

# **Karl Heinz Spatschek**

## **Das Graduiertenkolleg „Hochtemperatur-Plasmaphysik“**

### **Struktur des Graduiertenkollegs**

Das Graduiertenkolleg „Hochtemperatur-Plasmaphysik“ startete am 1. Januar 1995. Eine offizielle Eröffnungsfeier mit starker internationaler Beteiligung fand am 21. April 1995 im Schloss Mickeln statt. Die Begutachtung des ersten Fortsetzungsantrags für die zweite Förderperiode erfolgte im Rahmen eines Berichtskolloquiums am 20. Juni 1997 im Heinrich-Heine-Saal der Universität Düsseldorf. Die Begutachtung des zweiten (und nach den Regeln der DFG letzten) Fortsetzungsantrags erfolgte schriftlich. Jedesmal war der Bewilligungsbescheid positiv. Die Bewilligung umfasste 14 Graduiertenstipendien und ein Postdoktorandenstipendium. Das Graduiertenkolleg endet am 31. Dezember 2003, wobei u.U. noch eine kurze Auslaufphase möglich sein könnte.

Das an der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf angesiedelte Graduiertenkolleg schließt – und das ist sicher eine Besonderheit – Gruppen der benachbarten Universitäten in Bochum, Essen und Wuppertal mit ein. Hervorzuheben – und in Anbetracht des Themas Hochtemperatur-Plasmaphysik mit seinem Bezug zur Fusionsforschung sogar eine zwingende Notwendigkeit – ist die Zusammenarbeit mit dem Forschungszentrum Jülich.

Durch die besondere Konstellation der nordrhein-westfälischen Universitäten zusammen mit dem Forschungszentrum Jülich und dessen Einbettung in die internationale Fusionsforschung war es möglich, sowohl anwendungsrelevante Arbeiten aus der Fusionsforschung als auch experimentelle und theoretische Grundlagenuntersuchungen durchzuführen, zu verbinden und in die Ausbildung eines qualifizierten Nachwuchses einzubringen. Darüber hinaus erlaubten Kooperationen mit niederländischen und belgischen Kollegen, das Spektrum zu erweitern und zu ergänzen. Diesbezüglich wurden – mit der Unterstützung des „Euroregional Club for High-Temperature Plasmaphysics“ – Kooperationsvereinbarungen ausgehandelt.

Im Graduiertenkolleg Hochtemperatur-Plasmaphysik arbeiteten in den letzten acht Jahren regelmäßig und gleichzeitig fast 40 Doktorandinnen und Doktoranden im Jahr, wobei ca. ein Drittel durch das Stipendienprogramm gefördert wurde.

Die Vernetzung innerhalb des Kollegs, mit den entsprechenden Synergieeffekten, war von Anfang an die zentrale organisatorische Aufgabenstellung. Das Graduiertenkolleg hat – speziell in der Lehre – ein eigenes Profil entwickelt. Darüber hinaus war es auch wichtig, die Doktorandinnen und Doktoranden, die an den hier geförderten verschiedenen wissenschaftlichen Themen arbeiteten, zusammenzubringen, damit jede(r) von der Expertise der anderen Gruppe profitieren konnte und die eigenen Erkenntnisse den Kolleginnen und Kollegen zur Verfügung stellte. Bei der Verwirklichung dieser Ziele hat sich das jährliche Treffen des gesamten Graduiertenkollegs im Physikzentrum in Bad Honnef als der entscheidende Kristallisationspunkt herausgestellt. An zwei Tagen wurden jeweils die Projekte und ihre Fortschritte im Plenum diskutiert und sämtliche das Graduiertenkolleg insgesamt betreffende Fragen angesprochen. Begünstigt durch diese zentrale Veranstaltung

entwickelten sich viele neue Strukturen und Kontakte, die hier nicht alle im Einzelnen aufgeführt werden können. Die Leitung des Graduiertenkollegs hat sich größte Mühe gegeben, ein breites und aktuelles Lehrangebot zu erstellen, das auf die Bedürfnisse der Stipendiatinnen und Stipendiaten und der Kollegiatinnen und Kollegiaten zugeschnitten ist, die Intensität der Ausbildung verstärkt, jedoch nicht promotionsverlängernd wirkt.

Das Graduiertenkolleg arbeitete mit vielen ausländischen Partnern zusammen. Ein formelles Abkommen wurde mit dem Eindhovener „Centre for Plasma Physics and Radiation Technology“ abgeschlossen, das ein ähnliches Kolleg betreibt. Bei der Einrichtung des Graduiertenkollegs war der damals existierende Sonderforschungsbereich 191 „Physikalische Grundlagen der Niedertemperaturplasmen“ (der 2001 endete) sehr hilfreich. Nicht zuletzt hat die konzentrierte Arbeit in dem Graduiertenkolleg dazu geführt, dass die DFG mit Beginn des Jahres 2003 den neuen Sonderforschungsbereich 591 „Universelles Verhalten gleichgewichtsferner Plasmen: Heizung, Transport und Strukturbildung“ eingerichtet hat.

## Überblick über die wissenschaftlichen Fragestellungen

### Hochtemperatur-Plasmaphysik und Energieforschung

In der Sonne sorgt die Kernverschmelzung für den Energiegewinn, so dass die Sonne trotz Abstrahlung in einem Zustand des stabilen (stationären) hydrostatischen Gleichgewichts verbleibt. Energie durch Kernverschmelzung leichter Kerne erreichen wir wegen des Minimums der Kurve für die Bindungsenergie pro Nukleon.

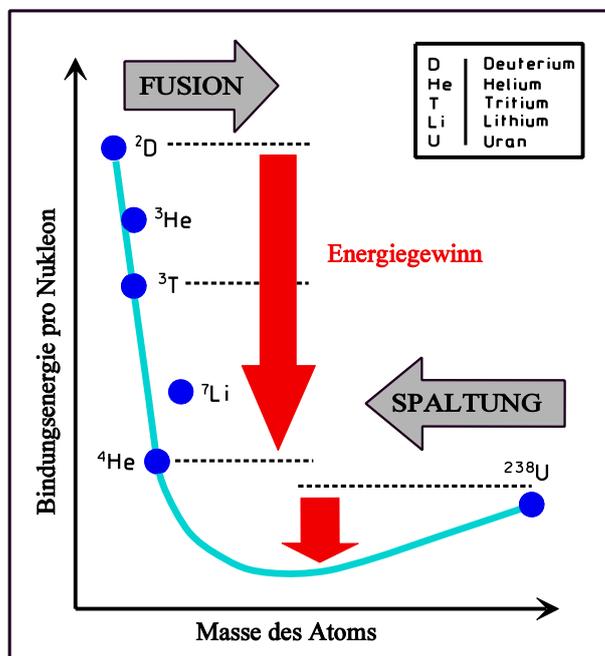


Abb. 1: Qualitativer Verlauf der Bindungsenergie pro Nukleon in Abhängigkeit von der Masse des Atoms.

In der Abbildung 1 ist dieser Zusammenhang, der einerseits Energiegewinn durch Fusion und andererseits Energiegewinn durch Spaltung erlaubt, qualitativ dargestellt. Bei der kontrollierten Kernfusion auf der Erde will man die Deuterium-Tritium Verschmelzung zu

Helium (plus Neutron) nutzen. Dass man diese Reaktion, z. B. im Gegensatz zur Deuterium-Deuterium Verschmelzung, hier nutzen will, liegt hauptsächlich an dem niedrigeren Wirkungsquerschnitt. Deuterium kann man aus Meerwasser gewinnen. Das Tritium muss aus  ${}^6\text{Li}$  gebrütet werden. Man kann die positive Perspektive der kontrollierten Kernfusion daran veranschaulichen, dass nur wenige Liter Meerwasser und einige Steine (für das Deuterium bzw. Lithium) nötig sein werden, um den Energieverbrauch einer vierköpfigen Familie für ein Jahr sicherzustellen.

Kernfusion benötigt hohe Temperaturen, um die abstoßende Coulomb-Barriere der geladenen Teilchen zu überwinden. Deshalb wird Kernfusion zur Hochtemperatur-Plasmaphysik gezählt. Dem alternativen Bereich, der Niedertemperatur-Plasmaphysik, werden meistens die Anwendungen in der Plasmatechnologie zugeordnet. In der Praxis ist die Unterscheidung oft nicht so ausschließlich, wie es die Bezeichnungen nahelegen. Erstens sind die Begriffe hoch bzw. niedrig relativ. Temperaturen von 5000 Grad Celsius erscheinen bei alltäglichen Anwendungen hoch; dabei sind sie für Plasmen eher niedrig. Grob charakterisiert man mit dem Begriff Hochtemperatur-Plasma solche Teilchensysteme, die im vollständig ionisierten Zustand vorliegen. Dagegen spielen bei Niedertemperatur-Plasmen die Ionisations- und Anregungsprozesse von Neutralteilchen eine entscheidende Rolle. Trotzdem lassen sich die Bereiche oft nicht eindeutig trennen. Eine Maschine wie das Tokamak-Experiment TEXTOR in Jülich beinhaltet beide Aspekte: Das Zentrum (Plasmakern) ist heiß und vollionisiert; dort sollen in Fusionsmaschinen die Verschmelzungsprozesse stattfinden. Der Wandbereich ist kalt; das Plasma ist dort nur teilweise ionisiert. Kaltes Material aus dem Wandbereich kann in den Plasmakern eindringen (z. B. als so genannte Verunreinigungen), und umgekehrt strömen heiße Teilchen aus dem Inneren in die kalte Randschicht. Wir erkennen, dass in physikalisch realistischen Systemen in der Regel beide Bereiche, Hoch- wie Niedertemperatur, eine Rolle spielen; das Graduiertenkolleg trug dem Rechnung.

Die Grundlagenforschung hat die Aufgabe, die prinzipiellen physikalischen Phänomene, die in Plasmen (makroskopisch oder mikroskopisch) auftreten können, zu untersuchen und (experimentell wie theoretisch) Methoden zu ihrer Analyse bereitzustellen. Dazu entwickelt sie Modelle, die in der Regel durch starke Idealisierungen geprägt sind. Idealisierungen sind solange gerechtfertigt, wie es darauf ankommt, den entscheidenden Effekt in einem bestimmten Parameterbereich herauszukristallisieren. Modelle wurden beispielsweise für einzelne Instabilitäten in Hochtemperatur-Plasmen entwickelt. Projektforschung wie die Kernfusion muss die Fülle der Erscheinungen und deren Wechselwirkungsmöglichkeiten erfassen. Das Plasma erscheint hier nicht als ein idealisiertes Modell, sondern als komplexes System. Das macht die Hochtemperatur-Plasmaforschung einerseits spannend, andererseits aber auch kompliziert. Das Zusammenwirken in komplexen Systemen kann man nur dann sinnvoll untersuchen, wenn man einen Überblick über die Effekte in Teilbereichen hat. Grundlagenforschung ist zweckfreier Erkenntnisgewinn; die Ergebnisse müssen der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt werden und den selbst gesteckten Qualitätskriterien der *scientific community* gerecht werden. Bei finanziell aufwändiger Grundlagenforschung fordert die Gesellschaft als Finanzier, Anwendungsmöglichkeiten zu eröffnen. Deshalb braucht in unserer Gesellschaft, bei aller Skepsis gegenüber Eingriffen von außen, die Grundlagenforschung, und das trifft auch auf die Plasmaphysik zu, Zielvorstellungen, die sich in Projekten artikulieren. Kontrollierte Kernfusion zur Energieversorgung

ist eine solche Zielvorstellung. Die Fusionsforschung liefert eine Fülle von wichtigen und interessanten Ergebnissen von hoher Präzision, die anderweitig nicht verfügbar wäre und der Grundlagenforschung umgekehrt wieder zugute kommt.

Die Natur demonstriert uns, dass Fusion ein über Milliarden von Jahren stabiler Prozess ist, der sich wie ein Thermostat selbst unkompliziert und robust regelt. Der von der Kernspaltung bekannte GAU mit einer Reaktorschmelze in kürzester Zeit durch eine Kettenreaktion ist bei einem Fusionskraftwerk, wie es die Sonne darstellt, prinzipiell unmöglich. Die mehr oder minder seit Jahrmillionen gleichbleibende Sonnenstrahlung gibt davon – für uns lebenswichtig – eindringlich Zeugnis. Auf unserer Erde besteht die Schwierigkeit hauptsächlich darin, die Flamme zum kontrollierten Brennen zu entfachen, und weniger darin, sie, falls sie einmal brennt, stabil weiter zu erhalten. Die Problematik des Zündens liegt an einer grundsätzlichen Konzeptabänderung. Auf unserer (astronomisch gesehen kleinen) Erde stehen uns nicht die riesigen Maßstäbe zur Verfügung, die einen Einschluss durch Gravitation ermöglichen. Deshalb werden die Konzepte des Trägheits-einschlusses (Stichwort „Laserfusion“) und des magnetischen Einschlusses (Stichwörter „Stellarator“ sowie „Tokamak“, wobei insbesondere der Name Stellarator auf die enge Verknüpfung mit der Energiegewinnung in Sternen hinweist) verfolgt. Der Einschluss auf kleineren Skalen wirft neue Fragen auf, die theoretisch wie experimentell detailliert untersucht werden müssen. Die Vergangenheit hat gezeigt, dass dabei viele neue Methoden (in Diagnostik, Materialforschung und Strahlung-Materie-Wechselwirkung, um einige aus dem experimentellen Bereich zu nennen, bzw. in Stabilitätsanalyse, Turbulenzforschung, nichtlinearer Dynamik und Transporttheorie, um einige aus dem theoretischen Bereich zu nennen) entwickelt und erfunden werden müssen, die dann auch Ausstrahlung in eine Vielzahl der benachbarten Disziplinen haben.

### **Hochtemperatur-Plasmaphysik und Astrophysik**

Ohne Zweifel hat die moderne Plasmaphysik ihre Wurzeln in der Astrophysik. Die ersten drei Minuten unserer Weltallgeschichte sind durch die Dynamik eines Quark-Gluonen-Plasmas mit Hadronen- und Leptonenära sowie der Bildung von Wasserstoff und Helium geprägt. Aber auch heute befindet sich noch mehr als 99 Prozent der gesamten bekannten Materie im natürlichen Plasmazustand. Nicht so hier auf unserer Erde, wo wir über Sonnenstrahlung, Polarlichter, ionosphärische Störungen, Wechselwirkungen des Sonnenwindes mit unserer Magnetosphäre usw. nur indirekt etwas von natürlichen Plasmaeffekten mitbekommen. Um so stärker sind in unserem unmittelbaren Lebensbereich künstlich erzeugte Plasmen in Anwendungen auf dem Vormarsch: von der Leuchtstoffröhre bis zur Chipproduktion, vom Plasmakristall bis zur Beschichtungstechnik, und nicht zuletzt von der Glimmentladung zur Fusionsmaschine. Von der Natur lernen ist die Devise, die in der Hochtemperatur-Plasmaforschung zu großen Erfolgen beigetragen hat.

Die Hochtemperatur-Plasmaforschung ist nötig, um die verschiedensten astrophysikalischen Erscheinungen zu verstehen. In diesem Zusammenhang gibt es bei Hochtemperatur-Plasmen, die generell als komplexe Vielteilchensysteme angesehen werden können, noch spannende Grundsatzfragen; erwähnt sei nur das solare Neutrino-Problem. Die Astrophysiker haben ein Standardmodell der Sonne entwickelt, das einen Großteil der Erscheinungen gut erklärt, sich in vielen Bereichen aber auf qualitative Aussagen beschränken muss. Das ist verständlich, können wir doch die Sonne nicht gut diagnostizieren. Sie ist zu weit ent-

fernt, und ihr Inneres ist für unsere Messinstrumente nicht zugänglich. Große Anstrengungen, sei es durch direkte Beobachtungen oder indirekte Schlüsse aus Modellen, sind hier auch zukünftig nötig, zählen doch Fortschritte in der Sonnenforschung von alters her zu den erstrebenswertesten Erkenntniszielen der Menschheit.

Viele astrophysikalische Plasmen sind von Magnetfeldern beeinflusst. Erinnert sei an die Sonnenkorona, die Erdmagnetosphäre, an Pulsare und intergalaktische Magnetfeldkonfigurationen. Man könnte nun meinen, dass sich die Situation wesentlich anders als bei einer überschaubaren Apparatur wie einem Tokamak darstellt. Das ist aber prinzipiell gar nicht so unterschiedlich. Es gibt in Analogie zu terrestrischen Experimenten erfolgversprechende Ansätze, insbesondere durch numerische Modellierung, ungelöste Grundlagenprobleme zu lösen. Der magnetische Einschluss wird in terrestrisch toroidalen Anordnungen realisiert. Er basiert im Wesentlichen auf der Existenz so genannter geschlossener magnetischer Flächen. Das sind Flächen, die von Magnetfeldlinien gebildet werden. Magnetische Flächen wirken bezüglich des Teilchen- und Energieeinschlusses isolierend, da die Bewegung senkrecht zum Magnetfeld wesentlich gehemmter erfolgt als parallel zu den Magnetfeldlinien. Die Frage ist jedoch, ob tatsächlich magnetische Flächen existieren (ein nicht-triviales mathematisches Problem), welche physikalischen Prozesse mögliche magnetische Flächen aufbrechen, usw. Dabei zeigt die Zerstörung magnetischer Flächen durchaus ambivalente Aspekte. Für den Einschluss sind geschlossene Flussflächen wichtig, für die Energie- und Ascheabfuhr kann ein kontrolliertes Aufbrechen der Flächen andererseits aber wiederum hilfreich sein. Und schon sind wir bei einem aktuellen Arbeitsschwerpunkt der Hochtemperatur-Plasmaforschung, die aufs Engste mit akademischer Grundlagenforschung verknüpft ist und den Dynamischen Ergodischen Divertor in Jülich nutzt. Aus der Sicht der Grundlagenforschung sind vier Dinge besonders interessant: Erstens handelt es sich bei den magnetischen Feldlinien um ein so genanntes Hamiltonsches System, das integrabel oder nicht-integrabel sein kann. Zweitens realisiert das Plasmagefäß des Tokamak einen Torus, wie er (in verallgemeinerter Form) von Mathematikern zur Charakterisierung der Dynamik nichtlinearer Systeme verwandt wird. Drittens liefert uns die Messung in einem Tokamak-Querschnitt in physikalisch anschaulicher Form einen so genannten Poincaré-Schnitt. Und letztlich verursacht der Einfluss der Teilchen den Übergang zur dissipativen Situation. Nehmen wir alle vier Aspekte zusammen, so befinden wir uns bereits mitten in dem aufstrebenden Bereich der Nichtlinearen Dynamik, mit der Konstruktion und Analyse symplektischer Abbildungen, der Frage nach dem Einsatz und der Kontrolle von Chaos, den physikalischen Eigenschaften partiell chaotischer Systeme, der Möglichkeit fremdartiger Attraktoren usw.

Der Experimentator sagt uns, dass ein global stabiler Einschluss nur in bestimmten Operationsbereichen auftritt. Gemeint sind z. B. bestimmte Dichte- und Temperaturbereiche in Wandnähe. Diese auf den ersten Blick etwas technisch anmutende Aussage beinhaltet in Wirklichkeit die gesamte Fülle mathematisch orientierter Stabilitätsanalysen. Die Methoden, die zum Verständnis der Operationsbereiche eines magnetisch eingeschlossenen Plasmas entwickelt werden, unterscheiden sich zunächst einmal nicht grundsätzlich von denen, die für die Stabilität eines Sterns hilfreich sind. Aus der Mathematik bekannte Variationsprinzipien, die aufwändig weiterentwickelt wurden, haben sich bewährt. Dass heute Tokamak-Maschinen stabil betrieben werden können, hängt zweifelsohne mit den Fortschritten der analytischen und numerischen Stabilitätsanalyse zusammen. Die Tatsa-

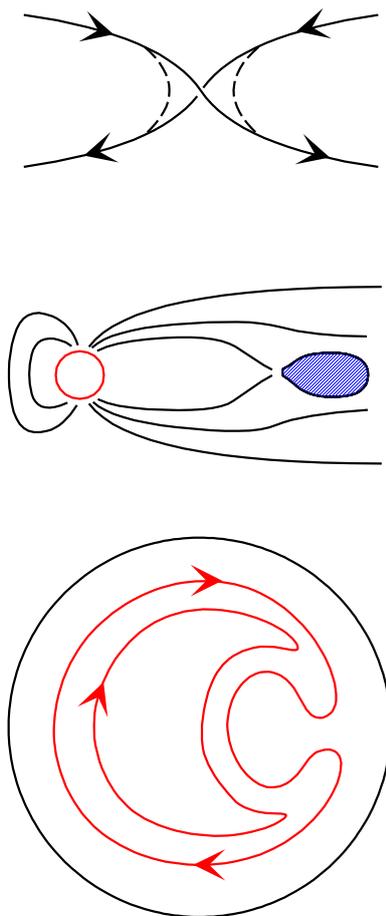


Abb. 2: Änderungen der Magnetfeldtopologie nach dem Prinzip der *Tearing*-Instabilität (oben) und in der Magnetosphäre der Erde bzw. in Tokamak-Experimenten.

che, dass mittlerweile große MHD<sup>1</sup>-Codes zum Design komplizierter Spulenordnungen eingesetzt werden, wie z. B. bei der Konstruktion des Stellarators Wendelstein 7X in Greifswald, ist ein weiteres Zeugnis für den grandiosen Erfolg der grundlagenorientierten Stabilitätsanalyse. Während die gefährlichsten, d. h. die großskaligen und schnellsten Instabilitäten heute gut unter Kontrolle sind, scheinen Mikroinstabilitäten bei Plasmaanordnungen unausweichlich zu sein. Aufgrund der vielen Freiheitsgrade und mannigfachen Quellen freier Energie eines inhomogenen Plasmas gibt es einen Zoo von Instabilitäten, der bestens katalogisiert ist. Viele Instabilitäten sind aus astrophysikalischen Beobachtungen bekannt, aber mindestens genau so viele wurden erst in den Laborexperimenten entdeckt. Letztere sind wiederum für viele bis dahin unverstandene Beobachtungen in Weltraum-Plasmen verantwortlich. Als ein Beispiel solcher Ähnlichkeiten sei die *Tearing*-Instabilität genannt, die einerseits bei der Dynamik unserer Magnetosphäre eine große Rolle spielt, andererseits in Tokamak-Plasmen zu einer Veränderung der Magnetfeldtopologie führen kann. Abbildung 2 zeigt von oben nach unten das Prinzip der *Tearing*-Instabilität und ihr Auftreten in der Erdmagnetosphäre sowie in einem Tokamak.

<sup>1</sup> Magnetohydrodynamik

## Transport und Turbulenz

Mikroinstabilitäten haben aber noch viel weitreichendere Folgen als bislang angedeutet. Sie sind die Ausgangspunkte für turbulentes Plasmaverhalten. Die Turbulenz stellt – übergreifend über viele Gebiete der Physik – wahrscheinlich den wichtigsten ungeklärten Bereich der klassischen Physik dar. Turbulenz begegnet uns im Alltag beim Wetter, in Strömungen oder beim Fliegen. Nicht immer sind die Auswirkungen der Turbulenz so augenscheinlich wie bei diesen Beispielen. Turbulente Plasmen äußern sich im Wesentlichen in einem anomalen Transportverhalten. Und das ist gravierend für Fragestellungen der Hochtemperatur-Plasmaphysik, versucht man doch durch magnetische Isolation das klassische Transportverhalten drastisch zu reduzieren. Klassischer Transport wird durch Stöße – man spricht auch von individuellen Zweier-Stößen – zwischen den Teilchen verursacht. Turbulente Fluktuationen bringen eine neue Qualität in die stochastische Dynamik der Teilchen. In Analogie zu den individuellen Zweierstößen können kollektive Fluktuationen zu effektiven Stößen und damit zu einer drastischen Erhöhung des Transports senkrecht zu den magnetischen Flächen führen. Turbulente Spektren wurden in den verschiedensten Apparaturen gemessen; die Hochtemperatur-Plasmaphysik liefert zurzeit mit die beste Diagnostik und die aussagekräftigsten Ergebnisse in diesem Bereich. Auch die Theorie ist weit fortgeschritten. Die „Weak turbulence theory“ und die „Renormalized turbulence theory“ sind Meilensteine auf dem Weg zum endgültigen Verständnis der komplizierten nichtlinearen Dynamik mit sehr vielen angeregten Freiheitsgraden.

Überhaupt sei an dieser Stelle eine allgemeine Bemerkung erlaubt. Unser naturwissenschaftlich orientiertes Denken ist vielfach noch immer von zwei Paradigmen geprägt: Linearität und Gleichgewicht. Aus Linearität resultiert die Vorhersagbarkeit durch Extrapolation. Nichtlineare Prozesse sind für unvorhersehbare abrupte Veränderungen verantwortlich, die lineare Extrapolationen zu unangemessenen Chartanalysen degradieren. Ähnlich verhält es sich bei unserem Verständnis für Zustände von Systemen. Die aus der Gleichgewichtsthermodynamik bekannten adiabatischen Parameteränderungen geben zwar in vielen Fällen Zustandsänderungen richtig wieder, sie führen aber zu falschen Beschreibungen, wenn sich Systeme schnell und gleichgewichtsfern entwickeln. Hochtemperatur-Plasmaforschung wird so zur Grundlagenforschung komplexer nichtlinearer Systeme außerhalb des thermodynamischen Gleichgewichtes, mit enormem Potential im Erkenntnisgewinn, der auch für andere Systeme wünschenswert ist.

## Gesamtbilanz

Forschung muss kreativ sein und ist daher immer für Überraschungen gut. Bei allen gut gemeinten Zielvorstellungen und verstärkten Wechselwirkungen ist eigentlich auch ein Kriterium für gute Forschung, dass sie Ergebnisse produziert, die unerwartet sind, überhaupt nicht in das bisherige Konzept passen und ihre wesentlichen Anwendungen ganz woanders erfahren. Die Geschichte all dieser Überraschungen müsste ein Pflichtkapitel in allen Richtlinien für Forschungsförderung sein. Glücklicherweise konnten unsere Doktorandinnen und Doktoranden viele neue und teils faszinierend überraschende Grundlagenresultate erzielen, die in über hundert Veröffentlichungen dokumentiert sind. Das Sekretariat des Graduiertenkollegs im Institut für Theoretische Physik der Heinrich-Heine-Universität stellt Interessierten gern die Liste der Veröffentlichungen zur Verfügung.