

# SAS

## in der fusionsorientierten Plasmaphysik

ANDREAS KUS und OTTO J.W.F. KARDAUN

Max-Planck-Institut für Plasmaphysik  
IPP-EURATOM Assoziation  
D-85748 Garching bei München

### Zusammenfassung

In der Fusionsforschung wird das Ziel verfolgt, ein brennendes Plasma, ähnlich dem in der Sonne, unter kontrollierten Verhältnissen zu erzeugen. Dazu sind auf Magnetfeldern basierende Einschlußanlagen erforderlich, die größer sind als die bisher existierenden.

Im Zusammenhang mit dem ITER-Projekt, wo in internationaler Kooperation eine zukünftige Fusionsmaschine entworfen wird, befaßt sich die ‘H-Mode Datenbank Arbeitsgruppe’ mit der Zusammenstellung internationaler plasmaphysikalischer Datenbanken und mit deren Analyse, gerichtet auf Hochrechnung (‘Skalierung’) der Energieeinschlußzeit auf die größeren Abmessungen von ITER, als auch mit der Bestimmung des Existenzgebiets der bevorzugten Entladungsphase, der sog. ‘High Confinement Mode’ (H-Mode), statt der ‘Low Confinement Mode’ (L-Mode).

In diesem Text werden drei für ITER wichtige Anwendungsgebiete, bei denen statistische Analysen mit SAS eine bedeutende Rolle spielen, beschrieben: (a) empirische Energieeinschlußzeit-Skalierungen, wo log-lineare Modelle (‘einfache Potenzgesetze’) und nichtlineare Erweiterungen (Interaktionsmodelle und ‘offset-lineare’ Modelle) benutzt werden, (b) Diskriminanzanalyse zur Untersuchung der Existenzgebiete für L-Mode und H-Mode, (c) Analyse von Profilen der Temperatur und der Dichte während der Plasmaentladungen.

### Gegenstand der Fusionsforschung

Um die Energieversorgung künftiger Generationen zu sichern, werden verschiedene Alternativen zu den fossilen Energiequellen (Kohle, Erdgas, Erdöl) untersucht. Die wichtigsten Möglichkeiten scheinen zu sein: Kernspaltungsenergie, Sonnenenergie und Fusionsenergie.

Fusionsenergie kann bei Verschmelzung von Wasserstoffkernen zu Helium gewonnen werden. Da die für den Fusionsprozeß benötigten Rohstoffe in nahezu unbegrenzter Menge vorhanden sind, könnte die Kernfusion schon im nächsten Jahrhundert einen wichtigen Beitrag zur Energieversorgung leisten.

### Das Prinzip der Fusionsreaktion

Abbildung 1 zeigt, daß die Bestandteile der Atomkerne für verschiedene Elemente unter-

schiedlich stark gebunden sind.

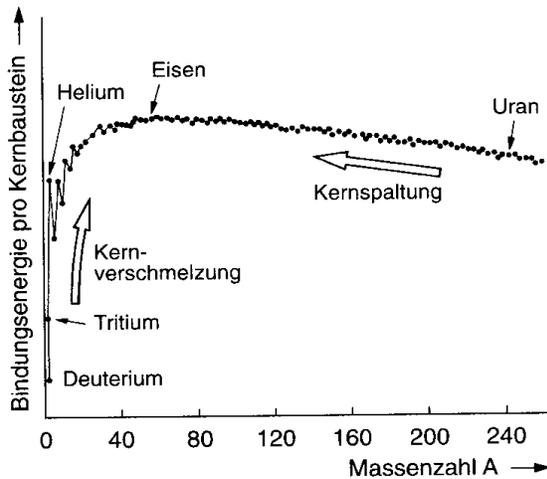


Abbildung 1: Die Kernbausteine verschiedener Elemente sind verschieden stark aneinander gebunden. Durch Kernumwandlungen kann man Energie entweder durch Spaltung schwerer Kerne (Kernspaltung) oder durch Verschmelzung leichter Kerne (Kernfusion) gewinnen. Das Bild ist [5] entnommen.

Die Quelle der Fusionsenergie ist die Zunahme der inneren Bindungsenergie der Atomkerne bei Verschmelzung leichter Elemente (Wasserstoff, Deuterium, Tritium), s. Abbildungen 1 und 2. Bei Kernspaltung wird dagegen Energie durch Spaltung der Kerne schwerer Elemente gewonnen. Deuterium ist in ausreichenden Mengen im Meereswasser vorhanden, während

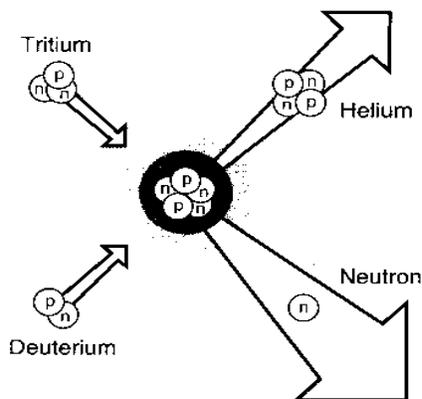


Abbildung 2: Ein Deuterium- und ein Tritiumkern verschmelzen zu einem Heliumkern, wobei ein Neutron frei wird. Beide Reaktionsprodukte besitzen hohe Bewegungsenergie, die zur Plasmaheizung und zur Energieproduktion im Kraftwerk genutzt werden kann. Das Bild ist [5] entnommen.

Tritium im Fusionskraftwerk aus dem Element Lithium erzeugt werden kann (s. [5]).

Bei einer hohen Temperatur (ab etwa  $10^4$  Grad) werden die Atome eines Gases ionisiert, und bilden eine gasförmige Mischung aus Kernen und Elektronen, genannt *Plasma*. Wegen seiner besonderen Eigenschaften ist das Plasma, neben Festkörper, Flüssigkeit und Gas, ein vierter Aggregatzustand der Materie.

Um die abstoßenden elektrischen Kräfte der positiv geladenen Atomkerne durch eine hohe Geschwindigkeit dieser Kerne zu überwinden, braucht man eine sehr hohe Temperatur (etwa  $10^8$  Grad) des Plasmas.

Mittels eines Magnetfeldes lassen sich in einem toroidalen Gefäß die elektrisch geladenen Plasmateilchen einschließen und von den Wänden fernhalten. (Ein Kontakt mit der Wand

würde sowohl das Plasma abkühlen, als auch die Wand beschädigen). Je nach Methode, mit der der magnetische Einschluß realisiert wird, unterscheidet man zwei wichtige Typen von Experimenten: *Tokamaks* und *Stellaratoren*, s. Abbildungen 3 und 4.

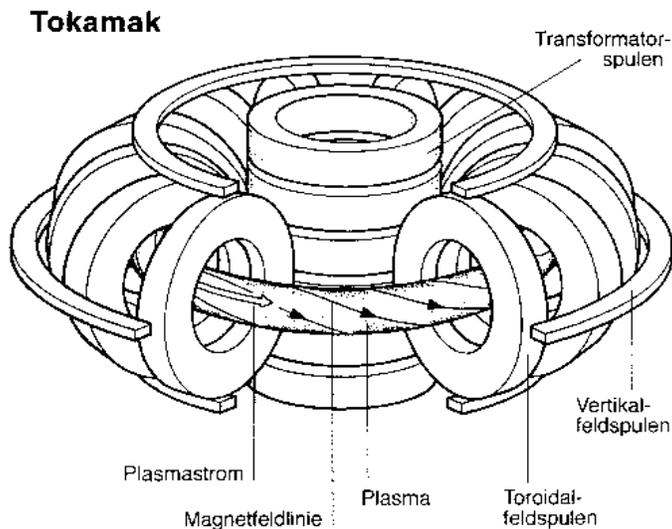


Abbildung 3: In einem Tokamak wird das Plasma durch ein schraubenförmiges Magnetfeld eingeschlossen. Dieses Feld ist eine Überlagerung von zwei Feldern, die durch äußere Spulen und den im Plasma fließenden Strom erzeugt werden. Der Plasmastrom wird durch Transformatorspulen induziert. Zusätzlich, zur Stabilisierung des Stromes im Gefäß, wird das durch die Vertikalspulen erzeugte Magnetfeld verwendet. Der Torusradius ist bei dem JET-Experiment 2.85 Meter und wird bei ITER voraussichtlich 8.14 Meter sein. Das Bild ist [5] entnommen.

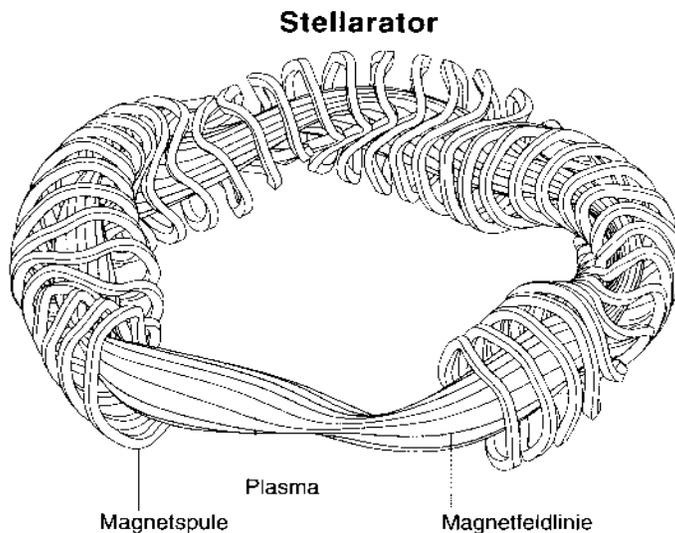


Abbildung 4: In einem Stellarator wird das Plasma nur durch ein Spulensystem eingeschlossen. Wegen des fehlenden toroidalen Plasmastroms müssen die Magnetspulen kompliziertere Formen haben. Das Bild ist ebenfalls [5] entnommen.

### Bedingungen zur Zündung eines Plasmas

Um das Plasma zu zünden (d.h. einen Zustand zu erreichen, bei dem so viele Fusionsprozesse ablaufen, daß die dabei erzeugten Heliumkerne genügend Leistung in das Plasma einbringen, um die Temperatur des Plasmas hoch zu halten), braucht man (a) eine Plasmatemperatur

von 100-200 Millionen Grad, und (b) ein Produkt aus Dichte und der sog. Energieeinschlußzeit von mindestens  $5 \cdot 10^{20}$  Teilchen/ $m^3$  mal Sekunde.

Das Plasma wird von außen auf verschiedene Weise (z. B. durch Neutralteilchen-Injektion (NI) oder durch elektromagnetische Wellen) geheizt. In einem Tokamak findet eine zusätzliche Heizung des Plasmas durch den elektrischen Strom nach dem Ohmschen Gesetz statt.

Der Brennstoff, eine Mischung aus Wasserstoffisotopen, wird in das Vakuumgefäß von außen nachgefüllt. Bei Bedarf werden auch Teilchen in Form von 'Pellets' während der Entladung in das Plasma hineingeschossen. Nach heutigem Erkenntnisstand, wird man für die Zündung eine Plasmadichte von etwa  $10^{20}$  Teilchen pro Kubikmeter brauchen.

Die Energieeinschlußzeit wird definiert als die Abklingzeit der Plasmaenergie (d.h. des Produktes der Plasmadichte und der Plasmatemperatur) wenn alle Heizquellen abgeschaltet werden. Eine höhere Einschlußzeit bedeutet also eine bessere Wärmeisolierung des Plasmas. Im allgemeinen nimmt bei allen Tokamaks die Einschlußzeit nach Einschalten von NI-Zusatzheizung ab. Etwa 1982 wurde am Max-Planck-Institut in Garching ein Plasmazustand entdeckt (s. [21]) in dem, bei hinreichender Zusatzheizung, die Einschlußzeit etwa doppelt so hoch war als bei vergleichbaren Entladungen mit denselben externen Plasmaparametern. Diese Entladungsphase wurde H-Phase oder *H-Mode* genannt. Dabei steht der Buchstabe H für High-Confinement. Die Entladungsphase in der keine erhöhte Einschlußzeit erreicht wird, nennt man seitdem *L-Mode* (L steht für Low-Confinement). Die H-Mode wurde dann, wenn auch manchmal mit einer geringeren Einschlußzeit-Verbesserung, an vielen Tokamaks erreicht, und später auch an Stellaratoren gefunden ([3]).

## Internationale Zusammenarbeit und das ITER-Projekt

Mitbedingt durch die Komplexität der Aufgaben, ist die Fusionsforschung schon seit vielen Jahren international orientiert.

Eines der wichtigsten Projekte, die von der EG, den USA, Japan und Rußland gemeinsam angegangen werden, ist die Entwicklung eines experimentalen Fusionskraftwerks vom Typ Tokamak unter dem Namen ITER ('International Thermonuclear Experimental Reactor').

Das Plasma im ITER soll a) die Zündung erreichen, was die Realisierbarkeit der kontrollierten Kernfusion wissenschaftlich nachweisen würde, und b) möglichst für längere Zeit (etwa 2000 Sekunden) brennen, um den Nachweis der technischen Machbarkeit eines energieliefernden Fusionsreaktors zu erbringen.

Um die erste Bedingung zu erfüllen, braucht man eine Energieeinschlußzeit von etwa 5 Sekunden, die voraussichtlich (bei der geplanten Größe der Maschine) nur in der H-Mode erreicht werden kann.

Da also die H-Mode für ITER von großer Bedeutung ist, hat sich eine Arbeitsgruppe ('H-Mode Database Working Group') gebildet ([9]), der sich als Aufgabe gestellt hat, vorhandene Datensätze von den verschiedenen Tokamaks zu einer einheitlichen Datenbasis zusammenzufügen, und aufgrund dieser zu empirisch begründeten Aussagen über die Energieeinschlußzeit und die Erreichbarkeit der H-Mode in ITER zu kommen. Eine aktuelle Mitgliederliste der Arbeitsgruppe kann man [6] entnehmen.

Die ITER-Einschluß-Datenbank ('ITERH.DB2 Confinement Database') enthält Daten von 6 Tokamaks, insgesamt etwa 6000 Datensätze von je 150 skalaren Größen (s. [20]).

Speziell zur Untersuchung der Erreichbarkeit der H-Mode wurde eine zusätzliche Datenbank ('ITERH.DB1 Threshold-Power Database') zusammengestellt, die, im gleichen Format wie ITERH.DB2, Daten von Entladungen sowohl in L-Mode als auch in H-Mode enthält.

## SAS-Anwendungen

### Energieeinschlußzeit-Skalierungen

Von praktischer und theoretischer Bedeutung ist die Frage, wie die Einschlußzeit von den Plasmaparametern und der Größe, als auch der geometrischen Form, des eingeschlossenen Plasmas abhängt.

Basierend auf physikalischer Erfahrung hat man schon in den 80-er Jahren einige Skalierungsmodelle für die Einschlußzeit benutzt (s. z. B. [16], [22]), die auf etwa 8 sog. ‘engineering variables’ basieren. Die Standardvariablen sind: Plasmastrom  $I_p$ , Magnetfeld  $B_T$ , Heizleistung  $P_{L'}$ , Massenzahl  $M$ , großer Torusradius  $R$ , Querschnittsverhältnis  $\kappa = b/a$ , inverses Aspektverhältnis  $\epsilon = a/R$ , und Plasmadichte  $n_e$ . Die kleinen Torusradien werden mit  $a$  (horizontal) und  $b$  (vertikal) bezeichnet. Die Einschlußzeit  $\tau_{E,th}$  ist, für stationäre Entladungen, das Verhältnis zwischen dem thermischen Energieinhalt  $W_{th}$  und der Heizleistung  $P_{L'}$ .

Unter Verwendung der ITER-H-Mode Einschlußdatenbank, Version 1 ([1]) und 2 ([9], [19], [20]), sind sowohl log-lineare Modelle (einfache Potenzgesetze), als auch Interaktionsmodelle und zwei-term log-nichtlineare Modelle (zwei-term Potenzgesetze ([12]) und andere nichtlineare Modelle ([2])) angepaßt worden.

#### Log-lineare Modelle

Das Modell ist:

$$Y = \log \tau_{E,th} = a_0 + a_I \log I + \dots + a_M \log M + E. \quad (1)$$

Der Regressand ist die thermische Energieeinschlußzeit  $\tau_{E,th}$ , während  $a_0, \dots, a_M$  die Regressionskoeffizienten sind, und  $E$  ein ‘random’ Meßfehler in  $\tau_{E,th}$  ist.

Aufgrund physikalischer Überlegungen, unterstützt durch SAS-Datenauswertungen, wurde nach bestimmten Selektionskriterien eine einheitliche Untermenge (‘standard dataset’) der Einschlußzeit-Datenbank festgelegt. Lineare Regressionsanalyse dieser Teilmenge ergab

$$\tau_{E,th} = 0.034 I_p^{0.9} B_T^{0.05} P_{L'}^{-0.65} M^{0.4} R^{2.1} \kappa^{0.8} (a/R)^{0.2} n_e^{0.3} \quad (2)$$

für die ELM-behafteten Entladungen ([9]), und

$$\tau_{E,th} = 0.036 I_p^{1.06} B_T^{0.32} P_{L'}^{-0.67} M^{0.41} R^{1.79} \kappa^{0.66} (a/R)^{-0.11} n_e^{0.17} \quad (3)$$

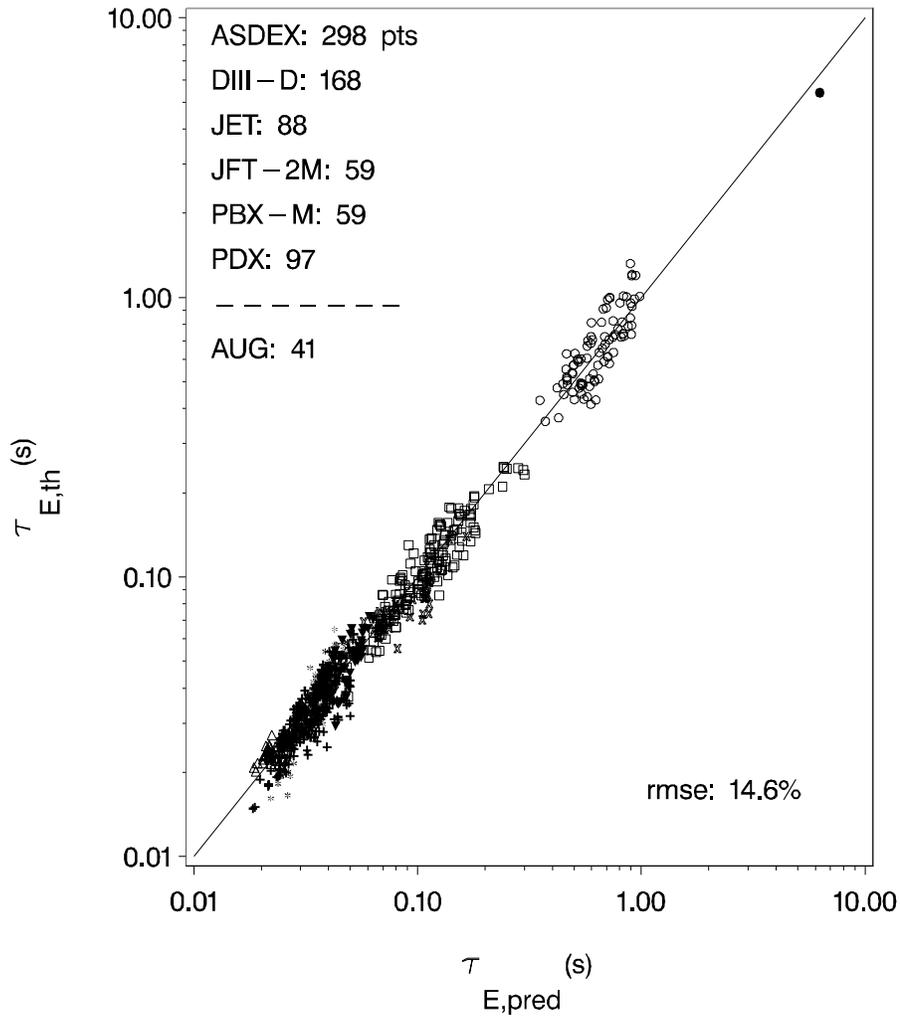
für die ELM-freien Entladungen ([19]).

ELM’s, eine Abkürzung von ‘Edge Localized Modes’, sind Instabilitäten am Plasmarand, die die Plasmaenergie und dadurch auch die Einschlußzeit verringern. Sie können sich, durch ihren positiven Einfluß auf die Stationarität der Entladung, im ITER als nützlich erweisen. Deswegen wurden die Skalierungen für ELMy und ELM-freien Entladungen gesondert gemacht.

Abbildung 5 zeigt die beobachteten gegen die aufgrund der ITERH92-P(y)-Skalierung vorhergesagten thermischen Energien für ELMy-Entladungen der 6 Tokamaks, die zur ITERH92 beigetragen haben, als auch die eines zusätzlichen Tokamaks (AUG), der nach Herleitung der Skalierung in Betrieb gegangen ist.

## ITERH92 – P(y) Scaling

$$0.034 I_p^{0.9} B_T^{0.05} P_L^{-0.65} M^{0.4} R^{2.1} \kappa^{0.8} (a/R)^{0.2} n_e^{0.3}$$



TOK    + + + ASDEX    x x x AUG    □ □ □ D3D    ○ ○ ○ JET  
          △ △ △ JFT2M    ▼ ▼ ▼ PBXM    \* \* \* PDX    ● ● ● P\_ITER

Abbildung 5: Einfaches Potenzgesetz (log-lineare Skalierung), ITERH92-P(y), hergeleitet aufgrund der Daten von den ersten 6 im Bild genannten Tokamaks. Die beobachtete Einschlußzeit von 7 Tokamaks ist gegen die vorhergesagte Einschlußzeit aufgetragen. Der Punkt rechts oben zeigt die erforderliche gegen die vorhergesagte Einschlußzeit von ITER.

### Log-lineare Interaktionsmodelle

Obwohl einfache Potenzgesetze eine vernünftige erste Näherung der Einschlußzeit-Skalierung darstellen, sind auch einige interessante und statistisch signifikante Interaktionseffekte gefunden worden ([9], [19]).

Zum Beispiel gibt es für ELM-freie Entladungen eine Interaktion zwischen der Isotopenmasse  $M$  und der Heizleistung pro Teilchen  $P_{L'}/n_e V$ , die sich in einem Kreuzterm  $(+0.25 \pm 0.08) \log M \log(P_{L'}/n_e V)$  äußert. Abbildung 6 zeigt eine graphische Interpretation dieser Interaktion: der effektive Isotopenexponent steigt mit zunehmender Heizleistung pro Teilchen, so daß für JET, den Tokamak mit den kleinsten Werten von  $P_{L'}/n_e V$ , fast kein Isotopeneffekt gefunden wird, und für ASDEX, wo  $P_{L'}/n_e V$  groß ist, der effektive Isotopenexponent etwa 0.5 ist. Dieses ist im Einklang mit bisherigen experimentellen Beobachtungen an diesen beiden Experimenten.

### Log-nichtlineare zwei-Term Modelle

Oft wird folgendes log-nichtlineares Modell für den thermischen Plasmaenergieinhalt benutzt:

$$Y = W_0 + W_l + E = a_0 I_p^{a_I} \dots P^{a_P} + b_0 I_p^{b_I} \dots P^{b_P} + E, \quad (4)$$

welches eine Summe von zwei einfachen Potenzgesetzen ist. Üblicherweise wird  $a_P = 0$  und  $b_P = 1$  gesetzt. Daher stammt die (ältere) Bezeichnung 'offset-linear scaling'. Für eine physikalische Motivation von Anpassung solcher Modelle, siehe [1], [12]. Ein wichtiges Problem bei der Anpassung von (4) ist die Anzahl der Regressionsparameter: bei den 6 vorhandenen Tokamaks enthält dieses Modell 8 geometrische Parameter (die Konstanten  $a, b$  und zweimal die Exponenten von  $R, \kappa$  und  $\epsilon$ ).

Abbildung 7 zeigt die unter Verwendung von der SAS/NLIN-Prozedur geschätzten Regressionsparameter des Modells (4) angepaßt an die ELM-freien Entladungen des Standard-Datensatzes. Die grauen Zonen stellen plus/minus 2 geschätzten Standardabweichungen dar. Die Linien geben die Punktschätzungen wieder, wenn die (beiden) Aspektverhältnis-Koeffizienten jeweils um einen Standardwert variieren. Als Standardwerte sind die Aspektverhältnisexponenten der im Histogramm dargestellten OL-95 Skalierung ([13]) genommen worden.

## **Diskriminanzanalyse für L- und H-Mode**

Zusätzlich zur Frage der Skalierung der Energieeinschlußzeit in der H-Mode, ist es von Bedeutung zu wissen, in welchem Plasmaparameter-Regime die H-Mode (vorzugsweise mit einem günstigen ELM-Typ) überhaupt erreicht werden kann.

Seit 1992 wird dieses Problem unter anderem mit Hilfe von Diskriminanzanalyse untersucht, s. [10], [11], [18].

Die Selektionskriterien für einen standardisierten Datensatz sind (auch hier) recht kompliziert, weil viele Faktoren einen Einfluß darauf haben ob (und bei welcher Heizleistung) man die H-Mode erreicht. Auch die Klassifikation von den verschiedenen ELM-Typen und mitunter sogar der Unterschied zwischen ELMy H-Mode und L-Mode ist nicht ganz leicht festzustellen.

In [11] wurden theoretische und praktische Aspekte der linearen, quadratischen, und nicht-parametrischen Diskriminanzanalyse in diesem Zusammenhang dargestellt. Abbildung 8 zeigt exemplarisch einen zweidimensionalen Schnitt von Ellipsen, die zwei Datengruppen appro-

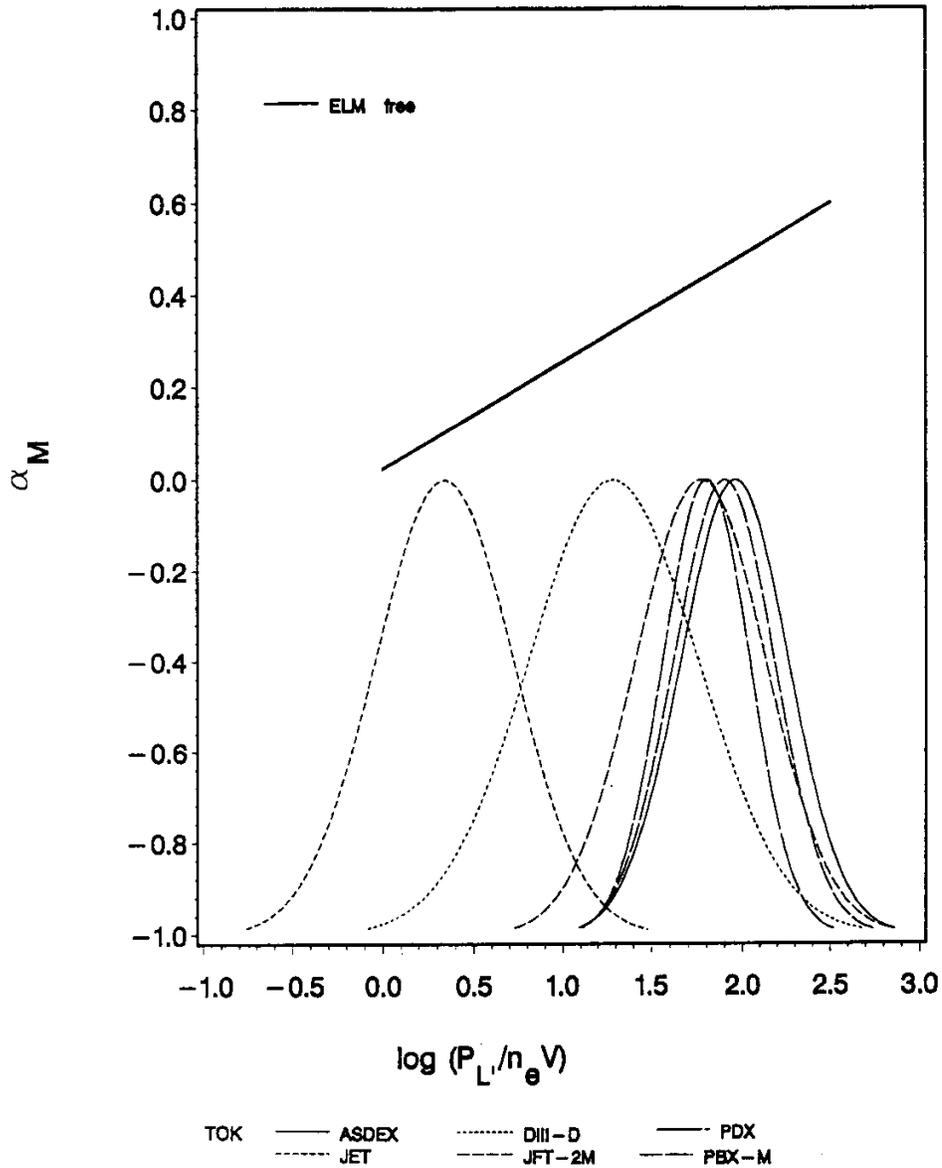


Abbildung 6: Variation des effektiven Isotopenexponenten  $\alpha_M$  mit  $\log P_L/n_e V$ , nach einem Interaktionsmodell angepaßt an den ELM-freien Standard-Datensatz. Die Gaußschen Anpassungen beschreiben näherungsweise die empirischen Verteilungen der Heizleistungen pro Teilchen der verschiedenen Tokamaks. Der Nullpunkt auf der horizontalen Achse entspricht den Werten:  $P_L = 200 \text{ MW}$ ,  $n_e = 12.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$  und  $V = 1200 \text{ m}^3$ . Das Bild ist [9] entnommen.

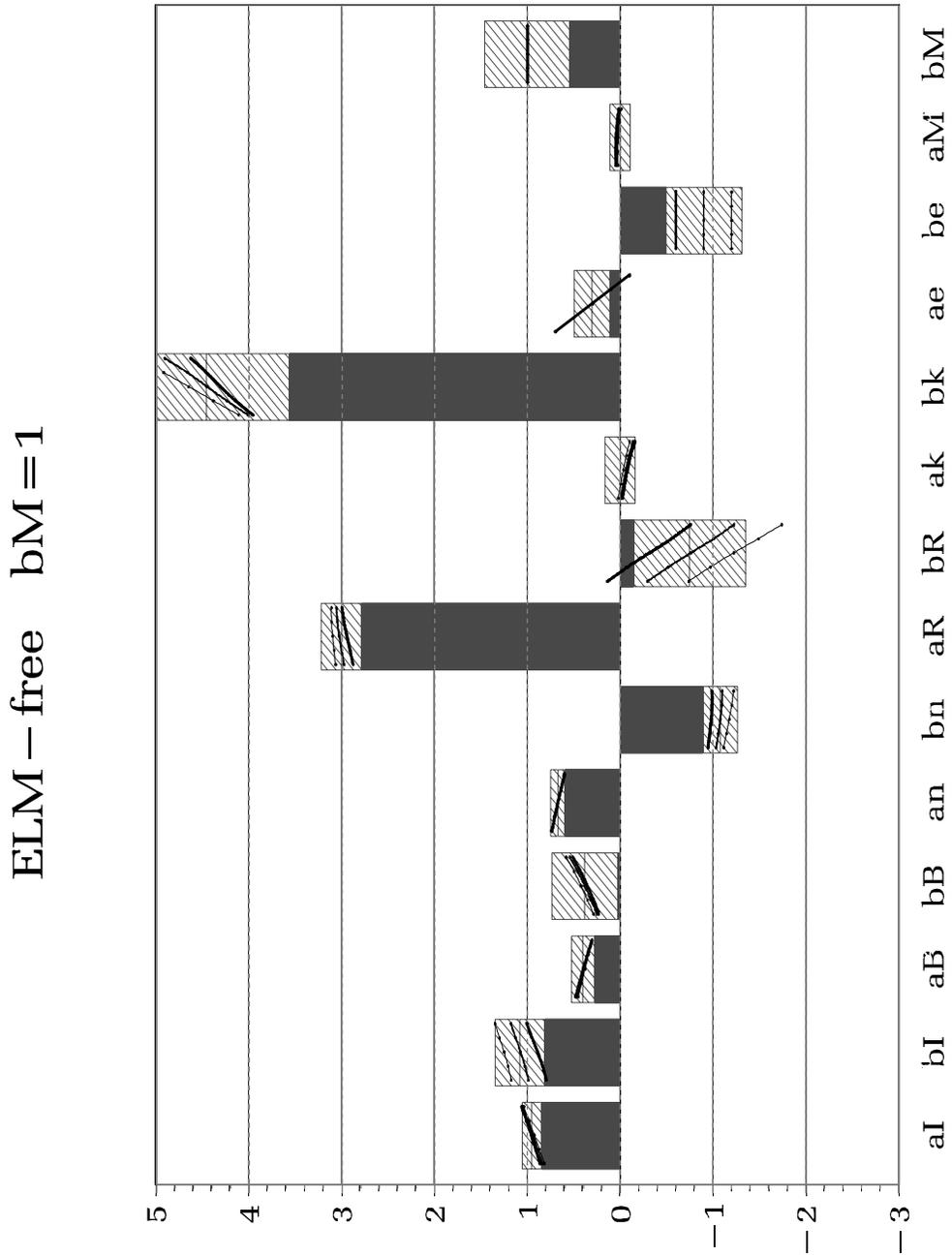


Abbildung 7: Geschätzte Exponenten einer log-nichtlinearen Skalierung (OL-95) mit geschätzten 95%-Konfidenzintervallen (unter der Voraussetzung, daß die benutzte Modellklasse richtig ist), und die Sensitivität der Exponenten bezüglich der Variation der nicht-indentifizierbaren Aspektverhältnis-Koeffizienten. Der Isotopeneffekt des zweiten Terms ist auf 1 festgesetzt worden.

ximieren, als auch von hyperbolischen Trennflächen quadratischer Diskriminanzanalyse. Der eigentliche Parameterraum hat 8 Dimensionen, was eine nichtparametrische Diskriminanzanalyse der Daten erschwert.

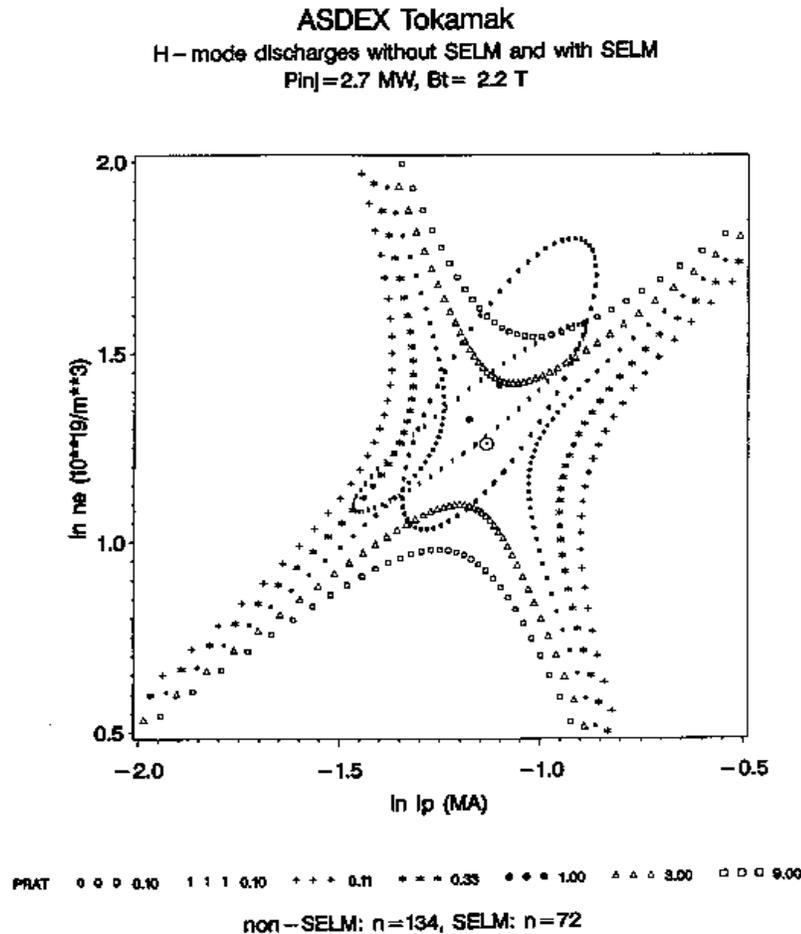


Abbildung 8: Schnitte mehrdimensionaler hyperbolischer Trennflächen für ASDEX Entladungen, basierend auf quadratischer Diskriminanzanalyse von zwei Typen ELM-behafteter Entladungen. Die Ellipsen sind Schnitte den (nicht gezeigten) Daten angepaßter mehrdimensionaler Ellipsen. Das Bild ist [10] entnommen.

## Analyse von Plasmaprofilen

Detailliertere Informationen als die globale Energieeinschlußzeit, oder der gesamte Energieinhalt, werden durch gemessene Dichte- und Temperaturprofile des Plasmas geliefert. Auch hier ist es wichtig eine Vorhersage der Profilform für ITER machen zu können. Man kann diese aufgrund von plasmaphysikalischen Theorien numerisch berechnen, vorausgesetzt, man weiß wie die Energietransportkoeffizienten von den lokalen Plasmavariablen (wie z. B. Stromdichte, Plasmadichte und Plasmatemperatur) abhängen.

Ein anderer Zugang ist es, empirische Profilanalyse als Erweiterung von globaler Einschluß-

zeit-Analyse durchzuführen. Die grundlegende Theorie ist in [7] und [8] dargestellt worden. Praktische Anwendung auf ASDEX-Daten ist in [7] und ausführlicher in [17] beschrieben. Eine semiparametrische Profilanalyse, angewandt auf JET-Daten, ist in [4] zu finden.

Abbildung 9 zeigt ein aufgrund multivariater Analyse (eines Datensatzes mit etwa 40 Profilen) vorhergesagtes Temperaturprofil ([17]), und die bei den vorgegebenen globalen Plasma-Variablen gemachten Temperaturmessungen. Die multivariate Analyse wurde mit PROC REG unter Verwendung von selbst entwickelten SAS-Macros durchgeführt.

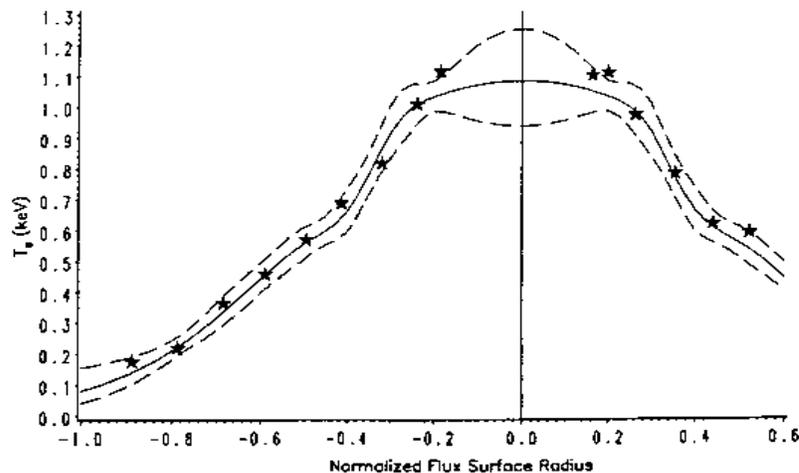


Abbildung 9: Das gemessene und vorhergesagte Temperaturprofil mit 95% Konfidenzbänder für vorgegebene Plasma-Strom, Magnetfeld und Dichte. Das Bild ist [17] entnommen.

## Weitere Anwendungen

In diesem Text haben wir SAS-Anwendungen beschrieben, die am Max-Planck-Institut für Plasmaphysik im Rahmen des ITER-Projekts ausgeführt worden sind. Einige weitere Anwendungen, im Rahmen des ASDEX-Upgrade Projekts, sind kurz und exemplarisch in [15] dargestellt worden. Außer am IPP, wird SAS an anderen plasmaphysikalischen Instituten, z. B. am gemeinsamen europäischen Projekt JET, an den japanischen Experimenten JT-60 und JFT-2M, und im ITER Co-Center in Garching benutzt.

## Schlußbemerkung

Obwohl SAS bei der Datenanalyse in der fusionsorientierten Plasmaphysik vielseitig eingesetzt wird, gibt es auch statistische Regressionsprobleme ([14]), die die Kapazitäten von SAS übersteigen. In solchen Fällen wird am IPP das S-PLUS Programmpaket in Zusammenhang mit Mathematica und Fortran-90 benutzt.

## Danksagung

Wir danken Herrn Prof. F. Wagner und Herrn Dr. U. Stroth für die kritische Durchsicht des Textes.

## Literatur

- [1] Christiansen, J.P. et al., Global Energy Confinement H-Mode Database for ITER, *Nuclear Fusion* 32 (1992) 291-338 (special topic).
- [2] Dorland, W. and Kotschenreuther, M. (1995), Pitfalls of 0-D Scalings, in: Material presented at the 3<sup>rd</sup> ITER Confinement Database and Modeling Workshop, Naka, Japan.
- [3] Erckmann, V. et al., H-Mode of the W7-AS Stellarator, *Phys. Rev. Lett.* 70 (1993) 2086-2089.
- [4] Imre, K., Riedel, K.S. and Schunke, B., A Hierarchy of Empirical Models of Plasma Profiles and Transport, *Physics of Plasmas* 2 (1995) 1614-1622.
- [5] IPP-Team (Redaktion: I. Milch) (1995), *Berichte aus der Forschung, Folge 1: Kernfusion*, Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Garching.
- [6] IPP-Jahresbericht 1997, Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Garching.
- [7] Kardaun, O.J.W.F., McCarthy, P.J., Lackner, K., Riedel, K., Gruber, O. (1987), A Statistical Approach to Profile Invariance, in: *Theory of Fusion Plasmas (International School of Plasma Physics Piero Caldirola)*, 435-444, Bondeson, A., Sindoni, E., Troyon, F. (Ed.), Editrice Compositori Bologna.
- [8] Kardaun, O.J.W.F., Riedel, K.S., McCarthy, P.J., Lackner, K. (1990), A Statistical Approach to Plasma Profile Analysis, IPP-Report 5/35.
- [9] Kardaun, O.J.W.F. and the H-Mode Database Working Group (1992), ITER: Analysis of the H-Mode Confinement and Threshold Databases, in: *Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research (Proc. 14<sup>th</sup> Int. Conf. Würzburg, 1992)*, Vol. 3, IAEA, Vienna (1993) 251-270.
- [10] Kardaun, O.J.W.F., Kardaun, J.W.P.F., Itoh, S.-I., Itoh, K. (1992), Discriminant Analysis of Plasma Fusion Data, in: *Computational Statistics*, Vol. 1 of Proceedings of the 10<sup>th</sup> Symposium on Computational Statistics, 163-170, Dodge, Y. and Whittaker, J., (Ed.), Physica-Verlag, Heidelberg.
- [11] Kardaun, O.J.W.F., Itoh, S.-I., Itoh, K., Kardaun, J.W.P.F. (1993), Discriminant Analysis to predict the Occurrence of ELMs in H-Mode Discharges, NIFS-Report 242.
- [12] Kardaun, O.J.W.F. and the H-Mode Database Working Group (1994), Offset-Linear Scalings Based on the ITER H-Mode Confinement Database, in: *Contr. Fusion and Plasma Physics (Proc. 21<sup>th</sup> Eur. Conf., Montpellier, 1994)*, Vol. 18B, Part I, European Physical Society, 90-94.
- [13] Kardaun, O.J.W.F., Kus, A., H-Mode Database Working Group (1996), Global Energy Confinement Analysis, in: Material presented at the 4<sup>th</sup> ITER Confinement Database and Modeling Workshop, Moscow, Russia.
- [14] Kardaun, O.J.W.F., Kus, A., H- and L-Mode Database Working Group (1996), Generalising Regression and Discriminant Analysis: Catastrophe Models for Plasma Confinement and Threshold Data, in: *Proceedings in Computational Statistics XII*, 313-318, Prat, A., (Ed.), Physica-Verlag, Heidelberg.

- [15] Kardaun, O.J.W.F. and Kus, A. (1996), Basic Probability Theory and Statistics for Experimental Plasma Physics, IPP-Report 5/68, Garching.
- [16] Kaye, S.M. and Goldston, R.J., Global Energy Confinement Scaling for Neutral-Beam-Heated Tokamaks, Nuclear Fusion 25 (1983) 65-69.
- [17] McCarthy, P.J. (1992), *An Integrated Data Interpretation System for Tokamak Discharges*, Ph.D. Thesis, University College, Cork.
- [18] Ryter, F. and the H-Mode Database Working Group, H-Mode Power Threshold Database for ITER, Nuclear Fusion 36 (1996) 1217-1264 (special topic).
- [19] Schissel, D. and the H-Mode Database Working Group (1993), Analysis of the ITER H-Mode Confinement Database, in: Contr. Fusion and Plasma Physics, (Proc 20<sup>th</sup> Eur. Conf. Lisbon, 1993), Vol. 17C, Part I, European Physical Society, 103-106.
- [20] Thomsen, K. and the H-Mode Database Working Group, ITER H-Mode Confinement Database Update, Nuclear Fusion 34 (1994) 131-167 (special topic).
- [21] Wagner, F. et al., Regime of Improved Confinement and High Beta in Neutral-Beam-Heated Divertor Discharges of the ASDEX Tokamak, Phys. Rev. Letter. 49 (1982) 1408-1412.
- [22] Yushmanov, P.N. et al., Scalings for Tokamak Energy Confinement, Nuclear Fusion 30 (1990) 1999-2008.

*Original Text: Garching, Febr. 1997, 1. KSFE, Berlin*

Revision: none (text in this font).

## COPYRIGHT AND DISCLAIMER NOTICE

This document is an IPP Internet Report which is copy-righted by IPP Garching.

This implies that it

- . is provided without any expressed or implied warranty;
- . may be freely distributed in its entirety without modification provided that the IPP copyright footnote and disclaimer notice are not removed;
- . may not be incorporated in publications without the prior written permission of the copyright holder.