



Zum Strahlungsantrieb von Lachgas

Martin Bülow

(MLS, Ostseebad Dierhagen)

Veröffentlicht: 20. Februar 2025

Abstract

The difference between the Radiative Forcing of nitrous oxide, N_2O , and carbon dioxide, CO_2 , ($200 \div 300$) W/m^2 , reported in the scientific literature is sufficiently well confirmed at $233 \text{ W}/\text{m}^2$. To discuss it, changes of thermodynamic functions that result from experimental data for the sorption system N_2O / Sodium Low Silica X Zeolite (NaLSX) are used. These data are $\lg p$ vs. $1/T$ -curves for very high but constant concentrations of N_2O in NaLSX-zeolite (above the region of saturation of the zeolitic micropore and the sorbent macropore systems). The examined dependencies reveal phase transitions of N_2O . Based on this information, it could be concluded that there is a relatively wide Triple region of N_2O bulk phase. The associated enthalpy changes are assigned to N_2O state transitions. The energetic effect associated with the transition of N_2O towards the Triple region amounts to $\approx 12 \text{ kJ}/\text{mol}$, which is a comparatively large value. It is postulated that this specific behaviour of N_2O may influence the Radiative Forcing of N_2O in analogy to the known phase transition behaviour of the atmospheric trace gas water vapour.

Zusammenfassung

Die in der wissenschaftlichen Literatur angegebene Differenz zwischen den Strahlungsantrieben von Distickstoffmonoxid, N_2O , und Kohlenstoffdioxid, CO_2 , ($200 \div 300$) W/m^2 , wird mit $233 \text{ W}/\text{m}^2$ hinreichend gut bestätigt. Um mögliche Ursachen hierfür zu finden, werden Änderungen thermodynamischer Funktionen betrachtet, die sich aus experimentellen Daten für das Sorptionssystem N_2O / Natrium Low Silica X Zeolite (NaLSX) ergeben. Dies sind Kurven der Art $\lg p$ vs. $1/T$ für sehr hohe, doch jeweils konstante Konzentrationen von N_2O in NaLSX-Zeolith (oberhalb des Sättigungsbereiches des zeolithischen Mikroporensystems und des Makroporensystems des verformten Sorbenten). Die untersuchten Abhängigkeiten ermöglichen die Annahme von Phasenübergängen des N_2O . Basierend auf dieser Information könnte der Schluss gezogen werden, dass es ein relativ breites Tripelgebiet von N_2O gibt. Für die zugehörigen Enthalpie-Änderungen wird das Auftreten von N_2O -Zustandsübergängen postuliert. Der energetische Effekt, der mit dem Übergang von N_2O in ein Tripelgebiet verbunden sein könnte, beträgt $\approx 12 \text{ kJ}/\text{mol}$, was ein relativ großer Betrag ist. In Analogie zum Phasenübergangs-Verhalten des atmosphärischen Spurengases Wasserdampf wird spekuliert, dass dieses spezifische Verhalten den Strahlungsantrieb von N_2O beeinflussen könnte.

Keywords/Schlüsselwörter

Nitrous oxide, carbon dioxide, radiative forcing, mesomerism, triple region, phase transition, heats of sorption, evaporation, fusion and sublimation, sodium low silica X zeolite, gas hydrate clathrate

Lachgas, Kohlenstoffdioxid, Strahlungsantrieb, Mesomerie, Tripelgebiet, Phasenübergang, Sorptions-, Verdampfungs-, Schmelz- und Sublimationswärmen, Natrium-LSX-Zeolith, Gas-Hydrat-Clathrate

1 Ausgangssituation

Der Strahlungsantrieb (*Radiative Forcing*, RF) ist ein Maß für den Vergleich und die Änderung der Energiebilanz des Planeten Erde infolge einer Änderung der Wirkung eines äußeren Einflusses/Beeinflussers („Drivers“), z.B. eines atmosphärischen Spurengases.¹ Er ist mit einer Änderung einer vereinbarten mittleren globalen Oberflächentemperatur der Erde² verbunden. Wegen seines nach internationaler Übereinkunft, d.h. nach der des *Intergovernmental Panel of Climate Change* (IPCC), definierten „größten Anteils“ an der Erderwärmung wird der Strahlungsantrieb von Kohlenstoffdioxid (*Carbon Dioxide*, CO₂) als Bezugspunkt für den Vergleich der Wirkung aller atmosphärischen Spurengase (der „Drivers“) betrachtet. Wird zusätzlich zum Strahlungsantrieb berücksichtigt, wie schnell ein betrachtetes Spurengas die Atmosphäre verlässt und welcher Zeitrahmen dafür berücksichtigt wird, so spricht man von seinem Erderwärmungspotenzial (*Global Warming Potential*, GWP; quasi das „Zeit-Integral“ von RF). *Per definitionem* hat CO₂ ein GWP von 1. Für Distickstoffmonoxid (*Nitrous Oxide*, Lachgas, N₂O) wurde ein GWP festgestellt, das über einen Zeitraum von 100 Jahren um einen Faktor im Bereich von (200 ÷ 300) größer sei als jener für CO₂ (Müller-Dum/Kube 2023) (Unternehmensberatung Babel 2021) (IPCC 2023)³. Für das Jahr 2023 wurde an der deutschen Messstation *Zugspitze* ein Mittelwert von 337,4 ppb N₂O bestimmt, während der weltweite Wert bei über 336,7 ppb liegt (Umweltbundesamt 2024). Für CO₂ beträgt er etwa 419,5 ppm (NOAA 2025).

2 Unterschied zwischen den Strahlungsantrieben von N₂O und CO₂

Der Unterschied im Strahlungsantrieb für N₂O und CO₂ wird in der Literatur mit einem Faktor im Bereich (200 ÷ 300) beziffert (Wiki Klimawandel 2020) (Brandstetter 2020). Er sei auf die starke Sättigung der Absorptionsbande des in der Erdatmosphäre viel häufiger vorkommenden CO₂ zurückzuführen, verglichen mit der viel geringeren Sättigung der Absorptionsbande von N₂O (de Lange et al. 2022). Eine leicht verständliche Verifizierung des Wertes für den Unterschied zwischen den Strahlungsantrieben von N₂O und CO₂ ist erschwert, da es an durchgreifend belastbaren und unschwer zugänglichen Hinweisen zur Herleitung dieses Wertes mangelt. Auch unterschiedliche intramolekulare Schwingungszustände der mehratomigen Spurengase (Ullmann/Bülow 2024) führen zu keinem allseits klärenden Verständnis.

In der vorliegenden Arbeit sei auf einen Essay (van Wijngaarden/Happer 2022) zurückgegriffen, in dem auf die Berechnung von Strahlungsantrieben aus auf Grund von Daten aus Satellitenmessungen und Modellrechnungen Bezug genommen wird. Hier werden Angaben aus Tabelle 4 jener Publikation berücksichtigt: „*Forcing powers per additional molecule in units of*

¹ RF hängt vom Breiten- und Längengrad sowie von der Höhe in der Atmosphäre ab, wird aber in der Regel für die Tropopause angegeben, etwa in 11 km Höhe, für gemäßigte Breiten oder für den oberen Teil der Atmosphäre in etwa 90 km Höhe.

² Damit wird nicht bestritten, dass die Temperaturen auf der Erde sehr unterschiedlich sind, und zwar zeitlich, in der Breite, in der Höhe bzw. in der Tiefe des Ozeans. Es gibt keine einzige einheitliche Temperatur. Die sinnvolle, nützliche Definition einer Durchschnittstemperatur oder einer Temperaturanomale bleibt problematisch.

³ *Global Warming Potential*=298 (100-year); 40 CFR 98 (USEPA); U.S. National Archives and Records Administration's Electronic Code of Federal Regulations. Available from, as of February 5, 2016: <https://www.ecfr.gov>.

10^{-22} W at the altitude $z_{tp} = 11$ km of the tropopause and $z_{mp} = 86$ km of the mesopause“ (sofern die aufgeführten Moleküle eine definierte Atmosphärensäulendichte haben und alle anderen Spurengasmolekül-Typen über ihre Standard-Säulendichten verfügen.⁴⁾ Verglichen werden insbesondere die Spurengase N_2O und CO_2 . Entsprechend ergibt sich das Verhältnis der Strahlungsantriebe von N_2O und CO_2 in einer Troposphärenhöhe von 11 km als

$$2.1 \times 10^{-1} \times 10^{-22} \text{ W} / 9.0 \times 10^{-4} \times 10^{-22} \text{ W} \approx \mathbf{233},$$

d.h. dividiert man die Strahlungsantriebswerte für N_2O und CO_2 , so folgt der Faktor **233**, was damit auch den vom IPCC in (Smith 2021) publizierten Wert verifiziert. Zugleich bekräftigt er das mit einem Wert von 265 definierte *Global Warming Potential* über 100 Jahre (EPA 2025), vgl. auch den in³⁾ genannten, etwas abweichenden Wert von 298.

In Verbindung mit anderen in jener Tabelle 4 aufgeführten Daten zu den Spurengasen verweist der Wert 233 offenbar auch auf eine Interferenz zwischen der Absorption der verschiedenen Spurengase, was ihre spezifischen Strahlungsantriebe, speziell gegenüber CO_2 , erheblich herabzusetzen scheint. Diese Schlussfolgerung steht mit dem grundsätzlichen Befund im Einklang, dass mit einer Zunahme der Konzentrationen von Spurengasen in der Atmosphäre ihr Einfluss auf die mittlere globale Oberflächentemperatur, d.h. auf die Klimaerwärmung, mehr und mehr, und zwar deutlich, nachlässt und schließlich verschwinden könnte.

3 Gründe für unterschiedliche Strahlungsantriebe von N_2O und CO_2

Zwei Strukturformeln (Mesomerie): [$N \equiv N^+ - O^- \leftrightarrow N^- = N^+ = O$] (Stabilste Lewis-Struktur: links)	N_2O
Kritischer Druck	72,4 bar
Kritische Temperatur	309,57 K
Dichte am kritischen Punkt	452 kg/m ³
Tripelpunkt (Dreiphasenpunkt), Druck	659 Torr
Tripelpunkt, Temperatur	182,34 K
Tripelgebiet, Temperatur (hier definiert, s. Bild 1)	$\approx (100 \div 140) \text{ K}$ ⁵⁾
Siedepunkt bei 1,013 bar	184,68 K

Bei Versuchen einer Betrachtung⁶⁾ des Unterschiedes zwischen den Strahlungsantrieben von N_2O und CO_2 wurden neben den Dipol- und Quadrupolmomenten auch die verschiedenen molekularen Strukturen bemüht. Beispielsweise erfolgten Analysen für die Momente in (Zolandz et al. 1992) und (de Lange et al. 2022). Ein entscheidender Einfluss auf den betrachteten Unterschied

Tabelle 1. Physikochemische Daten für N_2O (Unternehmensberatung Babel 2021; hier geringfügig ergänzt).

⁴⁾ Man betrachte hierfür die 3. Säule links in Tabelle 4 sowie die Erläuterungen in der Bildunterschrift und im zugehörigen Textteil von (van Wijngaarden/Happer 2022).

⁵⁾ Der Temperaturbereich des hier definierten „Tripelgebietes“, $\approx (100 \div 140) \text{ K}$, ist von der bekannten Tripelpunkt-Temperatur des Lachgases, $\approx 182,3 \text{ K}$, etwa $\geq 40 \text{ K}$ entfernt, wofür keine Erklärung gegeben werden kann.

⁶⁾ Der vorliegende Text ist eine **Betrachtung** und damit **keine Erklärung**, des Strahlungsantriebes von Lachgas.

wurde nicht festgestellt. Für den Strahlungsantrieb könnte auch das Schwingungsverhalten isolierter Moleküle in der Gasphase, wahrscheinlich bei reduziertem Druck, verantwortlich sein. Doch bei reduziertem Druck sollten kaum hinreichend viele molekulare Aggregate existieren. Des Weiteren fehlt eine konsequente thermodynamische Analyse.

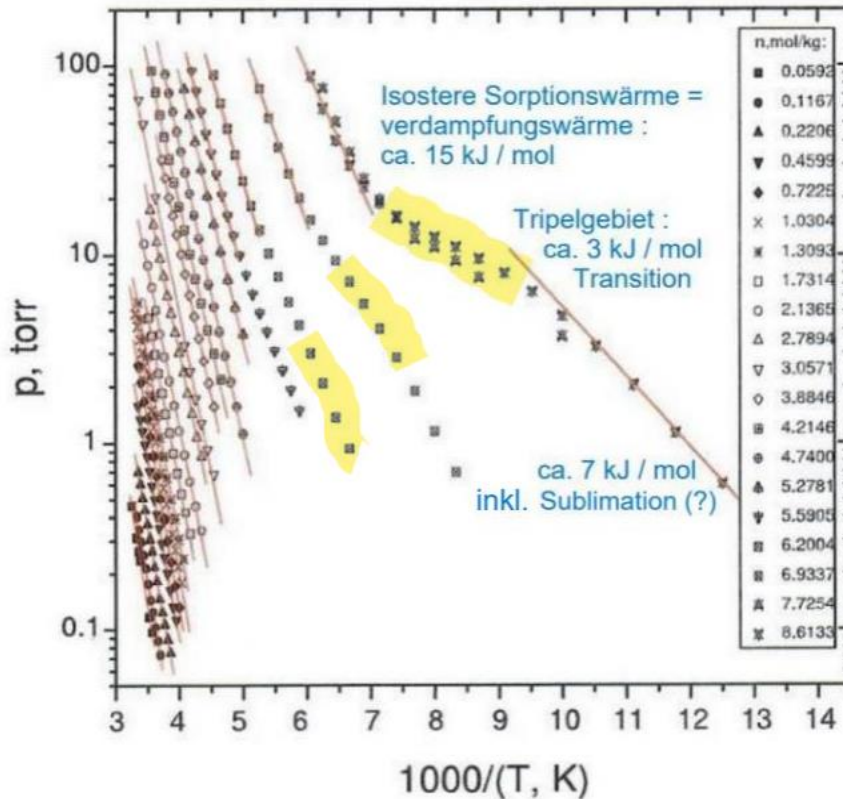


Bild 1. $\lg p$ vs. $1/T$ -Abhängigkeiten (Sorptionsisosteren) an NaLSX-Zeolith (verformte Kristallite) und Zustandsübergänge für wachsende N_2O -Konzentrationen n (Bülow et al. 2004).

Der oben benannte Versuch, den Unterschied auf die starke Sättigung der Absorptionsbande des viel häufiger vorkommenden CO_2 zurückzuführen, verglichen mit der viel geringeren Sättigung der Absorptionsbande von N_2O (de Lange et al. 2022), bleibt davon unberührt.

Die Strukturformel von N_2O kann nicht eindeutig dargestellt werden, da Mesomerie auftritt. Es werden zwei Grenzzustände (Mesomere) postuliert, s. Tabelle 1. Keine dieser zwei in den eckigen Klammern dargestellten Grenzformeln beschreibt die Bindungsverhältnisse exakt. Eine richtige Formel, die zwischen den beiden Grenzformeln läge, sollte spezifisch sein und von den jeweiligen Reaktionspartnern und -bedingungen abhängen.

Bei dem folgenden Versuch einer spekulativen thermodynamischen Beschreibung des Verhaltens von N_2O wird von der Existenz zweier Mesomere von N_2O im Gegensatz zu einer einzigen molekularen Struktur des CO_2 sowie auch - analog zum Spurengas Wasserdampf - von einem möglichen Auftreten unterschiedlicher physikalischer Zustände des N_2O in Abhängigkeit von Druck und Temperatur sowie ihres möglichen Einflusses auf den Strahlungsantrieb ausgegangen. Auch könnte der chemische Zustand von N_2O vom Vorhandensein des Spurengases Wasserdampf in der Atmosphäre beeinflusst sein.

Es wird auf thermodynamische Eigenschaften von N_2O , s. Bilder 1-3, die aus unabhängigen Messungen seiner Sorptionsgleichgewichte an Low Silica X Zeolithen (LSX) folgen (Bülow et al. 2004), zurückgegriffen.

Bild 1 zeigt direkt gemessene Sorptionsisothermen und Hinweise auf Zustandsübergänge von N_2O an NaLSX-Zeolith (mit Ton zu „Perlen“ verformte Zeolith-Kristallite) für wachsende in das experimentelle System dosierte Mengen n des Gases N_2O , s. Daten am rechten Bildrand. Aus den jeweils oberen geradlinigen Isosterenbereichen für geringere $1/T$ -Werte wurden mit Hilfe der *Clausius-Clapeyron*-Gleichung isostere Sorptionswärmen berechnet. Diese Enthalpie-Änderungen $-\Delta H$ sind in Bild 2 als Abhängigkeit von der N_2O -Konzentration n („sorbierte Menge“) im experimentellen System dargestellt. Die Daten liegen des Weiteren einer Berechnung der Standard-Werte der Sorptionsentropie, ΔS^0 , von N_2O an NaLSX-Zeolith zugrunde, vgl. Gl. (2) in (Bülow et al. 2004). Diese werden im Bild 3 als Abhängigkeit von der N_2O -Konzentration n im experimentellen System gezeigt.

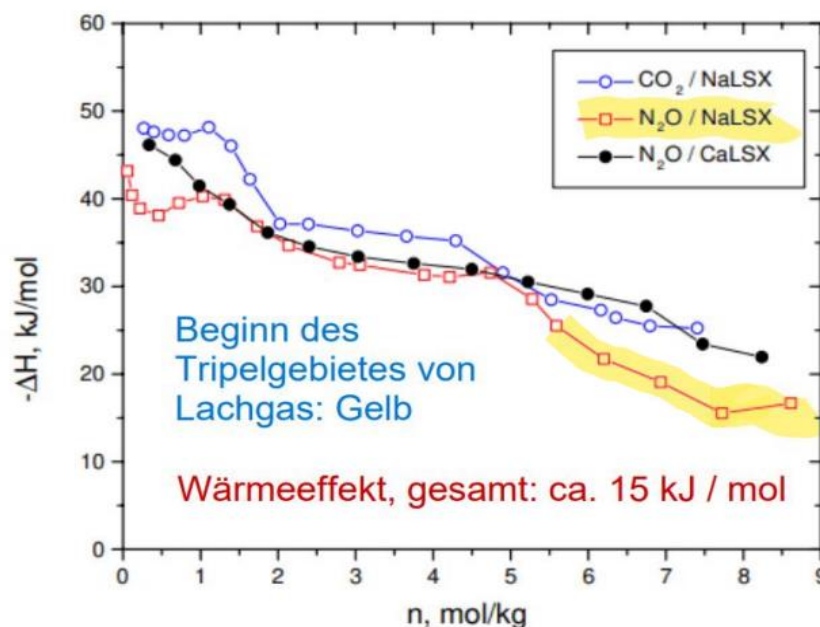


Bild 2. Isostere Sorptionswärmen, $-\Delta H$, und weitere (gelb eingefärbte) Wärmeeffekte von N_2O an verformten LSX-Zeolithen und Vergleich mit CO_2 (Bülow et al. 2004).

Die folgenden Befunde sind für eine weitere Betrachtung relevant:

- (i) Die experimentellen $\lg p$ vs. $1/T$ -Abhängigkeiten für die dosierten N_2O -Mengen von $n=8,6133$ mol/kg und $7,7254$ mol/kg stellen in Wirklichkeit keine Sorptionsisothermen dar, sondern charakterisieren auf Grund der bereits erfolgten Sättigung des zeolithischen Porensystems die druckabhängige N_2O -Konzentration im experimentellen System.
- (ii) Die Aussage (i) gilt ebenso für die Folge der experimentellen Punkte für die N_2O -Konzentration $n = 7,7254$ mol/kg, die mit der unter (i) genannten im gesamten $\lg p$ vs. $1/T$ -Gebiet deckungsgleich verläuft. Die Identität dieser zwei Datensätze für unterschiedliche dosierte N_2O -Mengen bezeugt nicht nur die Korrektheit der zugrunde liegenden primären Messdaten, sie zeigt vor allem auch das Auftreten gleicher physikalischer Zustände und Übergangsbereiche zwischen solchen für N_2O .

- (iii) Bild 1 weist für drei weitere $\lg p$ vs. $1/T$ -Abhängigkeiten das Vorliegen von zumindest einer Änderung des N_2O -Zustandes nach - bei weiterer Abnahme der N_2O -Konzentration n , s. auch die Bilder 2 und 3.
- (iv) Aus den im Bild 3 dargestellten Änderungen der Standard-Sorptionsentropie $-\Delta S^0$ von N_2O an verformtem NaLSX-Zeolithen folgen für die vier höchsten Konzentrationen n etwa gleiche Werte, $-\Delta S^0 \approx 80$ J/mol K. (Die Standard-Entropie S^0 von N_2O beträgt 220,0 J/mol K (Lohringer 2023.))

In die Betrachtung wird des Weiteren die Möglichkeit physikalischer und chemischer Zustandsänderungen von N_2O , z.B. die Existenz von Mesomeren, einbezogen. Auch wird auf das Vorhandensein von N_2O -Chlratrat-Hydraten (Zolandz et al. 1992) (Mohammadi et al. 2008) in der Erdatmosphäre (Salmon et al. 2016) eingegangen. In (Salmon et al. 2016) wurden speziell die niedrigsten Energiestrukturen und Bindungsenergien von N_2O - H_2O Komplexen untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass ihre Bildung in der Erdatmosphäre nicht vernachlässigbar ist. Auf Grund der vergleichsweise niedrigen Rest-Konzentration von Wasserdampf im speziell entwässerten experimentellen System sollte eine ursächliche Teilhabe an der $\lg p$ vs. $1/T$ -Abhängigkeit an dieser Stelle ausgeschlossen sein - nicht aber am betrachteten Unterschied zwischen den RF -Werten von N_2O und CO_2 in der Erdatmosphäre.

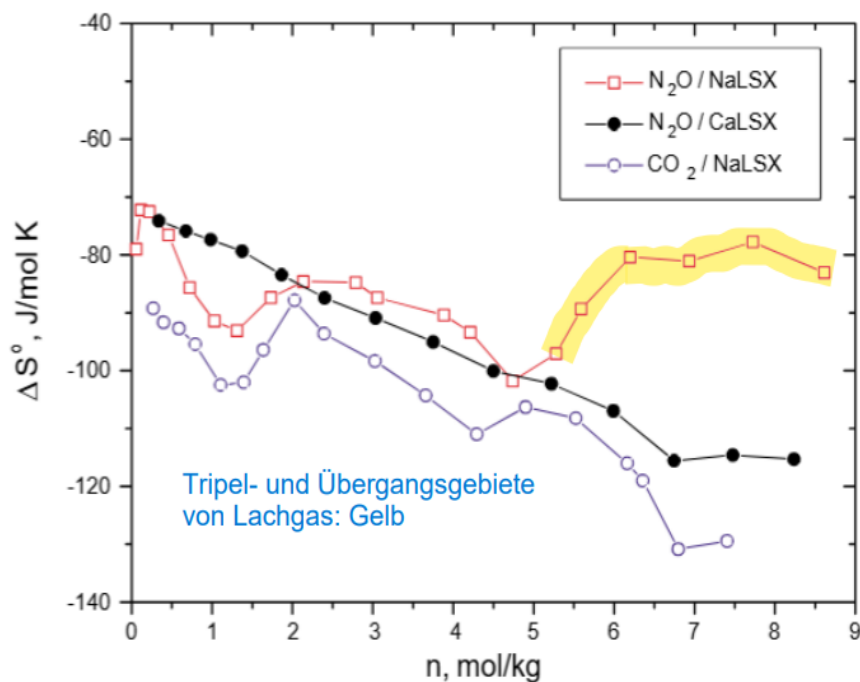


Bild 3. Standard-Sorptionsentropien $-\Delta S^0$ von N_2O und CO_2 an verformtem LSX-Zeolithen als Abhängigkeiten von der Konzentration n im experimentellen System (Bülow et al. 2004).

Aus den Darlegungen zu den Bildern 1-3 ergeben sich für N_2O die nachstehenden, mit energetischen Effekten verbundenen Zustandsformen: die vereinfachte duale, mesomere Molekülstruktur (s. Tab. 1; Kurven im Bereich $n \approx (4 \div 6)$ mol/kg), d.h. Phasenübergänge analog den in (Bülow/Schirmer 1973) beschriebenen), des Weiteren unterschiedliche, hier nicht näher beschriebene molekulare Anordnungen im hierarchischen Porensystem des verformten Zeoliths, Verdampfung, Tripelgebiets-Übergänge, Schmelzprozess (eventuell auch mit Sublimation). Für die weiteren Überlegungen scheidet die mit dem Porensystem und mit

dem Phänomen *Adsorption* verbundenen Erscheinungen wegen Irrelevanz aus. Daher werden nur Erscheinungen, die den „gelb“ markierten Bereichen zugrunde liegen könnten, erwogen. Es sei zunächst Bild 1 betrachtet. Die Verdampfungs- oder Kondensationswärme von N_2O in Nähe der Temperatur seines Tripelpunktes ($\approx 182\text{ K}$) und in Richtung des vermutlich existierenden Tripelgebiets beträgt $16,1\text{ kJ/mol}$ (Physik für alle 2024) (Mohammadi/Richon 2008); vgl. auch $16,54\text{ kJ/mol}$ bei $-88,48\text{ }^\circ\text{C}$ (Haynes 2014-2015), was den hier ermittelten Wert, $\approx 15\text{ kJ/mol}$, um wenig mehr als *ca.* 1 kJ/mol übertrifft und den Messfehlerbereich nur um ein Geringes übersteigt⁷. Die sich ergebende Differenz, *ca.* 15 kJ/mol , zur isothermen Sorptionswärme, *ca.* 30 kJ/mol , dürfte als die für die Raumphase des N_2O in seinem Tripelgebiet typische bzw. in seinen Phasenumwandlungen übertragene Energie (im Bild 2 als „Wärmeeffekt, gesamt“ bezeichnet) angesehen werden. Vom postulierten Tripelgebiet zu niedrigeren

Temperaturen hin schließt sich ein wiederum linearer Bereich der $\lg p$ vs. $1/T$ -Abhängigkeit mit einem Wärmeeffekt von *ca.* 7 kJ/mol an. Ihm ließe sich ein Schmelzprozess von festem zu flüssigem N_2O (inkl. Sublimation?) zuordnen; mit einer Schmelzwärme, *Heat of Fusion*, von $-\Delta H_{\text{Fus}} \approx 6,54\text{ kJ/mol}$ (PubChem 2004) (Haynes 2014-2015).

Für eine Interpretation im Sinne des Vorliegens von Tripelzuständen und ihrer Zugänglichkeit innerhalb gewisser Parameterbereiche von Druck, Temperatur und dosierter Menge wird auf die in (Bülow et al. 2004) publizierten Daten zurückgegriffen.

Wie die Bilder 1 und 3 zeigen, überlagern sich die $\lg p$ vs. $1/T$ -Abhängigkeiten für die N_2O -Mengen $n = 7,7254\text{ mol/kg}$ und $n = 8,6133\text{ mol/kg}$. Betont sei dieser Befund, da es sich hier nicht um „Adsorption“, d.h. um keine Anreicherung von N_2O in den Poren des verformten Zeoliths, handelt, sondern dass ein Raumphasen-Verhalten von N_2O vorliegt. Der mittlere, nicht „rot“, sondern „gelb“ eingefärbte Teil dieser zwei $\lg p$ vs. $1/T$ -Abhängigkeiten im Bild 1 ist der vom Tripelzustands-Verhalten des N_2O geprägte Parameterbereich. Dabei handelt es sich mutmaßlich um ein „Tripelgebiet“ (Dreiphasengebiet) (Physik für alle 2024), das gleichzeitig von gasförmigen, flüssigen und festen N_2O -Aggregaten bzw. -Bereichen gebildet wird.

Die aus Bild 1 abgeschätzte Temperaturspanne dieses Übergangsbereichs beläuft sich auf $\Delta T \approx (100 \div 140)\text{ K}$, d.h. der Tripelpunkt verwandelt sich - offensichtlich mit thermischen Effekten - in eine „Tripellinie“ oder - was wahrscheinlicher ist - in ein „Tripelgebiet“, s. die in Bild 1 „gelb“ eingefärbten Kurvenbereiche. Die ermittelte Temperaturspanne stimmt allerdings mit den Tripelzustands-Koordinaten von N_2O auch angesichts aller getroffenen Vereinfachungen nur unbefriedigend überein. Die für das hier gefundene Tripelgebiet charakteristische Übergangsenergie lässt sich zu $(3 \div 4)\text{ kJ/mol}$ abschätzen. Ihr Wertgehalt kann mangels Vergleichsdaten schwerlich eingeschätzt werden. Es sei vermutet, dass sich Tripelpunkt-Phasenübergänge im genannten N_2O -System in Übergänge analog jenen des *Schottky*-Typs (Bülow/Schirmer 1973) (keine Singularitäten oder Diskontinuitäten in den Maxima der C_p - T -Verläufe) über gewisse, nicht vorhersagbare genauere Parameterbereiche „verschmieren“, also auch keine Phasenübergänge 2. Ordnung darstellen. So treten Übergangsbereiche in den als $\lg p$ vs. $1/T$ -Abhängigkeiten für sehr hohe dosierte Mengen auf. Für das mutmaßliche, doch markante Tripelgebiet-Verhalten von N_2O sollten zusätzliche Untersuchungen vor allem seiner Energetik interessant sein. Der eingangs beschriebene erhöhte

⁷ Die Fehlerbreite bei der Bestimmung der im Bild 1 angegebenen Enthalpie-Werte beträgt $\pm 1\text{ kJ/mol}$. Die bis zur Übernahme der britischen BOC durch die deutsche Linde AG (2006) im BOC Group Technical Center (Murray Hill, NJ) genutzte isostere Messtechnik für thermodynamische Funktionsänderungen erlaubte eine Exaktheit von $\pm 50\text{ J/mol}$. Mit dieser Genauigkeit übertraf die isostere Methode alle anderen bekannten Verfahren für die Bestimmung von thermodynamischen Funktionsänderungen in Untersuchungen von Physi- und Chemisorption.

Strahlungsantrieb von N_2O gegenüber CO_2 könnte mit diesem Verhalten ursächlich verbunden sein, was hier weitgehend spekulativ geltend gemacht wird. Die Wirkvorgänge sollten analog jenen des reversiblen Schmelzens und Verdampfens des Spurengases Wasserdampf ablaufen.

Die Stimmigkeit der Enthalpie-Werte, wie sie sich aus den im Bild 1 gezeigten experimentellen $\lg p$ vs. $1/T$ -Verläufen für die zwei höchsten der dosierten N_2O -Mengen über die Gesamtbereiche von Druck und Temperatur ergeben, könnte wie folgt gestützt werden: Verdampfungswärme: 15,0 vs. 16,1 kJ/mol; Übergangswärme für das Tripelgebiet: $(3 \div 4)$ kJ/mol; Schmelzwärme: 7 kJ/mol vs. 6,54 kJ/mol bei $-90,8$ °C (Hoge 1945). Der zuletzt genannte Enthalpie-Wert stimmt mit der Schmelzwärme von N_2O überein (Bryson et al. 1974).

Ein weiterer Verstärkungsfaktor, der aus der erwähnten Bildung von N_2O - H_2O -Clathraten (Mohammadi et al. 2011) in der Erdatmosphäre folgt, besteht darin, dass in dem bei niedrigen Temperaturen entstehenden kristallinen Gashydrat jeweils ein N_2O -Molekül mit *ca.* 5,8 H_2O -Molekülen verbunden ist (Mohammadi/Richon 2008) (Zolandz et al. 1992). Seine molekulare Struktur ist mit jener des von (Takeya/Hachikubo 2022) beschriebenen N_2O - H_2O -Clathrats (Zusammensetzung: $\text{N}_2\text{O} \cdot 6,1\text{H}_2\text{O}$) nahezu identisch. Damit könnten in Analogie zu den CO_2 -Clathrat-Hydraten auch N_2O -Clathrat-Hydrate einen signifikanten Einfluss auf den summarischen Strahlungsantrieb ausüben, zumal sie eine identische molekulare Struktur haben. Bekanntlich (und etwas begünstigend) sind die Dissoziationstemperaturen von N_2O -Clathrat-Hydraten bei gegebenen Drücken um etwa 2 bis 3 K höher als jene von CO_2 -Clathrat-Hydraten.

4 Schlussfolgerungen

Der in der Fachliteratur mitgeteilte Unterschied zwischen den Werten für den Strahlungsantrieb von N_2O und CO_2 ($200 \div 300 \text{ W/m}^2$) wird - auf der Grundlage von Literaturangaben - mit 233 W/m^2 in guter Übereinstimmung bestätigt. Für eine Betrachtung dieses Unterschiedes wird auf thermodynamische Funktionsänderungen, die aus veröffentlichten isosteren Messergebnissen für das Sorptionssystem N_2O -NaLSX-Zeolith (verformt) folgen, zurückgegriffen. Dabei handelt es sich um in der Literatur zugängliche $\lg p$ vs. $1/T$ -Abhängigkeiten unter isosteren Bedingungen für sehr hohe N_2O -Mengen im experimentellen System (Bereich oberhalb der Sättigung der Mikro- und Makroporensysteme des Sorbenten). Die betrachteten Kurvenverläufe suggerieren Übergänge reiner Raumphasen des N_2O . Anhand dieser Information kann über das Vorhandensein eines relativ breiten Tripelgebietes von N_2O spekuliert werden. Damit verbundene Enthalpie-Änderungen werden N_2O -Zustandsübergängen zugeordnet. Der mit dem Übergang von N_2O in das Tripelgebiet verbundene energetische Effekt wäre hinreichend groß. Aus der Betrachtung dürfte folgen, dass in Analogie zu dem bekannten Phasenübergangsverhalten des atmosphärischen Spurengases Wasserdampf auch das Raumphasenverhalten von N_2O den Strahlungsantrieb beeinflussen könnte. Dies dürfte zum Unterschied zwischen den Strahlungsantrieben von Lachgas und Kohlenstoffdioxid beitragen- eine spekulative Schlussfolgerung.

5 Danksagung

Der Verfasser dankt Herrn Professor Dr. Helmut Ullmann, Freital, für viele inspirierende Gespräche während jahrelangen wissenschaftlichen Austausches zu mannigfaltigen Themen. Des Weiteren sei Herrn Professor Dr. Jürgen Caro, Berlin, für kritisch-helfende Ratschläge zu der vorstehenden Betrachtung gedankt.

Bibliographie

- Brandstetter, Nico (2020): *Lachgas aus Kläranlagen - 300x so schädlich wie CO₂*; January.
- Bryson, Charles E./Cazcarra, Victor/ Levenson, Leonard L. (1974): *Sublimation rates and vapor pressures of water, carbon dioxide, nitrous oxide, and xenon*, J. Chem. Eng. Data **19**, N2, 107-110, <https://doi.org/10.1021/je60061a021>.
- Bülow, Martin/Schirmer, Wolfgang (1973): *Zustandsänderungen in Adsorbaten*, Z. phys. Chemie, Leipzig **253** Nr. 1/2, 130-136.
- Bülow, Martin/Shen, Dongmin/Jale Sudhakar R. (2004): *Sorption equilibrium properties of nitrous oxide on low-silicon X-type zeolites*, Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects **241** 59- 65.
- de Lange, Kees A./Ferguson, J.D./ Happer, William/van Wijngaarden, William A. (2022): *Nitrous Oxide and Climate*; arXiv:2211.15780v1 [physics.ao-ph].
- EPA (2025): [Overview of Greenhouse Gases | US EPA].
- Haynes, William M. (ed.) (2014-2015): *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. 95th Edition. CRC Press LLC, Boca Raton: FL p. 6-149.
- Hoge, Harald J. (1945): *Vapor pressure, latent heat of vaporization, and triple-point temperature of N₂O*, J. Res. Natl. Bur. Stand **34**, N3, 281-297 297297317; <https://doi.org/10.6028/jres.034.015>.
- IPCC (2023): *7SM - The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks and Climate Sensitivity Supplementary Material*
- Lohninger, Hans (2023): *Anorganische Chemie, Tabellen, Standardbildungsenthalpie, freie Energie, und Standardentropie ausgewählter Substanzen*; Springer Verlag, Heidelberg, Germany.
- Mohammadi, Amir H./Richon, Dominique (2008): *Equilibrium Data of Nitrous Oxide and Carbon Dioxide Clathrate Hydrates*; J. Chem. Eng. Data **54** N2 279–281, doi:10.1021/je800286t.
- Mohammadi, Amir H./Eslamimanesh, Ali/Richon, Dominique (2011): *Nitrous Oxide Clathrate Hydrates*, In book: *Advances in Chemistry Research* (Volume **11**), Editor: James C. Taylor, Publisher: Nova Science Publishers, Inc., NY, USA.
- Müller-Dum, Denise/ Kube, Jens (2023): *Wie Lachgas den Klimawandel antreibt* | Helmholtz-Klima-Initiative.
- NOAA (2025): gml.noaa.gov/webdata/ccgg/trends/co2/co2_annmean_gl.txt.
- Physik für alle (2024): *Tripelpunkt - Physik-Schule*; https://www.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Tripelpunkt?utm_content=cmp-true.
- PubChem (2004): *National Library of Medicine; Nitrous Oxide* | N₂O | CID 948 - PubChem.
- Salmon, Stephen R./de Lange, Katrina M./Lane, Joseph R. (2016): *Structure and Abundance of Nitrous Oxide Complexes in Earth's Atmosphere*, J. Phys. Chem. A. **120**, N13, 2096-105.
- Smith, Chris/Nicholls, Zebedee/Armour, Kyle/Collins, William/Forster, Piers/Malte, Meinshausen/Palmer, Matthew/Watanabe, Masahiro (2021): *IPCC AR6 WGI; 7.SM Chapter 7: The Earth's energy budget, climate feedbacks, and climate sensitivity - Supplementary Material; Table 7. SM.7; p. 24.*
- Takeya, Satoshi/Hachikubo, Akihiro (2022): *Crystal Structure and Guest Distribution of N₂O Hydrate Determined by Powder X-ray Diffraction Measurements*, Cryst. Growth Design **22**, N2, 1345-1351.
- Ullmann, Helmut/Bülow, Martin (2024): *The role of greenhouse gases in radiative equilibrium – Thermodynamic evaluation*, Zeitschrift für Physikalische Chemie. <https://doi.org/10.1515/zpch-2023-0384>.

- Umweltbundesamt (2024): Atmosphärische Treibhausgas-Konzentrationen | Umweltbundesamt.
- Unternehmensberatung Babel (2021): *Distickstoffmonoxid, Lachgas. Wissenwertes und Stoffdaten* (unternehmensberatung-babel.de).
- van Wijngaarden, William A./Happer, William (2022): *Infrared-Forcing-by-Greenhouse-Gases-2019-Revised-3-7-2022.pdf*. arXiv:2006.03098v1 [physics.ao-ph].
- Wiki Klimawandel (2020) *Lachgas – Klimawandel*; <https://wiki.bildungserver.de/klimawandel/index.php/Lachgas>.
- Zolandz, Doronthy/Yaron, David/Peterson, K.I./Klemperer, W. (1992): *Water in weak interactions: The structure of the water–nitrous oxide complex* J. Chem. Phys. 97, 2861–2868, <https://doi.org/10.1063/1.463028>.

E-Mail-Adresse des Verfassers: mrtbnlw@gmail.com