

ZUSAMMENHANG ZWISCHEN STICKOXIDEN + RUß

Umweltanalytik Seminar – Abschlussaufgabe

Einleitung

Ruß und Stickoxide sind zwei bedeutende Luftschadstoffe, die sowohl gesundheitliche als auch klimatische Auswirkungen haben. Beide entstehen hauptsächlich als Nebenprodukte bei Verbrennungsprozessen, insbesondere bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe in Motoren und industriellen Anlagen. In städtischen Gebieten spielt der Verkehr eine besonders große Rolle bei der Emission dieser Schadstoffe.

Stickstoffdioxid (NO_2) ist ein reaktives Gas, das zu den Stickoxiden (NO_x) gehört. Es ist ein Reizgas, das vor allem die Atemwege belastet und zu Entzündungsreaktionen führen kann [1]. Menschen mit vorbestehenden Atemwegserkrankungen wie Asthma oder chronischer Bronchitis sind besonders anfällig für die schädlichen Auswirkungen von NO_2 . Darüber hinaus spielt NO_2 eine wichtige Rolle bei der Bildung von bodennahem Ozon, einem weiteren Schadstoff, der sowohl gesundheitsschädlich als auch klimawirksam ist. Ozon kann die Lungenfunktion beeinträchtigen und trägt als Treibhausgas zur globalen Erwärmung bei.

Der Verkehrssektor ist mit einem Emissionsanteil von 36% der größte Verursacher von Stickoxid-Emissionen in Deutschland [2, 4]. In Ballungsräumen wie Berlin kann dieser Anteil aufgrund der hohen Verkehrsdichte noch deutlich höher ausfallen [3]. Diesel-Fahrzeuge sind dabei besonders problematisch, da sie im Vergleich zu Benzinern deutlich mehr Stickoxide ausstoßen.

Ruß, auch als schwarzer Kohlenstoff bekannt, ist ein Produkt unvollständiger Verbrennung und besteht hauptsächlich aus elementarem Kohlenstoff. Seine Auswirkungen auf die Umwelt und das Klima sind vielfältig. Durch seine schwarze Färbung absorbiert Ruß Sonnenlicht sehr effektiv, was zu einer lokalen Erwärmung der Atmosphäre führen kann. Wenn sich Rußpartikel auf Schnee- oder Eisflächen ablagern, verringern sie deren Albedo (Rückstrahlvermögen), was zu einer beschleunigten Schmelze führen kann. Dieser Effekt ist besonders in arktischen Regionen und Gletschergebieten von Bedeutung. In unserer Untersuchung in Berlin spielen diese klimatischen Auswirkungen aufgrund der geringen Konzentrationen vermutlich eine untergeordnete Rolle, sind aber im globalen Kontext durchaus relevant.

Bei Messungen und Datenerhebungen wird Ruß meist als Teil des Feinstaubs $\text{PM}_{2.5}$ (Particulate Matter mit einem aerodynamischen Durchmesser von weniger als $2,5 \mu\text{m}$) erfasst. Die gesundheitlichen Auswirkungen von Ruß isoliert zu betrachten, ist schwierig, da er in der Regel gemeinsam mit anderen Feinstaubkomponenten auftritt [5]. Feinstaubpartikel können tief in die Lunge eindringen und sogar in den Blutkreislauf gelangen, wo sie verschiedene gesundheitliche Probleme verursachen können, darunter Herz-Kreislauf-Erkrankungen und Atemwegsprobleme.

In Deutschland ist der Verkehr für etwa 25% der PM_{2.5}-Emissionen verantwortlich [4]. Allerdings spielen auch andere Quellen eine wichtige Rolle, insbesondere die Industrie und die Verbrennung fester Brennstoffe wie Holz in privaten Haushalten. In Ballungsgebieten wie Berlin dürfte der Verkehrsanteil an den Rußemissionen aufgrund der hohen Fahrzeugdichte deutlich höher sein als im bundesweiten Durchschnitt.

In dieser Untersuchung analysieren wir die Konzentrationen von Ruß und Stickoxiden anhand von Daten, die von einem Messcontainer an der Straße des 17. Juni in Berlin erfasst wurden. Diese Straße ist eine stark frequentierte Verkehrsader in der Innenstadt und bietet daher einen guten Standort, um den Einfluss des Straßenverkehrs auf die Luftqualität zu untersuchen.

Unsere Hypothese lautet, dass eine positive Korrelation zwischen den Konzentrationen von Ruß und Stickoxiden in der Luft besteht. Diese Annahme basiert auf der Tatsache, dass beide Schadstoffe hauptsächlich als Abgase im Autoverkehr entstehen und unser Messcontainer an einer stark befahrenen innerstädtischen Straße platziert ist. Wir erwarten, dass Verkehrsspitzen zu erhöhten Konzentrationen beider Schadstoffe führen und dass deren Konzentrationen im Tagesverlauf ähnliche Muster aufweisen.

Methodik

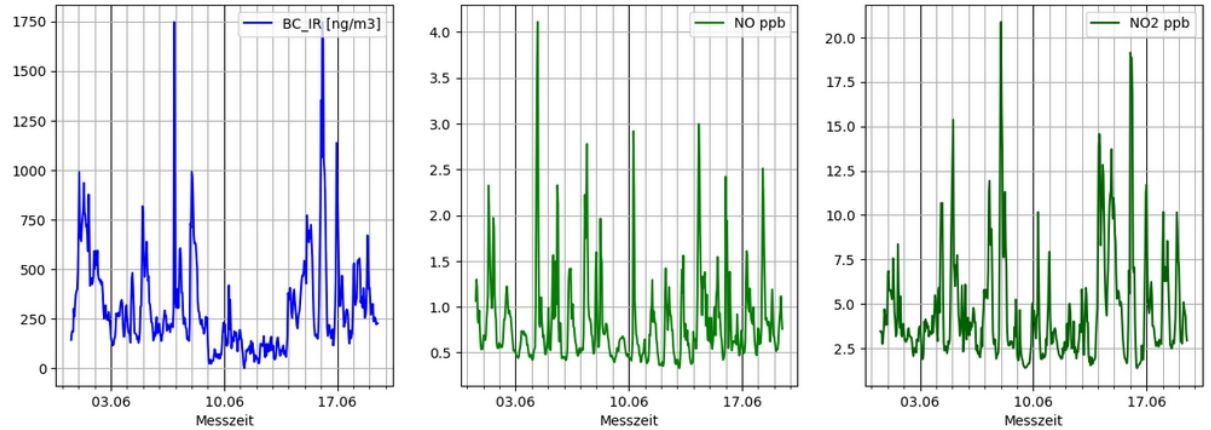
Für unsere Untersuchung standen uns Messdaten für Ruß und Stickoxide zur Verfügung, die über unterschiedliche Zeiträume erhoben wurden. Die Rußmessung ging vom 31.05. bis zum 24.06.24, die Stickoxidmessung vom 02.04. bis zum 19.06.24. Um eine konsistente Analyse zu gewährleisten, haben wir uns auf den Überschneidungszeitraum der Messungen konzentriert, also **vom 31.05.24 bis zum 19.06.24**. Dieser etwa dreiwöchige Zeitraum bietet uns eine solide Datenbasis für unsere Untersuchungen.

Die Datenqualität war insgesamt sehr gut, da es in diesem Zeitraum keine ungültigen Datenpunkte gab. Allerdings stellten wir fest, dass etwa 1% der Messwerte für Ruß negativ waren, mit einem durchschnittlichen Wert von etwa -17,8 ng/m³. Diese Messwerte traten zwischen dem 09.06. 01:45 Uhr und 13.06. 20:00 Uhr auf, und es bleibt auch bei diesem Zeitraum, wenn wir die gesamte Messreihe für Ruß berücksichtigen. In diesem Zeitraum machen sie 4% der Messdaten aus. Es ist für uns im Nachhinein schwer festzustellen, woher diese Messfehler kommen und warum sie sich auf diesen kurzen Zeitraum begrenzen, da wir die Messungen mit dem Aetholameter nicht selbst durchgeführt haben. Obwohl negative Konzentrationen physikalisch nicht sinnvoll sind, haben wir uns allerdings entschieden, diese Werte in unserer Analyse zu belassen. Der Grund dafür ist, dass diese negativen Werte im Gesamtkontext kaum ins Gewicht fallen und ihre Entfernung möglicherweise zu einer Verzerrung der Daten geführt hätte. Zudem wollten wir die zeitliche Übereinstimmung mit den Stickoxid-Daten beibehalten.

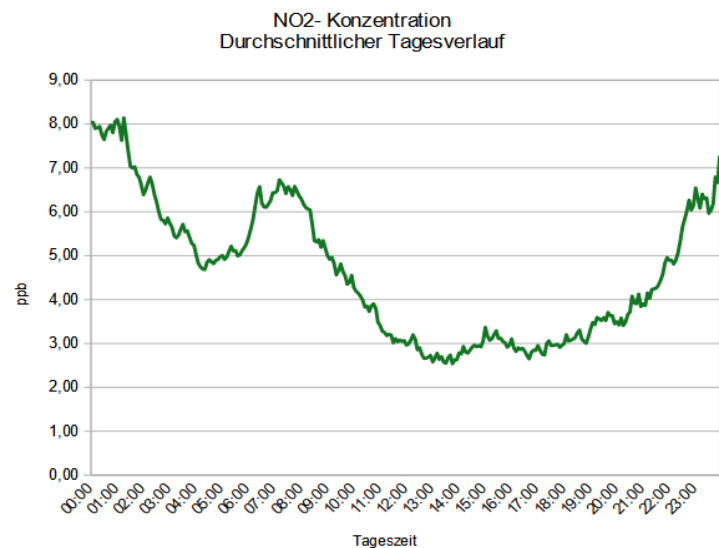
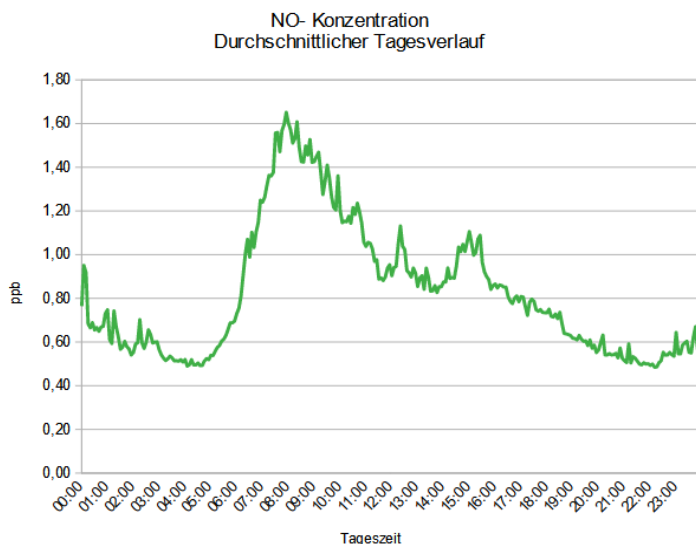
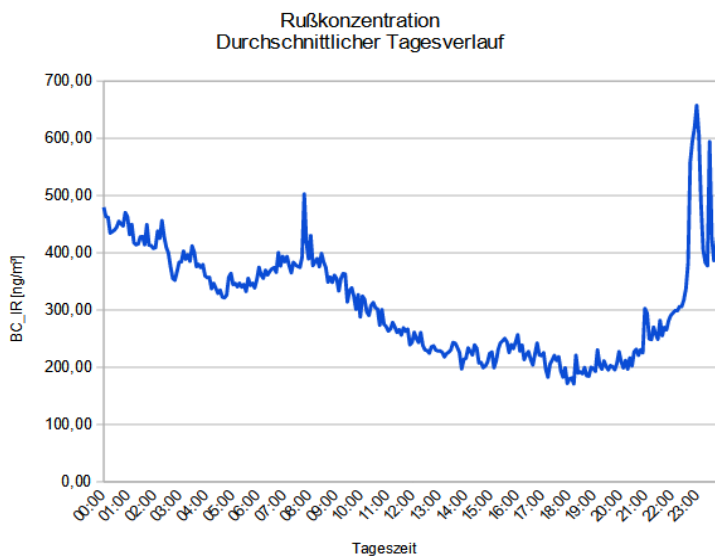
Die Messungen wurden ursprünglich im 5-Minuten-Takt durchgeführt. Für unsere Analyse haben wir diese hochaufgelösten Daten zu stündlichen Mittelwerten zusammengefasst. Diese Aggregation hilft uns, kurzfristige Schwankungen zu glätten und langfristige Trends besser zu erkennen. Zudem reduziert es die Datenmenge auf ein besser handhabbares Maß, ohne dabei wesentliche Informationen zu verlieren.

Nach der Aufbereitung der Daten haben wir verschiedene Visualisierungen erstellt, um die Beziehung zwischen Ruß und den Stickoxiden NO und NO₂ zu untersuchen:

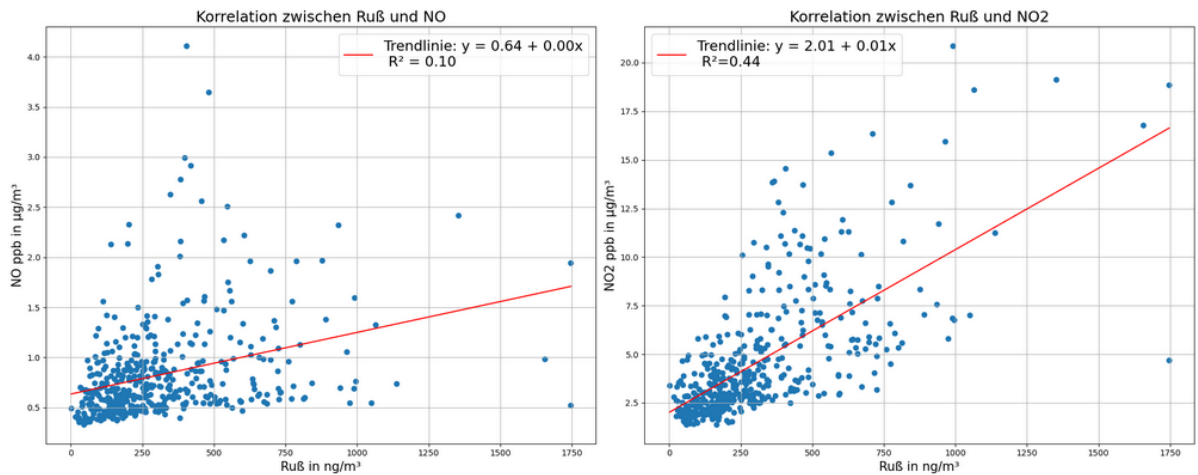
1. Ein Zeitreihendiagramm, das die Konzentrationen von Ruß, NO und NO₂ über den gesamten Untersuchungszeitraum darstellt. Dieses Diagramm ermöglicht es uns, allgemeine Trends und mögliche Korrelationen zwischen den Schadstoffen im Zeitverlauf zu erkennen.



2. Ein Tagesgang-Diagramm, das die durchschnittlichen Konzentrationen der Schadstoffe für jede Stunde des Tages zeigt. Diese Darstellung ist besonders nützlich, um den Einfluss menschlicher Aktivitäten, insbesondere des Verkehrs, auf die Schadstoffkonzentrationen zu visualisieren.



3. Streudiagramme, die die Konzentration von NO bzw. NO₂ gegen die Rußkonzentration auftragen. In diese Diagramme haben wir zusätzlich Regressionsgeraden eingezeichnet, um den linearen Zusammenhang zwischen den Variablen zu verdeutlichen



Für die statistische Analyse haben wir das Bestimmtheitsmaß R^2 berechnet, das ein Maß für die Stärke des linearen Zusammenhangs zwischen zwei Variablen ist. R^2 kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen, wobei 1 einen perfekten linearen Zusammenhang und 0 keinen linearen Zusammenhang anzeigt.

Es ist wichtig zu beachten, dass unsere Analyse auf Korrelationen basiert und nicht notwendigerweise Kausalzusammenhänge aufzeigt. Obwohl wir erwarten, dass der Straßenverkehr eine Hauptquelle für beide Schadstoffe ist, können auch andere Faktoren ihre Konzentrationen beeinflussen.

Ergebnisse

Die Analyse unserer Daten lieferte mehrere interessante Erkenntnisse über den Zusammenhang zwischen Ruß und Stickoxiden in der städtischen Luft von Berlin.

Zunächst fällt auf, dass zwischen Ruß und Stickstoffmonoxid (NO) nur ein schwacher Zusammenhang zu bestehen scheint. Dies ist überraschend, da beide Schadstoffe bei Verbrennungsprozessen entstehen und man daher eine stärkere Korrelation erwarten könnte. Eine mögliche Erklärung für diesen schwachen Zusammenhang könnte in der Reaktivität von NO liegen. NO ist ein sehr reaktives Gas, das in der Atmosphäre schnell mit Sauerstoff oder Ozon zu NO₂ reagiert. Diese Umwandlung könnte dazu führen, dass die gemessenen NO-Konzentrationen nicht direkt die Emissionen widerspiegeln, sondern stark von atmosphärischen Bedingungen beeinflusst werden. Auffällig ist zum Beispiel, dass die NO-Konzentrationen vor Allem dann besonders niedrig sind, wenn die NO₂-Konzentrationen besonders hoch sind, ca. in den Nachtstunden zwischen 22 Uhr und 5 Uhr. Eine Erklärung dafür ist das Fehlen von Sonnenlicht, welches normaler Weise vorhandenes NO₂ wieder in NO und Sauerstoffatome aufspaltet. Wenn dieser Faktor nachts wegfällt, nimmt die NO-Konzentration wieder ab.

Im Gegensatz zum NO zeigt sich zwischen Ruß und Stickstoffdioxid (NO_2) ein deutlich stärkerer Zusammenhang. Dies lässt sich sowohl an den ähnlich verlaufenden Tagesgangkurven als auch am Streudiagramm erkennen. Das berechnete Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,44$ für die Beziehung zwischen Ruß und NO_2 deutet auf einen moderaten linearen Zusammenhang hin. Obwohl dieser Wert nicht auf eine sehr starke Korrelation hindeutet, ist er angesichts der Komplexität der Luftverschmutzung in städtischen Gebieten durchaus bemerkenswert.

Es gibt mehrere mögliche Gründe, warum wir keine stärkere Korrelation zwischen Ruß und NO_2 beobachten:

1. Unterschiedliche Quellen: Obwohl der Straßenverkehr eine Hauptquelle für beide Schadstoffe ist, gibt es auch andere bedeutende Quellen. Für NO_2 sind das vor allem Haushalte, die Energiewirtschaft und die Landwirtschaft [4]. Feinstaub ($\text{PM}_{2.5}$), zu dem Ruß gehört, wird ebenfalls in Haushalten (z.B. durch Holzverbrennung) und bei industriellen Prozessen emittiert. Diese unterschiedlichen Quellprofile können zu Abweichungen in den Konzentrationsverläufen führen.
2. Meteorologische Einflüsse: Verschiedene Wetterfaktoren können sich unterschiedlich auf die Konzentrationen von Ruß und NO_2 auswirken. Zum Beispiel können Sonneneinstrahlung und das Vorhandensein von Ozon die NO_2 -Konzentration maßgeblich beeinflussen, während sie auf Ruß weniger Einfluss haben. Windgeschwindigkeit und -richtung können ebenfalls eine Rolle spielen, indem sie die Verteilung und den Transport der Schadstoffe beeinflussen.
3. Chemische Prozesse: NO_2 ist Teil eines komplexen chemischen Gleichgewichts in der Atmosphäre. Es kann aus NO gebildet werden, aber auch durch photochemische Prozesse wieder abgebaut werden. Ruß hingegen ist chemisch relativ inert und wird hauptsächlich durch physikalische Prozesse aus der Luft entfernt.
4. Unterschiedliche Lebensdauern: Rußpartikel können länger in der Atmosphäre verbleiben als NO_2 , was zu Unterschieden in den gemessenen Konzentrationen führen kann, insbesondere wenn die Emissionsquellen nicht konstant sind.

Ein weiterer interessanter Aspekt unserer Ergebnisse ist der Vergleich der Konzentrationen von NO und NO_2 . Wir beobachten, dass die NO_2 -Konzentrationen im Allgemeinen höher sind als die NO-Konzentrationen. Dies lässt sich durch mehrere Faktoren erklären:

1. Chemische Umwandlung: Wie bereits erwähnt, reagiert NO in der Atmosphäre schnell mit Sauerstoff und Ozon zu NO_2 . Dieser Prozess führt zu einer Abnahme der NO-Konzentration und einer Zunahme der NO_2 -Konzentration.
2. Direkte NO_2 -Emissionen: Moderne Dieselfahrzeuge stoßen aufgrund ihrer Abgasnachbehandlungssysteme direkt NO_2 aus [1]. Dies trägt zu höheren NO_2 -Konzentrationen in Straßennähe bei.
3. Längere atmosphärische Lebensdauer: NO_2 ist weniger reaktiv als NO und hat daher eine längere Verweildauer in der Atmosphäre, was zu höheren gemessenen Konzentrationen führen kann.

Die Tagesgangkurven für Ruß und NO_2 zeigen ähnliche Muster, die vor Allem morgens mit den typischen Verkehrsmustern in einer Stadt korrelieren. Wir beobachten Spitzen während der morgendlichen Hauptverkehrszeiten um ca. 8 Uhr. Allerdings wäre eine weitere Spitze zwischen 16 und 20 Uhr zu erwarten, und ein Abfall ab 22 Uhr. Stattdessen beobachten wir besonders niedrige Ruß- und NO_2 -Werte gegen 18 Uhr, und besonders hohe Werte ab 22

Uhr. Dies unterstützt unsere Annahme, dass der Straßenverkehr eine Hauptquelle für beide Schadstoffe ist, nur teilweise, und widerspricht ihr auch teilweise stark.

Fazit

Die vorliegende Untersuchung zum Zusammenhang zwischen Stickoxiden und Ruß in der städtischen Luft von Berlin hat wichtige Erkenntnisse über die Luftqualität und die Dynamik von Luftschadstoffen in urbanen Räumen geliefert.

Unsere Hauptergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Es besteht ein moderater positiver Zusammenhang zwischen Ruß und Stickstoffdioxid (NO_2), was durch ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,44$ belegt wird.
2. Überraschenderweise zeigte sich nur eine schwache Korrelation zwischen Ruß und Stickstoffmonoxid (NO).
3. Die Tagesgangkurven für Ruß und NO_2 weisen ähnliche Muster auf, die morgens stark mit typischen Verkehrsmustern korrelieren, ihnen aber zu späteren Tageszeiten entgegenlaufen.
4. NO_2 -Konzentrationen sind im Allgemeinen höher als NO -Konzentrationen, was auf chemische Umwandlungsprozesse in der Atmosphäre hindeutet.

Diese Ergebnisse bestätigen teilweise unsere ursprüngliche Hypothese, zeigen aber auch einige unerwartete Muster auf.

Die moderate Korrelation zwischen Ruß und NO_2 unterstützt die Annahme, dass beide Schadstoffe ähnliche Quellen haben, unter Anderem den Straßenverkehr. Die schwache Korrelation zwischen Ruß und NO lässt sich wahrscheinlich durch die hohe Reaktivität von NO und seine schnelle Umwandlung zu NO_2 in der Atmosphäre erklären.

Es ist wichtig zu betonen, dass unsere Studie auch einige Limitationen aufweist. Die Messungen wurden an einem einzelnen Standort in Berlin durchgeführt und können daher nicht ohne Weiteres auf die gesamte Stadt oder andere urbane Gebiete übertragen werden. Zudem wurde der Einfluss meteorologischer Faktoren in dieser Analyse nicht berücksichtigt, was die Interpretation der Ergebnisse beeinflussen könnte.

Für zukünftige Forschungen wäre es interessant, die Messungen auf mehrere Standorte in Berlin auszuweiten, um ein umfassenderes Bild der Schadstoffverteilung in der Stadt zu erhalten. Auch die Einbeziehung meteorologischer Daten könnte wertvolle Erkenntnisse über den Einfluss von Wetterbedingungen auf die Schadstoffkonzentrationen liefern.

Darüber hinaus wäre eine detailliertere Untersuchung der chemischen Prozesse, die zur Umwandlung von NO zu NO_2 führen, von großem Interesse. Dies könnte helfen, die komplexen Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Luftschadstoffen besser zu verstehen und effektivere Maßnahmen zur Luftreinhaltung zu entwickeln.

Die Ergebnisse unserer Studie haben wichtige Implikationen für die Stadtplanung und Umweltpolitik. Sie unterstreichen die Notwendigkeit, den Verkehr in Städten zu reduzieren und alternative, emissionsarme Verkehrsmittel zu fördern. Auch die Förderung von

Grünflächen in der Stadt könnte zur Verbesserung der Luftqualität beitragen, da Pflanzen Schadstoffe aus der Luft filtern können.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass unsere Untersuchung einen wertvollen Beitrag zum Verständnis der Luftverschmutzung in städtischen Gebieten leistet. Sie zeigt die komplexen Zusammenhänge zwischen verschiedenen Luftschadstoffen auf und unterstreicht die Bedeutung des Verkehrs als eine Hauptquelle für Luftverschmutzung in Städten. Diese Erkenntnisse können als Grundlage für zukünftige Forschungen und politische Entscheidungen zur Verbesserung der Luftqualität in urbanen Räumen dienen.

Quellen

- [1] <https://www.umweltbundesamt.de/daten/luft/stickstoffdioxid-belastung#uberschreitung-von-grenzwerten>
- [2] <https://www.umweltbundesamt.de/daten/luft/luftschaadstoff-emissionen-in-deutschland/stickstoffoxid-emissionen#entwicklung-seit-1990>
- [3] <https://www.berlin.de/sen/uvk/umwelt/luft/luftreinhaltung/luftreinhalteplan-2-fortschreibung/luftqualitaet/>
- [4] <https://www.umweltbundesamt.de/daten/luft/luftschaadstoff-emissionen-in-deutschland#ermittlung-der-emissionsmengen> (Tab: Emissionen ausgewählter Luftschadstoffe nach Quellkategorien)
- [5] https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/8699/Health_effects_black_carbon.pdf?sequence=3&isAllowed=1