der Straßenquerschnitte in Frankfurt am Main

Q1: Lorsche Straße

Verkehr	Verkehrswegekategorie	angebaute Hauptverkehrsstraßen				Erschließungsstraßen					
		Ortsdurchfahrten, innergemeindliche Hauptverkehrsstraßen		Quartiersstraße		Sammelstraßen		Anliegerstraßen			
	zul. Geschwindigkeit	Schrittgeschwindigkeit		30 km/h		50 km/h					
	Einrichtungsverkehr	Ja				Nein					
	Anzahl Fahrbahnen	1				2					
	Anzahl Fahrstreifen pro Richtung	1				2					
	Parken	kein Parken		Parken auf dem Gehweg			separater Parkstreifen				
	ÖPNV	kein ÖPNV		Linienbusverkehr			Straßenbahnverkehr				
Stadtplanung	Randbebauung	keine				einseitig		beidseitig			
		offene Bauweise				geschlossene Bauweise					
		1 und 2 geschossig		3 und 4 geschossig			5 geschossig und höher				
	Straßenraumbreiten	< 13 m	13 < 17 m	17 < 20 m	20 < 21 m	21 < 23 m	23 < 26 m	26 < 28 m	≥ 28 m		
	Verhältnis von Schluchthöhe und Schluchtbreite (Bebauungshöhe/Straßenraumbreite)	<0,7		0,7<1		1<1,3		≤1,3			
	Begrünung	keine		bodennahe		Bäume einseitig		Bäume beidseitig	fahrbahnübergreifende		
	Ausrichtung der Straßenzüge	parallel zur Hauptwindrichtung					senkrecht zur Hauptwindrichtung				
	Straßenlängsneigung	-6%	-4%	-2%	0%	+2%	+4%	+6%			
	Zustand der Fahrbahnoberfläche	gut				mittel			schlecht		
	Material der Fahrbahnoberfläche	Asphalt				Beton			Pflaster		

Q2: Thudichumstraße

Verkehr	Verkehrswegekategorie	angebaute Hauptverkehrsstraßen				Erschließungsstraßen					
		Ortsdurchfahrten, innergemeindliche Hauptverkehrsstraßen		Quartiersstraße		Sammelstraßen		Anliegerstraßen			
	zul. Geschwindigkeit	Schrittgeschwindigkeit		30 km/h		50 km/h					
	Einrichtungsverkehr	Ja				Nein					
	Anzahl Fahrbahnen	1				2					
	Anzahl Fahrstreifen pro Richtung	1				2					
	Parken	kein Parken		Parken auf dem Gehweg			separater Parkstreifen				
	ÖPNV	kein ÖPNV		Linienbusverkehr			Straßenbahnverkehr				
Stadtplanung	Randbebauung	keine				einseitig		beidseitig			
		offene Bauweise				geschlossene Bauweise					
		1 und 2 geschossig		3 und 4 geschossig			5 geschossig und höher				
	Straßenraumbreiten	< 13 m	13 < 17 m	17 < 20 m	20 < 21 m	21 < 23 m	23 < 26 m	26 < 28 m	≥ 28 m		
	Verhältnis von Schluchthöhe und Schluchtbreite (Bebauungshöhe/Straßenraumbreite)	<0,7		0,7<1		1<1,3		≤1,3			
	Begrünung	keine		bodennahe		Bäume einseitig		Bäume beidseitig	fahrbahnübergreifende		
	Ausrichtung der Straßenzüge	parallel zur Hauptwindrichtung					senkrecht zur Hauptwindrichtung				
	Straßenlängsneigung	-6%	-4%	-2%	0%	+2%	+4%	+6%			
	Zustand der Fahrbahnoberfläche	gut				mittel			schlecht		
	Material der Fahrbahnoberfläche	Asphalt				Beton			Pflaster		

Q3: Reuterweg

Verkehr	Verkehrswegekategorie	angebaute Hauptverkehrsstraßen				Erschließungsstraßen			
		Ortsdurchfahrten, innergemeindliche Hauptverkehrsstraßen		Quartiersstraße		Sammelstraßen		Anliegerstraßen	
	zul. Geschwindigkeit	Schrittgeschwindigkeit		30 km/h		50 km/h			
	Einrichtungsverkehr	Ja				Nein			
	Anzahl Fahrbahnen	1				2			
	Anzahl Fahrstreifen pro Richtung	1				2			
	Parken	kein Parken		Parken auf dem Gehweg		separater Parkstreifen			
	ÖPNV	kein ÖPNV		Linienbusverkehr		Straßenbahnverkehr			
Stadtplanung	Randbebauung	keine		einseitig		beidseitig			
		offene Bauweise				geschlossene Bauweise			
		1 und 2 geschossig		3 und 4 geschossig		5 geschossig und höher			
	Straßenraumbreiten	< 13 m	13 < 17 m	17 < 20 m	20 < 21 m	21 < 23 m	23 < 26 m	26 < 28 m	≥ 28 m
	Verhältnis von Schluchthöhe und Schluchtbreite (Bebauungshöhe/Straßenraumbreite)	<0,7		0,7<1		1<1,3		≤1,3	
	Begrünung	keine		bodennahe		Bäume einseitig		Bäume beidseitig fahrbahnübergreifende	
	Ausrichtung der Straßenzüge	parallel zur Hauptwindrichtung				senkrecht zur Hauptwindrichtung			
	Straßenlängsneigung	-6%	-4%	-2%	0%	+2%	+4%	+6%	
	Zustand der Fahrbahnoberfläche	gut				mittel		schlecht	
	Material der Fahrbahnoberfläche	Asphalt				Beton		Pflaster	

Q4: Miquelallee

Verkehr	Verkehrswegekategorie	angebaute Hauptverkehrsstraßen				Erschließungsstraßen			
		Ortsdurchfahrten, innergemeindliche Hauptverkehrsstraßen		Quartiersstraße		Sammelstraßen		Anliegerstraßen	
	zul. Geschwindigkeit	Schrittgeschwindigkeit		30 km/h		50 km/h			
	Einrichtungsverkehr	Ja				Nein			
	Anzahl Fahrbahnen	1				2			
	Anzahl Fahrstreifen pro Richtung	1				2			
	Parken	kein Parken		Parken auf dem Gehweg		separater Parkstreifen			
	ÖPNV	kein ÖPNV		Linienbusverkehr		Straßenbahnverkehr			
Stadtplanung	Randbebauung	keine		einseitig		beidseitig			
		offene Bauweise				geschlossene Bauweise			
		1 und 2 geschossig		3 und 4 geschossig		5 geschossig und höher			
	Straßenraumbreiten	< 13 m	13 < 17 m	17 < 20 m	20 < 21 m	21 < 23 m	23 < 26 m	26 < 28 m	≥ 28 m
	Verhältnis von Schluchthöhe und Schluchtbreite (Bebauungshöhe/Straßenraumbreite)	<0,7		0,7<1		1<1,3		≤1,3	
	Begrünung	keine		bodennahe		Bäume einseitig		Bäume beidseitig fahrbahnübergreifende	
	Ausrichtung der Straßenzüge	parallel zur Hauptwindrichtung				senkrecht zur Hauptwindrichtung			
	Straßenlängsneigung	-6%	-4%	-2%	0%	+2%	+4%	+6%	
	Zustand der Fahrbahnoberfläche	gut				mittel		schlecht	
	Material der Fahrbahnoberfläche	Asphalt				Beton		Pflaster	

Anhang 5: Vorgehen zur Berechnung der Emissionsfaktoren nach Fahrzeugart

Im Folgenden wird das Vorgehen für die Bestimmung der Emissionsfaktoren für die Fahrzeugarten Pkw, Lkw, Bus und KRad dargestellt.

Durchschnittliche motorbedingte Feinstaubemissionen_{Pkw}

Laut Kraftfahrtbundesamt (Kraftfahrtbundesamt 2020) waren zu Beginn des Jahres 2020 65,9% aller zugelassenen Pkw in Deutschland benzinbetrieben, während Diesel-Pkw auf einen Anteil von 31,7% kamen. Der Anteil aller Pkw lag für die Schadstoffklassen Euro 6 bei 32,3% für Euro 5 bei 25,9% und für Euro 4 bei 25,8%. Die restliche Gruppe bilden die Pkw mit schlechten Schadstoffklassen, sowie Pkw mit alternativen Antriebsformen, welche keiner Schadstoffklasse unterliegen. Letztere haben einen Anteil von circa 2,6%, woraus sich für die Schadstoffklasse Euro 1 bis Euro 3 ein Anteil von rund 13,4% ergibt. Da keine Aufteilung der Pkw verschiedener Kraftstoffkonzepte in die einzelnen Schadstoffklassen gegeben wurde, sollen vereinfacht angenommen werden, dass sich die genannten Prozentwerte in etwa gleichmäßig auf die beiden Hauptgruppen Benziner und Diesel verteilen. Bezieht man nun die Feinstaubemissionen aus Kapitel 2.6.4 für die verschiedenen Schadstoffklassen mit ein, unter der Annahme dass diese für Benziner sowie Diesel ab Euro 5 vernachlässigbar sind, so können die durchschnittlichen motorbedingten Feinstaubemissionen für Pkw wie folgt ermittelt werden:

$$\begin{aligned} & \text{Durchschnittliche motorbedingte Feinstaubemission}_{\text{Pkw}} \\ &= \text{Anteil}_{\text{Diesel}} \cdot (\text{Anteil}_{\text{Euro4}} \cdot \text{Emissionen}_{\text{Euro4}} + \text{Anteil}_{\text{Euro1-3}} \cdot \text{Emissionen}_{\text{Euro1-3}}) \\ &= 31,7\% \cdot (25,8\% \cdot 0,015 \mu\text{g}/\text{km} + 13,4\% \cdot 0,06 \mu\text{g}/\text{km}) \sim 0,004 \mu\text{g}/\text{km} \end{aligned}$$

Dabei wurde für die motorbedingten Emissionen der Pkw der Schadstoffklassen Euro 1 bis Euro 3 ein durchschnittlicher Wert von $0,006 \mu\text{g}/\text{km}$ angenommen. Hinzu kommen noch nicht motorbedingte Emissionen, welche sich unter anderem aus Abrieb von Bremsen, Reifen und Straßenoberfläche zusammensetzen. Der Anteil wird stark von verschiedenen Faktoren wie beispielsweise der Beschaffenheit von Straße und Reifen oder der Fahrweise beeinflusst, kann aber bei bis zu 60% bei $\text{PM}_{2,5}$ beziehungsweise 70% bei PM_{10} liegen. Vereinfacht soll für Pkw aufgrund ihrer relativ geringen Masse jedoch einen Anteil von 50% an der Gesamtemission von Feinstaub angenommen werden. Somit ergibt sich für einen Durchschnitts-Pkw eine Feinstaubemission von ca. $0,008 \mu\text{g}/\text{km}$. Da dieser Wert als Referenzgröße dienen soll wird ihm der Feinstaub Emissionsfaktor für Pkw 1,0 zugeordnet.

Durchschnittliche motorbedingte Feinstaubemissionen_{Lkw}

Im Jahr 2019 entfielen, bezogen auf die Gesamtmasse mautpflichtiger Fahrleistungen von Lkw 76,9% und 4,1% auf die Schadstoffklasse Euro 6 bzw. die noch strengere Schadstoffklasse EEV. Der Anteil der Euro 5 lag bei 16,3%, die der Euro 6 bei etwas 1,5% und die Summe der Euronormen 1 bis 3 bei rund 1,1%. Legt man die Verteilung den Werten der motorbedingten Feinstaubemissionen aus Kapitel 2.6.4 zugrunde, so ergibt sich hierfür ein Durchschnittswert von etwa $0,005 \mu\text{g}/\text{km}$. Dabei wurde für die Feinstaubemission der Schadstoffklassen 1 bis 3 der gemittelte Wert von $0,5 \mu\text{g}/\text{km}$ angenommen. Da während der Verkehrsuntersuchung bei den stationären Messungen sämtliche Fahrzeugarten ab 3,5 Tonnen unter der Kategorie Lkw zusammengefasst wurden, soll eine Durchschnittsmasse von etwa 8 Tonnen angenommen werden. Diese Durchschnittsmasse kann als Ausgangswert für die nicht-motorbedingten Feinstaubemissionen genutzt werden. Da die durchschnittlichen motorbedingten Feinstaubemissionen von Lkw etwa um den Faktor 12,5, höher als die der Pkw sind und da hierbei auch leichtere Fahrzeuge ab 3,5 Tonnen zu dieser Gruppe gezählt werden, soll als Feinstaubemissionsfaktor für Lkw der Wert 10,0 angenommen werden.

Durchschnittliche motorbedingte Feinstaubemissionen_{Bus}

Im Untersuchungsraum Frankfurt am Main werden alle Busse des ÖPNV von der Firma In-der-City-Bus GmbH (ICB) betrieben. Deren Fuhrpark besteht aus etwa 160 Bussen verschiedener Hersteller, welche jedoch alle mindestens die Schadstoffklasse Euro 6 aufweisen. Daher kann für die motorbedingten Feinstaubemissionen der Busse ein Wert von etwa $0,002 \mu\text{g}/\text{km}$ angenommen werden. Die Standardbusse der ICB haben eine Leermasse von 12 Tonnen und eine maximale Masse von ca. 18 Tonnen. Für die Abschätzung der nicht-motorbedingten Feinstaubemissionen soll daher eine durchschnittliche Masse von etwa 15 Tonnen angenommen werden. Diese liegt also deutlich über der durchschnittlichen Masse der Lkw. Da die motorbedingten Emissionen von Bussen etwa fünfmal so hoch sind wie die der Vergleichsgruppe Pkw, soll ein Feinstaubemissionsfaktor von 5,0 für Busse festgelegt werden.

Durchschnittliche motorbedingte Feinstaubemissionen_{KRad}

Für die unter KRad zusammengefassten Leichtkraft- und Motorräder gelten ab der Euronorm 5 ähnliche Grenzwerte in Bezug auf Feinstaubemissionen wie für Pkw. Da diese jedoch in den Euronormen 1 bis 4 nicht bzw. nur teilweise geregelt sind und da insbesondere ältere Zweitaktmodelle größere Feinstaubemissionen verursachen, soll für den Feinstaubemissionsfaktor für KRad trotz ihrer geringen Masse ebenfalls der Wert 1,0 angenommen werden.

Anhang 6: Mobile Messungen im Rahmen der Felduntersuchungen in Deutschland

Wochentag	Datum	Verkehrsmittel	Strecke	Startzeit	km
Montag	24.08.2020	Fahrrad	Nebenstrecke Rödelheim-Ostend	15:23	8,38
Montag	24.08.2020	Fahrrad	Nebenstrecke Ostend-Rödelheim	16:09	8,39
Montag	24.08.2020	Fahrrad	Hauptstrecke Rödelheim-Ostend	16:55	7,99
Montag	24.08.2020	Fahrrad	Hauptstrecke Ostend-Rödelheim	17:31	8,36
Dienstag	25.08.2020	Fahrrad	Hauptstrecke Rödelheim-Ostend	07:15	7,98
Dienstag	25.08.2020	Fahrrad	Hauptstrecke Ostend-Rödelheim	07:48	8,33
Dienstag	25.08.2020	Fahrrad	Nebenstrecke Rödelheim-Ostend	08:29	8,00
Dienstag	25.08.2020	Fahrrad	Nebenstrecke Ostend-Rödelheim	09:10	8,02
Dienstag	25.08.2020	Fahrrad	Hauptstrecke Rödelheim-Ostend	10:03	7,99
Dienstag	25.08.2020	Fahrrad	Hauptstrecke Ostend-Rödelheim	10:41	8,33
Dienstag	25.08.2020	Fahrrad	Hauptstrecke Rödelheim-Ostend	11:16	7,98
Dienstag	25.08.2020	Fahrrad	Hauptstrecke Ostend-Rödelheim 1	11:52	4,62
Dienstag	25.08.2020	Fahrrad	Hauptstrecke Ostend-Rödelheim 2	14:38	3,68
Dienstag	25.08.2020	Bus, U-Bahn, Tram	Rödelheim-Ostendstraße	15:05	
Dienstag	25.08.2020	Tram, U-Bahn, Bus	Ostendstraße-Rödelheim	15:46	
Dienstag	25.08.2020	S-Bahn	Rödelheim-Ostendstraße	16:39	
Dienstag	25.08.2020	S-Bahn	Ostendstraße-Rödelheim	17:00	
Dienstag	25.08.2020	S-Bahn	Rödelheim-Ostendstraße	17:31	
Dienstag	25.08.2020	S-Bahn	Ostendstraße-Rödelheim	17:56	
Freitag	27.08.2020	Pkw _{Neu}	B44 Rödelheim-Ostend	14:29	7,88
Freitag	27.08.2020	Pkw _{Neu}	B44 Ostend-Rödelheim	14:58	12,33
Freitag	27.08.2020	Pkw _{Neu}	B44 Rödelheim-Ostend	15:29	7,79
Freitag	27.08.2020	Pkw _{Neu}	B44 Ostend-Rödelheim	15:57	8,34
Freitag	27.08.2020	Pkw _{Neu}	A66 Rödelheim-Ostend	16:48	10,58
Freitag	27.08.2020	Pkw _{Neu}	A66 Ostend-Rödelheim	17:31	16,97
Freitag	27.08.2020	Pkw _{Neu}	A66 Rödelheim-Ostend	18:10	10,64
Freitag	27.08.2020	Pkw _{Neu}	A66 Ostend-Rödelheim	18:43	11,29
Dienstag	01.09.2020	Pkw _{Neu}	A66 Rödelheim-Ostend	07:15	8,50
Dienstag	01.09.2020	Pkw _{Neu}	A66 Ostend-Rödelheim	07:39	11,35
Dienstag	01.09.2020	Pkw _{Neu}	A66 Rödelheim-Ostend	08:07	10,68
Dienstag	01.09.2020	Pkw _{Neu}	A66 Ostend-Rödelheim	08:45	11,34
Dienstag	01.09.2020	Pkw _{Neu}	B44 Rödelheim-Ostend	09:17	8,00
Dienstag	01.09.2020	Pkw _{Neu}	B44 Ostend-Rödelheim	09:46	8,68
Dienstag	01.09.2020	Pkw _{Neu}	B44 Rödelheim-Ostend	10:19	7,91
Dienstag	01.09.2020	Pkw _{Neu}	B44 Ostend-Rödelheim	10:49	8,45
Dienstag	01.09.2020	Pkw _{Neu}	A66 Rödelheim-Ostend	11:24	10,69
Dienstag	01.09.2020	Pkw _{Neu}	A66 Ostend-Rödelheim	11:53	11,20
Dienstag	01.09.2020	Pkw _{Alt}	B44 Rödelheim-Ostend	14:08	7,89
Dienstag	01.09.2020	Pkw _{Alt}	B44 Ostend-Rödelheim	14:33	8,71
Dienstag	01.09.2020	Pkw _{Alt}	B44 Rödelheim-Ostend	14:57	7,80
Dienstag	01.09.2020	Pkw _{Alt}	B44 Ostend-Rödelheim	15:24	8,41
Dienstag	01.09.2020	Pkw _{Alt}	A66 Rödelheim-Ostend	16:05	10,69
Dienstag	01.09.2020	Pkw _{Alt}	A66 Ostend-Rödelheim	16:41	11,22
Dienstag	01.09.2020	Pkw _{Alt}	A66 Rödelheim-Ostend	17:07	10,61
Dienstag	01.09.2020	Pkw _{Alt}	A66 Ostend-Rödelheim	17:40	11,63

Wochentag	Datum	Verkehrsmittel	Strecke	Startzeit	km
Mittwoch	02.09.2020	S-Bahn	Ostendstraße-Rödelheim	09:14	
Mittwoch	02.09.2020	S-Bahn	Rödelheim-Ostendstraße	09:40	
Mittwoch	02.09.2020	S-Bahn	Ostendstraße-Rödelheim	10:09	
Mittwoch	02.09.2020	Bus, U-Bahn, Tram	Rödelheim-Ostendstraße	10:54	
Mittwoch	02.09.2020	S-Bahn	Ostendstraße-Rödelheim	14:15	
Mittwoch	02.09.2020	S-Bahn	Rödelheim-Ostendstraße	14:35	
Mittwoch	02.09.2020	S-Bahn	Ostendstraße-Rödelheim	14:56	
Mittwoch	02.09.2020	S-Bahn	Rödelheim-Ostendstraße	15:27	
Mittwoch	02.09.2020	S-Bahn	Ostendstraße-Rödelheim	15:46	
Mittwoch	02.09.2020	Bus, U-Bahn, Tram	Rödelheim-Ostendstraße	16:05	
Mittwoch	02.09.2020	Tram, U-Bahn, Bus	Ostendstraße-Rödelheim	16:47	
Mittwoch	02.09.2020	Bus, U-Bahn, Tram	Rödelheim-Ostendstraße	17:33	
Mittwoch	02.09.2020	Tram, U-Bahn, Bus	Ostendstraße-Rödelheim	18:08	
Donnerstag	03.09.2020	PkWA _{Alt}	A66 Rödelheim-Ostend	07:18	10,62
Donnerstag	03.09.2020	PkWA _{Alt}	A66 Ostend-Rödelheim	07:47	11,19
Donnerstag	03.09.2020	PkWA _{Alt}	A66 Rödelheim-Ostend	08:14	10,50
Donnerstag	03.09.2020	PkWA _{Alt}	A66 Ostend-Rödelheim	08:47	11,36
Donnerstag	03.09.2020	PkWA _{Alt}	B44 Rödelheim-Ostend	09:22	7,88
Donnerstag	03.09.2020	PkWA _{Alt}	B44 Ostend-Rödelheim	09:45	8,25
Donnerstag	03.09.2020	PkWA _{Alt}	B44 Rödelheim-Ostend	10:07	7,88
Donnerstag	03.09.2020	PkWA _{Alt}	B44 Ostend-Rödelheim	10:39	8,49
Donnerstag	03.09.2020	PkWA _{Alt}	A66 Rödelheim-Ostend	11:04	10,58
Donnerstag	03.09.2020	PkWA _{Alt}	A66 Ostend-Rödelheim	11:29	11,24
Freitag	04.09.2020	Bus, U-Bahn, Tram	Rödelheim-Ostendstraße	07:14	
Freitag	04.09.2020	Tram, U-Bahn, Bus	Ostendstraße-Rödelheim	07:50	
Freitag	04.09.2020	Bus, U-Bahn, Tram	Rödelheim-Ostendstraße	08:33	
Freitag	04.09.2020	Tram, U-Bahn, Bus	Ostendstraße-Rödelheim	09:09	
Freitag	04.09.2020	Bus, U-Bahn, Tram	Rödelheim-Ostendstraße	09:52	
Freitag	04.09.2020	Tram, U-Bahn, Bus	Ostendstraße-Rödelheim	10:38	
Freitag	04.09.2020	S-Bahn	Rödelheim-Ostendstraße	11:20	
Freitag	04.09.2020	S-Bahn	Ostendstraße-Rödelheim	11:40	
Freitag	04.09.2020	S-Bahn	Rödelheim-Ostendstraße	12:04	
Freitag	04.09.2020	S-Bahn	Ostendstraße-Rödelheim	12:26	
Freitag	04.09.2020	PkWN _{Neu}	A66 Rödelheim-Ostend	13:55	10,67
Freitag	04.09.2020	PkWN _{Neu}	A66 Ostend-Rödelheim	14:26	11,18
Freitag	04.09.2020	PkWN _{Neu}	A66 Rödelheim-Ostend	14:56	10,68
Freitag	04.09.2020	PkWN _{Neu}	A66 Ostend-Rödelheim	15:29	11,20
Freitag	04.09.2020	PkWN _{Neu}	B44 Rödelheim-Ostend	16:02	8,01
Freitag	04.09.2020	PkWN _{Neu}	B44 Ostend-Rödelheim	16:32	8,42
Freitag	04.09.2020	PkWN _{Neu}	B44 Rödelheim-Ostend	17:00	7,90
Freitag	04.09.2020	PkWN _{Neu}	B44 Ostend-Rödelheim	17:33	8,37

Wochentag	Datum	Verkehrsmittel	Strecke	Startzeit	km
Dienstag	08.09.2020	PkWN _{Neu}	B44 Rödelheim-Ostend	07:09	7,86
Dienstag	08.09.2020	PkWN _{Neu}	B44 Ostend-Rödelheim	07:33	8,37
Dienstag	08.09.2020	PkWN _{Neu}	B44 Rödelheim-Ostend	08:05	7,88
Dienstag	08.09.2020	PkWN _{Neu}	B44 Ostend-Rödelheim	08:36	8,31
Dienstag	08.09.2020	PkWN _{Neu}	A66 Rödelheim-Ostend	09:08	10,60
Dienstag	08.09.2020	PkWN _{Neu}	A66 Ostend-Rödelheim	09:49	11,19
Dienstag	08.09.2020	PkWN _{Neu}	A66 Rödelheim-Ostend	10:17	10,65
Dienstag	08.09.2020	PkWN _{Neu}	A66 Ostend-Rödelheim	10:46	11,19
Dienstag	08.09.2020	PkWN _{Neu}	B44 Rödelheim-Ostend	11:10	7,97
Dienstag	08.09.2020	PkWN _{Neu}	B44 Ostend-Rödelheim	11:34	8,43
Dienstag	08.09.2020	PkWA _{Alt}	A66 Rödelheim-Ostend	14:08	10,61
Dienstag	08.09.2020	PkWA _{Alt}	A66 Ostend-Rödelheim	14:38	11,30
Dienstag	08.09.2020	PkWA _{Alt}	A66 Rödelheim-Ostend	15:05	10,65
Dienstag	08.09.2020	PkWA _{Alt}	A66 Ostend-Rödelheim	15:38	11,31
Dienstag	08.09.2020	PkWA _{Alt}	B44 Rödelheim-Ostend	16:07	7,94
Dienstag	08.09.2020	PkWA _{Alt}	B44 Ostend-Rödelheim	16:35	8,37
Dienstag	08.09.2020	PkWA _{Alt}	B44 Rödelheim-Ostend	17:07	7,99
Dienstag	08.09.2020	PkWA _{Alt}	B44 Ostend-Rödelheim	17:33	8,39
Donnerstag	10.09.2020	Fahrrad	Nebenstrecke Ostend-Rödelheim	09:21	7,93
Donnerstag	10.09.2020	Fahrrad	Nebenstrecke Rödelheim-Ostend	09:59	7,93
Donnerstag	10.09.2020	Fahrrad	Nebenstrecke Ostend-Rödelheim	10:34	7,87
Donnerstag	10.09.2020	Fahrrad	Nebenstrecke Rödelheim-Ostend	11:32	7,96
Donnerstag	10.09.2020	Fahrrad	Nebenstrecke Ostend-Rödelheim	12:10	7,95
Donnerstag	10.09.2020	Fahrrad	Nebenstrecke Rödelheim-Ostend	13:54	7,97
Donnerstag	10.09.2020	Fahrrad	Nebenstrecke Ostend-Rödelheim	14:30	7,96
Donnerstag	10.09.2020	Fahrrad	Hauptstrecke Rödelheim-Ostend	15:10	7,96
Donnerstag	10.09.2020	Fahrrad	Hauptstrecke Ostend-Rödelheim	15:45	8,36
Donnerstag	10.09.2020	Fahrrad	Hauptstrecke Rödelheim-Ostend	16:21	7,94
Donnerstag	10.09.2020	Fahrrad	Nebenstrecke Ostend-Rödelheim	16:59	7,96
Freitag	11.09.2020	PkWA _{Alt}	B44 Rödelheim-Ostend	07:16	7,92
Freitag	11.09.2020	PkWA _{Alt}	B44 Ostend-Rödelheim	07:39	8,40
Freitag	11.09.2020	PkWA _{Alt}	B44 Rödelheim-Ostend	08:08	7,80
Freitag	11.09.2020	PkWA _{Alt}	B44 Ostend-Rödelheim	08:35	8,46
Freitag	11.09.2020	PkWA _{Alt}	A66 Rödelheim-Ostend	09:04	10,73
Freitag	11.09.2020	PkWA _{Alt}	A66 Ostend-Rödelheim	09:35	11,19
Freitag	11.09.2020	PkWA _{Alt}	A66 Rödelheim-Ostend	10:01	10,71
Freitag	11.09.2020	PkWA _{Alt}	A66 Ostend-Rödelheim	10:32	11,25
Freitag	11.09.2020	PkWA _{Alt}	B44 Rödelheim-Ostend	10:53	7,90
Freitag	11.09.2020	PkWA _{Alt}	B44 Ostend-Rödelheim	11:18	8,34

Anhang 7: Stationäre Messungen im Rahmen der Felduntersuchungen in Deutschland

Wochentag	Datum	Messstelle	Messzeit
Dienstag	04.08.2020	Lorscher Straße	08:00-13:00
		Thudichumstraße	14:00-19:00
Mittwoch	05.08.2020	Thudichumstraße	08:00-13:00
		Lorscher Straße	14:00-19:00
Donnerstag	06.08.2020	Reuterweg	08:00-13:00
		Miquelallee	14:00-19:00
Freitag	07.08.2020	Miquelallee	08:00-13:00
		Reuterweg	14:00-19:00
Dienstag	15.09.2020	Reuterweg	08:00-13:00
		Reuterweg	14:00-19:00
Mittwoch	16.09.2020	Miquelallee	08:00-13:00
		Miquelallee	14:00-19:00
Donnerstag	17.09.2020	Lorscher Straße	08:00-13:00
		Thudichumstraße	14:00-19:00
Freitag	18.09.2020	Thudichumstraße	08:00-12:30
		Lorscher Straße	14:00-19:00

Anhang 8: Städtebauliche Eigenschaften

Städtebau	Codierung
Streckenverlauf	0 = nein, 1 = ja
Bauweise	0 = keine Bebauung, 1 = offen, 2 = halboffen, 3 = geschlossen
Höhe	0 = keine Gebäude, 1 = niedrig, 2 = mittel, 3 = hoch, 4 = sehr hoch (Hochhaus)
Stb Typ	0 = keine Bebauung, 1 = Block (Eingänge an der Straße), 2 = Hof (Eingänge nicht an der Straße), 3 = Reihe (Lange Seite d.h. Eingänge zur Straße), 4 = Zeile (Kurze Seite an der Straße, Eingänge), 5 = Solitär, 6 = Mischung/uneindeutig
Nutzung	0 = uneindeutig/keine Nutzung, 1 = Wohnen (EFH), 2 = Wohnen (MFH), 3 = Gemischte Nutzung, 4 = Gemischte Nutzung (Innenstadt), 5 = Gewerbe/Industrie, 6 = Grünflächen (inkl. Sport), 7 = Brücke, 8 = Unterführung, 9 = Verkehr, 10 = Fußgängerzone, 11 = Baustelle
Straße	1 = Weg (≤ 5 m), 2 = Schmale ... (6 bis 15 m) (Straßenraum war wirklich nur Bebauung, Gehweg, Fahrbahn, Gehweg, Bebauung), 3 = normale ... (16 bis 22 m) (Gehweg und 2 Spuren), 4 = weite Straße (23 bis 30 m) (Gehweg, Parkstreifen, Fahrbahn (teilw. mehrere Fahrstreifen), Gehweg, Parken, Bebauung), 5 = sehr weite Straße (> 30 m)
Straßen m	Breite des Straßenraumes (ca., gemessen)
Homogenität	0 = nicht vorhanden, 1 = kleinere Straßenbäume, Büsche oder Sträucher, 2 = große Straßenbäume ja groß
Straßengrün	0 = nicht vorhanden, 1 = kleinere Straßenbäume, Büsche oder Sträucher, 2 = große Straßenbäume ja groß
Randgrün	0 = nein, 1 = ja wenig, 2 = ja normal, 3 = ja viel
Verkehrsbelastung	0 = keine, 1 = geringe, 2 = normale, 3 = hohe, 4 = sehr hohe Verkehrsbelastung

Anhang 9: Durchschnittliche Belastungswerte UFP in Abhängigkeit der Verkehrsmittelwahl (Deutschland)

Verkehrsmittel	LDSA [$\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$]	Belastung in Bezug auf Pkw _{Neu}	Partikelanzahl UFP [$\#/\text{cm}^3$]	Belastung in Bezug auf Pkw _{Neu}	Partikelmasse UFP [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Belastung in Bezug auf Pkw _{Neu}	Partikelgröße UFP [nm]	Belastung in Bezug auf Pkw _{Neu}
Pkw _{Neu}	23,65	-	16.266	-	2,03	-	33,71	-
Pkw _{Alt}	34,20	+50%	24.133	+50%	2,63	+30%	33,57	+/-0%
Fahrrad	28,56	+20%	23.651	+45%	1,51	-25%	24,01	-29%
S-Bahn	18,68	-20%	9.760	-40%	2,05	+/-0%	38,52	+14%
Bus, U-Bahn, Tram	24,35	+3%	14.609	-10%	2,16	+6%	36,28	+8%

Anhang 10: Durchschnittliche Partikelmasse PM_{2,5} und PM₁₀ in Abhängigkeit der Verkehrsmittelwahl (Deutschland)

Verkehrsmittel	PM _{2,5} [$\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$]	Belastung in Bezug auf Pkw _{Neu}	PM ₁₀ [$\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$]	Belastung in Bezug auf Pkw _{Neu}
Pkw _{Neu}	4,22	-	8,24	-
Pkw _{Alt}	4,40	+4%	5,69	-31%
Fahrrad	7,03	+67%	15,95	+94%
S-Bahn	14,97	+355%	27,00	+328%
Bus, U-Bahn, Tram	11,59	+275%	21,93	+266%

Anhang 11: Durchschnittliche Belastungswerte UFP in Abhängigkeit der Verkehrsmittel- und Routenwahlwahl (Deutschland)

Verkehrsmittel und Route		LDSA [$\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$]	Belastungs- differenz	Partikel- anzahl UFP [#/ cm^3]	Belastungs- differenz	Partikel- masse UFP [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Belastungs- differenz	Partikel- größe UFP [nm]	Belastungs- differenz
Pkw _{Neu}	B44	23,62	-	16.686	-	2,09	-	34,17	-
	A66	23,68	+/-0% ¹⁾	15.845	-5% ¹⁾	1,96	-6% ¹⁾	33,26	-3% ¹⁾
Pkw _{Alt}	B44	33,45	+42% ¹⁾	22.975	+38% ¹⁾	2,75	+32% ¹⁾	34,97	+2% ¹⁾
	A66	34,95	+4% ²⁾	25.290	+10% ²⁾	2,52	-8% ²⁾	32,17	-8% ²⁾
Fahrrad	B44	34,34	+45% ¹⁾	29.173	+75% ¹⁾	1,77	-15% ¹⁾	23,03	-33% ¹⁾
	Nebenstrecke	23,26	-32% ³⁾	18.589	-36% ³⁾	1,26	-28% ³⁾	24,91	+8% ³⁾
S-Bahn		18,68	-21% ¹⁾	9.760	-42% ¹⁾	2,05	-2% ¹⁾	38,52	+13% ¹⁾
Bus, U-Bahn, Tram		24,35	+3% ¹⁾	14.609	-12% ¹⁾	2,16	+3% ¹⁾	36,28	+6% ¹⁾

1) In Bezug auf Pkw_{Neu} - B44

2) In Bezug auf Pkw_{Alt} - B44

3) In Bezug auf Fahrrad - B44

Anhang 12: Durchschnittliche Partikelmassen PM_{2,5} und PM₁₀ in Abhängigkeit der Verkehrsmittel- und Routenwahl (Deutschland)

Verkehrsmittel und Route		PM _{2,5} [$\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$]	Belastungs- differenz	PM ₁₀ [$\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$]	Belastungs- differenz
Pkw _{Neu}	B44	4,54	-	8,92	-
	A66	3,88	-15% ¹⁾	7,51	-16% ¹⁾
Pkw _{Alt}	B44	4,32	-5% ¹⁾	5,80	-35% ¹⁾
	A66	4,48	+4% ²⁾	5,57	-0% ²⁾
Fahrrad	B44	6,84	+51% ¹⁾	13,79	+55% ¹⁾
	Nebenstrecke	7,21	+5% ³⁾	17,93	+30% ³⁾
S-Bahn		14,97	+230% ¹⁾	27,00	+203% ¹⁾
Bus, U-Bahn, Tram		11,59	+155% ¹⁾	21,93	+146% ¹⁾

1) In Bezug auf Pkw_{Neu} - B44

2) In Bezug auf Pkw_{Alt} - B44

3) In Bezug auf Fahrrad - B44

Anhang 13: Durchschnittliche inhalede Dosis UFP und Partikelmassen PM_{2,5} und PM₁₀ für die einzelnen Verkehrsmittel und Routen (Deutschland)

Verkehrsmittel und Route		Partikelanzahl UFP [#/cm ³]	Belastungs-differenz	Partikel-masse UFP [µg/m ³]	Belastungs-differenz	PM _{2,5} [µm ² /cm ³]	Belastungs-differenz	PM ₁₀ [µm ² /cm ³]	Belastungs-differenz
Pkw _{Neu}	B44	83.432	-	10,44	-	22,71	-	44,61	-
	A66	81.205	-3% ¹⁾	10,07	+2% ¹⁾	19,88	-12% ¹⁾	38,50	-14% ¹⁾
Pkw _{Alt}	B44	114.873	+38% ¹⁾	13,74	+32% ¹⁾	21,59	-5% ¹⁾	29,01	-35% ¹⁾
	A66	129.613	+55% ²⁾	12,92	+24% ²⁾	22,95	+1% ²⁾	28,56	-36% ²⁾
Fahrrad	B44	620.246	+643% ¹⁾	37,67	+261% ¹⁾	145,34	+540% ¹⁾	293,09	+557% ¹⁾
	Nebenstrecke	429.894	+415% ³⁾	29,21	180% ³⁾	166,81	+635% ³⁾	414,65	+830% ³⁾
S-Bahn		49.473	-41% ¹⁾	10,37	-1% ¹⁾	75,86	+234% ¹⁾	136,86	+207% ¹⁾
Bus, U-Bahn, Tram		132.097	+58% ¹⁾	19,54	+87% ¹⁾	104,78	+561% ¹⁾	198,25	+344% ¹⁾

1) In Bezug auf Pkw_{Neu} - B44

2) In Bezug auf Pkw_{Alt} - B44

3) In Bezug auf Fahrrad - B44

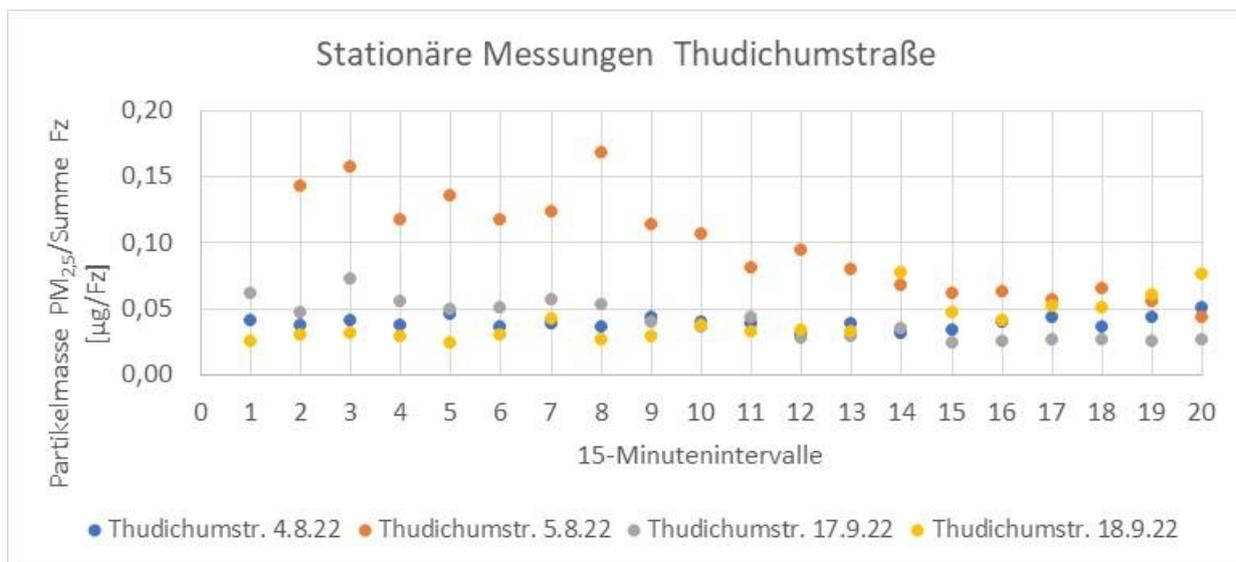
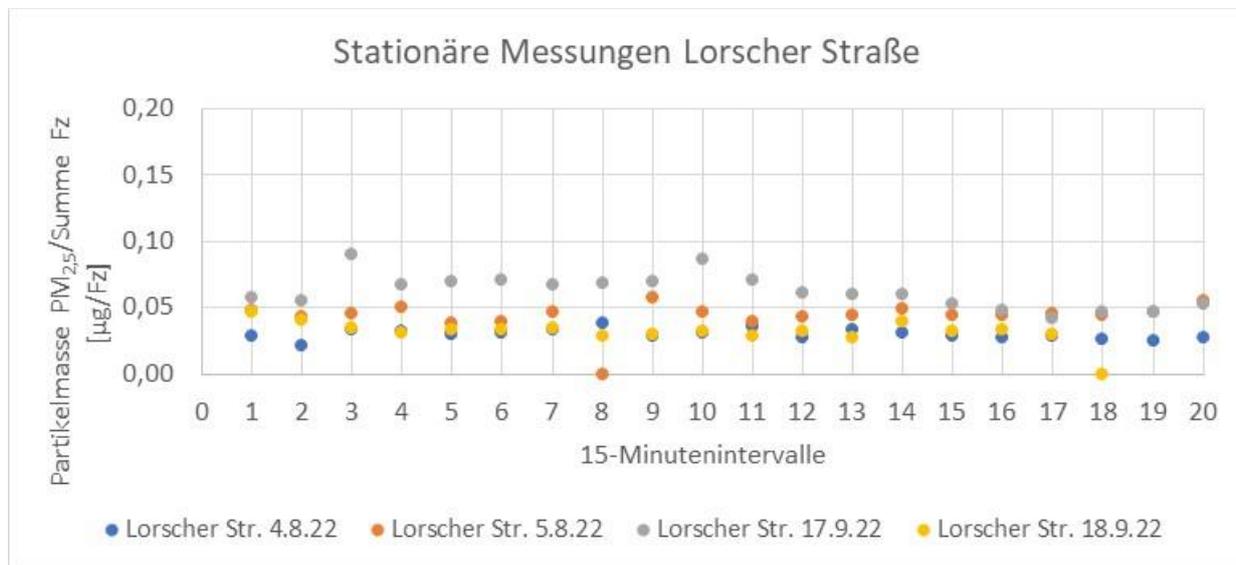
Anhang 14: Durchschnittliche Belastungswerte UFP in Abhängigkeit der Verkehrsmittelwahl (Vietnam)

Verkehrsmittel	LDSA [µm ² /cm ³]	Belastung in Bezug auf Pkw	Partikelanzahl UFP [#/cm ³]	Belastung in Bezug auf Pkw	Partikel-masse UFP [µg/m ³]	Belastung in Bezug auf Pkw	Partikel-größe UFP [nm]	Belastung in Bezug auf Pkw
Pkw	39,55	-	15.930	-	6,06	-	47,69	-
Bus	90,04	+128%	51.514	+223%	8,00	+32%	36,37	-24%
Motorrad	476,67	+1.105%	360.903	+2.166%	28,65	+372%	27,41	-43%
Fahrrad	426,49	+978%	308.963	+1.840%	28,96	+578%	28,05	-41%
Zu Fuß	211,97	+436%	177.134	+1.012%	10,86	+79%	25,01	48%
Wartevorgang Bushaltestelle	182,29	+361%	122.081	+666%	13,58	+124%	31,77	-33%

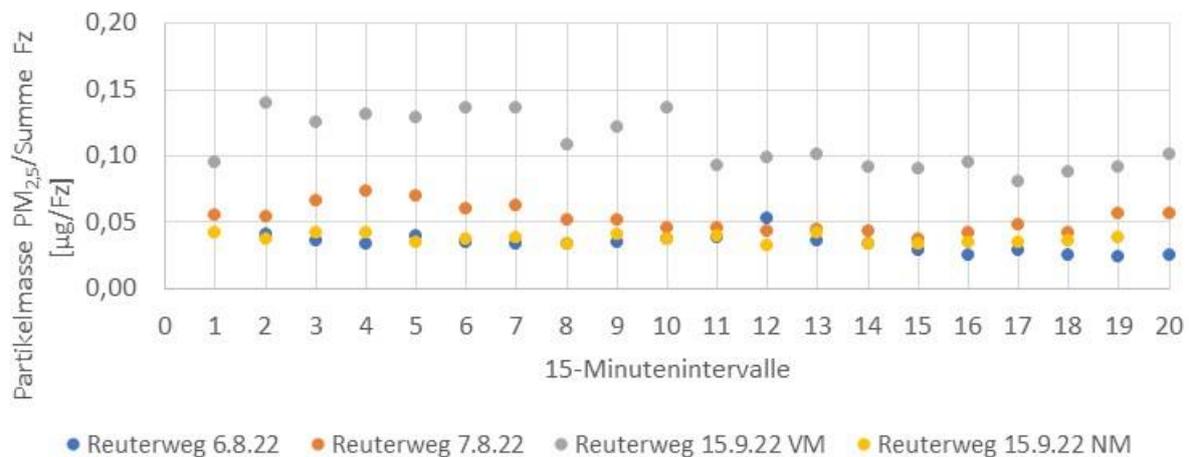
Anhang 15: Erfassung von Stickoxiden während stationärer Messungen

Wochentag	Datum	Messstelle	Messzeit
Dienstag	04.08.2020	Lorscher Straße	08:15-13:00
		Thudichumstraße	14:00-15:00
Mittwoch	05.08.2020	Thudichumstraße	-
		Lorscher Straße	-
Donnerstag	06.08.2020	Reuterweg	08:30-12:30
		Miquelallee	14:00-19:00
Freitag	07.08.2020	Miquelallee	-
		Reuterweg	-
Dienstag	15.09.2020	Reuterweg	-
		Reuterweg	-
Mittwoch	16.09.2020	Miquelallee	08:00-19:00
		Miquelallee	
Donnerstag	17.09.2020	Lorscher Straße	08:00-13:00
		Thudichumstraße	14:00-17:45
Freitag	18.09.2020	Thudichumstraße	-
		Lorscher Straße	-

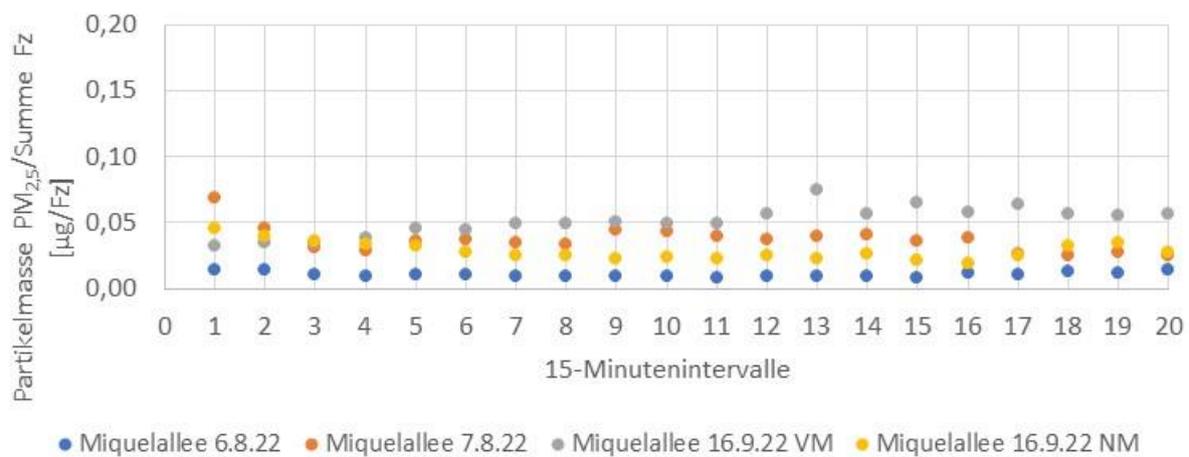
Anhang 16: Ergebnisse stationärer Messungen PM_{2,5}



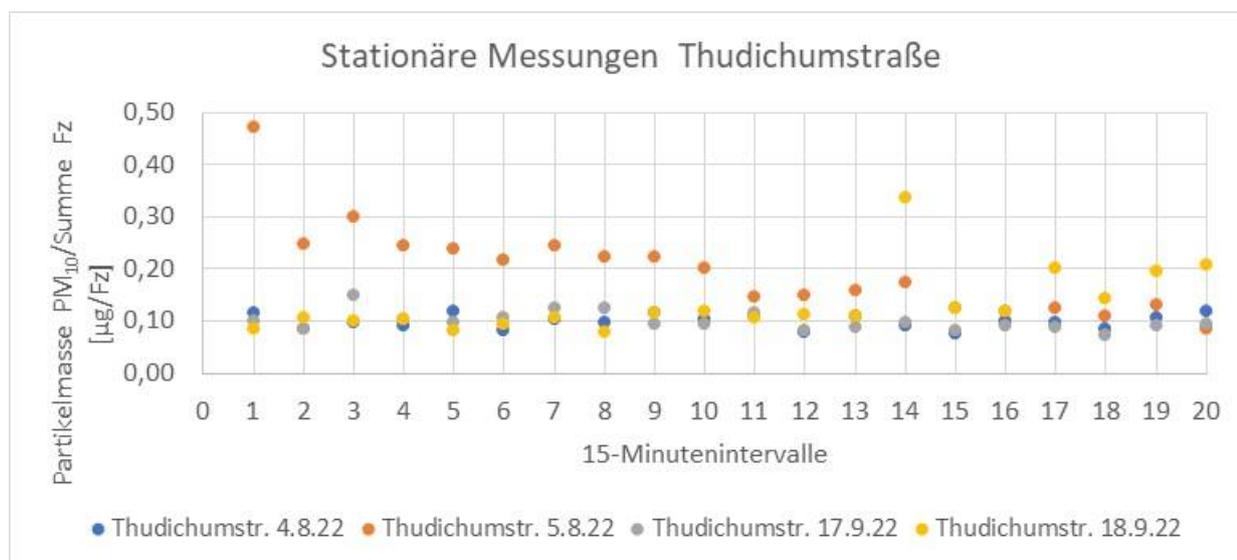
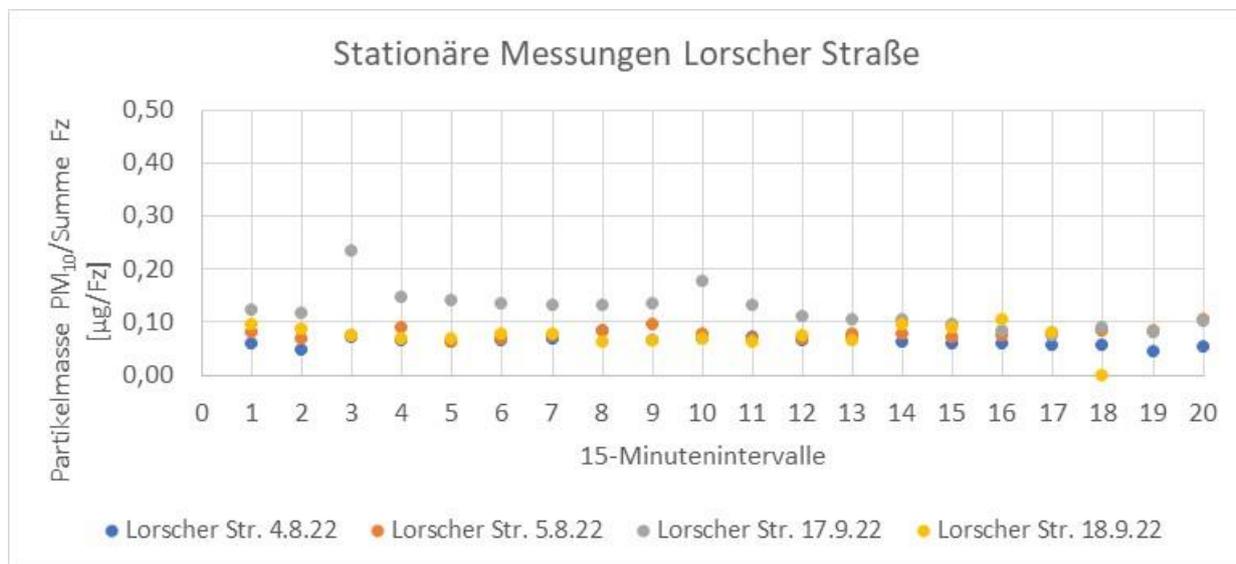
Stationäre Messungen Reuterweg



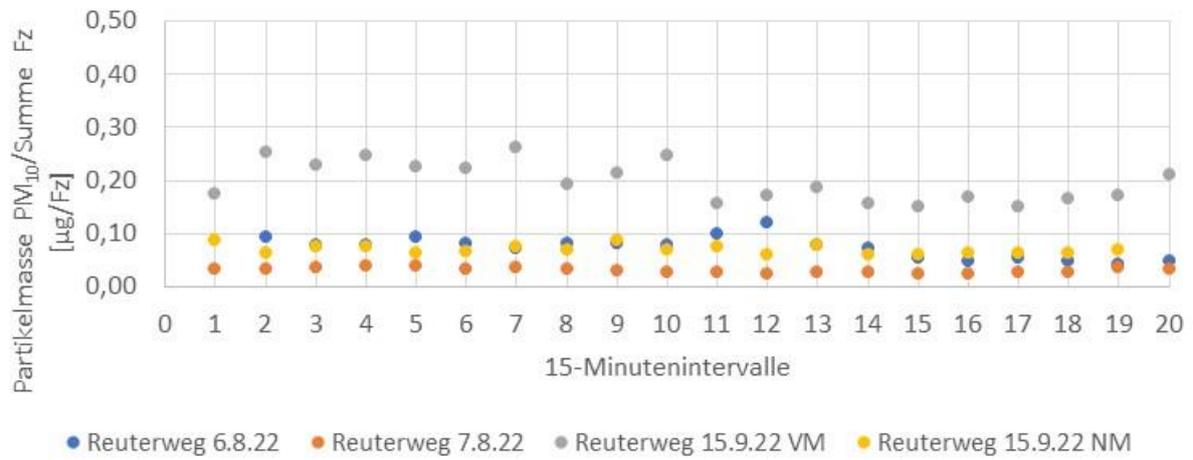
Stationäre Messungen Miquelallee



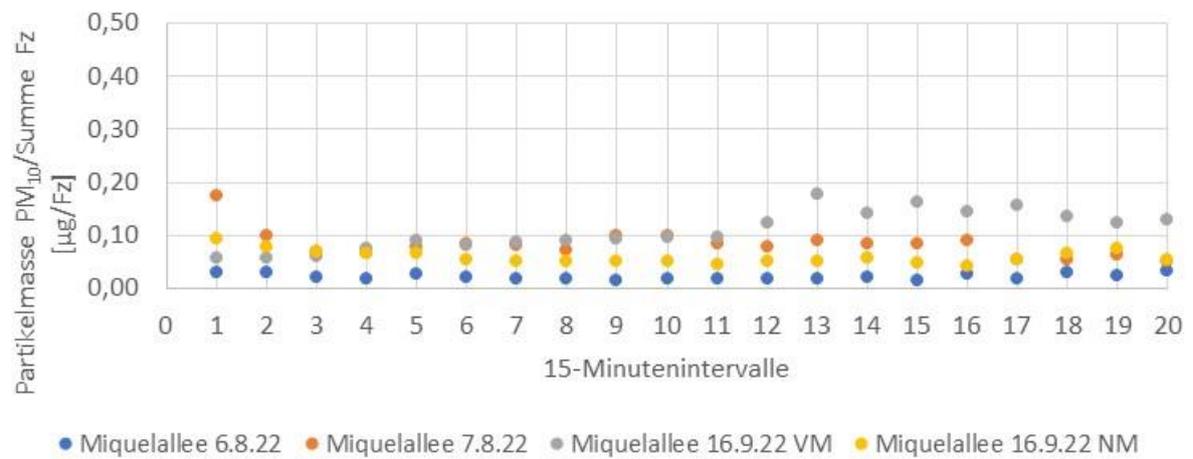
Anhang 17: Ergebnisse stationärer Messungen PM₁₀



Stationäre Messungen Reuterweg



Stationäre Messungen Miquelallee



Quellenverzeichnis - Anhang

Envilyse o.J.: Direkte Messung von NO₂ – Modell 405nm NO₂/NO/NO_x MonitorTM. Online verfügbar unter: <https://envilyse.de/wp-content/uploads/2017/06/Datenblatt-2B-Modell-405nm-05.pdf> (zuletzt geprüft: 17.09.2021)

Kulkarni, P, P A Baron, and K Willeke. 2011. Aerosol Measurement: Principles, Techniques, and Applications. Wiley. <https://books.google.de/books?id=ETvXooNW4-EC>.

TSI o. J. a: Fundamentals of Condensation Particle Counters (CPC) and Scanning Mobility Particle SizersTM. Online verfügbar unter: https://tsi.com/getmedia/e85ad416-1608-4e0e-aa12-dd7a8cf5393d/Fundamentals_on_CPC_and_SMPS_CPC-003-A4-web?ext=.pdf. (zuletzt geprüft: 17.09.2021)

TSI o. J. b: Measuring Nanoparticle Exposure. Online verfügbar unter: <https://www.kenelec.com.au/wp-content/uploads/2018/04/TSI-NSAM-001-Measuring-Nanoparticle-Exposure-AppNote.pdf> (zuletzt geprüft: 17.09.2021)