**Wie gut ist unsere Luft wirklich?**

Eine Untersuchung der für den Menschen besonders schädlichen Schadstoffe Ozon und PM2,5 anhand der für 2030 vorgeschlagenen EU- sowie der WHO-Richtwerte.

**Autoren:**

Wiesbauer, Jonathan Matrikelnummer: 12038206

Wiederkehr, Philipp Gheorghe Matrikelnummer: 12138261

Premauer, Johannes Matrikelnummer: 01342290

Hartmann, Johannes Matrikelnummer: 01518628

916.113 PJ Interdisziplinäres Projekt – 2024S

Gruppe\_08\_02

LV-Leitung: Ao.Univ.Prof. Mag.rer.nat. Dr.rer.nat. Philipp Weihs

**Inhaltsverzeichnis**

[1. Einleitung 1](#_Toc170994924)

[1.1 Luftschadstoffe und die menschliche Gesundheit 1](#_Toc170994925)

[1.1.1 Entwicklung 2](#_Toc170994926)

[1.1.2 Quellen 3](#_Toc170994927)

[1.1.3 Gesundheitliche Auswirkungen 3](#_Toc170994928)

[1.1.4 Ausblick und Herausforderungen 5](#_Toc170994929)

[1.2 Ozon und seine Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit 6](#_Toc170994930)

[1.2.1 Quellen von Ozon 6](#_Toc170994931)

[1.2.2 Methoden zur Messung von Ozon in der Luft 7](#_Toc170994932)

[1.2.3 Ausblick 7](#_Toc170994933)

[1.2.4 Auswirkungen auf Flora und Fauna 8](#_Toc170994934)

[1.2.5 Gesundheitliche Folgen 8](#_Toc170994935)

[1.3 Feinstaub – Particulate Matter PM 10](#_Toc170994936)

[1.3.2 Quellen von Feinstaub 12](#_Toc170994937)

[1.3.3 Unterscheidung zwischen verschiedenen Arten von Feinstaub 13](#_Toc170994938)

[1.3.4 Chemische Zusammensetzung von Feinstaubpartikeln 14](#_Toc170994939)

[1.3.5 Methoden zur Messung von Feinstaub in der Luft 15](#_Toc170994940)

[1.3.6 Technologische Lösungen zur Verringerung von Feinstaubemissionen 16](#_Toc170994941)

[1.3.7 Herausforderungen bei Feinstaubemissionen 17](#_Toc170994942)

[1.4 Herkunft und Klassifizierung der Schadstoffe 18](#_Toc170994943)

[1.4.1 Grenz- und Schwellenwerte 19](#_Toc170994944)

[1.4.2 Messtechniken 21](#_Toc170994945)

[1.4.3 Derzeitige Situation in Österreich – PM2,5 22](#_Toc170994946)

[1.4.4 Derzeitige Situation in Österreich – Ozon 23](#_Toc170994947)

[1.4.5 Problemdarstellung 24](#_Toc170994948)

[1.4.6 Fragestellung 24](#_Toc170994949)

[1.4.7 Hypothesen 24](#_Toc170994950)

[2. Methodik 25](#_Toc170994951)

[2.1 Datenauswertung von Ozon 27](#_Toc170994952)

[2.2 Datenauswertung von PM2.5 28](#_Toc170994953)

[2.3 Analyse der überschrittenen Tage 29](#_Toc170994954)

[2.4 Schwächen der Methodik 30](#_Toc170994955)

[3. Ergebnisse 30](#_Toc170994956)

[3.1 Ergebnisse Ozon 30](#_Toc170994957)

[3.2 Ergebnisse PM2.5 36](#_Toc170994958)

[4. Schlussfolgerungen & Diskussion 41](#_Toc170994959)

[4.1 Interpretation der Ergebnisse 42](#_Toc170994960)

[4.2 Gesundheitliche Aspekte – PM2,5 42](#_Toc170994961)

[4.3 Gesundheitliche Aspekte – Ozon 43](#_Toc170994962)

[4.4 Ergebnisse im Licht der Klimakrise 45](#_Toc170994963)

[4.5 Städte Österreichs im nationalen und internationalen Vergleich 49](#_Toc170994964)

[4.6 Maßnahmen 51](#_Toc170994965)

[4.7 Beschränkungen der Forschung 52](#_Toc170994966)

[4.8 Empfehlungen für weiterführende Forschung 53](#_Toc170994967)

[Abbildungsverzeichnis 55](#_Toc170994968)

[Tabellenverzeichnis 56](#_Toc170994969)

[Literaturverzeichnis 57](#_Toc170994970)

# Einleitung

## 1.1 Luftschadstoffe und die menschliche Gesundheit

Eine der größten Katastrophen der jüngeren Public Health - Geschichte Europas stellt Londons *great smog* von 1952 dar. Damals starben aufgrund der enormen gesundheitlichen Belastung durch die Luftverschmutzung 12.000 Menschen. Seitdem hat sich im Sinne der Luftqualitätssicherung einiges getan und viele Gesetze und Regeln sind in Kraft, um die Gesundheit der Bevölkerung zu schützen und garantieren (Holgate, 2022). Trotzdem führt Luftverschmutzung auch heute noch zu geschätzten 7 Millionen frühzeitigen Todesfällen weltweit, sowie zu einer großen Beeinträchtigung der Lebensqualität und einer Vielzahl von Lungen- und kardiovaskulären Krankheiten. Während ein Großteil der europäischen Bevölkerung von einer Luftverschmutzung über den empfohlenen Grenzwerten betroffen ist, wird davon ausgegangen, dass dadurch die durchschnittliche Lebenserwartung eines Europäers um 9 Monate gesenkt wird. Zusätzlich sterben in der EU, nach einer Schätzung aus dem Jahr 2018, jährlich über 400.000 Menschen aufgrund von Schadstoffen und die gesundheitsbezogenen externen Kosten belaufen sich auf mehrere hundert Milliarden Euro. Aufgeschlüsselt sind dies etwa 399.000 Todesfälle durch Feinstaub PM2,5, 75.000 durch Stickstoffdioxid und 13.600 durch bodennahes Ozon. Es finden sich darin Überschneidungen, beispielsweise spielt Stickstoffdioxid eine wichtige Rolle in der Entstehung von Ozon (Rechnungshof, 2018, p. 62). Bis 2020 hatten sich die Zahlen bereits verändert – 238.000 Tote wurden Tote aufgrund der erhöhten PM2,5-Konzentrationen identifiziert, 49.000 Tote aufgrund der erhöhten NO2-Konzentrationen und 24.000 Tote aufgrund der erhöhten O3-Konzentrationen (Agency, 2022). Todesfälle sind aber nicht alles. Luftschadstoffe verursachen Krankheiten, unter denen viele Menschen jahrelang leiden. Berechnet man die Jahre die alle Menschen der EU unter einer bestimmten Krankheit oder Belastung leben müssen, so führte 2019 die Belastung mit PM2,5-Feinstaub zu 175.702 Jahren, die Menschen in den EU-Ländern mit chronisch obstruktiven Lungenerkrankungen leben mussten. Gleichzeitig führte die Belastung mit NO2 zu 175.070 Jahren, die Menschen mit Diabetes Mellitus Typ 2 in insgesamt 31 europäischen Ländern leben mussten. Außerdem wurden in 23 Europäischen Ländern insgesamt 12.253 Menschen mit Atemwegsinfektionen aufgrund von akuter Belastung durch erhöhte Ozon-Konzentrationen in Spitäler eingewiesen (Agency, 2022).

Die größte Belastung der Bevölkerung findet jedoch in Entwicklungs- und Schwellenländern statt, wo global gesehen laut WHO-Schätzungen 89% der Luftverschmutzungsbedingten-Todesfälle auftreten (WHO, 2022). In vielen struktur- und einkommensschwächeren Ländern besteht auch zusätzlich noch eine große gesundheitliche Belastung durch die häusliche Luftverschmutzung durch die Verbrennung von Feststoffen zum Heizen oder Kochen. Die allein dadurch entstehende Belastung wird für 2 Millionen Todesfälle verantwortlich gemacht.

### 1.1.1 Entwicklung

Weiters wird davon ausgegangen, dass der Klimawandel die allgemeine Luftverschmutzung über viele Mechanismen weiter beeinflussen wird. Dazu zählt der Wind, die Luftfeuchtigkeit, die Temperatur sowie vertikale Austauschprozesse und Regenfälle. Während die PM2,5- (Particulate matter 2,5 µm) und die Ozon Werte seit 1860 um 5% bzw. 2% gestiegen sind, führen diese erhöhten Werte bereits heute zu einer deutlichen gesundheitlichen Mehrbelastung der Bevölkerung (Orru et al., 2017). Für die menschliche Gesundheit ist vor allem die PM2,5 Belastung relevant, da diese alveolengängig sind, also sehr tief in die Lunge vordringen. Allerdings spielen auch PM10 und PM0.1 eine nicht unbedeutende Rolle (Sierra-Vargas and Teran, 2012). Weiters wurde bereits ein Anstieg von 1,2 ppm Ozon pro °C Erwärmung nachgewiesen, weshalb davon ausgegangen wird, dass sich diese Prozesse mit der fortschreitenden Klimaerwärmung verstärken werden (Orru et al., 2017). Ozon soll in Hitzeperioden sogar für mehr Todesfälle als der Temperaturanstieg an sich verantwortlich sein (Sierra-Vargas and Teran, 2012). Zusätzlich entsteht hiermit eine deutliche Mehrbelastung des Gesundheitssystems. Es wurde jedoch gezeigt, dass Interventionen zur Verbesserung der Luftqualität sehr schnell zu einer Verbesserung der allgemeinen Gesundheit führen und damit sogar kosteneffizient sind. So konnten bereits während und vor allem nach olympischen Spielen oder temporären Schließungen von industriellen Anlagen gezeigt werden, dass die Luftverschmutzung und die damit verbundenen gesundheitlichen Beschwerden sehr schnell abnehmen (Schraufnagel et al., 2019).

### 1.1.2 Quellen

Gerade in urbanen Zentren, in denen immer mehr Menschen leben und leben werden, stellt die Luftverschmutzung eine große Herausforderung dar. Ein großer Teil davon, wird durch mit fossilen Brennstoffen betriebenen Motoren verursacht, die vordergründig PM2.5 PM0.1, elementares Karbon und NO2 aufstoßen. Zusätzlich gibt es aber auch bedeutende Quellen der Luftverschmutzung durch das Aufwirbeln von Staub, sowie dem Abrieb von Bremsen, Reifen und Straßen (Boogaard et al., 2022). Neben anthropogenen, also menschgemachten, Emissionen von PM2,5 Feinstaub und VOCs (Volatile Organic Compounds), die zur bodennahen Ozonbildung beitragen, gibt es auch eine Reihe natürlicher Prozesse, die bei einer Klimaerwärmung auch ohne menschlichen Einfluss dazu beitragen können, die Luftqualität zu verschlechtern. So führen die veränderten klimatischen Bedingungen zum Beispiel zu einer verstärkten Freisetzung von biogenen VOCs, zu vermehrten Waldbrände und. zu heftigeren Sandstürmen; alles Faktoren, die die Luftverschmutzung vorantreiben (Orru et al., 2017).

### 1.1.3 Gesundheitliche Auswirkungen

Neben der Beeinträchtigung der Funktionsfähigkeit von Pflanzen sowie der Auswirkungen auf Tiere, hat die fortschreitende Luftverschmutzung deutliche Einflüsse auf die menschliche Gesundheit. Einerseits wirken sich diese Schadstoffe primär auf die Lungenfunktion aus und verursachen und fördern hier eine Vielzahl von Lungenkrankheiten, wie Asthma, COPD und virale Infekte. Andererseits wurden zusätzlich bereits Auswirkungen auf den gesamten Körper, wie Diabetes mellitus, rheumatische- und neurodegenerative Krankheiten, sowie eine allgemeine Zunahme an Todesfällen und Hospitalisationen beschrieben (Orru et al., 2017) (Boogaard et al., 2022).

Ein Bild, das Text, Screenshot enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Abbildung 1: Angenommene Assoziation zwischen bestimmten Gesundheits-Outcomes und Verkehr-bedingter Luftverschmutzung. (Boogaard et al., 2022)

Einmal über die Lunge aufgenommen, können diese Lungenschadstoffe einige pathologische Reaktionen hervorrufen. Im Vordergrund steht hier der oxidative Stress, die Freisetzung von einer Vielzahl von inflammatorischen Botenstoffen, sowie die Bildung von ROS (Reaktiven Oxygen Spezies), die in weitere Folge auch zu DNA-Schäden und onkologischen Erkrankungen führen können. Manche diese Feinpartikel gelangen sogar in das zentrale Nervensystem. Neben der Beeinträchtigung vom generellen Wachstum von Pflanzen durch die Luftverschmutzung, führt diese auch zu einer verstärkten Pollen-Produktion, wodurch wiederum allergische Asthmatiker stärker betroffen sind. Besonders Diesel-Abgase erzeugen nachgewiesenermaßen synergistische Effekte mit den Allergenen (Sierra-Vargas and Teran, 2012).

Eine ähnlich stark betroffene Gruppe stellen Kinder unter 5 Jahren dar, für die die WHO schätzt, dass es durch Luftverschmutzung zu 900.000 Todesfällen jährlich kommt (Brugha and Grigg, 2014). Ebenso nachgewiesen wurde, dass erhöhte Luftverschmutzung und die Nähe zu starken Verkehrsadern mit einem niedrigeren Geburtsgewicht einhergeht und die Lungenfunktion früh beeinträchtigen kann.

Es wird davon ausgegangen, dass die maternal aufgenommen Feinstaubteilchen bis in die Plazenta und den Fetus gelangen können (Whitehouse and Grigg, 2021). Die Lungenreifung findet bereits sehr früh in-utero statt und ist besonders in den ersten Lebensjahren sehr empfindlich für äußere Einflüsse. Die genauen pathologischen Mechanismen, die zu dieser Einschränkung führen, sind noch nicht ausreichend erforscht, allerdings zeigen Tierversuche, eine schlechtere Entwicklung der Alveolen, wenn diese PM ausgesetzt sind. Diese Schäden durch Luftverschmutzung haben besonderes für Frühgeborene Kinder beträchtliche Folgen, deren Lungen aufgrund der verminderten Schwangerschaft von sich aus bereits schlechter entwickelt sind. Es gibt Hinweise, darauf, dass diese frühzeitige Schädigung der Lungenentwicklung auch noch im späteren Jugendalter und sogar bei Erwachsenen nachgewiesen werden kann. (Lundberg et al., 2022) In Bezug auf die kindliche Lungenfunktion konnte bereits gezeigt werden, dass großflächige Feinstaubregulierungen im Süden Kaliforniens schnell zu einer Besserung und Abnahme der Beschwerden führen konnte (Whitehouse and Grigg, 2021).

### 1.1.4 Ausblick und Herausforderungen

In Studien wird derzeit davon ausgegangen, dass die globale Luftverschmutzung noch bis 2030-2050 zunehmen, danach jedoch abnehmen wird. Trotzdem sind alle diese Prognosen und Trendanalysen mit Vorsicht zu betrachten, da die Entwicklung der Klimaerwärmung mit ihren Kipppunkten und multifaktoriellen Änderungen in der Atmosphäre sehr schwer vorherzusagen und zu erfassen sind. Zusätzlich könnte es zwar gelingen anthropogene Emissionen zu reduzieren, doch würden auch dann die negativen Einflüsse der weiter fortschreitenden Klimaerwärmung zu einer Mehrbelastung der menschlichen Gesundheit führen und häufigere Naturkatastrophen ein weiterhin schwer zu prognostizierender Faktor bleiben (Orru et al., 2017).

Dazu kommt, dass die Zusammensetzung der Luftverschmutzung und die damit verbundenen gesundheitlichen Implikationen deutliche regionale Unterschiede aufweist und damit Forschungserkenntnisse nicht automatisch überregional verglichen und umgesetzt werden können.

Generell werden mit den meisten epidemiologischen Erhebungen und Messungen nur grobe Aussagen für bestimmte Regionen getroffen, die damit schwer auf ein Individuum und die mit ihm verbundenen gesundheitlichen Beschwerden übertragbar sind. Jedoch wird hier mittlerweile vermehrt auch auf das Tragen von persönlichen Monitoren gesetzt, die damit die Zuordnung von gemessener Luftverschmutzung und folgenden gesundheitlichen Beschwerden ermöglichen. Weiters kann man auch die vorliegenden Emissionsparameter mit den diesen Zeitraum betreffenden Notaufnahmebesuchen aufgrund von respiratorischen Beschwerden vergleichen (Brugha and Grigg, 2014).

Während bereits vielfach über die Wirkung, Effekte und Auswirkungen auf die öffentliche Gesundheit von bestimmten Luftschadstoffen geforscht wurde, stellt zusätzlich auch die Kombination und mögliche Wechselwirkungen eine sehr große Herausforderung dar, die wissenschaftlich noch nicht ausreichend ergründet wurde. Es hat sich in Studien bereits gezeigt, dass die Präsenz von multifaktoriellen Luftschadstoffen die Wirkung dieser Mischung im Vergleich zu der Wirkung des einzelnen Stoffes beeinflussen kann. Da auch bekannt ist, dass sich die Zusammensetzung der Luftschadstoffe durchaus regional unterscheiden kann und überregionale Vergleiche und Schlüsse aus einzelnen Studien damit schwierig sind, hat sich eine chinesische Studie acht verschiedene Großstädte in unterschiedlichen Regionen und klimatischen Bedingungen in Bezug auf deren Luftverschmutzung und die dabei beobachtete Mortalität angesehen. Ein besonders hohes Risiko für Mortalität haben dabei die Kombinationen PM2,5, NO2 und Ozon, sowie PM2,5 und NO2 ergeben, während das Risiko einer multifaktoriellen Luftverschmutzung eher im Sommer als im Winter gegeben war. Die Zusammensetzungen für hohes Mortalität-Risiko unterschieden sich jedoch unter den einzelnen Städten (Zhao et al., 2022).

## 1.2 Ozon und seine Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit

### 1.2.1 Quellen von Ozon

Ozon oder O3 ist ein Gas, das zumeist in der Stratosphäre gebildet wird und dort die für die menschliche Gesundheit essenzielle Ozonschicht bildet, die uns vor der UV-Strahlung der Sonne und schwerwiegenden Folgen wie Hautkrebs schützt.

Ebenso kann es jedoch auch in der Troposphäre durch chemische Reaktionen gebildet werden, durch eine chemische Reaktion zwischen Nitrogenoxiden und VOCs. Letztere werden durch menschliche Aktivität immer häufiger ausgestoßen und tragen mit Sonnenstrahlung sowie der zunehmenden Hitze dazu bei, dass vermehrt bodennahes Ozon entsteht (Manisalidis et al., 2020). So lassen sich die höchsten Ozonwerte üblicherweise im Sommer feststellen, da dessen Bildung sowie die Freisetzung der begünstigenden Stoffe bei hohen Temperaturen vermehrt stattfindet. Methan jedoch, das vermehrt ausgestoßen wird und das häufigste VOC darstellt, führt nun zu steigenden Ozonwerten im gesamten Jahr (Kinney, 2018). Neben dem Ozon das bodennah im Freien unter Hitze und Sonneneinstrahlung entsteht, spielt für die menschliche Gesundheit auch das Ozon in Innenräumen eine beträchtliche Rolle. Hier zeigt sich Ozon zwar meist mit niedrigeren Konzentrationen, als außerhalb der Gebäude. Aufgrund der längeren Aufenthaltszeit vieler Menschen in Innenräumen spielt es jedoch eine ebenso wesentliche Rolle und kann damit 25-60% der gesamten Aufnahme ausmachen (Weschler, 2006).

### 1.2.2 Methoden zur Messung von Ozon in der Luft

Um Ozon im Rahmen der Richtwerte und Bestimmungen zu messen und um diese Werte in Einklang mit den geltenden Grenzwerten zu setzen, ist laut Rechtstext die Ultraviolett-Photometrie anzuwenden (RIS - Ozonmesskonzeptverordnung - Bundesrecht Konsolidiert, Fassung Vom 07.06.2024, n.d.). Mithilfe dieses Photometers kann die Ozonkonzentration vor Ort genau gemessen werden. Zuerst fließt die Außenluft hier durch einen Ozonvernichter/Scrubber, in dem Ozon zu Sauerstoff umgewandelt wird. Diese Luft wird dann weiter durch eine Absorptionszelle geleitet, die die durchgehende UV-Strahlung als Referenzwert misst. Parallel wird ein weiterer Luftstrom am Scrubber vorbeigeführt und hier erneut die UV-Strahlung gemessen. Nun kann man die Referenzwerte auf die Werte der unbehandelten Probe anlegen und erhält damit einen Verhältniswert. Die Nachweisgrenze liegt hierbei bei 1 µg/m³ (Ozon-Messmethode (Prinzip UV-Absorption), Fassung Vom 07.06.2024, n.d.).

### 1.2.3 Ausblick

Es wird vermutet, dass dieser Trend der steigenden Ozonwerte anhält und mit dem Klimawandel weiter zunimmt(Orru et al., 2017) und dass, das bodennahe Ozon zwischen 1860 und 2000 bereits um 2% zugenommen hat (Y. Fang et al., 2013).

Auch in den letzten beiden Jahrzehnten konnte man beobachten, dass der Temperaturanstieg um 1°C mit jeweils einer Zunahme von 1.2 ppb (Teile pro Milliarde) Ozon vergesellschaftet war (Bloomer et al., 2009).

### 1.2.4 Auswirkungen auf Flora und Fauna

Bodennah kann Ozon, das ein starkes Oxidationsmittel ist, das Wachstum und den Ertrag von Pflanzen hemmen und zelluläre Funktionen einschränken. Zusätzlich führt Ozon zu einem Verschluss der Stomata, wodurch weniger CO2 aufgenommen und damit weniger Photosynthese stattfinden kann (Singh et al., 2009). Dazu führt es auch zu einer Reihe weiterer pathologischen Prozesse in Tieren und Menschen. Primär wirkt Ozon hier an den ihm zugänglichen Oberflächen, wie der Epidermis sowie Tränengängen.

Da Ozon allerdings als Gas vorliegt und eine schwache Wasserlöslichkeit aufweist, kann es, wie bereits in der Einleitung beschrieben, auch sehr weit in die Lunge hineingelangen und dort zu *„biochemischen, morphologischen, funktionalen und autoimmunologischen Schäden führen“*(Manisalidis et al., 2020) und weiters eine vermehrte Ausschüttung von Entzündungsmarkern und Entzündungsreaktionen auslösen (Wiegman et al., 2020).Im Bezug zu den Pathomechanismen gibt es Ähnlichkeiten zur Reaktion der Lunge auf PM. Ozon gelangt nicht in die Zelle, reagiert aber mit der Lungenflüssigkeit, wodurch Reaktive Oxygen Spezies (ROS) auftreten, die wiederum den lokalen oxidativen Stress verstärken und zu Entzündungsprozessen und Epithelschaden führen. Ozon interagiert hier mit einigen Lipiden und oxidiert diese. Diskutiert wird auch ein mögliche Mitochondrienschaden durch Ozon, der weiter zu einer verminderten Lungenbelüftung und Emphysemen führen kann.

### 1.2.5 Gesundheitliche Folgen

Einige Gesundheitliche Folgen und Pathomechanismen der allgemeinen Luftverunreinigung wurden bereits in der Einleitung vorgestellt. Spezifisch auf Ozon bezogen, lässt sich aber sagen, dass bei hohen Ozonkonzentrationen viele gesundheitlichen Beschwerden, wie chronischen Atemwegserkrankungen (zB Asthma oder COPD), aber auch erhöhte Raten von Frühgeburten und kognitivem Leistungsabfall nachgewiesen werden konnten (Orru et al., 2017).

Erhöhtes Ozon trifft weiters vor allem die ältesten und jüngsten Bevölkerungsanteile und führt zu vermehrten Spitalsaufnahmen aufgrund von Asthma und COPD bei älteren Personen sowie vermehrten Ambulanzbesuchen aufgrund von Asthma bei Kindern.Einerseits sind Raucher besonders gefährdet, durch die zusätzliche Ozonbelastung eine weiter eingeschränkte Lungenfunktion zu erhalten, aber auch Nicht-Raucher zeigten schlechtere Werte nach einer kurzeitigen erhöhten Ozon-, PM2,5- und NO2-Exposition. Eine kurzeitige Luftschadstoffbelastung reichte in Studien ebenfalls aus, um zu einer erhöhten Anzahl an Asthma-Exazerbationen sowie Spitalsaufnahmen zu führen. Bei Kindern führte eine kurzzeitig erhöhte Ozonbelastung zu vermehrten Aufnahmen und eine erhöhte allgemeine Luftverunreinigung zu vermehrten respiratorischen Symptomen und Ambulanzbesuchen (Kurt et al., 2016). Eine erhöhte Ozonbelastung führte über alle Altersgruppen zu vermehrten Notaufnahmebesuchen, dieser Effekt fällt jedoch nicht so stark wie bei einer erhöhten PM oder NO2 Belastung aus. Noch häufiger traten diese Folgen bei Patienten mit bekanntem Asthma oder COPD auf. Während es noch zu wenige Studien über die Effekte einer langfristigen Ozonbelastung gibt, lassen sich bereits Hinweise darauf finden, dass diese das vorzeitige Altern der Lunge begünstigen (Lippmann, 1989). Eine erhöhte Ozonbelastung kann weiters der Atmosphäre eine reduzierte Lungenfunktion bedingen und erhöht das Emphysemrisiko (Wiegman et al., 2020). Ergänzend konnte gezeigt werden, dass ein jährlicher Anstieg von 1 ppb mit einem Anstieg der Spitalsaufnahmen aufgrund von akutem respiratorischem distress syndrom (ARDS) führt und dieser Effekt auch in weniger dicht bewohnten Gegenden und auch bei Ozonbelastungen unterhalb der gegenwärtig geltenden Grenzen auftreten kann (Mumby et al., 2019). Während Luftverschmutzung nachgewiesenermaßen zu einer Verschlechterung der Asthma-Symptome führen kann, ist auch die Entstehung von Asthma dadurch möglich (Kurt et al., 2016). Zusätzlich ließen sich in Zeiträumen mit hohen Ozonwerten bereits vermehrt respiratorische (1.13%), kardiovaskuläre (0.45%) und allgemeine Todesfälle (0.33%) nachweisen und auch generell kardiovaskuläre Events traten vermehrt auf. Im Winter konnten diese Anstiege in dieser Studie nicht festgestellt werden (Jiang et al., 2023).

Arlamierenderweise konnte weiters bereits eine Zunahme der Mortalität um 0,66% in europäischen Städten bei einem Anstieg von 10 ppb Ozon im 1-Stunden Maximum nachgewiesen werden. Zusätzlich fand eine Studie in Genua, Italien einen Anstieg um 4,0% bei einer Zunahme des Ozons um 25 ppb (Weschler, 2006). Es wird davon ausgegangen, dass diese emissionsbedingten Todesfälle durch den Klimawandel noch weiter zunehmen werden und die Ozonmenge in unserer Stratosphäre damit eine zunehmend erhebliche Gefahr für die menschliche Gesundheit darstellen wird (Yuanyuan Fang et al., 2013).Tatsächlich stellt diese jedoch bereits heute eine erhebliche Herausforderung für unser Gesundheitssystem dar, da laut aktuellen Richtlinien bereits 92% der Weltbevölkerung zu hohen Ozondosen ausgesetzt sind (Wiegman et al., 2020).

## 1.3 Feinstaub – Particulate Matter PM

Feinstaub, definiert als Partikel mit einem Durchmesser von weniger als 10 Mikrometern (PM10) oder sogar weniger als 2,5 Mikrometern (PM2.5), ist eine komplexe Mischung aus festen und flüssigen Partikeln in der Luft. Diese Partikel stammen aus einer Vielzahl von Quellen, darunter Verkehrsemissionen, industrielle Prozesse, Landwirtschaft und natürliche Quellen wie Staubstürme und Vulkanaktivitäten.

Die Bedeutung von Feinstaub liegt sowohl in seinen direkten Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit als auch in seinen indirekten Auswirkungen auf die Umwelt und das Klima. Zahlreiche wissenschaftliche Studien haben gezeigt, dass Feinstaubpartikel, insbesondere solche mit einem Durchmesser von weniger als 2,5 Mikrometern (PM2.5), die menschliche Gesundheit beeinträchtigen (Pope, 2006).

Darüber hinaus trägt Feinstaub zur Verschlechterung der Luftqualität bei, was zu Sichtbehinderungen und saurem Regen führen kann. Dies hat wiederum Auswirkungen auf die Ökosysteme und die biologische Vielfalt. In Bezug auf den Klimawandel können Feinstaubpartikel die Temperatur der Atmosphäre beeinflussen, indem sie Sonnenlicht absorbieren oder reflektieren und so die Wärmebilanz der Erde verändern (IPCC, 2013).

Direkte Kühlwirkung durch Reflexion von Sonnenlicht

Ein wesentlicher positiver Effekt von Feinstaub ist seine Fähigkeit, Sonnenlicht direkt zu reflektieren. Feinstaubpartikel in der Atmosphäre streuen einfallendes Sonnenlicht zurück ins All, was die Menge an Energie reduziert, die die Erdoberfläche erreicht. Diese direkte Reflexion führt zu einer Verringerung der Oberflächentemperaturen und wirkt somit der Erderwärmung entgegen Haywood, 2000) .

Indirekte Kühlwirkung durch Wolkenbildung

Neben der direkten Reflexion trägt Feinstaub auch indirekt zur Abkühlung bei, indem er die Eigenschaften von Wolken verändert. Feinstaubpartikel fungieren als Kondensationskeime, um die sich Wassertröpfchen bilden können. Dieser Prozess kann zur Bildung von Wolken mit mehr und kleineren Tröpfchen führen, was die Albedo (das Reflexionsvermögen) der Wolken erhöht. Hellere Wolken reflektieren mehr Sonnenlicht zurück ins All, was ebenfalls eine kühlende Wirkung hat (Twomey, 1974). Diese sogenannte "Twomey-Effekt" trägt signifikant zur Abkühlung der Erdoberfläche bei.

Verschiedene Klimamodelle haben die kühlenden Effekte von Feinstaub quantifiziert. Eine Studie von Andreae et al. (2005) zeigt, dass die anthropogene Freisetzung von Feinstaub seit der industriellen Revolution eine bedeutende kühlende Wirkung hatte, die einen Teil der Erwärmung durch Treibhausgase kompensiert hat. Andere Untersuchungen unterstützen diese Ergebnisse und betonen die Bedeutung von Aerosolen in der Klimamodellierung (Andreae, 2005).

Angesichts dieser vielfältigen Auswirkungen ist die Überwachung und Reduzierung von Feinstaubemissionen zu einem wichtigen Anliegen für Regierungen, Forscher und die breite Öffentlichkeit geworden. Maßnahmen zur Verbesserung der Luftqualität und zum Schutz der menschlichen Gesundheit erfordern ein tiefes Verständnis der Quellen, der Zusammensetzung und der Auswirkungen von Feinstaubpartikeln sowie effektive politische und technologische Lösungen. In diesem wissenschaftlichen Text werden wir eine eingehende Analyse der Definition, Zusammensetzung, Auswirkungen, Messung, Überwachung, Reduzierung und aktuellen Forschungsergebnisse im Zusammenhang mit Feinstaub präsentieren, um ein umfassendes Verständnis dieses wichtigen Umwelt- und Gesundheitsthemas zu fördern.

**1.3.1 Relevanz und Bedeutung von Feinstaub für die Umwelt und die Gesundheit des Menschen**

Feinstaub beeinträchtigt die Luftqualität erheblich, indem er die Sicht beeinträchtigt, sauren Regen verursacht und die Ozonschicht abbaut. Diese Partikel können auch in Boden- und Wassersysteme gelangen und dort zu Verschmutzung führen, was wiederum die biologische Vielfalt und die Gesundheit von Ökosystemen beeinträchtigt (Dockery, 1994).

Darüber hinaus spielt Feinstaub eine Rolle bei der Klimaänderung. Feinstaubpartikel können die Atmosphäre entweder erwärmen oder abkühlen, indem sie Sonnenlicht absorbieren oder reflektieren. Dies trägt zur Modulation des Strahlungsantriebs der Erde bei und kann somit das globale Klima beeinflussen (IPCC, 2013).

Besonders besorgniserregend sind die Auswirkungen von ultrafeinem Feinstaub (PM0.1), der aufgrund seiner winzigen Größe tiefer in die Lunge eindringen und direkt in den Blutkreislauf gelangen kann. Diese Partikel sind mit einer erhöhten Entzündungsreaktion im Körper verbunden und können das Risiko für Herz-Kreislauf-Erkrankungen und andere schwerwiegende Gesundheitsprobleme erhöhen (Li, 2003).

In Anbetracht der ernsthaften Auswirkungen von Feinstaub auf die Umwelt und die menschliche Gesundheit ist es unerlässlich, wirksame Maßnahmen zur Reduzierung von Feinstaubemissionen zu ergreifen, um die Luftqualität zu verbessern und die Gesundheit der Bevölkerung zu schützen.

### 1.3.2 Quellen von Feinstaub

Der Verkehr, insbesondere Kraftfahrzeuge mit Verbrennungsmotoren, ist eine bedeutende Quelle für Feinstaubemissionen. Abgaspartikel aus Fahrzeugen enthalten eine Vielzahl von Substanzen, einschließlich Ruß, Metallen und organischen Verbindungen, die zur Bildung von Feinstaubpartikeln beitragen (Schauer, 2001).

Industrielle Aktivitäten wie Verbrennung von fossilen Brennstoffen, Abgase aus Fabriken und Emissionen aus Rauchgasreinigungsanlagen tragen ebenfalls zur Feinstaubbelastung bei. (Dockery, 1994) Ebenso landwirtschaftliche Aktivitäten wie Bodenbearbeitung, Viehhaltung und Verbrennung von landwirtschaftlichen Abfällen können zu Feinstaubemissionen führen, insbesondere in ländlichen Gebieten (Thornburg, 2015).

Natürliche Ereignisse wie Staubstürme, vulkanische Aktivitäten, Waldbrände und Meeresgischt tragen ebenfalls zur Freisetzung von Feinstaub in die Atmosphäre bei (Middleton, 2008).

### 1.3.3 Unterscheidung zwischen verschiedenen Arten von Feinstaub

Feinstaub wird oft nach der Größe der Partikel klassifiziert, wobei die beiden häufigsten Kategorien PM10 und PM2.5 sind, die Partikel mit einem Durchmesser von weniger als 10 Mikrometern bzw. 2,5 Mikrometern repräsentieren. Diese Klassifizierung basiert auf der Erkenntnis, dass Partikel unterschiedlicher Größe unterschiedliche Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt haben können.

PM10 bezieht sich auf Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser von weniger als 10 Mikrometern. Diese Partikel umfassen eine breite Palette von Materialien, einschließlich Staub, Ruß, Pollen, Schimmelpilzsporen und mehr. PM10-Partikel können durch die Atemwege gelangen und bis zu den Bronchien und Lungenbläschen vordringen. Studien haben gezeigt, dass PM10 mit einer Vielzahl von Gesundheitsproblemen verbunden ist, darunter Atemwegserkrankungen, Herz-Kreislauf-Erkrankungen und sogar vorzeitiger Tod (Pope, 2006).

PM2.5 bezieht sich auf Partikel mit einem Durchmesser von weniger als 2,5 Mikrometern. Diese ultrafeinen Partikel können tiefer in die Lunge eindringen und sogar in den Blutkreislauf gelangen. Aufgrund ihrer winzigen Größe haben PM2.5-Partikel eine größere Oberfläche pro Einheit Masse im Vergleich zu größeren Partikeln wie PM10, was ihre Toxizität und ihre Fähigkeit, toxische Verbindungen zu tragen, erhöht. Studien haben gezeigt, dass PM2.5-Exposition mit einer erhöhten Inzidenz von Atemwegserkrankungen, Herz-Kreislauf-Erkrankungen, Schlaganfällen und anderen Gesundheitsproblemen verbunden ist, insbesondere bei langfristiger Exposition (Brook, 2010).

Obwohl sowohl PM10 als auch PM2.5 gesundheitsschädlich sind, haben sie unterschiedliche Auswirkungen auf die Gesundheit und die Umwelt aufgrund ihrer unterschiedlichen Größe und Zusammensetzung. PM2.5-Partikel sind aufgrund ihrer geringeren Größe besonders besorgniserregend, da sie tiefer in die Atemwege eindringen und eine größere Oberfläche haben, um toxische Verbindungen zu tragen. Die Überwachung und Kontrolle von PM10 und PM2.5 sind entscheidend für die Gewährleistung einer gesunden Luftqualität und zum Schutz der menschlichen Gesundheit und der Umwelt vor den schädlichen Auswirkungen von Feinstaub.

### 1.3.4 Chemische Zusammensetzung von Feinstaubpartikeln

Die chemische Zusammensetzung von Feinstaubpartikeln ist äußerst vielfältig und variiert je nach Quelle, geografischem Standort, Wetterbedingungen und Jahreszeit. Feinstaubpartikel können aus einer breiten Palette von chemischen Verbindungen bestehen, die sowohl anorganischer als auch organischer Natur sind.

Anorganische Verbindungen:

Metalle: Feinstaubpartikel enthalten oft eine Vielzahl von Metallen wie Eisen, Kupfer, Blei, Zink, Nickel und Cadmium, die aus verschiedenen Quellen stammen können, einschließlich Industrieemissionen, Fahrzeugabgasen und natürlichen Prozessen wie Bodenerosion (Riediker, 2003).

Sulfate und Nitrate: Schwefeldioxid (SO2) und Stickoxide (NOx) aus industriellen Aktivitäten und Fahrzeugemissionen können in der Atmosphäre zu Schwefelsäure (H2SO4) und Salpetersäure (HNO3) reagieren, die sich dann mit Ammoniak (NH3) oder anderen Basen zu Sulfat- und Nitratpartikeln umwandeln (Seinfeld, 2016).

Organische Verbindungen:

Ruß und Kohlenstoff: Rußpartikel, die hauptsächlich aus elementarem Kohlenstoff (C) bestehen, sind ein charakteristischer Bestandteil von Feinstaubemissionen aus Verbrennungsprozessen wie Fahrzeugabgasen und Industrieemissionen.

Neben Ruß können Feinstaubpartikel auch eine Vielzahl von organischen Verbindungen enthalten, die während der Verbrennung von fossilen Brennstoffen und organischen Materialien entstehen (Schauer, 2001).

Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK): Diese Verbindungen entstehen ebenfalls während der Verbrennung von organischen Materialien und sind in Feinstaubpartikeln häufig vorhanden. PAK sind bekannt für ihre toxischen und krebserzeugenden Eigenschaften und tragen zur Gesundheitsgefährdung durch Feinstaub bei (Lohmann, 2009).

Die chemische Zusammensetzung von Feinstaubpartikeln beeinflusst ihre physikalischen Eigenschaften, ihre Reaktivität in der Atmosphäre und ihre potenziellen Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt. Eine detaillierte Analyse der chemischen Zusammensetzung von Feinstaubpartikeln ist daher von entscheidender Bedeutung für das Verständnis ihrer Herkunft, ihres Verhaltens in der Atmosphäre und ihrer Auswirkungen auf die Umwelt und die menschliche Gesundheit.

### 1.3.5 Methoden zur Messung von Feinstaub in der Luft

Die Messung von Feinstaub in der Luft ist von entscheidender Bedeutung für die Überwachung der Luftqualität und die Bewertung der Exposition von Menschen und Ökosystemen gegenüber schädlichen Partikeln. Es gibt verschiedene Methoden zur Messung von Feinstaub in der Luft, die auf unterschiedlichen Prinzipien und Technologien basieren. Die Auswahl der geeigneten Methode zur Messung von Feinstaub hängt von den spezifischen Anforderungen der Studie oder Überwachungskampagne ab, einschließlich der benötigten Messgenauigkeit, der zeitlichen Auflösung und der verfügbaren Ressourcen.

Gewichtsbasierte Methoden:

Gravimetrische Methoden: Diese Methode beruht auf der Erfassung von Partikeln auf einem Filtermedium und ihrer anschließenden Wiegung, um die Partikelmasse zu bestimmen. Gravimetrische Methoden gelten als Referenzmethode für die Messung von Feinstaub und werden häufig für Langzeitmessungen und Studien zur Luftqualität verwendet (Chow, 2004).

Optische Methoden:

Nephelometrie: Diese Methode misst die Lichtstreuung von Partikeln in der Luft und verwendet diese Information, um die Konzentration von Feinstaub zu bestimmen. Nephelometer werden häufig für Echtzeitmessungen von Feinstaub in der Luft eingesetzt und ermöglichen eine kontinuierliche Überwachung der Luftqualität (Wiedensohler, 2009).

Laser-basierte Methoden: Laserbasierte Techniken wie die Laser-Diffusions-Spektroskopie (LDS) und die Laser-Lichtstreuung (LLS) ermöglichen die präzise Messung der Partikelgröße und -konzentration in der Luft. Diese Methoden bieten hohe Empfindlichkeit und Genauigkeit und werden häufig in Labormessungen und Feldstudien eingesetzt (Wang J. Z., 2015).

Chemische Analysemethoden:

Ionenchromatographie: Diese Methode ermöglicht die Messung von Anionen und Kationen in Feinstaubproben, was wichtige Informationen über die chemische Zusammensetzung von Feinstaubpartikeln liefert. Ionenchromatographie wird häufig für die Charakterisierung von Feinstaubemissionen aus verschiedenen Quellen und für Studien zur chemischen Zusammensetzung von Feinstaub verwendet (Wiedensohler, 2009).

Röntgenfluoreszenzspektroskopie (XRF): XRF ermöglicht die Messung von Metallkonzentrationen in Feinstaubproben durch Anregung der Probe mit Röntgenstrahlung. Diese Methode wird häufig für die Bestimmung von Metallkonzentrationen in Feinstaubproben und für Studien zur Herkunft und Zusammensetzung von Feinstaub verwendet (Garbaras, 2014).

### 1.3.6 Technologische Lösungen zur Verringerung von Feinstaubemissionen

Die Reduzierung von Feinstaubemissionen ist ein wichtiges Ziel, um die Luftqualität zu verbessern und die negativen Auswirkungen von Luftverschmutzung auf die Gesundheit von Menschen und Umwelt zu verringern. Es gibt verschiedene technologische Lösungen, die dazu beitragen können, Feinstaubemissionen zu reduzieren und die Luft sauberer zu machen.

Abgasnachbehandlungssysteme für Fahrzeuge:

Partikelfilter sind Abgasnachbehandlungssysteme, die in Diesel-Fahrzeugen eingesetzt werden, um die Emission von Feinstaubpartikeln zu reduzieren. Partikelfilter erfassen und speichern Feinstaubpartikel während des Betriebs des Fahrzeugs und regenerieren sich periodisch, um die gespeicherten Partikel zu verbrennen und zu entfernen (Biswas, 2015). Katalysatoren in Fahrzeugen können dazu beitragen, die Verbrennungseffizienz zu verbessern und die Emission von Feinstaub sowie anderen Luftschadstoffen zu reduzieren.

Dies umfasst die Verwendung von Katalysatoren zur Reduzierung von Stickoxiden (NOx) und die Umwandlung von Kohlenwasserstoffen (HC) und Kohlenmonoxid (CO) in weniger schädliche Verbindungen (Nova, 2017).

Verbrennungstechnologien und -anlagen:

Die Optimierung von Verbrennungsprozessen in Industrie- und Kraftwerksanlagen kann dazu beitragen, die Bildung von Feinstaubemissionen zu reduzieren. Dies umfasst die Verbrennung bei optimalen Temperaturen und Sauerstoffgehalten sowie die Verwendung von effizienten Verbrennungstechnologien und -anlagen (Gullett, 2016).

Alternative Brennstoffe: Die Verwendung von saubereren Brennstoffen wie Erdgas, Biogas oder Wasserstoff kann die Emission von Feinstaub und anderen Schadstoffen reduzieren. Die Umstellung von fossilen Brennstoffen auf alternative Brennstoffe in Industrie- und Kraftwerksanlagen kann daher eine wirksame Maßnahme zur Verringerung von Feinstaubemissionen sein (Lim, 2013).

Luftreinhaltungstechnologien in der Industrie:

Staubabscheidungssysteme: Industrielle Staubabscheidungssysteme, wie z. B. elektrostatische Abscheider, Zyklonabscheider und Filteranlagen, können dazu beitragen, Feinstaubemissionen aus industriellen Prozessen zu reduzieren, indem sie Partikel aus dem Abluftstrom entfernen (Khan, 2015).

Rauchgasreinigungssysteme: Rauchgasreinigungssysteme wie Nasswäscher und Trockenabscheidungssysteme können eingesetzt werden, um Schadstoffe aus den Abgasen von Industrieanlagen zu entfernen und die Emission von Feinstaub zu reduzieren (Du, 2015). Die Implementierung dieser technologischen Lösungen kann dazu beitragen, Feinstaubemissionen signifikant zu reduzieren und so zur Verbesserung der Luftqualität und zum Schutz von Menschen und Umwelt beizutragen.

### 1.3.7 Herausforderungen bei Feinstaubemissionen

Feinstaubemissionen stammen aus einer Vielzahl von Quellen und bestehen aus einer komplexen Mischung von Partikeln unterschiedlicher Größe, Form und chemischer Zusammensetzung.

Die Identifizierung und Quantifizierung von Feinstaubquellen und -partikeln ist daher eine große Herausforderung für Forscher und Behörden (Liu, 2017). Darüber hinaus kennen sie keine nationalen Grenzen und können über weite Entfernungen transportiert werden. Dies führt zu grenzüberschreitenden Problemen und erfordert eine länderübergreifende Zusammenarbeit und Koordination bei der Bekämpfung von Feinstaubemissionen (Wang H. F., 2015). Feinstaubemissionen sind mit einer Vielzahl von gesundheitlichen Problemen verbunden, darunter Atemwegserkrankungen, Herz-Kreislauf-Erkrankungen, Krebsrisiko und andere gesundheitliche Beeinträchtigungen. Die Bekämpfung von Feinstaubemissionen erfordert daher nicht nur technologische Lösungen, sondern auch Maßnahmen zur Verbesserung der öffentlichen Gesundheit und zur Minimierung der Exposition der Bevölkerung (Lelieveld, 2015).

## 1.4 Herkunft und Klassifizierung der Schadstoffe

Der größte Teil der Luftschadstoffe entsteht durch menschliche Aktivitäten, durch Verkehr, Heizen, Industrie, Energieerzeugung und Landwirtschaft. Vereinzelt entstehen auch Emissionen aus der Natur, beispielsweise durch Waldbrände, Vulkanausbrüche oder Winderosion (Rechnungshof, 2018, S. 13).

Emissionen sind ein wichtiger Faktor für das Zustandekommen der Schadstoffbelastung. Die Luftqualität wird aber durch weitere Variablen beeinflusst. Zu den wichtigsten zählen die geografischen Bedingungen, die Nähe zur Quelle, die Höhenlage, in der Schadstoffe ausgestoßen werden, die Witterung, Wind, Sonneneinstrahlung und Temperatur sowie Wechselwirkungen zwischen Schadstoffen (Rechnungshof, 2018, S. 13).

Die gemessenen Werte hängen also wesentlich davon ab, wie viel emittiert wird und wie die Ausbreitungsbedingungen sind. Hohe Konzentrationen in bodennahen Luftschichten entstehen beispielsweise durch stabile Temperaturschichtung und geringe Windgeschwindigkeiten.

Diese Bedingungen sind eher Nachts und im Winter vorzufinden, während Tagsüber und im Sommer eher stärkere Durchmischung stattfindet. Grund dafür ist die höhere Intensität der Sonneneinstrahlung tagsüber und im Sommer, die dazu führt, dass eine stärkere Durchmischung der Luftschichten und damit eine größere Verdünnung der Schadstoffe stattfindet.

Tendenziell werden also in der Nacht und im Winter höhere Konzentrationen gemessen (Umweltbundesamt, Jahresberichte der Luftgütemessungen in Österreich, 2022, S. 21).

### 1.4.1 Grenz- und Schwellenwerte

Durch das Festlegen von Grenzwerten für Luftschadstoffe sollen Menschen vor gesundheitlichen Auswirkungen der Schadstoffe geschützt werden, dabei wird in der Regel auf vulnerable Gruppen, wie Menschen mit Vorerkrankungen, Ältere und Schwangere Rücksicht genommen. Verschiedene Institutionen setzen deutlich voneinander abweichende Grenzwerte fest, wobei neuere Erkenntnisse zeigen, dass Luftschadstoffe gesundheitsschädlicher sind als bislang oft angenommen. Relevant für den österreichischen Kontext sind vor allem die Grenzwerte laut EU-Luftqualitätsrichtlinie und die der WHO. Die EU-Luftqualitätsrichtlinie sieht für das Jahr 2030 Grenzwerte vor, die deutlich unter den derzeitigen Grenzwerten liegen – sie orientiert sich dabei an den Richtlinien der WHO. Bis 2050 sollen die Luftschadstoffkonzentrationen in der EU dann so weit gesenkt werden, dass praktisch keine Belastung mehr vorliegt (Umweltbundesamt, Grenz-, Ziel- und Schwellenwerte, 2024). Folgende Tabelle 1 gibt eine Übersicht über ausgewählte derzeit vorhandene bzw. geplante Richtwerte.

Tabelle 1: Ausgewählte Luftschadstoffe und Richtwerte laut EU-Luftqualitätsrichtlinie und WHO (Umweltbundesamt, Grenz-, Ziel- und Schwellenwerte, 2024), eigene Darstellung.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Schadstoff** | **Mittelwert** | **Geltender EU-Grenzwert** | **EU-Grenzwert ab 2030** | **WHO-Richtwert** |
| Feinstaub PM2,5 | Jahresmittelwert | 25 µg/m³ | 10 µg/m³ | 5 µg/m³ |
| Feinstaub PM2,5 | Tagesmittelwert | Keiner | 25 µg/m³ (18 Überschreitungen erlaubt) | 15 µg/m³ (3-4 Überschreitungen erlaubt) |
| Ozon | Warme Jahreszeit | Keiner | Keiner | 60 µg/m³ als täglich maximaler 8h-Mittelwert, gemittelt über die sechs aufeinanderfolgenden, höchst belasteten Monate |
| Ozon | Täglich maximaler 8h-Mittelwert | Keiner | 120 µg/m³ (18 Überschreitungen erlaubt, im Mittel über drei Jahre)  100 µg/m³ (langfristiges Ziel, keine Überschreitungen) | 100 µg/m³ als täglicher maximaler Achtstundenmittelwert, 3 Überschreitungen erlaubt |
| Ozon | AOT 40 (Mai-Juli, 5-Jahresmittel) | Keiner | 18000 µg/m³h (Vegetation) | Keiner |
| Ozon | AOT 40 (Mai-Juli) | Keiner | 6000 µg/m³h (langfristiges Ziel, Vegetation) | Keiner |

Deutlich höher als die Grenzwerte liegen die Informations- und die Alarmschwellenwerte. Diese bestimmen, ab welchem Wert Menschen von erhöhter Belastung zu informieren sind und ab wann auch Warnungen besonders für vulnerable Personen ausgesprochen werden müssen. Diese Grenzwerte sind in der Tabelle 2 ersichtlich. Es geht dabei um die akute Belastung durch einen Schadstoff verglichen mit der Belastung über eine längere Zeit bei den Grenzwerten (Umweltbundesamt, Grenz-, Ziel- und Schwellenwerte, 2024).

Tabelle 2: Schwellenwerte für Ozon und Feinstaub PM2,5 (Umweltbundesamt, Grenz-, Ziel- und Schwellenwerte, 2024), eigene Darstellung.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Schadstoff** | **Mittelwert** | **Informationsschwelle** | **Alarmschwelle** |
| Feinstaub PM2,5 | 1 Tag | 50 μg/m³ | 50 μg/m³ (drei oder weniger Tage) |
| Ozon | 1 Stunde | 180 μg/m³ | 240 μg/m³ |

Im Immissionsschutzgesetz-Luft werden auch Werte für den Schutz der menschlichen Gesundheit definiert. Der Jahresmittelwert von Feinstaub PM2,5 deckt sich dabei mit dem aktuellen Grenzwert der EU und liegt bei 25 µg/m³. Die über Messungen ermittelte tatsächliche durchschnittliche Belastung liegt für die Jahre von 2013-2015 beispielsweise bei 20 µg/m³ pro Person und Jahr (Umweltbundesamt, Grenz-, Ziel- und Schwellenwerte, 2024).

### 1.4.2 Messtechniken

Die Überwachung und Messung von Luftschadstoffen erfordert den Einsatz einer Vielzahl von Messtechniken, um genaue und zuverlässige Daten zu erfassen. In der Europäischen Union (EU) sowie in Österreich werden verschiedene Verfahren und Instrumente eingesetzt, um Luftschadstoffe zu quantifizieren und zu überwachen.

Eine der grundlegenden Methoden zur Erfassung von Luftschadstoffen sind bodengebundene Messstationen. Diese Stationen sind mit einer Reihe von Sensoren ausgestattet, die verschiedene Schadstoffe wie Stickstoffdioxid (NO2), Schwefeldioxid (SO2), Kohlenmonoxid (CO), Ozon (O3) und Feinstaub (PM2.5 und PM10) erfassen können. Die Sensoren arbeiten auf der Basis chemischer Reaktionen oder physikalischer Eigenschaften der Schadstoffe.

Die Daten von bodengebundenen Messstationen liefern Einblicke in die Konzentrationen von Luftschadstoffen in verschiedenen städtischen und ländlichen Gebieten (EEA E. U., Air quality in Europe — 2020 report, 2020).

Mobile Messungen spielen eine wichtige Rolle bei der Erfassung von Luftschadstoffen entlang von Straßen oder in verschiedenen Stadtgebieten. Fahrzeuge werden mit Messgeräten ausgestattet, die die Konzentrationen von Schadstoffen in Echtzeit erfassen können. Diese mobile Überwachung ermöglicht es, die räumliche Verteilung von Schadstoffen genauer zu erfassen und Hotspots der Verschmutzung zu identifizieren (EEA E. U., Mobile monitoring of air quality, 2022).

Fernerkundungstechnologien, einschließlich Satelliten und Luftaufnahmen, werden verwendet, um große Gebiete zu überwachen und Luftschadstoffe wie Ozon und Feinstaub zu erfassen. Satellitenmessungen können Informationen über die räumliche Verteilung von Schadstoffen liefern und ermöglichen eine umfassende Überwachung der Luftqualität über große geografische Gebiete hinweg. Diese Technologien tragen dazu bei, regionale Trends und Muster der Luftverschmutzung zu identifizieren (ESA, 2022).

In Österreich erfolgt die Überwachung der Luftqualität gemäß den Richtlinien der Europäischen Union. Das österreichische Umweltbundesamt (UBA) betreibt ein Netzwerk von bodengebundenen Messstationen im gesamten Land. Diese Stationen liefern regelmäßig Daten über die Konzentrationen von Luftschadstoffen und tragen dazu bei, die Einhaltung der Luftqualitätsstandards sicherzustellen. Zusätzlich zu den stationären Messungen führt das UBA auch mobile Messungen durch und setzt Fernerkundungstechnologien ein, um die Luftqualität in Österreich zu überwachen und zu bewerten (UBA, 2022).

### 1.4.3 Derzeitige Situation in Österreich – PM2,5

Laut dem Jahresbericht der Luftgütemessungen in Österreich wurde im Jahr 2022 der Jahresmittelwert nach IG-L für PM2,5 von 25 μg/m³ an keiner der 64 betriebenen Messstellen in Österreich überschritten. Zwei Messstellen wiesen Jahresmittelwerte über 15 μg/m³ auf, 40 Messstellen hatten Jahresmittelwerte zwischen 10 und 15 μg/m³, 19 zwischen 5 und 10 μg/m³, 2 Messstellen blieben unter dem WHO-Richtwert von 5 μg/m³ und an einer Messstelle waren keine Daten verfügbar.

Die Richtwerte der WHO wurden im Jahr 2022 jedoch an allen Messstellen überschritten. Die Messstellen, die unter dem Jahresmittelwert von 5 μg/m³ blieben, überschritten an mehr als drei Tagen den Tagesmittelwert von 15 μg/m³. Die häufigsten Tagesmittelwertüberschreitungen lagen bei 155, 138, 114 und 106 Tagen.

Insgesamt wies das Jahr 2022 für ganz Österreich die zweitniedrigste PM2,5-Belastung seit Beginn der Aufzeichnung auf. Im Zeitraum von 2013 bis 2022 konnte die PM2,5-Belastung im Mittel um 36% gesenkt werden. Dies wurde über 28 Messstellen ermittelt, die seit 2013 Messungen liefern. Die Senkung der PM2,5-Belastung ist dabei ungleich verteilt – Nordostösterreich weist mit -40% eine besonders hohe Senkung auf, während in Südösterreich nur -22% Senkung beobachtbar sind.

Die PM2,5-Emissionen in Österreich werden zu 45% durch Raumwärme, zu 14% vom Straßenverkehr und zu 11% durch die Industrie verursacht. Die Emissionen gingen im selben Zeitraum, in dem die Belastung um 36% zurückging, um 21% zurück. Die mittlere Exposition für die Bevölkerung Österreichs, also die Konzentration, der ein\*e österreichische\*r Bürger\*in durchschnittlich ausgesetzt ist, lag bei 9,5 μg/m³, dies entspricht einem Rückgang von -47% seit 2004. Die Spanne reicht von 13,5 μg/m³ für den Ballungsraum Graz bis zu 7,6 μg/m³ für Tirol (Umweltbundesamt, Jahresberichte der Luftgütemessungen in Österreich, 2022, S. 41-48).

### 1.4.4 Derzeitige Situation in Österreich – Ozon

Ozon wird an 107 Messstellen in Österreich erhoben. Im Jahr 2022 wurde die Alarmschwelle von 240 μg/m³ an keiner Messstelle überschritten, die Informationsschwelle von 180 μg/m³ an 10 Messstellen an insgesamt 6 Tagen, alle Überschreitungen ereigneten sich in Juli und August, der höchste Wert lag bei 214 μg/m³ in Klosterneuburg. Der Zielwert von 120 μg/m³ als Achtstundenmittelwert (der über dem WHO-Richtwert von 100 μg/m³ liegt und außerdem bis zu 18 Überschreitungen erlaubt), wurde im Mittel über die Jahre 2020-2022 an acht Stationen überschritten. Am häufigsten wurde der Wert im Hochgebirge überschritten, während die geringsten Belastungen in den inneralpinen Tälern zu beobachten sind. Im Jahr 2022 traten an 32 Messstellen an mehr als 25 Tagen Achtstundenmittelwerte von über 120 μg/m³ auf.

Die langfristigen Ziele - 120 μg/m³ als täglicher maximaler Achtstundenmittelwert – wurden an 96% der Messstellen überschritten. Die Richtwerte der WHO wurden an allen Messstellen überschritten. Die Überschreitungshäufigkeiten der Schwellernwerte nehmen über die Jahre unregelmäßig ab. Die Jahresmittelwerte veränderten sich jedoch kaum, sie nahmen in einigen Gebieten, wie z.B. Vorarlberg, im Inntal und in den Großstädten sogar zu. Der Zielwert zum Schutz der Vegetation von 18.000 μg/m³h – über 5 Jahre gemittelt – wurde an 38 Messstellen überschritten. Das langfristige Ziel von 6.000 μg/m³ wurde 2022 an allen Messstellen in Österreich überschritten (Umweltbundesamt, Jahresberichte der Luftgütemessungen in Österreich, 2022, S. 90-115).

### 1.4.5 Problemdarstellung

Die Grenzwerte für Luftschadstoffe laut EU-Luftqualitätsrichtlinie und Immissionsgesetz-Luft sind teilweise deutlich über denen der WHO. Oft werden jedoch die Grenzwerte laut EU oder IG-L zur Bewertung der Luftqualität herangezogen und es entsteht so der Eindruck, die Menschen in Österreich seien ausreichend geschützt, es bestehe kein nennenswertes Gesundheitsrisiko mehr. Ziel dieser Arbeit ist, zu erheben, inwieweit sich, bezogen auf die Schadstoffe PM2,5 und Ozon, orientiert an den Grenzwerten der WHO, die Luftqualität in Österreich in den letzten 20 Jahren (seit Beginn der Messungen) verbessert hat.

### 1.4.6 Fragestellung

Daraus ergibt sich die Forschungsfrage:

Wie entwickeln sich die Schadstoffkonzentrationen von PM2,5 und Ozon in Wien im Verlauf der Messungen gemessen an den WHO-Richtlinien und welche Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit sind dadurch zu beobachten und erwarten?

### 1.4.7 Hypothesen

Diese Arbeit stellt folgende Hypothesen auf:

1. Die Grenzwertüberschreitungen nach WHO-Standard haben im Zeitraum von 2002-2023 signifikant abgenommen.
2. Es bestehen weiterhin hohe Belastungen für die menschliche Gesundheit, die durch die aktuellen Grenzwerte nicht abgebildet werden.

# Methodik

Die Studie verwendet zur Ergebnisfindung Sekundärdaten der European Environment Agency (European Environment Agency, 2024). Sie konzentriert sich auf die Stadt Wien, wobei alle möglichen Messstellen im angegebenen Zeitraum (siehe Tabelle 3) für die Analyse herangezogen wurden. Die Messstellen in Wien, welche mit Messgeräten für Ozon und PM2.5 ausgestattet sind, werden in der folgenden Tabelle aufgelistet. Auf der Website der European Environment Agency sind die Daten nur mit den zugehörigen Samplingpoint IDs verfügbar, daher stammt die hier verwendete Beschriftung von den Autoren dieser Arbeit. In Klammern neben den Namen der Messstationen ist die von der European Environment Agency angegebene Messmethode angeführt.

“Gravi” steht in Tabelle 3 für die gravimetrische Methode, bei der das Gewicht der Partikel gemessen wird, um deren Konzentration zu bestimmen. “Automatic” hingegen bezeichnet die Messung mit dem GRIMM-EDM180. Der GRIMM-EDM180 ist ein zugelassenes PM-Messgerät zur Bestimmung der Partikelkonzentration in der Umgebungsluft. Dieses Gerät misst PM10, PM2.5 und PM1 in Echtzeit durch Lichtstreuung an einzelnen Partikeln mittels eines Diodenlasers. Es bietet eine hohe Reproduzierbarkeit von über 97 % des gesamten Messbereichs und eine flexible Zeitauflösung, die ab 6 Sekunden wählbar ist. Das System ist vollautomatisch und kann ferngesteuert werden, was eine kontinuierliche und genaue Überwachung der Luftqualität ermöglicht (Grimm Aerosol Technik GmbH, 2024).

Für Ozonmessungen – in der Tabelle gekennzeichnet durch “Ozone” – wurden unter anderem die Geräte Horiba APOA-360 und Teledyne API T400 verwendet. Der Horiba APOA-360 verwendet das UV-Absorptionsprinzip zur Bestimmung der Ozonkonzentration in der Umgebungsluft. Dieses Gerät zeichnet sich durch seine hohe Empfindlichkeit und Stabilität aus und ist unempfindlich gegenüber Feuchtigkeitsschwankungen. Es ermöglicht kontinuierliche Ozonanalysen sowohl im Innen- als auch im Außenbereich und kann Ozonkonzentrationen im Bereich von 0 bis 1000 ppb messen (CleanAir, 2024). Das Teledyne API T400 arbeitet ebenfalls nach dem UV-Absorptionsprinzip und bietet stabile Messungen der Ozonkonzentration in der Umgebungsluft. Es verfügt über ein großes, robustes Farb-Touchscreen-Display und unterstützt mehrere Messbereiche von 0-100 ppb bis zu 0-10 ppm. Mit einer minimalen Nachweisgrenze von weniger als 0,4 ppb und einer hohen Präzision ist das T400 für genaue und zuverlässige Ozonmessungen ausgelegt (Teledyne, 2024).

Tabelle 3: Betrachtete Messstellen

|  |  |
| --- | --- |
| **Messstellen ID in den Datensätzen** | **Beschriftung der Messtelle** |
| A23.65516 | A23 Südosttangente/Wehlistraße (Automatic) |
| A23.65515 | A23 Südosttangente/Wehlistraße (Gravi) |
| AKC.5066 | AKH (Allgemeines Krankenhaus) (Automatic) |
| AKC.55371 | AKH (Allgemeines Krankenhaus) (Gravi) |
| BELG.67350 | Belgradplatz (Automatic) |
| BELG.68289 | Belgradplatz (Gravi) |
| FLO.67351 | Floridsdorf (Automatic) |
| FLO.67752 | Floridsdorf (Gravi) |
| GAUD.67352 | Gaudenzdorf (Automatic) |
| GAUD.67908 | Gaudenzdorf (Gravi) |
| KE.66730 | Kaiser-Ebersdorf (Automatic) |
| KE.68290 | Kaiser-Ebersdorf (Gravi) |
| KEND.64383 | Kendlerstraße (Gravi) |
| KEND.64567 | Kendlerstraße (Automatic) |
| LAA.67353 | Laaer Berg (Automatic) |
| LIES.67354 | Liesing - Carlberger-Gasse Gewerbegebiet (Automatic) |
| LOB.64389 | Lobau (Gravi) |
| LOB.64566 | Lobau (Automatic) |
| SCHA.66729 | Schafberg (Automatic) |
| SCHA.68291 | Schafberg (Gravi) |
| STAD.64391 | Stadlau (Gravi) |
| STAD.64538 | Stadlau (Automatic) |
| TAB.56213 | Taborstraße (Automatic) |
| TAB.56396 | Taborstraße (Gravi) |
| JAEG.821 | Hermannskogel (Ozone) |
| LAA.822 | Laaer Berg (Ozone) |
| LIES.67909 | Liesing - Carlberger-Gasse Gewerbegebiet (Ozone) |
| LOB.823 | Lobau (Ozone) |
| STEF.816 | Stephansplatz (Ozone) |
| ZA.811 | Hohe Warte (Ozone) |

Zunächst wurden die Daten aus verschiedenen herunterladbaren Dateien zu einem Datensatz zusammengeführt. Nach Rücksprache mit dem Umweltbundesamt Österreich wurden die vollständigen Daten der European Environment Agency (EEA) um nicht gültige Messwerte bereinigt. Von diesem Zeitpunkt an wurde ausschließlich mit validen Werten gearbeitet, also solchen, die von der EEA als gültigen eingestuft wurden.

## 2.1 Datenauswertung von Ozon

Da sich die Richt- und Grenzwerte der WHO und der Europäischen Union für Ozon auf den 8-Stunden-Mittelwert beziehen, wurden aus den verifizierten Daten 8-Stunden-Mittelwerte für jede Messstelle einzeln berechnet. Für jede gegebene Stunde wurde ein Durchschnitt aus den vorangegangenen 8 Stunden inklusive der aktuellen Stunde gebildet, um so den Mittelwert für jede Stunde zu erhalten. Für die ersten 7 Werte des Jahres 1991 wurden an den jeweiligen Messstellen die verfügbaren Messwerte berücksichtigt, um den Durchschnitt zu berechnen. Da es für die ersten 7 Werte naturgemäß keine 8 vorhergehenden Werte gab, wurden bei den ersten 7 Mittelwerten Durchschnitte von weniger als 8 Werten berechnet.

Für die Anzahl der Überschreitungen wurde jeder Tag als Überschreitung gezählt, wenn an mindestens einer der Ozon messenden Messstellen mindestens einer der 8-Stunden-Mittelwerte an diesem Tag die vorgegebene Schwelle überschritten hat.

In Abbildung 1 ist die Anzahl derjenigen Messstationen in Wien dargestellt, die zumindest einen validen Wert pro Jahr für PM2.5 gemessen haben. Diese Zahl ist seit 1991 konstant 5, mit Ausnahme des Jahres 2021, wo es in einem Jahr 6 gleichzeitig messende Stationen gab.

Dies ist auf den Wechsel der Inbetriebnahme der Station Laaer Berg, die Messdaten bis Ende Februar 2021 aufweist, auf die Station Liesing - Carlberger-Gasse Gewerbegebiet zurückzuführen, die ihren Betrieb Anfang 2021 gestartet hat und Messwerte bis heute liefert.

Ein Bild, das Screenshot, Reihe enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Abbildung 2: Anzahl der Messstationen für Ozon mit mindestens einem validen Messwert in Wien pro Jahr

## 2.2 Datenauswertung von PM2.5

Bei Feinstaub wurden bei einigen Messtellen zwei verschiedene Messmethoden gleichzeitig verwendet. Gekennzeichnet wurden die Einträge der Daten mit „Gravi“, was für die gravimetrische Methode steht, und „Automatic“, was für die Messung mit dem Gerät EDM180 der Marke Grimm steht. Während mit „Gravi“ aufgenommen Messwerte täglich aufgezeichnet werden, sind Werte mit „Automatic“ stündlich vorhanden.

Für eine Analyse der Überschreitungen der Schwellenwerte wurden beide Messverfahren herangezogen, eine Messung wurde als über dem Schwellenwert klassifiziert, wenn entweder der Tageswert („Gravi“) über dem Schwellenwerte lag oder der Mittelwert aller gemessenen stündlichen Werte („Automatic“) über dem Schwellenwert lag.

In Abbildung 2 ist die Anzahl der Messstationen in Wien dargestellt, die mindestens einen validen Wert pro Jahr für PM2.5 gemessen haben. Zwar gibt es in den Jahren 1999 und 2000 Messwerte, jedoch sind diese ausschließlich von einer Messstation, Allgemeines Krankenhaus (Gravi).

Zwischen 2001 und 2004 wurden keine validen Messwerte aufgenommen; ab dem Jahr 2005 steigt die Anzahl der messenden Stellen in Wien an. Aufgrund dieser Datenlage wird die Analyse im Zeitraum von 2005 bis 2023 durchgeführt, da die Jahre davor als unzureichend eingestuft wurden.

Ein Bild, das Screenshot enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Abbildung 3: Anzahl der Messstationen für PM2.5 mit mindestens einem validen Messwert in Wien pro Jahr

## 2.3 Analyse der überschrittenen Tage

Ein Tag wurde als überschrittener Tag gewertet, wenn mindestens eine Messtelle für den jeweiligen Luftschadstoff eine Überschreitung registrierte. Zur Analyse wurde eine lineare Regressionsanalyse durchgeführt, um die Signifikanz des zeitlichen Trends zu testen.

## 2.4 Schwächen der Methodik

Die Analyse hat aufgrund der schwankenden und tendenziell steigenden Anzahl an Messstellen, insbesondere bei PM2.5, Schwächen. Obwohl eine Zunahme der Messstellen grundsätzlich zu einer präziseren Datenerhebung führt, hat sie auch zur Folge, dass mehr Überschreitungstage erfasst werden. Dies liegt daran, dass mit jeder neuen Messstelle potenziell zusätzliche Überschreitungen identifiziert werden können. Die Ergebnisse dieser Studie können daher primär Aussagen über die Tage machen, an denen mindestens eine Messstelle eine Überschreitung verzeichnete. Die steigende Anzahl an Messstellen könnte somit zu einer scheinbaren Zunahme der Häufigkeit von Überschreitungstagen führen, was die Interpretation der zeitlichen Trends beeinflussen kann und so die Ergebnisse verzerrt, wenn man den Kontext der steigenden Anzahl an Messstellen nicht beachtet.

# Ergebnisse

Die Ergebnisse unserer statistischen Analysen zeigen, dass es einen Unterschied für die Anzahl der Überschreitungstage macht, ob wir den ab 2030 geltenden EU-Grenzwert oder den WHO-Richtwert als Schwellenwert nehmen.

Die Hintergrundfarben in den folgenden Graphiken kennzeichnen die drei Zeitreihen, die von der European Environment Agency zur Verfügung gestellt werden (European Environment Agency, 2024): Gelb steht in unseren Diagrammen für historische Airbase-Daten, die zwischen 2002 und 2012 geliefert wurden, bevor die Luftqualitätsrichtlinie 2008/50/EG in Kraft trat. Grün steht für geprüfte Daten (E1a) von 2013 bis 2022, die von den Ländern, im vorliegenden Fall Österreich, bis zum 30. September eines jeden Jahres für das vorangegangene Jahr gemeldet werden. Und die Farbe Rot steht für ungeprüfte, kontinuierlich übermittelte Daten (Up To Date/UTD/E2a) ab Anfang 2023.

## **3.1 Ergebnisse Ozon**

Abbildung 4 zeigt die Anzahl der Tage pro Jahr, an denen in Wien der ab 2030 geltende EU-Grenzwert von 120 µg/m³ Ozon überschritten wurde. Zu Beginn des beobachteten Zeitraums, in den 1990er Jahren, haben die meisten Jahre über 50 Überschreitungen, im Jahr 2003 ist ein deutlicher Anstieg auf über 100 Tage zu verzeichnen.

Danach ist eine allgemeine Abnahme der Überschreitungstage erkennbar. Ab 2004 schwanken die jährlichen Werte um die 50 Überschreitungstage pro Jahr. Nach 2010 stabilisieren sich die Werte weiter, wobei sie meist unter 50 Tagen bleiben. Ein besonders niedriger Wert wird 2014 erreicht. In den darauffolgenden Jahren gibt es leichte Schwankungen, jedoch ohne größere Ausreißer. Die Jahre 2020 bis 2022 verzeichnen wieder einen leichten Anstieg auf knapp unter 50 Tage, bevor die Werte erneut sanken. Der allgemeine Trend, dargestellt durch eine rote Linie, zeigt eine kontinuierliche Abnahme der Anzahl der Tage mit Ozonüberschreitungen.

Die lineare Regressionsanalyse zeigt einen signifikanten abnehmenden Trend in der Anzahl der Tage mit mindestens einer Überschreitung des Schwellenwerts von 120 µg/m³ für Ozon in Wien im Zeitraum von 1990 bis 2023. Der geschätzte Rückgang beträgt durchschnittlich etwa 1.0074 Tage pro Jahr (p-Wert = 0.000486), was auf einen signifikanten negativen Trend hinweist.

Das Modell erklärt 32.88% der Varianz in den Überschreitungstagen (R² = 0.3288). Die F-Statistik von 15.19 (p-Wert = 0.0004856) unterstreicht die Gesamtbedeutung des Modells. Der Residualstandardfehler von 14.14 Tagen gibt die durchschnittliche Abweichung der tatsächlichen Werte von den vorhergesagten Werten an. Diese Ergebnisse belegen einen signifikanten Rückgang der Ozonüberschreitungstage, berechnet nach den EU-Grenzwerten.

A graph with a line going up

Description automatically generated

Abbildung 4: Anzahl der Tage mit mindestens einer gemessenen Überschreitung des Schwellenwertes 120 von Ozon in Wien pro Jahr

Abbildung 5 zeigt die Anzahl der Tage pro Jahr, an denen in Wien der WHO-Richtwert von 100 µg/m³ Ozon überschritten wurde. Von 1991 bis 2000 sind die Werte relativ konstant zwischen 100 und 150 überschreitenden Tagen. In den Jahren von 2001 bis 2003 kommen die bis dahin niedrigsten und höchsten Werte vor, 2003 und 2018 haben im Vergleich zu den anderen Jahren die höchsten Werte.

2010 fällt zum ersten Mal der Jahreswert unter 100 Tage mit Überschreitungen. Ab 2011 pendeln sich die Werte tendenziell rund um die 100 Werte Marke ein, mit Ausnahme des Werts des Jahres 2018. Der allgemeine Trend, dargestellt durch die rote Linie, zeigt wieder eine kontinuierliche Abnahme der Anzahl der Tage mit Ozonüberschreitungen. Diese Abnahme ist jedoch schwächer als bei den zuvor besprochenen EU-Grenzwerten.

Die lineare Regressionsanalyse zeigt einen signifikanten abnehmenden Trend in der Anzahl der Tage mit mindestens einer Überschreitung des Schwellenwerts von 100 µg/m³ der WHO für Ozon in Wien.

Der geschätzte Rückgang beträgt durchschnittlich etwa 0.6761 Tage pro Jahr (p-Wert = 0.0238), was auf einen signifikanten negativen Trend hinweist. Dieser Rückgang ist jedoch deutlich geringer, als er es bei dem Modell der ab 2030 geltenden EU-Grenzwerte (120 µg/m³) war.

Das Modell erklärt 15.41% der Varianz in den Überschreitungstagen (R² = 0.1541). Die F-Statistik von 5.648 (p-Wert = 0.02383) ist niedriger als bei der Regression der EU-Grenzwerte. Der Residualstandardfehler von 15.56 Tagen ist etwas höher. Diese Ergebnisse belegen einen signifikanten, wenn auch moderateren Rückgang der Ozonüberschreitungstage im Vergleich zu den EU-Grenzwerten.

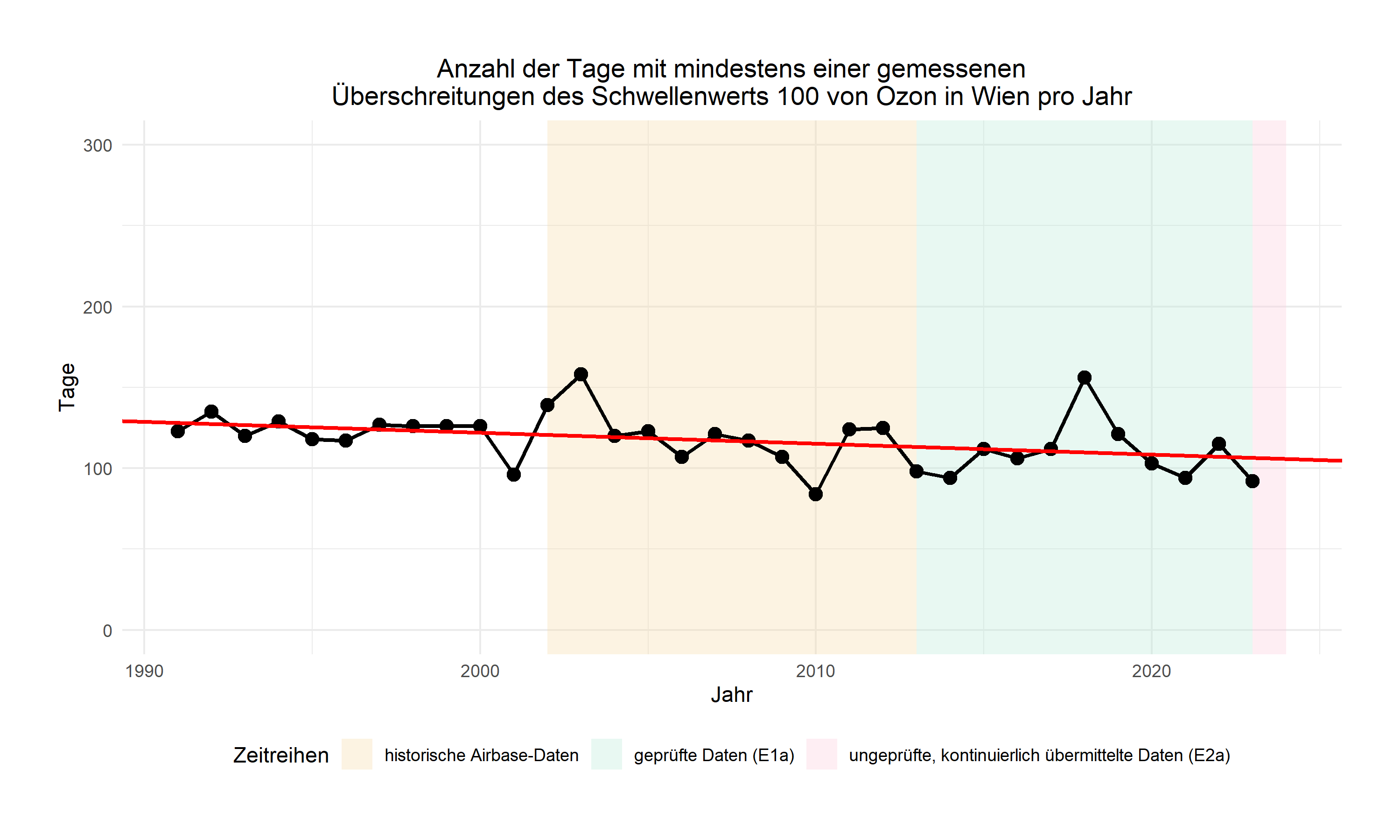


Abbildung 5: Anzahl der Tage mit mindestens einer gemessenen ÜBerschreitung des Schwellenwertes 100 von Ozon in Wien pro Jahr

Die nachfolgende Grafik, Abbildung 6, zeigt die durchschnittliche Anzahl der Tage pro Monat, an denen der Schwellenwert von 120 µg/m³ für Ozon in Wien überschritten wird. Diese Daten bieten einen wertvollen Einblick in die Luftqualität der Stadt und ermöglichen es, saisonale Muster und Trends zu erkennen. Die Darstellung verdeutlicht, dass die Ozonbelastung in Wien saisonalen Schwankungen unterliegt. Insbesondere in den Sommermonaten, von Juni bis August, ist die Anzahl der Tage mit Ozonüberschreitungen am höchsten.

Dies liegt vor allem an den höheren Temperaturen und der stärkeren Sonneneinstrahlung, die die Bildung von Ozon begünstigen. Wie bereits in der Einleitung weiter ausgeführt, wird die Bildung von bodennahem Ozon durch das Vorliegen der Vorläuferstoffen, u.a. *volatile organic compounds*, sowie direkter Sonneneinstrahlung begünstigt. Diese Bedingungen liegen nachgewiesenermaßen vor allem in den Sommermonaten, sowie in den umliegenden Wochen mit höheren Temperaturen vor. Während dieser Monate kann die durchschnittliche Anzahl der Tage mit Überschreitungen des Schwellenwerts oft deutlich über dem Durchschnitt liegen. Im Gegensatz dazu sind die Herbst- und Wintermonate von Oktober bis Februar durch deutlich niedrigere Ozonwerte gekennzeichnet. In dieser Zeit sind Überschreitungen des Schwellenwerts von 120 µg/m³ nahezu nicht vorhanden. Die geringere Sonneneinstrahlung und die niedrigeren Temperaturen tragen dazu bei, dass weniger Ozon gebildet wird. Der Frühling (März bis Mai) und der Herbst (September bis Oktober) zeigen moderate Werte, wobei im Frühling eine Zunahme der Ozonüberschreitungen zu beobachten ist, die dann im Herbst wieder abnimmt.

Ein Bild, das Screenshot, Diagramm enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Abbildung 6: Durchschnittliche Überschreitungstage pro Monat von Ozon mit Schwellenwert 120

Die untenstehende Abbildung 7 zur durchschnittlichen Anzahl der Tage pro Monat, an denen der Schwellenwert von 100 µg/m³ für Ozon in Wien überschritten wird, bietet einen detaillierten Einblick in die Luftqualitätsentwicklung der Stadt. Diese Daten sind besonders wichtig, da sie einen umfassenderen Überblick über die Häufigkeit von Ozonereignissen im Vergleich zu der strengeren Schwelle von 120 µg/m³ geben.

Ähnlich wie bei der Schwelle von 120 µg/m³ zeigt auch diese Grafik saisonale Schwankungen, jedoch mit einer deutlich höheren Anzahl an Tagen mit Überschreitungen. Besonders in den Sommermonaten, von Juni bis August, ist die Anzahl der Tage mit Ozonüberschreitungen von 100 µg/m³ wesentlich höher. Dies verdeutlicht, dass während der heißen Monate nicht nur die Intensität der Ozonbelastung steigt, sondern auch die Häufigkeit der Überschreitungen insgesamt zunimmt. Während die Grafik für 120 µg/m³ eine moderate Anzahl von Überschreitungstagen zeigt, ist die Anzahl der Tage, an denen 100 µg/m³ überschritten werden, weitaus höher und somit ein signifikanteres Problem für die Luftqualität. Im Frühling und Herbst, also von März bis Mai und von September bis Oktober, ist ebenfalls eine erhöhte Anzahl von Tagen mit Überschreitungen des 100 µg/m³ Schwellenwertes zu beobachten. Diese Zeiträume zeigen eine deutliche Zunahme der Tage mit moderaten Ozonwerten im Vergleich zur 120 µg/m³ Schwelle, was auf eine insgesamt größere Ozonbelastung während dieser Übergangsmonate hinweist.

Ein Bild, das Screenshot, Diagramm enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Abbildung 7: Durchschnittliche Überschreitungstage pro Monat von Ozon mit Schwellenwert 100

## 3.2 Ergebnisse PM2.5

Abbildung 8 zeigt die Anzahl der Tage pro Jahr, an denen in Wien des vorgeschlagenen EU-Grenzwert ab 2030 von 25 µg/m³ PM2.5 überschritten wurde. Im ersten Jahr der Analyse, 2005, zeigt sich PM2.5 noch mit knapp 130 Überschreitungstagen auf einem hohen Niveau. 2007 fällt zum ersten Mal der Jahreswert unter 100 Tage mit Überschreitungen, zeigt in den folgenden Jahren jedoch noch dreimal Schwankungen nach oben. Der allgemeine Trend, dargestellt durch die rote Linie, zeigt eine kontinuierliche Abnahme der Anzahl der Tage mit PM2.5-Überschreitungen.

Die lineare Regressionsanalyse für die Anzahl der Tage mit Überschreitungen des Grenzwerts von 25 µg/m³ PM2.5 in Wien zeigt einen signifikanten Abwärtstrend in den Jahren 2005 bis 2025. Das Modell weist einen stark negativen Koeffizienten von -5.1368 pro Jahr auf, was auf eine jährliche Verringerung der Überschreitungstage hinweist. Der Standardfehler des Koeffizienten beträgt 0.5955, was den t-Wert (-8.626) und den sehr kleinen p-Wert (1.29e-07) signifikant macht. Das multiple Bestimmtheitsmaß (R²) liegt bei 0.814, was darauf hindeutet, dass das Modell etwa 81.4% der Variabilität in den Daten erklärt.

A graph with a line and a red line

Description automatically generated

Abbildung 8: Anzahl der Tage mit mindestens einer gemessenen Überschreitung des Schwellenwertes 25 von PM2.5 in Wien pro Jahr

Im Gegensatz zu Abbildung 8 zeigt Abbildung 9 die Anzahl der Tage pro Jahr, an denen in Wien der WHO-Richtwert von 15 µg/m³ PM2,5 überschritten wurde. Hier kann man schnell erkennen, dass das Anlegen eines neuen Richtwertes die Anzahl der Überschreitungstage deutlich erhöht. So zeigen sich im ersten Messjahr, 2005, knapp 220 Tage mit zu hohen Werten. Unter 100 Tage mit Überschreitungen können das erstmalig im Jahr 2023 erkannt werden, also 16 Jahre später als beim Richtwert von 25 µg/m³. Auch dieser Trend schwankt noch viermalig in unserem Beobachtungszeitraum. Der allgemeine Trend jedoch, dargestellt durch die rote Linie, zeigt wieder eine kontinuierliche Abnahme der Anzahl der Tage mit PM2,5-Überschreitungen.

Die Analyse der Überschreitungstage des WHO-Richtwerts von 15 µg/m³ PM2.5 in Wien zeigt über den untersuchten Zeitraum einen deutlichen Rückgang. Die statistische Auswertung ergibt einen ausgeprägten negativen Trend mit einem jährlichen Rückgang von etwa 7.0825 Tagen.

Die Genauigkeit wird durch den, im Vergleich zum Modell des EU-Grenzwerts (15 µg/m³) etwas höheren Standardfehler von 0.7827 und einen sehr hohen t-Wert von -9.048 bekräftigt, wobei der niedrige p-Wert von 6.57e-08 die statistische Signifikanz des Trends bestätigt. Die Analyse erklärt 82.81% der Variabilität der Überschreitungstage laut WHO-Richtwerten, die eine etwas stärkere statistische Aussagekraft aufweist als die Analyse mit EU-Grenzwerten.

Ein Bild, das Text, Screenshot, Diagramm, Reihe enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Abbildung 9: Anzahl der Tage mit mindestens einer gemessenen ÜBerschreitung des Schwellenwertes 15 von PM2.5 in Wien pro Jahr

Die nachfolgende Abbildung 10 illustriert die durchschnittliche Anzahl der Tage pro Monat, an denen in Wien der Schwellenwert von 25 µg/m³ für Feinstaub (PM 2.5) überschritten wird. Diese Darstellung gibt Aufschluss über die Luftqualität und die saisonalen Schwankungen der Feinstaubbelastung in der Stadt. Aus der Grafik geht hervor, dass die Feinstaubbelastung in Wien deutlichen saisonalen Schwankungen unterliegt. Insbesondere in den Wintermonaten, von November bis Februar, ist die Anzahl der Tage mit Überschreitungen des Schwellenwerts von 25 µg/m³ am höchsten.

Dies lässt sich auf verstärkte Heizungsaktivitäten, vermehrten Verkehr sowie ungünstige Wetterbedingungen, die den Luftaustausch einschränken, zurückführen. So werden einerseits vermehrt Feinstaubpartikel ausgestoßen und andererseits führt das im Winter geringere, durchschnittliche Windaufkommen zu einer reduzierten Verteilung dieser Partikel und dadurch zu höheren kumulativen Konzentrationen an Orten der Entstehung derselben. Im Gegensatz dazu zeigt sich in den Sommermonaten, von Juni bis August, eine deutlich geringere Anzahl von Tagen mit PM 2.5-Überschreitungen. Während dieser Zeit sind die Luftbedingungen günstiger, mit höherer Luftzirkulation und weniger Emissionen durch Heizungen, was zu einer besseren Luftqualität führt. Die Übergangszeiten, Frühling (März bis Mai) und Herbst (September bis Oktober), weisen eine moderate Anzahl von Tagen mit Feinstaubüberschreitungen auf. Im Frühling kann die Belastung durch Pollen und landwirtschaftliche Aktivitäten leicht ansteigen, während im Herbst die ersten Heizperioden beginnen und somit die Feinstaubkonzentration leicht erhöht ist.

Ein Bild, das Screenshot, Diagramm enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Abbildung 10: Durchschnittliche Überschreitungstage pro Monat von PM 2,5 mit Schwellenwert 25

Die nächste Grafik, Abbildung 11, veranschaulicht die durchschnittliche Anzahl der Tage pro Monat, an denen in Wien der Schwellenwert von 15 µg/m³ für Feinstaub (PM 2.5) überschritten wird. Diese Darstellung bietet detaillierte Einblicke in die Luftqualität und zeigt, wie häufig die Feinstaubkonzentrationen kritische Werte erreichen. Im Vergleich zur Grafik mit dem höheren Schwellenwert von 25 µg/m³, ist die Anzahl der Tage mit Überschreitungen des niedrigeren Schwellenwerts von 15 µg/m³, ersichtlich in Abbildung 11, erwartungsgemäß höher.

Dies deutet darauf hin, dass selbst moderate Feinstaubbelastungen in Wien häufig vorkommen. Die saisonalen Schwankungen sind in beiden Grafiken ähnlich, wobei die höchsten Überschreitungswerte in den Wintermonaten (November bis Februar) auftreten. Dies ist auf verstärkte Heizungsaktivitäten, erhöhten Verkehr und ungünstige Wetterbedingungen zurückzuführen, die die Luftzirkulation einschränken und die Ansammlung von Feinstaub begünstigen. Im Sommer (Juni bis August) sind die Überschreitungen des Schwellenwerts von 15 µg/m³ seltener, ähnlich wie bei dem höheren Schwellenwert von 25 µg/m³. Die bessere Luftzirkulation und das geringere Emissionsaufkommen durch Heizungen tragen zu einer allgemein besseren Luftqualität in diesen Monaten bei. Die Übergangsmonate, Frühling (März bis Mai) und Herbst (September bis Oktober), zeigen auch hier eine moderate Anzahl von Tagen mit Überschreitungen des niedrigeren Schwellenwerts. Im Frühling kann die Feinstaubbelastung durch Pollen und landwirtschaftliche Aktivitäten leicht ansteigen, während im Herbst die ersten Heizperioden beginnen und die Feinstaubkonzentration leicht erhöht wird. Der Vergleich der beiden Grafiken zeigt, dass eine erhebliche Anzahl von Tagen die niedrigeren Feinstaubgrenzwerte von 15 µg/m³ überschreitet, was auf eine weit verbreitete Belastung hinweist, die selbst bei moderaten Konzentrationen gesundheitliche Auswirkungen haben kann.

Ein Bild, das Screenshot, Design enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Abbildung 11: Durchschnittliche Überschreitungstage pro Monat von PM 2,5 mit Schwellenwert 15

# Schlussfolgerungen & Diskussion

Insgesamt lässt sich sowohl bei PM2.5 als auch bei Ozon ein signifikanter Rückgang der Überschreitungstage, sowohl bei dem ab 2030 geltenden EU-Grenzwert als auch den WHO-Richtlinien, erkennen. Die Grafiken zeigen, dass sich alle vier Kurven über den Untersuchungszeitraum nach unten bewegen und damit einen negativen Trend darstellen. Jedoch ist auch leicht erkennbar, wie groß der Unterschied zwischen den angewandten Grenzwerten ist und dass die Anlegung eines niedrigeren Wertes sogleich zu einer deutlichen höheren Überschreitung/Jahr führen kann. Damit ist klar, dass das Festlegen von Grenzwerten einleuchtenderweise die Anzahl der Überschreitungen deutlich beeinflussen und verzerren kann. Sind diese zum Beispiel bei einer Normalverteilung der Ergebnisse knapp vor der 25. Perzentile angesetzt, kann der Eindruck entstehen, dass es kaum Überschreitungen gibt.

Jedoch kann man leicht feststellen, dass tatsächlich die Gesamtbelastung und die durchschnittliche Belastung deutlich höher sein kann, als es durch die Anzahl der Überschreitungen den Anschein macht, da eine leichte Verschiebung des Grenzwertes schnell zu einer deutlichen/überproportionalen Zunahme der Überschreitungen führen kann. So gesehen ist es sehr wichtig, jene Grenzwerte im best practices Sinne der aktuellen medizinischen Forschung festzulegen und sich dabei an den aktuellsten Anregungen z.B. der WHO zu orientieren. Zusätzlich müssen natürlich die gesamten Eigenschaften der vorliegenden Daten beachtet werden und genau untersucht werden, ob diese Grenzwerte eventuell von den zuständigen Behörden gerade so gesetzt wurden, dass diese niedrig wirken, gleichzeitig aber hoch genug sind, um nicht von der Mehrheit der Daten überschritten zu werden. Dieser statistischer Fehler kann zwar auch ohne verfälschende Absichten auftreten, sollte aber tunlichst vermieden werden, da sonst schnell ein sehr falsche Eindruck von der tatsächlichen Belastung von Umwelt und Gesellschaft entstehen kann.

## 4.1 Interpretation der Ergebnisse

Nachfolgend werden die Ergebnisse bezogen auf gesundheitliche Aspekte, ihre Einordnung in Zeiten der Klimakrise, politische Entwicklungen, möglichen Maßnahmen, Österreichische Städte im Vergleich, Österreich im internationalen Vergleich, Maßnahmen sowie der Zusammenhang mit Wirtschaftswachstum diskutiert.

## 4.2 Gesundheitliche Aspekte – PM2,5

Es ist anzunehmen, dass sich die Abnahme der PM2,5-Partikel, sollte sich diese fortsetzen, positiv auf die menschliche Gesundheit auswirkt und zu einer deutlichen Abnahme von Todesfällen und mit Erkrankungen gelebten Jahren führen wird. Der in der Arbeit für Wien festgestellte Trend für PM2,5-Partikel ließ sich auch in der gesamten EU feststellen und durch vergleichbare Quellen des Umweltbundesamtes bestätigen. Die Todesfälle aufgrund der hohen Feinstaubkonzentration nahmen EU-weit von 2005 bis 2022 schon um 45% ab. Das Problem ist aber noch immer riesig und das größte umweltbedingte Gesundheitsrisiko in Europa. 97% der Bevölkerung im urbanen Raum sind 2023 weiterhin einer Feinstaubbelastung über den WHO-Richtwerten ausgesetzt (Agency, Health impacts of air pollution in Europe, 2022; Agency, Europe´s air quality status 2023, 2023).

Auch bei den drastischen Unterschieden zwischen einer Messung nach EU-Standards und nach WHO-Richtlinien finden die Ergebnisse der Arbeit Bestätigung. Der Anteil des urbanen Bevölkerungsanteils der EU, der Konzentrationen über den EU-Standards ausgesetzt war und der von jenen, die Konzentrationen über WHO-Richtlinien ausgesetzt war, unterscheiden sich stark. So waren laut EU-Standards weniger als 1% der urbanen Bevölkerung erhöhter Feinstaubbelastung ausgesetzt, während es laut WHO- Richtlinien 97% waren (Agency, Europe´s air quality status 2023, 2023). Dies bestätigt die Beobachtung der Arbeit, dass das Heranziehen von Richtlinien, die tatsächlich auf die Gesundheit des Menschen Rücksicht nehmen, ein völlig anderes und in diesem Fall sogar gegensätzliches Bild zeichnet. Die Unterschiede sind enorm und es ist angesichts dessen nicht verwunderlich, dass manchmal lieber kommuniziert wird, dass nur noch 1% der urbanen Bevölkerung in der EU erhöhten Feinstaubkonzentrationen laut EU-Standards ausgesetzt sind als zu beschreiben, dass noch immer 97% der urbanen Bevölkerung Feinstaubkonzentrationen ausgesetzt ist, die gesundheitsschädlich sind. Der Unterschied sind hier gut 96% und zeigt damit wieder deutlich auf, dass die Höhe der Grenzwerte, einerseits als politisches Argument für bereits ausreichenden Schutz oder andererseits für viel zu lasche Maßnahmen herangezogen werden können.

## 4.3 Gesundheitliche Aspekte – Ozon

Ein weiterer Anstieg der Konzentration von bodennahem Ozon dagegen würde aller Wahrscheinlichkeit nach zu einer Zunahme an Todes- und Erkrankungsfällen führen. Die Ergebnisse der Arbeit bestätigen hier ebenfalls den generellen Trend in der EU, laut dem sich die Ozonkonzentration über die Jahre verringert (EEA E. U., Mobile monitoring of air quality, 2022).

Auch bei Ozon finden sich, ähnlich zu den Ergebnissen der Arbeit, große Unterschiede zwischen einer Bewertung der Ozonbelastung nach EU-Standards und einer Bewertung nach WHO-Richtlinien, wie in der folgenden Abbildung 12 ersichtlich ist. Laut EU-Standards sind 10% der urbanen Bevölkerung erhöhten Ozon-Werten ausgesetzt, laut WHO-Richtlinien sind es ganze 94% (Agency, Europe´s air quality status 2023, 2023). Auch hier zeigt sich, wie in der vorliegenden Arbeit, ein deutlicher Unterschied zwischen der Bewertung der Belastung nach gesetzlich vorgesehenen Richtlinien und nach dem, was laut Weltgesundheitsorganisation dem Menschen nicht mehr schaden würde.

Die Amplitude ist etwas kleiner als bei Feinstaub PM2,5, wo er bei 96% liegt, die Bewertung nach WHO-Richtlinien zeigt aber dennoch auf, dass 84% der Bevölkerung mehr gesundheitlichen Belastungen durch Ozon ausgesetzt ist, als das nach EU-Standards anzunehmen wäre.

Die Trends bei Ozon und PM2,5 werden sich auch wohl gesamthaft positiv auf die Gesundheit der Menschen in Wien auswirken. Die Anzahl der Todesfälle durch die beiden Schadstoffe unterscheidet sich jedoch deutlich. PM2,5 führte beispielsweise in der EU 2020 zu etwa 238.000, während Ozon zu ca. 24.000 frühzeitigen Todesfällen führte (EEA, 2023). Das entspricht einem Faktor von beinahe 1:10. Somit kann angenommen werden, dass die PM2,5-Reduktion zu einem deutlich stärkeren Rückgang bei den Todesfällen führen wird als der Rückgang der Ozon-Belastung. Auch Wechselwirkungen bei einer gleichzeitigen Reduktion von Ozon und PM2,5, die die Gesamtzahl an Todesfällen weiter verringern, sind möglich. Gleichzeitig bleibt es eine Herausforderung, die tatsächlichen pathophysiologischen Auswirkungen auf Umwelt und Gesellschaft zu monitieren, da es, ähnlich der Covid-Pandemie, schwer ist den einzelnen Todesfall auf eine Mehrbelastung durch Ozon oder PM zurückzuführen.

Solche Überlegungen müssen mithilfe statistischer Werkzeuge im Vergleich von Regionen durchgeführt werden, wobei auch hier das mögliche Zusammenspiel von unterschiedlichsten Luftverschmutzungskomponenten und anderen, dem Klimawandel unterliegenden, Faktoren wie Temperaturanstieg, Unwetter und Allergenbelastung schwer zu durchschauen und voneinander abzugrenzen ist.

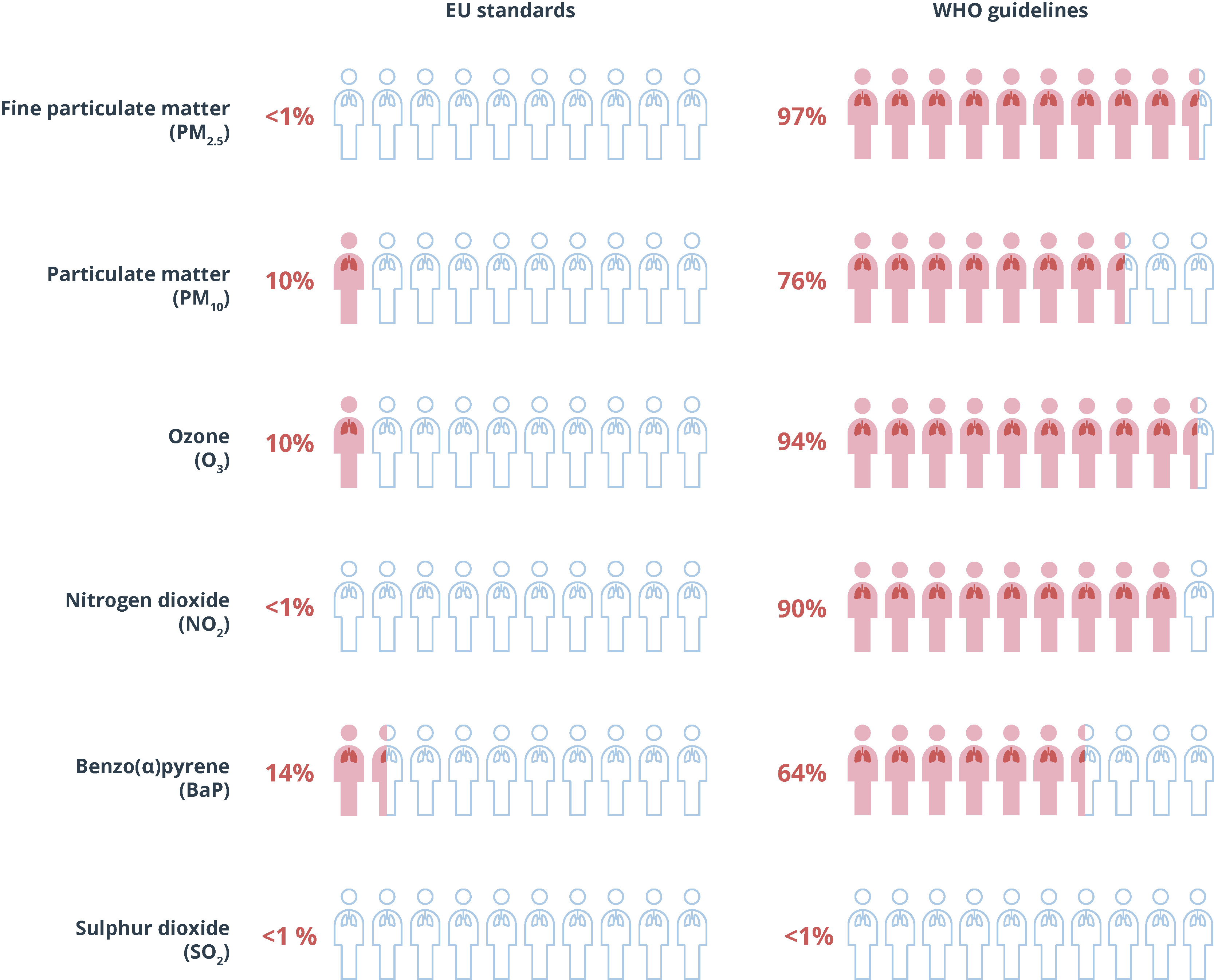


Abbildung 12: Vergleich der Überschreitungen von EU-Standards und WHO-Richtlinien verschiedener Schadstoffe in % der urbanen Bevölkerung innerhalb der EU (Agency, Europe´s air quality status 2023, 2023)

## 4.4 Ergebnisse im Licht der Klimakrise

Wie eben bereits beschrieben, hat auch die Temperatur einen Einfluss auf Luftschadstoffe. Durch die Klimakrise sind schon jetzt höhere Temperaturen beobachtbar und in Zukunft ist mit noch höheren Temperaturen zu rechnen. Besonders Ozon wird dadurch vermutlich an heißen Sommertagen zu einem noch stärkeren Problem. Da Ozon aus Vorläuferstoffen gebildet wird, gilt es, um die Belastung durch Ozon zu verringern, die Produktion dieser zu reduzieren.

Möglichkeiten dafür sieht das Umweltbundesamt z.B. im Verkehrssektor, bei der Verbrennung von Biomasse, bei der Einsparung von Energie und bei der Lösemittelverwendung (Umweltbundesamt, Gesundheitsrisiken durch Ozon, 2023; Umweltbundesamt, Einfluss des Klimawandels auf die Luftqualität, 2018, S. 7-11).

Zahlreiche Forschungsprojekte und Studien haben sich mit dem Thema des Einflusses der fortschreitenden Klimakrise auf die Feinstaubbelastung beschäftigt. Das Umweltbundesamt (2018) gibt einen Überblick darüber, wobei unterschiedliche Studien zu unterschiedlichen Ergebnissen kommen. Die Zusammenhänge sind aus heutiger Sicht noch sehr komplex und es kann keine eindeutige Aussage dazu getroffen werden (Umweltbundesamt, Einfluss des Klimawandels auf die Luftqualität, 2018, S. 11-14). Nachfolgend findet sich in der Tabelle 4 eine Übersicht zu den Zusammenhängen und möglichen Auswirkungen der Klimakrise auf die Luftqualität bezüglich Ozon und Feinstaub.

Tabelle 4: Übersicht über die möglichen Auswirkungen der Klimakrise auf Ozon und Feinstaub (Schultz, 2017), eigene Darstellung

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Zunahme:** | **Folgen:** | **Ozon** | **Feinstaub** |
| **Temperatur** | Fotochemie beschleunigt, weniger Kondensation | Je nach Höhe der Stickoxidwerte | Abnahme |
| Anstieg biogene Kohlenwasserstoffemissionen | Anstieg | Anstieg |
| **Feuchte** | Erhöhter Ozonverlust und vermehrte Produktion von Hydroxylradikalen | Anstieg bei hohen Stickoxicwerten oder Abnahme bei niedrigen Stickoxidwerten | Anstieg |
| **Starknieder-schlag** | Ozonvorläufersubstanzen ausgewaschen | Keine Mittelwertänderung | Keine Mittelwertänderung |
| **Dürreperioden** | Hohe Temperatur, reduzierte Feuchte | Anstieg | Anstieg |
| Pflanzenstress | Anstieg | Keine Angabe |
| Zunahme Waldbrände | Anstieg | Anstieg |
| Zunahme Staubemissionen | Keine Angabe | Anstieg |
| Weniger Ozonvorläufersubstanzen ausgewaschen | Anstieg | Anstieg |
| **Blockierende Wetterlagen** | Stagnierende Bedingungen, längere Verweildauer | Anstieg | Anstieg |
| Hitzewellen | Anstieg | Anstieg |

Die Angaben aus der Tabelle können nun nicht einfach aufaddiert werden, da teilweise keine Angabe gemacht wird und da keine Gewichtungen vorliegen, nach denen die einzelnen Punkte bewertet werden könnten. So könnte ein einziger Grund zur Abnahme von entweder Ozon oder Feinstaub PM2,5 stärker zu Buche schlagen als alle anderen zusammengenommen. Deshalb unterbleibt eine weitere Interpretation der in der Tabelle dargestellten Information.

Aktuell gibt die EU ambitionierte Zielsetzungen zur Verbesserung der Luftqualität vor. Es werden Maßnahmen gesetzt und die Europäische Umweltagentur überwacht die Erreichung der Ziele. Nationale Gesetzgebung innerhalb der Europäischen Union baut darauf auf und es ist keinesfalls sicher, dass die Luftqualität ohne die Gesetzgebung der EU auf demselben Stand wäre oder sich weiterhin in dieser Geschwindigkeit verbessern würde. Luftqualität ist also auch eine Frage politischer Entscheidungen und Prioritäten. Für stärkeren Umwelt- und Klimaschutz setzen sich aktuell hauptsächlich Parteien ein, die dem linken Spektrum zuzuordnen sind. Eine ausführliche Analyse des Climate Action Networks Europe beispielsweise hat sich das Wahlverhalten der einzelnen EU-Parlamentarier bei den letzten Abstimmungen zu Klimarelevanten Gesetzesentwürfen angesehen und anhand dieser Daten einen “track record” der einzelnen im EU-Parlament vertretenden Parteienfamilien aufgestellt.

Diese Analyse hat ergeben, dass die zugehörigen Parlamentarier der *Greens/European Free Alliance,* The Left und *Progressive Alliance of Socialists and Democrats* sich stark für Umweltbelange eingesetzt haben, während sich die der österreichischen NEOS-Partei nahen Familie *Renew Europe* eher durch eine Verlangsamung dieser Prozesse und die restlichen Parteien des konservativen und rechten Spektrums durch eine Ablehnung auszeichnen (*EU Elections: EU Parliament Scoreboard 2019-2024*, n.d.).

In vielen Staaten agitieren rechte Parteien gegen die EU und die europäischen Richtlinien und Verordnungen (Naumann, 2024). Je nachdem, wie sehr rechte und rechtsextreme Parteien erstarken und bei Entscheidungen mitwirken oder Staaten durch deren Einwirken sogar die EU verlassen, könnte dies einen relevanten, und höchstwahrscheinlich negativen Einfluss auf die Luftqualität haben. Gerade im Zusammenhang mit der Anfang Juni 2024 durchgeführten EU-Parlamentswahl wird ein starker Rechtsruck erwartet und die politische Zusammensetzung der daraufhin gebildeten Kommission wird entscheiden, in welche Richtung und mit wie viel Nachdruck sich die EU den kommenden Umweltbezogenen Herausforderungen stellen wird.

Ein hierbei viel diskutiertes Thema ist der Zusammenhang von Umweltverschmutzung und Wirtschaftswachstum. Dabei geht es meist nicht nur um Luftverschmutzung, sondern auch um Boden- und Gewässerverschmutzung. Während weltweit viele Gruppierungen für den Umweltschutz eintreten und sich durch ein starkes Engagement auszeichnen, herrscht gleichzeitig auch Ungewissheit über das eigentliche Ziel dieser Bemühungen. Eingeordnet können solche Überlegungen meist mit den Stickworten Green Growth vs. De-Growth werden. Es wird die Frage aufgeworfen, inwieweit wirtschaftliche Produktivität vereinbar mit sauberer Umwelt ist, bzw. inwieweit die Umwelt sauber gehalten werden kann, wenn die Wirtschaftsleistung steigt. Die vorliegende Arbeit liefert einen Beitrag zu dieser Diskussion.

Die Ergebnisse der Arbeit und ähnliche Untersuchungen (EEA E. U., Air quality in Europe — 2020 report, 2020; UBA, 2022) zeigen, dass die Luftqualität in europäischen Staaten sich in den letzten Jahren und Jahrzehnten bezogen auf viele Schadstoffe verbessert hat. Während derselben Zeit ist die Wirtschaftsleistung Europas stark angestiegen (WKO, 2024).

Daraus lässt sich ableiten, dass trotz größerer Wirtschaftsleistung die Menge an emittierten Luftschadstoffen reduziert werden kann – also absolute Entkopplung in diesem Bereich möglich zu sein scheint. In Zukunft wird trotzdem die Frage im Raum stehen, ob diese absolute Entkopplung ausreichend ist, oder wir als Gesellschaft Einschnitte im Wirtschaftswachstum in Kauf nehmen müssen, um noch weitere Reduktionen bei Luftschadstoffen und damit endlich einen nach medizinischen Kriterien ausreichenden Schutz von Umwelt und Menschheit erreichen können.

## 4.5 Städte Österreichs im nationalen und internationalen Vergleich

In einem europäischen Vergleich der PM2,5-Konzentration schnitt die Stadt Wien mittelmäßig ab. Wien war dabei auf Rang 164 von 375 Städten. Weitere österreichische Städte, die im Vergleich vorkommen, waren Innsbruck, Salzburg, Linz und Graz. Innsbruck belegte den Rang 49 und Salzburg schaffte es gar auf den Rang 42 – beide erhielten dafür die zweitbeste Note „fair“. Linz schaffte es nur auf den Rang 229 und Graz lag sogar auf dem Rang 278. So wie Wien erhielten sie den Status mittelmäßiger Luftqualität (EU-Rat, 2022).

Die Lage Österreichs ist im europäischen Vergleich bei PM2,5 und Ozon sehr unterschiedlich, wie in den nachfolgenden Abbildungen 13 und 14 zu sehen ist. Während Österreich bei der Höhe der PM2,5-Konzentrationen im unteren Mittelfeld liegt, fällt Österreich bei der Höhe der Ozon-Konzentration im oberen Mittelfeld eher negativ auf (Agency, Europe´s air quality status 2023, 2023).

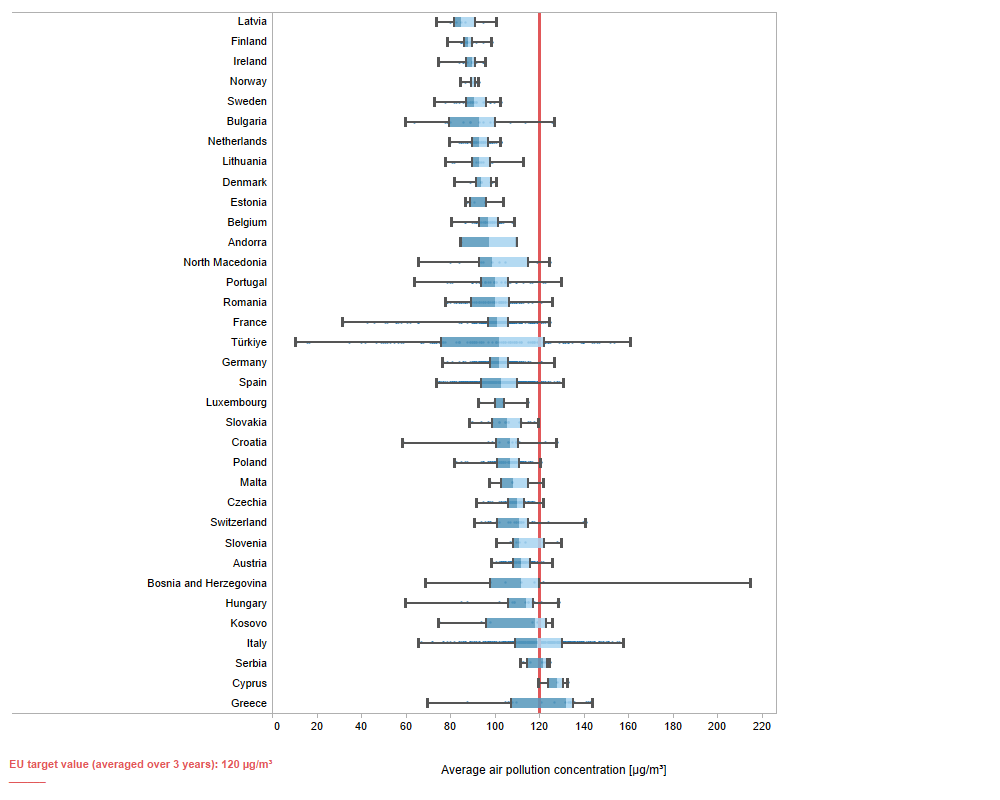


Abbildung 13: Ozonkonzentration - EU-Länder im Vergleich (Agency, Europe´s air quality status 2023, 2023)

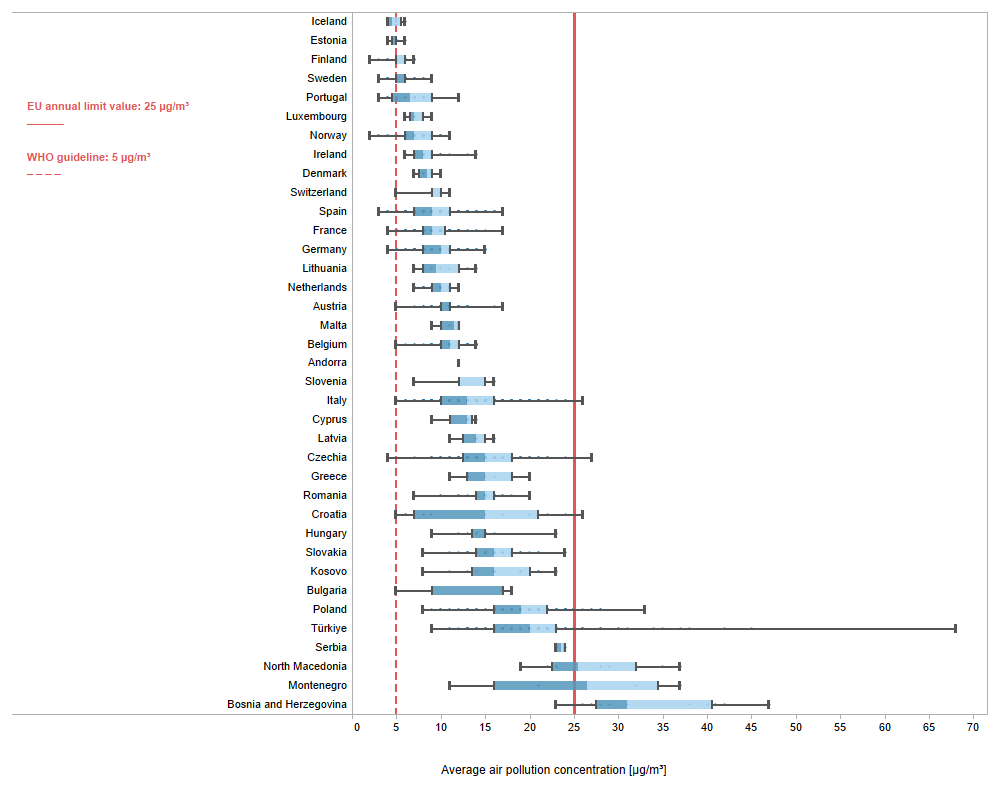


Abbildung 14: PM2,5-Konzentration - EU-Länder im Vergleich (Agency, Europe´s air quality status 2023, 2023)

## 4.6 Maßnahmen

Auf Basis der ausgewerteten Daten kann ein Bedarf an weiteren politischen Maßnahmen zur Verbesserung der Luftqualität abgeleitet werden. Damit könnten in der EU noch immer hunderttausende Todesfälle verhindert werden, und auch in der Stadt Wien können Menschenleben gerettet und Lebensqualität erhalten werden. 6100 Menschen kostet die Luftverschmutzung durch NO2, Feinstaub und Ozon in Österreich laut Europäischer Umweltagentur jährlich das Leben. Das entspricht 69 Todesfällen pro 100.000 Einwohner\*innen (VCÖ, 2021). Bei einer Bevölkerung von 2,0 Millionen (Wien, 2024) würde das für Wien frühzeitige 1380 Todesfälle durch Luftverschmutzung im Jahr bedeuten.

Das sind 3,78 Verstorbene pro Tag, wenn man außer Acht lässt, dass die Luftverschmutzung im urbanen Raum höchstwahrscheinlich deutlich mehr Todesfälle verursacht als im ländlichen Raum. Zum Vergleich: in Wien gab es im Jahr 2023 zwölf Verkehrstote (Austria, 2023). Trotzdem werden Todesfälle durch Unfälle meist als gefährlicher eingeschätzt und eher Maßnahmen zum Schutz davor akzeptiert bzw. sind jene meist leichter politisch umzusetzen.

Bereits geplant ist mit dem Europäischen Green Deal eine Annäherung der EU-Schwellenwerte an die WHO-Richtlinien, wie bereits in der Einleitung beschrieben. Die Vision ist dabei die Senkung der Verschmutzung auf ein Niveau, das der menschlichen Gesundheit nicht mehr schadet – sprich die Senkung bis auf die WHO-Richtlinien. Das Jahr, in dem dieses Ziel laut dem Null-Schadstoff-Aktionsplan erreicht werden soll, lautet 2050. In einem Vorschlag zur Überarbeitung der Luftqualitätsrichtlinie der Europäischen Kommission aus dem Oktober 2022 finden sich Maßnahmen wie strengere Emissionsgrenzwerte, Entschädigungsansprüche bei Erkrankungen aufgrund von verschmutzter Luft – also ein stärkeres Recht auf saubere Luft, die Überwachung der Qualität soll strengeren Vorschriften unterzogen und die Menschen sollen besser informiert werden (EEA, 2023). Im Februar 2024 gab es eine Einigung zwischen Europäischer Kommission, dem Rat und dem Europäischen Parlament. Im November 2024 soll die Richtlinie in Kraft treten und binnen 2 Jahren in nationales Recht umgesetzt werden.

Eine Vielzahl an Maßnahmen kann die Emissionen reduzieren. Maßnahmen im Bereich der Wirtschaft sind z.B. Emissionsrichtlinien für Produktionsstätten, Filter, Sanierungen, geringerer Einsatz fossiler Brennstoffe und Ausbau erneuerbarer Energien, Steuern und Subventionen. Im Bereich von Wohnen und Raumplanung wird der Austausch von fossil betriebenen Heizsystemen auf erneuerbare sowie die thermische Sanierung von Wohnbauten empfohlen. Im Verkehr würde zum Beispiel helfen, Radwege und öffentliche Verkehrsmittel auszubauen und zu fördern, auf kurze Wege zu achten, sowie Tempolimits und Fahrverbote einzuführen (ÖGÖ, 2022).

## 4.7 Beschränkungen der Forschung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich in der Auswertung der Daten zur Luftverschmutzung lediglich mit der Stadt Wien. Grund dafür ist der Charakter als studentisches Projekt und der mögliche Umfang der Arbeit. Dadurch bleibt die Aussage auf Wien beschränkt.

Aussagen zu ganz Österreich, zum ländlichen Bereich oder zu Städten mit anderen Voraussetzungen (z.B. in meteorologischer Hinsicht, Größe, Verschmutzung) können nicht getroffen werden. Der Zeitraum der verwendeten Daten geht von 2005-2023. Für die Zeit davor können keine Aussagen getroffen werden. Bezogen auf die mögliche zukünftige Entwicklung verwendet die vorliegende Arbeit lediglich öffentlich zugängliche Trends und Prognosen. Um belastbarere Aussagen über die Zukunft treffen zu können, müssten jedenfalls weitere Parameter herangezogen und umfassendere Analysen durchgeführt werden.

Die Arbeit bezieht sich auf die Einschätzungen der WHO zur Schädlichkeit von Luftschadstoffen für die menschliche Gesundheit und geht davon aus, dass unter den aktuell angesetzten Schwellen der WHO keine Gefährdung für den Menschen mehr besteht. Durch zukünftige Forschung in diesem Bereich könnten sich die Schwellenwerte erneut verändern und damit auch die Anzahl der Überschreitungen eine neue Belastung darstellen.

## 4.8 Empfehlungen für weiterführende Forschung

Für Städte wie Wien wären kleinräumige Forschungsprojekte interessant, mit welchen Maßnahmen die Ozon-Konzentration im Sommer reduziert werden kann. Es könnte beispielsweise untersucht werden, wie sich die Begrünung an bestimmten Plätzen auf die Ozon-Konzentration auswirkt, welche Auswirkungen das schrittweise Verbannen von Autos aus dem öffentlichen Raum haben oder wie sich ein Umstieg von fossilen Heizungen auf erneuerbare Heizsysteme auf die Luftverschmutzung im Winter auswirken würde. Da es sich bei der Erarbeitung einer Lösung für die erhöhten Feinstaub und Ozon-Emissionen nicht in erster Linie um ein technisches Problem handelt, das noch nicht gelöst ist, wären besonders sozialwissenschaftliche Studien interessant, die z.B. erheben, wie die gesellschaftlichen und politischen Voraussetzungen für Maßnahmen für eine weitere Reduktion der Feinstaubbelastung geschaffen werden könnten, sodass die WHO-Richtwerte und damit ein Europa ohne relevante Gesundheitsbelastung durch Luftschadstoffe eines Tages Realität werden kann.

Es bräuchte nach Ansicht der Autoren auch weiterführende Forschung im Bereich des Wissenstransfers von wissenschaftlichen Erkenntnissen aus der Forschung in die Politik und die Gesellschaft sowie in die politische Umsetzung.

An der Verbesserung dieser Schnittstelle könnte geforscht werden, sodass die Erkenntnisse, wie Menschenleben geschützt werden können auch tatsächlich bis zu den Verantwortlichen und Betroffenen durchdringt und die vorgeschlagenen Maßnahmen nach Möglichkeit auch umgesetzt werden. Es wäre auch Forschung dazu interessant, inwieweit sich Maßnahmen zur Bekämpfung der Klimakrise mit den Maßnahmen zur Reduktion der Luftschadstoffe ergänzen. Den Autoren ist aufgefallen, dass oft sehr ähnliche Maßnahmen vorgeschlagen werden, die beiden Phänomene aber oft nicht zusammen gedacht werden und damit der Wert einer einzelnen Maßnahme durch Ausblendung der zusätzlich bestehenden Benefits eventuell niedriger eingeschätzt bzw. deren Kosteneffizienz falsch dargestellt wird.

# Abbildungsverzeichnis

[Abbildung 1: Angenommene Assoziation zwischen bestimmten Gesundheits-Outcomes und Verkehr-bedingter Luftverschmutzung. (Boogaard et al., 2022) 4](#_Toc170994758)

[Abbildung 2: Anzahl der Messstationen für Ozon mit mindestens einem validen Messwert in Wien pro Jahr 28](#_Toc170994759)

[Abbildung 3: Anzahl der Messstationen für PM2.5 mit mindestens einem validen Messwert in Wien pro Jahr 29](#_Toc170994760)

[Abbildung 4: Anzahl der Tage mit mindestens einer gemessenen Überschreitung des Schwellenwertes 120 von Ozon in Wien pro Jahr 32](#_Toc170994761)

[Abbildung 5: Anzahl der Tage mit mindestens einer gemessenen ÜBerschreitung des Schwellenwertes 100 von Ozon in Wien pro Jahr 33](#_Toc170994762)

[Abbildung 6: Durchschnittliche Überschreitungstage pro Monat von Ozon mit Schwellenwert 120 34](#_Toc170994763)

[Abbildung 7: Durchschnittliche Überschreitungstage pro Monat von Ozon mit Schwellenwert 100 36](#_Toc170994764)

[Abbildung 8: Anzahl der Tage mit mindestens einer gemessenen Überschreitung des Schwellenwertes 25 von PM2.5 in Wien pro Jahr 37](#_Toc170994765)

[Abbildung 9: Anzahl der Tage mit mindestens einer gemessenen ÜBerschreitung des Schwellenwertes 15 von PM2.5 in Wien pro Jahr 38](#_Toc170994766)

[Abbildung 10: Durchschnittliche Überschreitungstage pro Monat von PM 2,5 mit Schwellenwert 25 39](#_Toc170994767)

[Abbildung 11: Durchschnittliche Überschreitungstage pro Monat von PM 2,5 mit Schwellenwert 15 41](#_Toc170994768)

[Abbildung 12: Vergleich der Überschreitungen von EU-Standards und WHO-Richtlinien verschiedener Schadstoffe in % der urbanen Bevölkerung innerhalb der EU (Agency, Europe´s air quality status 2023, 2023) 45](#_Toc170994769)

[Abbildung 13: Ozonkonzentration - EU-Länder im Vergleich (Agency, Europe´s air quality status 2023, 2023) 50](#_Toc170994770)

[Abbildung 14: PM2,5-Konzentration - EU-Länder im Vergleich (Agency, Europe´s air quality status 2023, 2023) 51](#_Toc170994771)

# Tabellenverzeichnis

[Tabelle 1: Ausgewählte Luftschadstoffe und Richtwerte laut EU-Luftqualitätsrichtlinie und WHO (Umweltbundesamt, Grenz-, Ziel- und Schwellenwerte, 2024), eigene Darstellung. 20](#_Toc170994821)

[Tabelle 2: Schwellenwerte für Ozon und Feinstaub PM2,5 (Umweltbundesamt, Grenz-, Ziel- und Schwellenwerte, 2024), eigene Darstellung. 21](#_Toc170994822)

[Tabelle 3: Betrachtete Messstellen 26](#_Toc170994823)

[Tabelle 4: Übersicht über die möglichen Auswirkungen der Klimakrise auf Ozon und Feinstaub (Schultz, 2017), eigene Darstellung 46](#_Toc170994824)

# Literaturverzeichnis

Agency, E. E. (2022). *Health impacts of air pollution in Europe*. Abgerufen am 30. März 2024 von https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2022/health-impacts-of-air-pollution

Agency, E. E. (2023). *Europe´s air quality status 2023*. Abgerufen am 11. 05 2024 von https://www.eea.europa.eu/publications/europes-air-quality-status-2023

Austria, S. (2023). *Straßenverkehrsunfälle*. Abgerufen am 13. 05 2024 von https://www.statistik.at/statistiken/tourismus-und-verkehr/unfaelle/strassenverkehrsunfaelle

Biswas, S. &. (2015). *A review on diesel particulate filter.* International Journal of Engineering Research and Applications.

Brook, R. D.-R. (2010). *Particulate matter air pollution and cardiovascular disease: An update to the scientific statement from the American Heart Association.* Circulation.

Chow, J. C. (2004). *Equivalence of elemental carbon by thermal/optical reflectance and transmittance with different temperature protocols.* Environmental science & technology.

CleanAir. (8. Juni 2024). Von Cleanaireurope: https://cleanaireurope.com/wp-content/uploads/2022/03/rental-Datasheet-Horiba-APOA360.pdf abgerufen

Dockery, D. W. (1994). *Acute respiratory effects of particulate air pollution.* Annual review of public health.

Du, X. &. (2015). *Review of wet scrubber systems for industrial air pollution control.* Frontiers of Environmental Science & Engineering.

EEA. (2023). *Vorzeitige Todesfälle aufgrund von Luftverschmutzung in der EU weiter rückläufig – mehr Anstrengungen für eine schadstofffreie Umwelt nötig*. Abgerufen am 13. 05 2024 von https://www.eea.europa.eu/de/highlights/vorzeitige-todesfaelle-aufgrund-von-luftverschmutzung

EEA, E. U. (2020). *Air quality in Europe — 2020 report*. Abgerufen am 12. April 2023 von https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2020-report

EEA, E. U. (2022). *Mobile monitoring of air quality*. Abgerufen am 12. April 2024 von https://www.eea.europa.eu/themes/air/air-quality-and-transport/mobile-monitoring

ESA, E. S. (2022). *Earth observation for air quality*. Abgerufen am 12. April 2024 von https://www.esa.int/Applications/Observing\_the\_Earth/Earth\_from\_Space\_Air\_Quality

EU-Rat. (2022). *Luftverschmutzung in der EU: Fakten und Zahlen*. Abgerufen am 12. 05 2024 von https://www.consilium.europa.eu/de/infographics/air-pollution-in-the-eu/

European Environment Agency. (2024). *European Environment Agency - Air Quality Download Service*. Abgerufen am 16. Mai 2024 von https://eeadmz1-downloads-webapp.azurewebsites.net/

Garbaras, A. M. (2014). *Size-segregated fine and ultrafine particles at three sites in Vilnius, Lithuania: their concentrations and chemical composition.* Air Quality, Atmosphere & Health.

Grimm Aerosol Technik GmbH. (8. Juni 2024). *EDM 180.* Von Durag Group: https://www.durag.com/en/product-filter-837.htm?productID=EDM%20180 abgerufen

Gullett, B. K. (2016). *Speciated and toxic emissions from open burning of biomass piles.* Journal of the Air & Waste Management Association.

IPCC. (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press. Cambridge University Press.

Kelly, F. J. (2012). *Air pollution and public health: emerging hazards and improved understanding of risk.* Environmental geochemistry and health.

Khan, M. N. (2015). *Effect of primary measures on the reduction of particulate matter emissions from industrial boilers.* Environmental Science & Technology.

Lelieveld, J. E. (2015). *The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale.* Nature.

Li, N. S. (2003). *Ultrafine particulate pollutants induce oxidative stress and mitochondrial damage. Environmental health perspectives.*

Lim, S. H. (2013). *Review of fuel sulfur reduction technologies for the transportation sector.* Environmental Science & Technology.

Liu, Y. &. (2017). *Airborne particulate matter (PM2. 5) in China: Source, composition, and control.* Environmental Pollution.

Lohmann, R. (2009). *Global anthropogenic aerosol effects on convective clouds in ECHAM5-HAM. .* Atmospheric Chemistry and Physics.

Middleton, N. Y. (2008). *A 10-year time-series analysis of respiratory and cardiovascular morbidity in Nicosia, Cyprus: the effect of short-term changes in air pollution and dust storms.* Environmental health.

Naumann, F. (2024). *Rechtsruck in Europa? Analyse zeigt Ausmaß - Politologe warnt vor Trugschluss*. Abgerufen am 06. 05 2024 von https://www.fr.de/politik/rechtsruck-europa-wahl-analyse-afd-fpoe-orban-populisten-extremisten-umfrage-hoehenflug-92852846.html

Nova, I. &. (2017). *Automotive catalytic converters: current status and some perspectives.* Topics in Catalysis.

ÖGÖ. (2022). *Luftverschmutzung: Was man dagegen tun kann*. Abgerufen am 13. 05 2024 von https://www.gesundheit.gv.at/leben/umwelt/luftschadstoffe/massnahmen-gegen-luftverschmutzung.html

Pope, C. A. (2006). Health effects of fine particulate air pollution: Lines that correct. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 709-742.

Rechnungshof, E. (2018). *Sonderbericht. Luftverschmutzung: Unsere Gesundheit ist nach wie vor nicht hinreichend geschützt. .* Abgerufen am 30. März 2024 von https://op.europa.eu/webpub/eca/special-reports/air-quality-23-2018/de/

Riediker, M. &. (2003). *The Health Effects of Ultrafine Particles. Experimental and toxicologic pathology.*

Schauer, J. J. (2001). Measurement of emissions from air pollution sources. 5. C1-C32 organic compounds from gasoline-powered motor vehicles. *Environmental science & technology*, 1781-1788.

Schultz, M. K. (2017). Luftqualität. In G. J.-Z. Brasseur (Hrsg.), *Klimawandel in Deutschland* (S. 127-135). Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum.

Seinfeld, J. H. (2016). *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change.* John Wiley & Sons.

Teledyne. (8. Juni 2024). Von Thomson Environmental Systems: https://thomsongroup.com.au/wp-content/uploads/2018/09/T400\_datasheet.pdf abgerufen

Thornburg, J. R. (2015). *PM10, PM2.5, PM1, number and surface area size distributions in Barcelona during Calm and Windy Conditions. Atmospheric Environment.*

UBA, Ö. U. (2022). *Luftgütemessungen*. Abgerufen am 12. April 2024 von https://www.umweltbundesamt.at/themen/luft/luftguetemessungen/

Umweltbundesamt. (2018). *Einfluss des Klimawandels auf die Luftqualität.* Abgerufen am 05. 05 2024 von https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/rep0659.pdf

Umweltbundesamt. (2022). *Jahresberichte der Luftgütemessungen in Österreich.* Abgerufen am 31. März 2024 von https://www.umweltbundesamt.at/luft-jahresberichte

Umweltbundesamt. (2023). *Gesundheitsrisiken durch Ozon*. Abgerufen am 05. 05 2024 von https://www.umweltbundesamt.de/daten/umwelt-gesundheit/gesundheitsrisiken-durch-ozon#weniger-bodennahes-ozon-ist-moglich

Umweltbundesamt. (2024). *Grenz-, Ziel- und Schwellenwerte*. Abgerufen am 30. März 2024 von https://www.umweltbundesamt.at/umweltthemen/luft/daten-luft/luft-grenzwerte

VCÖ. (2021). *VCÖ: Im EU-Vergleich in Österreich große Gesundheitsschäden durch Luftverschmutzung*. Abgerufen am 12. 05 2024 von https://vcoe.at/presse/presseaussendungen/detail/vcoe-im-eu-vergleich-in-oesterreich-grosse-gesundheitsschaeden-durch-luftverschmutzung

Wang, H. F. (2015). *Impact of mineral dust on nitrate, sulfate, and ozone in transboundary air polluted region in China.* Atmospheric Environment.

Wang, J. Z. (2015). *aser-Light-Scattering-based methods for particle-size measurement in atmospheric research.* Atmospheric Measurement Techniques.

WHO. (2021). *World Health Organization.* Abgerufen am 15. März 2024 von WHO global air quality gudelines: particulate matter (‎PM2.5 and PM10)‎, ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide.: https://iris.who.int/handle/10665/345329

WHO. (19. 12 2022). *World Health Organization.* Abgerufen am 15. März 2024 von Ambient (outdoor) air pollution: https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health

Wiedensohler, A. W. (2009). *Mobility particle size spectrometers: harmonization of technical standards and data structure to facilitate high quality long-term observations of atmospheric particle number size distributions.* Atmospheric Measurement Techniques.

Wien, S. (2024). *Bevölkerungsstand - Statistiken*. Abgerufen am 12. 05 2024 von https://www.wien.gv.at/statistik/bevoelkerung/bevoelkerungsstand/

WKO. (Februar 2024). *Wirtschaftswachstum im EU-Vergleich.* Abgerufen am 11. 05 2024 von https://www.wko.at/statistik/eu/europa-wirtschaftswachstum.pdf

Zhao, Y., An, X., Sun, Z., Li, Y., & Hou, Q. (2022). Identification of Health Effects of Complex Air Pollution in China. International Journal of Environmental Research and Public Health, 19(19), 12652. https://doi.org/10.3390/IJERPH191912652Brook, R. D.-R. (2010). *Particulate matter air pollution and cardiovascular disease: An update to the scientific statement from the American Heart Association.* Circulation.