

KARLSRUHER AKADEMISCHE REDEN
NEUE FOLGE / NR. 22

KARLSRUHER AKADEMISCHE REDEN
NEUE FOLGE / NR. 22

Professor Dr. phil. P. SCHULZ

DER PLASMAZUSTAND DER GASE

VORTRAG
GEHALTEN BEI DER JAHRESFEIER
AM 7. DEZEMBER 1963



VERLAG C. F. MÜLLER KARLSRUHE

1964

Es ist ein alter und guter Brauch, daß der neu sein Amt antretende Rektor einen Vortrag aus seinem engeren Fachgebiet hält und damit seine Visitenkarte als Wissenschaftler einem größeren Kreis vorlegt. Forschung und Lehre heißt der Auftrag des Hochschullehrers. Nur wer selbst aktiven Anteil an der Ausgestaltung seiner Wissenschaft hat, kann die jungen Menschen, die später in führender Stellung wesentlich unsere Zukunft mitbestimmen sollen, bis an die eigentliche Problematik seines Fachgebietes heranführen. Die Entwicklung der Wissenschaft ist gekennzeichnet einerseits durch eine zunehmende Spezialisierung, andererseits aber auch durch eine Verstärkung der Bindung zwischen den einzelnen Disziplinen. Es ist gut, wenn der Wissenschaftler, der notwendigerweise einen beträchtlichen Teil seiner Arbeitskraft einem sehr speziellen Problemkreis zuwenden muß, sich immer wieder der Stellung seines Forschungsgebietes in einem größeren Rahmen bewußt wird.

Die Plasmaphysik ist in neuester Zeit in den Blickpunkt des allgemeinen Interesses gerückt, weil sie einen Weg aufzeigt durch Verschmelzung leichterer Atome zu schwereren Atomen große Energien frei zu machen und dadurch die Möglichkeit in Aussicht stellt, unsere Energieversorgung für alle Zeiten sicherzustellen. Eine der großen Hoffnungen der Gegenwart ist deshalb mit der weiteren Entwicklung dieses Forschungsgebietes verknüpft.

Es ist lange eine offene Frage gewesen, woher die Sonne und die Fixsterne die großen Energiemengen nehmen, die dauernd abgestrahlt werden. Nach klassischen Abschätzungen hätte die Sonne durch diesen fortwährenden Energieentzug schon längst erkaltet sein müssen. Heute wissen wir, daß die Sonne zum überwiegenden Teil aus Wasserstoff besteht und in ihrem Innern durch Fusion von Wasserstoff zu Helium Energien frei werden, die groß genug sind, den Energiehaushalt zu decken. Die Sonne kann aufgefaßt werden als ein riesiges Laboratorium mit einer Temperatur von $14\,000\,000^\circ$ im Innern, in welchem durch Kernfusion Energie erzeugt wird.

Soll dieser Prozeß unter irdischen Bedingungen zur Energiegewinnung ausgenutzt werden, treten sofort zwei große Schwierigkeiten auf. Bei den im Vergleich zum Sonnenvolumen kleinen Reaktionsräumen, die uns auf der Erde zur Verfügung stehen, und den nur geringen Gasdrücken, die uns hier möglich sind, wären Temperaturen von etwa einer Milliarde Grad nötig, um die Wasserstoffusion einzuleiten. Die

Herstellung so hoher Temperaturen im Laboratorium erscheint unmöglich. Aber selbst wenn es gelänge, ein Gas so hoher Temperatur herzustellen, wäre das Problem, dieses Gas genügend lange zusammenzuhalten, noch ungelöst. Gefäße aus festen Stoffen halten nur wenige tausend Grad aus. Es wird zur Zeit als völlig ausgeschlossen angesehen, in einer kontrollierbaren Reaktion Temperaturen von einer Milliarde Grad herzustellen und für eine gewisse Zeit aufrechtzuerhalten.

Es sind jedoch eine Reihe von anderen Reaktionen denkbar, bei denen aus leichteren Teilchen schwerere aufgebaut werden und bei denen gleichfalls hohe Energiebeträge frei werden. Eine solche Reaktion ist zum Beispiel die Bildung von einem Heliumatom des Atomgewichtes 3 und einem Wasserstoffatom aus zwei Atomen des schweren Wasserstoffs. Schwerer Wasserstoff ist dem in der Natur vorkommenden normalen Wasserstoff zu 0.015 % beigemischt. Da Wasserstoff im Wasser der Meere in beliebiger Menge zur Verfügung steht, ist schwerer Wasserstoff trotz des geringen Anteils in großer Menge vorhanden.

Die Temperaturen, die unter Laboratoriumsbedingungen zur Fusion benötigt werden, sind für diese Reaktion zu rund $100\,000\,000^\circ$ berechnet worden. Temperaturen dieser Größe herzustellen und auch für einige Zeit aufrechtzuerhalten, erscheint nicht ganz aussichtslos. Gelingt es aber, diese Reaktion unter irdischen Bedingungen zu realisieren und im technischen Maßstab zu steuern, so braucht sich die Menschheit bei dem praktisch unerschöpflichen Vorrat an schwerem Wasserstoff keine Sorgen um die Energiegewinnung für die zukünftigen Generationen zu machen.

Aus diesem Grunde hat die Forschung zur Herstellung und Aufrechterhaltung eines solchen Gases großen Umfang angenommen. Ein so hoch erhitztes Gas hat eine Anzahl von Eigenschaften, die ein normales Gas nicht aufweist. Man hat hierfür eine besondere Bezeichnung eingeführt und spricht vom Plasmazustand des Gases oder von einem Gasplasma.

Es entsteht nun die Frage nach der Ursache des großen Energiegewinns beim Aufbau eines schwereren Teilchens aus leichteren, zum Beispiel eines Heliumatoms aus Wasserstoffatomen. Aus der Kernphysik ist schon seit langem bekannt, daß beim Zerfall eines Atomkerns die Zerfallsprodukte nicht genau die gleiche Masse haben wie das ursprüngliche Atom. Umgekehrt beim Aufbau eines Atoms ist auch die Masse des neu entstandenen Kerns nicht ganz genau gleich der Masse der Bausteine. Man bezeichnet diese Erscheinung als Massendefekt. Ordnet man die Atome nach ihrer Masse an, so bemerkt man die eigenartige Tatsache, daß die mittelschweren Atome einen maximalen Massendefekt in dem Sinne aufweisen, daß ihre Masse um einen geringen Betrag kleiner ist als die Masse ihrer Bausteine. Bei schwe-

ren Atomen nimmt der Massendefekt wieder ab. Zerfällt also ein schweres Atom, zum Beispiel Uran, in zwei etwa gleich schwere Bestandteile, wobei auch noch einige leichtere Teilchen mit auftreten können, so ist die Gesamtmasse der Zerfallsprodukte etwas geringer als die des ursprünglichen Atoms. Umgekehrt tritt, wenn ein leichteres Element aus noch leichteren Kernen aufgebaut wird, wie zum Beispiel Helium aus Wasserstoff, gleichfalls ein Massendefekt auf, und wieder ist die Masse des Endproduktes etwas geringer als die der Summe der Bausteine. In beiden Fällen verschwindet Masse.

Nun macht die Relativitätstheorie eine allgemeine Aussage über die Äquivalenz von Masse und Energie. Verschwindet Masse, so wird dafür Energie frei und zwar bewirkt schon ein geringer Massenschwund die Freisetzung einer sehr großen Energiemenge. Aus der Energie-Masse-Beziehung der Relativitätstheorie kann die bei einer Kernreaktion entstehende Energie berechnet werden. Danach entsteht wegen des Massendefekts Energie beim Zerplatzen von schweren Kernen. Dieser Prozeß wird bereits heute beim Kernreaktor technisch ausgenutzt. Energie entsteht jedoch nach der Energie-Masse-Beziehung auch bei der Fusion leichter Kerne. Diesen Prozeß führen uns die Sonne und die Fixsterne täglich vor. Alles Leben auf unserer Erde hängt letzten Endes vom Ablauf dieser Reaktion ab. Realisation dieses Prozesses in einer gelenkten Reaktion ist ein Hauptproblem der heutigen Physikergeneration. Ein wichtiges technisches Ziel der Plasmaphysik ist Sicherstellung der Energieversorgung der Menschheit auf beliebig lange Zeit.

Der Begriff Plasma ist keineswegs neu. Schon 1924 wurde er von Langmuir eingeführt. Gase sind im allgemeinen sehr gute elektrische Isolatoren. Legt man eine relativ niedrige elektrische Spannung an zwei Elektroden, die in ein Gas eintauchen, so fließt kein Strom. Erhöht man die Spannung allmählich, so verwandelt sich das Gas plötzlich in einen guten elektrischen Leiter. Zwischen beiden Elektroden fließt durch das Gas ein elektrischer Strom. Gleichzeitig zeigt sich ein für das jeweilige Gas charakteristisches Leuchten. Diese Erscheinung wird als elektrische Gasentladung bezeichnet. Dem Gas sind nunmehr elektrische Ladungsträger sowie zum Leuchten angeregte Atome beigegeben. Die Ladungsträger bewegen sich unter der Wirkung des angelegten elektrischen Feldes und bewirken somit den Stromtransport durch das Gas.

Das Gas wird also plötzlich bei der Zündung einer Entladung in einen Zustand überführt, der gekennzeichnet ist durch Leuchterscheinungen und durch eine elektrische Leitfähigkeit. Die vorher elektrisch neutralen Atome sind jetzt zum Teil aufgespalten in positive und negative Teilchen, die als Ionen bezeichnet werden. Die positiv geladenen Ionen sind stets Atome oder Moleküle, die eine oder mehrere positive Ele-

mentarladungen tragen. Als negative Teilchen kommen neben den negativen Ionen, die aus Atomen oder Molekülen mit einer oder mehreren negativen Elementarladungen bestehen, auch freie, nicht an Atome gebundene elektrische Elementarteilchen sehr geringer Masse, Elektronen genannt, vor. Ein Gas, dessen Verhalten wesentlich mitbestimmt wird durch einen Gehalt an elektrischen Ladungsträgern wird nach Langmuir als Plasma bezeichnet. Durch die Zündung einer elektrischen Entladung ist das vorher elektrisch nicht leitende Gas überführt worden in einen neuen eigenartigen Zustand, den wir Plasmazustand nennen.

Ein Gas besteht aus einer großen Anzahl einzelner Moleküle. Bei Zimmertemperatur und Atmosphärendruck ist ihre Anzahl rund 10^{19} je Kubikzentimeter. Eine Vorstellung von der ungeheuren Anzahl von Molekülen möge Ihnen die Tatsache vermitteln, daß im Hochvakuum, welches wir durch Auspumpen nur mit recht raffinierten Mitteln erzielen können, noch immer mehr als hundert Millionen Moleküle im Kubikzentimeter enthalten sind. Die einzelnen Moleküle sind nicht in Ruhe, sondern bewegen sich ungeordnet durcheinander. Die Moleküle, die auf die Wände treffen, verursachen den Gasdruck. Innerhalb des Gefäßes, in dem sich das Gas befindet, bewegen sich die Moleküle auch nicht völlig ungehindert. Sie stoßen bei ihrer regellosen Bewegung dauernd aneinander. Die einzelnen Moleküle führen dadurch eine Zickzack-Bewegung aus und kommen dabei trotz großer Eigengeschwindigkeit, die bei Zimmertemperatur rund 1 km/s beträgt, so recht nicht vom Fleck. Man spricht von einer thermisch ungeordneten Bewegung. Beim Erhitzen des Gases wird die Eigengeschwindigkeit der Moleküle vergrößert. Temperaturerhöhung bedeutet weiter nichts als Vergrößerung der Eigengeschwindigkeit der Moleküle und damit ihrer Bewegungsenergie.

Beim Zünden einer elektrischen Entladung werden in dem Gas aus neutralen Molekülen Ionen und Elektronen erzeugt. Der Einfachheit halber wollen wir uns bei den weiteren Betrachtungen auf Gase aus einatomigen Molekülen beschränken, zum Beispiel auf Edelgase oder Metaldämpfe. Wir können davon ausgehen, daß stets einige wenige Ladungsträger in jedem Gas vorhanden sind. Diese Ladungsträger werden durch Spuren radioaktiver Beimengungen sowie durch die nicht auszuschließende kosmische Strahlung erzeugt. Ihre Zahl ist jedoch so gering, daß das Verhalten des Gases hierdurch zunächst nicht beeinflußt wird. Wird aber an das Gas ein hohes elektrisches Feld gelegt, so werden diese Ladungsträger stark beschleunigt und ihre Bewegungsenergie kann so groß werden, daß beim Zusammenstoß mit einem neutralen Atom ein Elektron von diesem fortgerissen wird. Wir wissen, daß ein Atom aus einem schweren, positiv geladenen Kern und einer

Hülle aus Elektronen besteht. Bei einem normalen neutralen Atom kompensieren sich gerade positive Kernladung und negative Ladung der Elektronenhülle. Wird dem Atom beim Zusammenprall mit einem genügend energiereichen Elektron ein Hüllenelektron entrissen, so entstehen ein positives Ion und ein freies Elektron. Hat das elektrische Feld, das an ein Gas gelegt ist, den kritischen Wert überschritten, bei dem dieser Prozeß der Erzeugung neuer Ladungsträger durch Elektronenstoß einsetzt, so wächst ihre Zahl lawinenartig an, d. h. das Gas wird schnell in den Plasmazustand überführt.

Ein solches Gasplasma ist eine Mischung aus normalen neutralen Atomen, zum Leuchten angeregten Atomen, positiven Ionen und Elektronen. Alle diese Partner führen eine thermisch ungeordnete Bewegung aus. Wir können diesen Plasmazustand auffassen als einen neuen Aggregatzustand der Materie, der sich zu den bekannten Zuständen – fest, flüssig, gasförmig – hinzugesellt. Er tritt, so schien es zunächst, nur unter ganz besonderen Umständen, beispielsweise in einer elektrischen Gasentladung, auf. Der Plasmazustand wäre demnach eine selten vorkommende Ausnahme.

Ein Plasma zeigt gelegentlich recht seltsame Erscheinungen. So kann im Plasma einer Niederdruckentladung das Gas der neutralen Atome Zimmertemperatur haben, während das beigemischte Elektronengas eine Temperatur von vielen tausend Grad, beispielsweise $30\,000^\circ$, hat. Die Elektronen besitzen wegen dieser hohen Temperatur große Bewegungsenergien und sind imstande, Atome durch Stoß zum Leuchten anzuregen. Ein solches Niederdruckplasma kann Zimmertemperatur haben und sich bezüglich seiner ausgesandten Strahlung so verhalten, als ob es auf $30\,000^\circ$ erhitzt sei.

Ladungsträger können aber auch in einem heißen Gas entstehen, dann nämlich, wenn die Temperatur so hoch und damit die Geschwindigkeit der Teilchen so groß geworden ist, daß ihre Bewegungsenergie ausreicht, beim Zusammenprall Elektronen von den Atomen loszuschlagen. Auch in diesem Fall werden also Ladungsträger gebildet, d. h. das Gas wird in den Plasmazustand überführt. Man spricht dann von einem thermischen Plasma. In einem thermischen Plasma sind die Mittelwerte der Bewegungsenergien der Elektronen, der Ionen und der Atome gleich groß. Man sagt, es herrscht thermisches Gleichgewicht zwischen den einzelnen Partnern. Die Temperaturen der Elektronen, der Ionen sowie der neutralen Atome sind in diesem Fall gleich.

Ein thermisches Plasma ist zum Beispiel realisiert in Quecksilber- und Xenon-Hochdruckentladungen. Solche Entladungen werden in Hochdruckentladungslampen in großem Umfang zur Lichterzeugung benutzt. Die Temperaturen liegen in diesen Entladungen zwischen 5000° und $10\,000^\circ$. Ein großer Teil unserer Kenntnisse über das Verhal-

ten eines thermischen Plasmas ist durch das Studium der Vorgänge in diesen Entladungsröhren gewonnen worden. Technische Entwicklung und Erweiterung unserer Kenntnisse über die physikalischen Grundlagen waren auf diesem Arbeitsgebiet besonders eng miteinander verknüpft. Ich möchte nur einige technische Probleme andeuten. In der Achse der Entladung herrschen Temperaturen bis ca. $10\,000^\circ$. Feste Körper, die als Entladungsgefäß dienen können, halten jedoch nur Temperaturen von wenigen tausend Grad aus. Große Lichtausbeuten erzielt man überdies, wenn nicht extrem hohe Stromstärken angewandt werden sollen, erst bei hohen Drucken. Die heute in Entladungsröhren angewandten Drucke gehen bis zu 100 Atm. Das Entladungsgefäß muß bei hohen Temperaturen noch diese Drucke mit Sicherheit aushalten können. Das Gefäß muß überdies auch noch durchsichtig sein, und schließlich muß man in dieses Gefäß Ströme von unter Umständen vielen Ampères einführen können. Die Arbeiten zur Beherrschung der technischen Voraussetzungen dieser Entladungstypen hat etwa die Jahre 1930 – 1950 in Anspruch genommen.

Die im gleichen Zeitraum erfolgte Klärung der Elementarvorgänge von solchen Entladungen hat die weitere technische Entwicklung wesentlich beeinflusst. Am Anfang dieser Entwicklung stand die Erkenntnis, daß ein thermisches Plasma überhaupt unter irdischen Verhältnissen herstellbar ist und in den Hochdruckentladungen realisiert werden kann. Die Temperatur in den Plasmen konnte zunächst nur indirekt aus Abschätzungen des Energiehaushalts erschlossen werden. Ein genaueres Studium der von der Quecksilber-Hochdruckentladung ausgesandten Strahlung eröffnete dann die Möglichkeit, Elektronendichte und Temperatur des Plasmas genau zu bestimmen. Die Quecksilber-Hochdruckentladung sendet nicht wie unsere Sonne ihre Strahlung kontinuierlich verteilt über das gesamte Spektrum aus, sondern vorwiegend bei einigen bestimmten Wellenlängen. Die Ausstrahlung erfolgt in wenigen Spektrallinien. Dies ist auch der Grund, weshalb die Farbwiedergabe einer Quecksilber-Hochdruckentladungslampe manche Wünsche unerfüllt läßt. Die Spektrallinien bestehen aber nicht aus Strahlung von exakt nur einer einzigen Wellenlänge, d. h. sie sind nicht exakt scharf. Alle Spektrallinien haben eine gewisse Breite. Es zeigt sich nun, daß die Breiten gewisser Spektrallinien im Quecksilber-Hochdruckplasma wesentlich dadurch zustande kommen, daß zum Leuchten angeregte Atome dauernd gestört werden durch Elektronen, die sich ihnen während ihrer thermischen Bewegung nähern. Man nennt diese Erscheinung Elektronenstoßverbreiterung. Die Elektronenstoßverbreiterung ist um so größer, je höher die Elektronenkonzentration ist. Die Ausmessung der elektronenstoßverbreiterten Spektrallinien erlaubte zum ersten Mal, die Elektronendichte in einem Hochdruckplasma wirklich

zu messen. Aus der Elektronendichte konnte dann mit Hilfe der schon bekannten Beziehung zwischen Temperatur und Ionisierungsgrad in einem thermischen Plasma die Temperatur bestimmt werden.

Außer der linienhaften Strahlung senden die Plasmen kontinuierliche Spektren aus. Die Klärung der Ursache der – relativ schwachen – kontinuierlichen Strahlung des Quecksilber-Hochdruckplasmas als Leuchten, das bei der Wiedervereinigung von Elektronen und positiven Ionen zu neutralen Atomen entsteht, legte die Verwendung eines Xenon-Hochdruckplasmas zur Erzeugung dieser Strahlung nahe und führte zur Entwicklung der Xenon-Hochdruckentladungslampe, die heute im Begriff ist, große technische Bedeutung zur Erzeugung kontinuierlicher Strahlung mit sonnenähnlichem Spektrum zu erlangen.

Erfahrungen, die man beim Studium der thermischen Plasmen im Laboratorium gewonnen hatte, konnten angewandt werden, um ein Verständnis von Vorgängen in der Sonne und den Fixsternen zu gewinnen. Umgekehrt hat man theoretische Ansätze, die gemacht wurden, um das Verhalten von Sternatmosphären zu deuten, auf irdische, künstlich im Laboratorium erzeugte Vorgänge übertragen können. Die vorher angedeutete Bestimmung von Temperatur und Elektronendichte in einem Hochdruckplasma aus der Elektronenstoßbreite griff zum Beispiel zurück auf Überlegungen, die angestellt wurden, um gewisse große Verbreiterungen von Spektrallinien in Sternatmosphären zu verstehen.

Wir wissen jetzt, daß das Innere unserer Sonne und der Fixsterne aufgefaßt werden kann als ein thermisches Plasma, d. h. als ein Gas, welches so hoch erhitzt ist, daß die Atome ganz oder zum Teil in positive Ionen und Elektronen aufgespalten sind. Die Materie des Weltalls befindet sich also zum weitaus überwiegenden Teil im Plasmazustand. Nicht das Plasma ist eine seltene Ausnahme, sondern der Zustand der Materie auf der Erde und den Planeten.

Die Dichte der Sonne entspricht etwa derjenigen von flüssigem Wasser auf unserer Erde. Typisch für Gase, die wir auf der Erde kennen, ist ihre geringe Dichte. Bei höherer Dichte werden die Gase flüssig oder fest. Es erscheint somit erstaunlich, daß die Sonne aufgefaßt wird als ein Gas. Bei dem Stern Capella zum Beispiel, dessen Dichte ungefähr gleich der Dichte unserer atmosphärischen Luft ist, würde dies keine Schwierigkeiten bereiten. Aber bei einer Reihe von anderen Fixsternen wird die Lösung dieser Frage noch dringender. Ein Stern beispielsweise, der nach seinem Entdecker Krüger 60 heißt, hat die Dichte des Eisens bei Zimmertemperatur, also eine Dichte, die um den Faktor 10000 größer ist als die unserer atmosphärischen Luft. Ganz unbegreiflich sind uns aber zunächst die Dichten einer Reihe von Sternen, die als weiße Zwerge bezeichnet werden. Zum Beispiel befindet sich in der

Nähe des Sirius ein Stern, dessen Dichte 60 000 mal größer ist als die Dichte irgendeines Körpers auf der Erde. Eine Tonne dieses Stoffes wäre in einer kleinen Schachtel unterzubringen. Trotzdem werden alle diese Sterne als Gasplasmen betrachtet.

Um dies zu verstehen, muß einiges über die Größe der Atome gesagt werden. Ihr Durchmesser beträgt etwa 10^{-8} cm, d. h. rund ein hundert-millionstel Zentimeter. Würden die Atome dicht an dicht gepackt, so erhielte man Stoffe von der Dichte der festen Körper auf unserer Erde. Bei dieser dichten Packung sind die Atome an ihren Ort gebunden und können nicht wie in Gasen eine freie thermische Bewegung durchführen.

Die Bausteine, aus denen sich ein Atom zusammensetzt, sind jedoch sehr viel kleiner. Sowohl der positive Kern als auch die Elektronen besitzen Durchmesser von nur etwa dem 10 000. Teil der Atomdurchmesser. Ein Atom, so kann man sagen, ist praktisch leer. Ein Atom von der Größe, die uns bei den meisten Versuchen entgegentritt, kommt durch die Bewegung der Elektronen um den Kern zustande. Die Ausdehnung der Bahnen der Elektronenwolke bestimmt den Durchmesser des Atoms. Bei den hohen Temperaturen in den Sternen von $10\,000\,000^{\circ}$ bis über $100\,000\,000^{\circ}$ sind die Atome vollkommen ihrer Elektronenhüllen entkleidet. Die Teilchen im Plasma der Sonne und der Fixsterne sind positive Kerne und freie Elektronen. Wegen der sehr kleinen Durchmesser dieser Teilchen ist trotz der hohen Dichte noch genügend Platz für eine thermisch ungeordnete Bewegung, wie sie in einem normalen Gas stattfindet. Die erstaunliche Tatsache, daß in Sternatmosphären Gase vorkommen mit einer Dichte, die selbst die Dichte der schwersten festen Körper auf der Erde um viele Größenordnungen übertrifft, findet damit eine einleuchtende Erklärung.

Kehren wir zum Ausgangspunkt unserer Betrachtungen zurück. In einem thermischen Plasma, wie wir es zur Einleitung einer Kernfusion anstreben, werden die Temperaturen so hoch sein, daß die Atome voll ionisiert sind. Das Gas besteht dann nur noch aus positiven Kernen und freien Elektronen. Jedoch werden wir die Dichten, die in der Sonne existieren, nicht realisieren können – und natürlich erst recht nicht solche, die in den weißen Zwergen vorhanden sind. Hier sorgt die Gravitation durch die ungeheuren Massen der Sterne für den Zusammenhalt der Materie. Unter irdischen Bedingungen würde das hochehitze Gasplasma schnell auseinanderlaufen, wenn es nicht durch besondere experimentelle Kniffe gelingt, es zusammenzuhalten. Eine Möglichkeit hierfür wird zum Beispiel in der Verwendung von geschickt angeordneten Magnetfeldern gesehen. Es bleibt der Zukunft vorbehalten, ob es gelingen wird, ein Plasma genügend hoher Temperaturen zu erzeugen und zusammenzuhalten. Das technisch-wirtschaftliche Interesse, wel-

ches die Menschheit an der Realisation gebändigter Fusionsprozesse hat, wird dafür sorgen, daß auf diesem Gebiet weitere Erkenntnisse gewonnen werden können. An vielen Stellen unserer Erde wird an der Bewältigung dieser Probleme intensiv gearbeitet.

Die Durchführung des Fusionsprozesses ist bereits unter irdischen Bedingungen als Wasserstoffbombe gelungen. Die Zündung erfolgt hier mit einer normalen Kernbombe. Die weitere Reaktion läuft dann nicht mehr aufhaltbar ab. Die hierbei frei werdenden Kräfte der Zerstörung gehen ins Ungeheure. Dieser Prozeß zeigt wieder einmal die großen Gefahren, die entstehen, wenn die Entwicklung unserer moralischen Verantwortung nicht Schritt hält mit dem naturwissenschaftlichen und technischen Fortschritt. Auslösung eines Prozesses ist oft einfacher als dessen Bändigung. Deshalb soll der Forscher, der heute nur als Spezialist wirklichen Anteil an der Weitergestaltung seiner Wissenschaft nehmen kann, nicht nur seinen Standort kennen im Rahmen seines weiteren Fachgebietes; er soll sich stets seiner Verantwortung bewußt bleiben als Teil unserer menschlichen Gesellschaft.