



Dokumentation

Wirkung einzelner Regulierungen in der Umweltpolitik
Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW), Blei in Kraftstoffen und
Schwefeloxidemissionen aus Kraftwerken

Wirkung einzelner Regulierungen in der Umweltpolitik
Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW), Blei in Kraftstoffen und
Schwefeloxidemissionen aus Kraftwerken

Aktenzeichen: WD 8 - 3000 - 045/23
Abschluss der Arbeit: 18. August 2023
Fachbereich: WD 8: Umwelt, Naturschutz, Reaktorsicherheit, Bildung
und Forschung

Die Wissenschaftlichen Dienste des Deutschen Bundestages unterstützen die Mitglieder des Deutschen Bundestages bei ihrer mandatsbezogenen Tätigkeit. Ihre Arbeiten geben nicht die Auffassung des Deutschen Bundestages, eines seiner Organe oder der Bundestagsverwaltung wieder. Vielmehr liegen sie in der fachlichen Verantwortung der Verfasserinnen und Verfasser sowie der Fachbereichsleitung. Arbeiten der Wissenschaftlichen Dienste geben nur den zum Zeitpunkt der Erstellung des Textes aktuellen Stand wieder und stellen eine individuelle Auftragsarbeit für einen Abgeordneten des Bundestages dar. Die Arbeiten können der Geheimschutzordnung des Bundestages unterliegende, geschützte oder andere nicht zur Veröffentlichung geeignete Informationen enthalten. Eine beabsichtigte Weitergabe oder Veröffentlichung ist vorab dem jeweiligen Fachbereich anzuzeigen und nur mit Angabe der Quelle zulässig. Der Fachbereich berät über die dabei zu berücksichtigenden Fragen.

Inhaltsverzeichnis

1.	Fragestellung und einführende Bemerkungen	4
2.	Begrenzung des Bleigehaltes in Kraftstoffen	5
3.	Regulierung von Fluorchlorkohlenwasserstoffen (FCKW)	8
4.	Entschwefelung von Kraftwerken	11

1. Fragestellung und einführende Bemerkungen

Ausgangspunkt der vorliegenden Dokumentation ist die Frage, inwieweit ein gesellschaftlicher Konsens die Wirksamkeit von Regulierung in der Umweltpolitik beeinflusst. Diese Fragestellung soll an den konkreten Beispielen des Verbots von bleihaltigen Klopfmitteln in Pkw-Kraftstoffen, an der Beschränkung von Fluorchlorkohlenwasserstoffen (FCKW) und auch an der Begrenzung von Schwefeloxidemissionen aus Kraftwerken (nicht näher definierter Leistung und Art) nachgegangen werden.

Zur Annäherung an die Thematik werden nachfolgend Literaturhinweise zusammengestellt. Aus den übermittelten Informationen kristallisiert sich heraus, dass die Regulierung in den genannten Themenbereichen kein einmaliges regulatorisches Ereignis war. Vielmehr handelte es sich in allen drei genannten Bereichen um sukzessiv politisch-gesetzgeberische Prozesse auf nationaler, EU- und internationaler Ebene, die der Rechtsnatur entsprechend auch aufeinander einwirkten. Einen Fixpunkt, ab dem die Wirkung eines „Verbotes“ untersucht werden könnte, gibt es aufgrund dieser kontinuierlichen Genese nicht. Weiterhin gab es in allen drei Fällen keine Stoffverbote im engen Sinn, sondern Mengen- und Anwendungsbegrenzungen, z. B. Grenzwerte bzw. Auflagen zum Betrieb von Anlagen (Schwefeldioxidemissionen aus Großfeuerungsanlagen).

Zur Frage der öffentlichen Meinung in Bezug auf oben genannte Umweltprobleme ist zunächst ganz generell vorzuschicken: Seit den 1960er Jahren werden Umweltprobleme in der Bevölkerung hierzulande vermehrt bewusst wahrgenommen und öffentlich diskutiert. Standen anfänglich die Verschmutzung von Luft und Wasser sowie die Zerstörung von Naturräumen im Fokus, so nahm bald die Auseinandersetzung mit der Atomenergie einen zentralen Stellenwert ein. Gegenwärtig ist der Klimawandel eine der wichtigsten Fragen der umweltpolitischen Debatten in der Öffentlichkeit.

Zur Frage des Meinungsbildes zu Blei in Kraftstoffen, FCKW und Schwefeloxidemissionen aus Feuerungsanlagen - jeweils über die langen Zeiträume der sich verändernden Regulierung - konnte keine einschlägig relevante Literatur ausgemacht werden.¹ Weiterhin konnten im Rahmen der Erstellung dieser Dokumentation keine wissenschaftlichen Arbeiten gefunden werden, die einen Zusammenhang zwischen dem gesellschaftlichen Konsens und der Effektivität der Gesetzgebung postulieren oder gar untersuchen.

Es sei an dieser Stelle erwähnt, dass die Adressaten der Regulierung in keinem der drei genannten Themenbereiche die Bürgerinnen und Bürger selbst waren und sind. Vielmehr ist die Begrenzung des Bleigehaltes in Kraftstoffen von den Raffinerien, letztlich der Mineralölwirtschaft, umzusetzen. Die Regulierung von FCKW bewerkstelligt die Kältemittelindustrie. Die Rauchgasentschwefelung von Kraftwerken unterschiedlicher Leistung, Bauart und Größe erfolgt von Seiten der Kraftwerksbetreiber und Anlagenbauer.

Obwohl die originäre Fragestellung sich nicht in der gewünschten Form beantworten lässt, werden im Folgenden zur Frage der Wirkung der sukzessiven Regulierungen weiterführende Informationen zusammengestellt.

1 Fachrecherche im Internet und Recherche in der Bibliothek des Deutschen Bundestages.

2. Begrenzung des Bleigehaltes in Kraftstoffen

Das Benzinbleigesetz vom 5. August 1971² begrenzte erstmals hierzulande den Gehalt in Blei in Benzin und war damit der Auftakt der Regulierung von Zusätzen auf Basis des Schwermetalls (vornehmlich: Tetraethylblei) in Kraftstoffen. Neben der Gesundheitsgefährdung, die von dem Schwermetall ausgeht, war die Entwicklung der Autokatalysatoren maßgeblich, deren Wirksamkeit durch Blei herabgesetzt wird.

Ab 1984 wurde bleifreies Benzin an Tankstellen in Deutschland angeboten, zunächst neben verbleiten Kraftstoffen. 1988 folgte das Verbot von verbleitem Normalbenzin. In verschiedenen anderen Treibstoffsorten wurde Blei schließlich über die EU-Kraftstoffqualitätsrichtlinie 98/70/EG³ zum 1. Januar 2000 auf 5 Milligramm je Liter begrenzt (vgl. Anhang I zur Richtlinie 98/70/EG).

Oft wird zwar von „bleifreiem Benzin“ gesprochen. Da die Rechtsvorschriften Grenzwerte für Blei festlegen, handelt es sich jedoch genau genommen bei kommerziellen Kraftstoffen für Pkw um bleiarmer Kraftstoffe. Dem entsprechend ist der Straßenverkehr aufgrund seines hohen Aufkommens weiterhin eine Quelle für Bleiemissionen. Zu berücksichtigen ist in diesem Zusammenhang auch, dass Reifen und Bremsbeläge ebenfalls bleihaltige Bestandteile in Form von Partikeln emittieren.⁴

Detaillierte Rechnungen der Bleiemissionen aus Reifen, Bremsbelägen und dem Straßenverkehr finden sich in einer Publikation des Umweltbundesamtes (UBA) aus dem Jahr 2005. Diese ist abrufbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/2936.pdf> (Seite 60 ff.).

Einen fachkundigen Überblick zur Verbreitung des bleihaltigen Klopfmittels Tetraethylblei in Kraftstoffen und zu seiner Beschränkung gibt der Chemiker Dietmar Seyfarth in einem zweiteiligen englischsprachigen Fachaufsatz aus dem Jahr 2003 mit dem Titel „The rise and fall of tetraethyllead“, abrufbar unter: <https://pubs.acs.org/doi/epdf/10.1021/om030245v>, sowie <https://pubs.acs.org/doi/epdf/10.1021/om030621b>.

Nach Inkrafttreten des Benzinbleigesetzes befassten sich einige Fachaufsätze mit der Frage der ökonomischen Folgen der Regulierung des Bleigehalts in Kraftstoffen. Exemplarisch hierfür sei die Doktorarbeit „Effizienzkontrolle von Umweltpolitik – Eine integrierte ökonomisch-ökologische Analyse am Beispiel des Benzinbleigesetzes“ des Volkswirtes Bernhard Schulz aus dem Jahr 1983 vorgestellt: Die Doktorarbeit untersucht ausnahmslos die ökologische und ökonomische Effizienz des Benzinbleigesetzes (nicht nachfolgender Regulierungen) nach definierter Methodik.

2 Gesetz zur Verminderung von Luftverunreinigungen durch Bleiverbindungen in Ottokraftstoffen für Kraftfahrzeugmotore (Benzinbleigesetz - BzBlG) vom 5.8.1971 (BGBl. I S. 1234), das zuletzt durch Artikel 102 der Verordnung vom 19.6.2020 (BGBl. I S. 1328) geändert worden ist, <https://www.gesetze-im-internet.de/bzblg/BJNR012340971.html>.

3 Richtlinie 98/70/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13.10.1998 über die Qualität von Otto- und Dieseldieselkraftstoffen und zur Änderung der Richtlinie 93/12/EG des Rates (ABl. L 350 vom 28.12.1998, S. 58), <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CONSLEG:1998L0070:20090625:DE:PDF>.

4 UBA (2022), Blei im Feinstaub, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschadstoffe-im-ueberblick/metalle-im-feinstaub/blei-im-feinstaub#belastung-der-luft>.

Wie eingangs bereits ausgeführt, wurde der Bleigehalt in Ottokraftstoffen lediglich limitiert - und zwar ab 1972 auf 0,4 Gramm je Liter und ab 1976 auf 0,15 Gramm je Liter. Der Autor stellt fest, dass sich die Bleiemissionen in die Luft dem Umweltbundesamt zufolge reduzierten. Die kumulierten Emissionen sanken jedoch keineswegs kontinuierlich, da das Verkehrsaufkommen insgesamt zunahm. Dieser heute als „Reboundeffekt“ beschriebene Zusammenhang ist ein häufiges Phänomen der Wirkung von Umweltpolitik: Mehr Konsum macht Fortschritte infolge von Regulierung wieder partiell oder ganz zu Nichte.

Hinsichtlich der ökonomischen Indikatoren kommt Schulz zu dem Schluss, dass keinerlei erhebliche Wirkungen vom Benzinbleigesetz ausgingen. Das Preisniveau für Ottokraftstoffe änderte sich praktisch nicht; die Preise gaben sogar etwas nach, da andere Faktoren weitaus maßgeblicher auf die Preisbildung einwirkten. Von den Investitionen in Höhe von 250 bis 500 Millionen Deutsche Mark, die die Mineralölindustrie infolge des Benzin-Blei-Gesetzes tätigte, ging dem Autor zufolge keine gesamtwirtschaftliche Wirkung in eine positive oder negative Richtung aus. Er beurteilt das Gesetz als „Musterfall einer geglückten umweltpolitischen Maßnahme“.

Als Randnotiz referiert er in seiner Dissertationsschrift eine nicht-repräsentative Befragung unter 331 Studierenden der Universität Frankfurt am Main. 62,2 Prozent der Befragten ist das Benzinbleigesetz bekannt. Nur 2,8 Prozent halten es jedoch für sehr effizient, je ein Viertel für „effizient“, ein weiteres Drittel für „kaum effizient“. Schulz deutet das als Ausdruck des Wunsches nach schärferer Regulierung seinerzeit: Umweltpolitische Maßnahmen sollten schneller und messbare Effekte zugunsten des Schutzes der Umwelt zeigen.

Bernhard Schulz (1983): Effizienzkontrolle von Umweltpolitik – Eine integrierte ökonomisch-ökologische Analyse am Beispiel des Benzinbleigesetzes. Haag und Herchen, Frankfurt am Main.

Aufgrund des Benzinbleigesetzes und nachfolgender Regulierungsbemühungen sanken die Emissionen von Blei in die Luft in Deutschland von 1985 bis 1995 um bis zu 65 Prozent. Parallel zum Rückgang des Verbrauchs an bleihaltigem Benzin nahm die Bleikonzentration in menschlichen Proben (Blut und Urin) und in Umweltproben im Rahmen des Humanbiomonitorings⁵ nach und nach ab. In den letzten Jahren ist jedoch keine weitere Abnahme zu beobachten. Hauptaufnahmepfad für den Menschen war und ist die Nahrung und das Trinkwasser, die wiederum über Umweltmedien mit dem Schwermetall kontaminiert werden.

Es sei angemerkt: Im Meer und im Süßwasserhaushalt nahm die Bleibelastung nicht nachweisbar ab. Dies hängt mit der Langlebigkeit des Schadstoffs zusammen und dem Umstand, dass das Umweltmedium Wasser eine der letzten Stationen des Transports von Blei innerhalb der Biosphäre darstellt.⁶

5 Das Humanbiomonitoring ist ein Instrument der gesundheitsbezogenen Umweltbeobachtung, mit dem Bevölkerungsgruppen auf ihre Belastung mit Schadstoffen aus der Umwelt untersucht werden.

6 Umweltprobenbank des Bundes, Benzinbleigesetz: Wie ein Gesetz die Schadstoffbelastung von Mensch und weiten Teilen der Umwelt verringert, https://www.umweltprobenbank.de/de/documents/selected_results/12198.

Einen ähnlichen Erfolg der Bleiregulierung in Kraftstoffen beschreibt der Bericht der Europäischen Kommission vom 31. Mai 2017 an das Europäische Parlament und den Rat nach Artikel 9 der Richtlinie 98/70/EG über die Qualität von Otto- und Dieselmotorkraftstoffen: Im Zeitraum 1995 bis 2013 sanken die Emissionen von Blei im Straßenverkehr der EU um 98 Prozent.⁷

Das Verbot von Blei in Kraftstoffen weitete sich in den letzten Jahren sukzessive auf andere Länder aus, hatte also internationalen Vorbildcharakter. 2021 ist nach Informationen von Spiegel Online in Algerien als einer der letzten Nationen weltweit eine Begrenzung für Blei im Benzin wirksam geworden.⁸

Generell ist Blei global betrachtet nach einhelliger Auffassung von Toxikologen und Toxikologinnen weiterhin einer der relevanten Umwelt- und Humanschadstoffe mit nachteiligen Auswirkungen insbesondere auf die Gesundheit von Kindern. Hierzu liegt ein umfassender Korpus an Studien und Fachliteratur vor, sodass Blei als einer der meist untersuchten Fremdstoffe angesehen werden kann. Exemplarisch hierzu folgende Literaturhinweise:

UNICEF (2020), The Toxic Truth: Children's Exposure to Lead Pollution Undermines a Generation of Future Potential, <https://www.unicef.org/media/73246/file/The-toxic-truth-children%E2%80%99s-exposure-to-lead-pollution-2020.pdf>.

Schwaba/Bleidorn/Hopwood/Gosling (2021), The impact of childhood lead exposure on adult personality: Evidence from the United States, Europe, and a large-scale natural experiment, <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.2020104118>.

Wani/Ara/Usmani (2015), Lead toxicity: a review, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4961898/>.

Die Exposition insbesondere von Kindern mit Blei wird in den USA und ebenso in Europa, so auch in Deutschland, nach wie vor als zu hoch angesehen, um negative gesundheitliche Folgen, insbesondere neurologische Effekte, ausschließen zu können. Hierauf weist beispielsweise die folgende Publikation hin:

McFarland/Hauer/Reuben (2022), Half of US population exposed to adverse lead levels in early childhood, <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.2118631119>.

Weiterführende Informationen und Veröffentlichungen zu Blei sind dem Internetauftritt des Bundesinstituts für Risikobewertung (BfR) zu entnehmen: <https://www.bfr.bund.de/de/a-z-index/blei-5227.html>.

7 Bericht der Kommission an das Europäische Parlament und den Rat nach Artikel 9 der Richtlinie 98/70/EG über die Qualität von Otto- und Dieselmotorkraftstoffen, COM(2017) 284 final, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52017DC0284&from=LV>.

8 Verbleites Benzin am Ende - letzter Tropfen vertankt, In: Spiegel Online vom 31.8.2021, <https://www.spiegel.de/auto/benzin-tankstellen-weltweit-verkaufen-kein-verbleites-benzin-mehr-a-34a74426-a1a7-4d32-83c8-bc16d10d3f2b>.

3. Regulierung von Fluorchlorkohlenwasserstoffen (FCKW)

Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) zerstören in der Stratosphäre Ozon und lassen darüber verstärkt die schädliche UV-Strahlung der Sonne zur Erdoberfläche gelangen. Überdies sind FCKW im unteren Stockwerk der Atmosphäre, der Troposphäre, bedeutsame Treibhausgase, die zur anthropogenen Erderwärmung beitragen.

Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler beschrieben in den siebziger Jahren die wissenschaftlichen Zusammenhänge der Zerstörung der atmosphärischen Ozonschicht durch anthropogene FCKW-Emissionen, woraufhin die Forschung gezielt unterstützt wurde und parallel dazu eine politische Debatte über die Chemikalien und deren Folgewirkungen einsetzte. Einen Überblick zur Chronologie der Maßnahmen gibt der Internetauftritt des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz: BMUV, Montrealer Protokoll: Chronologie der Maßnahmen, <https://www.bmu.de/themen/luft-laerm-mobilitaet/luft/ozonschicht-ozonloch/montrealer-protokoll-chronologie-der-massnahmen>.

Im Jahr 1987 verpflichteten sich 24 Länder und die Europäische Union im Protokoll von Montreal⁹, die Produktion von FCKW bis 1999 zu halbieren. Mittlerweile sind dem Montrealer Protokoll alle 198 UN-Staaten beigetreten. Die Vertragsstaaten kamen in dem internationalen Übereinkommen überein, Produktion und Verbrauch von acht wichtigen FCKW und Halonen schrittweise bis zum Jahr 1999 auf die Hälfte der Mengen von 1986 zu reduzieren. Nachfolgend wurde diese Vorgabe verschärft. Die Vertragsstaaten des Übereinkommens vom 29. Juni 1990 verständigten sich darauf, die Produktion von bestimmten FCKW binnen zehn Jahren komplett einzustellen.

Deutschland hat im Zuge der Debatten als eines der ersten Länder mit der FCKW-Halon-Verbots-Verordnung¹⁰ weltweit eine weitergehende nationale Regulierung zu Fluorchlorkohlenwasserstoffen auf den Weg gebracht. Sie beinhaltet eine schrittweise Einschränkung der Verwendung und Herstellung der Substanzen bis spätestens 1995. Zum damaligen Zeitpunkt wurden FCKW als Treibgas in Sprühdosen und zum Herstellen von Schäumen benutzt. Sie waren als Kühlmittel in Kühl- und Gefriergeräten sowie Klimaanlageen enthalten, dienten aber auch als Reinigungs- und Prozessmittel für Textilien und in der Elektronikindustrie.

Auf EU-Ebene erfolgte parallel dazu eine erste Gesetzgebung. Die Reduktionsbemühungen mündeten 2006 schließlich in die EU-Verordnung und Richtlinie zur Minderung der Emission fluorierter Treibhausgase in Kälte und Klimaanlageen und weiteren Anwendungen (Nr. 842/2006 und

9 Montrealer Protokoll über Stoffe, die zu einem Abbau der Ozonschicht führen, Amtsblatt Nr. L 297 vom 31/10/1988 S. 0021 – 0028, [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:21988A1031\(02\)](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:21988A1031(02)).

10 Verordnung zum Verbot von bestimmten die Ozonschicht abbauenden Halogenkohlenwasserstoffen (FCKW-Halon-Verbots-Verordnung) vom 6.5.1991 (BGBl. I S. 1090), zuletzt geändert durch § 9 Chemikalien-OzonschichtVO vom 13.11.2006 (BGBl. I S. 2638), https://beck-online.beck.de/Dokument?vpath=bib-data%2Fges%2Ffckw_vo%2Fcont%2Ffckw_vo.htm&anchor=Y-100-G-FCKW_VO.

2006/40). Die Chemikalien-Ozonschichtverordnung der EU wurde mit einer gleichnamigen Verordnung in deutsches Recht umgesetzt¹¹ und löste die FCKW-Halon-Verbots-Verordnung ab.

Als weiterer Meilenstein trat 2014 die neue F-Gase-Verordnung der EU (Nr. 517/2014)¹² mit weiteren Verboten und der schrittweisen Mengenbeschränkung von teilfluorierten Kohlenwasserstoffen (HFKW) in Kraft. HFKW schädigen nicht die Ozonschicht, tragen aber zur Erderwärmung bei.

Im Zuge der Gesetzgebung zu FCKW dominierte in der Diskussion die Frage ökonomischer Aspekte und des Weiteren die Frage, welche Ersatzstoffe je nach Kälteanlage und Anwendung geeignet sein könnten. Oft ging es dabei um teilhalogenierte F-Gase mit geringerem Ozonabbaupotenzial, was Fachleute mitunter kritisieren, da auch diese Alternativen atmosphärenschaädlich sind und zur Erderwärmung beitragen. Auch das Recycling von Altgeräten wurde erörtert. Das gesellschaftliche Meinungsbild im Verhältnis zur Wirkung der rechtlichen Bestimmungen war - sofern ersichtlich - dagegen kein Thema in der Fachliteratur. Exemplarisch hierfür:

Forschungszentrum für Kältetechnik und Wärmepumpen GmbH (1998). Statusbericht. Ersatz der FCKW R11, R13, R503, R13B1, R113, R114 und R12B1 in bestehenden Kälte-, Klima- und Wärmepumpenanlagen in der Bundesrepublik Deutschland durch Kältemittel mit geringem Ozonabbaupotential. Forschungsbericht 206 01 049. UBA-Texte 59/98.

Die Einhaltung der Regulierung von FCKW wird über ein weltweites Netz an Luftmessstationen überwacht. Dazu gehört etwa das Messnetz der National Oceanographic and Atmospheric Administration (NOAA) und das der Advanced Global Atmospheric Gases Experiment (AGAGE). Sie detektieren die atmosphärischen Gehalte der jeweiligen Substanzen und ihrer Abbauprodukte. Insgesamt gehen die Gehalte der ozonschädigenden Substanzen langsam zurück, was als Erfolg des Montrealer Protokolls und damit der internationalen Regulierung gewertet wird.¹³

Aus den Messdaten geht etwa hervor, dass die Konzentration des FCKW CFC-11 von 1977 bis 1994 drastisch anstieg. Seither und bis 2020 sinkt sie und hat gegenwärtig ein Niveau erreicht, wie es in der zweiten Hälfte der achtziger Jahre vorherrschte. Weit weniger deutlich ist der Rückgang indes beim FCKW CFC-12. Die Konzentration in der Atmosphäre sinkt seit Anfang des Jahrtausends leicht und liegt derzeit auf dem Niveau, das Mitte der neunziger Jahre detektiert wurde.

-
- 11 Verordnung über Stoffe, die die Ozonschicht schädigen (Chemikalien-Ozonschichtverordnung - ChemOzon-SchichtV) in der Fassung der Bekanntmachung vom 15.2.2012 (BGBl. I S. 409), die zuletzt durch Artikel 298 der Verordnung vom 19.6.2020 (BGBl. I S. 1328) geändert worden ist, <https://www.gesetze-im-internet.de/chemozonschichtv/BJNR263800006.html>.
 - 12 Verordnung (EU) Nr. 517/2014 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16.4.2014 über fluorierte Treibhausgase und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 842/2006, ABl. L 150/195 vom 20.5.2014, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014R0517>.
 - 13 Zu den Erfolgen des Montrealer Protokolls in Zahlen: UBA (2017), 1987–2017: 30 Jahre Montrealer Protokoll - Vom Ausstieg aus den FCKW zum Ausstieg aus teilfluorierten Kohlenwasserstoffen, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/1987_-_2017_30_jahre_montrealer_protokoll_bf.pdf, Seite 20 ff.

Der atmosphärisch bessere Zustand der sechziger und siebziger Jahre ist im Hinblick auf beide FCKW damit noch nicht erreicht.¹⁴

Mit abnehmenden FCKW-Gehalten in der Atmosphäre konnte ab etwa 2012 ein sich verkleinerndes Ozonloch über der Antarktis gemessen werden. Aufgrund der Wechselwirkung zwischen Klimawandel und FCKW-Restkonzentrationen in der Atmosphäre kann es jedoch zum Auftreten neuer Ozonlöcher kommen.¹⁵

Im Zuge dieses FCKW-Monitorings fiel ab 2012 ein Anstieg verbotener FCKW in der Atmosphäre auf, darunter Trichlorfluormethan. Dies führten Chemikerinnen und -chemiker auf die illegale Herstellung des Kältemittels zurück. Obwohl es über die Daten der Luftmessstationen nicht direkt möglich ist, auf den Urheber zu schließen, wurde aus den aggregierten Daten der Überwachungsstellen und den Strömungsverhältnissen ein Ursprung in China vermutet. Nach Bekanntwerden des Verdachtes gingen die Gehalte verbotener FCKW 2018 wieder zurück.¹⁶

Der Handel mit verbotenen F-Gasen beschäftigt verschiedene Kontrollinstitutionen, etwa die Zollbehörden, und stellt ein massives Umweltproblem dar.¹⁷ Deutlich wird, dass die Vielzahl von Akteuren und Händlern der Kälteindustrie die Überwachung von Kältemitteln, die in Klimaanlage bis zu Kälteanlagen verschiedenster Bauart und Verwendung landen, erschweren. Dies stellt einen Unterschied zur Kontrolle des Bleigehaltes in Kraftstoffen dar: die Mineralölwirtschaft ist in oligopolartigen Strukturen organisiert.

Dem zuständigen Sekretariat des Montrealer Protokolls zufolge gibt es aus der wissenschaftlichen Forschung seit 2000 Hinweise auf eine sich erholende Ozonschicht über der Antarktis. Das Loch nehme in der Größe und Tiefe ab, obwohl es beträchtliche jährliche Schwankungen gebe. Außerhalb der Antarktisregion gebe es nur begrenzte Evidenz für die Erholung der Ozonschicht in der Stratosphäre. Zwar würden Zunahmen in der oberen Ozonschicht gemessen, aber auch Abnahmen in den unteren Schichten in den tropischen Regionen. Das Sekretariat erwartet, dass sich das Ozonloch über der Antarktis bei einer Fortschreibung des Trends 2066 schließen würde.¹⁸

-
- 14 Hamburger Bildungsserver, Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) als Treibhausgase, <https://bildungsserver.hamburg.de/themenschwerpunkte/klimawandel-und-klimafolgen/klimawandel/treibhausgase/fckw-treibhausgase-artikel-253344>.
 - 15 Weiterführend: Knauer, Es bleibt ein Loch ohne Boden, In: Spektrum.de vom 29.6.2015, <https://www.spektrum.de/news/25-jahre-fckw-verbot-wie-steht-es-um-das-ozonloch/1352353>.
 - 16 Palmer, Die FCKW-Detektive, In: Spektrum.de vom 25.1.2020, <https://www.spektrum.de/news/ozonloch-wie-forscher-illegale-chinesische-fckw-emissionen-entdeckten/1701112>. Siehe auch van den Heuvel, Weniger illegale FCKW-Emissionen - aber es gibt ein anderes Problem, In: Ingenieur.de vom 15.2.2021, <https://www.ingenieur.de/fachmedien/umweltmagazin/luft/weniger-illegale-fckw-emissionen-aber-es-gibt-ein-anderes-problem/>.
 - 17 Mihatsch, Schmuggler verdienen an Klimagift, In: Klimareporter.de vom 8.7.2021, <https://www.klimareporter.de/europaeische-union/schmuggler-verdienen-an-klimagift>.
 - 18 UN Environment Programme, Facts and Figures on Ozone Protection, <https://ozone.unep.org/facts-and-figures-ozone-protection>.

4. Entschwefelung von Kraftwerken

Seit 1974 ist in Deutschland für neue Steinkohlekraftwerke die Rauchgasentschwefelung vorgeschrieben. Die dieser Regulierung nachfolgende Verordnung über Großfeuerungs-, Gasturbinen- und Verbrennungsmotoranlagen von 1983 erforderte dann auch die Nachrüstung oder Stilllegung bestehender Anlagen bestimmter Leistung. Sukzessive mussten auch Braunkohlekraftwerke ihre Abgase entschwefeln. In Kraftwerken besteht prinzipiell die Möglichkeit, durch technische Maßnahmen Schwefeldioxid bis über 95 Prozent aus dem Rauchgas zu entfernen. Hierfür stehen mehr als 100 verschiedene Verfahren zur Verfügung. Vor allem in Japan und in den USA, aber auch in Deutschland wurden Varianten entwickelt, die als Endprodukt Gips oder Ammoniumsulfat liefern.¹⁹

Im Jahr 1979 wurde das Genfer Übereinkommen über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung²⁰ verabschiedet. Es trat 1983 als erste internationale Vereinbarung zur Verringerung der Emission von Luftschadstoffen in Kraft. Dem folgte 1985 das Helsinki-Protokoll²¹ zur Reduktion der Schwefelemissionen um mindestens 30 Prozent. Weiterhin ist das Göteborg-Protokoll²² zur Vermeidung von Versauerung und Eutrophierung sowie des Entstehens von bodennahem Ozon relevant, das am 17. Mai 2005 in Kraft getreten ist und länderspezifische Grenzwerte für jährliche Schwefeldioxidemissionen enthält. Internationale Vereinbarungen sind für die Wirkungen auf die Schadstoffgehalte der Luft auch deshalb bedeutsam, weil ein Teil der Schadstoffe über Ferntransport über weite Strecken verfrachtet wird.

Neben den internationalen Vereinbarungen bestimmten ab 1996 EU-Vorgaben die regulatorische Begrenzung der Schwefeloxidemissionen in Deutschland. Auch an dieser Stelle sei nur schlaglichtartig die erste Richtlinie genannt, die den Auftakt der Gesetzgebung zur Luftreinhaltung auf EU-Ebene bildete. Dies war die Richtlinie 96/62/EG des Rates vom 27. September 1996 über die Beurteilung und die Kontrolle der Luftqualität (Luftqualitätsrahmenrichtlinie)²³. In diesem Regelwerk verpflichten sich die Mitgliedstaaten zur Erreichung bestimmter Luftqualitätsziele, die in den weiterführenden Richtlinien für einzelne Schadstoffe mit zeitlichen Vorgaben verknüpft wurden.

19 Rauchgasentschwefelung, <https://www.chemie.de/lexikon/Rauchgasentschwefelung.html>.

20 Übereinkommen über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung, [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:21979A1113\(01\)](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:21979A1113(01)).

21 The 1985 Helsinki Protocol on the Reduction of Sulphur Emissions or their Transboundary Fluxes by at least 30 per cent, <https://unece.org/environment-policy/air/1985-helsinki-protocol-reduction-sulphur-emissions-or-their-transboundary>.

22 1999 Protocol to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone to the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution, <https://unece.org/environment-policy/air/protocol-abate-acidification-eutrophication-and-ground-level-ozone>.

23 Richtlinie 96/62/EG des Rates vom 27.9.1996 über die Beurteilung und die Kontrolle der Luftqualität, <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:31996L0062:DE:HTML>.

Einen umfassenden Überblick über frühere und bestehende Rechtsvorschriften zur Luftreinhaltung auf nationaler, europäischer und internationaler Ebene bietet der Internetauftritt des Umweltbundesamtes: UBA (2023), Rechtliche Grundlagen der Luftreinhaltung, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/regelungen-strategien/rechtliche-grundlagen-der-luftreinhaltung#internationale-abkommen>.

Die Wirkung der zahlreichen Bestimmungen lässt sich gesamthaft an den Schwefeldioxidgehalten in der Atmosphäre wie auch am Ausmaß des Waldsterbens prüfen. Mit Ende der achtziger und Beginn der neunziger Jahre wurde in Deutschland ein bundesweites Netz von Luftmessstationen aufgebaut. Nach Informationen des Umweltbundesamtes sind die Schwefeldioxidemissionen seit 1990 bis 2021 deutlich gesunken - von 5,5 auf 0,25 Millionen Tonnen.

Die wichtigsten Emittenten von Schwefeldioxidemissionen sind die verschiedenen Feuerungsanlagen der Energiewirtschaft sowie die Industriefeuerungsanlagen des verarbeitenden Gewerbes. Dem Umweltbundesamt zufolge senkten diese Branchen ihren Schwefeldioxid-Ausstoß um 96 Prozent. Neben Stilllegungen spielen die Rauchgasentschwefelung nach Stand der Technik und der Einsatz schwefelarmer Brennstoffe eine maßgebliche Rolle.

Im Göteborg-Protokoll und in der NEC-Richtlinie der EU (2016/2284) wird festgelegt, dass die jährlichen Schwefeldioxid-Emissionen ab 2020 um 21 Prozent niedriger sein müssen als 2005. Diese Ziele wurden 2020 und 2021 eingehalten.²⁴

Das Waldsterben war in den frühen achtziger Jahren ein breit diskutiertes Umweltthema und veranlasste 1983 viele Menschen zu Demonstrationen. In diesem Zusammenhang war auch die wissenschaftliche Hypothese verbreitet, dass die Versauerung von Böden und Wasser der Baumgesundheit schade. Ohne dass Meinungsumfragen aus der damaligen Zeit vorlägen, kann davon ausgegangen werden, dass die öffentliche Stimmung die oben genannte nationale Gesetzgebung beförderte.²⁵

Seit 1984 wird jährlich die bundesweite Waldzustandserhebung durchgeführt. Sie beruht auf einem systematischen Netz von Stichproben. Das Bundesergebnis wird aus den von den Ländern zur Verfügung gestellten Daten am Institut für Waldökosysteme des Johann Heinrich von Thünen-Instituts, Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei, berechnet.

Nach einer zwischenzeitlichen Stabilisierung der Wälder ab der Jahrtausendwende, die auch auf die günstigere Witterung und die Begrenzung der Schwefeldioxidemissionen zurückgeführt wurde, sind die Schäden in den Wäldern bundesweit seit 2020 auf einem sehr hohen Niveau und so schlecht wie noch nie seit Beginn der Aufzeichnungen im Jahr 1984. Der Anteil aller Bäume, die keine Kronenverlichtung aufweisen, lag 2021 bei 20,8 Prozent. Vier von fünf Bäumen gelten damit als krank. Vor allem ältere Bäume über 60 Jahre sind geschädigt, aber auch jüngere Bäume.

24 Zum Ganzen: UBA (2023), Schwefeldioxid-Emissionen, <https://www.umweltbundesamt.de/daten/luft/luftschadstoff-emissionen-in-deutschland/schwefeldioxid-emissionen#entwicklung-seit-1990>.

25 Hecking, Was wurde eigentlich aus dem Waldsterben?, In: Spiegel.de vom 3.1.2015, <https://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/umweltschutz-was-wurde-aus-dem-waldsterben-a-1009580.html>.

Der Anteil der Kronenverlichtung ist hoch und wird primär auf die zu trockenen und warmen zurückliegenden Jahre zurückgeführt. Aber auch der Eintrag von Stickstoff gilt als zu hoch und schadet der Vitalität der Bäume. Multifaktorielle Stressoren setzen letztlich der Vitalität des Waldes zu.²⁶

* * *

26 B MEL, Ergebnisse der Waldzustandserhebung 2022, https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/waldzustandserhebung-2022.pdf?__blob=publicationFile&v=6.