

Von Andreas Petzold

NANOPARTIKEL IN

Die Wirkung auf Ge

Ultrafeine Partikel, auch „Nanopartikel“ genannt, spielen in der Diskussion der vom Menschen verursachten (anthropogenen) Veränderungen der Atmosphäre und ihrer Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit und das Klima immer häufiger eine Rolle. Nanopartikel sind ein Teil der in der Atmosphäre vorhandenen Schwebepartikel, des so genannten Aerosols. Luftgetragene Partikel



und Robert Sausen

DER ATMOSPHÄRE

s u n d h e i t u n d K l i m a

sind auch in einer völlig unbelasteten natürlichen Atmosphäre vorhanden, allerdings verändert der Mensch die Zusammensetzung des atmosphärischen Aerosols etwa durch Emissionen aus Industrieprozessen, dem gesamten Verkehrssystem, bestehend aus Straßen-, Schienen-, Schiffs- und Luftverkehr, der Hausfeuerung und landwirtschaftlicher Nutzung deutlich.

Nanopartikel in der Atmosphäre können sich insbesondere in Ballungsgebieten oder am Arbeitsplatz bei langandauernder Belastung negativ auf die menschliche Gesundheit auswirken. Auf einer größeren Skala haben Nanopartikel oder Aerosolpartikel allgemein eine inzwischen unbestrittene Wirkung auf das Klima. Die Untersuchungen möglicher Auswirkungen anthropogener Veränderungen des atmosphärischen Aerosols auf das Weltklima bilden einen wesentlichen Schwerpunkt der Forschung am Institut für Physik der Atmosphäre des DLR.

Für den Begriff Nanopartikel gibt es in der wissenschaftlichen Fachliteratur mehrere Definitionen. Allgemein werden unter Nanopartikeln alle Partikel subsummiert, deren Durchmesser D unter $1\ \mu\text{m}$ ($= 1$ Millionstel Meter) liegt. Die vom Menschen einatembare Aerosolfraction schließt Partikel bis $10\ \mu\text{m}$ Durchmesser ein, die so genannte PM 10-Fraktion. Auf dem Gebiet der Medizin werden als Nanopartikel im Gegensatz zum Feinstaub (Durchmesser kleiner als $2.5\ \mu\text{m}$, oder PM 2.5) die Partikel zusammengefasst, deren Größe unter $0.1\ \mu\text{m}$ liegt. Diese Definition soll im weiteren Verlauf verwendet werden. Als Luftqualitätskriterium wird in Europa zur Zeit die Belastung der Luft durch Schwebstaub im Größenbereich PM 10 verwendet, die Angabe erfolgt als Masse des Schwebstaubs in μg Staub ($= 1$ Millionstel Gramm) pro m^3 Luft.

Eine weitere Möglichkeit, die Belastung der Luft durch Partikel zu charakterisieren, besteht in der Angabe der Anzahl von Partikeln pro Kubikzentimeter Luft. Je kleiner die Partikelgröße, um so höher der Anteil der Partikel an der Gesamtzahl. Umgekehrt stellt sich die Situation im Bezug auf die Masse dar. Je größer die Partikel, um so größer ihr Anteil an der Gesamtmasse des Aerosols. Wird die An-

zahl und Masse aller Partikel im Größenbereich PM 10 als 100 Prozent angenommen, so trägt die PM 2.5-Fraktion 99,9 Prozent zur Anzahl und 37 Prozent zur Masse bei, während die Nanopartikel immer noch 99,3 Prozent zur Anzahl, aber lediglich 3,5 Prozent zur Masse beitragen. Daraus geht deutlich hervor, dass eine Beurteilung der Luftqualität aufgrund der Masse hauptsächlich durch große Partikel bestimmt wird, während eine Beurteilungsbasis bezogen auf die Anzahl der luftgetragenen Partikel durch die sehr kleinen Partikel dominiert wird.

Gesundheitswirkung

Die Tiefe des Eindringens der Partikel in die Atemwegsorgane ist physikalisch abhängig von der Partikelgröße. Die Partikelgröße ist nicht nur wichtig im Bezug auf die Beiträge der einzelnen Aerosolfractionen zu Anzahl oder Masse des Gesamtaerosols, sondern auch im Bezug auf die gesundheitliche Wirkung und die Klimawirksamkeit des Aerosols. Atmosphärisches Aerosol kann über die Atemwege in den menschlichen Körper eindringen, dort abgelagert werden und gesundheitliche Wirkungen entfalten.

Allgemein werden die gesundheitlichen Auswirkungen erhöhter atmosphärischer Partikelexposition als weniger bedeutend angesehen als zum Beispiel die des Tabakrauchens. Dennoch ist allgemein anerkannt, dass eine Auswirkung auf die Volksgesundheit prinzipiell besteht. Kurzfristige Gesundheitsauswirkungen sind erhöhte Sterblichkeitsraten und Krankenhauseinweisungen vor allem bei bereits vorgeschädigten Herz-Kreislauf-Erkrankten und eine Zunahme von Symptomen bei Atemwegserkrankungen, etwa bei Asthmakranken. Langfristige Gesundheitsauswirkungen sind ein generell erhöhtes Auftreten von Atemwegserkrankungen, eine erhöhte Sterblichkeitsrate aufgrund von zunehmenden Herz-Kreis-

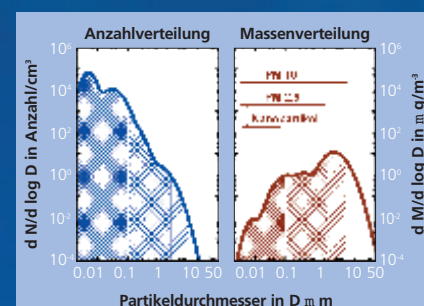
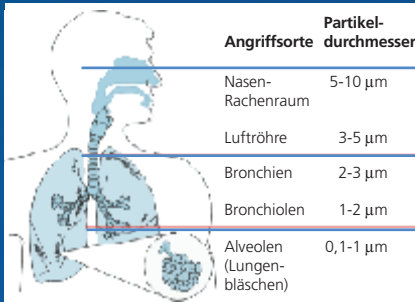


Abb.: Anzahlkonzentration der luftgetragenen Partikel pro Kubikzentimeter Luft und Partikelgrößenintervall $d \log D$ (links) und zugehörige Massenkonzentration des Aerosols pro m^3 Luft und Partikelgrößenintervall $d \log D$ (rechts) in Abhängigkeit von der Partikelgröße für ein typisches Aerosol in unbelasteter Luft. Die enge Schraffur markiert die Nanopartikel, die mittlere Schraffur markiert die PM2.5 ohne Nanopartikel und die leichte Schraffur PM 10 ohne die beiden übrigen Fraktionen, zu beachten sind die logarithmischen Skalen der Achsen.



Angriffsorte	Partikel-durchmesser
Nasen-Rachenraum	5-10 μm
Luftröhre	3-5 μm
Bronchien	2-3 μm
Bronchiolen	1-2 μm
Alveolen (Lungenbläschen)	0,1-1 μm

Abb.: Eindringtiefe der Partikel in das Atemwegssystem in Abhängigkeit von der Partikelgröße.

lauf-Erkrankungen und ein erhöhtes Krebsrisiko bei dauerhafter Exposition gegenüber Dieselruß.

Über die Auswirkung einzelner chemischer Komponenten besteht inzwischen eine vergleichsweise gute Vorstellung. Die chemische Zusammensetzung von Umweltaerosolen ist jedoch höchst komplex, und es ist noch offen, welche Rolle synergetische Effekte zwischen einzelnen chemischen Komponenten des Aerosols für die gesundheitlichen Wirkungen spielen. Damit verbunden ist auch die Frage nach den Quellen und der chemischen und physikalischen Vorgeschichte inhalierter und gesundheitlich wirksamer Aerosoltypen noch offen.

Wie schon erwähnt, tragen ultrafeine oder Nanopartikel nur unwesentlich zur gesamten Partikelmasse bei, treten aber in hohen Anzahlkonzentrationen auf. In Städten werden typische Werte von 10.000 und mehr Partikeln pro Kubikzentimeter Luft gemessen. Da feinere Partikel bei gleicher Massenkonzentration eine höhere Oberfläche bieten als größere, wird ihnen eine große Bedeutung für die Aufnahme von toxischen Komponenten und deren Transport in das Atemwegssystem zugeschrieben. Auf diesen Sachverhalt gründet sich die Hypothese, dass ultrafeine Partikel eine besondere toxische Wirkung aufweisen. Gesetzliche Regulierungen existieren derzeit ausschließlich für die Partikelmassenkonzentration PM 10. Die ab 1.1.2005 in der EU gültigen Grenzwerte sind 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ im Mittel, bezogen auf 24 Stunden, und 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ im Mittel, bezogen auf ein Kalenderjahr. Der Jahresmittelwert soll 2010 auf 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ abgesenkt werden. Im Gegensatz zu den USA ist eine PM 2.5 Regulierung in der EU bisher nicht vorgesehen. PM 10-Grenzwerte der USA sind jedoch höher als diejenigen der EU. Die Erfüllung der EU-

Grenzwerte in Städten ist gemessen an typischen aktuellen Messwerten der PM 10-Konzentration nicht einfach zu erreichen.

Der relative Anteil an Nanopartikeln im gesamten Partikelgrößenspektrum nimmt nach Langzeitmessungen in deutschen Städten in den letzten ca. zehn Jahren systematisch und signifikant zu. Trotz eines rückläufigen Trends in der Aerosolmassenkonzentration ergibt sich damit eine gleichbleibende oder sogar zunehmende Anzahlkonzentration von Nanopartikeln. Besonders eine Zunahme von Partikeln in der so genannten Nukleationsmode (Durchmesser kleiner als 30 Nanometer oder 30 Milliardstel Meter) wurde registriert. In derselben Richtung wirken sich Reduktionsstrategien für partikelförmige Emissionen von Kfz-Motoren aus. Die festzustellende Verschiebung der Größenspektren emittierter Partikel hin zu kleineren Durchmessern hat eine Zunahme der Anzahlkonzentration von Nanopartikeln bei gleichzeitiger Abnahme der emittierten Aerosolmassen zur Folge. Dies betont die nach wie vor bestehende Notwendigkeit, die gesundheitlichen Auswirkungen speziell ultrafeiner Partikel besser zu charakterisieren.

Klimawirkung

Die Beeinflussung des regionalen und globalen Klimas durch Nanopartikel beruht auf der Wechselwirkung der Partikel mit der einfallenden Solarstrahlung und der von der Erdoberfläche abgestrahlten terrestrischen Wärme- oder Infrarotstrahlung. Weitere Effekte können durch chemische Prozesse an der Partikeloberfläche hervorgerufen werden. Hier ist insbesondere eine mögliche Auswirkung von anthropogenen Nanopartikelemissionen auf das Ozon der Troposphäre zu nennen.

Bei den Strahlungseffekten müssen direkte und indirekte Effekte unterschieden werden. Der direkte Strahlungseffekt bezeichnet die Wechselwirkung der Aerosolpartikel mit solarer und terrestrischer Strahlung in Form von Streuung oder Absorption. Der direkte Effekt beeinflusst in erster Linie den solaren Strahlungsbereich (Wellenlänge $< 4 \mu\text{m}$). Durch den direkten Effekt kann Solarstrahlung am Aerosol in den Weltraum zurückgestreut werden und stünde damit für eine Erwärmung der Erdoberfläche und der bodennahen Luftschichten nicht mehr zur Verfügung (kühlende Wirkung), oder die Solarstrahlung kann durch das Aerosol absorbiert und in Wärme umgesetzt werden und würde damit zu einer Erwärmung der absorbierenden Luftschicht führen (erwärmende Wirkung).

Der indirekte Strahlungseffekt bezeichnet die indirekte Wechselwirkung zwischen solarer und terrestrischer Strahlung und Partikeln über deren Einfluss auf die Wolken, da luftgetragene Partikel als Keime für die Bildung von Wolkentropfen dienen können. Eine Erhöhung der Wolkondensationskeime kann zu einer Verringerung der Wolkentropfengröße (erster indirekter Effekt) und zu einer Erhöhung der Lebensdauer von Wolken (zweiter indirekter Effekt) führen. Im jüngsten Bericht des International Panel on Climate Change (IPCC) der UN von 2001 werden vier anthropogene Aerosolklassen genannt, die für den direkten Strahlungseffekt entscheidend sind: Sulfataerosol (streuend), Aerosol aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe (absorbierend), Aerosol aus der Verbrennung von Biomasse (absorbierend) und Mineralstaub (streuend und absorbierend). Drei dieser Aerosolklassen (Sulfataerosol, Verbrennungsaerosole) bestehen zu einem großen Teil aus Nanopartikeln. Für die indirekten Strahlungseffekte wird nicht zwischen ver-

schiedenen Aerosolklassen differenziert, da sich anthropogene von natürlichen Einflüssen nur sehr schwer trennen lassen. Bei den für die indirekten Strahlungseffekte relevanten Partikeln aus anthropogenen Emissionen spielen Nanopartikel eine wichtige Rolle.

Partikelemissionen des Verkehrssektors

Der Hauptindikator für anthropogen bedingte Emissionen von Nanopartikeln ist der schwarze Kohlenstoff oder Ruß, der bei unvollständigen Verbrennungsprozessen entsteht. Neben den primären Kohlenstoffpartikeln können sich aus anthropogenen schwefelhaltigen Emissionen Sulfatpartikel bilden, die ebenfalls zu den Nanopartikeln beitragen. Der schwarze Kohlenstoff ist jedoch nicht nur als Indikator für anthropogene Partikelemissionen von Bedeutung, sondern er spielt wegen seiner starken Absorptionsfähigkeit für die solare Strahlung auch für die Klimawirkung des Aerosols eine zentrale Rolle.

Am Institut für Physik der Atmosphäre wurde in Zusammenarbeit mit dem mittelständischen Unternehmen ESM Andersen Instruments in Erlangen ein neues Gerät – ein so genanntes Mehrwinkelabsorptionsphotometer (MAAP) – entwickelt, das eine stark verbesserte Messung des schwarzen Kohlenstoffs in der Atmosphäre ermöglicht. Informationen zu diesem Messinstrument sind unter http://www.esm_andersen.de/andersen/product/CARUSSO-Brochure.pdf im Internet zu finden. Mit dem MAAP wurden bisher Messungen in der Troposphäre auf der Zugspitze, dem Jungfraujoch in der Schweiz, in der planetaren Grenzschicht auf Bergstationen im Bayrischen Voralpenland, im Taunus und in verschiedenen Innenstädten durchgeführt. Die Massenkonzentrationen in der sauberen freien Troposphäre und an Verkehrsstraßen weichen um einen Faktor 100 voneinander

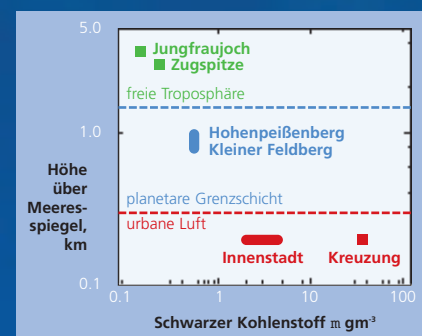


Abb.: Tagesmittelwerte der Massenkonzentration von schwarzem Kohlenstoff (Ruß) in Großstädten (braun), in der planetaren Grenzschicht (blau) und in der freien Troposphäre an zwei Bergstationen (grün); die Messwerte stammen aus dem Zeitraum 2000 bis 2003.

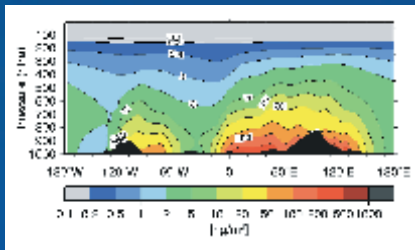


Abb.: Modellierung der Ausbreitung von partikelförmigem schwarzem Kohlenstoff aus dem globalen Straßenverkehr; dargestellt ist die über den Sektor von 30 bis 70° Nord gemittelte Massenkonzentration des schwarzen Kohlenstoffs aus Straßenverkehrsemissionen.

ab. Hier wird der Einfluss insbesondere von verkehrsbedingten Partikelemissionen sehr deutlich. Ein Einsatz dieses Messgeräts an Messstellen des internationalen Global Atmospheric Watch Programms und an Messstellen der US-amerikanischen Umweltbehörde EPA ist derzeit in Vorbereitung.

Neben der Erfassung der Luftbelastung durch anthropogene Partikelemissionen werden am Institut für Physik der Atmosphäre auch Arbeiten zur Charakterisierung von Partikelemissionen aus Verbrennungsprozessen durchgeführt. Die Arbeiten zur Emission von Partikeln durch den Luftverkehr in Reiseflughöhe sind weitgehend abgeschlossen und unter anderem in das DLR-Kataster für luftverkehrsbedingte Partikelemissionen eingeflossen. Aktuelle Arbeitsrichtungen in internationalen Verbänden befassen sich mit Partikelemissionen von Flugzeugen im Flughafennahbereich und deren Auswirkungen auf die lokale und regionale Luftqualität sowie mit Partikelemissionen aus Schiffen, über die bisher nur sehr wenig bekannt ist. Die verfügbaren Daten zeigen, dass der KFZ-Verkehr etwa zehn bis 20 mal mehr Masse an partikelförmigem schwarzem Kohlenstoff pro Masse CO_2 emittiert als ein Flugzeugtriebwerk im Reiseflug. Erste Abschätzungen für einen Schiffsmotor deuten darauf hin, dass dieser noch einmal zwei bis fünf Mal mehr partikelförmigen Kohlenstoff pro CO_2 emittiert als ein LKW-Dieselmotor. Die Unterschiede zwischen diesen Emissionsfaktoren rühren sowohl von der Art der Verbrennung als auch von der Art des verwendeten Treibstoffs her. In den kommenden Jahren sind mehrere international verankerte Aktivitäten geplant, die auf eine Quantifizierung der Auswirkungen von gas- und partikelförmigen Emissionen aus dem globalen Schiffsverkehr auf das Klima abzielen.

Für die Auswirkungen der Partikelemissionen aus dem Straßenverkehr auf die globale Atmosphäre liegen am Institut

für Physik der Atmosphäre bereits erste Resultate vor. In einer Modellstudie wurde mit Hilfe des globalen Klimamodells ECHAM 4 unter Verwendung des neuen Programmmoduls MADE zur Simulation der Dynamik des Aerosols untersucht, welchen Beitrag Partikelemissionen aus dem globalen Straßenverkehr zur Massenkonzentration des schwarzen Kohlenstoffs liefern. Die Emissionsstärken der einzelnen Partikelquellen in Europa, Asien und den USA wurden internationalen Emissionskatastern entnommen. Es stellt sich heraus, dass partikelförmiger Kohlenstoff aus Straßenverkehrsemissionen bis in die mittlere freie Troposphäre und über weite Strecken transportiert werden kann. Der vom Modell simulierte gesamte schwarze Kohlenstoff stimmt gut mit den Konzentrationswerten aus Punktmessungen überein. Der Straßenverkehr liefert einen Beitrag von bis zu 20 Prozent zur gesamten Massenkonzentration des schwarzen Kohlenstoffs in der Atmosphäre. Diese Modellstudie in Verbindung mit Messwerten über Europa zeigt in sehr klarer Weise, dass Partikelemissionen aus dem Straßenverkehr nicht nur ein lokales Phänomen mit negativen Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit sind, sondern dass diese Emissionen auch auf einer regionalen Skala und in höheren Schichten der Atmosphäre von großer Bedeutung sind. Der Verbund aller Forschungsarbeiten am Institut für Physik der Atmosphäre sowohl von den Modellier-Arbeitsgruppen als auch von den im Feld messenden Gruppen kann im Rahmen des DLR-Programmschwerpunkts Verkehr einen sehr wichtigen Beitrag zur Beurteilung der Relevanz des gesamten Verkehrssystems für die regionale Luftqualität und für das globale Klima liefern.

Dr. Andreas Petzold und Prof. Dr. Robert Sausen, DLR Institut für Physik der Atmosphäre, Oberpfaffenhofen. ◀