



Dokumentation

Einzelfragen zu Kondensationskeimen und Luftverunreinigung

Einzelfragen zu Kondensationskeimen und Luftverunreinigung

Aktenzeichen: WD 8 - 3000 - 033/20
Abschluss der Arbeit: 29. Mai 2020
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.	Einleitung	4
2.	Wolkenbildung und Luftqualität	4
2.1.	Kondensationskeime und Aerosolarten	4
2.2.	Partikelgrößen	5
2.3.	Aerosole und Niederschlagsneigung	5
3.	Forschungsaktivitäten zur Modifikation der Wolkenbildung	8
4.	Historische Aufzeichnungen zu Niederschlagsmenge und Niederschlagsintensität	12
5.	Quellenverzeichnis	13

1. Einleitung

Wolken sind keine isolierten Phänomene, sondern in komplexe Strömungsvorgänge eingebunden. Im atmosphärischen Teil des hydrologischen Zyklus verdunstet Wasser aus Ozeanen, Oberflächengewässern, aus dem Boden und durch Verdunstung der Pflanzen. Es kondensiert zu Wolken und fällt als Niederschlag wieder zu Boden. Dabei regnet es nur aus etwa 1 % aller Wolken.

Für die Wolkenbildung sind Kondensationskeime (Aerosole) notwendig. Damit Wasser zu Wolken kondensieren kann, müssen die Keime eine Mindestgröße haben und die Luft mit Wasserdampf gesättigt sein. Die für die Kondensation erforderliche Sättigung wird in der Regel durch die Abkühlung der Luft bei einem gegebenen Feuchtegehalt erreicht. Die Anzahl der Keime und die Umgebungsbedingungen bestimmen Wolken- und Niederschlagsbildung in komplexer Weise.

Die folgende Arbeit liefert Literaturstellen zu Wechselwirkungen von Wolkenbildung, Niederschlag und Luftqualität und zu Forschungsaktivitäten zur Modifikation von Wolken.

2. Wolkenbildung und Luftqualität

Der Deutsche Wetterdienst beschreibt die Wolkenbildung wie folgt: „Wolken entstehen durch Kondensation oder Sublimation der mit Wasserdampf übersättigten Luft auf geeigneten Aerosolpartikeln. Der hauptsächliche Vorgang ist der Kondensationsprozess, der bereits bei einer Übersättigung der Luft mit Wasserdampf von maximal 1 % auf den Wolkenkondensationskernen (CCN, Cloud condensation nucleus) erfolgt. Diese Teilchen bilden sich zum größten Teil innerhalb der planetarischen Grenzschicht durch Gas-zu-Partikelreaktionen und stammen nicht von einer direkten Oberflächenquelle.“¹

2.1. Kondensationskeime und Aerosolarten

Kondensationskeime² sind in der Atmosphäre schwebende, mikroskopisch kleine Partikel, an denen bei Wasserdampfsättigung die Kondensation beginnt. „Kondensationskerne bestehen zum größten Teil aus hygroskopischen, d.h. Feuchtigkeit anziehenden Aerosolen. In reiner Luft findet

1 Deutscher Wetterdienst (DWD) (2020). „Wolkenbildung“, https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/begriffe/W/Wolkenbildung_pdf.pdf?blob=publicationFile&v=4

Weiterführende Literatur: Hans R. Pruppacher, James D. Klett & Pao K. Wang (1998). „Microphysics of Clouds and Precipitation, Aerosol Science and Technology“, 28:4, 381-382, DOI: 10.1080/02786829808965531

Hupfer, et al. (2013). „Witterung und Klima“, Springer-Verlag, https://books.google.de/books?id=qJ59BwAAQBAJ&pg=PA6&dq=Koaleszenzwachstum&hl=de&source=gbs_selected_pages&cad=2#v=onepage&q=Koaleszenzwachstum&f=false

2 Die Begriffe „Kondensationskeime“ und „Kondensationskerne“ werden oft synonym verwendet.

man bis etwa 1000, in verschmutzter Großstadtluft über 100.000 Kondensationskerne pro Kubikzentimeter.“³

Ruß, Staub, Kohlenwasserstoffpartikel, Schwefelsäuretröpfchen und andere Schwebeteilchen, Wüstenstaub oder mineralischer Staub können als Kondensationskeime dienen. Dabei kann Ruß anthropogenen Ursprungs sein oder aus Waldbränden oder Vulkanausbrüchen stammen. Ebenso tragen Pflanzen mit organischen Dämpfen zu natürlichen Aerosolen bei. Auch Pilzsporen oder das Meersalz zählen zu den Aerosolen.⁴

2.2. Partikelgrößen

Die Keimgröße der Kristallisationskeime geben Forscher des Max-Planck-Instituts (MPI) mit etwa 60 bis 80 Nanometer Durchmesser und größer an. Ab dieser Größe wird ein Partikel als Wolkenkeim aktiv. Die Forscher haben festgestellt, dass sich zwei Teilchen aus unterschiedlichen Quellen bei gleicher Größe in ihrer Wolkeneigenschaft ähnlich verhalten.“⁵

2.3. Aerosole und Niederschlagsneigung

Die Zusammenhänge zwischen der Entwicklung der Aerosolmengen und den Niederschlagsmengen und Niederschlagsintensitäten sind komplex. Das Niederschlagswachstum ist eine Kombination von hydro- und thermodynamischen Prozessen. Ein Fachartikel beschreibt die Prozesse ausführlich:

„Zwei Hauptmechanismen führen zur Niederschlagsbildung: der warme Regenprozess und die Beteiligung der Eisphase. Während in mittleren Breiten der Niederschlag grund-

3 Deutscher Wetterdienst (DWD) (2020). „Kondensationskeime“, <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=101334&lv3=101474>

4 Wengenmayr, R., Max-Planck-Institut (MPI) (2010). „Staub, an dem Wolken wachsen“, <https://www.mpg.de/forschung/aerosole-und-wolken>

Eine ausführliche Beschreibung von Wolken Klima und Umwelt findet sich in: Hauf, T. et al. Physik in unserer Zeit (1991). „Wolken, Klima und Umwelt“, I 22. Jahrg. 1991 / Nr. 2, <http://online-library.wiley.com/doi/10.1002/piuz.19910220206/pdf>

Ein Leibnitz-Institut beschäftigt sich insbesondere mit dem grundlegenden Prozessverständnis der Wechselwirkungen zwischen Aerosol, Wolken und Strahlung sind deren Bedeutung zur Verbesserung zukünftiger Wetter- und Klimavorhersagen: Leibnitz-Institut für Troposphärenforschung (TROPOS) (2020). „Aerosol-Wolken-Wechselwirkungen“, <https://www.tropos.de/forschung/aerosol-wolken-wechselwirkungen/prozessstudien-auf-kleinen-zeit-und-raumskalen>

Studien über die Rolle von Huminstoffen (Substanzen des Humusbodens, HULIS) beim hygrokopischen Wachstum und der Aktivität der Wolkenkondensationskerne (CCN) von Aerosolpartikeln: Kristensen et al. (2012). „Hygroscopic growth and CCN activity of HULIS from different environments“, J. Geophys. Res., 117(22), doi:10.1029/2012JD018249, <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2012JD018249>

5 Wengenmayr, R., Max-Planck-Institut (MPI) (2010). „Staub, an dem Wolken wachsen“, <https://www.mpg.de/forschung/aerosole-und-wolken>

sätzlich an das Auftreten von Eisteilchen geknüpft ist, liegt in den Tropen die Nullgradgrenze so hoch, dass der warme Regenprozess überwiegt. Generell wachsen nach der Kondensation Tropfen zunächst aus der Dampfphase. Je größer ein Tropfen geworden ist, umso schneller fällt er. Die Fallgeschwindigkeit relativ zur umgebenden Luft erscheint klein, [...] jedoch reichen die Unterschiede zwischen den Fallgeschwindigkeiten aus, dass große Tropfen die kleinen überholen oder mit ihnen zusammen stoßen und sie damit auf-sammeln. Die großen Tropfen wachsen durch den Koagulationsprozess an und vergrößern wiederum ihre Fallgeschwindigkeit. Diese positive Rückkopplung führt bei etwa 80 µm Durchmesser zu einer zweiten Spitze im Tröpfchengrößenspektrum, welches die beginnende Niederschlagsbildung anzeigt.

Dieser Prozess tritt in allen Wolken auf. Bildet sich der Niederschlag ausschließlich dadurch, so spricht man von warmen Regen. In Wolken mittlerer Breiten ist er nicht ausschlaggebend, da neben dem reinen Koaleszenzwachstum⁶ drei weitere Prozesse die Niederschlagsbildung über die Eisphase effektiver machen. Haben sich erst einmal Eisteilchen gebildet, z. B. in Form von Eiskristallen oder gefrorenen Wolkentropfchen, so wachsen diese dann schneller als gleich große flüssige Teilchen, da der Sättigungsdampfdruck über Eis niedriger als über Wasser ist. Wiederum fallen die großen schneller als die kleinen Teilchen. Eisteilchen sammeln nun nicht nur andere Eisteilchen, sondern auch Wolkentropfchen. Letztere gefrieren spontan, das Eisteilchen bereift und wird schließlich zu Graupel. Je nach Umgebungstemperatur und freigesetzter Gefrierwärme kann das Teilchen auch ein Zweiphasengemisch aus Wasser und Eis bilden. Die unterschiedliche Phase und Form der Stoßpartner - Eisteilchen und Wolkentropfen - begünstigt den Wachstumsprozess. Weiterhin können sich Eiskristalle zahlenmäßig durch Auseinanderbrechen vermehren. Auch Tropfen können sich vermehren, ohne damit allerdings großen Einfluss auf die Niederschlagsbildung zu nehmen. Zum einen fließen nicht alle Tropfen beim Stoß mit einem anderen zusammen, sondern können auch bei Durchmessern größer 200 µm auseinanderbrechen; es wurden bis zu 10 Fragmente beobachtet. Zum anderen oszillieren fallende Regentropfen, werden dadurch dynamisch instabil und brechen auf. Der größte in ruhender Luft fallende und noch stabile Tropfen besitzt einen Durchmesser von 9 mm. In der Natur werden allerdings Maximalwerte von nur 2 bis 3 mm beobachtet.“⁷

Dieser und weitere Artikel beschreiben zudem die chemischen und thermodynamischen Prozesse und Wechselwirkungen von Wolkenbildung, Niederschlag und Luftverschmutzung.⁸

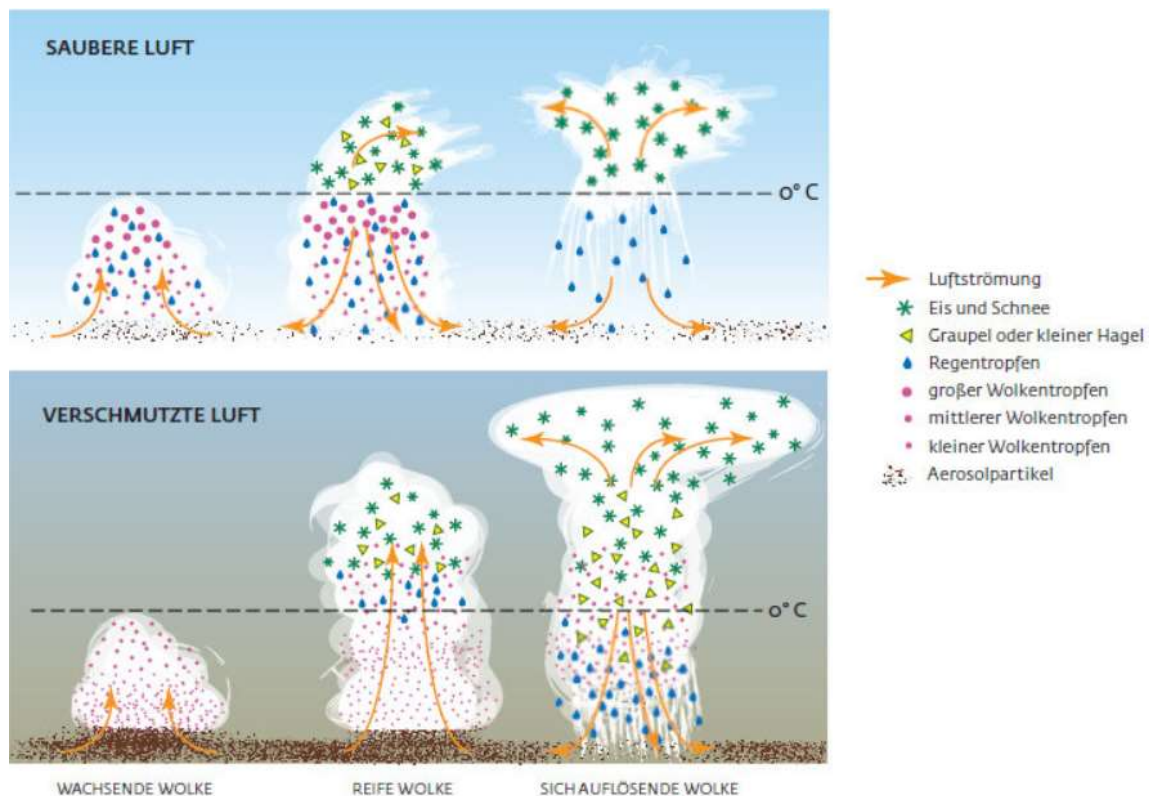
6 Koaleszenz ist das Zusammenfließen von Regen- oder Wolkentropfchen nach Kollision, hauptsächlich hervorgerufen durch unterschiedliche Fallgeschwindigkeiten. Aus: Lexikon der Geowissenschaften, <https://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/koaleszenz/8517>

7 Hauf, T. et al. Physik in unserer Zeit (1991). „Wolken, Klima und Umwelt“, I 22. Jahrg. 1991 / Nr. 2, <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/piuz.19910220206/pdf>

8 Hauf, T. et al. Physik in unserer Zeit (1991). „Wolken, Klima und Umwelt“, I 22. Jahrg. 1991 / Nr. 2, <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/piuz.19910220206/pdf>

Der Einfluss der Luftverschmutzung ist komplex: „In sauberer Atmosphäre bilden sich schnell dicke Regentropfen, die bald abregnen. Nur ein kleiner Teil der Wolkentröpfchen steigt höher, sodass sie gefrieren und davontreiben.“ Bei wachsender Luftverschmutzung erhöht sich die Aerosolkonzentration. Dem aufsteigenden Wasserdampf stehen mehr Kondensationskeime zur Verfügung. Es entstehen mehr, aber kleinere Tropfen. Die Bildung von Regentropfen wird erschwert. Die Wolke regnet sich nicht an ihrem Entstehungsort ab, sondern steigt weiter auf.⁹

Nicht nur Niederschlagsarmut kann durch Luftverschmutzung entstehen, sondern auch starker Niederschlag: „In verschmutzter Atmosphäre (s. Grafik unten) findet der Dampf viele Aerosole, bildet also nur sehr kleine Wolkentröpfchen, die hoch aufsteigen und dabei gefrieren. An den Eisteilchen kondensiert zusätzlicher Dampf. So entstehen energiegeladene Gewitterwolken mit Starkniederschlag.“ Die folgende Grafik verdeutlicht die Zusammenhänge für saubere und verschmutzte Luft.¹⁰



Deutscher Wetterdienst (DWD) (1993). „Wolkenphysik und Wolkendynamik I“, https://www.dwd.de/DE/leistungen/pfb_verlag_promet/pdf_promethefte/23_1_2_pdf.pdf;jsessionid=A078211D7789321707B28CBCD422A4B5.live21063?_blob=publicationFile&v=3

9 Wengenmayr, R., Max-Planck-Institut (MPI) (2010). „Staub, an dem Wolken wachsen“, <https://www.mpg.de/forschung/aerosole-und-wolken>

10 Wengenmayr, R., Max-Planck-Institut (MPI) (2010). „Staub, an dem Wolken wachsen“, <https://www.mpg.de/forschung/aerosole-und-wolken>

Aerosole und Wolkenbildung spielen auch beim Klima eine Rolle. Wolken in sauberer Luft bestehen aus einer relativ geringen Anzahl großer Tröpfchen im Vergleich zu Wolken in verschmutzter Luft. Die Wolken sind etwas dunkler und durchscheinend. Da in Luft mit hohen Aerosolkonzentrationen Wasser leichter an den Partikeln kondensiert, bilden sich eine größere Anzahl kleiner Tröpfchen. Diese Wolken sind wiederum dichter, reflektieren das Licht besser und leuchten weiß.¹¹

Niedrige Wolken kühlen beispielsweise die Erde, indem sie das Sonnenlicht zurück in den Weltraum reflektieren. Sie sind aber auch den von Menschen erzeugten Aerosolen ausgesetzt. Die Partikel können das Reflexionsvermögen der Wolken und die damit verbundene Kühlung durch Veränderung der Tröpfchengröße und der Wassermenge verändern.¹² Forscher haben beispielsweise entdeckt, dass anthropogene Aerosole – im Vergleich zu nicht verschmutzten Wolken – eine schwache durchschnittliche Abnahme des Wolkenwassergehalts verursachen. Der verringerte Wassergehalt schränkt den gesamten Kühleffekt von Aerosolemissionen ein. Da Aerosole nicht so lange in der Luft bleiben wie Kohlendioxid (CO₂), wäre der kühlende Effekt nicht langfristig genug und würde durch das entstandene CO₂ überlagert werden.¹³

3. Forschungsaktivitäten zur Modifikation der Wolkenbildung

Weltweit gibt es eine Vielzahl von Forschungsaktivitäten zum Verständnis der Prozesse und der gezielten Modifikation der Wolkenbildung.¹⁴

Im Jahr 1947 hat der Atmosphärenforscher Bernhard Vonnegut herausgefunden, dass die Keimbildung in Eis mittels Silberjodid beeinflusst werden kann. Seit dem hat es im Rahmen des Geoengineering bzw. Climate Engineering eine Vielzahl von Forschungsaktivitäten gegeben, die

11 NASA earth Observatory (2010). „Aerosols: Tiny Particles, Big Impact“, <https://earthobservatory.nasa.gov/features/Aerosols>

Der Artikel beschreibt auch Messungen zur Aerosolkonzentrationen mittels Satelliten und vom Boden aus.

12 Possner, A. nature (2019). „Weak sensitivity of cloud water to aerosols“, <https://www.nature.com/articles/d41586-019-02287-z>

13 Toll, V. et al. (2019). „Weak average liquid-cloud-water response to anthropogenic aerosols“, <https://www.nature.com/articles/s41586-019-1423-9>

Yirka, B. Physic.org (2019). „Researchers find cooling effect of aerosols in cumulus and MSC clouds twice as high as thought“, <https://phys.org/news/2019-01-cooling-effect-aerosols-cumulus-msc.html>

NASA Earth Observatory (2010). „Aerosols: Tiny Particles, Big Impact“, <https://earthobservatory.nasa.gov/features/Aerosols>

14 Malberg, H. (1997). „Meteorologie und Klimatologie“, Springer Verlag, Berlin, Kapitel 17 „Wetterbeeinflussung“, Seite 342 ff

herausfinden sollten, wie man beispielsweise regenarme Jahreszeiten oder Starkregenphänomene modifizieren könnte.¹⁵

Ein Artikel aus dem letzten Jahrhundert diskutiert die grundlegenden, komplexen Zusammenhänge der Niederschlagsbeeinflussung.¹⁶ Der Autor verweist auch auf die Beschreibung der Niederschlagsvermehrung der American Metrological Society (AMS) im Jahr 1992. Die theoretische Annahme, dass eine Niederschlagsvermehrung von 10 % möglich wäre, konnte bisher nicht bestätigt werden.¹⁷ Eine aktuelle Zusammenfassung der bis dato bekannten Erkenntnisse zur Wetterbeeinflussung haben Autoren im Jahr 2004 zusammengefasst.¹⁸

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unterstützt im Rahmen einer europäischen Forschungs Kooperation die Forschungsinitiative „ACTRIS-D“. ACTRIS-D untersucht atmosphärische Aerosole, Wolken und Spurengase und soll künftig bessere Vorhersagen sowohl für die Luftqualität als auch für Wetter und Klima ermöglichen.¹⁹

Weiter führende Untersuchungen zur Wolkenphysik finden u.a. am Leibnitz-Institut für Troposphärenforschung in der Abteilung „Experimentelle Aerosol- und Wolkenmikrophysik“ statt.²⁰

Chinesische Wissenschaftler arbeiten ebenfalls an der Modifikation der Wolkenbildung. Nach Aussage von Forschern wurden in den letzten Jahren zwar Erfolge erzielt, seien aber für eine kontrollierte Modifikation noch nicht ausreichend.²¹

15 Vonnegut, B. (1947). The nucleation of ice formation by silver iodide“, J. Appl. Physics, 18, 593-595.

16 Wald, A. DWD Promet (1993). „Niederschlagsbeeinflussung am Beispiel der Hagelbekämpfung“, Artikel Nr.13, Seite 87, https://www.dwd.de/DE/leistungen/pbfb_verlag_promet/pdf_promethefte/23_3_pdf.pdf;jsessionid=A078211D7789321707B28CBCD422A4B5.live21063?_blob=publicationFile&v=3

17 American Metrological Society (AMS) (1992). Planned and inadvertent weather modification. Bull. Amer. Meteor. Soc., 73, 331-337

18 American Metrological Society (AMS) (2004). „Weather Modification - A Scenario for the Future“, <https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/BAMS-85-1-51>

19 ACTRIS European Research Infrastructure for the observation of Aerosol, Clouds and Trace Gases (2015). <https://www.actris.eu/>

20 Leibnitz-Institut für Troposphärenforschung (TROPOS) (2020). „Labor- und Felduntersuchungen zu flüssigen Wolken“, <https://www.tropos.de/institut/abteilungen/experimentelle-aerosol-und-wolkenmikrophysik/ag-wolken/labor-und-felduntersuchungen-zu-fluessigen-wolken>

Datensammlung zur Größe und Anzahl atmosphärischer Wolkenkondensationskeime (CCN): Leibnitz Leibnitz-Institut für Troposphärenforschung (TROPOS) (2020). „Wolkenkondensationskeime: Charakterisierung im Feld“, <https://www.tropos.de/forschung/aerosol-wolken-wechselwirkungen/prozessstudien-auf-kleinen-zeit-und-raumskalen/aerosol-und-wolken-mikrophysikalische-prozesse/wolkenkondensationskeime-charakterisierung-im-feld>

21 Guo, X, et al. (2015). „Advances in Cloud Physics and Weather Modification in China“, Advances in Atmospheric Sciences 32 (2), https://www.researchgate.net/publication/269637380_Advances_in_Cloud_Physics_and_Weather_Modification_in_China

Die World Meteorological Organization (WMO) hat 2016 einen Bericht über die weltweiten Forschungsaktivitäten zur Wettermodifikation zusammengestellt.²² Insbesondere das Projekt „Cloud Aerosol Interaction Precipitation Enhancement Experiment“, CAIPEEX, befasst sich mit den Aktivitäten zur Impfung von Wolken über Indien und deren wissenschaftlichen Erkenntnissen.²³

Am National Center for Atmospheric Research (NCAR) untersuchen Forscher derzeit Grundlagen über die Auswirkungen von Umgebungs- und Seeding-Aerosolen auf Wolken- und Niederschlagsprozesse.²⁴

Die Experten der American Meteorological Society vermuten beispielsweise auch, dass niedrige unterkühlte und Mischphasen-Wolken beträchtlich zur verstärkten Erwärmung der Arktis beitragen. Sie gingen der Frage nach, auf welchen arktischen Aerosolpartikeln sich diese Wolken formen und was die Quellen dieser Wolkenkondensationskerne sind.²⁵

Darüber hinaus gibt es ein Spektrum von Forschungsaktivitäten, die mit dem Verständnis und der Modifikation von Wolken und der Wetter- und Klimaforschung im Zusammenhang stehen.²⁶

Im Bericht des Büros für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) zum Geoengineering fasst ein Abschnitt die Historie der Wettermodifikation und des Climate Engineering zusammen. Der Bericht beschreibt auch die Idee der Wolkenaufhellung. Dabei sollen sich

22 World Meteorological Organization (WMO) (2016). https://www.wmo.int/pages/prog/arep/wwrp/new/documents/WMO_ET_Weather_Modification_Research.pdf

23 Kulkarni, J. R., WMO (2012). „Overview of CAIPEEX – Cloud-aerosol interaction experiment over Indian region“, Kurzfassung: https://www.wmo.int/pages/prog/arep/wwrp/new/documents/OBS.Kulkarni_India.pdf, Langfassung: https://www.jstor.org/stable/24083888?seq=12#metadata_info_tab_contents

24 National Center for Atmospheric Research (NCAR) (2020). „Aerosols, Clouds and Precipitation Studies“, <https://ral.ucar.edu/expertise/aerosols-clouds-and-precipitation-studies>

25 Wendisch, M., (2019). „The Arctic Cloud Puzzle: Using ALOUD/PASCAL Multiplatform Observations to Unravel the Role of Clouds and Aerosol Particles in Arctic Amplification“, <https://journals.ametsoc.org/doi/full/10.1175/BAMS-D-18-0072.1>

26 Erhöhung der Keimbildungsrate im Vergleich zur neutralen Keimbildung um ein bis zwei Größenordnungen, durch Ionen aus der galaktischen kosmischen Strahlung: Kirkby, J. et al. Nature (2016). „Ion-induced nucleation of pure biogenic particles“, <https://www.nature.com/articles/nature17953#Sec1>

Entwicklung eines Modells, dass Niederschlagsarmut und Starkregen durch Erhöhung der Aerosolkonzentration erklären soll: Rosenfeld, D. et al. Science (2008). „Flood or Drought: How Do Aerosols Affect Precipitation?“, <https://science.sciencemag.org/content/321/5894/1309.full>

Satellitengestützte Messungen zeigen, dass die Koaleszenz von Wolkentropfen und die Bildung von Eisniederschlag in verschmutzten Wolken gehemmt werden: Rosenfeld, D. Science (2000). „Suppression of Rain and Snow by Urban and Industrial Air Pollution“, <https://science.sciencemag.org/content/287/5459/1793>

Modellsimulationen zum Einfluss der reinen biogenen Partikelbildung in der vorindustriellen und heutigen Zeit: Gordon, H., PNAS (2016). „Reduced anthropogenic aerosol radiative forcing caused by biogenic new particle formation“, <https://www.pnas.org/content/113/43/12053.abstract>

tiefliegende Wolken über den Ozeanen durch Einsprühen von Seesalzkristallen aufhellen, wodurch diese mehr Sonnenlicht reflektieren sollten.²⁷

Die vom Bundesministerium für Bildung und Forschung in Auftrag gegebene Sondierungsstudie „Gezielte Eingriffe in das Klima? Eine Bestandsaufnahme der Debatte zu Climate Engineering“ im Jahr 2011, zeigte erste Ansatzpunkte bezüglich der mit Geo/Climate Engineering verbundenen Wirkungen, Nebenwirkungen und Risiken. Nach Auswertung der Ergebnisse hat sich gezeigt, dass „für keine derzeit diskutierten Technologien eine zuverlässige Bewertung der naturwissenschaftlichen Effektivität und der technischen Machbarkeit vorgenommen werden kann“.²⁸ Ein Artikel diskutiert die Thematik vor einem aktuellen Hintergrund.²⁹

Grundsätzliche Fragen zu Definition, Risiken und Studien des Themenkreises „Geoengineering“ beantwortet die Bundesregierung im Rahmen von kleinen Anfragen der SPD-Fraktion³⁰ und der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN.³¹ In Deutschland wurden beispielsweise Projekte mit Bezug zu Climate Engineering im Rahmen eines Schwerpunktprogramms der DFG gefördert („Climate Engineering: Risks, Challenges, Opportunities?“ - SPP 1689).³²

Eine aktuelle OECD-Studie zur globalen Analyse der wirtschaftlichen Folgen des Klimawandels und insbesondere der Luftverschmutzung betrachtet einen Zeitraum, der bis ins Jahr 2060 reicht.³³

-
- 27 Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) (2014). Endbericht zum TA-Projekt „Geoengineering“, „Climate Engineering“, <https://www.tab-beim-bundestag.de/de/pdf/publikationen/buecher/care-2014-159.pdf>, Seite 49-54
- 28 Umweltbundesamt (UBA) (2011). „Geo-Engineering - wirksamer Klimaschutz oder Größenwahn?, Methoden - Rechtliche Rahmenbedingungen - Umweltpolitische Forderungen“, <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/4125.pdf>
- 29 University College of London (2020). „The right dose of geoengineering could reduce climate change risks, study says“, <https://phys.org/news/2020-03-dose-geoengineering-climate.html>
- 30 Antwort der Bundesregierung zur Kleinen Anfrage (2012). „Geoengineering/Climate-Engineering“ BT-Drs 17/10311, <http://dip21.bundestag.btg/dip21/btd/17/103/1710311.pdf>
- 31 Antwort der Bundesregierung zur Kleinen Anfrage (2018). „Geoengineering und Klimakrise“, BT-Drs 19/03149, <http://dipbt.bundestag.de/doc/btd/19/031/1903149.pdf>
- 32 Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) (2015). „Schwerpunktprogramm „Climate Engineering: Risks, Challenges Opportunities?“ (SPP 1689)“, https://www.dfg.de/foerderung/info_wissenschaft/2015/info_wissenschaft_15_44/index.html
- 33 OECD (2019). „Economic interactions between climate change and outdoor air pollution“, <https://www.oecd-ilibrary.org/docserver/8e4278a2-en.pdf?expires=1589791180&id=id&accname=guest&checksum=920ED69D26DE406E3DEBE7D14AE480A3>

4. Historische Aufzeichnungen zu Niederschlagsmenge und Niederschlagsintensität

In Deutschland begannen die Wetteraufzeichnungen im 18. Jahrhundert mit täglichen Temperaturmessungen. Umfangreiche Wetteraufzeichnungen gibt es seit dem Jahr 1879. Der Deutsche Wetterdienst hält in seinem Archiv Klimadaten für Deutschland für 83 Messstationen für Monats- und Tageswerte zur Verfügung. Es stehen Messwerte und Hinweise zur Datenerhebung seit Beginn der Aufzeichnungen zum Download bereit.³⁴

Im Jahr 1988 wurde in Deutschland im DWD auf Anregung der World Meteorological Organization (WMO) das Weltzentrum für Niederschlagsklimatologie (WZN) eingerichtet. Das Zentrum liefert globale monatliche Niederschlagsanalysen³⁵ für die Klimaüberwachung und Klimafor-schung im Rahmen des Weltklimaforschungsprogramms (WCRP) und des globalen Klimabeobachtungssystems (GCOS). Es verfügt über die weltweit umfangreichste monatliche Nieder-schlagsdatenbasis mit Daten von mehr als 80.000 Stationen. Datengrundlage für die Analysepro- dukte des WZN sind Niederschlagsmessungen aller verfügbaren Stationen auf der Erdoberflä- che.³⁶

34 Deutscher Wetterdienst (DWD) (2020). „Klimadaten Deutschland - Monats- und Tageswerte (Archiv)“, <https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimadatendeutschland/klarchivtagmonat.html>

Die Daten stehen in der Text-Datei „produkt_klima_monat“ enthalten. In der ersten Zeile steht die Spaltenüber-schriften: Stationsnummer, Messbeginn und -ende und die Messparameter wie „MO_RR“. Die Bezeichnung der Parameter und deren Beschreibung sind in der Datei „Metadaten_Parameter_klima_monat“ enthalten. (Beispiel: MO_RR = Monatssumme der Niederschlagshöhe.)

35 Deutscher Wetterdienst (2020). „GPCC VISUALIZER“, <http://kunden.dwd.de/GPCC/Visualizer>

Niederschlagsanalysen https://www.dwd.de/DE/fachnutzer/wasserwirtschaft/ku42/publikationen/Nieder-schlagsanalysen.pdf?_blob=publicationFile&v=2

36 Näheres zum WZN unter <http://gpcc.dwd.de>

5. Quellenverzeichnis

ACTRIS European Research Infrastructure for the observation of Aerosol, Clouds and Trace Gases (2015). <https://www.actris.eu/>

American Metrological Society (AMS) (1992). Planned and inadvertent weather modification. Bull. Amer. Mete-or. Soc., 73, 331-337

American Metrological Society (AMS) (2004). „Weather Modification - A Scenario for the Future“, <https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/BAMS-85-1-51>

Antwort der Bundesregierung zur Kleinen Anfrage (2012). „Geoengineering/Climate-Engineering“ BT-Drs 17/10311, <http://dip21.bundestag.btg/dip21/btd/17/103/1710311.pdf>

Antwort der Bundesregierung zur Kleinen Anfrage (2018). „Geoengineering und Klimakrise“, BT-Drs 19/03149, <http://dipbt.bundestag.de/doc/btd/19/031/1903149.pdf>

Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) (2014). Endbericht zum TA-Projekt „Geoengineering“, „Climate Engineering“, <https://www.tab-beim-bundestag.de/de/pdf/publikationen/buecher/care-2014-159.pdf>

Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) (2015). „Schwerpunktprogramm „Climate Engineering: Risks, Challenges Opportunities?“ (SPP 1689)“, https://www.dfg.de/foerderung/info_wissenschaft/2015/info_wissenschaft_15_44/index.html

Deutscher Wetterdienst (2020). „GPCC VISUALIZER“, <http://kunden.dwd.de/GPCC/Visualizer>
<http://gpcc.dwd.de>

Deutscher Wetterdienst (2020). „Wolkenbildung“, https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/begriffe/W/Wolkenbildung_pdf.pdf?blob=publicationFile&v=4

Deutscher Wetterdienst (DWD) (1993). „Wolkenphysik und Wolkendynamik I“, https://www.dwd.de/DE/leistungen/pbfb_verlag_promet/pdf_promethefte/23_1_2_pdf.pdf;sessionid=A078211D7789321707B28CBCD422A4B5.live21063?blob=publicationFile&v=3

Deutscher Wetterdienst (DWD) (2020). „Klimadaten Deutschland - Monats- und Tageswerte (Archiv)“, <https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimadatendeutschland/klarchivtagmonat.html>

Deutscher Wetterdienst (DWD) (2020). „Kondensationskeime“, <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=101334&lv3=101474>

Deutscher Wetterdienst „Niederschlagsanalysen“ <https://www.dwd.de/DE/fachnutzer/wasserwirtschaft/ku42/publikationen/Niederschlagsanalysen.pdf?blob=publicationFile&v=2>

Gordon, H., PNAS (2016). „Reduced anthropogenic aerosol radiative forcing caused by biogenic new particle formation“, <https://www.pnas.org/content/113/43/12053.abstract>

Guo, X, et al. (2015). „Advances in Cloud Physics and Weather Modification in China“, Advances in Atmospheric Sciences 32 (2), https://www.researchgate.net/publication/269637380_Advances_in_Cloud_Physics_and_Weather_Modification_in_China

Hauf, T. et al., Physik in unserer Zeit (1991). „Wolken, Klima und Umwelt“, I 22. Jahrg. 1991 / Nr. 2, <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/piuz.19910220206/pdf>

Hupfer, et al. (2013). „Witterung und Klima“, Springer-Verlag, https://books.google.de/books?id=qJ59BwAAQBAJ&pg=PA6&dq=Koaleszenzwachstum&hl=de&source=gbs_selected_pages&cad=2#v=onepage&q=Koaleszenzwachstum&f=false

Kirkby, J. et al. Nature (2016). „Ion-induced nucleation of pure biogenic particles“, <https://www.nature.com/articles/nature17953#Sec1>

Kristensen et al. (2012). „Hygroscopic growth and CCN activity of HULIS from different environments“, J. Geophys. Res., 117(22), doi:10.1029/2012JD018249, <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2012JD018249>

Kulkarni, J. R., WMO (2012). „Overview of CAIPEEX – Cloud-aerosol interaction experiment over Indian region“, Kurzfassung: https://www.wmo.int/pages/prog/arep/wwrp/new/documents/OBS.Kulkarni_India.pdf, Langfassung: https://www.jstor.org/stable/24083888?seq=12#metadata_info_tab_contents

Leibnitz-Institut für Troposphärenforschung (TROPOS) (2020). „Aerosol-Wolken-Wechselwirkungen“, <https://www.tropos.de/forschung/aerosol-wolken-wechselwirkungen/prozessstudien-auf-kleinen-zeit-und-raumskalen>

Leibnitz-Institut für Troposphärenforschung (TROPOS) (2020). „Labor- und Felduntersuchungen zu flüssigen Wolken“, <https://www.tropos.de/institut/abteilungen/experimentelle-aerosol-und-wolkenmikrophysik/ag-wolken/labor-und-felduntersuchungen-zu-fluessigen-wolken>

Leibnitz-Institut für Troposphärenforschung (TROPOS) (2020). „Wolkenkondensationskeime: Charakterisierung im Feld“, <https://www.tropos.de/forschung/aerosol-wolken-wechselwirkungen/prozessstudien-auf-kleinen-zeit-und-raumskalen/aerosol-und-wolken-mikrophysikalische-prozesse/wolkenkondensationskeime-charakterisierung-im-feld>

Lexikon der Geowissenschaften, <https://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/koaleszenz/8517>

Malberg, H. (1997). „Meteorologie und Klimatologie“, Springer Verlag, Berlin

NASA earth Observersatory (2010). „Aerosols: Tiny Particles, Big Impact“, <https://earthobservers.nasa.gov/features/Aerosols>

National Center for Atmospheric Research (NCAR) (2020). „Aerosols, Clouds and Precipitation Studies“, <https://ral.ucar.edu/expertise/aerosols-clouds-and-precipitation-studies>

OECD (2019). „Economic interactions between climate change and outdoor air pollution“, <https://www.oecd-ilibrary.org/docserver/8e4278a2-en.pdf?expires=1589791180&id=id&ac-name=guest&checksum=920ED69D26DE406E3DEBE7D14AE480A3>

Possner, A., nature (2019). „Weak sensitivity of cloud water to aerosols“, <https://www.nature.com/articles/d41586-019-02287-z>

Pruppacher, H.R., et al. (1998). „Microphysics of Clouds and Precipitation, Aerosol Science and Technology“, 28:4, 381-382, DOI: 10.1080/02786829808965531

Rosenfeld, D. et al., Science (2008). „Flood or Drought: How Do Aerosols Affect Precipitation?“, <https://science.sciencemag.org/content/321/5894/1309.full>

Rosenfeld, D., Science (2000). „Suppression of Rain and Snow by Urban and Industrial Air Pollution“, <https://science.sciencemag.org/content/287/5459/1793>

Toll, V. et al. nature (2019). „Weak average liquid-cloud-water response to anthropogenic aerosols“, <https://www.nature.com/articles/s41586-019-1423-9>

Umweltbundesamt (UBA) (2011). „Geo-Engineering - wirksamer Klimaschutz oder Größenwahn?, Methoden - Rechtliche Rahmenbedingungen - Umweltpolitische Forderungen“, <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/4125.pdf>

University College of London (2020). „The right dose of geoengineering could reduce climate change risks, study says“, <https://phys.org/news/2020-03-dose-geoengineering-climate.html>

Vonnegut, B. (1947). The nucleation of ice formation by silver iodide“, J. Appl. Physics, 18, 593-595.

Wald, A. DWD Promet (1993). „Niederschlagsbeeinflussung am Beispiel der Hagelbekämpfung“, https://www.dwd.de/DE/leistungen/pbfb_verlag_promet/pdf_promethefte/23_3_pdf.pdf;jsessionid=A078211D7789321707B28CBCD422A4B5.live21063?_blob=publicationFile&v=3

Wendisch, M., (2019). „The Arctic Cloud Puzzle: Using ACLOUD/PASCAL Multiplatform Observations to Unravel the Role of Clouds and Aerosol Particles in Arctic Amplification“, <https://journals.ametsoc.org/doi/full/10.1175/BAMS-D-18-0072.1>

Wengenmayr, R., Max-Planck-Institut (MPI) (2010). „Staub, an dem Wolken wachsen“, <https://www.mpg.de/forschung/aerosole-und-wolken>

World Meteorological Organization (WMO) (2016). https://www.wmo.int/pages/prog/arep/wwrp/new/documents/WMO_ET_Weather_Modification_Research.pdf

Yirka, B. Physic.org (2019). „Researchers find cooling effect of aerosols in cumulus and MSC clouds twice as high as thought“, <https://phys.org/news/2019-01-cooling-effect-aerosols-cumulus-msc.html>