

COVID-19 Pandemie, Luftverschmutzung und Gesundheit

Literaturanalyse und Bewertung

Prof. Dr. med. Dr. rer. nat. H.-Erich Wichmann

Direktor d. Instituts für Epidemiologie i.R.
Helmholtz Zentrum München – Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt

und
o. Professor für Epidemiologie i.R.,
Ludwig Maximilians Universität, München

Stand 20.2.2021

-

Inhalt

Zusammenfassung

Einleitung

1._Entwicklung der Schadstoffbelastung und der COVID-19 Pandemie in 2020

1.1_Immission in 2020

- Deutschland
- Europa
- USA
- China

1.2_Entwicklung der COVID-19 Pandemie in 2020

- Deutschland
- Weltweit

2._Auswirkung der Schadstoffreduktion während der Pandemie auf die Sterblichkeit ohne Berücksichtigung von COVID-19 Patienten

- China bis Anfang März 2020
- Weltweit bis Mitte Mai 2020

3._Luftschadstoffe und Risiken für Patienten mit COVID-19

- Definitionen im Zusammenhang mit COVID-19
- Luftschadstoffe und Risiken für COVID-19
- USA
- Weltweit (global und regional)
- Niederlande
- China
- England
- Sonstiges

4._zu beachten: Soziale Benachteiligung, Gesundheitsprobleme und COVID-19

- Definitionen
- Sozioökonomische Ungleichheit und COVID-19
- Internationale Metaanalyse
- USA
- England/ Vereinigtes Königreich
- Deutschland

5._Literatur

Zusammenfassung

Es wurde eine Literaturrecherche durchgeführt, die den Wissensstand zu möglichen ungünstigen Einflüssen von Luftschadstoffen auf das Krankheitsgeschehen in der COVID-19 Pandemie zusammenstellen und bewerten soll. Hieraus lässt sich folgende Einschätzung ableiten:

Durch die Maßnahmen zur Eindämmung der Pandemie ergibt sich in Abhängigkeit von der Strenge der Maßnahmen ein deutlicher Rückgang der NO₂-Immission, der in Deutschland während des Lockdown im Frühjahr 2020 ca. 20-30% betrug und in anderen Ländern teilweise noch stärker ausfiel. Für Feinstaub war der Rückgang schwächer, da hier der Beitrag des Verkehrs kleiner ist als bei NO₂.

Methodisch erscheint es schwierig, für den Zeitraum von Lockdown-Maßnahmen mit Hilfe modellierter Tagesmittelwerte Kurzzeitwirkungen auf die Gesundheit zu berechnen. Sinnvoller wäre es, bei Vorliegen vollständiger Immissions- und Mortalitätsdaten die Auswirkungen der Schadstoffreduktion für das gesamte Jahr 2020 zu analysieren. Man kann allerdings davon ausgehen, dass der Rückgang der Immission sich günstig auf die Gesundheit auswirkt, nur ist das Ausmaß dieses Effekts derzeit nicht seriös abschätzbar.

Es gibt mehrere Studien, die einen Anstieg von COVID-19 Erkrankungen oder Sterbefällen bei erhöhter Langzeitbelastung durch PM_{2,5} (und in schwächerem Umfang durch NO₂) finden. Diese Ergebnisse basieren allerdings überwiegend auf „ökologischen“ Analysen mit aggregierten Daten, die inhärent deutliche Limitationen aufweisen und für Fehlschlüsse anfällig sind. Dennoch liefern diese Studien insgesamt Hinweise auf einen adversen Effekt der Luftschadstoffbelastung. Es ist wünschenswert, möglichst bald größere Studien mit Individualdaten durchzuführen, die diese Limitationen vermeiden.

Analysen des Einflusses der sozioökonomischen Situation ergeben, dass benachteiligte Bevölkerungsgruppen während der Pandemie zT stark erhöhte Erkrankungs- und Sterberisiken für COVID-19 aufweisen. Als wichtige Ursache konnte dabei der oft langandauernde Kontakt mit Infizierten identifiziert werden. Diese Gruppen sind häufiger in Berufen tätig, die eine Anwesenheit am Arbeitsplatz erforderlich machen. Hinzu kommen engere Kontakte in beengten Wohnverhältnissen und insgesamt ein schlechterer Gesundheitszustand dieser Gruppen, mit höherer Anfälligkeit auch für Infektionen. Das stark erhöhte Risiko durch die sozioökonomischen Bedingungen zeigt sich besonders deutlich für ethnische Minderheiten wie Farbige und Hispanics in den USA und Asiaten in UK. Aber auch für Deutschland gibt es erste Hinweise, die in diese Richtung gehen.

Nun leben sozioökonomisch Benachteiligte oftmals in Wohngebieten mit schlechter Luftqualität. Wegen dieser engen Korrelation ist der Nachweis eines eigenständigen Risikos durch Luftschadstoffe zusätzlich zum sehr starken Risiko durch die Lebensbedingungen dieser Gruppe methodisch schwierig und gelingt derzeit nicht. Im Gegenteil, die einzige Studie aus England, die diese Abgrenzung mit detaillierten Daten versucht hat, findet, dass der zunächst beobachtete Zusammenhang zwischen erhöhter Luftschadstoffexposition und COVID-19 verschwindet, wenn man die Ethnizität in die Analyse einbezieht.

Insgesamt ergibt sich, dass eine spezifische, eigenständige Rolle der Luftschadstoffe bei COVID-19 nicht nachweisbar ist. Die bekannten Gesundheitsrisiken von PM_{2,5} für Herz-Kreislauf Erkrankungen und Atemwegserkrankungen, vor allem für Ältere, können durchaus auch COVID-19 Patienten betreffen, deren Risiken für schwere Verläufe oder das Versterben ja ebenfalls stark mit dem Alter zunehmen.

Aufgrund dieser Situation erscheint es sinnvoll und erforderlich, die Luftschadstoffkonzentrationen unabhängig von COVID-19 mit Nachdruck weiter zu reduzieren, zumal die neuere Literatur immer deutlicher zeigt, dass die derzeit in Europa gültigen Grenzwerte keinen ausreichenden Gesundheitsschutz gewährleisten (*Hofmann et al. 2020*). Eigenständige Maßnahmen in Hinblick auf die COVID-19 Pandemie lassen sich derzeit wissenschaftlich nicht begründen.

Einleitung

Bedingt durch die COVID-19 Pandemie hat sich im Jahr 2020 das Leben in vielen Bereichen grundlegend verändert. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass der Rückgang industrieller und verkehrsabhängiger Emissionen zu einer Verbesserung der Luftqualität und dadurch zu einer Verminderung der negativen gesundheitlichen Auswirkung der Immissionsbelastung geführt hat. Gleichzeitig wird diskutiert, ob durch die Luftverschmutzung der Verlauf von COVID-19 Infektionen negativ beeinflusst werden könnte.

Im Folgenden wird die hierzu erschienene Literatur ausgewertet. Diese bezieht sich überwiegend auf die erste Jahreshälfte 2020, vor allem auf die Zeitraum des ersten Lockdown der je nach Land von Februar bis April 2020 stattfand.

1. Entwicklung der Schadstoffbelastung und der COVID-19 Pandemie in 2020

1.1 Immission in 2020

Deutschland

Für Deutschland wurde in einem Bericht des *UBA (2020)* der Lockdown im März/April 2020 ausgewertet, aus dem hier in verkürzter Form zitiert werden soll. Danach waren die bundesweit strengen Maßnahmen zur Eindämmung des Corona-Virus vom 23.3.2020 bis 19.4.2020 mit vermindertem Straßenverkehr und verringerten Industrieprozessen verbunden. Grundsätzlich gilt: Eine Reduzierung von Emissionen hat immer eine Verringerung der Schadstoffe in der Luft zur Folge. Allerdings bedeutet dies nicht automatisch immer und überall eine spürbare Verringerung der Luftbelastung. Denn: Meteorologische Effekte überlagern die Auswirkungen der Emissionsminderung.

Welche Auswirkungen hat die Corona-Krise auf die Stickstoffdioxid (NO₂)-Belastung?

Die Hauptquellen (Emissionen) der Stickstoffdioxid-Belastung sind der Straßenverkehr und die Energieerzeugung. Eine Methode, um in Datenanalysen den Einfluss des Wetters auf die Konzentrationswerte zu minimieren, ist es, die Konzentrationswerte vor und während des Lockdowns zu vergleichen, die an Tagen mit ähnlichen meteorologischen Bedingungen gemessen wurden. Neben der Wetterbereinigung muss somit auch der durch die Emissionsänderungen bedingte Trend aus den Datenreihen eliminiert werden. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass die mittleren verkehrsnahen NO₂-Konzentrationen einen deutlichen - in den letzten drei Jahren besonders stark ausgeprägten – Rückgang zeigen. Ohne Berücksichtigung dieses emissionsbedingten Trends würde der errechnete „Corona-Effekt“ zu hoch ausfallen.

Erste Untersuchungen in einigen Bundesländern zeigen folgende Ergebnisse: Im Zeitraum des Lockdowns ging der Straßenverkehr in den Städten um 30 bis 50 Prozent zurück. Die an *verkehrsnahen Messstationen gemessenen NO₂-Konzentrationen sanken im gleichen Zeitraum um 15 bis 40 Prozent*. Eine Analyse des Deutschen Wetterdienstes, bei der die Parameter Windgeschwindigkeit, Temperatur, Ozon und Trend berücksichtigt wurden, ermittelt einen *Lockdown-bedingten NO₂-Rückgang von 23 ±6 Prozent*. In Abhängigkeit des jeweiligen Verkehrsrückgangs und der meteorologischen Randbedingungen fielen die Auswirkungen des Lockdowns auf die NO₂-Konzentrationen regional und lokal sehr unterschiedlich aus.

Die derzeit aktuellste Auswertung für die bundesweite Schadstoffentwicklung in 2020 (Stand 16.2.2021) ist dem Bericht *UBA (2021)* zu entnehmen. Danach werden 2020 deutlich weniger als zehn Städte von der Überschreitung des NO₂-Grenzwertes betroffen sein - im Jahr 2019 waren es noch 25 Städte. Modellierungen zeigen, dass Softwareupdates und Flottenerneuerung im Jahr 2020 zusammen eine deutliche Minderung von rund drei Mikrogramm NO₂ pro Kubikmeter bewirkten. Davon sind

rund zwei Drittel auf die neuen, deutlich saubereren Fahrzeuge zurückzuführen, ein Drittel auf die Softwareupdates.

Neben Verbesserungen an den Fahrzeugen direkt sanken die mittleren NO₂-Konzentrationen an verkehrsnahen Messstationen im Schnitt um ein weiteres Mikrogramm durch lokale Maßnahmen wie Tempolimits und Fahrverbote sowie den Einsatz schadstoffärmerer Busse, meteorologische Einflüsse, die die Ausbreitung von Luftschadstoffen begünstigen oder verschlechtern, und in geringem Umfang auch die Maßnahmen zur Eindämmung der Corona-Pandemie (*UBA 2021*).

Welche Auswirkungen hat die Corona-Krise auf die Feinstaub (PM₁₀)-Belastung?

Die hohe Zahl und Dichte von Quellen (Emittenten) – vor allem Hausfeuerungsanlagen, Gewerbebetriebe, industrielle Anlagen und der Straßenverkehr – führen in Ballungsräumen und Städten zu einer erhöhten Feinstaubkonzentration. Dabei liefern die Emissionen des Straßenverkehrs - überwiegend aus dem Abrieb von Reifen, Bremsen und dem Straßenbelag - den größten lokalen Beitrag in Städten. Der Straßenverkehr hat jedoch im Vergleich zu den Stickstoffoxiden bei PM₁₀-Feinstaub einen wesentlich geringeren Anteil an den Gesamtemissionen in Deutschland. Insbesondere im Frühjahr kommt mit der Landwirtschaft eine weitere bedeutende Feinstaubquelle hinzu: Bei der Düngung der Felder wird aus gasförmigen Vorläuferstoffen Feinstaub gebildet, der mit dem Wind auch in die Städte transportiert wird. Zudem kann Feinstaub auch natürlichen Ursprungs sein - beispielsweise Saharastaub oder als Folge von Bodenerosion, Wald- und Buschfeuern - und kann über weite Entfernungen nach Deutschland herantransportiert werden.

Kurzfristige Verringerungen nur einzelner Feinstaub-Quellen in Städten können daher keine durchschlagende Konzentrationsverringering erwarten lassen. Der Beitrag anderer Feinstaubquellen kann sogar soweit an Bedeutung gewinnen, dass trotz verringerten Verkehrsaufkommens erhöhte Feinstaubkonzentrationen auftreten. Genau mit dem Beginn des Corona-Lockdowns war dies in vielen Regionen Deutschlands der Fall. Das sehr trockene Hochdruckwetter in diesem Zeitraum verschärfte die Situation zudem. Auswertungen der Bundesländer zeigen denn auch keine oder nur geringfügige positive Auswirkungen des Lockdowns auf die Feinstaubkonzentrationen, was bestätigt, dass der Straßenverkehr mittlerweile nicht mehr der Hauptverursacher ist. Die Konzentrationen anderer Luftschadstoffe wie z.B. NO₂, Ruß oder Ultrafeiner Partikel werden dagegen nach wie vor von Emissionen aus dem Verkehr dominiert und sind daher geeigneter, die Auswirkung verkehrsbedingter Emissionsänderungen auf die Luftqualität aufzuzeigen. (*UBA 2020*).

Nach *UBA (2021)* wurden die Feinstaubgrenzwerte für PM₁₀ und PM_{2,5} deutschlandweit eingehalten. Die außergewöhnlich geringe Feinstaubbelastung im Jahr 2020 ging mit einem extrem milden und feuchten Winter einher: Der Winter 2020 war laut Deutschem Wetterdienst der zweitwärmste seit Aufzeichnungsbeginn und auch die Monate November und Dezember waren milder als normal. Die Maßnahmen zur Eindämmung der Corona-Pandemie hatten nur einen geringen Einfluss auf die Feinstaubkonzentrationen, da der Straßenverkehr im Vergleich zu den Stickstoffoxiden wesentlich weniger zur Feinstaubbelastung beiträgt.

Europa

Die Analyse der Luftschadstoffsituation in 2020 durch die Europäische Umweltbehörde ergibt Folgendes (*EEA 2020*):

In vielen europäischen Ländern, in denen im Frühjahr 2020 Ausgangsbeschränkungen galten, ist die NO₂-Konzentration in diesem Zeitraum um bis zu 60% zurückgegangen. Mitte März 2020 wurden von den meisten europäischen Ländern Lockdown-Maßnahmen ergriffen. Das führte zu einer deutlichen Reduktion bei der Emission von Luftschadstoffen, speziell vom Straßenverkehr.

Mittels Satelliteninstrumenten sind kontinuierliche räumliche Messungen von NO₂ in Europa möglich. Diese liefern typischerweise vertikal integrierte Messwerte für die gesamte Atmosphäre (oder von Teilen) und sind daher nicht direkt vergleichbar mit den bodennahen

Messungen der Überwachungsmessnetze. Um die Veränderungen der beobachteten NO_2 -Konzentrationen durch die Veränderungen der Emission während des Lockdown zu ermitteln ist es erforderlich, die Situation unter den gleichen meteorologischen Bedingungen ohne Lockdown zu simulieren. Dies wurde dadurch erreicht, dass man Satellitenbeobachtungen bei wolkenfreiem Himmel unter Verwendung von Verfahren des Maschinenlernens eingesetzt hat, um die meteorologische Variabilität zu modellieren.

Als Lockdown-Periode wurde der Zeitraum vom 15.3. bis 30. 4.2020 betrachtet, und für diese Zeit wurden die gemessenen Konzentrationen mit den modellierten Konzentrationen verglichen. Die Lockdown-Maßnahmen variierten stark in Europa, sie waren am strengsten in Spanien und Italien und am schwächsten in Schweden. Die stärksten **NO_2 -Reduktionen** traten in Barcelona (-59%), Madrid (-47%), Mailand (-54%), Turin (-47%) und Marseille (-49%) auf. **In Deutschland wurden die stärksten Rückgänge in München (-37%), Bremen (-36%), Berlin (-33%) Hamburg (-28%), und Frankfurt (-27%) beobachtet.**

Um den Effekt der Lockdown-Maßnahmen auf alle in der EU gemessenen NO_2 und PM_{10} Konzentrationen zu ermitteln, wurden ferner die Daten aller Stationen zusammen mit den modellierten Vergleichsdaten ohne Lockdown analysiert. Dabei ergab sich für NO_2 im April 2020 für alle Länder ein deutlicher Rückgang. Dieser betrug im Median zB für Spanien ca. -60% und für **Deutschland** und die Niederlande **ca. -30%**. Auch für PM_{10} gingen die Konzentrationen in allen Ländern zurück, wenn auch weniger stark als bei NO_2 . Der **Rückgang für PM_{10}** betrug im Median zB für Spanien ca. -30% und **für Deutschland ca. -12%**. Dabei ist zu beachten, dass die Abschätzung des Einflusses der Lockdown-Maßnahmen auf PM_{10} komplexer ist und die Ergebnisse ungenauer sind, da die Konzentrationen nicht nur von der Meteorologie und der Emission primärer Partikel aus anthropogenen Quellen abhängen. Sie werden auch von natürlichen Quellen beeinflusst, deren Veränderungen schwer vorherzusagen sind, sowie von Vorläufergasen aus unterschiedlichen Quellen.

USA

Berman et al. (2020) untersuchten die Luftschadstoffsituation in den USA in der COVID-19 Periode (13.3.-21.4.2020) und der vor-COVID-19-Periode (8.1.-12.3.2020). Die Messdaten in diesen Zeiträumen wurden mit entsprechenden historischen Daten aus 2017-2019 auf Ebene der Kreise (Counties) verglichen. Es wurde ein statistisch signifikanter Rückgang der NO_2 -Konzentration um 25,5% beobachtet. $\text{PM}_{2,5}$ zeigte einen schwächeren Abfall.

China

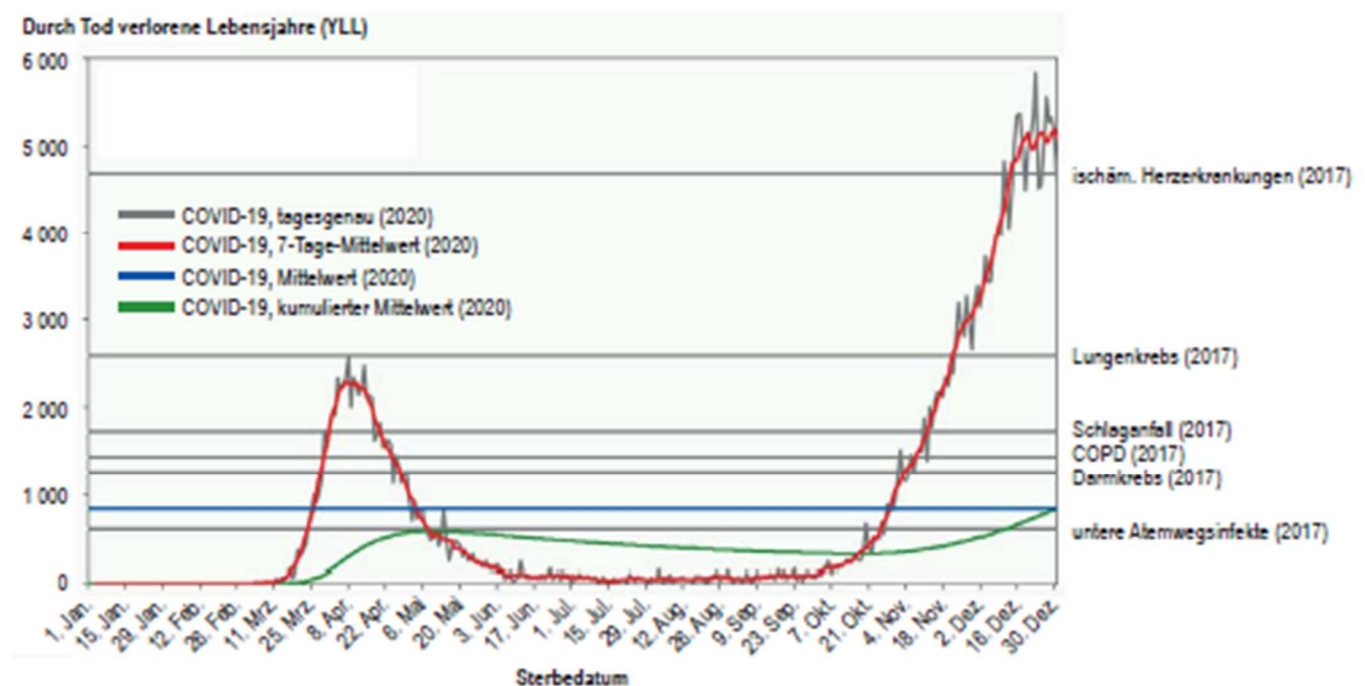
Die Konsequenzen des drastischen Rückgangs von NO_2 und $\text{PM}_{2,5}$ während der „Quarantäne-Periode“ auf die Mortalität wurden in der Studie von **Chen et al. (2020)** analysiert, die weiter unten genauer beschrieben ist. Um den Ausbruch der COVID-19 Pandemie zu kontrollieren, wurden in China sehr restriktive Einschränkungen des Verkehrs und Maßnahmen der Selbst-Isolation ergriffen. Diese Maßnahmen begannen am 23.1.2020 in Wuhan und benachbarten Städten und 2 Tage später in ganz China. Die Autoren definieren die eigentliche Quarantäne-Periode als den Zeitraum vom 10.2. bis 3.3.2020 und den Zeitraum vor der Quarantäne vom 5. bis 20.1.2020. Es ergab sich durch die Quarantäne in den betrachteten 367 Städten in China im Mittel ein Abfall von NO_2 um $12,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und von $\text{PM}_{2,5}$ um $18,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Die Vergleichskonzentrationen werden nicht genau angegeben. Aus Abb. 6.1 B lässt sich aber qualitativ entnehmen, dass NO_2 in der Quarantäne-Periode um ca. 50% zurückging, während der prozentuale Rückgang für $\text{PM}_{2,5}$ deutlich geringer ausfiel.

1.2_Entwicklung der COVID-19 Pandemie in 2020

Deutschland

Die ersten COVID-19 Infektionen in Deutschland wurden im Februar und die ersten Todesfälle im März 2020 registriert. Bis zum Ende des ersten Lockdown Mitte Mai wurden ca. 175.000 Infektionen und ca. 8.000 Todesfälle gemeldet. Nach niedrigen Zunahmen im Sommer kam es ab Oktober 2020 zu einem starken Anstieg, wobei bis Ende 2020 insgesamt ca. 1,8 Millionen Infektionen und ca 35.000 Todesfälle registriert wurden (*Statista 2021*). Insgesamt wurden dem RKI für das Jahr 2020 31.638 Todesfälle mit der Todesursache COVID-19 übermittelt. Durch diese Todesfälle gingen in Deutschland 303.608 Lebensjahre durch COVID-19 verloren. Eine verstorbene Person verlor im Mittel etwa 9,6 Lebensjahre (*Rommel et al. 2021*).

Die zeitliche Entwicklung durch Tod verlorener Lebensjahre (YLL) bei Personen mit COVID-19 im Jahr 2020 in Deutschland ist in Abb. 1.2a dargestellt. Im Herbst und Winter war die Zahl der YLL durch COVID-19 für einige Tage höher als der tagesmittlere YLL infolge wichtiger chronischer Erkrankungen wie Atemwegserkrankungen und Herz-Kreislauf Erkrankungen.



COPD, chronisch-obstruktive Lungenerkrankung

Abb. 1.2a Zeitliche Entwicklung durch Tod verlorener Lebensjahre (YLL) bei Personen mit COVID-19 in Deutschland (Tagesmittelwerte 2020) und aufgrund ausgewählter Todesursachen (Tagesmittelwerte 2017). (Quelle: Rommel et al. 2021 Graphik 1, Meldedaten 2020, Todesursachenstatistik 2017, Sterbetafel 2016/2018)

Mit dem Alter nahm bei Personen mit COVID-19 die Zahl der YLL zu. Bei den 90-Jährigen und Älteren gingen die YLL bei beiden Geschlechtern in absoluten Zahlen stark zurück, relativ betrachtet stiegen die YLL bis ins hohe Alter weiter an (Abb. 1.2b). Die Geschlechterunterschiede im Verlust an Lebenszeit sind dadurch bedingt, dass Männer mit COVID-19 häufiger als Frauen und vermehrt bereits vor Vollendung des sechsten Lebensjahrzehnts versterben. Dies entspricht der Befundlage, nach der sich Frauen etwas häufiger infizieren, Männer aber häufiger bereits in jüngerem Alter schwer erkranken.

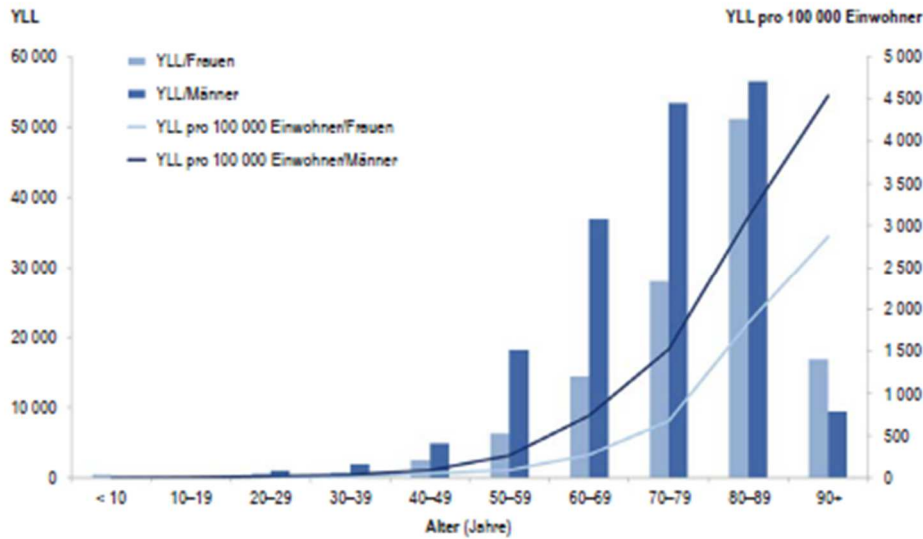
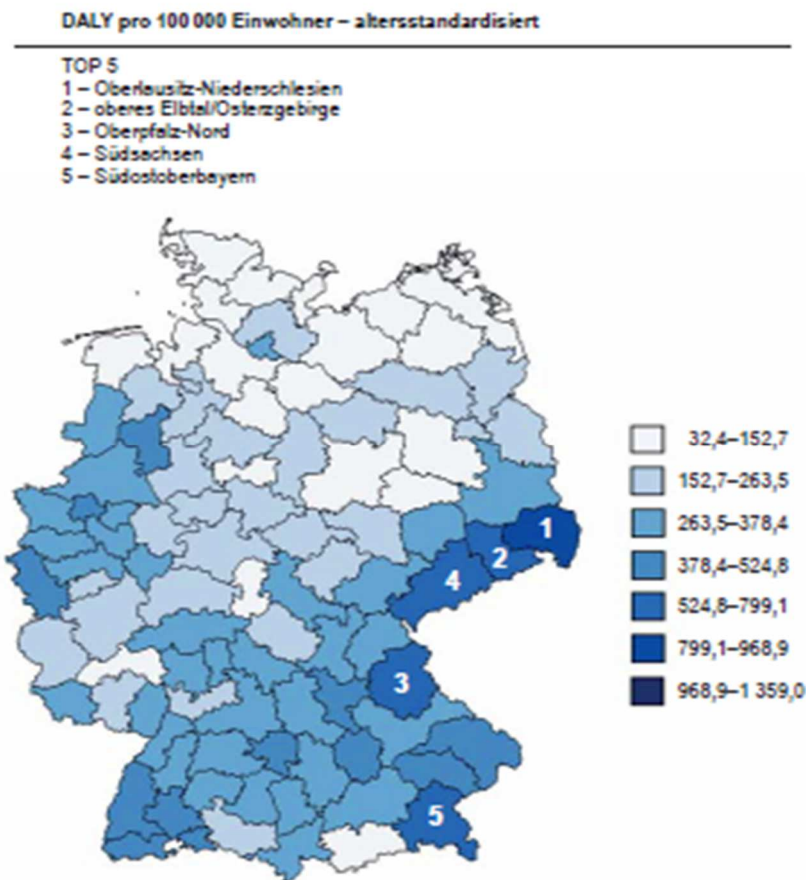


Abb. 1.2b Durch Tod verlorene Lebensjahre (YLL) 2020 bei Personen mit COVID-19 in Deutschland nach Alter und Geschlecht (Anzahl und pro 100 000 Einwohner) (Quelle: Rommel et al. 2021 Graphik 2)

Die Krankheitslast durch COVID-19 war in West und Süddeutschland höher, in Nord- und Nordostdeutschland geringer. Insbesondere in einigen Regionen in Bayern und Sachsen war die Krankheitslast besonders hoch (Abb. 1.2c).



DALY: „disability-adjusted life years“

Abb. 1.2c COVID-19-Krankheitslast insgesamt (DALY) 2020 in Deutschland auf Ebene der Raumordnungsregionen (pro 100 000 Einwohner). (Quelle: Rommel et al. 2021 Graphik 4)

Im Rahmen dieser Analysen wurde geprüft, ob die Gesamtsterblichkeit, ohne Berücksichtigung unterschiedlicher Todesursachen, im Jahr 2020 im Vergleich zu den Vorjahren abweicht. Zur Ermittlung der Übersterblichkeit wurde die Zeitreihe der wöchentlichen Gesamtzahl von Sterbefällen im Zeitraum 2016 und 2020 analysiert (Rommel *et al.* 2021, Abb. 1.2d)

Dabei wurde der Verlauf der Sterbefallzahlen mithilfe eines sinusförmigen saisonalen Musters und mit einem linearen Trend nach den Altersgruppen und insgesamt nachgebildet. Durch diesen linearen Trend wird die demografische Alterung, wie auch die Veränderungen der Lebenserwartung in Deutschland, in den Modellierungen berücksichtigt. In den Wintermonaten zeigt sich in einigen Jahren während der Influenzawelle eine Übersterblichkeit; während der Sommermonate gehen Hitzewellen regelmäßig mit erhöhten Sterbefallzahlen einher.

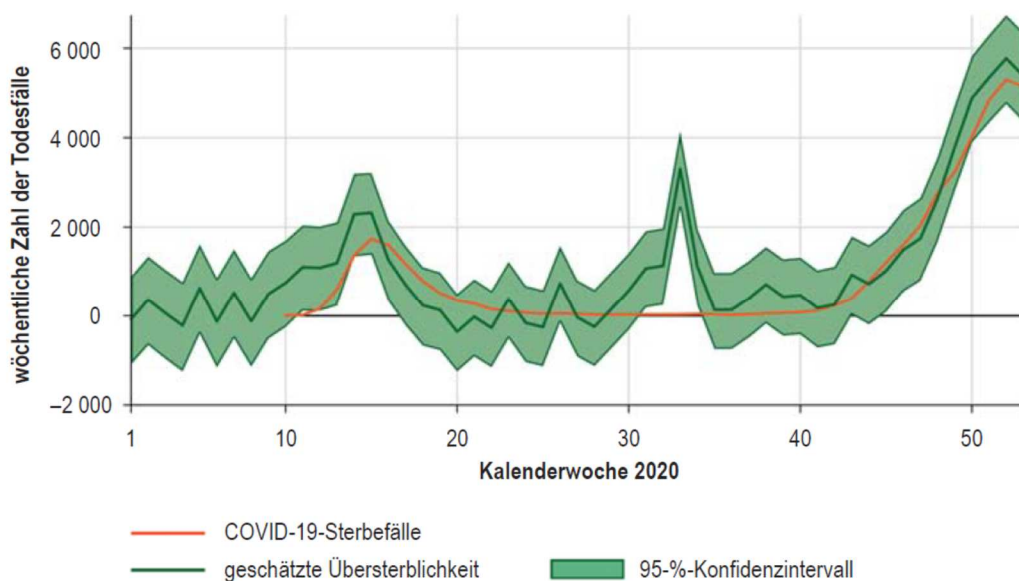


Abb. 1.2d Geschätzte Übersterblichkeit in Deutschland im Jahr 2020 im Vergleich zur Zahl der gemeldeten COVID-19-Todesfälle (Quelle: Rommel *et al.* 2021 eGraphik 4, Destatis 2021 Sonderauswertung zu Sterbefallzahlen)

Die Analyse der Übersterblichkeit legt aber nahe, dass die COVID-19-Pandemie am Ende des Jahres 2020 etwa das Niveau schwerer Influenzawellen erreicht hat. Zudem kann ermittelt werden, inwieweit sich das Sterbegeschehen auch für andere Todesursachen verändert hat und die Übersterblichkeit möglicherweise von gegenläufigen Effekten beeinflusst ist. So gingen die Kontaktbeschränkungen mit einer geringeren Verkehrsunfallsterblichkeit einher, das zögerliche Aufsuchen von Notaufnahmen möglicherweise mit einer erhöhten Herz-Kreislauf-Sterblichkeit (Rommel *et al.* 2021).

Weltweit

Am 31. Dezember 2019 wurde der Ausbruch einer neuen Lungenentzündung mit noch unbekannter Ursache in Wuhan in China bestätigt. Bis Ende 2020 haben sich weltweit ca. 100 Millionen Menschen infiziert, und es sind mehr als 2 Millionen an oder mit COVID-19 gestorben. Genaueres siehe in Johns Hopkins University (2021).

2. Auswirkung der Schadstoffreduktion während der Pandemie auf die Sterblichkeit ohne Berücksichtigung von COVID-19 Patienten

China bis Anfang März 2020

Vorbemerkung: Die Auswirkung der Maßnahmen zur Eindämmung der COVID-19 Pandemie auf die Luftschadstoffbelastung lässt sich besonders gut in China studieren, da hier die Maßnahmen sehr drastisch und auf einen kurzen Zeitraum beschränkt waren. Allerdings wird die Analyse dadurch kompliziert, dass während dieser Zeit das chinesische Neujahrsfest stattfand, das seinerseits üblicherweise mit einer großen Reisetätigkeit verbunden ist, die ihrerseits die Konzentrationen der verkehrsabhängigen Luftschadstoffe beeinflusst.

Die Konsequenzen des drastischen Rückgangs von NO_2 und $\text{PM}_{2.5}$ während der „Quarantäne-Periode“ auf die Mortalität wurden in der Studie von **Chen et al. (2020)** von der Yale School of Public Health analysiert. Um den Ausbruch der COVID-19 Pandemie zu kontrollieren, wurden in China einschneidende Verkehrsbeschränkungen und Maßnahmen der Selbst-Isolation ergriffen. Diese Maßnahmen begannen am 23.1.2020 in Wuhan und benachbarten Städten und 2 Tage später in ganz China.

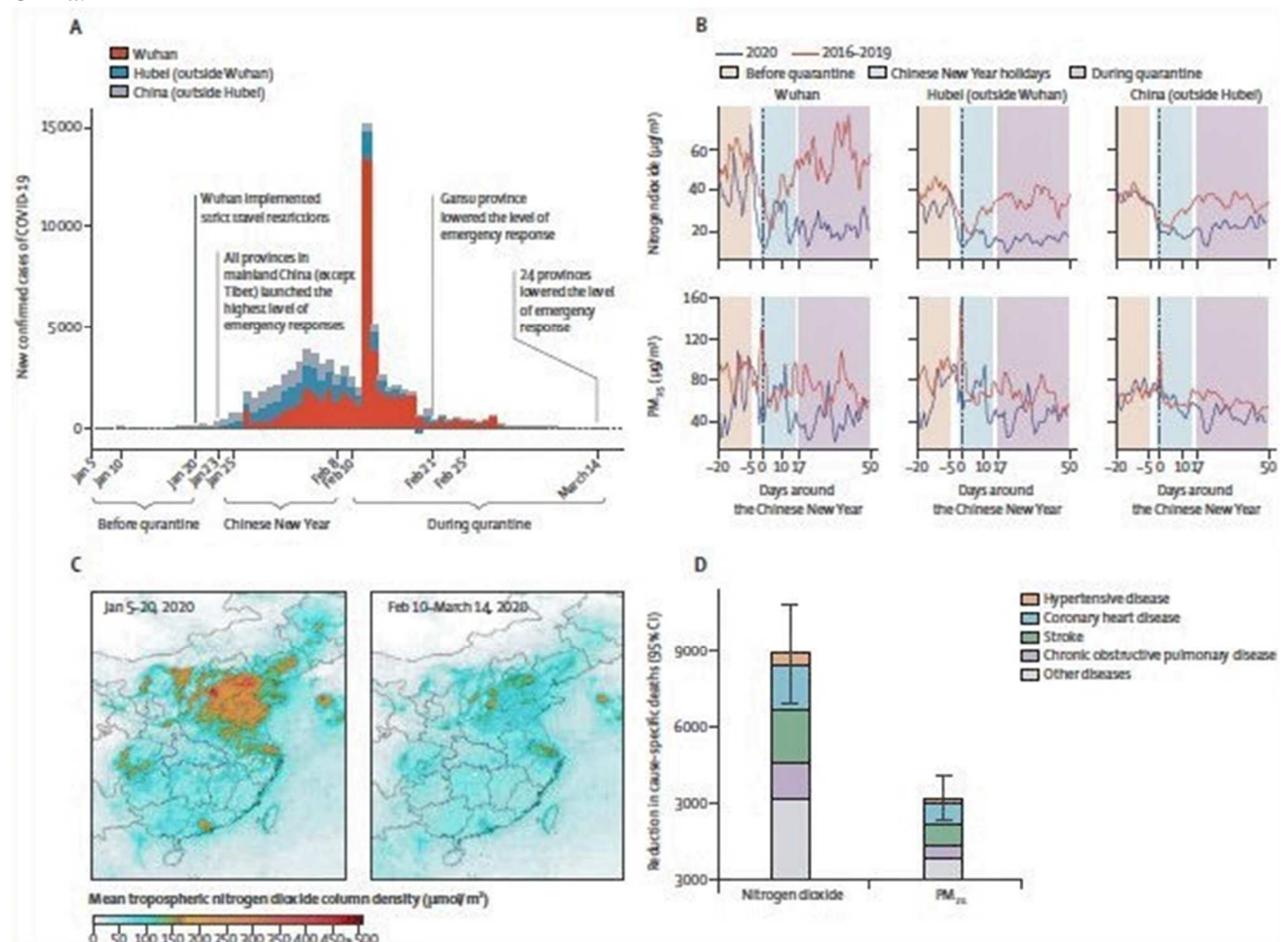


Abbildung 2 Luftschadstoffkonzentrationen und vermiedene Todesfälle während des COVID-19 Ausbruchs in China. (A) Bestätigte COVID-19 Fälle und zeitlicher Verlauf der Quarantäne. (B) Tägliche NO_2 - und $\text{PM}_{2.5}$ Konzentrationen ab 20 Tage vor bis 50 Tage nach dem chinesischen Neujahrsfest 2020 (blau) im Vergleich zu 2016-19 (rot). (C) Mittlere NO_2 Dichte in der Troposphäre vor und während der Quarantäne. (D) Rückgang der Todesfälle in China aufgrund des Rückgangs der Luftverschmutzung während der Quarantäne. (Quelle: Chen et al 2020).

Die Autoren definieren die eigentliche Quarantäne-Periode als den Zeitraum vom 10.2. bis 3.3.2020 und den Zeitraum vor der Quarantäne vom 5. bis 20.1.2020. Sie schließen den Zeitraum vom 21.1. bis 9.2.2020 aus, um eine Beeinflussung der Analyse durch die Aktivitäten und Maßnahmen um das chinesische Neujahrsfest herum zu vermeiden. Für den gesamten Zeitraum wurden die täglichen NO_2 - und $\text{PM}_{2.5}$ Konzentrationen in 367 chinesischen Städten betrachtet. Dann wurde die Luftqualität in der Quarantäne-Periode 2020 mit den Konzentrationen in der gleichen Periode der Jahre 2016-2019 verglichen, wobei gleichzeitig der Beitrag des Langzeitabfalls der Konzentrationen in China während dieser Jahre berücksichtigt wurde (Abb. 2).

Die vermiedenen Todesfälle durch den Rückgang der täglichen NO_2 - und $\text{PM}_{2.5}$ - Konzentrationen wurde für ganz China auf der Grundlage der Konzentrations-Wirkungs-Funktionen für Kurzeffekte berechnet, die in früheren sehr großen Studien in China ermittelt worden waren. Dabei wurden die Gesamtmortalität und die ursachenspezifische Mortalität betrachtet. Es ergab sich durch die Quarantäne in den 367 Städten im Mittel ein Abfall von NO_2 um $12,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und von $\text{PM}_{2.5}$ um $18,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Die Berechnungen ergaben, dass insgesamt in China während der Quarantäne-Periode 8.911 vorzeitige Todesfälle durch den Rückgang von NO_2 und 3.214 vorzeitige Todesfälle durch den Rückgang von $\text{PM}_{2.5}$ vermieden wurden. Die Autoren weisen darauf hin, dass diese Zahlen mit Vorsicht interpretiert werden sollten, da sich die Effekte von NO_2 und $\text{PM}_{2.5}$ auf die Mortalität überlappen. Ferner sind mögliche Effekte auf die Mortalität durch die eingeschränkte Leistungsfähigkeit des Gesundheitssystems während der Quarantäne-Periode und dadurch bedingte verzögerte Behandlungen von Patienten mit chronischen Krankheiten nicht berücksichtigt.

Nach diesen Abschätzungen führten die Interventionen zur Eingrenzung der COVID-19 Pandemie zu Verbesserungen der Luftqualität, die positive Gesundheitseffekte bei den nicht-COVID-19 Todesfällen zur Folge hatten, die möglicherweise die Todesfälle durch COVID-19 in China (4.633 Todesfälle bis 4. Mai 2020) übertroffen haben. Die Arbeit zeigt, wie sich drastische Einschnitte in die Mobilität auf die Luftschadstoffkonzentrationen auswirken können. Dabei sind allerdings Unsicherheiten wegen nicht berücksichtigter meteorologisch bedingter Schwankungen nicht auszuschließen. Eine Übertragung auf die derzeitige COVID-19 Situation in den USA, Europa und Deutschland ist jedoch nicht möglich, da hier die Einschränkungen einerseits weniger drastisch waren, andererseits mittlerweile (mit Unterbrechungen) über deutlich längere Zeiträume andauerten und die COVID-19 Pandemie unverändert anhält.

Weltweit bis Mitte Mai 2020

Wissenschaftler des Norwegischen Instituts für Naturforschung und des Mainzer Max Planck Instituts für Chemie untersuchten die Auswirkungen der Lockdown-Maßnahmen im Zusammenhang mit der COVID-19 Pandemie (Venter *et al.* 2020 und 2021). Dabei wurden Satellitendaten und ein weltweites Netzwerk von mehr als 10.000 Messstationen genutzt. Die Auswertungen erfolgten für 34 Länder mit Lockdown-Maßnahmen für den Zeitraum Januar bis 15. März 2020 verwendet. Nach Berücksichtigung der meteorologischen Variabilität ergaben sich bei den bevölkerungsgewichteten Konzentrationen signifikante **Rückgänge um 60% für NO_2 und um 31% für $\text{PM}_{2.5}$** . Der Vergleich mit Mobilitätsdaten von Google und Apple zeigte ferner einen Zusammenhang zwischen der Abnahme des globalen Verkehrsaufkommens und der Abnahme der NO_2 -Konzentrationen (Venter *et al.* 2020). Um den Einfluss der Lockdowns auf die Schadstoffkonzentrationen und damit auf die Gesundheit genauer zu quantifizieren wurden „Anomalien“ der Schadstoffverläufe identifiziert und für die empirische Festlegung der Lockdown-Zeiten verwendet, die separat für jedes Land erfolgte. Dies geschah mit Hilfe eines Wetter-Benchmark Modells, das den Einfluss der vorherrschenden meteorologischen Bedingungen berücksichtigen sollte. Die Luftverschmutzungs-Anomalien zur Festlegung der Lockdown-Zeiten wurden aus der Differenz zwischen der bevölkerungsgewichteten gemessenen Luftschadstoffkonzentration und der populationsgewichteten Wetter-Benchmark Konzentration ermittelt.

Zur Berechnung der Gesundheitsrisiken wurden publizierte Expositions-Wirkungs-Beziehungen für Kurzeffekte aus der Literatur verwendet, die nicht genauer angegeben sind. Aus den Wetter-

korrigierten bodennahen Luftverschmutzungsanomalien während der Lockdowns ergab sich für die tägliche Mortalität eine Vermeidung von insgesamt 49.900 Toten und von insgesamt 89.000 Besuchen in der Notaufnahme wegen kindlichem Asthma während der ca. 2-3 Monate dauernden Lockdown-Maßnahmen in den 34 Ländern. Die Zahl der PM_{2,5}-bezogenen vermiedenen Todesfälle betrug dabei weltweit 52.000, in China 19.665, in den USA 1.000 und in Deutschland 545. Demgegenüber war der Effekt von NO₂ deutlich kleiner und betrug weltweit 4.300, in China 1.954, in den USA 0 und in Deutschland 68 vermiedene Todesfälle (*Venter et al. 2021*).

Zu den Arbeiten von *Venter et al. (2020 und 2021)* ist anzumerken, dass die quantitativen Aussagen mit erheblichen Unsicherheiten behaftet sind:

- Es ist unklar, wieweit die gewählte Festlegung der Lockdown-Perioden und deren Auswirkungen auf die Schadstoffkonzentrationen realistisch durch den gewählten atmosphärenchemischen Ansatz wiedergegeben werden.
- Die errechneten täglichen Gesundheitseffekte sind aus methodischen Gründen nicht mit den sonst üblichen Langzeiteffekten vergleichbar und liefern zT widersprüchliche Ergebnisse.
- Andere Einflüsse wie die in der Lockdown-Perioden veränderten Aufenthaltszeiten außen und in Innenräumen konnten ebenfalls nicht berücksichtigt werden.
- Insgesamt sind die Ergebnisse qualitativ nachvollziehbar, aber quantitativ als wenig belastbar einzustufen

3. Luftschadstoffe und Risiken für Patienten mit COVID-19

Definitionen im Zusammenhang mit COVID-19

COVID-19 (Erkrankungs-) Fall: Ein *bestätigter COVID-19-Fall* ist eine Person mit durch Labortests bestätigter Infektion, ungeachtet klinischer Anzeichen und Symptome (RKI). In manchen Studien wird auch eine Person ohne positiven Test aber mit typischen Symptomen als Fall betrachtet.

Ausbreitung: Die Ausbreitung der Infektion wird durch die **Basisreproduktionszahl R_0** charakterisiert. R_0 bezeichnet die Anzahl der Individuen, die im Mittel infiziert werden, wenn ein krankes (infiziertes) Individuum in eine gesunde Population ohne Immunität gegenüber dem Erreger eingebracht wird. Mit Hilfe der Basisreproduktionszahl lässt sich abschätzen, wie schnell sich eine Infektionskrankheit verbreitet. Ist $R_0 > 1$, kann sich die Infektionskrankheit in der Population ausbreiten, ist $R_0 < 1$, wird die Infektion langfristig auslaufen.

COVID-19 Todesfall: (1) RKI: Wenn bei einem Verstorbenen eine Corona-Infektion nachgewiesen wurde, dann gilt er als Corona-Todesfall. **(2) WHO:** Nach den INTERNATIONAL GUIDELINES FOR CERTIFICATION AND CLASSIFICATION (CODING) OF COVID-19 AS CAUSE OF DEATH gilt: Der Tod aufgrund von COVID-19 wird als Tod infolge einer klinisch möglichen (kompatiblen) Krankheit in einem wahrscheinlichen oder bestätigten COVID-19-Fall definiert, es sei denn, es gibt eine eindeutige alternative Todesursache, die nicht mit der COVID-Krankheit in Zusammenhang gebracht werden kann (z. B. Trauma).

Sterberisiko: Das Sterberisiko für COVID-19 wird durch den Fall-Verstorbenen-Anteil (**Case-Fatality Rate, CFR**) beschrieben. Die CFR bezieht sich auf die Zahl verstorbener gemeldeter Fälle durch die Zahl der insgesamt gemeldeten Fälle. Diese Zahl ist stark von der Effizienz des Diagnostik- und Meldesystems abhängig und kann die tatsächliche Letalität sowohl über- als auch unterschätzen.

Luftschadstoffe und Risiken für COVID-19

Vorbemerkung: Die meisten Studien untersuchen, ob die **langfristige Dauerbelastung** durch Luftschadstoffe dazu führt, dass die dort auftretenden Erkrankungs- und Todesfälle an COVID-19 mit steigender Luftschadstoffkonzentration ansteigen. Zur Charakterisierung der Langzeitbelastung werden üblicherweise Jahresmittelwerte verwendet, die zur Vermeidung meteorologisch bedingter Schwankungen zusätzlich über mehrere Jahre gemittelt werden. Dabei wird davon ausgegangen, dass diese Dauerbelastung auch während der COVID-19 Pandemie bestand.

Seltener werden Analysen von **Kurzzeiteffekten** durchgeführt. Hier ist die Fragestellung, ob die Konzentrationen eines Tages sich auf die COVID-19 Erkrankungszahlen dieses Tages (oder verzögert ein paar Tage später) auswirkt.

In zahlreichen Medien wurde im November 2020 von Studien berichtet, die eine Erhöhung des Sterberisikos für COVID-19 oder vermehrte Todesfälle durch Luftverschmutzung zeigen. Was ist der Kenntnisstand zu diesem Zusammenhang?

USA

Eine umfangreiche Studie hierzu wurde von der Harvard School of Public Health durchgeführt (**Wu et al. 2020**). Sie basiert auf der Analyse der Daten von ca. 3.000 Kreisen (Counties) in den USA. Diese haben extrem unterschiedliche Bevölkerungszahlen zwischen unter 100 bis 10 Millionen Einwohnern (im Mittel 100.000 Einwohner). Es standen Angaben zum Wohnort der ca. 100.000 COVID-19-Todesfälle zur Verfügung die von der Johns Hopkins Universität bis zum 18. Juni 2020 ermittelt worden waren. Die Luftverschmutzung wurde auf der Grundlage mittlerer $PM_{2,5}$ -Konzentrationen auf einem 1km x 1km Raster für den Zeitraum 2000-2016 charakterisiert. Hierbei wurden atmosphärenchemische Modelle verwendet, die auf regionalen Schätzungen der chemischen

Zusammensetzung von PM_{2,5} basieren und Information von Satelliten, Modellrechnungen und Schadstoffmessungen an Monitorstationen berücksichtigen. Um andere Einflüsse auf die Gesundheit zu berücksichtigen wurden 20 Kovariablen einbezogen, die auf Kreisebene aggregiert waren. Hierzu gehörten z.B. Variable, die den Sozialstatus und das Einkommen berücksichtigen, der Anteil der Bevölkerung mit niedrigem Schulabschluss, der Anteil farbiger Einwohner etc.. Die Analyse ergibt, dass ein **Anstieg der Langzeitkonzentration von PM_{2,5} um 1 µg/m³ mit einem Anstieg der COVID-19 Mortalität um 11% einher geht**. Das Ergebnis ist statistisch signifikant.

Die Autoren interpretieren ihre eigene „ökologische“ Studie mit großer Vorsicht:

- Individualdaten zum Gesundheitszustand von COVID-19 Patienten liegen bisher nicht für eine repräsentative Bevölkerung vor. Daher besteht derzeit nur die Möglichkeit, Auswertungen mit *aggregierten Daten* durchzuführen, sog. „ökologische“ Regressionsrechnungen. Dadurch sind nur **vorläufige Aussagen** über den Zusammenhang zwischen PM_{2,5} und dem Schweregrad und Krankheitsendpunkten bei COVID-19 möglich.
- „Ökologische“ Regressionsanalysen sind grundsätzlich **nicht in der Lage für individuelle Risikofaktoren** wie Alter, ethnischer Zugehörigkeit, Rauchen etc **zu adjustieren**. Dies ist eine schwerwiegende Limitation, da bekannt ist, dass individuelle Risikofaktoren den Gesundheitszustand bei COVID-19 stark beeinflussen. Dadurch kann es zum „ökologischen Fehlschluss“ (ecological fallacy) kommen. Im Extremfall ist es möglich, dass in „ökologischen“ Regressionsanalysen Zusammenhänge entdeckt werden, die nicht existieren oder sogar in die umgekehrte Richtung gehen wie die wahren Assoziationen bei der Verwendung von Individualdaten.
- Um die wissenschaftliche Aussagekraft der Forschung auf diesem Gebiet zu stärken ist es erforderlich, repräsentative Individualdaten zu COVID-19 Patienten zu verwenden. Dazu gehören die Wohnadresse, demographische und individuelle Einflussgrößen.
- Die Zusammenhänge, die in „ökologischen“ Regressionsanalysen gefunden werden geben eine starke Rechtfertigung für zukünftige Untersuchungen mit besseren Daten (**Wu et al. 2020**)

Weltweit (global und regional)

In der Publikation von **Pozzer et al. (2020)** wird der Anteil der COVID-19 Mortalität abgeschätzt, der global und regional der Langzeitexposition gegenüber der Luftverschmutzung zuzuschreiben ist. Für die Exposition gegenüber PM_{2,5} wird ein globales Modell verwendet, das die Atmosphärenchemie und meteorologische Prozesse sowie Wechselwirkungen mit den Meeren und der Biosphäre berücksichtigt. Die jährlichen PM_{2,5} Konzentrationen in der bodennahen Atmosphäre werden aus in das Modell integrierten Satellitendaten des Jahres 2019 ermittelt. Die horizontale Auflösung entspricht einem Raster von 1 km x 1 km.

Relative Risiken werden anhand einer Expositions-Wirkungsfunktion der WHO auf der Basis der PM_{2,5} Konzentrationen auf den Rasterzellen berechnet, wobei der Risikoeffizient verwendet wurde, welcher in Wu et al. (2020) für die USA ermittelt wurde. Zusätzlich wurden Daten der SARS-Epidemie 2003 verwendet, um die Situation in Ländern mit hoher PM_{2,5}-Belastung zu berücksichtigen. Schließlich wurden die Attributablen Fraktionen auf Ebene der Regionen und Länder aggregiert.

Auf dieser Grundlage wird dann zB berechnet, dass weltweit ca 15% der COVID-19 Sterbefälle der Exposition gegenüber PM_{2,5} zugeschrieben werden können. Für Deutschland wird (im Supplementay Material zur Publikation) angegeben, dass 17% der COVID-19 Mortalität auf Emissionen aus dem Einsatz fossiler Brennstoffe und 26% auf alle anthropogenen Emissionen zurückzuführen sind. Es wird allerdings nicht angegeben, wie diese Zahlen ermittelt wurden.

In der Diskussion wird ferner auf die Plausibilität der beschriebenen Ergebnisse hingewiesen, da die Luftverschmutzung Entzündungen induzieren kann, was zu einer größeren Anfälligkeit und verminderten Abwehrkräften des menschlichen Organismus führen kann.

Als Limitation wird angeführt, dass es sich hierbei um eine „ökologische“ Studie handelt, bei der Verzerrungen (Residual Confounding) nicht ausgeschlossen werden können. Daher seien die Ergebnisse als vorläufig (preliminary finding) anzusehen.

Kritisch ist anzumerken, dass in dieser Studie nicht nur dieselben „ökologischen“ Verzerrungsmöglichkeiten wie in der amerikanischen Studie von Wu et al. (2020) bestehen. Hinzu kommen große Unsicherheiten durch die Annahmen, dass die übrigen Gesundheitsrisiken für COVID-19 im Rest der Welt denselben Effekt haben wie in den USA. Auch ist die Abschätzung der PM_{2,5} Exposition aus globalen Modellrechnungen ohne deren Validierung an Messdaten sicherlich fehlerbehaftet. Insgesamt kann aus dieser Studie *bestenfalls* geschlossen werden, dass es **Hinweise auf einen möglichen Beitrag der Luftverschmutzung zur COVID-19 Sterblichkeit** gibt. Ob dieser Beitrag groß oder eher klein ist, lässt sich aus der Studie wegen der genannten Schwachstellen nicht ableiten. Die in den Medien wiedergegebene Interpretation dieser Studie geht (teilweise unterstützt durch Interviews der Autoren) allerdings auf die Schwächen nicht ein, so dass der Eindruck entstehen kann, es handelte sich um gut abgesicherte Ergebnisse.

Wegen der großen öffentlichen Aufmerksamkeit, die diese Studie in Deutschland erlangt hat, soll exemplarisch der Bericht wiedergegeben werden, der von der Redaktion des Deutschen Ärzteblatts erstellt wurde (**DÄ 2020**):

„Rund 15 Prozent der COVID-19-Todesfälle weltweit könnten auf das Konto von Luftverschmutzungen gehen. Zu diesem Ergebnis kommen Forscher aus Deutschland und Zypern in einer heute veröffentlichten Studie in Cardiovascular Research (2020), in der die möglichen Gesundheitsrisiken für COVID-19 durch Treibhausgasemissionen untersucht werden. Für ihre Studie untersuchten die Forscher um Jos Lelieveld vom Max-Planck-Institut für Chemie in Mainz unter anderem Gesundheits- und Krankheitsdaten aus den USA und China und kombinierten diese dann mit Daten zur globalen und lokalen Feinstaubbelastung der Luft.

Die Forscher kamen zu dem Schluss, dass in Ostasien, das eine der höchsten Schadstoffbelastungen weltweit aufweist, 27 Prozent der COVID-19-Todesfälle auf die gesundheitlichen Auswirkungen der schlechten Luftqualität zurückzuführen sein könnten. In Europa lag der Anteil bei 19 Prozent, in Nordamerika bei 17 Prozent. Allerdings gibt es große Unterschiede auch in Europa: Während die Forscher beispielsweise in Tschechien bei 29 Prozent und in Deutschland bei 26 Prozent der COVID-19-Todesfälle die Luftverschmutzung als mögliche Ursache sehen, sind es in Portugal nur elf und in Spanien neun Prozent. In Australien sind es gerade mal drei und in Neuseeland ein Prozent.

„Wenn die langfristige Belastung durch Luftverschmutzung und eine Infektion mit SARS-CoV-2 zusammenkommen, dann wirkt sich das negativ auf die Gesundheit aus – insbesondere auf Herz- und Blutgefäße“, erklärte der Kardiologe und Ko-Autor der Studie, Thomas Münzel. Nach seinen Angaben macht die Luftverschmutzung Risikofaktoren für COVID-19 wie Lungen- und Herzprobleme wahrscheinlicher. Der genaue Grund sei noch unklar, sagte Münzel Spiegel Online. Es könnte jedoch daran liegen, „dass sowohl Feinstaub als auch das Virus das Endothel, also die Auskleidung der Blutgefäße, jeweils angreifen und Entzündungen verursachen“. Die Forschungsergebnisse deuteten darauf hin, dass „die Verschmutzungspartikel ein Co-Faktor bei der Verschlimmerung der Krankheit sind“, sagte Lelieveld der afp. Die Schätzungen legten nahe, dass mehr als 6.100 COVID-19-Todesfälle in Großbritannien und 40.000 in den USA auf Luftverschmutzung zurückgehen könnten.“ (DÄ 2020)

Die kritische Analyse der Publikation von **Pozzer et al. (2020)** ergibt, dass die Aussagen dieses Beitrags im Deutschen Ärzteblatt eine **erhebliche Überinterpretation der Ergebnisse** dieser Studie darstellen. Insbesondere werden plausibel klingende Argumente für eine Beteiligung der Luftverschmutzung am COVID-19 Geschehen gemacht, belastbare Aussagen insbesondere über die Stärke des Zusammenhangs lassen sich aus der „ökologischen“ Studie mit grober Charakterisierung der Exposition und fehlender Berücksichtigung länderspezifischer Daten zu anderen Einflussfaktoren nicht ableiten.

Niederlande

Von *Cole et al. (2020)* wurde Daten zur Luftverschmutzung und COVID-19 in den Niederlanden im Rahmen einer „ökologischen“ Studie mit Adjustierung für aggregierte Einflussvariablen untersucht. Dabei wurden positive Assoziationen gefunden. Für einen Anstieg von PM_{2,5} um 1 µg/m³ ergaben sich 9,4 zusätzliche COVID-19 Erkrankungsfälle, 3,0 zusätzliche Krankenhausaufnahmen und 2,3 zusätzliche Todesfälle (was einem ca 13%igen Anstieg der Mortalität entspricht). Für NO₂ war der Effekt mit 0,35 zusätzlichen Todesfällen pro µg/m³ deutlich schwächer ausgeprägt.

In der Studie wurden 355 Gemeinden (Municipalities) der Niederlande betrachtet, deren Einwohnerzahl zwischen 900 und 900.000 Einwohnern und im Mittel bei ca. 50.000 Einwohnern lag. Es wurden die jährlichen Konzentrationen von PM_{2,5}, NO₂ und SO₂ der Umweltbehörde RIVM verwendet. Diese werden auf einem 1 km x 1 km Raster angegeben und basieren auf Modellrechnungen, die eine große Zahl von Quellen und Komponenten aus den Niederlanden und anderen europäischen Ländern berücksichtigen. Die Karten mit den räumlichen Verteilungen der Schadstoffkonzentrationen wurden mit einem Dispersionsmodell berechnet, welches die Emissionen, Transport, chemische Umwandlung und die Dispersion berücksichtigt. Die sich daraus ergebenden Konzentrationen werden an den Messdaten des Niederländischen Luftqualitätsnetzwerks kalibriert. Für die Analyse wurde der Median innerhalb jedes Rasterfläche, gemittelt über den 5 Jahres-Zeitraum 2015-2019, verwendet.

Es wurden die mehr als 46.000 COVID-19 Patienten einbezogen, die bis Juni 2020 in den Niederlanden registriert wurden. Dies entspricht einer mittleren Zahl von 131 Erkrankungen pro Gemeinde und einem Maximum von 2416 Erkrankungen. Um andere (direkte und indirekte) Einflüsse auf die Gesundheit zu berücksichtigen wurden auf Gemeindeebene aggregierte Daten zu Haushaltsgröße, Haushaltseinkommen, Anteil von Migranten aus nicht-westlichen Ländern, Ausbildung und Beruf, Bevölkerungsdichte, sowie Anteile von Rauchern, Übergewichtigen und Berufsunfähigen einbezogen.

Die Autoren interpretieren ihre Ergebnisse sehr zurückhaltend und weisen auf wichtige Limitationen hin:

- Um überzeugend einen Zusammenhang zwischen der Luftschadstoffbelastung und COVID-19 Erkrankungen herzustellen werden Individualdaten benötigt, die es erlauben, in der Auswertung für individuelle Charakteristika zu kontrollieren. Solche Individualdaten stehen für COVID-19 Patienten derzeit nicht zur Verfügung.
- Die zweitbeste Möglichkeit besteht darin, eine große Zahl kleiner regionaler Einheiten zu betrachten, für die detaillierte Daten zu den Charakteristika dieser Regionen vorliegen. Diesem Ziel kommt die Studie von Wu et al. (2020) in den USA nahe, wobei allerdings die Kreise (counties) relativ groß sind so dass offen bleibt, ob die aggregierten Daten tatsächlich in der Lage sind, die lokale Variation ausreichend abzubilden. Diese Situation ist in den Niederlanden besser, da hier die betrachteten Einheiten (Gemeinden) deutlich kleiner sind.
- Die statistische Auswertung liefert signifikante Ergebnisse für PM_{2,5}, auch wenn unterschiedliche Auswertungsverfahren verwendet werden. Das Hauptergebnis – ein Anstieg der COVID-19 Mortalität um 13 % pro µg/m³ - liegt dabei nahe bei dem Anstieg um 11%, den die Studie von Wu et al. (2020) für die USA findet.
- Die Autoren halten ihr Ergebnis für robust und plausibel. Dennoch kommen sie abschließend zu der Bewertung, dass eine vorsichtige Interpretation erforderlich ist. Solange keine detaillierten Individualdaten für COVID-19 Patienten vorliegen muss das Ergebnis der statistischen Auswertung als *Hinweis (suggestive)*, vielleicht als starker Hinweis, angesehen werden, kann aber *nicht als schlüssiger Beweis (conclusive)* eingestuft werden.

China

Von Wissenschaftlern der Fudan-Universität in Shanghai wurden zwei Studien publiziert, welche untersuchen, ob die Luftverschmutzung Einfluss auf die Ausbreitung der COVID-19 Infektion oder das Sterberisiko während der Pandemie in China Anfang 2020 gehabt hat (Yao *et al.* 2020, 2021). Dabei wurden 63 bzw. 49 Städte einbezogen, welche Wuhan sowie weitere Städte innerhalb und außerhalb der Provinz Hubai umfassten. Die Luftqualität wurde einerseits durch tägliche Konzentrationen von PM_{2,5}, NO₂ und weiteren Schadstoffen charakterisiert, die im Januar und Februar 2020 in den Städten gemessen wurden, andererseits durch Jahresmittelwerte für 2015-2019. Zusätzlich wurden für die Auswertungen die mittlere tägliche Temperatur und die relative Feuchte in der Stadt bzw für die Analyse der Langzeiteffekte das Bruttoinlandsprodukt (Gross Domestic Product) pro Person, die Zahl der Krankenhausbetten und die Populationsgröße berücksichtigt.

Das **Sterberisiko für COVID-19** wird durch den Fall-Verstorbenen-Anteil (**Case-Fatality Rate, CFR**) beschrieben (Definition s.o.). Der Zusammenhang zwischen der PM_{2,5} Belastung und der CFR in den betrachteten Städten wurde in einer „ökologischen“ Studie auf der Grundlage der Jahresmittelwerte 2015-2019 analysiert, welche die Langzeit-Basisbelastung auch während der COVID-19 Pandemie charakterisieren sollte. Adjustiert wurde für das Bruttoinlandsprodukt (Gross Domestic Product) pro Person, die Zahl der Krankenhausbetten und die Populationsgröße in den Städten. Es wurde ein signifikanter **Anstieg der CFR um 0,24% bei einem Anstieg der PM_{2,5} Langzeitkonzentration um 10 µg/m³** gefunden. Für PM₁₀ ergab sich ein ähnliches Ergebnis. Die Studie zeigt nach Ansicht der Autoren, dass die PM_{2,5}-Exposition die Prognose bei COVID-19 Patienten beeinflusst (Yao *et al.* 2020).

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit (transmission rate) der COVID-19 Infektion wird anhand der **Basisreproduktionszahl R₀** analysiert (bei R₀ > 1 nimmt die Zahl Neuinfizierter zu). Für die Untersuchung des Zusammenhangs von NO₂ und R₀ wurde die tägliche Konzentration in der jeweiligen Stadt betrachtet und für Temperatur und Luftfeuchte adjustiert. Es ergab sich eine signifikante Korrelation zwischen dem Tagesmittelwert von NO₂ und R₀ mit einer zeitlichen Verzögerung von 12 Tagen. Hierbei wird NO₂ als Indikator für verkehrsabhängige Luftschadstoffe angesehen. Die Assoziation zwischen NO₂ und R₀ wird erklärt als Beziehung zwischen der Mobilität der Bevölkerung und der Ausbreitung des Virus, wobei beim Lockdown mit der drastischen Einschränkung der Mobilität der Bevölkerung die Ausbreitung des Virus zurückging (Yao *et al.* 2021).

Zheng *et al.* (2020) untersuchten den Zusammenhang zwischen der langfristigen Luftschadstoffbelastung und dem Auftreten von COVID-19 Erkrankungsfällen für 324 Städte in China, wobei Wuhan ausgeschlossen wurde. Betrachtet wurden für jede Stadt die mittleren Immissionskonzentrationen von 2015 bis 2019 und die im Zeitraum Januar bis März 2020 außerhalb von Wuhan aufgetretenen COVID-19 Erkrankungsfälle. Die Mobilität der Bevölkerung wurde anhand von Daten von Mobilfunknetzbetreibern berücksichtigt. Dabei wurden das Reisevolumen von Wuhan in die jeweilige Stadt im Zeitraum 11.-23.1.2020 vor dem Reiseverbot sowie die innerstädtischen Bewegungen im Zeitraum 23.1.-6.3.2020 während des Reiseverbots betrachtet. Ferner wurden soziodemographische Angaben (Bruttoinlandsprodukt, Bevölkerungsdichte, Anteil älterer Personen) und Daten zum Gesundheitsverhalten (Raucher und Passivraucher) auf Ebene der Städte berücksichtigt. Die klimatischen Bedingungen wurden anhand der langjährigen mittleren Temperaturen und Regenmengen einbezogen.

Es wurde eine lineare Regressionsrechnung durchgeführt, in welcher für jede Stadt die genannten Variablen berücksichtigt wurden. Das Ergebnis dieser „ökologischen“ Studie war ein signifikanter **Anstieg der COVID-19 Fälle um 2,2% pro 1 µg/m³ NO₂ und 1,5% pro 1 µg/m³ PM_{2,5}**. Für den Anteil schwerer Erkrankungsverläufe ergibt sich ein ähnliches Bild. Die Autoren sehen in den Ergebnissen einen Hinweis darauf, dass in Städten mit langfristig höherer Luftschadstoffbelastung in der Bevölkerung eine erhöhte Vulnerabilität für das Auftreten von COVID-19 Erkrankungen besteht. Sie weisen aber auch auf Schwächen ihrer Studie hin und sprechen sich für weitere gründliche Analysen des Zusammenhangs zwischen Luftverschmutzung und COVID-19 aus.

England

Travaglio et al. (2021) untersuchten die Verbindung zwischen Luftverschmutzung und COVID-19 in England. Sie führten mehrere Teilstudien durch. (1) In einer deskriptiven regionalen Gegenüberstellung wurden die Daten von über 60.000 durch Tests abgesicherten Erkrankungsfällen und über 7.000 COVID-19-Todesfällen betrachtet, die im Zeitraum Februar bis April 2020 in England aufgetreten waren. (2) In der sub-regionalen Analyse, die sich auf die Daten der lokalen Behörden stützte, wurden über 100.000 getestete Erkrankungsfälle und ca. 33.000 COVID-19 Todesfälle berücksichtigt. (3) In die Studie mit Individualdaten wurden ca. 1.500 getestete Teilnehmer der UK-Biobank einbezogen, einer bevölkerungsbezogenen Studie mit insgesamt ca. 500.000 Teilnehmern.

Es wurden Luftschadstoffdaten (Jahresmittelwerte) der englischen Messstationen für 2018 und 2019 sowie zeitlich gemittelt für 2014-2018 verwendet. Diese wurden für die Analysen (1) und (2) für die Regionen und Orte gemittelt, für (3) wurden die modellierten Schadstoffdaten an den zum Wohnort der Teilnehmer nächstgelegenen Koordinaten verwendet.

Für die Analyse (2) wurde ein generalisiertes lineares Regressionsmodell verwendet, wobei zusätzlich für die Orte aggregierte Daten zur Bevölkerungsdichte, das mittlere Einkommen und das mittlere Alter berücksichtigt wurden. Es ergaben sich in der „ökologischen“ Studie (2) signifikant erhöhte Mortalitätsraten und Infektionsraten für NO und NO₂ sowie signifikant erniedrigte Raten für PM_{2,5} und PM₁₀.

Mit Abstand am wichtigsten war allerdings Analyse (3), da hier *individuelle Daten aus einer bevölkerungsbasierten Studie* verwendet werden konnten. In der Unterstichprobe von 1.464 Teilnehmern der UK Biobank waren 664 positiv und 800 negativ für COVID-19 getestet. Ferner wurden als *Individualdaten* Geschlecht und Alter, Gesundheitsparameter wie Übergewicht, Blutdruck, Atemwegsprobleme, Lungenfunktionsparameter, Arzt Diagnosen von COPD, Diabetes, Krebs, sowie Rauchen und Schadstoffbelastungen am Arbeitsplatz in die Analyse einbezogen. Für alle Teilnehmer lagen die Wohnadressen vor, so dass die (modellierten) Schadstoffkonzentrationen in einem Abstand von maximal 2 km von der Wohnadresse verwendet werden konnten. Die Analyse (3) erfolgte mit einem binomialen Regressionsmodell. Sie ergab dass ein **Anstieg von PM_{2,5} um 1 µg/m³ mit einer signifikanten Zunahme der COVID-19 Fälle um 12% einherging**. Für PM₁₀ zeigte sich ein ähnliches Ergebnis. Demgegenüber führte der **Anstieg von NO₂ um 1 µg/m³ lediglich zu einer signifikanten Zunahme der COVID-19 Fälle um 4,5%**.

Die Autoren erklären sich die Ergebnisse von Analyse (2) dadurch, dass keine individuellen Angaben zur Verfügung standen und die Verwendung aggregierter Daten zu einem verzerrten Ergebnis geführt haben könnte. Ferner hat das „ökologische Design“ möglicherweise zu einem gewissen Ausmaß von Missklassifikation der Exposition geführt hat.

Im Gegensatz dazu liefert Analyse (3) zum ersten Mal Individualdaten zur Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Luftverschmutzung am Wohnort und COVID-19 unter Berücksichtigung individueller Charakteristika und des individuellen Gesundheitszustands. Doch auch hier gibt es Limitationen. Wichtig ist vor allem, dass die Ethnizität nicht analysiert werden konnte, da in der UK Biobank ethnische Minderheiten nicht ausreichend vertreten sind. Die Autoren verweisen auf den Bericht von *Dutton (2020)*, der zeigt, dass der Zusammenhang zwischen Luftverschmutzung und COVID-19 in England abgeschwächt wird, wenn für die Ethnizität kontrolliert wird (s.u.).

Der angesprochene Bericht des Nationalen Statistikamtes von *Dutton (2020)* untersucht ebenfalls die COVID-19 Mortalität und die Wirkungen der Luftverschmutzung in England. Im Zeitraum 7.3.-12.6.2020 wurden in England 46.000 COVID-19 Todesfälle dokumentiert. Diese wurden mit den Konzentrationen von PM_{2,5} und NO₂ unter Berücksichtigung anderen Einflussgrößen analysiert. Hierzu wurden auf einem 1km x 1km Raster die Schadstoffkonzentrationen der letzten 5 bzw 10 Jahre

vor der Pandemie gerankt und in 7 Gruppen unterteilt. Jede dieser Gruppen wurde wiederum anhand des Index für soziale Benachteiligung (IMD, Erklärung s.u.) in 5 Quintile unterteilt, und diese 35 Gruppen wurden anhand der Bevölkerungsdichte nochmals in Quintile unterteilt, so dass insgesamt 175 Gebiete (sample areas) entstanden. Für jedes dieser Gebiete wurde die altersadjustierte COVID-19 Todesrate pro 100.000 Einwohner berechnet.

Der Autor hat diesen Ansatz gewählt, um die größtmögliche Variation der Luftverschmutzung und der sozioökonomischen Variablen zu erreichen. Der verwendete Index für soziale Benachteiligung (IMD = English Index of multiple deprivation) ermöglicht kleinräumige Aussagen zur Armut. In den Index gehen Angaben zum Einkommen, zur Arbeitslosigkeit, zur Ausbildung, Gesundheit und Kriminalität in einem Gebiet ein. Ferner wurden der Anteil der Raucher und die Häufigkeit von anderen Krankheiten in dem Gebiet betrachtet. Hierbei handelt es sich um Krankenhausaufnahmen für Herz-Kreislauf Erkrankungen und (zusammengefasst) andere Krankheiten. Für die **Ethnizität** wurde die Einteilung in Weiße, Asiaten, Farbige („Blacks“), andere ethnische Gruppe und gemischte ethnische Gruppe gewählt. Die Auswertung erfolgte mit linearen Poisson-Regressionsrechnungen. Es wurden mehrere schrittweise Verfahren zum Ein- und Ausschluss von Variablen gewählt.

Der stärkste Effekt der Luftverschmutzung zeigte sich ab der 21. Kalenderwoche (18.-24.5.2020). Es bestand ein hochsignifikanter Zusammenhang zwischen der PM_{2,5} bzw der NO₂ Exposition und der altersstandardisierten Mortalitätsrate, wenn keine anderen Variablen berücksichtigt wurden. Bei Berücksichtigung aller anderen Einflussgrößen außer der Ethnizität wurde der Effekt der Luftverschmutzung etwas kleiner, blieb aber signifikant. Starke Einflüsse ergaben sich hier für Herz-Kreislauf Erkrankungen und das Rauchen. **Wurde die Ethnizität mit in die Berechnung einbezogen, wurde der Einfluss der Luftverschmutzung erheblich reduziert und war nicht mehr signifikant (Tab. 3).** Hier zeigte sich der stärkste Effekt für den asiatischen Bevölkerungsanteil.

Tabelle 3 Zunahme der COVID-19 Mortalitätsrate in Abhängigkeit von der historischen Schadstoffexposition mit und ohne Berücksichtigung der Ethnizität (Quelle: Dutton 2020)

Prozentuale Zunahme der Mortalitätsrate beim Anstieg der 10 Jahres Exposition pro 1 µg/m ³	PM _{2,5}	NO ₂
Ohne Berücksichtigung anderer Einflussgrößen	8,8%	3,4%
Mit Berücksichtigung aller Einflussgrößen außer der Ethnizität (stärkster Einfluss für Herz-Kreislauf Erkrankungen und Rauchen)	7%	2%
Mit zusätzlicher Berücksichtigung der Ethnizität (stärkster Effekt für die asiatische Bevölkerung)	1% ns	0,6% ns

ns: nicht signifikant

Ohne Berücksichtigung der Ethnizität ist der Zusammenhang zwischen der COVID-19 Mortalität und PM_{2,5} für England ähnlich stark wie für die USA (Wu et al. 2020). Wird die Ethnizität einbezogen, geht der Effekt der Luftverschmutzung erheblich zurück. Das könnte dafür sprechen, dass PM_{2,5} und NO₂ in städtischen Gebieten stellvertretend (Proxy) für Faktoren stehen, die mit der sozialen Benachteiligung der Bevölkerung dieser Gebiete zu tun haben. Wegen der starken Korrelation zwischen der Luftschadstoffbelastung und der Ethnizität ist es jedenfalls nicht möglich, deren Einflüsse voneinander zu trennen.

Als limitierenden Faktor seiner Auswertung sieht der Autor die Tatsache an, dass auch er nur eine „ökologische“ Studie mit aggregierten Daten durchführen konnte. Ferner ist sein Ansatz für die Gebietsdefinition nicht ohne weiteres mit den sonst üblichen Ansätzen vergleichbar.

Sonstiges

Weitere kleinere oder methodisch nur eingeschränkt belastbare Studien, die Daten aus Norditalien (Conticini et al. 2020) und mehreren europäischen Ländern analysieren (Ogen 2020) sollen hier nicht detailliert besprochen werden.

4. zu beachten: Soziale Benachteiligung, Gesundheitsprobleme und COVID-19

Definitionen

Soziale Benachteiligung oder *Soziale Deprivation* bezeichnen jede Form von sozialer Ausgrenzung, welche stattfinden kann durch Zugehörigkeit zu einer sozialen Randgruppe und/oder Armut. Sie wird in manchen Ländern durch Deprivations-Indizes gemessen, die zB Angaben zum Einkommen, zur Arbeitslosigkeit, zur Ausbildung, Gesundheit und Kriminalität in einem Gebiet umfassen. Siehe hierzu den German Index of Socioeconomic Deprivation (GISD, *Kroll et al. 2017*).

Ethnische Minderheiten sind Ethnien, die als Minderheit auf dem Territorium eines Staates leben. Als Teil eines Staatsvolkes unterscheidet sich die Minderheit vom Rest der Bevölkerung in mehreren Merkmalen wie Sprache, Kultur oder Religion. In Nordamerika spricht man auch dann von ethnischen Minderheiten, wenn lediglich eine Herkunft aus derselben Weltgegend vorliegt und die Bevölkerungsgruppe eine zahlenmäßige Minderheit darstellt, z. B. bei den Gruppen der Afroamerikaner oder der Lateinamerikaner. Die Angehörigen verbleiben in der ethnischen Minderheit, auch wenn keine sprachlichen, kulturellen oder religiösen Unterschiede zur übrigen Bevölkerung feststellbar sind.

Sozioökonomische Ungleichheit und COVID-19

Zur Frage nach dem Zusammenhang zwischen sozioökonomischer Ungleichheit und COVID-19 haben *Wachtler et al. (2020a)* eine Literaturübersicht erstellt. Danach dokumentiert die sozialepidemiologische Forschung der letzten Jahrzehnte, dass das Krankheits- und Sterberisiko in engem Zusammenhang mit dem sozioökonomischen Status der Menschen steht. Inzwischen ist für eine Vielzahl von Erkrankungen und verschiedene Todesursachen nachgewiesen, dass diese auch in reichen Ländern mit modernen Wohlfahrtssystemen sozial ungleich verteilt sind. Demnach haben Personen ein umso höheres Risiko krank zu werden und vorzeitig zu versterben, je niedriger ihr sozioökonomischer Status ist. Diese gesundheitliche Ungleichheit ist besonders für chronische Erkrankungen beschrieben. Aber auch für akute Infektionskrankheiten, wie zum Beispiel virale Erkrankungen der Atemwege, gibt es Hinweise, dass diese nicht alle Bevölkerungsgruppen gleich häufig und stark betreffen. Analysen der Influenza-Pandemien 1918/1919 und 2009 zeigen, dass sozioökonomisch benachteiligte Bevölkerungsgruppen häufiger an Influenza erkrankten und verstarben als sozioökonomisch bessergestellte Gruppen.

Sozioökonomische Ungleichheiten im COVID-19-Geschehen könnten unter anderem aus Unterschieden im Infektionsrisiko resultieren, die sich wiederum aus den ungleichen Lebens- und Arbeitsbedingungen der Menschen ergeben. Auch während Pandemien leben und arbeiten viele Menschen unter Bedingungen, die es ihnen kaum möglich machen, sich vor einer Ansteckung zu schützen. Ein Beispiel dafür sind beengte und überfüllte Wohnverhältnisse, die das Risiko für eine Virusübertragung erhöhen können. Daten aus den USA zeigen, dass schwere Influenza-Erkrankungen bei Menschen häufiger waren, die in beengten Wohnverhältnissen lebten.

Neben Risikofaktoren für eine Infektion unterscheiden sich verschiedene sozioökonomische Gruppen auch in den Risikofaktoren für schwere COVID-19-Krankheitsverläufe. Dazu zählen vor allem Erkrankungen des Herz-Kreislauf-Systems (z. B. koronare Herzkrankheit und Bluthochdruck), der Lunge (z. B. chronische Bronchitis), der Leber sowie Diabetes mellitus. Außerdem gelten Personen mit einer Krebserkrankung und einem geschwächten Immunsystem als Risikogruppen für COVID-19. Auch für Deutschland ist beschrieben, dass bei Menschen aus sozioökonomisch benachteiligten Bevölkerungsgruppen viele dieser Krankheiten häufiger vorkommen. Als weitere Risikofaktoren für schwere COVID-19-Verläufe werden Rauchen und Adipositas diskutiert – beide sind Risikofaktoren, die ebenfalls in sozioökonomisch benachteiligten Bevölkerungsgruppen häufiger vorkommen

Ziel der Arbeit von **Wachtler et al. (2020a)** ist es, einen Überblick über den internationalen Kenntnisstand zu sozioökonomischer Ungleichheit im COVID-19-Geschehen zu geben. Die Literaturrecherche zeigt, dass vor allem Arbeiten aus den USA und Großbritannien ein Vorliegen sozioökonomischer Ungleichheiten in der COVID-19-Pandemie berichten.

Insgesamt mehren sich in der internationalen Literatur die Hinweise, dass vor allem im fortgeschrittenen Verlauf der Pandemie Menschen mit niedrigem sozioökonomischen Status schwerer von COVID-19 betroffen sein könnten als Menschen mit höherem Status. Die meisten dieser Studien arbeiten allerdings mit aggregierten Daten. Es ist dringend notwendig, sozioökonomische Ungleichheiten auch auf der Individualebene weiter zu erforschen und so die Gefahr „ökologischer“ Fehlschlüsse zu vermeiden.

Internationale Metaanalyse

In die Metaanalyse von **Sze et al. (2020)** zu Ethnizität und COVID-19 wurden 42 Studien aus den USA und 8 Studien aus dem Vereinigten Königreich einbezogen, die bis Ende August 2020 erschienen waren. Das gepoolte Relative Risiko (RR) zeigte signifikant mehr COVID-19 Infizierte bei Farbigen („Blacks“) (RR=2,02) und Asiaten (RR=1,50) im Vergleich zu Weißen. Ferner wurden die Asiaten häufiger auf Intensivstationen behandelt und wiesen eine höhere Todesrate auf. Die genauere Analyse ergab, dass die erhöhten Anzahlen von COVID-19 Patienten bei Farbigen und Asiaten vor allem auf mehr Infektionen in diesen Gruppen zurückzuführen waren. Kontaktverfolgungsstudien lieferten eine starke Evidenz dafür, dass der lang andauernde enge Kontakt mit Infizierten für die Mehrzahl der neuen Infektionen verantwortlich war. Das COVID-19 Virus verbreitet sich sehr viel stärker in geschlossenen Räumen mit vielen Personen, und die Personen aus den ethnischen Minderheiten lebten überwiegend in vielköpfigen Mehrgenerationen-Haushalten. Diese Gruppen wiesen zudem einen schlechteren Sozialstatus auf und waren häufiger in unabhkömmlichen Berufen tätig bzw konnten weniger im Homeoffice arbeiten. Dadurch hatten sie stärkeren Kontakt zu anderen Personen am Arbeitsplatz und im (öffentlichen) Nahverkehr. Die Beobachtung, dass Asiaten ein erhöhtes Risiko für schwere Infektionsverläufe aufwiesen, basiert vor allem aus den Daten aus England, wo ein relativ hoher Anteil von Asiaten in Krankenhäusern und auf Intensivstationen tätig war. Als Limitation ihrer Metaanalyse diskutieren die Autoren, dass die Hälfte der einbezogenen Studien Vorab-veröffentlichungen ohne peer Review waren. Ferner wurden breite Kategorien für Ethnizität verwendet, wodurch die Analyse von relevanten Untergruppen nicht möglich war.

USA

Zusätzlich zu den Ergebnissen der Metaanalyse von **Sze et al. (2020)** für die USA sei auf die Veröffentlichung **CDC (2020)** des Center of Disease Control hingewiesen (Tab. 4a).

Tabelle 4a COVID-19 Fälle, Krankenhausbehandlungen, Tote für verschiedene ethnische Gruppen in den USA (Quelle: CDC 2020)

Im Vergleich zu Weißen, Nicht-Hispanics	Ureinwohner (Indianer)	Asiaten	Afro-Amerikaner („Blacks“)	Hispanics oder Latinos
Bevölkerungsanteil	1%	6%	13%	16%
Erkrankungsfälle	1,8x	0,6x	1,4x	1,7x
Krankenhausbehandlungen	4,0x	1,2x	3,7x	4,1x
Todesfälle	2,6x	1,1x	2,8x	2,8x

Das CDC zeigt auf seiner Homepage einen Vergleich von COVID-19 Fällen, Krankenhausbehandlungen und Toten für verschiedene ethnische Gruppen in den USA. Danach weisen (im Vergleich zu Weißen) die großen Gruppen der Farbigen und Hispanics 1,4-1,7 Mal höhere

Erkrankungsfälle, 3,7-4,1 Mal so hohe Krankenhausbehandlungen wegen COVID-19 und 2,8 Mal so hohe COVID-19 Todeszahlen auf.

In einer weiteren, vorläufigen Analyse des CDC (*Arias et al. 2021*) zeigte sich dass die Lebenserwartung bei Geburt in der ersten Hälfte 2020 in den USA auf den niedrigsten Wert seit 2006 abgesunken ist. Am stärksten ging die Lebenserwartung von 2019 auf 2020 bei der Bevölkerung mit afroamerikanischer Abstammung („Blacks“, -2,7 Jahre) zurück, gefolgt von der Bevölkerung mit spanischem oder lateinamerikanischem Ursprung („Hispanics“, -1,9 Jahre). Am schwächsten war der Rückgang bei der weißen Bevölkerung („Non-Hispanic White“, -0,9 Jahre) (*Arias et al. 2021*). Auch wenn diese vorläufige Auswertung einige Limitationen aufweist, so ist das Muster doch bemerkenswert und zeigt, dass offenbar bei Nicht-Weißen ethnischen Gruppen ein deutlich erhöhtes Risiko besteht, an COVID-19 zu erkranken und zu versterben.

In der oben besprochenen „ökologischen“ Studie von *Wu et al. (2020)* zum Einfluss der Luftschadstoffe in den USA wurden für verschiedene weitere Einflussgrößen betrachtet. Dabei wurde ein signifikant erhöhtes Relatives Risiko von 1,49 für den Anteil farbiger Einwohner im Kreis (County) und von 1,13 für den Anteil von Rauchern gefunden.

England/ Vereinigtes Königreich

Zusätzlich zu den Ergebnissen der Meta-analyse von *Sze et al. (2020)* für England und das vereingte Königreich sei auf folgende Veröffentlichungen hingewiesen:

In der oben bereits besprochenen Studie von *Dutton et al. (2020)* ergibt sich ohne Berücksichtigung der Ethnizität ein signifikanter Zusammenhang zwischen der COVID-19 Mortalität und PM_{2,5} bzw NO₂. Wird die Ethnizität einbezogen, geht der Effekt der Luftverschmutzung erheblich zurück. Das könnte dafür sprechen, dass PM_{2,5} und NO₂ in städtischen Gebieten stellvertretend (Proxy) für Faktoren stehen, die mit der sozialen Benachteiligung der Bevölkerung dieser Gebiete zu tun haben.

Die Studie von *Williamson et al. (2020)*, die mit dem öffentlich zugänglichen Datensatz des Britischen NHS (National Health Service) arbeitete, der 40% aller Patienten in England umfasst, erlaubt grobe Aussagen zur Ethnizität. Es zeigt sich nach Adjustierung für Geschlecht, Alter und verschiedene Erkrankungen im Vergleich zu Weißen ein signifikant erhöhtes Risiko für Südasiaten (1,45 fach) und Farbige (1,48 fach), an COVID-19 zu versterben (Tab. 4b).

Tabelle 4b COVID-19 Verstorbene und Relatives Risiko (HR) für ethnische Gruppen im Vereinigten Königreich (Quelle: *Williamson et al. 2020, Table 1, Table 2, Stand Juli 2020*)

	Personen (%)		Verstorbene mit COVID-19 Bezug (% der Personen)		Hazard Ratio HR
insgesamt	17.278.392	(100.0)	10.926	(0.06)	
Weisse	10.866.411	(62.9)	7.119	(0.07)	1,00
Südasiaten	1.022.130	(5.9)	608	(0.06)	1,45*
Farbige (“Blacks”)	339.909	(2.0)	250	(0.07)	1,48*
andere	320.132	(1.9)	110	(0.03)	
Fehlende Angaben	4.560.113	(26.4)	2.777	(0.06)	

*Hazard Ratio (HR) ist sign. erhöht nach Adjustierung für Geschlecht, Alter, verschiedene Erkrankungen

Die Studie von *Raisi-Estabragh et al. (2020)* untersuchte anhand von Daten der UK Biobank die Häufigkeit von COVID-19 Erkrankungen in ethnischen Minderheiten. Hierzu dienten die Daten von 4.510 getesteten Teilnehmern dieser großen Bevölkerungsstichprobe (n=500.000), von denen 1.326 positiv waren. Da zum Zeitpunkt der Studie in UK praktisch nur stationäre Patienten getestet wurden, kann man davon ausgehen, dass die positiv Getesteten schwere Krankheitsverläufe hatten. In einer

logistischen Regressionsrechnung wurde der Einfluss von Alter, Geschlecht und Ethnizität bei den COVID-19 Patienten untersucht. Zusätzlich wurden folgende gesundheitsrelevante Parameter berücksichtigt, die ebenfalls auf der **Individualebene** vorlagen: kardiometabolische Faktoren (Diabetes, Bluthochdruck, früherer Herzinfarkt, Rauchen, Übergewicht), schlechte Ernährung, Armuts- (Deprivation-) Score, Wohnbedingungen und weitere.

Farbige, Asiaten und andere ethnische Minderheiten sowie Männer zeigten eine höhere Häufigkeit von COVID-19 Erkrankungen. Die Minderheiten hatten zwar ebenfalls ein schlechteres kardiometabolisches Profil, waren ärmer und lebten in größeren Haushalten, dies konnte aber den Einfluss der Ethnizität nicht erklären. Daraus folgt, dass es Faktoren gibt, die den ethnischen Unterschieden bei COVID-19 zugrunde liegen, die nicht einfach erfasst werden können. Als Limitationen der Studie führen die Autoren an, dass die Altersspanne in der Studie (40-69 Jahre bei der Rekrutierung 2006-2010) begrenzt war und dass die tatsächliche Bandbreite sozialer, ökonomischen und verhaltensabhängiger Faktoren in der Bevölkerung deutlich größer ist als bei den Teilnehmern der UK Biobank, bei denen ethnische Minderheiten unterrepräsentiert sind.

Deutschland

Migration, sozio-ökonomische Situation

Migrationshintergrund: Nach Angaben der Bundeszentrale für Politische Bildung (**BPB 2021**), die auf den Ergebnissen des Mikrozensus 2016 beruhen, haben rund 18,6 Millionen in Deutschland lebende Menschen bzw. 22,5 Prozent der Bevölkerung Deutschlands einen Migrationshintergrund. Darunter fallen neun Millionen ausländische Staatsangehörige (10,9 Prozent der Bevölkerung) und 9,6 Millionen Deutsche (11,7 Prozent der Bevölkerung). Die meisten Menschen mit Migrationshintergrund haben Wurzeln in der Türkei (15,1 Prozent), Polen (10,1 Prozent) und der Russischen Föderation (6,6 Prozent). Wie sehr die Bevölkerung Deutschlands durch Migration geprägt wurde und wird zeigt sich besonders an der Gruppe der unter Fünfjährigen: 38,1 Prozent haben einen Migrationshintergrund.

Sozio-ökonomische Situation: *Kroll et al. (2017)* beschreiben einen regionalen sozioökonomischen Deprivationsindex für Deutschland, der regionale sozioökonomische Ungleichheiten in der Gesundheit sichtbar macht und Ansatzpunkte zur Erklärung regionaler Unterschiede in der Gesundheit aufzeigen kann. Der „German Index of Socioeconomic Deprivation“ (GISD) ist ein mehrdimensionaler Index aus regional aggregierten Einzelindikatoren für die drei Kerndimensionen des sozioökonomischen Status – Bildung, Beschäftigung und Einkommen. Auf Ebene der Regierungsbezirke zeigen sich anhand des GISD für etwa zwei Drittel der Todesursachen signifikante sozioökonomische Unterschiede. Auf Kreisebene ist die Lebenserwartung in den Kreisen mit der höchsten Deprivation je nach Beobachtungszeitpunkt mindestens 1,3 Jahre bei Frauen bzw. 2,6 Jahre bei Männern geringer als in den Kreisen mit der geringsten Deprivation. Der Index erklärt dabei 45,5 % bzw. 62,2 % der regionalen Unterschiede bei Frauen bzw. Männern. Zudem weist die Bevölkerung in Regionen mit hoher Deprivation signifikant höhere Raucherquoten auf und ist seltener sportlich aktiv, aber häufiger adipös

Sozio-ökonomische Situation und COVID-19 in Deutschland

Die Arbeit von *Wachtler et al. (2020b)* berichtet die Ergebnisse einer ersten bundesweiten Analyse der COVID-19-Meldedaten mit einem Index sozioökonomischer Benachteiligung (Deprivation) auf regionaler Ebene. Es wurden insgesamt 186.839 laborbestätigte COVID-19-Fälle in den Analysen berücksichtigt, die bis zum 16.06.2020 an das Robert Koch-Institut (RKI) übermittelt wurden. Diese Daten wurden auf Ebene der Landkreise und kreisfreien Städte (N = 401) mit dem GISD verknüpft. Für die Analysen wurden die Kreise anhand ihrer Indexwerte in fünf gleich große Gruppen (Quintile) eingeteilt, wobei das erste Quintil die 20 % der am wenigsten deprivierten Kreise und das fünfte Quintil die 20 % der am stärksten deprivierten Kreise in Deutschland enthält.

Das Infektionsgeschehen zeigt zu Beginn der Pandemie eine Häufung im Süden und Westen Deutschlands, woraus sich kein Hinweis auf den Einfluss ungünstiger sozio-ökonomischer Bedingungen ableiten lässt. Das ändert sich im späteren Infektionsgeschehen und lässt sich etwa daran erkennen, dass seit Ende April immer wieder Ausbrüche in fleischverarbeitenden Betrieben sowie unter Arbeitsmigranten in landwirtschaftlichen Betrieben und in Gemeinschaftsunterkünften für Geflüchtete auftreten, wobei hier eine intersektionelle Benachteiligung und Diskriminierung in Bezug auf die Arbeits- und Wohnbedingungen sowie Zugang zur Gesundheitsversorgung eine ausschlaggebende Rolle spielen dürften.

Auch diese „ökologische“ Studie ist aufgrund der ausschließlichen Verwendung von aggregierten sozioökonomischen Informationen auf der Ebene der Kreise nur eingeschränkt interpretierbar. Außerdem konnten weitere Faktoren, die eine Ausbreitung beeinflussen könnten, wie zum Beispiel die Bevölkerungsdichte oder Pendlerverflechtungen in diesen Analysen nicht berücksichtigt werden. Zusammengefasst deuten die Ergebnisse der Analysen darauf hin, dass das Infektionsrisiko in Deutschland regionalen Mustern sozioökonomischer Ungleichheit folgt. In der frühen Phase der Epidemie zeigt sich zunächst ein sozioökonomischer Gradient mit höheren Inzidenzraten in sozioökonomisch bessergestellten Kreisen, der sich allerdings im weiteren Verlauf des Ausbruchsgeschehens wandelt und sich in den am stärksten betroffenen Landesteilen im Süden Deutschlands ab Mitte April umdreht (*Wachtler et al. 2020b*).

Solch eine zeitliche Veränderung der Muster regionaler sozioökonomischer Ungleichheit im Verlauf des Ausbruchsgeschehens wird auch in der Arbeit von *Plümper et al. (2020)* beschrieben, die ebenfalls in Richtung des Vorliegens sozioökonomischer Ungleichheit zuungunsten sozial Benachteiligter im weiteren Verlauf der Pandemie deutet. In dieser Studie wird die kumulative Zahl von COVID-19 Erkrankungsfällen und Todesfällen auf Ebene der Stadt- und Landkreise (local districts) analysiert. Dabei wird das Infektionsgeschehen in zwei Phasen eingeteilt: Die erste Phase umfasst den Zeitraum bis zum 13.4.2020 und war stark durch den Ski-Tourismus beeinflusst, an welchem die Bewohner Süddeutschlands (v.a. von Baden-Württemberg und Bayern) wegen der Nähe zu den Alpen zu einem höheren Anteil beteiligt waren. Insofern ergibt sich auf der Ebene der Kreisdaten kein Hinweis auf ein erhöhtes COVID-19 Risiko für sozial schlechter gestellte Kreise. In der zweiten Phase, die den Zeitraum 14.4.- 19.5.2020 umfasst (der strenge Lockdown bestand in Deutschland vom 21. bzw. 22.3. bis zum 19.5.2020) zeigt sich im Gegensatz dazu ein signifikanter Zusammenhang zwischen Kreisen mit niedrigem mittlerem Einkommen bzw. schlechterer Ausbildung und erhöhter COVID-19 Mortalität. Die Ergebnisse für die Erkrankungszahlen gehen in die gleiche Richtung, sind aber weniger klar. Die Autoren räumen ein, dass die vorliegende „ökologische“ Studie höchstens plausible Zusammenhänge aufzeigen kann. Es ist zu ergänzen, dass zahlreiche Annahmen in der Studie über den zeitlichen Verlauf der Infektion und dessen Ursachen nicht unbedingt zwingend aus der Datenlage abgeleitet werden können.

In der Studie von *Dragano et al. (2020)* wird das Risiko für Krankenhausaufnahmen mit COVID-19 bei Berufstätigen und Arbeitslosen analysiert. Insgesamt wurden ca. 1,3 Millionen Personen im Alter von 18 bis 65 Jahren einbezogen, die bei der AOK Rheinland/Hamburg krankenversichert waren. Im Zeitraum 1.1. bis 4.6.2020 wurden 1.311 Personen mit der Krankenhausdiagnose COVID-19 hospitalisiert. Die höchsten Erkrankungsraten wurden für Langzeitarbeitslose gefunden. Bei diesen war das Risiko (Odds Ratio) für einen stationären Krankenhausaufenthalt wegen COVID-19 signifikant auf das 1,8 fache erhöht. Bei Kurzarbeitslosen war der Zusammenhang weniger deutlich ausgeprägt. Nach Ansicht der Autoren ist plausibel, dass bei Langzeitarbeitslosen wegen oftmals bestehender Gesundheitsprobleme von einer erhöhten Anfälligkeit (Vulnerabilität) für eine COVID-19 Infektion mit schwerem Verlauf auszugehen ist. Aus anderen Untersuchungen ist bekannt, dass Herz-Kreislauf Erkrankungen und Risikofaktoren wie Rauchen und Übergewicht bei Arbeitslosen häufiger vorliegen als bei Berufstätigen. Die Stärke der Studie liegt in der großen Zahl von Teilnehmern mit amtlichen Angaben zum Arbeitslosenstatus jedes Einzelnen. Andere sozioökonomische Angaben und Daten zum Gesundheitszustand standen nicht zur Verfügung.

5. Literatur

Arias E, Tejada-Vera B, Ahmad F 2021 Provisional Life Expectancy Estimates for January through June, 2020. CDC Vital Statistics Rapid Release Report No. 010 <https://www.cdc.gov/nchs/data/vsrr/VSRR10-508.pdf>

Berman JD, Ebisu K. 2020 Changes in U.S. air pollution during the COVID-19 pandemic. *Sci Total Environ.* 2020 Oct 15;739:139864.

BPB (Bundeszentrale für politische Bildung) 2021 Länderprofile Migration <https://www.bpb.de/gesellschaft/migration/laenderprofile/256273/einwandererbevoelkerung>

CDC (Center of Disease Control) 2020 covid-data: hospitalization-death-by-race and ethnicity. <https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/downloads/covid-data/hospitalization-death-by-race-ethnicity.pdf> Nov 2020

Chen K, Meng Wang, Conghong Huang, Patrick L Kinney, Paul T Anastas 2020 Air pollution reduction and mortality benefit during the COVID-19 outbreak in China. *Lancet Planet Health.* 2020 Jun; 4(6): e210–e212. + suppl material [https://www.thelancet.com/journals/lanplh/article/PIIS2542-5196\(20\)30107-8/fulltext#sec1](https://www.thelancet.com/journals/lanplh/article/PIIS2542-5196(20)30107-8/fulltext#sec1)

Cole MA, C. Ozgen, E. Strobl 2020 Air pollution exposure and COVID-19 in Dutch municipalities. *Environ. Resour. Econ.* 1–30 (2020). <https://www.iza.org/publications/dp/13367/air-pollution-exposure-and-covid-19>

Conticini E, B. Frediani, D. Caro 2020 Can atmospheric pollution be considered a co-factor in extremely high level of SARS-CoV-2 lethality in Northern Italy? *Environ. Pollut.* **261**,114465 (2020).

DÄ (Deutsches Ärzteblatt) 2020 15 Prozent der COVID-19-Todesfälle könnten auf Luftverschmutzung zurückgehen. Beitrag der Redaktion vom 27. Oktober 2020 <https://www.aerzteblatt.de/nachrichten/118644/Luftqualitaet-in-Europa-bessert-sich-weniger-Tote-durch-Schadstoffe>

Destatis 2021 Sterbefälle und Lebenserwartung Sonderauswertung zu Sterbefallzahlen der Jahre 2020/2021. www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bevoelkerung/Sterbefaelle-Lebenserwartung/sterbefallzahlen.html

Dragano N, Rupprecht CJ, Dortmann O et al. 2020 Higher risk of COVID-19 hospitalization for unemployed: an analysis of 1,298,416 health insured individuals in Germany. medRxiv: <https://doi.org/10.1101/2020.06.17.20133918> (Stand: 11.08.2020)

Dutton A 2020 Coronavirus (COVID-19) Related Mortality Rates and the Effects of Air Pollution in England Office for National Statistics (2020)

EEA (European Environmental Agency) 2020 Air quality in Europe — 2020 report EEA Report No 09/2020 (incl. COVID-19) <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2020>

Hoffmann B, Roebbel N, Gumy S, et al. 2020 Air pollution and health: recent advances in air pollution epidemiology to inform the European Green Deal: a joint workshop report of ERS, WHO, ISEE and HEI. *Eur Respir J* 2020; 56: 2002575 [https://doi.org/10.1183/13993003.02575-2020].

Johns Hopkins University 2021 COVID-19 Dashboard <https://coronavirus.jhu.edu/map.html>

Kroll LE, Schumann M, Hoebel J et al. (2017) Regionale Unterschiede in der Gesundheit: Entwicklung eines sozioökonomischen Deprivationsindex für Deutschland. *Journal of Health Monitoring* 2(2):103–120. <https://edoc.rki.de/handle/176904/2648.2> (Stand: 11.08.2020)

Ogen, Y. (2020). Assessing nitrogen dioxide (NO₂) levels as a contributing factor to coronavirus (COVID-19) fatality. *Science of the Total Environment*, 726 (2020) 138605

Plümper T, Neumayer E 2020 The Pandemic Predominantly Hits Poor Neighbourhoods? SARS-CoV-2 Infections and Covid-19 Fatalities in German Districts *Eur J Public Health.* 2020 Aug 20 : ckaa168. Published online 2020 Aug 20.

Pozzer A, Dominici F, Haines A, Witt C, Münzel T, Lelieveld J 2020 Regional and global contributions of air pollution to risk of death from COVID-19. *Cardiovascular Research*, Vol 116, Issue 14, 1 December 2020,

Raisi-Estabragh Z, McCracken C, Bethell MS et al. 2020 Greater risk of severe COVID-19 in non-White ethnicities is not explained by cardiometabolic, socioeconomic, or behavioural factors, or by 25(OH)-vitamin D status: study of 1,326 cases from the UK Biobank. medRxiv: <https://doi.org/10.1101/2020.06.01.20118943> (Stand: 11.08.2020)

Rommel A, Lippe E; Plaß D, Ziese T, Diercke M, Heiden, M, Haller S, Wengler A 2021 COVID-19-Krankheitslast in Deutschland im Jahr 2020. Durch Tod und Krankheit verlorene Lebensjahre im Verlauf der Pandemie. *Dtsch Arztebl* 2021; 12. Februar 2021; DOI: 10.3238/arztebl.m2021.0147; ONLINE first

Statista 2021 Anzahl Infektionen und Todesfälle in Zusammenhang mit dem Coronavirus (COVID-19) in Deutschland seit Januar 2020 <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1102667/umfrage/erkrankungs-und-todesfaelle-aufgrund-des-coronavirus-in-deutschland/> (Stand: 2. Februar 2021)

Sze S, Daniel Pan, Clareece R. Nevill, Laura J. Gray, Christopher A. Martin, Joshua Nazareth, Jatinder S. Minhas, Pip Divall, Kamlesh Khunti, Keith R. Abrams, Laura B. Nellums, Manish Pareek 2020 Ethnicity and clinical outcomes in COVID-19: A systematic review and meta-analysis. *EClinicalMedicine*. 2020 Dec; 29: 100630. Published online 2020 Nov 12.

Travaglio M, Yizhou Yu, Rebeka Popovic, Liza Selley, Nuno Santos Leal, Luis Miguel Martins 2021 Links between air pollution and COVID-19 in England *Environ Pollut*. 2021 Jan 1; 268(Pt A): 115859.

UBA (Umweltbundesamt) 2020 Auswirkungen der Corona-Krise auf die Luftqualität. Bericht vom 17.7.2020. <https://www.umweltbundesamt.de/faq-auswirkungen-der-corona-krise-auf-die>

Venter ZS, Aunan K, Chowdhury S, Lelieveld J. 2020 COVID-19 lockdowns cause global air pollution declines. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2020 Aug 11;117(32):18984-18990.

Venter ZS, Aunan K, Chowdhury S, Lelieveld J. 2021 Air pollution declines during COVID-19 lockdowns mitigate the global health burden. *Environ Res*. 2021 Jan;192:110403.

Wachtler B, Michalski N, Nowossadeck E, Diercke M, Wahrendorf M, Santos-Hövenner C, Lampert T, Hoebel J 2020b Sozioökonomische Ungleichheit im Infektionsrisiko mit SARS-CoV-2 – Erste Ergebnisse einer Analyse der Meldedaten für Deutschland. *Journal of Health Monitoring* 5(S7):19–31. DOI 10.25646/7056

Wachtler B, Michalski N, Nowossadeck E, Diercke M, Wahrendorf M, Santos-Hövenner C, Lampert T, Hoebel J 2020a Sozioökonomische Ungleichheit und COVID-19 – Eine Übersicht über den internationalen Forschungsstand. *Journal of Health Monitoring* 5(S7):3-18. DOI 10.25646/7058

Williamson EJ, Walker AJ, Bhaskaran K, et al. 2020 Factors associated with COVID-19-related death using OpenSAFELY. *Nature* 2020;584:430–6.

Wu X, Nethery RC, Sabath BM, Braun D, Dominici F 2020 Exposure to air pollution and COVID-19 mortality in the United States: A nationwide cross-sectional study. medRxiv. 2020 Apr 7:2020.04.05.20054502. Updated.

Yao Y, Jinhua Pan, Weidong Wang, Zhixi Liu, Haidong Kan, Yang Qiu, Xia Meng, Weibing Wang 2020 Association of particulate matter pollution and case fatality rate of COVID-19 in 49 Chinese cities. *Sci Total Environ*. 2020 Nov 1; 741: 140396.

Yao Y, Jinhua Pan, Zhixi Liu, Xia Meng, Weidong Wang, Haidong Kan, Weibing Wang 2021 Ambient nitrogen dioxide pollution and spreadability of COVID-19 in Chinese cities *Ecotoxicol Environ Saf*. 2021 Jan 15; 208:

Zheng P, Yonghong Liu, Hongbin Song, Chieh-Hsi Wu, Bingying Li, Moritz U.G. Kraemer, Huaiyu Tian, Xing Yan, Yuxin Zheng, Nils Chr. Stenseth, Christopher Dye, Guang Jia 2020, 'Risk of COVID-19 and long-term exposure to air pollution: evidence from the first wave in China'. *medRxiv* (<https://doi.org/10.1101/2020.04.21.20073700>). Preprint, posted 23.8.2020