

Wort der Woche

BEGRIFFE DER WISSENSCHAFT



Der Mensch hat massiv in den Stickstoffkreislauf eingegriffen. Sogar in Hochgebirgsseen findet sich heute Stickstoff, der Tausende Kilometer entfernt als Dünger ausgebracht wurde.

» VON MARTIN KÜGLER

In der Vorwoche war an dieser Stelle von Stickoxid-Emissionen aus Dieselmotoren die Rede. Diese werden ein echtes Problem – als Vorläufersubstanz von Feinstaub und bodennahem Ozon, als saurer Regen und als Beitrag zur Überdüngung der Welt.

Durch die menschliche Aktivität hat sich die Menge an „reaktivem Stickstoff“ (Ammonium, Nitrit, Nitrat) mehr als verdoppelt: Bis vor gut 100 Jahren waren Blitrschläge und die Aktivität bestimmter Bodenbakterien die einzigen Prozesse, die Luftstickstoff in eine reaktive Form verwandeln konnten. Erst durch das Haber-Bosch-Verfahren wurde es möglich, Luftstickstoff auch künstlich in eine Form zu bringen, die fit Pflanzen verwertbar ist. Das erlaube eine dramatische Steigerung der Ernten – ohne diesen Prozess könnte die Weltbevölkerung wohl kaum ernährt werden.

Allerdings nutzen Pflanzen nur einen Teil des Düngers, mit heutigen Methoden verbreitet sich rund die Hälfte in die Umwelt: Als Nitrat wird der Stickstoff in Gewässern ausgespült, in Gasform (Ammoniak, Stickoxide, Lachgas) wird er vom Wind verfrachtet. Es kommt zu einer Überdüngung von Lebensräumen (und dadurch zu einer Abnahme der Biodiversität). Lachgas ist zudem ein starkes Treibhausgas.

Erhöhte Nitrat-Werte findet man daher heute nicht nur in landwirtschaftlich intensiv genutzten Regionen, sondern auch weit abseits jeglicher Zivilisation, etwa auf tropischen Inseln oder in abgelegenen Bergregionen. Kanadische Forscher um Katrina Moser haben sich bei alpinen Seen in Utah genau angesehen, aus welchen Quellen der Stickstoff kommt. Gemessen wurde dabei die Verteilung von Stickstoff- und Sauerstoff-Isotopen (die sich durch die Zahl von Neutronen im Atomkern unterscheiden). Dadurch lässt sich unterscheiden, ob die Stickstoffmoleküle in der Luft (durch Blitze oder Verbrennungsprozesse) oder auf der Erde (durch den Abbau von Düngemitteln) gebildet wurden.

Das Ergebnis ist wirklich erstaunlich: Nur 30 Prozent der Nitrate stammen demnach aus natürlichen Quellen. Zehn Prozent kommen aus Autotagasen – und 60 Prozent aus Düngemitteln (*Nature Communications*, 8. 2.). Diese Daten zeigen einmal mehr, wie vordringlich eine Effizienzsteigerung in der Landwirtschaft ist: Je mehr Stickstoff die Pflanzen aus dem Dünger verwerten, umso besser ist das für die Biodiversität, die Luftreinhaltung, den Klimaschutz und das Saubehalten von Wasser. Hier sind viele Innovationen gefragt!

Der Autor leitet das Forschungsprojekt der „Presse“ und ist Chefredakteur des „Universum Magazins“. ■■■



meineuldg@diepresse.com

diepresse.com/wortderwoche

ELEMENTE

Tiere und wir I: Im Heulen der Wölfe den Ursprung unserer Sprache suchen

Kaniden – Wölfe, Hunde und Kojoten – heulen nicht so einfach vor sich hin, alle haben ihre eigenen Dialekte: Timberwölfe etwa kommunizieren in tiefen Tönenlagen, Rotwölfe in hohen. Insgesamt haben die Kaniden 21 Dialekte, Arik Kerschbaum (Cambridge) hat sie weltweit an 2000 Heulern von 13 Arten und Unterarten dokumentiert. Was da gehault wird, ist wenig klar, Kerschbaum erhofft sich aber Rückschlüsse auf die Entstehung unserer Sprache (*Behavioural Processes* 21. 1.).

Tiere und wir II: Pferde können uns unsere Wut vom Gesicht ablesen

Wir kommunizieren nicht nur mit Sprache, sondern etwa auch mit Mimik. Hundebesitzer sind sicher, dass ihr Freund das versteht. Ganz gesichert ist das nicht, aber die zweitbesten Freunde können es: Amy Smith (Sussex) hat Pferden zwei Fotos eines ihnen unbekanntes Mannes gezeigt, einmal lächelt er, einmal schaut er wütend. Das Lächeln interessiert nicht, aber die Wut weckt Sorge: Die Pferde wenden den Kopf nach rechts. Dann steht das linke Auge, es meldet der rechten Gehirnhälfte, dort wird Bedrohliches verarbeitet (*Biological Letters* 10. 2.).

Er relativierte den Raum

Die Ideen von Ernst Mach beeinflussten Einsteins Suche nach der Gravitationstheorie: Zum 100. Todestag des großen Physikers und Philosophen.

» VON PETER C. AICHELBURG

Am 19. Februar 1916 der in Mähren geborene Physiker und Philosoph Ernst Mach starb, war die neue Gravitationstheorie Albert Einsteins gerade etwas mehr als zwei Monate alt. Jene Theorie, um die Einstein jahrelang gerungen hat, zur deren Aufstellung die Ideen Machs entscheidende Impulse gegeben hatten. Doch später distanzierte sich Einstein von dem Mach'schen Prinzip, wie er es nannte.

Was waren diese Ideen, von denen Einstein so begeistert war? Ernst Mach vertrat den Standpunkt, dass nur den Sinnesorganen zugängliche Phänomene bei der Erklärung der Natur Platz haben sollten. Unter diesem Gesichtspunkt kritisierte er den Begriff des absoluten Raums und der absoluten Zeit bei Newton. Begriffe, auf denen die Newton'sche Theorie aufbaut und die es über Jahrhunderte erlaubten, erfolgreich die Planetenbewegung, Sonnen- und Mondfinsternisse und die Bahnen von Kometen zu berechnen.

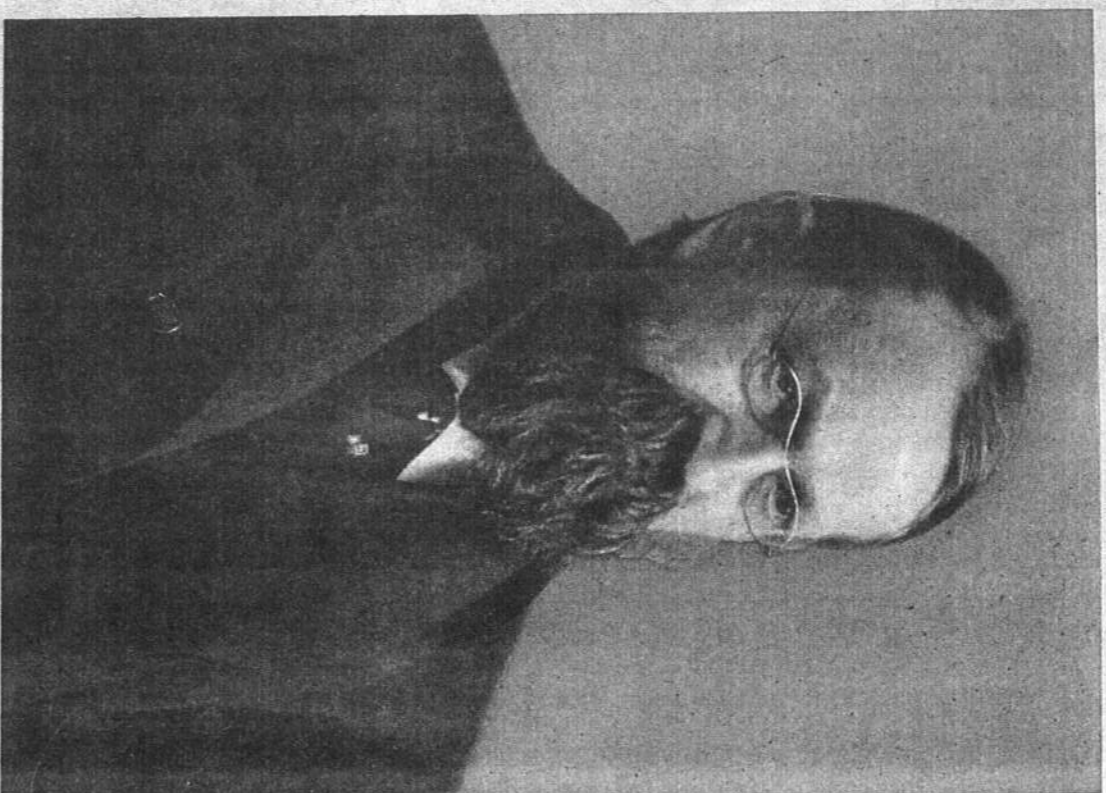
Trägheitskräfte. Bei der Kritik Machs ging es um die Trägheit, also um das Phänomen, dass Körper Widerstand gegen Bewegungsänderung zeigen. Aus dem Träglichen ist uns der Effekt geläufig: Beim Abbremsen oder Beschleunigen des Autos verspüren wir Kräfte, die dieser Änderung entgegenwirken.

Newton zeigte diese Trägheit anhand eines mit Flüssigkeit gefüllten rotierenden Eimers. Die Flüssigkeit wird durch die Trägheitskräfte (auch Fliehkkräfte genannt) nach außen gedrückt. Newtons Erklärung: Trägheit macht sich immer bei Bewegungsänderung bezüglich des absoluten Raums bemerkbar. Mach empfand diese Argumentation als irrig, denn dieser absolute Raum sei für die Physik ein unbrauchbares Konstrukt. Es sei vielmehr die Rotation des Eimers in Bezug auf all die anderen Massen im Universum, die die Flüssigkeit an den Rand drückt. Schärfer formuliert: ohne andere Körper keine Trägheit.

Einstein war von der Idee angetan. In seiner Speziellen Relativitätstheorie ist Geschwindigkeit relativ, d. h. nur in Bezug auf andere Körper feststellbar. Beschleunigung dagegen absolut. Sie macht sich durch eben diese Trägheitskräfte bemerkbar, ohne jeden äußeren Bezug. Einsteins Ziel war, eine Theorie zu formulieren, in der auch Beschleunigung relativ ist, ganz im Sinn von Mach.

Hier kommt die Gravitation ins Spiel, denn Einstein bemerkte, dass sie die gleiche Wirkung wie Beschleunigung auf Körper ausübt. Diese Beobachtung führte schließlich zu seiner Theorie, in der Gravitation auf geometrische Eigenschaften des Raums (eigentlich der Raumzeit) zurückgeführt wird. Geometrie und Materie beeinflussen sich wechselseitig. Diese Beeinflussung sollte laut Einstein so weit gehen, dass es ohne Materie auch keinen Raum geben dürfte, „dass es unmöglich ist, dem Raum und der Zeit notwendig eine getrennte Existenz unabhängig von den wirklichen Objekten der physikalischen Realität zuzuschreiben“.

Einsteins Fehler. Einstein wollte diese Interpretation des Mach'schen Prinzips erzwingen und beging einen entscheidenden Fehler: Er ergänzte seine Gleichungen durch eine „kosmologische Konstante“. 1917 schrieb er an seinen Kollegen Ehrenfest: „Ich habe wieder etwas verbrochen in der Gravitationstheorie, was mich ein wenig in Gefahr bringt, in ein Tollhaus interniert zu werden.“ Kurz nachdem Einstein seine Gleichungen verändert hatte, publizierte der Astronom Wilhelm de Sitter eine Lösung eines kosmologischen Modells ohne Materie. Einstein versuchte Fehler darin zu finden, meinte, dass irgendwo Materie versteckt sein müsse. Schließlich musste er aber die Richtigkeit der Lösung akzeptieren. Es könnte also doch Raum ohne Ma-



Prof. Dr. Ernst Mach

Er kritisierte Newtons Grundlagen der Mechanik: Ernst Mach (1938–1916).

■■■ APA

terie gehen, im Widerspruch zu Mach. Es erstaunt, dass Einstein hier noch ganz dem mechanistischen Weltbild des 19. Jahrhunderts anhing und dem geometrischen Feld kein Eigenleben zugestand.

Aber nochmals zurück zu Mach und Newton. Eine Möglichkeit, die Erddrehung nachzuweisen, ist mit dem sogenannten Foucaultschen Pendel. Seine Schwingungsebene dreht sich re-

lativ zur Erde. Newton sagt: Das Pendel behält seine Richtung in Bezug auf den absoluten Raum bei, und die Erde dreht sich darunter weg. Mach hingegen meint: Es sind die anderen Gestirne, die die Ebene fixieren.

Lassen sich diese beiden Erklärungen durch Beobachtung unterscheiden? Schließlich können wir das Universum nicht austräumen. In Gedanken schon: Man stelle sich einen Kosmos vor, in dem es außer der rotierenden Erde keine Massen gibt. Dann müsste nach Mach die Pendelebene mitrotieren. Nun begnügen wir nach und nach Sterne ins Universum einzufüllen. Je mehr Materie vorhanden ist, desto mehr sollte die Pendelebene hinter der Erddrehung zurückbleiben, bis sie schließlich durch die Gesetze fast fixiert ist. Fast, weil im Mach'schen Gedankenexperiment ein kleiner Effekt durch die Erddrehung bestehen bleiben müsste, im Gegensatz zu Newtons Erklärung.

Bei einem Vortrag 1913 in Wien sprach Einstein über die Wirkung rotierender Körper auf ihre Umgebung. Demnach sollte das von dem Körper erzeugte Gravitationsfeld, sprich die Geometrie, dazu führen, dass eine Art von Mitziehen

entsteht, analog zu einer zähen Flüssigkeit beim Umrühren.

Diese Idee wurde 1918 vom österreichischen Physiker Hans Thirring und vom deutschen Mathematiker Josef Lenze aufgegriffen. Doch wegen seiner Kleinheit konnte der Thirring-Lenze-Effekt erst vor ca. zehn Jahren nachgewiesen werden, mit einem mit Gyroskopen (Kreiseisen) bestückten Satelliten in einer Erdumlaufbahn. In gewissem Sinn kann man dies als Bestätigung des Mach'schen Prinzips ansehen.

Haben also Machs Ideen in Einsteins Theorie ihren Niederschlag gefunden? Die Antwort ist nicht eindeutig, es gibt viele Formulierungen des Mach'schen Prinzips, die Experten sind nicht einig. Sicher ist, dass Machs Ideen Leitgedanken auf dem Weg zu Allgemeinen Relativitätstheorie waren.

Prof. Peter Christian Aichelburg ist theoretischer Physiker an der Uni Wien. ■■■

PHYSIKER PHILOSOPH

Ernst Mach, 1838 bei Brünn geboren, 1916 in Vaterstetten gestorben, forschte an den Universitäten in Wien, Graz und Prag. Er ist bis heute durch die Mach-Zahl in aller Munde: Sie ist das Verhältnis der Geschwindigkeit eines Körpers zur Schallgeschwindigkeit. Mach war nicht nur Physiker (der z. B. den Dopplereffekt experimentell bestätigte), sondern auch entscheidender Gegner jeder Metaphysik. Seine Haltung war streng positivistisch: Wissenschaft könne nur die Welt, wie sie sich in den Sinnesindrücken zeigt, möglichst einfach beschreiben. Wahrheit sei relativ, relevant sei nur der Nutzen. Der Wiener Kreis sah Mach als Vorreiter.