

Plasma – was ist das?

Oliver RUDOLPH
Fraunhofer IISB

Einleitende Worte

Die meisten mögen es im Unterricht in der Schule einmal gehört haben, ein jeder kennt es aber sicherlich aus persönlicher Erfahrung: die uns umgebende, fassbare Welt – Physiker sprechen in diesem Zusammenhang auch gerne von Materie – liegt in verschiedenen Zuständen vor. Wasser etwa ist als Flüssigkeit lebensnotwendig! Sei es aus direkter Zufuhr durch Nahrungsaufnahme oder aus hygienischen Gründen. Wasser kann uns aber ebenso in fester Form, sprich als Eis, den Cocktail am Strand bei sommerlichen Temperaturen kühlen oder überhaupt erst genießbar machen. Wenn wir Wasser ausreichend erhitzen oder nur lange genug bei Raumtemperatur stehen lassen, wird es irgendwann für uns scheinbar verschwunden sein. Es hat sich „in Luft aufgelöst“!

Diese drei Zustände, man sagt dazu auch Aggregatzustände oder Phasen, also fest, flüssig und gasförmig, begegnen uns im Alltag hundertfach und erscheinen uns daher als natürlich und selbstverständlich. Es existiert jedoch ein weiterer Aggregatzustand, welcher tatsächlich in unserem Universum viel häufiger vorliegt (etwa zu 99 %!) als die zuvor genannten, (scheinbar) lediglich nur nicht immer in greifbarer Nähe: der Aggregatzustand des Plasmas.

Struktur der Materie

Was ist das nun: Plasma? Für die Erklärung und um ein prinzipielles Verständnis zu erhalten, muss zunächst die Struktur der uns umgebenden Materie näher betrachtet werden, denn: alle Materie besteht aus Atomen. Atome, das sind gewissermaßen die elementaren Bausteine der Materie, aber keineswegs die kleinsten. Denn Atome bestehen

ihreerseits wiederum aus einem Kern mit Protonen und Neutronen, und einer Hülle aus Elektronen. Protonen und Elektronen sind zugleich Träger einer elektrischen Ladung, die sich gerade im Vorzeichen unterscheidet, sodass sie sich gegenseitig anziehen, siehe Abb. 1. (Ohne elektrische Anziehung, der sogenannten Coulomb-Wechselwirkung, gäbe es keine stabilen Atome und somit auch kein Universum, wie wir es kennen!) Fehlen einem Atom ein oder mehrere Elektronen oder ist es sogar von einem oder mehreren zusätzlichen Elektronen umgeben, spricht man von Ionen, vgl. Abbildung 2.

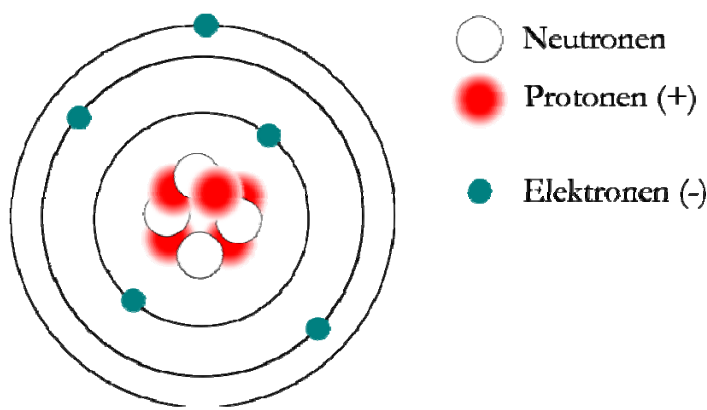


Abbildung 1: Schematische Darstellung eines Atoms bestehend aus 5 Neutronen, 5 Protonen und 5 Elektronen. Wesentlich hierbei ist, dass die Anzahl von Protonen (positive Ladungsträger) und Elektronen (negative Ladungsträger) übereinstimmt und das Atom aus der Distanz betrachtet somit elektrisch neutral erscheint.

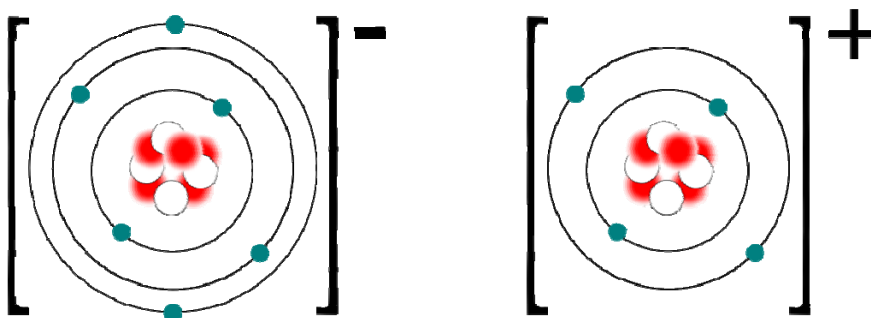


Abbildung 2: Schematische Darstellung von Ionen. Links: Ein sogenanntes Anion, welches durch ein zusätzliches Elektron entstanden ist und somit über einen negativen Ladungsüberschuss verfügt. Rechts: Ein Kation, welches weniger Elektronen als Protonen hat und somit über einen positiven Ladungsüberschuss verfügt.

Jeder Festkörper, jede Flüssigkeit und jedes Gas enthält neben Atomen und Molekülen (zusammenhängende Gruppen von Atomen) immer auch zu einem gewissen, sehr kleinen Teil Ionen. (Ausnahme: Tatsächlich existieren Festkörper, die ausschließlich aus Ionen bestehen, diese bezeichnet man als Salze. Die Ionen sind hier allerdings aufgrund der Coulomb-Wechselwirkung sehr fest aneinander gebunden und können sich kaum voneinander entfernen.) Eine skizzierte Übersicht dieser drei Zustände findet sich in Abbildung 3. Ein Plasma ist demgegenüber eine „Flüssigkeit“ oder ein „Gas“, welches viel mehr (geladene) Ionen als (neutrale) Atome enthält; diese können sich einigermaßen frei voneinander bewegen (Abbildung 4). Detailliertere Ausführungen zum Zusammenhang zwischen Aggregatzustand und Anzahl der Ionen finden sich im nun folgenden Abschnitt.

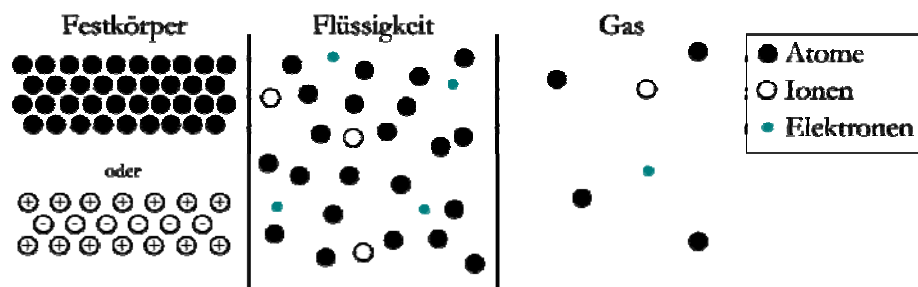


Abbildung 3: Die drei Aggregatzustände fest, flüssig und gasförmig im Vergleich. Mit Ausnahme des Festkörperzustandes, der ausschließlich aus Ionen besteht (Salz), liegen bei allen drei Zuständen nur geringe Mengen an Ionen vor, die Anzahl neutraler Teilchen überwiegt deutlich. Während im Festkörper die Atome bzw. Ionen sehr fest aneinander gebunden sind, können sich diese in Flüssigkeiten und Gasen vergleichsweise frei bewegen.

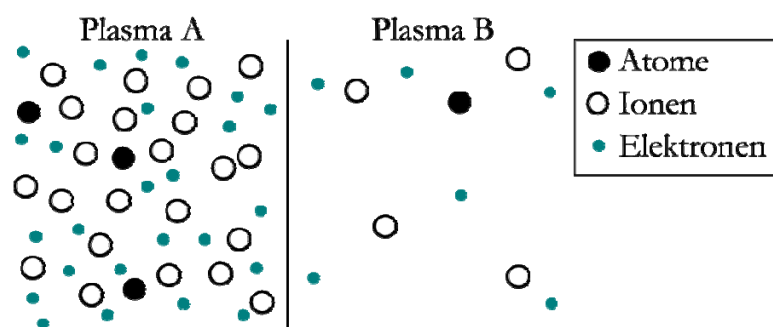


Abbildung 4: Zwei Beispiele für Plasmen. Plasma A (links) verfügt über eine höhere Teilchendichte als Plasma B (rechts), ansonsten ist in beiden Fällen die deutliche Zunahme an ionisierten Teilchen im Gegensatz zu Flüssigkeiten oder Gasen zu erkennen.

Erzeugung von Plasmen

Wie kann ein solches Plasma nun entstehen oder gar erzeugt werden (und wozu)? Wie bereits eingangs erwähnt, existieren tatsächlich überall in der Natur Plasmen. Das für den Menschen wohl prominenteste Beispiel offenbart sich bei einem Blick in den Himmel: Sterne, wie auch unsere Sonne einer ist, liegen größtenteils im plasmatischen Zustand vor, d. h. fast alle Bausteine, aus denen diese Sterne aufgebaut sind, sind Ionen. Doch wie kommt es dazu? Beim Gedanken an die Sonne kommt einem neben „Licht“ mit Sicherheit auch „Wärme“ in den Sinn, und eng daran gekoppelt der Begriff Temperatur. Temperatur ist ein Maß für die innere Energie, über die ein physikalisches System verfügt. Diese innere Energie wird oft mit der Bewegung der Teilchen in Zusammenhang gebracht und anschaulich erklärt. Wird einem System also Energie, mit welchen Methoden auch immer, zugeführt oder entzogen, so erwärmt es sich oder kühlt ab. Um der anschaulichen Interpretation der Teilchenbewegung zu folgen, führt eine Energiezufuhr – also eine Erwärmung – dazu, dass sich die Teilchen schneller bewegen, ihre kinetische Energie steigt. Bei Energieentnahme findet der umgekehrte Prozess statt, die Teilchen werden langsamer. Mit diesem einfachen Erklärungsmodell lassen sich nun die drei Aggregatzustände fest, flüssig und gasförmig besser verstehen. Betrachten wir dazu erneut das in der Einleitung bereits genutzte Beispiel „Wasser“. Bei „üblicher“ (für den Menschen angenehmer) Raumtemperatur liegt Wasser als Flüssigkeit vor. Darin bewegen sich die Teilchen mehr oder weniger ungeordnet hin und her, stoßen dabei zusammen, aber hängen nicht fest aneinander. Kühlt man das Wasser nun ab, entzieht ihm also Energie, werden die Teilchen zunehmend langsamer. Sobald sie langsam genug sind, können gewisse Wechselwirkungen dazu führen, dass sie aneinander „kleben“ bleiben. Wenn ausreichend Teilchen derart aneinander haften bleiben, bildet sich Eis, der feste Aggregatzustand des Wassers. Hätte man es hingegen erhitzt, dem Wasser also Energie zugeführt, so wären die Teilchen immer schneller geworden, ihre Stöße miteinander immer heftiger, sodass diese sich gegenseitig geradezu wegtreiben. Das Wasser wäre verdampft und in seine gasförmige Phase übergegangen, vorausgesetzt das Wasser befände sich in einem ausreichend großen oder gar offenen Gefäß.

Was würde nun passieren, wenn dem Wasserdampf weiter Energie zugeführt wird? Das mechanische Vorstellungsmodell liefert

hierauf keine entsprechende Antwort mit Ausnahme, dass die Teilchen zunehmend schneller würden. Erinnern wir uns für einen Moment aber daran, dass jene Teilchen, die Atome, über eine innere Struktur verfügen und nicht elementar sind. Wenn den Teilchen Energie zugeführt wird, äußert sich dies bei niedrigen Temperaturen zunächst in einer Zunahme ihres Geschwindigkeitsbetrags. Sobald jedoch Temperaturen erreicht werden, die ausreichend hoch sind, beginnt diese innere Struktur aufzubrechen und die Elektronen werden von den Atomkernen getrennt, die Atome werden ionisiert. Man hat es dann mit einem Plasma zu tun! (Abbildung 5.) Bei weiterer Erhöhung der Temperatur folgt das zuvor begonnene Spiel, zunächst werden die Elektronen immer schneller (dies ist mit ihrer geringen Masse zu begründen), anschließend werden auch die Ionen zunehmend schneller. (Anmerkung: Dieser Sachverhalt der unterschiedlichen Geschwindigkeitszunahme von Elektronen und Ionen führt zur Einführung zweier Temperaturen: der Elektronen- und der Ionen-temperatur. Da zunächst die Elektronen beschleunigt werden, ist ihre Temperatur höher als die der Ionen, man spricht von einem Nieder-temperaturplasma. Das „niedrig“ bezieht sich dabei auf die Ionen-temperatur. Werden auch die Ionen zunehmend schneller und ihre Temperatur nähert sich der Elektronentemperatur an, so ist von einem Hochtemperaturplasma die Rede.)

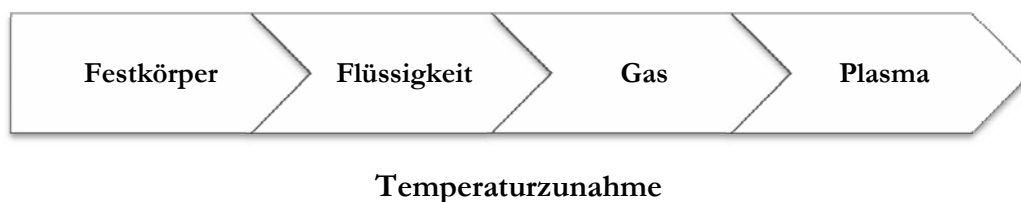


Abbildung 5: Temperaturabhängigkeit der Phasen: Mit zunehmender Temperatur geht ein System von der festen Phase in die Aggregatzustände flüssig, gasförmig und plasmatisch über.

Nach dieser Ausführung kann die Frage nach der Erzeugung von Plasmen umformuliert werden in die Frage nach der Energiezufuhr. Welche Möglichkeiten gibt es also, einem System derart (d. h. in geeigneter Weise) Energie zuzuführen, dass seine Bestandteile zunehmen ionisiert werden und ein Plasma entsteht?

Natürliche Vorkommen

Ein natürlicher Entstehungsort von Plasmen hat bereits Erwähnung gefunden: in Sternen. Die dort ablaufenden kernphysikalischen Fusionsreaktionen liefern die Energie, die für die Erzeugung des im Stern vorliegenden Plasmas notwendig ist. Auch bei einem alltäglichen Wetterphänomen entsteht kurzfristig ein Plasma. Die bei Gewittern häufig zu beobachtenden Blitze entsprechen dem plasmatischen Zustand der Atmosphäre. Die Luft wird durch elektrostatische Aufladung soweit ionisiert, dass elektrische Ladungsträger (im Wesentlichen Elektronen) sich frei bewegen können und für den Ausgleich der Spannungsdifferenz zwischen Himmel und Erde sorgen. Aber auch eine bei Bränden auftretende Flamme besteht zu einem gewissen Teil aus Plasma. Die darin ablaufenden exothermen chemischen Reaktionen (auch als Oxidationsreaktionen bezeichnet) liefern ausreichend Energie, um die Zahl der Ionen deutlich zu erhöhen und somit ein Plasma auszubilden.

Künstlich erzeugte Plasmen

Um die natürlich auftretenden Phänomene besser verstehen und Plasmen als solche besser beschreiben zu können, hat man Methoden entwickelt, um diesen Aggregatzustand künstlich zu erzeugen. Doch auch aus technologischer Sicht haben sich Plasmen in vielfältiger Hinsicht als hilfreich erwiesen. Im folgenden Abschnitt werden daher einige Anwendungsgebiete aufgeführt. Doch zunächst zum zugrundeliegenden Prinzip der künstlichen Erzeugung eines Plasmas. Wie zuvor schon ausgeführt, beruht seine Entstehung auf dem Vorhandensein einer Energiequelle, die zur Ionisation der Atome des betreffenden Mediums führt. (Wird die Energiequelle abgeschaltet, erlischt das Plasma, da Elektronen und Ionen sich zu Atomen rekombinieren.)

Häufig eingesetzte Energiequellen nutzen elektrische Felder, um geladene Teilchen zu beschleunigen. Da Atome nach außen jedoch elektrisch neutral sind, können diese so (augenscheinlich) zunächst nicht beschleunigt werden! Geht man zunächst von schwachen elektrischen Feldern aus, so ist diese Annahme sicherlich richtig. Im Abschnitt über die Struktur der Materie wurde jedoch bereits erwähnt,

dass jederzeit in jedem Aggregatzustand auch eine sehr geringe Zahl an Ionen (und damit auch Elektronen) vorliegt. Diese Ionen und Elektronen reagieren auf das äußere elektrische Feld und werden beschleunigt. Auf ihrem Weg stoßen sie untereinander, aber auch mit den neutralen Atomen zusammen. Haben diese Stöße ausreichend Energie, d. h. sind die Ionen und Elektronen ausreichend schnell, können sie weitere Ionen-Elektronen-Paare erzeugen, die wiederum beschleunigt werden. Es entsteht eine regelrecht lawinenartige Kaskade dieser Paarerzeugung bis eine hohe Zahl ionisierter Teilchen, also ein Plasma, vorliegt. Wenn die elektrischen Felder sehr stark sind, besteht sogar die Möglichkeit einer direkten Ionisation von Atomen. Da Atome räumlich ausgedehnte Gebilde mit einer inneren Struktur sind, können starke elektrische Felder die Elektronen so weit vom Atomkern trennen, dass sie regelrecht auseinandergerissen werden und so freie Elektronen und ein zurückbleibendes Ion entstehen.

Anstelle der Erzeugung mit elektrischen Feldern können Plasmen auch durch exotherme, d. h. Wärme abgebende, chemische oder kernphysikalische Reaktionen erzeugt werden.

Anwendungsgebiete technisch erzeugter Plasmen

Ein Plasma nur um des Plasmas willens zu erzeugen ist sowohl aus wirtschaftlicher als auch aus technologischer Sicht wenig ergiebig. Glücklicherweise haben sich über die Jahre der Forschung etliche Bereiche ergründen lassen, in denen der plasmatische Zustand der Materie von großem Nutzen ist. Untenstehend findet sich eine kurze Beschreibung einiger Anwendungsfälle ohne jeden Anspruch auf Vollständigkeit.

Mittlerweile, nicht zuletzt aufgrund kürzlich getroffener Verordnungen, aber auch wegen des stetig wachsenden Bedarfs an Energieeinsparung – sei es aus Kostengründen, Ressourcenverfügbarkeit oder moralischen Werten heraus –, findet man allerorts die unter dem Namen „Energiesparlampe“ bekannte Lichtquelle. Diese Energiesparlampen sind tatsächlich kleine Niedertemperaturplasmaquellen, in denen durch eine angelegte Gleichspannung, also ein elektrisches Feld, ein geeignetes Füllgas zu einem Plasma „entzündet“ wird. (Eine bislang noch nicht erwähnte Tatsache eines Plasmas ist die ständige Aussendung von Lichtteilchen, sogenannten Photonen, was man sehr

gut an Sonne und Blitzen nachprüfen kann. Dieses Licht verfügt nicht notwendigerweise über die für unser Auge sichtbare Wellenlänge. Es gibt jedoch Methoden, dieses Licht in die „richtige“ Wellenlänge zu ändern und dafür zu sorgen, dass auch Energiesparlampen für uns sichtbares, weißes Licht ausstrahlen.) Ebenso wie zur Beleuchtung von Räumen, wird auch in den seit einigen Jahren erhältlichen Plasmafernsehern ein Plasma als Lichtquelle für die Hintergrundbeleuchtung eingesetzt.

Neben diesen Alltagsgegenständen befinden sich Plasmen in der Fertigungsindustrie im Einsatz, etwa bei der Beschichtung oder beim Ätzen von Werkstücken sowie bei Schweißvorgängen. Auch die uns umgebende Mikroelektronik wäre ohne die Materialbearbeitung durch Plasmaquellen so nicht denkbar.

Die Aussendung von Photonen charakteristischer Wellenlängen wird im Rahmen des Materialnachweises genutzt. So werden Proben unbekannter Zusammensetzung in den Plasmazustand gebracht und das ausgesandte Licht analysiert. Anhand der gemessenen Wellenlängen bzw. der Frequenzen können Rückschlüsse auf die in der Probe enthaltenen Materialien getroffen werden.

Eine weitere Anwendungsmöglichkeit findet sich in der Hochenergietechnik, wo zum Teil sehr große Ströme in kurzen zeitlichen Intervallen transportiert werden müssen. Ähnlich einem Blitz, der ja auch dem Plasmazustand der Atmosphäre entspricht, wird in einem sog. Plasmafunktenschalter ein großer elektrischer Strom kontrolliert geführt.

Ein letztes Beispiel, ebenfalls aus der Energietechnik, ist die gegenwärtig laufende Forschung an Fusionsreaktoren, welche die Prozesse der Sonne nachzubilden versuchen und so, in menschlichen Maßstäben gerechnet, geradezu unerschöpfliche Energiequellen sein könnten.

Abschließende Worte

Die hier gegebene Beschreibung von Plasmen und deren Anwendung liefert für sich noch keineswegs ein vollständiges Bild des Phänomens, nicht zuletzt um auch eine gewisse Anschaulichkeit und Kompaktheit zu wahren. Die weiterführende Literatur ist vielzählig und eine

gerichtete Empfehlung fällt daher schwer, weswegen an dieser Stelle lediglich einige Standardwerke Erwähnung finden sollen:

Halliday, Resnick, Walker, *Fundamentals of Physics*. John Wiley & Sons Ltd.

Chen, *Introduction to Plasma Physics*. Plenum Press.

Goldstone, Rutherford, *Introduction to Plasma Physics*. IOP Publishing.

Dendy, *Plasma Physics: An Introductory Course*. Cambridge University Press.

Eventuell wird der nächste Blick zur Sonne oder gar der nächste Blitz, die nächste Betätigung des Lichtschalters oder das Anzünden einer Kerze nach dem Lesen dieses Beitrags dazu führen, dass sich kurzzeitig ein Gedanke an diese Myriaden von Teilchen und ein damit verbundenes Staunen einschleicht. Wenn dem so ist, hat diese kurze Ausführung ihren Zweck erfüllt!