

Naturwissenschaftlicher  
Verein für das Fürstentum  
Lüneburg von 1851 e. V.

# Jahrbuch

*Band 50*



Herausgeber: Andreas Fichtner, Werner Härdtle & Johannes Prüter  
2026

Herausgeber:  
Andreas Fichtner, Werner Härdtle & Johannes Prüter  
Satz & Lektorat: Sabine Arendt, lektoratmitformat@posteo.de  
Titelfoto: Johannes Prüter  
Designvorlagen: borowiakzieheKG  
Druck: Bartels Druck GmbH, Lüneburg



© 2026  
Naturwissenschaftlicher Verein  
für das Fürstentum Lüneburg von 1851 e. V.  
Wandrahmstraße 10  
21335 Lüneburg  
<http://www.naturwissenschaftlicher-verein-lueneburg.de>

ISSN: 0340-4374

# Inhalt

Vorwort	5
Marion Welsch	
Wer war Heinrich Steinvorth? – Biographisches zum Mitbegründer des Naturwissenschaftlichen Vereins in Lüneburg	9
Ulrich Gebhard	
Gutes Leben und gute Orte – Natur als Erfahrungsraum und Sinninstanz	21
Detlef Schumacher & Gerhard Stein	
Der „Riesenammonit“ vom Zeltberg im Museum Lüneburg	43
Gerhard Stein	
Lüneburg als Typlokalität miozäner Nordsee-Mollusken	55
Markus Quante	
Wolken – ihre Bedeutung für Wetter, Klima und Umwelt	73
Carsten Hobohm	
Jahrhundert-Dürre und Rekordernte 2025 in Norddeutschland?	101
Ute Thiergärtner & Florian Bibelriether	
Amphibienschutz in der Elbtalaue – Von der besonders geschützten Rotbauchunke zur Massenart Moorfrosch	123
Heike Brenken	
Heiden - Schnucken - Schäfer – vom Aussterben bedroht?	141

Elke Bergmann & Ingrid Lönngren	
Das Heide-Herbar der Käte Lampert – „Flora der Lüneburger Heide und ihrer Ränder“	155
Angelika Schwabe	
Ein Keimlingsherbarium der Pflanzensoziologen Reinhold Tüxen und Otti Wilmanns	195
Studienfahrten und Exkursionen 2024 und 2025	201
Vorträge und Kolloquien in den Wintersemestern 2023/24, 2024/25 und 2025/26	203

# Vorwort

Wenn dieser 50. Band des Jahrbuchs erscheint, begeht der „Naturwissenschaftliche Verein für das Fürstentum Lüneburg“ sein 175-jähriges Jubiläum. Weitsichtige Menschen waren es, die sich am 30. März 1851 am Rande der Stadt Lüneburg trafen, um sich, wie es in den Gründungsstatuten heißt, „der Förderung und Verbreitung der Kenntnisse der Natur, ihrer Erzeugnisse und der Benutzung derselben, mit besonderer Berücksichtigung des Fürstentums Lüneburg“ zu widmen. Im zweiten Paragraphen heißt es dann: „Mittel dazu sind a) eine naturhistorische Sammlung, b) regelmäßige Zusammenkünfte zu mündlichen Vorträgen und Besprechungen, c) öffentliche Vorträge, d) schriftliche Abhandlungen.“

Ziele und Aufgaben des Vereins blieben über diese lange Zeit trotz zum Teil erheblicher Wandlungen der Rahmenbedingungen weitgehend stabil. Gleichwohl änderten sich die Schwerpunkte.

Waren es zunächst die neuen Entdeckungen und Entwicklungen in den Naturwissenschaften, die es zu vermitteln und zu besprechen galt, so wurde diese primäre Neugier mehr und mehr bezogen auf detaillierte Einblicke in die Naturkunde der Region und dabei schließlich auch immer deutlicher begleitet von der Sorge um den zunehmend nachlässigen Umgang mit unseren natürlichen Lebensgrundlagen und den Fortbestand des Lebens in Natur und Landschaft. Das kann in der Reihe unserer Jahreshefte und Jahrbücher gut nachvollzogen werden. Das prägt auch den vorliegenden 50. Band unserer Jahrbuchreihe.

Wir freuen uns, dass wir mit dem ersten Beitrag dieses Bandes Heinrich Steinvorth, einem der Gründungsväter unseres Naturwissenschaftlichen Vereins, näherkommen können. Marion Welsch, Autorin aus Klein Machnow, fand Zugang zu den umfangreichen Tagebuchaufzeichnungen ihres Urgroßvaters und konnte so das Lebensbild eines Mannes zeichnen, der die ersten Jahrzehnte unseres Vereins im 19. Jahrhundert maßgeblich geprägt hat.

Auch er wusste als Pädagoge bereits um die Bedeutung der Natur für die menschliche Entwicklung, die von Ulrich Gebhard im zweiten Beitrag dieses Bandes aus heutiger Perspektive und auf Grundlage eigener Forschungen zur Entwicklungspsychologie beleuchtet wird.

Mit den weiteren Arbeiten in diesem Band werden Themen in einer inhaltlichen Vielfalt angesprochen, wie sie in unseren Jahrbüchern Tradition hat: Sie reichen von den paläontologischen Besonderheiten Lüneburgs über Klima- und Wetterphänomene, deren Auswirkungen auf Ökosysteme unserer Region, Fragen des Artenschutzes und der Landschaftspflege bis hin zu musealen Sammlungstätigkeiten am Beispiel von Herbarien aus früherer Zeit.

Diese Themenvielfalt entspricht nach wie vor den in der Satzung verankerten, aber immer wieder auch neu zu deutenden und mit Leben zu füllenden Aufgaben des Naturwissenschaftlichen Vereins, nämlich Naturwissenschaft und regionale Naturkunde über zeitgemäße Bildungsmaßnahmen, Exkursionen, Führungen, regionale Forschungsarbeiten und Publikationen sowie über museale Dokumentation zu fördern und zu unterstützen.

So wollen wir auch das im Jahr 2026 anstehende Vereinsjubiläum zum 175-jährigen Bestehen dergestalt begehen, dass wir vom 6.-12. Juni eine Jubiläumswoche ausrichten, in der Mitglieder und Unterstützer des Naturwissenschaftlichen Vereins vielfältige Angebote aus diesem Spektrum unterbreiten.

Die Veranstaltungen, die in dieser Woche in und um Lüneburg angeboten werden, sind im folgenden Programm dokumentiert:

Die Herausgeber

# JUBILÄUMS- WOCHE

6. bis 12. Juni 2026

# 175 Jahre



Naturwissenschaftlicher  
Verein für das  
Fürstentum Lüneburg  
von 1851 e.V.

## Zur Einführung

Vor 175 Jahren, am 30. März 1851, setzten sich 26 Menschen aus Lüneburg zusammen, um einen Verein ins Leben zu rufen, der sich, wie es in den ersten Statuten hieß, „der Förderung und Verbreitung der Kenntnisse der Natur, ihrer Erzeugnisse und der Benutzung derselben, mit besonderer Berücksichtigung des Fürstentums Lüneburg“ widmen wollte. Das Fürstentum ist Geschichte aber der Naturwissenschaftliche Verein in Lüneburg besteht, ist gewachsen, und im Wandel der Zeit seither seinen Zielen stets verbunden geblieben.

Aus diesem Anlass wollen wir eine Jubiläumswoche ausrichten, in der wir konzentriert Veranstaltungen zur Naturkunde unserer Region anbieten.

Wir laden Sie herzlich ein zur Teilnahme an der feierlichen Auftaktveranstaltung am 6. Juni sowie zu den Vorträgen, Führungen und Exkursionen an den folgenden Tagen!

Die frühabendlichen Exkursionen sind in der Regel auf ca. 2 h terminiert und für individuelle Anfahrt vorgesehen. Die Treffpunkte sind im Programm beschrieben.

Wenn Sie an der Auftaktveranstaltung am 6. Juni, dem Abschlussposium am 12. Juni oder an Exkursionen teilnehmen möchten, bitten wir um Zusage an unsere Geschäftsstelle bis zum 20. Mai!

Wenn Sie Mitfahrgelegenheiten zu den Treffpunkten der Exkursionen anbieten möchten oder wünschen, teilen Sie uns dies bitte bei Ihrer Anmeldung mit. Wir würden uns ggf. um Vermittlung bemühen.

## Samstag, 6. Juni 2026

### 17:50 Uhr Auftaktveranstaltung

Marcus-Heinemann-Saal, Museum Lüneburg

**Begrüßung** Prof. Dr. Johannes Prüter

**Grüßworte** Prof. Dr. Heike Düselder,  
OB Claudia Kalisch, Hansestadt  
Lüneburg  
Landrat Jens Böther, Landkreis  
Lüneburg

**Kurzvortrag** Wegmarken der Vereinsgeschichte  
Dr. Christoph Hinkelmann,  
Mathias Hinsch

**Kurzvortrag** Welche Rolle spielt ein Naturwissen-  
schaftlicher Verein für die Natur-  
wissenschaft und die Gesellschaft von  
heute?  
Prof. Dr. Werner Härdtle

**Kurzvortrag** Der Naturwissenschaftliche Verein in  
Lüneburg - ein durchaus ernstes  
Vergnügen  
Dr. Wolfram Eckloff

Anschließend geselliges Beisammensein mit Snacks  
und Getränken

Marcus Heinemann-Saal, Eingang Wandrahmstraße  
Willy-Brandt-Straße 1, 21335 Lüneburg



## Sonntag, 7. Juni 2026

### 8:00 Uhr

Was singt denn da? Vogelstimmenführung auf dem  
Lüneburger Michaelisfriedhof

Treffpunkt: Haupteingang Michaelisfriedhof,  
Lauensteinstraße

Frank Allmer

### 15:00 Uhr

Wo ist eigentlich der Rattenkönig geblieben?  
Naturkundliche Objekte aus 175 Jahren Naturwissen-  
schaftlicher Verein. Führung durch die Abteilung  
Naturkunde des Museums Lüneburg.

Christina Broesike, Museum Lüneburg

### 16:30 Uhr

Bildervortrag/Multivision im Markus-Heinemann-Saal:  
Unser Naturerbe - Lüneburg von der Heide bis in die  
Elbtalau. Die großräumigen Naturschätze der Region  
Lüneburg ins Bild gesetzt.

Jürgen Borris, Holzminden

### 17:50 Uhr

Stadtökologischer Rundgang (ca. 1,5 Stunden). Bestand  
und Erhalt des Stadtgrüns in Lüneburg im Hinblick auf  
die Entwicklung des innerstädtischen Klimas. Maß-  
nahmen des städtischen Klima-Anpassungsprojekts,  
insbesondere die des Hitzeschutzes für Mensch, Flora  
und Fauna.

Treffpunkt: Museumsfoyer

Volkmar Ziese

## Montag, 8. Juni 2026, 17:50 Uhr

### Wald bei Reppenstedt - Vom Leben der Roten Waldameisen

Dr. Wolfram Eckloff



Waldameisen sind in der Lebensgemeinschaft des  
Waldes von dominanter Bedeutung. Ihr soziales  
Verhalten und ihre Lebensweise bieten auch für Laien  
spannende Beobachtungsmöglichkeiten.

Treffpunkt: Reppenstedt, Haltestelle der Linie 5013 in  
der Gerhard-Hauptmann-Str./Heinrich-Heine-Straße

## Montag, 8. Juni 2026, 17:50 Uhr

### Verborgen, bunt und meistens sauer - die Böden unserer Heidelandschaft und ihre Lebensgemeinschaften

Prof. Dr. Werner Härdtle



Die Exkursion führt in die Kronsbergheide bei Amelings-  
hausen. Sie bietet Einblick in die Vielfalt und An-  
passungsfähigkeit der Pflanzenwelt auf den kargen  
Heideböden und die aktuellen Bemühungen um den  
Schutz der einst so weit verbreiteten Lebensgemein-  
schaften unserer Region.

Treffpunkt: Parkplatz Kronsbergheide am Lopausee  
Amelingshausen

## Dienstag, 9. Juni 2026, 17:50 Uhr

### Die Breetzer Sandgrube - Hotspot der Biodiversität

Jann Wübberhorst, Sören Frischmuth



Ein ehemaliges Sandabbaugebiet zwischen Breetze  
und Nindorf mit besonderen Standortverhältnissen hat  
sich zu einem äußerst artenreichen Lebensraum  
entwickelt. Renaturierungs- und Pflegemaßnahmen  
werden vorgestellt.

Treffpunkt: Abzweigung Rippenberg von Ellringer Straße;  
Ortsausgang Breetze

## Dienstag, 9. Juni 2026, 17:50 Uhr

### Heil- und Färbepflanzen im Lüne- r Klostergarten

Dr. Rolf-Dieter Aye



Der Kräutergarten vereint in großer Vielfalt traditio-  
nelle Heilpflanzen und die auch zur Herstellung der  
Wandteppiche gebräuchlichen Färbepflanzen.  
Auch die Bedeutung der Pflanzen als Arzneimittel,  
früher wie heute, wird erläutert.

Treffpunkt: Eingang Kräutergarten des Klosters,  
Bus 5007 bis zur Haltestelle "Lüner Weg"

**Mittwoch, 10. Juni 2026, 17:50 Uhr**

**Wald erleben und verstehen - Ein Streifzug durch die Vielfalt des Waldes**

Prof. Dr. Andreas Fichtner



Der Naturwald Forellenbachtal umfasst eine naturnahe Bachau mit einem Mosaik unterschiedlicher Waldlebensräume. Ein abendlicher Spaziergang bietet Einblicke in Strukturen, Arten und Besonderheiten dieser Landschaft.

Treffpunkt: Waldengang „Am Silberberg 8“ in Grünhagen, direkt am Ende der letzten Häuser vor dem Wald (53.150918, 10.452514)

**Mittwoch, 10. Juni 2026, 17:50 Uhr**

**Zur Vielfalt und Herkunft nordischer Geschiebe in der Region Lüneburg**

Renate Bönig-Müller



Auf einem wunderschön am Wald gelegenen 3.000m<sup>2</sup> Grundstück befinden sich ungefähr 100 größere und teilweise polierte Geschiebesteine. 9 davon waren auch auf der Landesgartenschau 2006 zu sehen. Auf dieser Garteneckursion werden Entstehung, Art und Herkunft der hier zusammengetragenen größtenteils Eiszeitrelikte erläutert.

Treffpunkt: An der Ratsforst 10, 21335 Lüneburg  
Anfahrt per Fahrrad, Auto oder Bus Linie 5009

**Donnerstag, 11. Juni 2026, 17:50 Uhr**

**Flora des Lüneburger Kalkbergs**

Adrian Kreft



Dank seiner besonderen geologischen Formation bietet der Lüneburger Kalkberg vielen Pflanzenarten Lebensraum, die kaum anderswo im norddeutschen Tiefland vorkommen. Insbesondere an den süd-exponierten Hängen finden Arten mit trocken-warmen Standortansprüchen Lebensraum. Die Exkursion zeigt das breite Spektrum der Besonderheiten.

Treffpunkt: Lüneburg, Eingang Schlöbckeweg

**Donnerstag, 11. Juni 2026, 17:50 Uhr**

**Abendexkursion in das NSG Lüneburger Heide, Landschaftspflegehof Tütsberg und Vogelwelt der Heidelandschaft**

Prof. Dr. Johannes Prüter, Dr. Heike Brenken, Dr. Andreas Koopmann, VNP



Auf der Exkursion erhalten wir zunächst Einblicke in die Schafhaltung und die seit Jahrzehnten praktizierte Form ökologischer Landwirtschaft im NSG Lüneburger Heide. Im Weiteren geht es um die Vogelwelt der Heide; bei gutem Wetter und für alle, die mögen, bis zum Erwachen der Nachtschwalben in der Dämmerung des späten Abends. Rucksackverpflegung empfohlen.

Treffpunkt: Parkplatz Hof Tütsberg, 29640 Schneverdingen/Heber

**Freitag, 12. Juni 2026, 13:30 - 18:30 Uhr**

**Abschluss Symposium mit Kurzvorträgen zur Naturschutzarbeit öffentlicher/öffentlich geförderter Stellen in der Region Lüneburg**

Marcus-Heinemann-Saal, Museum Lüneburg

**13:30 Uhr**

**Begrüßung und Einführung**

Prof. Dr. Johannes Prüter

**13:45 Uhr** (jeweils 15 min)

**Aktuelle Einblicke in die Naturschutzarbeit**

**des Landkreises Lüneburg**

- zum Wiesenvogelschutz  
Elke Benecke
- zu Naturschutzmaßnahmen rund um das Turniergelände Luhmühlen  
Jonas Pape
- zu Schutzmaßnahmen auf dem Artenburger Werder  
Sören Frischmuth

**zu Aktivitäten der Naturschutzstiftung des Landkreises**

Ole Dierssen

**der Betriebsstelle Lüneburg des NLWK**

Leonie Braasch, Hannah Burmester

**Pause**

**der Biosphärenreservatsverwaltung Niedersächsische Elbtal**

Jann Wübbenhorst

- Maßnahmen zum Amphibienschutz in der Niedersächsischen Elbtal  
Ute Thiergärtner, Florian Bibelriether

**Projekte zu wissenschaftlichen Grundlagen des Naturschutzes**

Prof. Dr. Vicky Temperton, Institut für Ökologie der Leuphana Universität

**Pause**

**Aktuelle Einblicke in die Naturschutzarbeit**

**des Bereichs Grünplanung der Hansestadt Lüneburg**

Constanze Keuter

- des Stadtforstamts Lüneburg

Per-Ole Wittenburg

**der Ökologischen Station Flusslandschaft Ilmenau, Luhe und Netze des BUND**

Dr. Olaf Anderjón

**des Niedersächsischen Forstamts Sellhorn**

- Naturdienstleistungen in den Niedersächsischen Landesforsten - Entwicklung des Kompensationsflächenpools „Grasgehege“

Nils Mischke

**ca. 18:30 Uhr**

**Zusammenfassung und Ende der Veranstaltung**



**Naturwissenschaftlicher Verein**

für das Fürstentum Lüneburg von 1851 e.V.

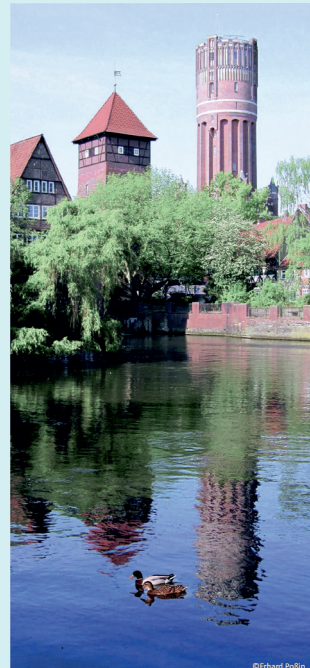
**Geschäftsstelle**

Wandramstraße 10, 21335 Lüneburg  
Telefon: 0 41 31 / 7 20 65 70  
info@naturwissenschaftlicher-verein-lueneburg.de  
www.naturwissenschaftlicher-verein-lueneburg.de

**Geschäftszeiten:**

Montag 10 - 12 Uhr, Mittwoch 14:30 - 16:30 Uhr

In 175 Jahren entstanden 50 Bände der Jahrbücher (früher Jahreshefte) des Naturwissenschaftlichen Vereins in Lüneburg. In wandelndem Erscheinungsbild dokumentieren sie seither die Entwicklung des Vereins und Ergebnisse regionaler naturkundlicher Forschungen in der Region.



©Erhard Pollin

# Wolken – ihre Bedeutung für Wetter, Klima und Umwelt

Markus Quante

## Zusammenfassung

Für uns alle sind Wolken in ihren unterschiedlichen Erscheinungsformen vertraute Elemente am Himmel. Für unser Leben haben Wolken eine immense Bedeutung. Sie sind zentraler Bestandteil des globalen Wasserkreislaufs, in ihnen werden die Regentropfen und Eiskristalle gebildet, die am Ende relevante Teile des aus den Ozeanen verdunsteten Wassers auf die Kontinente bringen, wo es uns für den Nahrungsmittelanbau und als Trinkwasser zu Verfügung steht. Niederschlagsereignisse sind häufige und wichtige Bestandteile des Wettergeschehens. Wolken, die im globalen Mittel mehr als 70 % der Erde bedecken, sind auch ein ungemein wichtiger Klimafaktor. Die im Klimasystem alles antreibende Sonneneinstrahlung wie auch die ausfallende Wärmestrahlung müssen auf ihrem Weg die Atmosphäre und damit häufig Wolken passieren. Dabei kommt es zur Streuung und Absorption von Strahlung, beides im Ausmaß abhängig von der Partikelart, Partikelanzahl und Größenverteilung. Tiefe Wasserwolken haben einen kühlenden Effekt auf das Klima, hohe Eiswolken tendieren dazu, das Klima zu erwärmen, da sie einen eigenen Treibhauseffekt aufweisen. Derzeit überwiegt der kühlende Einfluss der Wolkenpopulation, das Ausmaß kann sich aber mit dem Klimawandel verändern. In Klimamodellen gehören Wolken und ihre Wechselwirkung mit Partikeln in der Atmosphäre zu den größten Unsicherheitsfaktoren. Der Umwelteinfluss von Wolken ist hauptsächlich durch chemische Umwandlungsprozesse von Schadgasen in Wolkentröpfchen und an Eiskristallen gegeben. Die in Wolken entstehenden Niederschläge bringen auch Anteile von Schadgasen und Feinstaubpartikeln zurück zum Erdboden. Durch die nasse Deposition wird die Atmosphäre gereinigt. Dieser Beitrag stellt die unterschiedlichen Wolkentypen vor, beschreibt deren Bildung auf verständliche Weise und beleuchtet ihre Rolle im Wettergeschehen. Zudem werden Prozesse skizziert, die die Klimawirksamkeit und den Umwelteinfluss von Wolken ausmachen.

## Schlüsselwörter:

Aerosol-Wolken-Wechselwirkung, Kondensationskerne, Nukleation, rainout, wash-out, Wolkenklassifikation, Wolkenstrahlungseffekt

## Abstract

For all of us, clouds in their various forms are familiar elements in the sky. Clouds are tremendously important to our lives. They are a central component of the global

water cycle, forming raindrops and ice crystals that ultimately bring relevant parts of the water evaporated from the oceans to the continents, where it is available to us for food production and as drinking water. Precipitation events are frequent and important components of weather patterns. Clouds, which cover more than 70 % of the earth on average, are also an extremely important climate factor. The solar radiation that drives everything in the climate system, as well as the outgoing heat radiation, must pass through the atmosphere and thus often through clouds on their way. This results in the scattering and absorption of radiation, both of which depend on the type, number, shape, and size distribution of the particles. Low water clouds have a cooling effect on the climate, while high ice clouds tend to warm the climate because of their own greenhouse effect. The cooling influence of the current cloud population predominates, but the extent of this may change with climate change. In climate models, clouds and their interaction with particles in the atmosphere are among the greatest sources of uncertainty. The environmental impact of clouds is mainly due to chemical transformation processes of pollutant gases in cloud droplets and on ice crystals. The precipitation that forms in clouds also brings some of the harmful gases and aerosol particles back to the ground. Wet deposition cleans the atmosphere. This article introduces the different types of clouds, describes how they form in a comprehensible way, and highlights their role in weather patterns. It also outlines the processes that determine the climate impact and environmental influences of clouds.

### **Keywords:**

aerosol-cloud interaction, cloud classification, cloud radiative effect, condensation nuclei, nucleation, rainout, washout

*Ist uns eigentlich bewusst, dass wir den größten Teil unseres Lebens unter einer Wolkendecke verbringen?*  
Vincenzo Levizzani (2025)

## **1 Einleitung**

Beim Blick an den Himmel bekommen die meisten Menschen in fast allen Regionen der Welt mit hoher Wahrscheinlichkeit Wolken der einen oder anderen Art zu sehen. Im globalen Mittel ist der

Himmel zu etwa 70 % bedeckt (Bertrand et al. 2024). Die Vielfalt der zu entdeckenden Wolken in Art und Struktur ist dabei enorm. Einige Menschen nehmen die Wolken nur peripher wahr, andere wiederum geraten ins Staunen und

Schwärmen. Dabei können bestimmte Wolkentypen auch bedrohlich wirken und Angst einflößen. Die abwechslungsreiche und oft ästhetische und Emotionen hervorrufende Erscheinungsform hat viele Künstler – Maler, Dichter, Musiker – angeregt, den Wolken in ihren Werken einen Platz zu geben. Dieses Themenfeld wird hier nicht weiter behandelt, soll aber nicht unerwähnt bleiben.

Um über die Bedeutung von Wolken sprechen zu können, muss man sich mit dem Wasservorkommen in der Atmosphäre befassen, in der es in allen drei Phasen – fest, flüssig, gasförmig – präsent ist. Die Menge von 12900 Kubikkilometer atmosphärischen Wassers entsprechen lediglich in etwa 0,001 % des Weltwasservorkommens (Blanken 2024). In der Atmosphäre tritt Wasser hauptsächlich in Form von Wasserdampf in Erscheinung, nur der geringe Anteil von 0,25 bis 0,3 % des atmosphärischen Wassers ist in flüssiger und fester Form in Wolken anzutreffen (Quante & Matthias 2006).

Trotz des verschwindend geringen Anteils am atmosphärischen Wasservorrat spielen die Wolken in der Energiebilanz unseres Planeten und im Wasserkreislauf eine bedeutende Rolle, denn sie reflektieren, absorbieren und emittieren Strahlung, was sich entscheidend auf die Temperaturverteilung in unserm Lebensraum an der Erdoberfläche und

damit auf das Klima auswirkt. Ohne Wolken gäbe es keinen Niederschlag, der für die Nahrungsmittel- und Trinkwasserversorgung und damit für das Leben unerlässlich ist. Die Wolken sind an der vertikalen und horizontalen Umverteilung des Wasserdampfes beteiligt. Durch ihre Bedeutung im Strahlungs- und Energiehaushalt bestimmen sie in vielen Regionen die Verdunstungsraten und beeinflussen regionale und lokale Zirkulationssysteme durch das Freisetzen latenter Wärme und modifizieren die mit Strahlungsprozessen verbundenen Erwärmungsraten. Wolken sind eng mit den Wetterereignissen verknüpft und können uns auf kurzer Zeitskala vor potenziell katastrophalen Naturereignissen wie Tornados, Starkregen oder heftigen Schneefällen warnen. Aufgrund ihrer großen Bedeutung für das Klima auf der Erde sind Manipulationen an Wolken in den letzten Jahren verstärkt in den Fokus von Proponenten des umstrittenen Climate Engineering geraten (Quante & Leisner 2023). Dabei geht es um gezielte Eingriffe in Wasser- oder Eiswolken mit dem Ziel, letztendlich die globale Erwärmung zu mindern. Über Strahlungseffekte, chemische Umwandlungen von Gasen und Partikeln (Aerosolen) beeinflussen Wolken auf der einen Seite auch Schadstoffkonzentrationen in der Atmosphäre und führen über Niederschläge einen großen Teil der unerwünschten Stoffe zurück an den Boden.

Menschliche Emissionen, insbesondere von Partikeln, können auf der anderen Seite auch stark in die Wolkenbildung eingreifen. Die Forschungsfelder, die sich mit den unterliegenden Prozessen der oben aufgeführten Themenbereiche befassen, nennen sich *Strahlung und Wolken*, *Wolken-Aerosol-Wechselwirkung* und *Wolken-Chemie-Wechselwirkung*. Neben der Bedeutung für die bisher genannten Gebiete haben Wolken auch einen Einfluss auf die atmosphärische Elektrizität und die atmosphärische Optik, was mitunter zu eindrucksvollen Erscheinungen am Himmel führt. Die beiden letzteren Bereiche werden hier nicht weiter ausgeführt.

In den nachfolgenden Kapiteln werden zunächst die Klassifikation, das Vorkommen und die Bildung von Wolken betrachtet, um anschließend ihr Auftreten im Wettergeschehen zu skizzieren. Die Rolle der Wolken im Klimakontext und in der Umwelt wird nachfolgend ausführlicher besprochen.

## **2 Definition, Klassifikation und Auftreten von Wolken**

Der Definition der *World Meteorological Organization (WMO)* folgend „ist eine Wolke ein Hydrometeor, der aus winzigen Partikeln aus flüssigem Wasser oder Eis oder aus beidem besteht, die in der Atmosphäre schweben und normalerweise den Boden nicht berühren. In einer Wolke können auch noch größere

Wasser- oder Eisteilchen enthalten sein und solche Teilchen, wie sie in Abgasen, Rauch oder Staub vorkommen.“

Es gibt keine quantitative Definition von Wolken, früher wurde noch die Sichtbarkeit der Ansammlung der Hydrometeore hinzugefügt. Der moderne Gebrauch des Begriffs Wolke schließt wegen ihrer Bedeutung für das Klima auch Anhäufungen von Wolkenpartikeln ein, die dem menschlichen Auge verschlossen bleiben. Die ersten Wolkenklassifikationen wurden zu Beginn des 19. Jahrhunderts von zwei Naturbeobachtern unabhängig voneinander erstellt. Der französische Naturforscher Jean-Baptiste Lamarck hat seine Überlegungen 1802 veröffentlicht, und der englische Pharmakologe, Apotheker und Hobbymeteorologe Luke Howard legte im Jahr 1803 sein Werk der Öffentlichkeit vor (Hamblyn 2001). Howard teilte die Wolken in Anlehnung an die Pflanzensystematik des schwedischen Botaniker Carl von Linné in Familien, Gattungen, Arten und Unterarten ein und verwendete zu deren Benennung lateinische Ausdrücke, was gut ins wissenschaftliche Weltbild der Zeit passte. Howards Wolken-systematik hat sich zum Leidwesen Lamarcks durchgesetzt. Trotz aller Fortschritte in der Wolkenphysik und -erfassung sind Howards Beobachtungen zur Form, Größe und Gestalt der Wolken heute immer noch genauso gültig wie vor 200 Jahren und bilden die Basis der aktuellen

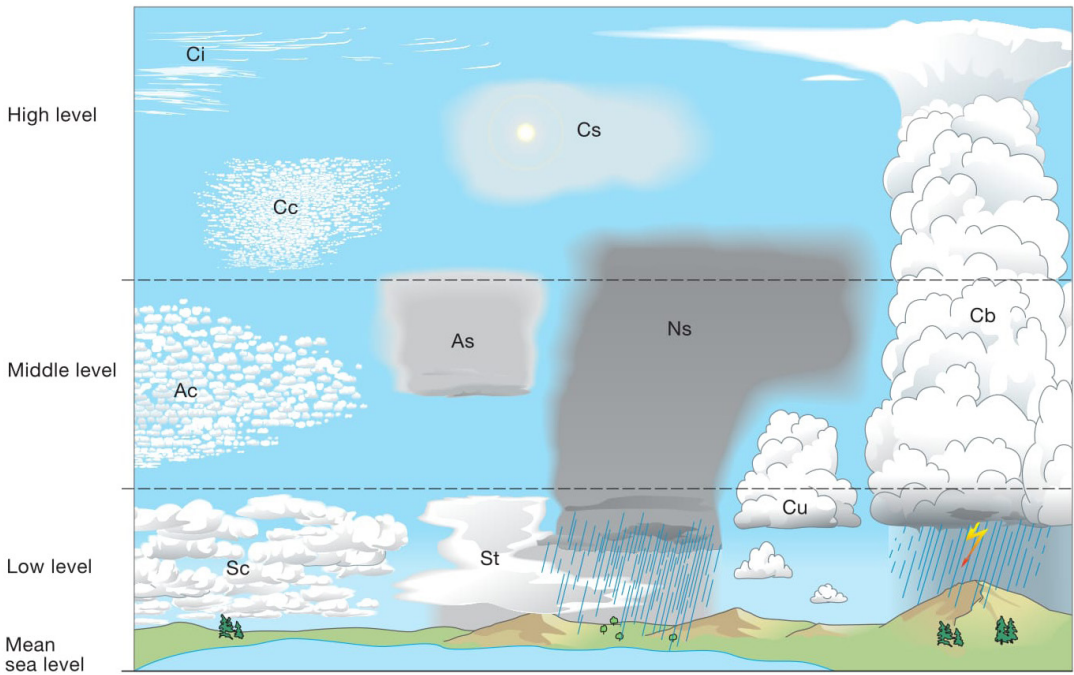
Wolkenklassifikation der Weltmeteorologischen Organisation, die mit einigen Modifikationen und Erweiterungen im *International Cloud Atlas* niedergelegt ist (aktuelle Onlineversion: <https://cloudatlas.wmo.int>).

Wolken sind in verschiedenen Höhenbändern („Stockwerken“) der Atmosphäre anzutreffen. Wolkenfamilien werden basierend auf ihrer Höhe als tiefe (Boden bis 2 km), mittelhohe (2 bis 7 km) und hohe Wolken (5 bis 13 km) festgelegt. Die angegebenen Werte gelten für die mittleren Breiten, hohe Wolken können in den Tropen nicht selten auch bis in 18 km Höhe reichen. Eine weitere Familie besteht aus Wolken mit großer vertikaler Mächtigkeit, die sich über mehrere Stockwerke erstrecken. Je nach Phase der Hydrometeore spricht man auch von Wasser-, Eis oder Mischphasenwolken. Reine Wasserwolken werden bei Temperaturen über 5 °C beobachtet, reine Eiswolken unter -40 °C. Im breiten Temperaturbereich von -5 bis -40 °C können Mischphasenwolken vorkommen.

Es werden 10 Wolkengattungen unterschieden, sie sind in Abb. 1 illustriert (siehe auch Fotos einer Auswahl in Abb. 2). Die Gattungen ergeben sich durch die äußere Form, es werden schichtförmige (stratiforme) und haufenförmige (cumuliforme) Wolken sowie Mischformen (z. B. Stratocumulus) unterschieden. Die weitere Differenzierung

in Arten berücksichtigt die Gestalt der Wolken, zusätzliche Unterarten werden durch weitere Eigenschaften und Erscheinungsformen bestimmt. Dazu kommen noch Sonderformen. Wolken, die am Boden aufliegen, werden Nebel genannt. Zur Bezeichnung mächtiger Cumulus- oder Cumulonimbuswolken, die sich über ausgedehnten Waldbränden ausbilden und daher auch sehr viel Ruß enthalten, werden in den letzten Jahren die Begriffe *Pyrocumulus* bzw. *Pyrocumulonimbus* verwendet. Über unseren Köpfen sind in größeren Höhen häufig auch Kondensstreifen zu beobachten, von denen je nach meteorologischen Bedingungen einige sehr beständig sein und eventuell in klimawirksame Cirruswolken ausfließen können.

Wolken treten in fast allen Regionen der Erde auf, das allerdings in unterschiedlicher Häufigkeit und Erscheinungsform. Wolkenschichten der verschiedenen Stockwerke können sich auch überlappen, was ihre messtechnische Erfassung erschweren kann. Seit ein paar Jahren sind moderne, aktive Fernmesssysteme (Millimeterwellen-Radar, LIDAR) auf Satelliten installiert, die es erlauben, eine verlässlichere Wolkenklimatologie zu erstellen. Abb. 3 (a) zeigt die globale Verteilung des so ermittelten fraktionellen Bedeckungsgrades, in Abb. 3 (b) ist die zugehörige Höhenverteilung des zonal gemittelten fraktionellen Bedeckungsgrades wiedergegeben. Mit fortschritt-



*Abb. 1: Die 10 Wolkengattungen in ihren typischen Höhenbändern: Cirrus (Ci), Cirrostratus (Cs), Cirrocumulus (Cc), Cumulonimbus (Cb), Nimbostratus (Ns), Altostratus (As), Altostratus (Cs), Altostratus (Ac), Cumulus (Cu), Stratus (St), Stratocumulus (Sc)*  
 (Quelle: International Cloud Atlas; Wiedergabe mit Erlaubnis der WMO)

*rechte Seite:*

*Abb. 2: Fotografischer Blick auf ausgewählte Wolken: (a) Cirrus, (b) Cirrostratus, von oben gesehen, (c) Altostratus stratiformis undulatus, (d) Altostratus floccus, (e) Mariner Stratocumulus, (f) Cumulus humilis, (g) Cumulus congestus, (h) Cumulonimbus*  
 (Fotos: M. Quante)



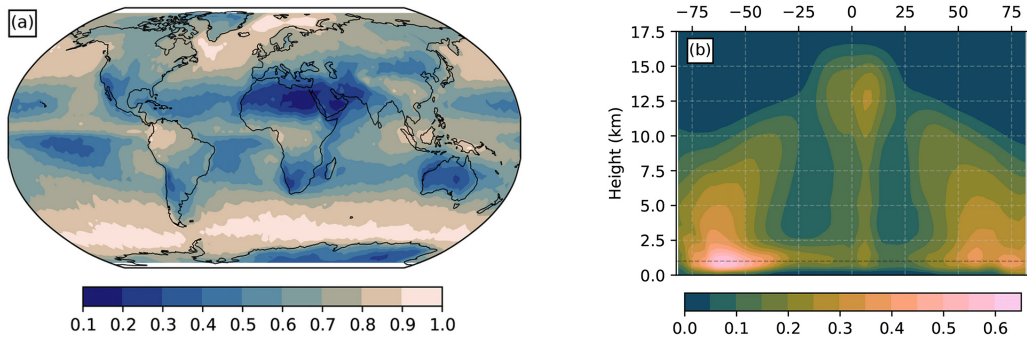


Abb. 3: (a) Jahresmittel des fraktionellen Wolkenbedeckungsgrades (0 bis 1) für den Zeitraum von 2006 bis 2020, (b) Höhenverteilung (in km) des zonal gemittelten fraktionellen Wolkenanteils für den gleichen Zeitraum (Bertrand et al. 2024, Wiedergabe gemäß Creative Commons Attribution 4.0 License)

lichen Verfahren werden derzeit auch Klimatologien von Wolkeneigenschaften erstellt (wie z. B. Wolkenwassergehalt, Phase und charakteristische Größe von Wolkenpartikeln, Höhe von Unter- und Oberkanten, Wolkenüberlappung), die für die Klimaforschung von großer Relevanz sind.

Wie Abb. 3 (a) zeigt, ist die Wolkenbedeckung im Äquatorialgürtel aufgrund der starken Konvektion entlang der Intertropischen Konvergenzzone (ITCZ) kontinuierlich hoch. Die mächtigen Wolkentürme reichen oft bis an die Stratosphäre in 16 bis 18 km Höhe heran (Abb. 3 (b)). Hohe Wolkenbedeckungsgrade treten auch in den Regionen der außertropischen Hauptzugbahnen der Tiefdruckgebiete (*storm tracks*) in den mittleren Breiten beider Hemisphären (ca. 50° bis

60°) auf. Minimale Bedeckung wird in den Zonen der Abwärtsbewegung in den Subtropen beobachtet (ca. 20° bis 30°), die mit den Hadley-Zellen verbunden sind. Die niedrigsten Werte des Wolkenbedeckungsgrades werden über den Wüstengebieten beobachtet. Eine detailliertere Untersuchung zeigt, dass in den Tropen und Subtropen großflächig, klimaphysikalisch interessante Stratocumulusfelder (siehe weiter unten) an den westlichen Rändern der großen Kontinente über den Ozeangebieten existieren, die typischerweise relativ kalt sind.

### 3 Wolkenbildung

Die Bildung von Wolken ist mit einem Phasenwechsel des Wassers, Energieumsätzen und dynamischen Prozessen verbunden. Details dazu sind komplex, hier

kann nur ein erster Einblick in die Vorgänge gegeben werden. Für eine vertiefte Betrachtung sind einschlägige Fach- und Lehrbücher zu konsultieren (leichter zugänglich sind Lohmann et al. 2016, Wallace & Hobbs 2006).

Wolken bestehen aus Hydrometeoren, die sich in Phase, Größe und Form unterscheiden. Grundbestandteile der Wolken sind Wolkentröpfchen und Eiskristalle. Zu den in Wolken gebildeten Niederschlagspartikeln gehören Regentropfen, Graupel, Hagel und Schneeflocken.

Wolkentröpfchen oder Eiskristalle bilden sich in der Atmosphäre, wenn die Luft bezüglich Wasser bzw. Eis gesättigt oder übersättigt ist und sogenannte Wolkenkondensations- bzw. Eiskeime verfügbar sind. Ein entscheidender Parameter dabei ist der Sättigungsdampfdruck, dieser folgt dem Verlauf einer exponentiell ansteigenden Funktion der Umgebungstemperatur. Über Eis ist der Sättigungsdampfdruck niedriger als über Wasser, was für das Partikelwachstum in Mischphasenwolken eine große Rolle spielt.

Um Sättigung zu erreichen und dadurch Kondensation zu ermöglichen, ist ein Abkühlen einer wasserdampfhaltigen Luftmasse erforderlich. Die meisten Wolken entstehen durch das Aufsteigen feuchter Luft, die sich dabei adiabatisch abkühlt, bewirkt durch Expansion der Luft aufgrund des mit der Höhe abnehmenden Luftdrucks. Die Hebung von

Luftpaketen/Luftmassen kann durch unterschiedliche Prozesse erfolgen, zu nennen sind insbesondere: das Aufsteigen warmer Luftblasen (Konvektion), das Aufsteigen von zusammenfließenden Luftmassen (Konvergenz), das Aufgleiten warmer Luft auf kältere an Warmfronten, das Aufsteigen wärmerer Luftschichten durch sich unter sie schiebende kalte Luft an Kaltfronten und das erzwungene Überströmen von orographischen Hindernissen. Die Höhe, ab der es dann zur Kondensation kommt, wird als Kondensationsniveau bezeichnet. Zum obigen Themenkomplex siehe z. B. Häckel (2024) und Levizzani (2025).

Unter den vielen Facetten der Wolkenphysik spielt die Nukleation (quasi die Geburt) von ersten Tröpfchen eine wesentliche Rolle. Die Bildung von Wolkentröpfchen in warmen Wolken ohne unterstützende Partikel (homogene Nukleation) ist äußerst unwahrscheinlich, da sie eine enorme Übersättigung erfordert, die so nicht beobachtet wird. Fast alle Wolkentröpfchen in der Atmosphäre entstehen aufgrund von heterogener Nukleation mithilfe atmosphärischer Partikel (Geburtshelfer). Dabei setzen sich Wassermoleküle auf der Oberfläche von geeigneten, hydrophilen Aerosolen ab, die Kondensationskerne (CCN, cloud condensation nuclei) genannt werden. Die häufigsten CCN sind die aus den Ozeanen freigesetzten Seesalzkristalle, eine bedeutende Rolle spielen auch die

vor allem aus Wüsten stammenden Mineralstäube, ferner sind Kohlepartikel aus Waldbränden und Partikel vulkanischen und biologischen Ursprungs (Bakterien, Sporen und Pollen) zu nennen. Auch auf anthropogene Aktivitäten zurückgehende Partikel, sie machen ca. 25 % der CCN aus, spielen eine bedeutende Rolle. Sie stammen aus Verbrennungsprozessen in Industrie und Verkehr und aus der Landwirtschaft, zu ihnen gehören neben vielen anderen Ruß sowie auf Sulfat und Ammonium basierende Partikel. Zudem sorgt die Gas-Partikel-Konversion für eine große Zahl an potenziellen CCN (Seinfeld & Pandis 2016). Mehr zu Wolkenkondensationskernen ist bei Andreae & Rosenfeld (2008) und Möhler et al. (2007) zu finden.

Ob ein neu gebildetes Tröpfchen in seiner Umgebung überlebt, d. h. die kritische Größe erlangt und ein aktiviertes Wolkenröpfchen wird, hängt vom Wassermolekülangebot (Übersättigung), von der Größe und evtl. auch von der Löslichkeit der CCNs ab. Bei der Aktivierung von Wolkenröpfchen spielen zwei gegensätzliche Effekte eine Rolle, der Krümmungseffekt (*Kelvin-Effekt*) und der Lösungseffekt (*Raoult-Effekt*). Die zugehörige, zusammenfassende Theorie wurde vom schwedischen Meteorologen Hilding Köhler formuliert und ist nach ihm benannt (Wallace & Hobbs 2006, Lohmann et al. 2016). Das weitere Tröpfchenwachstum geschieht durch

Anlagerung von Wasserdampf sowie insbesondere durch Kollision und Koaleszenz (größere, schneller fallende Tröpfchen sammeln in den Wolken kleinere ein, die mit ihnen verschmelzen). Typische Wolkenröpfchen haben einen Radius von 10  $\mu\text{m}$  (Mikrometer), der Bereich erstreckt sich von ca. 5  $\mu\text{m}$  bis zu 100  $\mu\text{m}$ . Ein Regentropfen ist dagegen mit einem typischen Radius von 1000  $\mu\text{m}$  (1 mm) ein Gigant. Das Volumen eines typischen Regentropfens ist um den Faktor 1.000.000 größer als das eines typischen Wolkenröpfchens. Im Allgemeinen steigt die Anzahl an Tropfen in einer Wolke, wenn die CCN-Anzahl steigt, die Partikel größer sind, die Partikel wasserlöslich sind und wenn die Aufwindgeschwindigkeit steigt.

Die unmittelbare Entstehung von Eisparkeln wie in Cirruswolken ist abhängig von einem lokalen Vertikalauftrieb, einer genügend hohen Wasserdampfübersättigung in Bezug auf Eis und von der Verfügbarkeit von Eiskeimen (IN, ice nuclei), an denen sich Wassermoleküle anlagern können, ein Prozess, der heterogene Deposition genannt wird. Viele Cirren bilden sich aber auch durch das Gefrieren von unterkühlten Wolkenröpfchen (sehr kleine Tröpfchen können bis ca.  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  flüssig bleiben). Der Bildungsprozess wird Gefriernukleation genannt. Das Immersionsgefrieren auf einem eingetauchten Teilchen ist dabei ein wichtiger Mechanismus. Mehr zur

Eisnukleation ist bei Knopf & Alpert (2023) zu finden. Geeignete Eiskeime sind in der Atmosphäre in deutlich geringerer Anzahl anzutreffen als Kondensationskerne. Bei Aerosolpartikeln, die als IN in Frage kommen, handelt es sich überwiegend um Staubteilchen (Silikate), die aus der Zersetzung von Böden, insbesondere Ton, stammen. Auch Teilchen biologischen Ursprungs (Bakterien, Zellulosepartikel) spielen eine Rolle. Das weite Spektrum der möglichen INs sowie ihre Quellen wird von Kanji et al. (2017) und Burrows et al. (2022) umfassend besprochen. Eiskristalle haben eine hexagonale Grundform und treten als Plättchen, Säulen, Nadeln oder Dendriten auf. Sie wachsen durch Wasserdampfdeposition, Anreifen oder Aggregation. Die in der Atmosphäre anzutreffenden Kristalle überstreichen einen weiten Größenbereich, sie variieren in ihrer Größe zwischen einigen  $\mu\text{m}$  und wenigen Millimetern. Typische Eiskristalle in Cirruswolken haben eine Größe von 100  $\mu\text{m}$  bis 150  $\mu\text{m}$ .

#### **4 Wolken und das Wettergeschehen**

Mit dem Begriff „Wetter“ wird der physikalische Zustand der Atmosphäre zu einem bestimmten Zeitpunkt oder in einem kürzeren Zeitraum, Stunden bis zu wenigen Tagen, an einem bestimmten Ort oder in einem Gebiet bezeichnet. Dieser Zustand ist durch die meteorologischen Elemente und ihr Zu-

sammenwirken gekennzeichnet. Zu diesen meteorologischen Elementen gehört insbesondere auch die Bewölkung. Die unterschiedlichen Wetterereignisse sind häufig mit besonderen Wolkentypen verknüpft, die sich im zeitlichen Verlauf bilden und zu Wolkenformationen zusammenschließen können. Bestimmte Wetterlagen sind in der Regel durch charakteristische Wolken gekennzeichnet. Es gibt jedoch auch Wetterphänomene, die zur Auflösung von Wolken führen, wie es häufig in den großräumigen Absinkströmungen der Hochdruckgebiete oder beim Einmischen von trockenen Luftmassen in Höhenströmungen zu beobachten ist.

Unsere Perzeption von Wetter – schnell als „gutes“ oder „schlechtes“ Wetter betitelt – ist überwiegend mit der Art und dem Bedeckungsgrad der Bewölkung verbunden. Ein wolkenverhangener Himmel, aus dem es auch noch regnet, wird ganz anderes aufgenommen als eine strahlungsdominierte Wetterlage mit lockerer Cumulusbewölkung. Bei uns in den mittleren Breiten treten die unterschiedlichen Wolkenarten vornehmlich im Zusammenhang mit atmosphärischen Vorgängen an den Luftmassengrenzen innerhalb der Tiefdruckgebiete auf. Wobei sich die Art und Ausprägung der Bewölkung an den Warmfronten charakteristisch von der an den Kaltfronten unterscheidet. Nachfolgend soll kurz der Wolkenhimmel entlang eines idealtypi-

schen Frontendurchzugs skizziert werden, wie er sich für einen Beobachter am Boden im zeitlichen Ablauf, der bis zu mehrere Tage dauern kann, zeigen würde. Die Warm- bzw. Kaltfront einer Zyklone trennen kalte und warme Luftmassen am Boden und in der Höhe. An der Warmfront gleitet warme, leichtere Luft recht langsam auf kältere, schwerere Luft auf und kühlt dabei in der Höhe ab. Da die kältere Luft nicht so viel Wasserdampf aufnehmen kann, kommt es in größeren Höhen zur Kondensation, und es bilden sich je nach Temperatur letztendlich Eis- oder Wasserwolken. Für einen festen Beobachter am Boden läuft die Warmfront in der Höhe der bodennahen voraus. Der sich noch in der Kaltluft befindende Beobachter sieht daher zunächst die sich in der Spitze der aufgleitenden Warmluft in der Höhe gebildeten Cirruswolken über sich ankommen, die dann über ihn hinwegziehen und im Verlauf von Stunden immer dichter werden. Der nachrückende Warmluftkeil wird immer mächtiger, wobei die Wolkenuntergrenze weiter absinkt. Die sich immer weiter verdichtende Bewölkung setzt sich jetzt aus Alto-cumulus und Altostratus zusammen, die nun auch flüssige Wolkentröpfchen enthalten. Die ursprünglich noch helle Wolkendecke erscheint dann immer dunkler und bedrohlicher, es fällt der erste Niederschlag. Im weiteren Verlauf bilden sich in der mittlerweile sehr mächtigen Warmluftschicht, die bis zu 10 km dick

sein kann, dann Nimbostratus Wolken, aus denen es viele Stunden lang regnen oder schneien kann. Wenn die Warmluft nach einiger Zeit den Beobachter am Boden passiert, befindet sich dieser im Warmluftsektor des Frontensystems und die Niederschläge hören nahezu schlagartig auf, und es sind bis auf einige Cumuli kaum noch Wolken zu sehen. Das ändert sich augenblicklich, wenn die Kaltfront den Beobachtungsort erreicht. An ihr schiebt sich sehr dynamisch kalte Luft unter die Warmluft und zwingt diese, in die Höhe aufzusteigen. Bei dieser erzwungenen Hebung auf relativ kleinem Raum bilden sich Quellwolken von großer vertikaler Mächtigkeit, in denen sich Wolkentröpfchen und Eiskristalle in starken Auf- und Abwindschläuchen vermischen, wechselwirken und große Hydrometeore bilden (Wegener-Bergeron-Findeisen-Prozess; Storelvmo & Tan 2015). Es kommt zu schweren Schauern, Graupel- und Hagelschlag, die oft von Gewittern begleitet sind. In Häckel (2024) sind der Wolkenaufzug und weitere meteorologische Größen in Verbindung mit dem Durchzug eines Tiefdrucksystems anhand von Vertikalschnitten durch ein typisches Frontensystem und exemplarischen Wolkenfotos anschaulich illustriert.

Beeindruckende Wetterereignisse mit imposanten Wolkenerscheinungen sind in unseren Breiten die Gewitter. Weltweit treten etwa 1600 Gewitter gleich-

zeitig auf, sie sind mit luftelektrischen Entladungen verbunden (Blitze mit nachfolgendem Donner) und führen häufig zu heftigen Regen- oder Schneeschauern, gelegentlich auch zu Hagel- oder Graupelschauern. Voraussetzung für die Gewitterbildung sind feuchtwarme Luftmassen, durch deren Aufsteigen sich ein Cumulonimbus (Cb, Abb. 1) ausbilden kann. Diese Wolken erstrecken sich von einigen hundert Metern über dem Boden bis hoch in die Troposphäre, in unseren Breiten bis zu 12 km Höhe, dort können sie einen ausgeprägten Schirm ausbilden (Amboss). Cumulonimben bestehen aus Wassertröpfchen und Eiskristallen. Die Bildung großer Niederschlagspartikel läuft über den Wegener-Bergeron-Findeisen-Prozess, Eispartikel wachsen dabei wegen der Sättigungsdampfdruckunterschiede auf Kosten von unterkühlten Wassertröpfchen (Storelvmo & Tan 2015). In den Cbs treten sehr hohe Aufwinde, die einige zehn km/h und im Extremfall bis zu 120 km/h betragen können, im Wechsel mit Abwinden auf.

Die für die Gewitterentwicklung zentralen Cumulonimben entstehen in einer vertikal mächtigen labilen Schichtung und bei entsprechendem Feuchteangebot. Der initiale Hebungsantrieb kommt z. B. durch dynamisches Aufgleiten an Kaltfronten, wo sich kalte Luft unter feuchtwarme Luft drängt, oder durch aufsteigende Konvektionsblasen über

dem von der Sonneneinstrahlung aufgeheizten Erdboden (Wärme- oder Hitzegewitter). Wird bei der Hebung die Taupunkttemperatur überschritten, kondensiert der Wasserdampf, dabei wird Kondensationsenthalpie frei, die freierwende Wärme verstärkt den Auftrieb. In größeren Höhen wird dann beim Übergang von der flüssigen in die feste Phase zusätzlich Kristallisationsenthalpie frei. Die in der Gewitterwolke herrschenden starken aufwärts gerichteten Strömungen sorgen dafür, dass kleine Regentropfen und Eiskristalle immer wieder nach oben getragen werden, wo neues Eis angelagert werden kann. Dieser Vorgang wiederholt sich so oft, bis die Eispartikel so schwer geworden sind, dass sie von den Aufwinden nicht mehr getragen werden können. Sie fallen dann als große Regentropfen, Graupelkörner oder sogar Hagelsteine aus der Gewitterwolke und erreichen meistens den Boden (Abb. 4). Wenn die Gewitterzelle ausgereignet ist, löst sich der Cumulonimbus auf, wobei der vereiste Wolkenschirm jedoch noch über längere Zeit als Cirrostratus bestehen bleiben kann.

Die Eisphase in den Wolken spielt eine entscheidende Rolle für die Bildung großer Kristalle und Tropfen und trägt global zu drei Viertel des Niederschlags bei (Heymsfield et al. 2020). In mittleren und höheren Breiten haben fast alle Starkniederschläge die Eisphase gesehen, sie entstehen in hochreichender Konvektion.



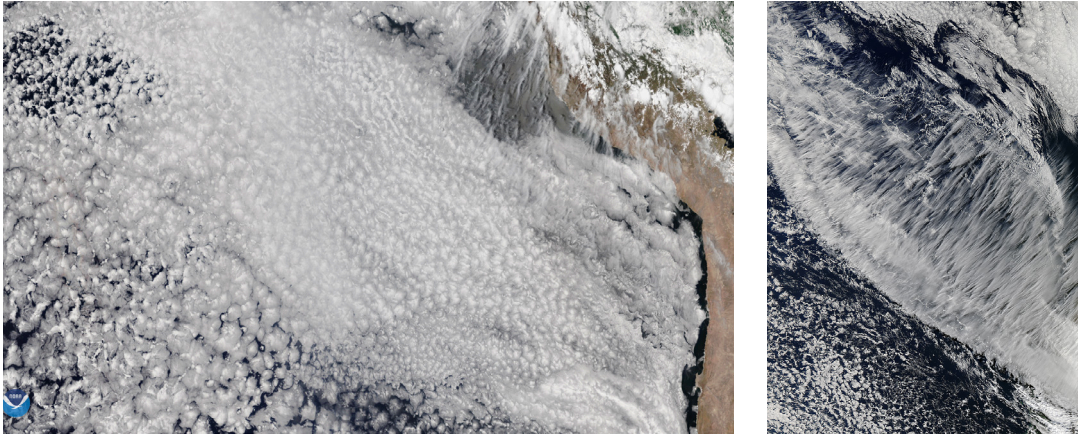
*Abb. 4: Kräftiger Schauer über dem Landkreis Lüneburg am 7. Juli 2020  
(Foto: M. Quante)*

Bei Hochdruckwetterlagen, die sich im Herbst und Winter relativ stabil zeigen, entsteht häufig durch Absinken über bodennaher feuchter Kaltluft (Inversionschicht) der auch uns im Norden sehr vertraute Hochnebel. Dabei handelt es sich um eine unspektakuläre, graue, mehr oder weniger dunkle Wolkenschicht, die der Gattung Stratus zugeordnet wird (Häckel 2024). Die Unterkante der Hochnebeldecke liegt bei einigen 10 bis 100 Metern. Der Hochnebel kann über Stunden mitunter aber auch über mehrere Tage anhalten, sein Auflösen gilt als schwer vorhersagbar.

Eine ansehnliche Sammlung beeindruckender Fotos von Wolken, die mit Wettererscheinungen und Strömungsphänomenen verbunden sind, gepaart mit entsprechenden Erläuterungen ist bei Bluestein (2024) zu finden.

## **5 Die Rolle der Wolken im Klimasystem und Klimawandel**

Wolken sind ein integraler Bestandteil des Klimasystems. Sie sind nicht nur essenziell im Wasserkreislauf, sondern auch eine äußerst wichtige Komponente im Strahlungshaushalt, also Energiehaushalt, der Erde (Quante 2004). Tröpfchen und Eiskristalle streuen, ab-



*Abb. 5: (a) NOAA-20-Satellitenbild eines Stratocumulusfeldes über dem Pazifik vor der Westküste Südamerikas am 3. Dezember 2019 (Quelle: NOAA), (b) Ausgedehntes Cirrusfeld über dem Pazifik vor der Küste Chiles am 21. Mai 2015. Die Bilddiagonale weist eine Länge von etwa 2000 km auf. (Quelle: NASA, LANCE/EOSDIS Rapid Response)*

sorbieren und emittieren elektromagnetische Strahlung. Somit beeinflussen Wolken das Klima und die Zirkulation durch die Modifikation der horizontalen und vertikalen Verteilung der solaren Strahlungserwärmung, das Kühlen durch thermische Ausstrahlung und die Freisetzung latenter Wärme bei ihrer Bildung.

Wolken zeigen ein relativ hohes Reflexionsvermögen (Albedo) im solaren Strahlungsbereich. Die winzigen Wasser- und Eispartikel streuen in der Summe über alle Wolken etwa 30 bis 60 % der auf sie treffenden Sonnenstrahlen zurück in den Weltraum, was zu einer Abkühlung am Boden führt. Wolken wirken aber nicht nur abkühlend. Sie behindern auch die

langwellige Wärmeausstrahlung von der Erdoberfläche und den unteren Schichten der Atmosphäre in den Weltraum, indem sie sie absorbieren und nach allen Seiten wieder emittieren. Die Menge der von einer Wolke emittierten Strahlung hängt vor allem von ihrer Temperatur ab. Die Oberfläche der Wolken ist typischerweise kälter als die Erdoberfläche und emittiert daher weniger Wärmestrahlung Richtung Weltraum als diese. Wolken üben damit effektiv einen Treibhauseffekt mit entsprechendem Erwärmungspotenzial aus. Der Nettoeffekt der beiden konkurrierenden kurzwelligen und langwelligen Prozesse hängt von der Höhe, dem Typ und den optischen Eigenschaften der Wolken ab.

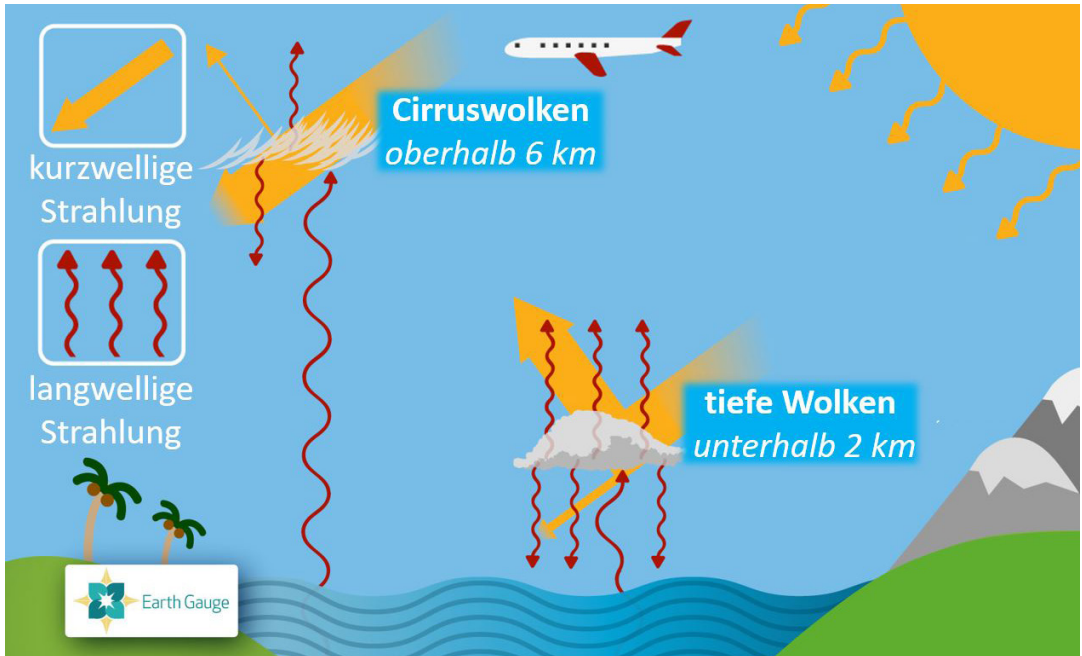


Abb. 6: Vergleich der typischen kurzwelligen und langwelligen Strahlungsflüsse in Verbindung mit Cirruswolken und tiefen Wasserwolken (nach Earth-Gauge-Projekt, verändert)

Zu den stark kühlenden Wolken gehören die tiefen stratiformen Wasserwolken mit ihrer hohen Albedo und einer Emissionstemperatur, die sich nicht sehr von der Bodentemperatur unterscheidet (Beispiel in Abb. 5 (a)). Im Gegensatz zu tiefen Wasserwolken sind die hohen und dünnen Cirruswolken semi-transparent für die kurzwellige Solarstrahlung, absorbieren aber die langwellige Wärmestrahlung (Beispiel in Abb. 5 (b)). Weil Cirren in größeren Höhen auftreten und daher sehr kalt sind, emittieren sie nur wenig

Wärmestrahlung Richtung Weltraum und üben somit einen relativ starken Treibhauseffekt aus (Quante 2015). Der Nettoeffekt bei Cirruswolken ist häufig erwärmender, er hängt jedoch empfindlich von den Wolkeneigenschaften u. a. von der Eispartikelanzahl, Kristallform und -größe ab. Abb. 6 veranschaulicht exemplarisch die Strahlungsflüsse für tiefe Wasser- und hohe Eiswolken. Vertikal mächtige Wolken und mehrschichtige Wolkensysteme ordnen sich zwischen den gezeigten ein.

## Quantifizierung des Wolkenstrahlungseffekts

Eine häufig verwendete Kenngröße zur Beschreibung des klimatologischen Einflusses von Wolken auf die Strahlungsbilanz ist der sogenannte Wolkenstrahlungseffekt (CRE, Cloud radiative effect). Sie erlaubt es, die Größe der Veränderung der Strahlungsbilanz am Oberrand der Atmosphäre durch die Anwesenheit von Wolken abzuschätzen. Die Größe CRE wird dabei durch die Differenz zwischen der Strahlungsbilanz in wolkenfreien Fällen und der über alle Situationen gemittelten angenähert.

Der Nettostrahlungsantrieb (N CRE) kann in einen kurzwelligen Teil (SW CRE) und einen langwelligen Teil (LW CRE) aufgespalten werden:  $N\text{ CRE} = SW\text{ CRE} + LW\text{ CRE}$ . Abschätzungen des satellitenbasierten Projektes *Clouds and the Earth's Radiant Energy System* (CERES) zeigen, dass die Wolken die Erdalbedo von ca. 15 % auf 0,29 % in etwa verdoppeln. Der damit verbundene SW CRE kommt im globalen Mittel auf ca.  $-46\text{ Wm}^{-2}$ , also stark kühlend. Der langwellige Wolkeneffekt durch Absorption und Re-Emission beträgt  $+28\text{ Wm}^{-2}$ . Im globalen Mittel ergibt sich damit ein Nettoeffekt von ungefähr  $-18\text{ Wm}^{-2}$  (Zelinka et al. 2017). Insgesamt kühlt also die heutige Wolkenpopulation unseren Planeten. Assessments basierend auf moderneren aktiven satellitengestützten Messsystemen bestätigen dieses Resultat

(L'Ecuyer et al. 2019). Zur Einordnung der Zahlenwerte: eine Verdoppelung der  $\text{CO}_2$ -Konzentration in der Atmosphäre im Vergleich zum Wert von 1750 bewirkt einen effektiven Strahlungsantrieb (ERF, effective radiative forcing) von  $+3,9\text{ Wm}^{-2}$  (Forster et al. 2021).

## Aerosol-Wolken-Wechselwirkungen

Aerosole sind kleinste feste oder flüssige Partikel in der Atmosphäre unterschiedlicher Größe. Sie haben aerodynamische Durchmesser von etwa 1 Nanometer (nm) bis hin zu mehreren 100 Mikrometern ( $\mu\text{m}$ ). Größere Partikel sinken recht schnell Richtung Boden, kleinere ( $< 10\ \mu\text{m}$ ) können viele Stunden bis zu mehreren Tagen in der Luft verweilen. Wolkenpartikel werden nicht zu den Aerosolen gezählt, sie gehören zu den sogenannten Hydrometeoren. Ihrer Quelle nach werden natürliche und anthropogene Aerosolpartikel unterschieden. Zu den natürlichen Aerosolen gehören insbesondere Mineralstäube (z. B. aus der Sahara) und Seesalzpartikel sowie auch Partikel biologischen Ursprungs. Anthropogene Aerosole stammen häufig aus Verbrennungsprozessen in Industrie und Verkehr und aus landwirtschaftlicher Aktivität. Zu ihnen gehören Ruß sowie auf Sulfat und Ammonium basierende Partikel. Atmosphärische Aerosole haben einen Einfluss auf den Strahlungshaushalt der Erde, da sie Sonnenstrahlung streuen und absorbieren, dies ist der

sogenannte direkte Aerosoleffekt. Bestimmte Aerosole können auch als Kondensationskeime (CCN) oder Eiskeime (IN) fungieren und dadurch zur Wolkenbildung oder Wolkenmodifikation führen. Hierdurch verändern Aerosole auf indirektem Weg über Aerosol-Wolken-Wechselwirkungen den effektiven Strahlungsantrieb und üben somit einen Einfluss auf das Klima aus.

Der mögliche klimatische Einfluss von Aerosolen durch den Mechanismus einer Erhöhung der Wolkentröpfchenanzahl durch zusätzliche CCN und einem daraus resultierenden Anstieg der Wolkenalbedo und der damit verbundenen Abkühlung des Planeten wurde schon in den 1970er-Jahren von Twomey aufgezeigt (z. B. Twomey 1974). Dieser Effekt wird als *erster indirekter Aerosoleffekt*, *Wkenalbedoeffekt* oder *Twomey-Effekt* bezeichnet. Die mit dem Effekt verbundene Verringerung der Tröpfchengröße hemmt die Niederschlagsbildung, dadurch bleiben die Wolken länger am Himmel, mit der Folge eines zeitlich verlängerten Kühleffekts (Albrecht 1989). Der letztgenannte Effekt wird als *zweiter indirekter Aerosoleffekt* oder *cloud lifetime effect* bezeichnet. Bei sehr dünnen Wolken, in die leicht trockene Luft eingemischt werden kann, sieht es möglicherweise auch anders aus. Es wurde beobachtet, dass die Erhöhung der Aerosolkonzentration in dem Fall den gegenteiligen Effekt hat, was auf die schnellere

Verdunstung von sehr kleinen Tröpfchen und nachfolgende Wolkenauflösung zurückzuführen ist (Forster et al. 2021).

In Cirruswolken können INs die Bildung von Eiskristallen bei einer relativen Luftfeuchtigkeit auslösen, die weit unter der liegt, die für das spontane Gefrieren von Tröpfchen erforderlich ist. Anthropogene INs können somit die Anzahl der Eiskristalle und damit die Strahlungseigenschaften von Eiswolken beeinflussen und damit einen möglichen Beitrag zur Erwärmung leisten (Storelvmo 2017). Bei Temperaturen, wie sie in Cirruswolken vorherrschen, wurde in Laborstudien tatsächlich nachgewiesen, dass bestimmte Arten von Rußpartikeln als INs wirken, was auf einen nicht zu vernachlässigenden anthropogenen Beitrag zu INs in Cirrusniveau hindeutet (Forster et al. 2021).

Der effektive Strahlungsantrieb durch den Aerosoleinfluss auf Wolken wird für den Bezugszeitraum 1750 bis 2024 mit  $-0,85$  [ $-1,65$  bis  $-0,25$ ]  $\text{Wm}^{-2}$ , also nicht unerheblich kühlend, beziffert (Forster et al. 2025). Der direkte Strahlungseinfluss von Aerosolen kommt auf einen geringeren kühlenden Wert von  $-0,22$  [ $-0,44$  bis  $+0,01$ ]  $\text{Wm}^{-2}$ . Die Zahlenwerte in eckigen Klammern verdeutlichen jeweils die derzeit doch noch beträchtliche Breite der Unsicherheitsbereiche. Zum Vergleich, der wärmende effektive Strahlungseinfluss von Kohlendioxidemissionen im selben Zeitraum beziffert

sich zu 2,33 [2,05 bis 2,61] Wm<sup>-2</sup>. Durch zurückgehende Emissionen von Aerosolen und ihren Vorläufersubstanzen hat ihr kühlender Einfluss in den letzten Jahren abgenommen, das allerdings bei hoher regionaler Variabilität (Quaas et al. 2022). Faktisch heißt das, die aus Gesundheitsgründen notwendigen Bestrebungen zur Reinhaltung der Luft führen zu einer stärkeren Erwärmung der unteren Atmosphäre.

Eine Übersicht zu Aerosol-Wolken-Wechselwirkungen, die früher indirekte Aerosoleffekte genannt wurden, ist bei Lohmann & Feichter (2005) zu finden. Zu ihnen und ihrer Berücksichtigung in Klimamodellen wird weiterhin intensiv geforscht, zur aktuellen Bewertung dieser Effekte im Klimawandelkontext siehe Forster et al. (2021).

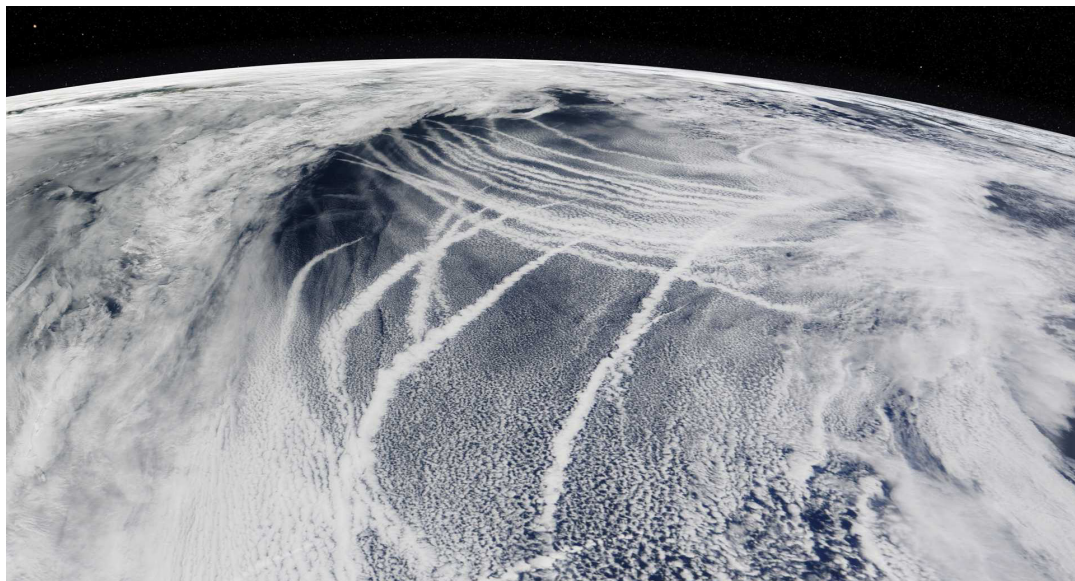
### **Veränderungen mit dem Klimawandel**

Der Klimawandel wirkt sich auch auf die Wolken aus. Die durch die globale Erwärmung erhöhten Temperaturen führen zu einer potenziell verstärkten Verdunstung und ermöglichen eine erhöhte Anzahldichte von Wasserdampfmolekülen in der Atmosphäre. Nach der Clausius-Clapeyron-Gleichung kann der Wasserdampfgehalt der Atmosphäre mit jedem Grad Celsius um ca. 7 % zunehmen. Diese zusätzlichen Wasserdampfmoleküle können die Wolkenpopulation modifizieren. Kleine Veränderungen der horizontalen und vertikalen

Wolkenverteilung und/oder ihrer mikrophysikalischen Eigenschaften (Anzahl, Phase und Größenverteilung der Wolkenpartikel) als Folge der globalen Erwärmung (Wolkenrückkopplungseffekt) könnte den oben erwähnten generellen Kühleffekt mindern und damit die Erwärmung deutlich verstärken, aber auch ein gegenteiliger Effekt ist nicht ausgeschlossen (positiver bzw. negativer Wolkenrückkopplungseffekt). Zusätzlich kann die Wolkenbildung durch sich ändernde Aerosolkonzentrationen (siehe unten) beeinflusst werden, die z. B. durch langanhaltende Dürren und sich verändernde Windsysteme verändert werden. Zu Wolkenrückkopplungseffekten siehe z. B. Stephens (2005) und Forster et al. (2021).

Fast alle aktuellen Klimamodelle deuten auf einen positiven Wolkenrückkopplungseffekt hin. Die Modelle unterscheiden sich jedoch hinsichtlich der Stärke der einzelnen Rückkopplungskomponenten, auch die Modellschätzungen der Gesamtstärke der positiven Wolkenrückkopplung weichen noch deutlich voneinander ab. Die auf Wolkenrückkopplungseffekte zurückgehenden Unsicherheiten sind ein dominierender Faktor für relative Abweichungen zwischen Projektionen der globalen Erwärmung der verschiedenen aktuellen Klimamodelle (Zelinka et al. 2017).

Die relative starke globale Erwärmung in den letzten Jahren kann zum Teil



*Abb. 7: Durch Schiffsemissionen aufgehellte Wolken entlang der Routen im nordwestlichen Pazifik im März 2009, die „ship tracks“ sind hunderte Kilometer lang. (Quelle: NASA MODIS Rapid Response Team)*

mit einer Veränderung der Bewölkung erklärt werden, hier geht es um einen Trend zur Abnahme der tiefen Bewölkung in den nördlichen mittleren Breiten und den Tropen (Goessling et al. 2025). Wieviel des beobachteten Trends auf interne Variabilität, reduzierte Aerosolkonzentrationen oder einen möglichen, sich einstellenden Rückkopplungseffekt für tiefe Wolken zurückgeht, ist Gegenstand aktueller Forschung. Schiffe haben aufgrund der Aufhellung niedriger mariner Wolken durch ihre Emissionen einen einzigartigen Klimaeffekt, der

auch zu sichtbaren Schiffsfahnen führen kann, die durch die Wechselwirkung von Wolken mit den Schiffsemissionen, insbesondere Sulfatpartikeln, entstehen (Abb. 7). Seit 2020 wurde der zulässige Schwefelgehalt von Schiffstreibstoffen drastisch reduziert. Modellierungen und Beobachtungen deuten darauf hin, dass die dadurch bedingten geringeren Schwefelemissionen ab dieser Zeit zu einer leichten Erwärmung des Planeten geführt haben könnten (Gottelman et al. 2024).

## Wolken als Klimaretter?

In den letzten Jahren wurden neben der unverzichtbaren drastischen Emissionsminderung bei den Treibhausgasen vermehrt andere Methoden, die unter dem Oberbegriff Climate Engineering (CE) subsummiert werden, zur Bekämpfung der Klimakrise in die Diskussion gebracht, respektive in Szenarien und Planungen aufgenommen (Quante & Leisner 2023). Die potenzielle Wirksamkeit der Methoden, unter denen sich auch einige zur Manipulation von Wolken befinden, ist höchst unterschiedlich. Gemein ist ihnen die Möglichkeit unerwünschter meteorologischer oder ökologischer Nebenwirkungen.

Die systematische Aufhellung von tiefen Wolken als Maßnahme des solaren Strahlungsmanagements gegen die fortschreitende Klimaerwärmung ist seit Anfang der 1990er-Jahre in der Diskussion. Die Reflektivität geeigneter Wolken ließe sich prinzipiell durch ein Impfen mit zusätzlichen Kondensationskeimen, z. B. Meersalzkristallen, erhöhen. Im Zentrum des Interesses stehen hier die marinen Stratocumuluswolken (*marine cloud brightening*). Ein entsprechender Effekt wurde in Nachlaufnahmen von Schiffen (*ship tracks*) als Folge eines Eintrags von Sulfatpartikeln beobachtet, siehe Abb. 7. Verfügbare Modellstudien zur Wirksamkeit und zu Nebenwirkun-

gen der Wolkenaufhellung zeigen noch keine eindeutigen Ergebnisse. Fragen bezüglich der Anwendungsbereiche, der technologischen Umsetzung und der Risiken sind noch ungeklärt (Possner et al. 2023).

Eine weitere Methode aus dem Bereich des Climate Engineering zielt darauf, Cirruswolken auszudünnen (*cirrus thinning*) und damit das Klima zu kühlen, da diese Wolken potenziell einen erwärmenden Effekt im Klimasystem haben (z. B. Gasparini et al. 2023). Ein Impfen mit geeigneten Eiskernen in Regionen mit homogen gebildeten Cirren könnte so in den Partikelbildungsprozess eingreifen, dass sich vermehrt große Eiskristalle bilden, die dann schneller absinken. Sehr viele Forschende stehen dieser Methode jedoch wegen großer Unsicherheiten extrem reserviert gegenüber. Insbesondere besteht hier auch die Gefahr des Überimpfens, durch das sich der gewünschte Effekt ins Gegenteil wenden könnte.

Um die globalen Wirkungen und Nebenwirkungen der oben genannten Eingriffe in das Wolkensystem abzuschätzen, sind die Forschenden auf Studien mit den derzeit verfügbaren Klimamodellen angewiesen, die für diese Aufgabe im Bereich Aerosol-Wolken-Wechselwirkungen noch mit großen Unsicherheiten behaftet sind (Feichter & Quante 2017).

## 6 Wolken und Umwelt

Neben den bedeutenden Einflüssen auf die Wasserverfügbarkeit, das Wetter und das Klima sind Wolken auf verschiedene Weise an der Verteilung und Umwandlung von Schadstoffen in der Umwelt beteiligt. Die aktive Rolle von Wolken bei der Umwandlung und dem Kreislauf atmosphärischer Substanzen ist seit langem bekannt. Gase und Aerosolpartikel können durch Absorption/Kondensation von löslichen Gasen und Aktivierung und Auswaschung (*scavenging*) von Aerosolpartikeln in Wolkentröpfchen gelangen (Seinfeld & Pandis 2016). Dadurch können sie mit ihnen sowohl horizontal als auch vertikal in der Atmosphäre transportiert werden.

Wolken können die Chemie der Atmosphäre und das Schicksal von Schadstoffen besonders beeinflussen, indem sie Substanzen aus der Grenzschicht in die freie Troposphäre transportieren. Hier sind Auf- und Abwinde in konvektiven Wolken effiziente Pfade zur vertikalen Umverteilung atmosphärischer Tracer (*cloud venting*) (Cotton et al. 1995; Barth et al. 2007). Wolken fungieren durch die Bildung von Niederschlägen auch als wichtige Senke für Schadstoffe in der Atmosphäre. Niederschlagspartikel können Schadstoffe über die gesammelten Wolkenpartikel (*rainout*) enthalten oder Schadstoffe auf ihrer Reise unterhalb der Wolke aufnehmen (*washout*) (Seinfeld & Pandis 2016). Wenn der Niederschlag

mit seiner Fracht den Boden erreicht, wird dieser Prozess als nasse Deposition bezeichnet. Allerdings erreicht in der Regel nicht der gesamte Niederschlag die Erdoberfläche. Die Niederschlagsverdunstung auf dem Weg Richtung Boden kann eine wichtige Rolle bei der vertikalen Umverteilung der Tracer-Masse innerhalb der Atmosphäre spielen.

Wolken fungieren auch als Reaktor für Flüssigphasenchemie in Wolkentröpfchen und Regentropfen (Graedel & Crutzen 1994; Ervens 2015). Ein großer Teil der in Wolken oft physikalisch und chemisch veränderten Gase und Aerosolpartikel wird bei der Auflösung der Wolken und Verdunstung der Tröpfchen wieder an die Atmosphäre abgegeben.

Wolken beeinflussen zudem die Photochemie innerhalb, oberhalb und unterhalb der Wolkendecke, indem sie die Photolyse-Raten durch ihren erheblichen Einfluss auf die Sonnenstrahlung (insbesondere UV) verändern (Tie et al. 2003; Liu et al. 2009). Der Einfluss auf photochemische Reaktionen führt zu Veränderungen der Oxidationskapazität der Atmosphäre, was sich wiederum auf den Abbau persistenter Schadstoffe auswirkt (Lelieveld & Crutzen 1991).

Es sind hier noch die Polaren Stratosphärenwolken (PSC, *polar stratospheric clouds*) zu erwähnen, die in der Stratosphäre der hohen Breiten bei Temperaturen unter  $-78^{\circ}\text{C}$  entstehen können und aus Kristallen von Schwefelsäure

oder Salpetersäure bestehen, um die sich bei noch tieferen Temperaturen auch ein Eismantel bilden kann. An den Oberflächen solcher Kristalle können heterogene chemische Reaktionen ablaufen, die für die Entstehung des Ozonlochs sehr bedeutsam sind.

Zusammenfassend lässt sich sagen, die wichtigen Auswirkungen von Wolken auf Schadstoffe in der Atmosphäre und damit auf die Umwelt erfolgen über folgende Wege:

- den Einfluss auf den Transport von atmosphärischen Beimengungen (*cloud venting*)
- die nasse Deposition
- die Chemie der flüssigen und festen Phase in Wolken- und Niederschlagspartikeln
- den Einfluss auf die Photochemie

Eine detailliertere Betrachtung zum Einfluss von Wolken auf die atmosphärische Umwelt ist z. B. bei Quante (2011), Ervens (2015) und Seinfeld & Pandis (2016) zu finden.

## 7 Abschließende Bemerkungen

Die vorangegangenen Ausführungen haben versucht hervorzuheben, für welche Bereiche unseres Lebens die Wolken eine bedeutende Rolle einnehmen. In all den angesprochenen Themenfeldern sind weiterhin Forschungsanstrengungen erforderlich, um den Einfluss von Wolken noch besser quantifizieren zu können. Neben einer Verfeinerung der Wolkenmodule in Wettervorhersagemodellen ist hier insbesondere eine notwendige verbesserte Berücksichtigung (Parametrisierung) der Wolken und ihrer Wechselwirkung mit Aerosolen in Klimamodellen zu nennen. Durch den in den nächsten Jahren angestrebten deutlichen Ausbau der Rechenleistung und die Nutzung von KI-basierten Methoden sind hier Fortschritte zu erwarten. Umfassende Unsicherheiten und schwer zu überschauende Nebenwirkungen gebieten es ferner, großskalige Manipulationen von Wolken zur Klimaabkühlung, wie sie im Kontext des Climate Engineering vorgeschlagen worden sind, zu unterlassen.

## Widmung

Ich widme diesen Beitrag der Wiener Künstlerin Angela Schwank, die sich zeichnerisch und fotografisch intensiv mit Wolken befasst hat. Die enge Zusammenarbeit mit Angela an ihrer „Cirren“-Ausstellung im Museum Lüneburg hat mir sehr viel Freude bereitet, und durch sie hat sich für mich auch eine andere Perspektive beim Blick auf die Wolken eröffnet.

## Literatur

- Albrecht, B. (1989): Aerosols, cloud microphysics, and fractional cloudiness. *Science*, 245, 1227–1230.
- Andreae, M. O.; Rosenfeld, D. (2008): Aerosol-cloud-precipitation interactions. Part 1. The nature and sources of cloud-active aerosols. *Earth Science Reviews*, 89, 13–41.
- Barth, M. C.; Kim, S.-W.; Wang, C. et al. (2007): Cloud-scale model intercomparison of chemical constituent transport in deep convection. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7(18), 4709–4731.
- Bertrand, L.; Kay, J. E.; Haynes, J.; Boer, G. (2024): A global gridded dataset for cloud vertical structure from combined CloudSat and CALIPSO observations. *Earth System Science Data*, 16, 1301–1316.
- Blanken, P. D. (2024): *Essentials of Water - Water in the Earth's Physical and Biological Environments*. Cambridge University Press, 342pp.
- Bluestein, H. B. (2024): *The Architecture of Clouds*. Oxford University Press, Oxford, UK, 540pp.
- Burrows, S. M.; McCluskey, C. S.; Cornwell, G.; Steinke, I.; Zhang, K.; Zhao, B. et al. (2022): Ice-nucleating particles that impact clouds and climate: Observational and modeling research needs. *Reviews of Geophysics*, 60, e2021RG000745.
- Cotton, W. R.; Alexander, G. D.; Hertenstein, R.; Walko, R. L.; McAnelly, R. L.; Nicholls, M. (1995): Cloud venting – A review and some new global annual estimates. *Earth-Science Reviews*, 39, 169–206.
- Ervens, B. (2015): Modeling the processing of aerosol and trace gases in clouds and fogs. *Chemical Reviews*, 115(10), 4157–4198.
- Feichter, J.; Quante, M. (2017): From predictive to instructive: Using models for geoengineering. In: Heymann, M., G. Gramelsberger, M. Mahony (Eds.): *Cultures of Prediction: Epistemic and Cultural Shifts in Environmental Science*. Routledge, London, 178–194.
- Forster, P.; Storelvmo, T.; Armour, K. et al. (2021): The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks, and Climate Sensitivity. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani et al. (Eds.): Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 923–1054.

- Forster, P. M.; Smith, C.; Walsh, T. (2025): Indicators of Global Climate Change 2024: annual update of key indicators of the state of the climate system and human influence. *Earth System Science Data*, 17, 2641–2680.
- Gasparini, B.; Quante, M.; Lohmann, U. (2023): Ausdünnung von Zirren, um dem Klimawandel entgegenzuwirken? Kapitel 5.6 in Lozán, J. L., H. Graßl, S.-W. Breckle, D. Kasang und M. Quante (Hrsg.): Warnsignal Klima: Hilft Technik gegen die Erderwärmung? *Climate Engineering in der Diskussion. Wissenschaftliche Auswertungen*, Hamburg, 255–262.
- Gottelman, A.; Christensen, M. W.; Diamond, M. S. et al. (2024): Has reducing ship emissions brought forward global warming? *Geophysical Research Letters*, 51, e2024GL109077.
- Goessling, H. F.; Rackow, T.; Jung, T. (2025): Recent global temperature surge intensified by record-low planetary albedo. *Science*, 387, 68–73.
- Graedel, T. E.; Crutzen, P. (1994): *Chemie der Atmosphäre: Bedeutung für Klima und globale Umwelt*. Spektrum Akademischer Verlag, 512 Seiten.
- Häckel, H. (2024): *Wolken und andere Phänomene am Himmel*. 4., akt. und erw. Auflage, Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, 208 Seiten.
- Hamblyn, R. (2001): *Die Erfindung der Wolken*. Insel Verlag, Frankfurt am Main, 311 Seiten.
- Heymsfield, A. J.; Schmitt, C.; Chen, C.-C.-J.; Bansemer, A.; Gettelman, A.; Field, P. R.; Liu, C. (2020): Contributions of the Liquid and Ice Phases to Global Surface Precipitation: Observations and Global Climate Modeling. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 77, 2629–2648.
- Kanji, Z. A.; Ladino, L. A.; Wex, H.; Boose, Y.; Burkert-Kohn, M.; Cziczo, D. J.; Krämer, M. (2017): Overview of Ice Nucleating Particles. *Meteorological Monographs*, 58, 1.1–1.33.
- Knopf, D. A.; Alpert, P. A. (2023): Atmospheric ice nucleation. *Nature Reviews Physics*, 5, 203–217.
- L’Ecuyer, T. S.; Hang, Y.; Matus, A. V.; Wang, Z. (2019): Reassessing the effect of cloud type on Earth’s energy balance in the age of active spaceborne observations. Part I: Top-of-atmosphere and surface. *Journal of Climate*, 32, 6197–6217.
- Lelieveld J.; Crutzen, P. J. (1991): The role of clouds in tropospheric photochemistry. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 12, 229–267.
- Levizzani, V. (2025): *Das Geheimnis der Wolken – Handbuch zum Lesen des Himmels*. HarperCollins, Hamburg, 206 Seiten.

- Liu, H.; Crawford, J. H.; Considine, D. B. et al. (2009): Sensitivity of photolysis frequencies and key tropospheric oxidants in a global model to cloud vertical distributions and optical properties. *Journal of Geophysical Research*, 114, D10305.
- Lohmann, U.; Feichter, J. (2005): Global indirect aerosol effects: A review. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 5, 715–737.
- Lohmann, U.; Lüönd, F.; Mahrt, F. (2016): *An Introduction to Clouds: From the Microscale to Climate*. Cambridge University Press, Cambridge, 399pp.
- Möhler, O.; DeMott, P. J.; Vali, G.; Levin, Z. (2007): Microbiology and atmospheric processes: the role of biological particles in cloud physics. *Biogeosciences*, 4, 1059–1071.
- Possner, A.; Quaas, J.; Quante, M. (2023): Impfen von Wolken zur Erhöhung der Reflektivität – Konzepte, Potentiale und Risiken. Kapitel 5.5 in Lozán, J. L., H. Graßl, S.-W. Breckle, D. Kasang und M. Quante (Hrsg.): *Warnsignal Klima: Hilft Technik gegen die Erderwärmung? Climate Engineering in der Diskussion. Wissenschaftliche Auswertungen*, Hamburg, 249–254.
- Quaas, J.; Jia, H.; Smith, C. et al. (2022): Robust evidence for reversal of the trend in aerosol effective climate forcing. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22, 12221–12239.
- Quante, M. (2004): The role of clouds in the climate system. *Journal de Physique IV*, 121, 61–86.
- Quante, M. (2011): The role of clouds in atmospheric transport and chemistry. In: Quante, M., R. Ebinghaus, G. Flöser (Eds.): *Persistent Pollution – Past, Present, Future*. Springer Verlag, Berlin, 299–316.
- Quante, M. (2015): Anmerkungen über die Eiswolken und ihre Bedeutung. In: Lozán, J. L., H. Grassl, D. Kasang, D. Notz und H. Escher-Vetter (Hrsg.): *Warnsignal Klima: Das Eis der Erde. Wissenschaftliche Auswertungen*, Hamburg, 99–103.
- Quante, M.; Leisner, T. (2023): Das Strahlungsmanagement im Climate Engineering – ein Überblick. Kapitel 5.1 in Lozán, J. L., H. Graßl, S.-W. Breckle, D. Kasang und M. Quante (Hrsg.): *Warnsignal Klima: Hilft Technik gegen die Erderwärmung? Climate Engineering in der Diskussion. Wissenschaftliche Auswertungen*, Hamburg, 221–229.
- Quante, M.; Matthias, V. (2006): Water in the Earth’s atmosphere. *Journal de Physique*, 139, 37–61.
- Seinfeld, J. H.; Pandis, S. N. (2016): *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*. 3rd edition, John Wiley & Sons, Inc, New York, 1152pp.

- Stephens, G. L. (2005): Cloud Feedbacks in the Climate System: A Critical Review. *Journal of Climate*, 18, 237–272.
- Storelvmo, T. (2017): Aerosol Effects on Climate via Mixed-Phase and Ice Clouds. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 45, 199–222.
- Storelvmo, T.; Tan, I. (2015): The Wegener-Bergeron-Findeisen Process – Its Discovery and Vital Importance for Weather and Climate. *Meteorologische Zeitschrift*, 24, 455–461.
- Tie, X.; Madronich, S.; Walters, S.; Zhang, R.; Rasch, P.; Collins, W. (2003): Effect of clouds on photolysis and oxidants in the troposphere. *Journal of Geophysical Research*, 108(D20), 4642.
- Twomey, S. (1974): Pollution and the planetary albedo. *Atmospheric Environment*, 8, 1251–1256.
- Wallace, J. M.; Hobbs, P. V. (2006): *Atmospheric Science: An Introductory Survey*. Chapter 6 „Cloud Microphysics“. 2nd edition, Elsevier, Amsterdam, 209–270.
- Zelinka, M.; Randall, D.; Webb, M.; Klein, S. A. (2017): Clearing clouds of uncertainty. *Nature Climate Change*, 7, 674–678.

## **Leseempfehlungen**

- Hamblyn, R. (2001): *Die Erfindung der Wolken*. Insel Verlag, Frankfurt am Main, 311 Seiten.
- Levizzani, V. (2025): *Das Geheimnis der Wolken – Handbuch zum Lesen des Himmels*. HarperCollins, Hamburg, 206 Seiten.
- Rahmstorf, S. (2011): *Wolken, Wind & Wetter*. Die Kinder-Uni, Deutsche Verlagsanstalt, München, 223 Seiten.

## **Anschrift** des Verfassers:

Prof. Dr. Markus Quante  
Leuphana Universität Lüneburg  
Fakultät Nachhaltigkeit  
Universitätsallee 1  
21335 Lüneburg  
markus.quante@leuphana.de