

## **Arnulf Schlüter und Rudolf Wienecke - Pioniere der Fusionsforschung**

**IPP 16/22  
Juli 2012**



# Inhaltsübersicht

Sibylle Günter

In memoriam Arnulf Schlüter und Rudolf Wienecke ..... 5

Uwe Schumacher

Arnulf Schlüter und die Anfänge der Fusionsforschung in Deutschland ..... 7

Martin Keilhacker

Rudolf Wienecke und die großen Fusionsanlagen Europas ..... 11

Allen Boozer

The continuing influence of Arnulf Schlüter and Rudolf Wienecke  
on fusion research ..... 15

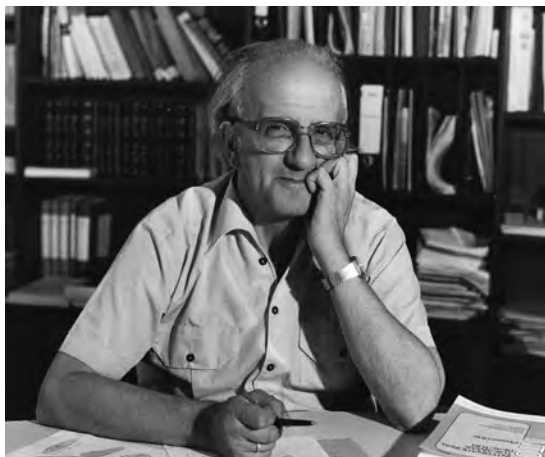
Dieser Report entstand aus Vorträgen anlässlich eines Kolloquiums zum Gedenken an die ehemaligen wissenschaftlichen Direktoren des Max-Planck-Instituts für Plasmaphysik, Prof. Dr. Arnulf Schlüter († Juni 2011) und Prof. Dr. Rudolf Wienecke († Mai 2011) am 4. November 2011 im IPP in Garching

Fotos: IPP  
Redaktion: Isabella Milch

Copyright 2012  
Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP)  
Garching und Greifswald

## In memoriam Arnulf Schlüter und Rudolf Wienecke

Sibylle Günter, IPP



*Prof. Dr. Arnulf Schlüter (22.8.1922 - 24.6.2011)*

Im Jahr 2011 verstarben die ehemaligen wissenschaftlichen Mitglieder und wissenschaftlichen Direktoren des Max-Planck-Instituts für Plasmaphysik, Professor Dr. Rudolf Wienecke und Professor Dr. Arnulf Schlüter. Beide haben das Institut vom ersten Tag an geprägt.

Arnulf Schlüter kam 1958 mit dem Max-Planck-Institut für Physik und Astrophysik nach München und wurde ordentlicher Professor an der Ludwig-Maximilians-Universität. 1959 wurde er wissenschaftliches Mitglied und Leiter der Abteilung Theoretische Plasmaphysik im neu gegründeten Institut für Plasmaphysik (IPP). Als Nachfolger Werner Heisenbergs wurde er 1965 wissenschaftlicher Direktor des IPP, ein Amt, das er für acht Jahre innehatte. Unter seiner Leitung wurde 1970 die ursprüngliche IPP GmbH zum Max-Planck-Institut.

Arnulf Schlüter war einer der großen Pioniere der Plasmaphysik und Fusionsforschung weltweit. Gemeinsam mit Ludwig Biermann und Reimar Lüst begründete er die deutsche Forschung zum magnetischen Plasmaeinschluss. Er gilt als Mitentdecker des Tokamakprinzips – das heute ITER zugrundeliegt, der ersten Fusionsanlage, die Energie erzeugen



*Prof. Dr. Rudolf Wienecke (5.5.1925 - 17.5.2011)*

soll. Alle Plasmaphysiker kennen die Pfirsch-Schlüter-Ströme und die Grad-Schlüter-Shafranov-Gleichung. Jeder, der Plasma-Gleichgewichte ausrechnet, benutzt sie.

Nach seiner Zeit als wissenschaftlicher Direktor wandte er sich der Optimierung von Stellaratoren zu. Ergebnis war die Anlage Wendelstein 7-AS. Nach seiner Emeritierung war er von 1986 bis 1991 Präsident der Bayerischen Akademie der Wissenschaften. Er erhielt zahlreiche Auszeichnungen, darunter das Bundesverdienstkreuz.

Auch Rudolf Wienecke war ein IPpler der ersten Stunde. Er wurde 1960 zum wissenschaftlichen Mitglied und Leiter der Abteilung Experimentelle Plasmaphysik berufen. Er arbeitete zunächst über Lichtbögen in Magnetfeldern und untersuchte Stoßwellen und Methoden der Plasmabeschleunigung, später auch MHD-Generatoren.

1969 wurde Rudolf Wienecke als ordentlicher Professor an die Universität Stuttgart berufen und baute dort das Institut für Plasmaforschung auf, das bis heute mit Abstand wichtigste Partnerinstitut des IPP an einer deutschen Universität. 1973 kehrte Rudolf

Wienecke an das IPP zurück und wurde nach Arnulf Schlüter für acht Jahre dessen wissenschaftlicher Direktor.

Rudolf Wienecke hat sich in dieser Zeit um das Institut sehr verdient gemacht – in einer Umbruchphase, in der kleine Laborexperimente für wesentliche Fortschritte nicht mehr ausreichten. Er hat nicht nur die heute noch existierende Bereichs- und Projektstruktur im IPP eingeführt, sondern auch alle Notwendigkeiten beim Management von Großexperimenten konsequent zu Ende gedacht. So hat er das Institut eigentlich erst in die Lage versetzt, Großprojekte wie jetzt Wendelstein 7-X zu konzipieren und aufzubauen. Nach seiner Tätigkeit im IPP wurde Rudolf Wienecke Präsident der Bundeswehrhochschule in München. Zu seinen zahlreichen Ehrungen zählen das Bundesverdienstkreuz und der Bayerische Verdienstorden.

Das Max-Planck-Institut für Plasmaphysik ist seinen ehemaligen Direktoren Arnulf Schlüter und Rudolf Wienecke zu großem Dank verpflichtet und wird ihr Andenken in Ehren halten.

# Arnulf Schlüter und die Anfänge der Fusionsforschung in Deutschland

Uwe Schumacher, Universität Stuttgart

Eine Kompass-Kompensation war die erste Arbeit, mit der Arnulf Schlüter am Beginn seiner beeindruckenden Laufbahn kurz nach dem Krieg aufgetreten ist. Er ist damit zugleich in Berührung zu den Magnetfeldern gekommen und – nach der Promotion in Bonn bei Walter Weizel – dann tief in die Plasmaphysik eingestiegen. Mit der Entwicklung der Grundlagen der Plasmaphysik vor und nach dem zweiten Weltkrieg hat er – wie auch Ludwig Biermann und Lyman Spitzer – erkannt, dass die plasmaphysikalischen Eigenschaften bei der Lösung astrophysikalischer Fragen von großer Bedeutung sind. Schon 1942 war das Theorem von Hannes Alfvén bekannt, dass in hoch ionisierten und damit gut leitfähigen Gasen die Magnetfeldlinien eingefroren sind. Kurz danach hat Arnulf Schlüter mit der Entwicklung seiner Zweiflüssigkeitstheorie des Plasmas erkannt, dass trotz der engen Bindung der geladenen Teilchen an die Magnetfeldlinien ein elektrischer Nettostrom quer zum Magnetfeld mit der gleichen geringen Spannung getrieben werden kann, die für einen Strom in Richtung des Magnetfeldes ausreicht. Bestimmt wird dies durch das Gleichgewicht, bei dem der Abfall des Gasdruckes mit dem Strom im Magnetfeld im Gleichgewicht steht.

## Grundlagen der Plasmaphysik

Diese Arbeiten wurden dann im Max-Planck-Institut für Physik in Göttingen weitergeführt, wo unter Ludwig Biermann und mit starker Mitwirkung von Reimar Lüst wesentliches zu den Grundlagen der Plasmaphysik erarbeitet wurde: das Plasmagleichgewicht im Magnetfeld, die Stabilität des Plasmas, Wellen im Plasma, die Emission von Wellen aus Plasmen, die Bahnen der Plasmateilchen im Erdmagnetfeld, die Wellenheizung von Plasmen – wofür Schlüter den Gyrorelaxationseffekt entdeckte und nutzbar machte – und die Theorie

quasistationärer thermonuklearer Prozesse. Diese Fragen wurden vor allem zur Lösung astrophysikalischer Probleme bearbeitet. Ein typisches Beispiel sind die solaren Filamente: Die Gleichgewichte, die heute den Namen „Kippenhahn-Schlüter Normal Polarity Prominence Mode“ tragen, zeigen, dass sich ein heißes Plasma im starken Schwerfeld der Sonne im Gleichgewicht halten kann, wenn ein magnetisches Dipolfeld vorhanden ist.

Weiterhin wesentlich waren Untersuchungen der Bahnen geladener Teilchen: Wie werden die Teilchen durch das Dipolfeld der Erde bewegt, wie treffen sie auf die Erde, welche Teilchen werden einfangen? Zur Berechnung dieser so genannten Störerbahnen nutzte man die ersten leistungsfähigen Rechenmaschinen, wie sie auch im Max-Planck-Institut für Physik in Göttingen entwickelt wurden. Für diese Arbeiten – zum Beispiel mit Hilfe der von Heinz Billing entwickelten G1, der berühmten Rechenmaschine des Göttinger Max-Planck-Instituts – waren Algorithmen zu entwickeln, zu deren Formulierung Arnulf Schlüter erhebliche Beiträge geleistet hat.

Ergebnis der grundlegenden Plasmatheorie, die Arnulf Schlüter schon 1949 begonnen und 1950 veröffentlichte, war die Lösung einer nichtlinearen elliptischen partiellen Differentialgleichung für das Plasmagleichgewicht, das heute so genannte „Grad-Schlüter-Shafranov-Gleichgewicht“ für axialsymmetrische Plasmen bei nicht zu hohem Plasmadruck. Eine der Folgerungen daraus ist, dass sich ineinander geschachtelte magnetische Flächen ergeben.

Diese Arbeiten brachten Arnulf Schlüter zu dem Urteil, dass sich das Plasma dem Theoretiker sowohl als besonders einfache als auch als besonders komplizierte Form der Materie

darstellt. Die Plasmaphysik spielt die Rolle einer wesentlichen Hilfswissenschaft, etwa für die Astronomie oder die Geophysik. Weiterhin wurde ihm deutlich, dass sich mit dem Verständnis des Plasmas technische Möglichkeiten eröffnen, zum Beispiel bei der Energieversorgung, aber auch viele andere neue Anwendungen in der Industrie, etwa in der Materialforschung und sogar in der Medizin.

### **Tokamak und Stellarator**

Betrachtet man die Energieforschung, die mit Hilfe der fusionsorientierten Plasmaphysik möglich wird, muss man sich die Zeit vor der Arbeit Arnulf Schlüters bewusst machen: George Gamow, bekannt durch seine Theorie des Alpha-Zerfalls der Atomkerne, hielt 1929 in Leningrad einen Vortrag über die Veröffentlichungen von Robert d'Escourt Atkinson und Friedrich Georg Houtermans, die die Energieproduktion der Sonne durch thermonukleare Reaktionen erklärt haben. Nach diesem Vortrag bot ihm Nikolai Bucharin, ein führendes Mitglied der Kommunistischen Partei Russlands, an, die gesamte elektrische Leistung von Leningrad jede Nacht eine Stunde lang zur Verfügung zu stellen, wenn er diesen Prozess auf der Erde reproduzieren würde. Gamow – ein Wissenschaftler mit großem Weitblick und hohem Verantwortungsbewusstsein – hat dieses Angebot nicht angenommen. Und aus demselben Grund hat auch Arnulf Schlüter sich nie zu einer Antwort auf die Frage verleiten lassen, in wieviel Jahren Fusionsenergie genutzt werden könne.

Auf der Basis ihrer grundlegenden astro- und plasmaphysikalischen Arbeiten machten Ludwig Biermann, Arnulf Schlüter und Reimar Lüst verschiedene Vorschläge für Anlagen zum magnetischen Einschluss thermonuklearer Plasmen, zu denen auch axialsymmetrische und nicht-axialsymmetrische toroidale

Anordnungen gehörten. Bei einer dieser nicht-axialsymmetrischen Konfigurationen wurden die Drift und die Ungleichgewichte des Druckes dadurch verhindert, dass die Korrugationen, d.h. Riefen und Wellen, auf der Innenseite des Torus viel stärker sind als auf der Außenseite. Dieser nach den Autoren Friedrich Meyer und Hermann Ulrich Schmidt so genannte „M&S-Torus“ bot eine Lösung für den nicht-axialsymmetrischen äußeren toroidalen Einschluss. Hierzu wurden schon am Max-Planck-Institut für Physik Experimente mit den Anlagen Kronentorus und Lupus gemacht.

In einem Vortrag auf der Physikertagung in Heidelberg 1957 über verschiedene Vorschläge zur und spezielle Probleme bei der thermonuklearen Fusion sagte Arnulf Schlüter: „Man muss einen genügend starken Strom im Plasmaring auf der Seele dieses Rings fließen lassen, so dass das entstehende meridionale Magnetfeld – wir sprechen heute vom poloidalen Magnetfeld – „stark genug ist, das dynamische Verhalten und Gleichgewicht zu sichern und den Teilchenverlust zu verhindern, und man muss die äußeren Spulen, die ein Magnetfeld längs der Seele des Torus erzeugen, so wählen, dass diese Anordnung dann noch stabil bleibt. Das gemeinsam von den inneren und äußeren Strömen erzeugte Magnetfeld wird dann die Gestalt von Schraubenlinien haben, die den Torus überall umschließen.“ In diesen Worten steckt die Mit-Erfindung des Tokamaks, mit dem damals in Russland – wie auch in den USA und in Großbritannien – unter Geheimhaltung an der Fusion gearbeitet wurde.

Arnulf Schlüter hatte auch schon in den Jahren vor 1958 in Princeton über die Göttinger Arbeiten zum nicht-axialsymmetrischen magnetischen Plasmaeinschluss referiert. Dabei



stellte er fest, dass die Diskussionsfragen sehr eingeschränkt und die Antworten wenig lebhaft waren, weil auch die Wissenschaftler in Princeton sich bis 1958 zur Geheimhaltung ihres von Lyman Spitzer erfundenen Stellarators verpflichtet fühlen mussten. Die Göttinger Arbeiten hatten damit ganz erheblich dazu beigetragen, dass am Vorabend der zweiten Genfer Atomkonferenz die Ergebnisse der Fusionsforschung aus der Geheimhaltung entlassen wurden.

1958 zog das Max-Planck-Institut für Physik, in dem Arnulf Schlüter schon seit 1956 die Arbeitsgruppe Plasmaphysik geleitet hat, von Göttingen nach München um. Bald darauf hat auch in Deutschland der Gedanke Raum gefunden, dass man die Fusionsforschung in großem Maßstabe verwirklichen sollte. Zwar gab es, wie immer, auch Bedenken, dass eine intensiver betriebene Plasmaphysik sich vielleicht wissenschaftlich nicht lohnen könne. Der Autorität Werner Heisenbergs war es aber zu verdanken, diese Bedenken zu widerlegen, und Bundesminister Siegfried Balke erklärte sich zu einem Bundeszuschuss von 10 Millionen DM für eine Fusionsforschungseinrichtung in Garching bereit.

### **Das Max-Planck-Institut für Plasmaphysik**

Mit drei Baracken begann daraufhin die Geschichte des IPP. Werner Heisenberg war 1960 bei der Gründung der „Institut für Plasmaphysik GmbH“ neben der Max-Planck-Gesellschaft der zweite Gesellschafter und hat dazu 3000 DM Gesellschaftskapital in das IPP investiert. Die damaligen Mitglieder der Wissenschaftlichen Leitung waren Ludwig Biermann, die Experimentatoren Ewald Fünfer und Gerhard von Gierke sowie Werner Heisenberg, Arnulf Schlüter, der die theoretische Abteilung leitete, und Karl-Heinz Schmitter, der Leiter der Abteilung Technik. 1963 wur-

den Rudolf Wienecke zum Wissenschaftlichen Mitglied und 1965 Arnulf Schlüter zum Vorsitzenden der Wissenschaftlichen Leitung und zum Wissenschaftlichen Direktor berufen. 1973 folgte ihm Rudolf Wienecke in beiden Ämtern.

In dieser Zeit hat sich Arnulf Schlüter intensiv mit der Weiterentwicklung des Stellarators befasst. Dabei haben seine intensiven Untersuchungen zum magnetischen Einschluss weitere Namensspuren hinterlassen, nicht nur im heute so genannten Grad-Schlüter-Shafranov-Gleichgewicht, sondern auch bei den Pfirsch-Schlüter-Strömen. Diese Ausgleichsströme müssen automatisch in einem toroidalen Magnetfeld fließen und die entstehenden Ladungen ausgleichen – und sind von großer Bedeutung für das Gleichgewichtsverhalten. Ebenso ist der Transport, eine wichtige Eigenschaft für den toroidalen Einschluss, mit seinem Namen verbunden. Im Gebiet hoher Stoßfrequenzen, dem Pfirsch-Schlüter-Regime, ist diese von Dieter Pfirsch und Arnulf Schlüter gefundene Abhängigkeit vorherrschend.

Neben diesem so genannten neoklassischen Transport hat sich Arnulf Schlüter auch mit turbulenten Prozessen im Plasma beschäftigt. Die Arbeit zusammen mit Dietrich Lortz und Friedrich H. Busse über die Stabilität stationärer Konvektion war zwei Jahre lang die am meisten zitierte Veröffentlichung. Schlüters Name ist auch bei der Entwicklung der „Advanced Stellarators“ wieder zu finden – Konfigurationen, die über die bisher betrachteten Stellaratoren hinausgehen und bezüglich einer Vielzahl unterschiedlicher Kriterien optimiert sind: Dazu hat er untersucht, wie eine Parallelstrom-Minimierung zu erreichen ist, wie die Driften minimiert werden können, insbesondere wie die Driftflächen mit den magnetischen Flächen in Einklang zu bringen sind

und wie hohe Beta-Werte möglich werden. Mit diesen beeindruckenden Verbesserungen wurde erstmals der Stellarator Wendelstein 7-AS ausgestattet, wobei AS nicht nur als „Advanced Stellarator“ zu verstehen ist, sondern auch die Initialen von Arnulf Schlüter wiedergibt.

### Lehrer und Forscher

Arnulf Schlüter war ein begnadeter Redner und Lehrer. Das Manuskript seiner Vorlesung „Einführung in die Plasmaphysik“ ist ein besonderes Werk, das leider nur noch in sehr kleiner Zahl vorliegt und ebenso wie die Vorlesung mit Begeisterung aufgenommen wurde.

Seine Arbeiten haben einen beeindruckend großen Umfang. Sein Lieblingsgebiet war die Statistik klassischer Gesamtheiten. Er hat sich mit der Emission von Kurzwellenstrahlen von der Sonne, mit der Erzeugung interstellarer Magnetfelder, den Schwingungen in Plasmen, der Plasmatheorie und der Ionosphäre beschäftigt. Er hat diese Arbeiten durch Rechenmaschinen-Ergebnisse unterstützt und dazu Algorithmen entwickelt.

Zu seinem großen wissenschaftlichen Spektrum gehört auch die Spektroskopie, die er mit Berechnungen der Oszillatorenstärken unterstützte. Er hat die Beschleunigung durch das Licht selbst dargestellt, hat sich mit kollektiver Ionenbeschleunigung befasst und mit Grundlagenproblemen der Synergetik. Er hat untersucht, wie das Mikrofeld in einem Plasma sich auf die Ionisation auswirkt, er hat Beiträge zur Relativitätstheorie, zur kosmologischen Konstante und zur klassischen Grenze der Einsteinschen Feldgleichungen geliefert – dies wahrscheinlich, nachdem er Einstein in Princeton getroffen hatte.

Aus diesem eindrucksvollen Spektrum sei das Beispiel der kollektiven Ionenbeschleunigung

herausgegriffen. Hier hat er gezeigt, dass man mit den sehr hohen elektrischen Feldern in einem Plasma geladene Teilchen auf sehr hohe Energien beschleunigen kann. Dies hat heute noch große Bedeutung, wenn man daran denkt, dass in der kosmischen Strahlung Teilchen mit Energien von mehr als  $5 \cdot 10^{20}$  Elektronenvolt gefunden werden, was sich ohne die Hilfe plasmaphysikalischer Betrachtungen nicht erklären lässt.

Arnulf Schlüter war Mitglied oder Präsident verschiedener wissenschaftlicher Organisationen und Institutionen und erhielt zahlreiche Auszeichnungen. Er hat die Entwicklung der Plasmaphysik in Deutschland nachhaltig und sichtbar geprägt. Alle seine ehemaligen Mitarbeiter, Schüler, Kollegen und Freunde sind ihm dankbar und werden sein Andenken in Ehren halten.

# Rudolf Wienecke und die großen Fusionsanlagen Europas

**Z**u Anfang möchte ich einige charakteristische Eigenschaften Rudolf Wieneckes in Erinnerung rufen, auch wenn das nur ein vereinfachendes Bild geben kann: Er hatte ein ausgeprägtes Gespür für Erfolg versprechende wissenschaftliche Aufgaben, was ihn zu einem großen Gestalter der europäischen Fusionsforschung werden ließ. Er war in München und Stuttgart ein engagierter und begeisternder Hochschullehrer und er war – dank seines Gerechtigkeitssinns, seiner aufrechten Haltung und Bescheidenheit – ein großes Vorbild für Studenten und Mitarbeiter. Für uns alle aber war er ein liebenswerter, hoch geachteter Mensch, Kollege und Förderer. Hier die wichtigsten Stationen seines wissenschaftlichen Lebens:

Nach der Rückkehr aus dem Russland-Feldzug als Schwerverwundeter hat er in Breslau und Münster studiert und wurde 1952 promoviert. Darauf war er zunächst im Forschungslabor von Siemens-Schuckert tätig, wo er an Schaltern und an Lichtbögen arbeitete. Mit diesen Forschungen hat er sich 1957 an der Universität Kiel habilitiert und war dann einige Jahre Oberassistent und Privatdozent am dortigen Institut für Experimentalphysik bei Walter Lochte-Holtgreve. 1960 wurde er nach Garching an das IPP berufen, zunächst als Leiter der Abteilung Experimentelle Plasma-physik 3 und dann ab 1963 als Wissenschaftliches Mitglied.

Zunächst Privatdozent und danach außerplanmäßiger Professor an der Universität München, folgte er 1969 einem Ruf als ordentlicher Professor an die Universität Stuttgart auf den Lehrstuhl für Energiekonversion. Er baute dort das Institut für Plasmaforschung auf und war zugleich Leiter des Projektes Kurzzeitverbrennungs-MHD-Generator am IPP. Von 1973 bis 1981 wechselte er als Vor-

sitzender der Wissenschaftlichen Leitung und Wissenschaftlicher Direktor zurück an das IPP. Nach einem erneuten Aufenthalt in Stuttgart wurde er 1982 zum Präsidenten der Bundeswehrhochschule München-Neubiberg berufen, die er in die Universität der Bundeswehr überführte. Er beendete seine wissenschaftliche Laufbahn schließlich im IPF in Stuttgart.

## Aufbauzeit des IPP

Zur Gründungs- und Aufbauzeit des IPP kam Rudolf Wienecke 1960 aus Kiel in die drei ersten Baracken auf dem Garching IPP-Gelände. In einer experimentierte Ewald Fünfer mit Theta-Pinchen; dort hatte auch ich ein kleines Experiment. In der zweiten logierte Rudolf Wienecke mit seiner Gruppe. Dieses „Barackeninstitut“ wurde im Sommer 1960 mit einer großen Feier eingeweiht, wobei folgendes Lied gesungen wurde: „Fern im Süden bei den Bayern, wo die Isar trübe rauscht, will man die Physik erneuern. Darum wird hier aufgebauscht der Gebäude große Zahl, voll mit Leuten erster Wahl.“ Und die letzte Strophe: „Mittags sieht man edle Recken kindlich mit dem Balle spielen. Diese Übung soll bezwecken, ihre Lungen durchzuspülen, mit der frischen Landesluft und Großlappens mildem Duft“. In den Abteilungen Rudolf Wieneckes, sowohl in Garching als auch in Stuttgart, wurde, soweit ich gehört habe, nicht nur gearbeitet sondern auch ausgiebig gefeiert.

1964 kam er bei einem Gastaufenthalt an der Stanford-Universität in Kalifornien mit dem Thema der MHD-Generatoren in Berührung und hat anschließend die Entwicklung dieser Generatoren in Garching betrieben. Die verschiedenen Gruppen in seiner Abteilung im IPP beschäftigten sich zudem mit Stoßwellenexperimenten, mit der Plasmaerzeugung durch Laser sowie mit chemischen Lasern.

Martin Keilhacker, ehemaliger Direktor  
des JET Joint Undertaking

Aus den beiden letzten Aktivitäten ging später ein eigenes Max-Planck-Institut hervor, das MPI für Quantenoptik in Garching.

### Aufbau des IPF in Stuttgart

1969 wechselte Rudolf Wienecke an die Universität Stuttgart und baute dort aus dem bereits existierenden Institut für Hochtemperaturforschung das Institut für Plasmaforschung (IPF) auf. Hier hat er sich in den Gruppen Wellen- und Plasmaheizung, Laseranwendungen und dichte Plasmen (Plasmafokus) mit fusionsorientierter Plasmaphysik beschäftigt. Die wissenschaftlichen Schwerpunkte seiner Arbeit waren – in Zusammenarbeit mit dem IPP in Garching – die fusionsorientierte Plasmaphysik und die Entwicklung von Komponenten für die Heizung des Plasmas mit Mikrowellen, was bei der Anwendung an den IPP-Anlagen bis heute bei ASDEX Upgrade, Wendelstein 7-X und ITER reichliche Früchte trägt. Hinzu kamen Plasmatechnologie wie Plasmabeschichtung und Plasmabehandlung – Arbeiten, die in der Industrie eine wichtige Rolle spielen – und schließlich der Plasmafokus: damals das Experiment mit der höchsten Fusions- bzw. Neutronenausbeute pro zugeführter Energie. Auf einige kleinere Anlagen folgte der 500 Kilojoule-Plasmafokus Poseidon, an dem der Mechanismus der Neutronenproduktion phänomenologisch erklärt werden konnte.

### Großanlagen in Garching

Während seiner Zeit als Wissenschaftlicher Direktor des Max-Planck-Instituts für Plasmaforschung von 1973 bis 1981 konzentrierte sich Rudolf Wienecke auf die Untersuchung des magnetischen Plasmaeinschlusses in toroidaler Geometrie. In den Anfangsjahren des IPP hatte man eine Reihe von kleineren Experimenten betrieben, die alle eingestellt werden mussten, um die Konzentration auf die beiden

erfolgsversprechenden Hauptlinien – Tokamak und Stellarator – zu ermöglichen und zwar mit relativ großen Anlagen. Nach Pulsator, dem ersten IPP-Tokamak, wurde der größere Tokamak ASDEX aufgebaut. Die Laserforschung wurde zunächst in eine Projektgruppe ausgegliedert und dann in einem eigenen Max-Planck-Institut weitergeführt.

Auch an der Idee und der Durchsetzung des europäischen Gemeinschaftsprojekts JET, dem Joint European Torus, hat Rudolf Wienecke entscheidend mitgearbeitet. Er war dabei, als das Projekt Wendelstein 7-A in Garching anließ und er hat die drei Planungsjahre für das Projekt ZEPHYR mit internationaler Beteiligung, unter anderem auch aus den USA, geführt.

Bereits am Anfang dieser acht Jahre als Wissenschaftlicher Direktor fällt er zukunftsweisende forschungspolitische Entscheidungen, die seinen strategischen Weitblick und sein Durchsetzungsvermögen bezeugen. Für die Konzentration auf den toroidalen magnetischen Einschluss mit den Großanlagen ASDEX, Wendelstein 7-A, JET und ZEPHYR mussten einige Forschungslinien, wie zum Beispiel die Laserforschung, aufgegeben werden. Zugleich hat Rudolf Wienecke das Institut umorganisiert und für die neuen Großanlagen die noch heute vorhandene Projektstruktur geschaffen; aus dem ehemaligen Bereich Technik und den allgemeinen Werkstätten wurden die Zentralen Technischen Einrichtungen. Diese Konzentration des technischen Potentials war entscheidend für den erfolgreichen Aufbau der größeren Experimente. Zudem hat sich das Institut in diesen Jahren unter seiner Leitung an den Studienarbeiten für NET und INTOR beteiligt, den papiernen Vorläufern von ITER.

Nach dem Einstieg in die Tokamak-Forschung mit Pulsator wurde 1973 der Vorschlag für ein größeres Tokamak-Experiment ausgearbeitet, das Axial-symmetrische Divertor-Experiment ASDEX. Dank Wieneckes Initiative liefen die Pläne für ASDEX in der Rekordzeit von einem Jahr durch alle deutschen und europäischen Genehmigungsprozesse. Zunächst nur mit Stromheizung ausgerüstet, waren bereits im ersten Betriebsjahr 1980 die Experimente sehr erfolgreich. Als die drei Megawatt starke Neutralinjektionsheizung zur Verfügung stand, folgte die Entdeckung des High Confinement-Regimes, die entscheidend war für den weiteren Fortgang der weltweiten Fusionsforschung: Der Einschluss im H-Regime war mindestens doppelt so gut als bislang. Weitere zukunftsweisende Ergebnisse mit dem Divertor waren: Mit seiner Hilfe wurden Verunreinigungen reduziert, ebenso die thermische Belastung der Prallplatten durch Abstrahlung im Divertor-Raum, der so genannte High-Recycling-Betrieb. Wir wissen inzwischen, dass die Divertor-Anordnung wesentliche Voraussetzung für ITER und ein späteres Kraftwerk ist.

### **Das Gemeinschaftsprojekt JET**

Rudolf Wieneckes Beitrag zum europäischen Gemeinschaftsprojekt JET war beträchtlich: 1972 hat die JET-Working-Group das physikalische Konzept für die Anlage erarbeitet. Die europäische Groupe de Liaison hat 1973 zugestimmt, obwohl das IPP zunächst Bedenken angemeldet hatte. Der wichtigste Einwand war wohl, dass man JET für einen zu großen Schritt hielt. Trotzdem hat das IPP nach der positiven Entscheidung JET uneingeschränkt unterstützt; man hat sich sogar für den Standort beworben. 1973/74 war das Designerteam unter Paul-Henry Rebut an der Arbeit: JET wurde als Limiter-Tokamak mit einem Plasmastrom von drei Mega-Ampere

geplant, der auf sechs Mega-Ampere ausgebaut werden konnte. Sensationellerweise war der – begrenzte – Betrieb mit Deuterium und Tritium vorgesehen, was die Auslegung der Maschine für ferngesteuerte Reparatur- und Umbauarbeiten verlangte.

Wiederum hatten das IPP, aber auch andere Forschungseinrichtungen Bedenken. Das IPP machte Gegenvorschläge, nämlich zum einen die adiabatische Kompression als Heizverfahren mit zu berücksichtigen und zum anderen einen Divertor einzubauen. Der Divertor wurde dann, wie wir wissen, vier bis fünf Jahre später tatsächlich eingebaut. Rudolf Wienecke, damals Mitglied der Groupe de Liaison, verlangte eine unabhängige wissenschaftliche Beurteilung des Projekts – es entstand der Risley-Report der UKAEA. Er kam zu dem Ergebnis, das Experiment sei grundsätzlich machbar, werde aber wesentlich teurer als zunächst abgeschätzt. Umstritten war auch hier die Fernhandhabung.

Als JET 1976 vom Ministerrat der Europäischen Gemeinschaft genehmigt wurde, folgte die Klärung der Standortfrage. Es wurde ein JET-Standortkomitee gegründet, an dem für das IPP Günter Grieger teilnahm. Die anfangs sieben europäischen Bewerber, darunter in Deutschland Jülich und Garching, reduzierten sich bald auf zwei, nämlich Garching und Culham, zu dessen Gunsten schließlich 1977 die Standortentscheidung ausfiel. Bald darauf machte das IPP einen eigenen Vorschlag für ein Zündexperiment ZEPHYR.

In der Amtszeit Rudolf Wieneckes gab es jedoch nicht nur glückliche Umstände und Erfolge. Er musste auch mit einigen Problemen kämpfen, die er allerdings fast alle gelöst hat. Zunächst einmal zeigte das deutsche Forschungsministerium wachsende steuerungspolitische



Ambitionen: Bei Wendelstein 7-A noch wenig aktiv, setzte es für ASDEX ein Beratungsgremium ein und war bei ZEPHYR dann stark involviert. Zugleich stellte das Ministerium die organisatorische Form des IPP in Frage: Entweder betreibe das IPP nur Grundlagenforschung und bleibe damit in der Max-Planck-Gesellschaft, oder es widme sich angewandter Forschung. Dann müsse es ein selbständiges Forschungszentrum werden oder einem Forschungszentrum zugeschlagen werden. Hinzu kamen Meinungsverschiedenheiten innerhalb der Wissenschaftlichen Leitung: Insbesondere Karl-Heinz Schmitter und Dieter Pfirsch waren zum Teil völlig anderer Meinung als die Übrigen und plädierten für Spiegelmaschinen und Hybridreaktoren.

Außerdem gab es einige pressepolitische Ungeschicklichkeiten. Zum Beispiel wurde in einer Pressemitteilung über den nettostromfreien Betrieb von Wendelstein 7-A von „einem Durchbruch bei der Energieerzeugung“ gesprochen. Und Rudolf Wienecke selbst beklagte öffentlich, dass die Fusionsforschung gefährdet sei durch den Sparkurs der Bundesregierung. Schließlich stellte ein Bericht „Kritische Zweifel am Superprogramm – 12 Fragen zur Kernfusion“ des Elementarteilchen-Physikers Jochen Benecke vom MPI für Physik und Astrophysik im Magazin „Bild der Wissenschaft“ die Fusionsforschung insgesamt in Frage. Die zwölf ausführlichen Antworten der Wissenschaftlichen Leitung unter Rudolf Wienecke konnten diese Zweifel aber stark relativieren. In einer von der Bundesregierung einberufenen Anhörung von Sachverständigen, darunter Klaus Pinkau vom IPP, Gerd Wolf aus Jülich und Hans-Otto Wüster von JET, wurden die Missverständnisse ausgeräumt und die Stellung der Fusionsforschung in Deutschland gestärkt.

### **JET-Erfolge – Krönung der Strategieplanung**

Zum Aufbau von JET wurde 1978 unter dem Direktor Hans-Otto Wüster das Joint Undertaking gegründet. 1983 ging die Maschine in Betrieb; 1991 lief das erste Tritium-Experiment mit der Verschmelzung von Deuterium und Tritium, das „Preliminary-Tritium-Experiment“. Zwei Entladungen mit nur elf Prozent Tritium – um die Maschine nicht zu stark zu aktivieren – erzeugten 1,7 Megawatt Fusionsleistung. Im Anschluss daran wurde die Anlage umgebaut, wie bereits erwähnt in eine Divertor-Konfiguration. Im Jahr 2000 folgte das Tritium-Experiment Nr. 1: Rund 200 Entladungen mit einer ungefähr fünfzigprozentigen Tritium-Beigabe – die Rekord-Fusionsleistung von 16 Megawatt wurde erzielt.

Rudolf Wienecke hat sich stets für diese neueren Entwicklungen in der Fusionsforschung interessiert. Alljährlich bis zu diesem Frühjahr hat er an den Jahrestreffen seiner Mitarbeiter teilgenommen: Wir alle werden ihn in guter Erinnerung behalten, ihn und seine Leistungen für das IPP und für die Fusionsforschung.

# On the continuing influence of Arnulf Schlüter and Rudolf Wienecke on fusion research

Alan Boozer  
Columbia University, New York

**A**rnulf Schlüter and Rudolf Wienecke were both transformational individuals in plasma physics. Schlüter was a world pioneer, and fusion physicists around the world know many of his contributions. He is also well-known for his contributions to astrophysics, but this talk is about fusion. Wienecke was an institution builder, turning IPP from a focus on small experiments to large devices. He also built the IPF Institute in Stuttgart and supported the JET experiment.

## Rudolf Wienecke – an institution builder

During Rudolf Wienecke's directorship, there were two transformational experiments that essentially every fusion physicist in the world knows. One is the ASDEX tokamak with its two discoveries, the H-Mode and the Edge-Localized Modes: The H-mode made the confinement twice as good as everybody thought it could be – a critical step for the development of the tokamak. The Edge-Localized Modes are small-scale instabilities in tokamaks that repetitively dump large amounts of energy from the plasmas edge – one of the problems, that ITER engineers are still working to confront. One would like to keep the H-Mode and get rid of the Edge-Localized Modes, which go with the H-mode when the gradients become too steep. A major part of the present fusion program is trying to figure out how to get rid of the bad and keep the good of these early ASDEX results.

The second transformational experiment in Wienecke's period was the Wendelstein 7-A stellarator. It was begun in 1971, before he became director, but its basic results were during his directorship. Wendelstein 7-A could go all the way from a stellarator to a tokamak. In the early period a current was used to heat the plasma, which was later replaced by other heating methods. As the plasma current was

taken away and most of the twist of the magnetic field lines came from the coils, the plasma became very quiet in the MHD sense – a very important result. The low current plasmas in Wendelstein 7-A could not be made to disrupt. It was the absence of disruptions – when the vacuum rotational transformation was bigger than 15 per cent – that demonstrated the importance of the stellarator concept. It was also very important that the plasma energy was well confined in Wendelstein 7-A – at least in comparison to the Princeton Model-C stellarator. The Model-C had an energy loss that was consistent with the Bohm formula, which made building a fusion reactor totally hopeless. Wendelstein 7-A showed that Bohm losses were not a necessary feature of stellarators, despite what many thought at the time.

Wienecke was not only important for plasma physics at the IPP, but also at Stuttgart University. He had two periods in Stuttgart – the foundation period of the Institut für Plasmaforschung as a major centre in plasma heating and diagnostics, and near the end of his career, he built strong programs in electron cyclotron heating and laser diagnostics.

## Arnulf Schlüter – pioneer in fusion science

Because Wienecke and I only met a few times and we did not interact strongly scientifically, my talk is somewhat asymmetric. With Schlüter this was different. He and I interacted over a decade or more.

Schlüter's 1952 paper on MHD equations including two-fluid effects is very important until this day and established a whole field of research. Actually this work was older than 1952, for it was presented at the 1950 meeting of the academy, so it is a remarkably early work.

At the time fusion research was declassified, there was an important issue of the 1957 “Zeitschrift für Naturforschung”, Volume A 12 with four Schlüter papers: What I found most remarkable in these papers was a diagram on the conservation of the magnetic moment. It shows that the conservation of the magnetic moment improves exponentially as the variation of the magnetic field sensed by the particles from one cyclotron gyration to the next becomes smaller. A related conservation law holds for the existence of magnetic surfaces in the presence of a perturbation. The important idea that the magnetic moment is exponentially conserved was not fully appreciated until recently. Martin Kruskal, a mathematician who was very important in the US development of these topics, showed that both the magnetic moment and magnetic surfaces were conserved to all orders in a Taylor expansion. This led Spitzer to assume that you do not have to build stellarators all that accurately. This is false, of course, and this error explains one problem, that the early stellarators at Princeton had. The last time Lyman Spitzer came to the Princeton Plasma Physics Laboratory, at its Fiftieth Anniversary, I was giving a talk on the history of stellarators. Afterwards he said to me: “Well, I was misled by Kruskal on this”, but Schlüter had the exponential convergence right in his 1957 paper.

The thing, that a typical fusion student in the United States, in Japan, or anywhere really knows about Schlüter, is the Pfirsch-Schlüter current, because it bears his name. But Schlüter did not publish as much as he should have. His publication on the Pfirsch-Schlüter currents in 1962 is a classic example. It is a Max-Planck-Institute report (MPI/PA/762), not a paper. If you try to get a copy, you have to go to one of the major fusion centres and dig into some dusty shelves and with luck you may find it.

### Stellarator optimization

A period of Schlüter’s career that I knew personally was his work on stellarator optimization by using the full freedom of the magnetic fields that can be produced at a distance. This had profound implications. The first machine it was applied to was Wendelstein 7-AS. The first attempt was to optimize vacuum magnetic fields, using Dommaschk potentials. Using such simple vacuum magnetic fields, it is easy to find coils that produce them.

Why is this so important? There are two basic ways of doing fusion using magnetic fields – axisymmetric tokamaks and stellarators. Axisymmetric tokamaks can certainly be designed more easily, but they also have fundamental problems that can be addressed by stellarators. Whether these issues will mean we have to go to stellarators or not, is still obscure. But the fact that we have an alternative in stellarators is what is important about these contributions.

There are three advantages of the stellarator and Schlüter was very much aware of these: First the robustness against disruptions, which means a sudden termination of the plasma – very important when we get to machines the size of ITER where a disruption can destroy the machine. Second the tokamak has restrictive upper limits for the plasma density, which compromise its use as a fusion device. These limits do not exist in stellarators. Thirdly, a tokamak must maintain a current to create the magnetic configuration, whereas a stellarator need not. For all these reasons, stellarators reduce the risk of achieving fusion energy.

Nevertheless, simple stellarator designs do not work. Without a supercomputer you really have no business designing stellarators, which



was reason stellarators had so many problems in their first twenty years. Schlüter was the person who recognized the potential for optimizing stellarators in a real sense. He also developed optimization tools. One of the first ways to optimize stellarators was to optimize curl-free magnetic fields and then calculate equilibria using the Chodura-Schlüter-Code, but that of course is very limited.

Chodura-Schlüter-Code was not used much because of the switch to the VMEC-Code. VMEC is an energy minimization code much as the Chodura-Schlüter-Code, but it is based on magnetic coordinates. It is a Lagrangean code, whereas the other is an Eulerian code. But the ordinary spatial coordinates that are used in the Chodura-Schlüter-Code are still used in many of the so-called 3-D MHD codes – M3D and NIMROD are two of these, but there are others. Thus the method is still used in the program until today.

### Wendelstein 7-X

There were further developments on optimization at the IPP, which led to the Wendelstein 7-X stellarator. The plasma cross-sections in Wendelstein 7-AS and Wendelstein 7-X are dependent on the toroidal position. An interesting point is that Wendelstein 7-X has a strong pentagonal shape, but the outer surface is more circular and the inner more pentagonal. This makes use of the original Meyer-Schmidt idea. As Schlüter explained to me, ideally all the magnetic field lines have the same length as they traverse a period. The distance around a symmetric torus is longer on the outboard than the inboard side. The implication is that the magnetic field lines should be as short as possible on the outside, which means circular, and lengthened on the inboard side. The strong corners on the inboard side of Wendelstein 7-X make the field lines more or less the

same length – and that’s the trick to make optimization work.

The person taking the next step in optimization was Jürgen Nührenberg using the plasma shape to define equilibria and using the VMEC equilibrium code to find a plasma shape with good physics properties. After the plasma shape is determined, distant coils must be designed to support that shape. The paper that gave the method for designing coils was by Peter Merkel; it was based on work that Karl Lackner had done earlier for tokamaks. This paper by Merkel is considered a classic and is still very much used in stellarator optimization.

Optimization goes on and further improvements can be made. One of the things that we are working on is determining what magnetic fields the coils really have to produce to obtain the desired physics properties. Everything about the magnetic field produced by the coils is defined in the plasma region by the component of that field perpendicular to the surface of the plasma. If you change that component by a little bit but in various ways, the changes have very different consequences. In some cases the field can be changed by an enormous amount, but the plasma properties do not change very much. In other cases you change it by parts in a thousand and everything just falls apart. To get simple coils one has figure it out which fields the plasma has high sensitivity to and very carefully control those.

### The burden of history

Arnulf Schlüter was not just a scientific colleague to me but very much a friend. One of the things we talked about is the burden of history. Those of us who grew up in the American south, as I did, have a burden of history much as the German people do. Other Ameri-

cans view us as fundamentally morally flawed – forever the perpetrators of slavery. Even though it happened 150 years ago, the destruction of war, the long military occupation, and the political isolation has had a so far indelible affect on southerners. Much was similar to what happened in Germany in World War I and even more in World War II. It has, therefore, been very interesting to me to talk to Germans and to see the evolution of German psyche through the different generations. Schlüter gave me new insights into the complexity of the human situation when you are immersed in terrible circumstances. Everyone in that generation, including Schlüter, had fascinating though disturbing stories, such as the horrors of the firebombing and how it affected ordinary civilians.

There is an early Schlüter reference, “Kompasskompensation mittels Feldstärkemessungen”, which was published in 1948. As Schlüter told me, this was connected with his wartime service in the navy: If a depth charge goes off near a submarine it sets up magnetic fields in the submarine. So the compass becomes useless to find the direction of north. Schlüter came up with a procedure to turn the submarine around and sort out the direction of true north. As it turns, the magnetization of the submarine appears to stay fixed and the magnetization of the earth looks like it is changing, so you can sort out the difference.

Schlüter was a person you had to know well to fully appreciate as a scientist, because his writings do not do him justice; he should have published more. I found him a very good friend, a very interesting person to talk with, and I will certainly miss him.



