

Schriftenreihe Umweltschutz
Nr. 52



IMMISSIONSGRENZWERTE FÜR LUFTSCHADSTOFFE

Herausgegeben vom Bundesamt für Umweltschutz
Bern, Juni 1986

Artenzusammensetzung der Wasserlebewesen aus. In der Schweiz sind vor allem Bergseen in Gebieten mit kristallinen geologischen Strukturen betroffen (Tessin). Auch in Böden können saure Niederschläge zu Veränderungen führen. Ein Absinken des Säuregrades kann beispielsweise zu erhöhter Mobilität von pflanzentoxischen Schwermetallen und zur Verarmung an Nährsalzen führen. Auch direkte Wirkungen von sauren Niederschlägen auf Pflanzen sind bekannt. Insbesondere die stark sauren und schadstoffreichen Nebel - der Säuregehalt des Nebelwassers kann zehn- bis hundertmal höher sein als jener des Regens - können in Kombination mit der Einwirkung von Photooxidantien zu Nährstoffauswaschungen aus den Blattorganen führen (sog. leaching).

52 Stickstoffoxide

Unter den Begriff Stickstoffoxide (kurz auch Stickoxide genannt) fallen eine Vielzahl von Verbindungen des Typs N_xO_y , von denen aus lufthygienischer Sicht allerdings nur die beiden Verbindungen NO (Stickstoffmonoxid) und NO_2 (Stickstoffdioxid) von Bedeutung sind, welche zusammenfassend als NO_x bezeichnet werden.

Sowohl natürliche als auch anthropogene Prozesse können zu NO_x -Emissionen in die Atmosphäre führen. Zu den natürlichen NO_x -Bildungsprozessen gehören mikrobielle Umsetzungen in den Böden (Nitrifikation, Denitrifikation) sowie luftelektrische Entladungen in der Atmosphäre (Blitze). Sogenannt gemischt anthropogen/natürliche NO_x -Emissionen entstehen einerseits bei Wald- und Buschbränden, andererseits bei der Oxidation von Ammoniak NH_3 (u.a. aus der Landwirtschaft, insbesondere der Intensivtierhaltung) in der Atmosphäre. Rein anthropogene NO_x -Emissionen werden schliesslich bei der Verbrennung fossiler Brenn- und Treibstoffe bei hohen Temperaturen gebildet (vorwiegend durch Umsetzung von Luftstickstoff N_2 mit Sauerstoff O_2).

In Gebieten mit hoher Besiedlungs-, Industrie- und Verkehrsdichte, wie zum Beispiel in der Schweiz, sind die natürlichen NO_x -Emissionen (mit einem Anteil in der Grössenordnung von etwa 4-5%) gegenüber den anthropogenen NO_x -Emissionen praktisch vernachlässigbar.

1982 waren in der Schweiz die Bereiche Industrie und Hausfeuerungen für ca. 17%, der Motorfahrzeugverkehr für ca. 83% der NO_x -Emissionen von insgesamt rund 180'000 t verantwortlich.

Die gesamten anthropogenen Stickoxidemissionen in der Schweiz haben sich von 1950 bis anfangs der 80er Jahre etwa verzehnfacht. Die NO_x -Emissionen des Motorfahrzeugverkehrs haben sich im gleichen Zeitraum gar verzwanzigfacht.

Bei den Immissionen ist ebenfalls ein eindeutig zunehmender Trend feststellbar. Die NO_x -Immissionskonzentrationen in den Stadtzentren und in den Agglomerationen haben sich seit 1965 verdoppelt bis verdreifacht. Die Jahresmittelwerte für NO_2 liegen heute in Stadtzentren je nach Lage der Messstation bei etwa 60-140 $\mu g NO_2/m^3$, in Agglomerationen bei 30-50 $\mu g/m^3$ und in ländlichen Gebieten bei 10-30 $\mu g/m^3$. Kurzzeitig auftretende Belastungen können erheblich über diesen Werten liegen. In Reinluftgebieten betragen die NO_2 -Immissionskonzentrationen weniger als 5 $\mu g/m^3$.

In der Atmosphäre können die Stickoxide (NO_x) in sekundäre Luftschadstoffe wie salpetrige Säure (HNO_2), Salpetersäure (HNO_3) und in Salze (Nitrite, Nitrate) der erwähnten Säuren umgewandelt werden. Ausserdem sind die Stickoxide zusammen mit reaktiven Kohlenwasserstoffen für die vor allem während der strahlungsreichen Jahreszeit (März-September) ablaufende Bildung von Photooxidantien (z.B. Ozon) in bodennahen Luftschichten verantwortlich.

Aus lufthygienischer Sicht müssen die Stickoxide, insbesondere NO_2 , heute in erster Linie aus folgenden Gründen als problematisch bezeichnet werden:

- NO_2 ist in den vorkommenden Konzentrationen ein human-toxikologisch relevanter Luftschadstoff.
- NO_2 und NO haben in den vorkommenden Konzentrationen u.a. in Kombination mit andern Luftschadstoffen (z.B. SO_2 , O_3) phytotoxische Wirkungen.
- NO_2 ist ein bedeutender Primärschadstoff für die photochemische Bildung von Oxidantien wie zum Beispiel Ozon (O_3) und die Gruppe der Peroxyacylnitrate (PANs).
- Die Stickoxide sind wie das Schwefeldioxid wichtige Vorläufersubstanzen für die Bildung saurer Niederschläge.

Bei der gesundheitlichen Beeinträchtigung des Menschen wie auch der Tiere durch Stickoxide steht NO_2 im Vordergrund. NO_2 ist wie SO_2 ein Reizgas, ist jedoch aggressiver und gelangt im Gegensatz zu SO_2 eher in den tiefer gelegenen Atemwegen zur Wirkung. Aufgrund seiner chemischen Aggressivität (ungesättigtes Radikal) reagiert NO_2 bei Kontakt unmittelbar mit den Schleimhäuten bzw. wird in deren Strukturelementen gelöst. Dabei können die Alveolarstrukturen morphologisch verändert und geschädigt werden, so dass Störungen des Gasaustausches als Folge von Permeabilitätsänderungen auftreten. In Abhängigkeit von Konzentration und Expositionsdauer kann die Einatmung von NO_2 zu reversiblen und irreversiblen nachteiligen Wirkungen führen, die sich im wesentlichen im Bereich der Bronchiolen und Alveolen einstellen.

Die akute Vergiftung mit sehr hohen NO_2 -Konzentrationen führt zum Tod durch Lungenödem. Niedrigere und umweltrelevante Konzentrationen können zu einer Vielzahl funktioneller, zellulärer, subzellulärer und biochemischer Veränderungen führen:

- Schleimhautreizungen (Augen, Atemwege), besonders ausgeprägt bei gleichzeitiger Anwesenheit aggressiver Sekundärschadstoffe wie z.B. Photooxidantien,
- Subjektive Beschwerden wie Atemnot und Kopfschmerzen.
- Auslösung von Asthma-Anfällen,
- Leistungsverminderung bei starker körperlicher Belastung,
- Zunahme des Atemwegswiderstandes und Beeinflussung weiterer Lungenfunktionsparameter (Strömungsgeschwindigkeit, Vitalkapazität, alveolo-arterielle Sauerstoffdruckdifferenz),
- Erhöhte bronchiale Reagibilität (z.B. erhöhte Empfindlichkeit gegenüber Bronchokonstriktoren),
- Erhöhte Empfindlichkeit gegenüber bakteriellen und viralen Infektionen (höchstwahrscheinlich im Zusammenhang mit der Beeinträchtigung der Makrophagenaktivität und des Schleimtransports in der Lunge),
- Vermehrtes Auftreten chronischer Atemwegserkrankungen (Husten, Auswurf, Bronchitis),
- Morphologische und histologische Veränderungen im Lungengewebe (z.B. Schädigung von Alveolarepithelzellen, Veränderung und Schädigung der Trachealmukosa und der Zilien, strukturelle Veränderung von Kollagenfasern, strukturelle Veränderung von Makrophagen),
- Biochemische und metabolische Veränderungen (z.B. Erhöhung der Lipidperoxidation im Lungengewebe, Hemmung des Prostaglandin-Stoffwechsels, Hydroxyprolinausscheidung im Urin, Veränderung biochemischer Parameter im Serum).

Als besonders empfindlich gelten vor allem Kinder und Menschen, die bereits an Atemwegserkrankungen leiden (z.B. an chronischer Bronchitis, Asthma).

Ueber ein mögliches karzinogenes Potential der Stickoxide in den in der Umwelt vorkommenden Konzentrationen können noch keine abschliessenden Aussagen gemacht werden. Grundsätzlich können jedoch nitrose Gase mit Gewebesaminen Nitrosamine bilden, welche als potentielle Karzinogene bekannt sind.

Gestützt auf die vorhandenen Ergebnisse von kontrollierten toxikologischen als auch epidemiologischen Untersuchungen sollte zum Schutze der Bevölkerung eine Langzeitbelastung von höchstens $40-50 \mu\text{g NO}_2/\text{m}^3$ (definiert als Jahresmittelwert) sowie eine Kurzzeitbelastung von ca. $100 \mu\text{g NO}_2/\text{m}^3$ (definiert als 95%-Wert aller 1/2h-Mittelwerte eines Jahres) nicht überschritten werden.

Aus phytotoxikologischer Sicht sind die Stickstoffoxide u.a. deshalb von Bedeutung, weil sie in niedrigen Konzentrationen vor allem in Kombination mit einigen anderen Luftschadstoffen (z.B. SO_2 , O_3) ausgeprägte Schädwirkungen zeigen. So konnten beispielsweise bereits nach nur vierstündiger gleichzeitiger Einwirkung von $130 \mu\text{g SO}_2/\text{m}^3$ und $90 \mu\text{g NO}_2/\text{m}^3$ sichtbare Blattschädigungen an verschiedenen Pflanzenarten festgestellt werden, während bei alleiniger Begasung mit SO_2 oder NO_2 zur Auslösung derselben Schadsymptome bei gleicher Einwirkungszeit wesentlich höhere Konzentrationen benötigt wurden ($3800 \mu\text{g NO}_2/\text{m}^3$; $1300 \mu\text{g SO}_2/\text{m}^3$). Bei länger dauernden Begasungen (mehrere Tage bis Monate) mit NO_2 -Konzentrationen im Bereich von $75-125 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und SO_2 -Konzentrationen von $100-160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ wurden u.a. beträchtliche Wachstumsreduktionen von 50 und mehr Prozent beobachtet sowie Auswirkungen auf die Morphogenese (z.B. kleinere Blattflächen, weniger Seitentriebe), auf den Stoffwechsel (Veränderung von Enzymaktivitäten mit Beeinträchtigung der Schadstoffentgiftung) und auf Alterungsvorgänge (z.B. vorzeitiger Blattabwurf). Schliesslich kann es bei zusätzlicher Einwirkung von Ozon zu weiteren Wirkungsverstärkungen kommen.

Die Schadgase Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO_2) werden von den Pflanzen unterschiedlich schnell aufgenommen, haben aber nach der Aufnahme durchaus vergleichbare Wirkungen. So wurde u.a. bei gleichzeitiger Begasung mit NO und NO_2 eine Hemmung der Photosynthese festgestellt, welche der Summe der von beiden Schadstoffen alleine hervorgerufenen Wirkung entsprach. Diese Ergebnisse spielen bei der Beurteilung der Stickoxidwirkungen insofern

eine Rolle, als in der Umwelt neben NO_2 immer auch NO in vergleichbaren oder kurzzeitig sogar höheren Konzentrationen vorkommt und damit die NO_x -Gesamtbelastung grösser ist als in den meist nur mit NO_2 durchgeführten Begasungsexperimenten.

Aufgrund der vorhandenen Wirkungsdaten sollte zum Schutze der Vegetation vor chronischer Schädigung eine Langzeitbelastung von $20-40 \mu\text{g NO}_2/\text{m}^3$ (definiert als Jahresmittelwert) nicht überschritten werden. Zur Verhinderung akuter Schädigungen sollten kurzzeitig nicht höhere Konzentrationen als ca. $100 \mu\text{g NO}_2/\text{m}^3$ auftreten.

Auch materialschädigende Wirkungen von Stickoxiden sind bekannt. Stickoxide greifen insbesondere natürliche und synthetische Polymere an, wobei die Farbstabilität sowie das mechanische Verhalten negativ beeinflusst werden.

Stickoxide tragen wie Schwefeldioxid zur Versauerung der Niederschläge bei. Einige Wirkungen der sauren Niederschläge sind im Kapitel 51 beschrieben.

Die aus den Stickoxiden gebildeten Nitrite und Nitrate wirken aber auch als Dünger. Diese Düngung ist in vielen Fällen nicht unproblematisch. So werden vor allem nährstoffarme, naturnahe Biotope durch diese Düngung gestört, aber auch in Wäldern kann es als Folge des erhöhten Stickstoffeintrages zu Ungleichgewichten bei der Nährstoffversorgung kommen.

Stickstoffdioxid gehört zusammen mit reaktiven Kohlenwasserstoffen zu den wichtigen Vorläufersubstanzen für die Photooxidantienbildung. Die mengenmässig wichtigste Komponente der Photooxidantien ist Ozon (O_3). Daneben werden weitere aggressive Stoffe wie zum Beispiel Peroxyacetylnitrat (PAN) und seine Homologen, H_2O_2 und andere Peroxide sowie Aldehyde und Säuren gebildet.

Immissionsgrenzwerte für NO₂

Statistische Definition	Zahlenwert	Land/Fachorganisation
Jahresmittelwert	30 µg/m ³	WHO (28)
	30 µg/m ³	Schweiz (5)
	50 µg/m ³	Sachverständigenanhörung, Berlin (29)
		(UBA)
	60 µg/m ³	Kanada (4)
	80 µg/m ³	BRD (13)
	100 µg/m ³	Kanada (10)
	100 µg/m ³	USA (30)
50%-Wert aller 1h-Mittelwerte eines Jahres	50 µg/m ³	EG (31)
50%-Wert aller Tages- oder 1h-Mittelwerte eines Jahres	50 µg/m ³	Niederlande (16)
95%-Wert aller Tagesmittelwerte eines Jahres	100 µg/m ³	Niederlande (16)
98%-Wert aller Tagesmittelwerte eines Jahres	120 µg/m ³	Niederlande (16)
	150 µg/m ³	Finnland (6)
Tagesmittelwert	74-112 µg/m ³	Japan (32)
	80 µg/m ³	Schweiz (5)
	100 µg/m ³	VDI (33)
	150 µg/m ³	Niederlande (34)
	200 µg/m ³	Kanada (10)
95%-Wert aller 1/2h-Mittelwerte eines Jahres	100 µg/m ³	Schweiz (5)
95%-Wert aller 1h-Mittelwerte eines Jahres	110 µg/m ³	Niederlande (16)
98%-Wert aller 1h-Mittelwerte eines Jahres	135 µg/m ³	EG (31)
	135 µg/m ³	Niederlande (16)
	200 µg/m ³	EG (17)
98%-Wert aller 1/2h-Mittelwerte	200 µg/m ³	BRD (13)

Immissionsgrenzwerte für NO₂ (Fortsetzung)

Statistische Definition	Zahlenwert	Land/Fachorganisation
99%-Wert aller 1h-Mittelwerte eines Jahres	300 µg/m ³	Finnland (6)
4h-Mittelwert	95 µg/m ³	WHO (28)
	95 µg/m ³	Niederlande (15)
1h-Mittelwert	190-320 µg/m ³	WHO (35)
	300 µg/m ³	Niederlande (34)
	400 µg/m ³	Kanada (10)
1/2h-Mittelwert	200 µg/m ³	VDI (33)

Bemerkungen

- (1) International Union of Forest Research Organizations: Immissionsgrenzwert zur Aufrechterhaltung der Schutz- und Sozialfunktionen des Waldes auf kritischen oder extremen Standorten (z.B. Erosions- und Lawinenschutz in höheren Lagen). Der 97,5%-Wert ist aus den 1/2h-Werten der Vegetationszeit zu ermitteln.
- (2) "Long term goal" zum Schutze von Wäldern, Landwirtschaftszonen, Naturreservaten.
- (3) Weltgesundheitsorganisation, Regionalbüro für Europa: Empfehlung einer Expertengruppe insbesondere zum Schutze der Vegetation. Der angegebene Grenzwert wird von den WHO-Experten im Falle extremer Umweltbedingungen und/oder gleichzeitiger Anwesenheit anderer Luftschadstoffe als u.U. zuwenig streng erachtet.
- (4) "Maximum desirable level".
- (5) Immissionsgrenzwerte in der Luftreinhalte-Verordnung (LRV), festgelegt nach den gesetzlichen Kriterien (Umweltschutzgesetz): Schutz von Menschen, Tieren, Pflanzen sowie von Risikogruppen. Berücksichtigung von Kombinationswirkungen mit andern Luftschadstoffen.
Für weitere Angaben zur statistischen Definition siehe Kapitel 6 des vorliegenden Berichts.
- (6) "Air Quality Standard" zum Schutze der menschlichen Gesundheit.
- (7) Weltgesundheitsorganisation, Genf: Environmental Health Criteria. Richtlinie zum Schutze der menschlichen Gesundheit. Kombinationswirkungen mit Staub berücksichtigt.
- (8) International Union of Forest Research Organizations: Immissionsgrenzwert zum Schutze der vollen Leistungsfähigkeit des Waldes auf den meisten Standorten (vgl. Bemerkung 1). Bezogen auf die Empfindlichkeit der Fichte.
Der 97,5%-Wert ist aus den 1/2h-Werten der Vegetationszeit zu ermitteln.
- (9) "Guideline Concentration for Air Quality Assessment".
- (10) "Maximum acceptable level".
- (11) Administratives Ziel für Agglomerationsgebiete.

- (12) "National primary ambient air quality standard". Der "primary standard" soll, unter Berücksichtigung eines angemessenen Sicherheitsabstandes, den Schutz der menschlichen Gesundheit gewährleisten.
- (13) Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA-Luft): Immissionswert zur Beurteilung des Einwirkungsbereiches von genehmigungspflichtigen Anlagen. Der Beurteilungszeitraum beträgt in der Regel ein Jahr.
- (14) Nicht zu überschreitender Halbjahresmittelwert (Oktober bis März, April bis September) zum Schutze der menschlichen Gesundheit.
- (15) "Target value to protect plants and/or livestock".
- (16) Interimgrenzwert zum Schutze der menschlichen Gesundheit.
- (17) Rat der Europäischen Gemeinschaften: Grenzwert zum Schutze der menschlichen Gesundheit.
- (18) Empfohlener Grenzwert zum Schutze der menschlichen Gesundheit.
- (19) International Union of Forest Research Organizations: Immissionsgrenzwert zur Aufrechterhaltung der Schutz- und Sozialfunktionen des Waldes auf kritischen oder extremen Standorten (z.B. Erosions- und Lawinenschutz in höheren Lagen). Darf 12 mal pro Halbjahr überschritten werden.
- (20) Zweite Verordnung gegen forstschädliche Luftverunreinigungen: Höchstwert für die Monate April bis Oktober, bezogen auf die Empfindlichkeit der Fichte.
- (21) International Union of Forest Research Organizations: Immissionsgrenzwert zum Schutze der vollen Leistungsfähigkeit des Waldes auf den meisten Standorten (vgl. Bemerkung 19), bezogen auf die Empfindlichkeit der Fichte. Darf 12 mal pro Halbjahr überschritten werden.
- (22) Zweite Verordnung gegen forstschädliche Luftverunreinigungen: Höchstwert für die Monate November bis März, bezogen auf die Empfindlichkeit der Fichte.
- (23) Zweite Verordnung gegen forstliche Luftverunreinigungen: Höchstwerte für die Monate April bis Oktober für Waldbestände mit weniger als 5% Nadelbaumarten, bezogen auf die Empfindlichkeit der Buche.
- (24) "Ambient Air Quality Standard. Value not to exceed".
- (25) Höchstwert zum Schutze der menschlichen Gesundheit.
- (26) Masszahl zur Berechnung von Kaminhöhen.

- (27) Verein deutscher Ingenieure: Maximale Immissionskonzentration zum Schutze der menschlichen Gesundheit. Auf einmalige Exposition abgestellt. Kombination mit Schwebestaub berücksichtigt.
- (28) Weltgesundheitsorganisation, Regionalbüro für Europa: Empfehlung einer Expertengruppe insbesondere zum Schutze der Vegetation. Gilt in Kombination mit SO₂ (30 µg/m³ im Jahresmittel) sowie mit O₃ (60 µg/m³ im Mittel während der Vegetationsperiode).
- (29) Sachverständigenanhörung des Bundesministers des Innern, Berlin: Grenzwertvorschlag für Stickstoffdioxid zum Schutze der Bevölkerung vor möglichen NO₂-bedingten Gesundheitsschäden.
- (30) "National primary and secondary ambient air quality standard". Der "primary standard" soll, unter Berücksichtigung eines angemessenen Sicherheitsabstandes, den Schutz der menschlichen Gesundheit gewährleisten. Der "secondary standard" hat die Erhaltung der öffentlichen Wohlfahrt zum Ziel, also insbesondere den Schutz der menschlichen Umwelt.
- (31) Rat der Europäischen Gemeinschaften: Leitwert zum Schutz insbesondere der menschlichen Gesundheit sowie als Beitrag zu einem langfristigen Schutz der Umwelt.
- (32) "Ambient Air Quality Standard". Der Tagesmittelwert muss innerhalb oder unterhalb des angegebenen Bereichs liegen.
- (33) Verein deutscher Ingenieure: Maximale Immissionskonzentration zum Schutze des Menschen. Der Wert soll nicht mehr als einmal pro Monat überschritten werden. Kombinationswirkungen mit SO₂ und Schwebestaub berücksichtigt.
- (34) "Emergency level" (Alarmwert).
- (35) Weltgesundheitsorganisation, Genf: Environmental Health Criteria. Richtlinie zum Schutze der menschlichen Gesundheit. Beinhaltet einen minimalen Sicherheitsfaktor von 3 bis 5. Größere Sicherheitsfaktoren werden als notwendig erachtet zum Schutze von Risikogruppen und bei gleichzeitiger Anwesenheit weiterer Luftschadstoffe.
- (36) Verein deutscher Ingenieure: Maximale Immissionskonzentration zum Schutze der menschlichen Gesundheit (Richtlinie vom September 1974).

- (37) Weltgesundheitsorganisation, Regionalbüro für Europa: Empfehlung einer Expertengruppe insbesondere zum Schutze der Vegetation. Gilt in Kombination mit SO₂ (30 µg/m³ im Jahresmittel) sowie mit NO₂ (30 µg/m³ im Jahresmittel und 95 µg/m³ als maximaler 4h-Mittelwert).
- (38) Umweltbundesamt Berlin: Luftqualitätskriterien für photochemische Oxidantien. Ozon-Höchstkonzentrationen zum Schutze empfindlicher Pflanzen gegen Ozon als Einzelkomponente.
- (39) Umweltbundesamt Berlin: Luftqualitätskriterien für photochemische Oxidantien. Ozon-Höchstkonzentrationen zum Schutze mittelempfindlicher Pflanzen gegen Ozon als Einzelkomponente.
- (40) "Ambient Air Quality Standard" für Gesamtoxidantien. Darf nicht überschritten werden.
- (41) Weltgesundheitsorganisation, Genf: Environmental Health Criteria. Richtlinie für Photooxidantien insgesamt zum Schutze der menschlichen Gesundheit. Soll höchstens einmal pro Monat überschritten werden.
- (42) Weltgesundheitsorganisation, Genf: Environmental Health Criteria. Richtlinie für Ozon zum Schutze der menschlichen Gesundheit. Beinhaltet keinen Sicherheitsfaktor.
- (43) Weltgesundheitsorganisation, Regionalbüro für Europa: Empfehlung einer Expertengruppe insbesondere zum Schutze der Vegetation.
- (44) Verein deutscher Ingenieure: Maximale Immissionskonzentration zum Schutze der menschlichen Gesundheit (Richtlinien-Entwurf vom März 1986).
- (45) Weltgesundheitsorganisation, Genf: Environmental Health Criteria. Richtlinie zum Schutze der menschlichen Gesundheit.