



Forschungszentrum Karlsruhe
in der Helmholtz-Gemeinschaft

Wissenschaftliche Berichte
FZKA 7335

Jahresbericht 2006
Institut für
Hochleistungsimpuls- und
Mikrowellentechnik

M. Thumm

Institut für Hochleistungsimpuls- und
Mikrowellentechnik

März 2007

Forschungszentrum Karlsruhe

in der Helmholtz-Gemeinschaft

Wissenschaftliche Berichte

FZKA 7335

Jahresbericht 2006 des Institutes für Hochleistungsimpuls- und Mikrowellentechnik

Redaktion: M. Thumm
Institut für Hochleistungsimpuls-
und Mikrowellentechnik

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe
2007

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe

Mitglied der Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft
Deutscher Forschungszentren (HGF)

ISSN 0947-8620

ISSN 1860-8310

urn:nbn:de:0005-073356

Institut für Hochleistungsimpuls- und Mikrowellentechnik (IHM)

Leitung: Prof. Dr. Dr. h.c. M. Thumm

Zentrale Arbeitsgebiete des Institut für Hochleistungsimpuls- und Mikrowellentechnik (IHM) sind die Forschung, Entwicklung, Ausbildung und, in Zusammenarbeit mit der Stabsabteilung Marketing, Patente und Lizenzen (MAP) und industriellen Partnern, der Technologietransfer auf den Gebieten der Impuls- und Mikrowellentechnik bei hohen Leistungen. In diesem Zusammenhang werden folgende Aufgabengebiete bearbeitet: Theoretische und experimentelle Grundlagen der Hochleistungsimpuls- und Mikrowellentechnik; Theorie und Praxis der Erzeugung intensiver Elektronenstrahlen, starker elektromagnetischer Felder und Wellen und ihrer Wechselwirkung mit Materialien und Plasmen; Anwendung dieser Verfahren bei der Energiegewinnung durch kontrollierte thermonukleare Fusion in magnetisch eingeschlossenen Plasmen, der Material-Prozesstechnik und der Umwelttechnik. Die Arbeiten in beiden Abteilungen erfordern die Anwendung moderner Hochspannungstechnik und Hochspannungsmesstechnik. In Kurzform stellt sich das derzeitige Institutsprogramm wie folgt dar:

Abteilung für Hochleistungsimpulstechnik:

- Aufschluss von biologischen Zellen mit gepulsten elektrischen Feldern bei Feldstärken im Bereich 10^6 - 10^7 V/m (Elektroporation), z.B. bei der Gewinnung von Zucker aus Zuckerrüben (KEA-Verfahren). Hier konnte der erhebliche wirtschaftliche Vorteil dieses Verfahrens gegenüber konventionellen thermischen Aufschlussverfahren in der Nahrungsmittelindustrie bestätigt werden. Gepulste elektrische Felder sollen auch zur umweltschonenden Keimreduktion in Abwässern aus Kläranlagen und zur Unterstützung der mechanischen Entwässerung und Trocknung von Energiepflanzen für die weitere energetische Verwertung eingesetzt werden (Programm UMWELT und MAP).
- Oberflächenvergütung und Korrosionsschutz von Metallen und Legierungen mit großflächigen gepulsten, hochenergetischen Elektronenstrahlen (GESA-Technik). Durch Einlegieren von Aluminium in Stahl und Umschmelzen von FeCrAlY-Oberflächen mit Hilfe der GESA-Technik konnte ein wirksamer Langzeitschutz gegen Korrosionsangriff in Pb/Bi-gekühlten Reaktorsystemen bei Temperaturen bis zu 650 °C erreicht werden. Die GESA IV-Anlage erlaubt die Außenbehandlung von Rohren (Programm NUKLEAR). Im Rahmen des EU-Projekts ASTERIXE (Advanced Surface Technology for Extended Resistance In eXtreme Environment) wird diese Methode zur Oberflächenvergütung von Materialien für den Einsatz unter extremen Bedingungen fortentwickelt (Programm UMWELT).
- Elektrodynamische Fragmentierung (FRANKA-Verfahren) zur Wiederverwertung von Feststoffen wie Altbeton und anderen Baustoffen sowie zum Recycling von Werkstoffverbänden, zur Aufbereitung von Mineralien und zum Abtragen und Bohren von Gestein (Programm UMWELT).

Abteilung für Hochleistungsmikrowellentechnik:

- Planung, Aufbau und Test des gesamten 10 MW, 140 GHz Elektronen-Zyklotron-Resonanz-Heizsystems (ECRH) für den Dauerbetrieb (CW) am neuen Stellarator W7-X des IPP Greifswald. Insbesondere wurde hierbei in Zusammenarbeit mit dem CRPP Lausanne und der Fa. Thales Electron Devices (TED) in Paris eine 1 MW, 140 GHz, CW Gyrotronröhre und mit dem IPF der Universität Stuttgart das quasi-optische Übertragungssystem entwickelt. Die erste Serienröhre liefert Weltrekord-Langpulsparameter mit nahezu 1 MW Leistung bei 30 min. Pulslängen und einem Wirkungsgrad von fast 45% (Programm FUSION).

- Entwicklung und Test von 2 MW, 170 GHz Gyrotronröhren mit koaxialen Resonator und stufenweise frequenzdurchstimmbaren 1 MW Gyrotronröhren (105-140 GHz), einschließlich der randgekühlten Mikrowellen-Vakuumfenster aus synthetischem Diamant, für ECRH-Anlagen an Tokamak-Großexperimenten (ITER, ASDEX Upgrade). Das koaxiale Gyrotron hält mit 2,2 MW den Leistungsweltrekord. Zur Zeit wird in Zusammenarbeit mit CRPP und TED eine Prototypröhre für das europäische 2 MW, 170 GHz ITER-Gyrotron mit koaxialen Resonator entwickelt (Programm FUSION).
- Experimentelle und theoretische Untersuchungen zum Verhalten der ersten Wand und des Divertors von Tokamak-Fusionsreaktoren bei Plasmaintabilitäten (Programm FUSION).
- Sintern von fortschrittlichen Funktions- und Strukturkeramiken, insbesondere von nanostrukturierten Keramiken und Metallpulvern und Prozesstechnik in der Nanomineralogie mittels Hochleistungsmillimeterwellen bei einer Frequenz von 30 GHz. In grundlegenden Experimenten konnte erstmals direkt ein nicht-thermischer Mikrowelleneffekt nachgewiesen werden (Programm NANOMIKRO).

- Systemstudien zu Mikrowellen-Applikatoren für verschiedenste Anwendungen bei den ISM (Industrial, Scientific, Medical)-Frequenzen 0,915 GHz, 2,45 GHz und 5,8 GHz, wie z.B. zur Herstellung von Flugzeugbauteilen aus Kohlefaserverbundwerkstoffen mittels Mikrowellenprozesstechnik bei 2,45 GHz. Mit der neuen HEPHAISTOS-CA2-Anlage wurden gegenüber der herkömmlichen Herstellung in Autoklaven wesentlich verkürzte Prozessierungszeiten bei leicht verbesserten Materialparameter erreicht (Programm UMWELT und MAP).

Zur Bearbeitung dieser theoretischen und experimentellen Themen stehen ein Workstation-Verbund und zahlreiche Experimentieranlagen zur Verfügung: vier FRANKA-Anlagen, KEA, KEA-ZAR, drei GESA-Anlagen, zwei Gyrotron-Teststände mit einer gemeinsamen Mikrowellen-Messkabine, eine Kompakt-Technologie-Gyrotron-Anlage (30 GHz, 15 kW) verschiedene 2,45 GHz-Applikatoren der HEPHAISTOS-Serie und eine 0,915 GHz, 60 kW Magnetron-Anlage.

Mit der Universität Karlsruhe und zahlreichen Universitäten und Forschungsinstituten des In- und Auslandes gibt es intensive, fruchtbare Kooperationen. Dabei besteht besonders mit der Universität Karlsruhe vor allem auch im Bereich der Ausbildung von Diplomanden und Doktoranden eine sehr enge Zusammenarbeit. Dies zeigt sich in formaler Weise schon dadurch, dass

- der Institutsleiter des IHM auch Professor am Institut für Höchstfrequenztechnik und Elektronik (IHE) in der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Universität Karlsruhe ist und auch eine Vorlesung im International Department der Fakultät hält.

Zum Jahresende waren am Institut 38 Mitarbeiter/innen beschäftigt, darunter 18 Akademiker/innen, 4 Ingenieure und 16 Sonstige Mitarbeiter/innen, davon 1 Halbtagskraft.

Wie oben erwähnt, ist ein Akademiker der Universität Karlsruhe Mitarbeiter des Instituts. Zusätzlich wurden 11 Akademiker, 3 Ingenieure und 8 Sonstige Mitarbeiter/innen aus Fremdmitteln finanziert. Für Technologie-Transfer-Projekte war ferner 1 Techniker dem Institut zugeteilt.

Im Verlaufe des Jahres 2006 waren an den Arbeiten des Instituts insgesamt 10 Gastwissenschaftler, 11 Doktoranden/innen (6 vom Forschungszentrum, 5 von der Universität Karlsruhe), 2 Diplomanden/innen, 1 BA-Student, 5 Praktikanten/innen und 8 Auszubildende beteiligt.

FUSION: Programm Kernfusion

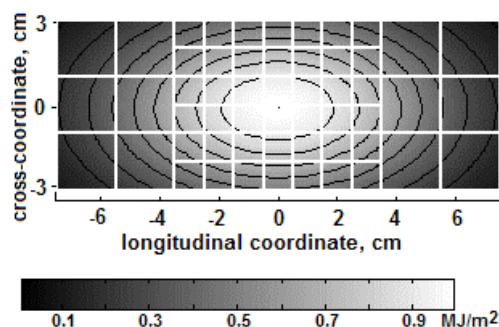
Hochbelastbare Komponenten und Versuchseinrichtungen

Zur Demonstration der Energieerzeugung durch thermonukleare Fusion mit dem zukünftigen Tokamak-Reaktor ITER ist der ELMy H-Modus die bevorzugte Betriebsweise. Dabei können jedoch instabile Zustände auftreten: entweder Plasmazusammenbrüche mit vollständiger Zerstörung des eingeschlossenen Plasmas, oder sogenannte ELM-Ereignisse (Edge Localized Modes), bei denen nur die Plasmaperipherie beschädigt wird. Bei Zusammenbrüchen erreichen die Leistungen Q an der Wand bis zu 30 MJ/m^2 und die Ereigniszeiten τ sind bis zu 10 ms. Für ELM Ereignisse werden am Divertor und anderen Wandflächen Leistungen von etwa $0.5 - 4 \text{ MJ/m}^2$ mit Dauern τ von $0.3 - 0.6 \text{ ms}$ und Wiederholfrquenzen von 1 bis 100 Hz erwartet. Nach solchen Transienten können die ITER Divertorschutzplatten stark beschädigt werden. Die daraus resultierende Erosion wird dominiert durch Verdampfung und Rissbildung bei kohlefaserverstärkten Schutzschichten (CFC), die in der Separatrix-Stoßpunkt Umgebung zum Einsatz kommen sollen, oder durch Schmelzen der metallischen Schutzschichten aus Wolfram, das für den Divertor vorgesehen sind.

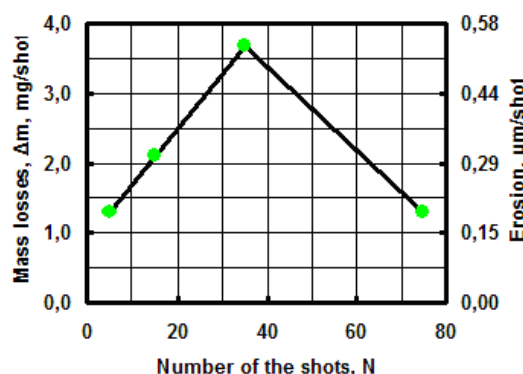
Zur Untersuchung der Erosionsmechanismen bei kohleverstärkte Schutzschichten (CFC NB31) und bei in der EU (Plansee AG, Österreich) hergestellten Wolframtargets unter ITER-relevanten Bedingungen gab es in 2006 weitere Aktivitäten in der Zusammenarbeit von FZK (numerischen Simulationen), TRINITI (Experimente an der QSPA-Anlage zur Validierung der FZK-Codes), und FZ-Jülich (Analyse der am QSPA eingesetzten Materialproben). Am FZK wurde außerdem auch Beryllium rechnerisch untersucht, ein Kandidatenmaterial für die Blanket-Module in der Hauptkammerwand von ITER. Die FZK Arbeiten wurden im Rahmen der EFDA-Tasks TW3-TPP/MATDAM, TW5-TPP/ITERTRAN und TW5-TPP/BEDAM durchgeführt.

Zur Modellierung der Zerstörungen an Wolfram- und Berylliumoberflächen wurde der Schmelzbewegungscode MEMOS eingesetzt. Für Rissbildung der Wolframoberflächen wurde ein neues Modell entwickelt und in den thermomechanischen Code PEGASUS implementiert. Zur Simulation der Zerstörungen von CFC wurde der Code PHEMOBRID eingesetzt, der auf der wohlbekanntem Rissbildungsschwellenenergie von 10 kJ/g beruht. Der wesentliche Mechanismus der Tropfenbildung – die Ausdehnung der Oberflächenwellen durch die vom auftreffenden Plasma induzierten Instabilitäten - wurde analysiert. Für dreidimensionale Simulationen bei CFC und Wolfram wurden die Codes signifikant verbessert und mit QSPA-Experimenten validiert.

QSPA Experimente: Der Einsatzbereich von QSPA umfasst eine Maximalleistung von 1.5 MJ/m^2 unter einem Plasmaeinfallswinkel von 60° , mit Pulsdauern von 0.5 ms . Auf 500°C vorgeheizte CFC- und Wolframtargets wurden jeweils 100 Pulsen ausgesetzt. Die absorbierte Energiedichte Q_a wurde mit einem zweidimensionalem Multikanalorimeter genau vermessen (Abbildung). Zur Untersuchung der Materialverluste wurde das Oberflächenprofil mit einem Laser-Profilometer ermittelt. Für die CFC-Proben wurden die größten Massenverluste für $Q_a > 1.3 \text{ MJ/m}^2$ beobachtet (Abbildung).



Die Energiedichte Q_a auf einer CFC Oberfläche am QSPA.

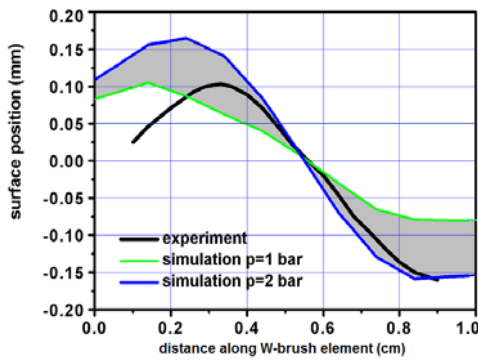


Massenverlust in der CFC-Probe und zugehörige Erosionsrate als Funktion der Pulszahl bei $Q_a = 1.4 \text{ MJ/m}^2$ am QSPA.

Die Erosion wurde hauptsächlich durch die PAN-Fasern bestimmt. Basierend auf elektronenmikroskopischen Untersuchungen wurde eine geringe Erosion für $Q_a > 0.5 \text{ MJ/m}^2$ beobachtet, und zwar nahe der plasmaseitigen Ecken der Kacheln.

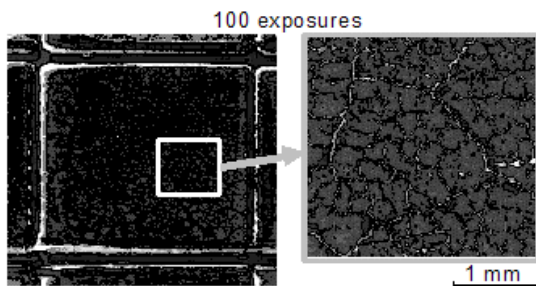
Für Wolframtargets ist die Erosion hauptsächlich durch Bewegung in der Schmelzschicht und durch Ejektion von Tröpfchen bestimmt. Der Schmelzbeginn wurde bei $Q_a > 0.4 \text{ MJ/m}^2$ an den plasmazugewandten Kanten der Kacheln beobachtet. Bei $Q_a < 1.3 \text{ MJ/m}^2$ ist das Schmelzen auf der gesamten Oberfläche entwickelt, und bei größerem Q_a beginnt die Schmelze, Brücken zwischen den Kacheln zu bilden. Tröpfchenejektion wurde ab $Q_a > 1.3 \text{ MJ/m}^2$ beobachtet. Die durchschnittliche Erosion pro Schuss betrug $0.06 \mu\text{m}$. Der Hauptmechanismus für den Massenverlust bei Wolfram ist Tröpfchenejektion.

MEMOS-Ergebnisse: Dieser Code wurde hauptsächlich zur Abschätzung der Schmelzerosion bei ITER (W und Be) und bei QSPA-Experimenten benutzt. Der Code wurde neuerdings auf dreidimensionale Geometrie erweitert, wodurch nunmehr sowohl Kanteneffekte als auch realistische Oberflächenverteilungen der Wärmebelastung berücksichtigt werden können. Die Rechnungen für die Schmelzschwelle für Wolfram zeigen ausreichende Übereinstimmung mit den QSPA-Experimenten. Die Simulationen zeigten einen Schmelzbeginn an den Bürstenkanten bei $Q_a > 0.7 \text{ MJ/m}^2$, und ein Schmelzen der Bürstenoberfläche bei $Q_a > 1 \text{ MJ/m}^2$. Die typische Dicke der Schmelzschicht an den Kantenoberflächen beträgt bis zu $40 \mu\text{m}$. Die berechneten Erosionprofile durch Verdampfung sind in Übereinstimmung mit den Experimenten (Abbildung).



Vergleich von gemessenen und berechneten W-Bürstenprofilen entlang der Oberfläche nach 100 Schüssen bei $Q = 1.5 \text{ MJ/m}^2$.

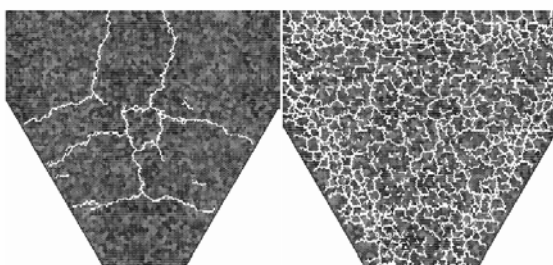
QSPA und PEGASUS Ergebnisse für Rissbildung bei Wolfram: Rissbildung auf Wolframoberflächen wurde bei $Q_a > 0.8 \text{ MJ/m}^2$ beobachtet (Abbildung).



Bilder einer W-Kacheloberfläche bei $Q_a = 0.9 \text{ MJ/m}^2$.

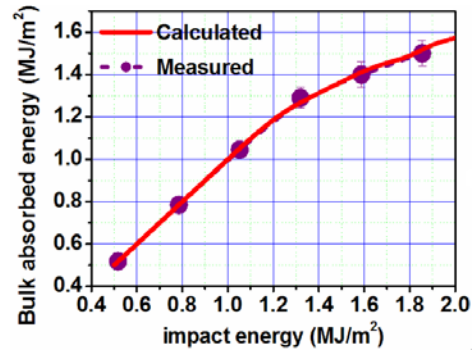
Es gab zwei Typen von Rissen, die überlappende Gitter auf der Oberfläche bilden. Risse vom Typ 1 besitzen eine charakteristische Zellengröße von ungefähr 0.1 cm und erscheinen nach zwanzig Pulsen. Die Zellengröße von Typ 2 Rissen ist mit 200-300 μm eine Größenordnung kleiner; sie erscheinen nach 50 Pulsen. Die post-mortem metallographische Analyse ergab eine Risstiefe von etwa 500 μm bei Typ 1 und 50 μm bei Typ 2.

Zur Erklärung der experimentellen Ergebnisse wurde am FZK ein neues Rissbildungsmodell entwickelt. Von der Oberfläche in die Tiefe ausgehende Risse entstehen prinzipiell durch eine Wärmespannung σ_c , die in einer dünnen, wieder erstarrten Schmelze nach schnellem Abkühlen entsteht. Das Szenario für die Rissbildung ist wie folgt: Anfänglich wird die Oberfläche schnell auf Temperaturen oberhalb der Schmelztemperatur erhitzt. Deswegen gerät die feste Masse unter Spannung, aber die Schmelzschicht und die anschließend wieder erstarrte Schicht sind spannungsfrei. Später sinkt die Oberflächentemperatur, was zu einem Anstieg der Spannung σ_c führt. Wenn σ_c die Reißgrenz σ_T überschreitet, erscheinen große Risse, die σ_c signifikant verringern. Weitere Abkühlung erhöht jedoch den Thermostress wieder, und zwar möglicherweise erneut über σ_T hinaus, wodurch neue Risse mit geringerer Tiefe entstehen. Nach dem Einbau dieses Modells in PEGASUS ergaben sich ähnliche Rissmuster wie bei den Experimenten (Abbildung).



PEGASUS-Simulation von Rissen an einer W-Oberfläche (links bei 500 μm Tiefe, rechts an der Oberfläche).

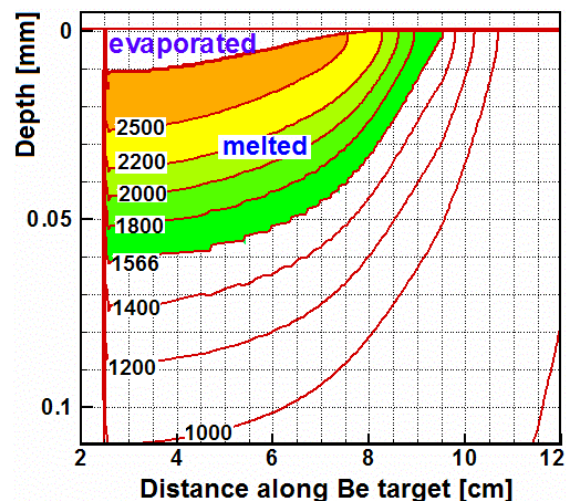
PHEMOBRID Ergebnisse: Der Code wurde mit den Ergebnissen der Plasmakanonenanlage QSPA validiert und für Vorhersagen der Rissbildung von CFC bei Plasmaströmen, wie sie in ITER erwartet werden, eingesetzt. Eine signifikante Erosion der Bürstenkanten und Langbündel bei $Q > 0.7 \text{ MJ/m}^2$ und der Querbündel bei $Q > 1.3 \text{ MJ/m}^2$ wurde nachgewiesen. Der Effekt der Dampfschichtabschirmung wurde phänomenologisch einbezogen, was eine gute Anpassung an die Messwerte erlaubte. Die Abhängigkeit der absorbierten Energie Q_a von der einfallenden Energie Q stimmt gut mit den QSPA-Messungen überein (Abbildung).



Abhängigkeit der absorbierten Energie Q_a von der einfallenden Energie Q ; Rechnung mit PHEMOBRID, Messung am QSPA.

Tropfenerosion: Eine frühere Abschätzung für Tropfenerosion an Wolframoberflächen wurde signifikant verfeinert. Im Falle schwacher ELMs produziert ein unter kleinem Winkel von 2 bis 5 Grad einfallender Plasmaström Kelvin-Helmholtz, Rayleigh-Taylor oder Kapillarwellen- Instabilitäten der Schmelzschicht. Quantitative Betrachtungen führten zu dem Schluss, dass bei ITER ELMs mit Wärmebelastungen unter 2.5 MJ/m^2 keine Tropfenerosion auftritt, aber für sehr große ITER ELMs mit entwickelter Plasmaabschirmung eine starke Schmelzerosion mit Massenverlusten bis zu $10^2 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1} \text{ g}$ vorkommen kann.

Beryllium Schutzschichtsimulation: Für Schutzschichten aus Beryllium werden als Schadensursachen Verdampfung, Schmelzbewegung und Tropfenerosion erwartet. Die Bildung metallischer Tröpfchen und die Tropfenerosion der Schmelzschicht durch ITER ELMs und abgemilderte Plasmaabrisse können ein bedeutender Faktor für die Lebensdauer der Schutzschicht sein. Zur Abschätzung der Erosion von massivem Beryllium nach ITER ELM ähnlicher Belastung wurde der Code MEMOS eingesetzt. Die Schwellen für Schmelzen und Verdampfung und die Verdampfungsrate wurden für erwartete Strahlungsbelastungen zwischen 0.2 und 2 MJ/m^2 und



Berechnete Temperaturen im Berylliumtarget bei einer Lastdauer von 0.5 ms. Die Wiedererstarrung ist nach 1.1 ms beendet.

Pulsauern von 0.2 bis 0.6 ms berechnet. Als Beispiel werden in der Abbildung die berechneten Temperaturen im Berylliumtarget für das Referenzszenario bei einer Lastdauer von 0.5 ms gezeigt. Die Schmelzgrenze an der Oberfläche entspricht einer Wärmebelastung von 0.5 MJ/m^2 (Schmelzschwelle). Eine substantielle Verdampfung tritt für Wärmebelastungen über 1 MJ/m^2 auf.

Integrale Plasma-Modellierung

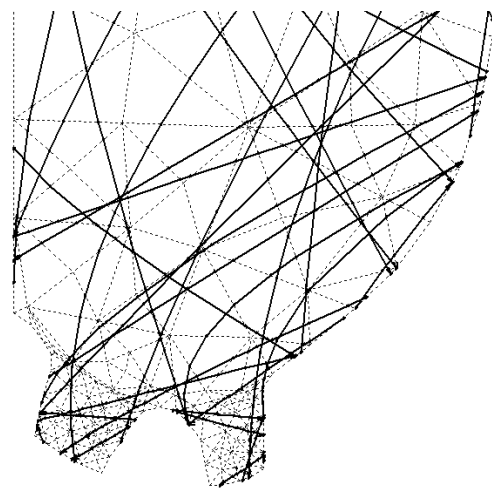
Im zukünftigen Tokamak-Reaktor ITER ist der ELMy H-Modus die bevorzugte Betriebsweise. Dabei können jedoch instabile Zustände auftreten, entweder Plasmazusammenbrüche mit vollständiger Zerstörung des eingeschlossenen Plasma, oder so genannte ELM Ereignisse, bei denen nur die Plasmaperipherie beschädigt wird (siehe vorher). Für kohlefaserverstärkte Schutzschichten (CFC) wird die daraus resultierende Erosion durch Verdampfung und Rissbildung dominiert. Das erodierte Material kann eine Dampfschicht bilden, die vor exzessiver Abtragung schützt. Durch weitere Ionisation des Dampfes entstehen Verunreinigungen, die sich entlang der magnetischen Feldlinien in die Plasma-Abschälschicht (SOL) ausbreiten und dort die Plasmastabilität, insbesondere durch Strahlungsverluste, gefährden können.

Diese Prozesse werden im Rahmen des EFDA Tasks TW5-TPP-ITERTRAN numerisch mit dem Programm FOREV untersucht. Außerdem wurden am FZK der neue zweidimensionale Plasma-gleichgewichts- und Wandprozesscode TOKES (TOKamak Equilibrium and Surface Processes Code) für Randpedest- und Kernplasma entwickelt.

In FOREV wurde ein verbessertes Modell für das aus der Einschlussregion austretende heiße Deuterium-Tritium Plasma implementiert und damit der Kohlenstoffeintrag in die Podestregion abgeschätzt. Der anschließende Transport des Kohlenstoffs in den Kernbereich wurde mit TOKES berechnet. Die Simulation wurde für ELM-Gesamtenergien von $W_{\text{ELM}} = 3.5 - 12.1 \text{ MJ}$ bei einer ELM-Dauer von $\tau_{\text{ELM}} \sim 0.5 \text{ ms}$ durchgeführt.

In TOKES werden die Plasmagefäßoberflächen und die magnetischen Oberflächen in toroidaler Symmetrie beschrieben. Neu implementiert wurden beliebigförmige Begrenzungsflächen in der poloidalen Ebene. Der Eintrag von Neutralteilchen in die Einschlussregion wird modelliert mit einem speziellen an die magnetischen Oberflächen gekoppelten Gitter mit dreieckigen Zellen, was eine schnelle Berechnung der Plasma-Neutralgas-Wechselwirkungen ermöglicht. Im Poloidalschnitt werden die poloidalen Flusskonturen mit Liniensegmenten angenähert, die in den Dreieckszellen liegen. Auf diese Weise können Rechnungen für die gesamte Gefäßoberfläche einschließlich Divertor, Dom und Hauptwand, einheitlich durchgeführt werden. Die poloidalen Flusskoordinaten überdecken das gesamte Gefäßvolumen, einschließlich der Plasmaeinschlussregion, der SOL, und der Divertor-Beine.

Die Modellierung von neutralen Teilchen (Atome, Photonen, Neutronen) erfolgt mit dem Monte-Carlo-Verfahren, wobei die Teilchen als Zufallsstrahlen über das Volumen verteilt generiert werden (Abbildung). Es wird angenommen, dass alle während eines Zeitschritts zur Wand gelangenden Ionen an der Oberfläche rekombinieren. Die gesamte Stoßenergie - kinetische Energie, Rekombinationsenergie, und die elektromagnetische Strahlung - dient zur Ermittlung der Zerstäubungsausbeute und bildet die in den Wandsegmenten absorbierte Wärme. Dabei können die auftreffenden Teilchen die Wandoberfläche bis zur Verdampfungsschwelle aufheizen. Die Wandtemperatur wird als Funktion der Zeit und der Wandtiefe berechnet.



Poloidalebene von ITER mit dem Dreiecksgitter (gepunktete Linien) und den die Neutralteilchen repräsentierenden Strahlen auf dem Gitter (durchgezogene Linien).

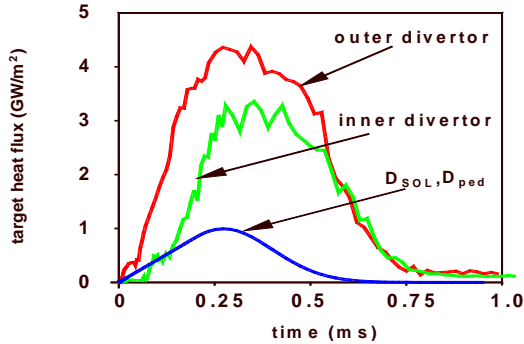
Plasmaströme und Spulenströme werden in TOKES in jedem Zeitschritt unter der Annahme von toroidaler Symmetrie um die Hauptachse z berechnet. Das Plasma wird über einen Satz von "magnetischen Schichten" verteilt, die den magnetischen Oberflächen folgen. Beliebige räumliche Variationen des poloidalen magnetischen Flusses w sind im Code vorgesehen, was Berechnungen auch in Anwesenheit von magnetischen Inseln gestattet. Mit radialer Entfernung von der Magnetachse ändert sich der Fluss monoton bis zur Separatrix; außerhalb der Separatrix bleiben die Feldlinien offen. Dort produzieren die externen Spulen mehrere Bereiche von monotoner Zu- oder Abnahme des Flusses in der Nähe der Wandoberflächen.

Die Nachbarschaft innerhalb von Bereichen mit monotonem Verhalten von w wird durch Anordnung in einer grafischen Struktur beschrieben, die von TOKES automatisch nach jedem Zeitschritt generiert wird. Spezielle Algorithmen wurden zur Berechnung von Plasmadiffusion, Wärmeleitung und Plasmakonvektion über die gesamte in den Graph-Strukturen angeordnete Magnetkonfiguration entwickelt.

Hinsichtlich der Validierung wurde bis jetzt nur das für die Plasmadiffusion entwickelte numerische Schema durch Vergleich von mit TOKES und mit anderen Verfahren erhaltenen Ergebnissen überprüft. Dabei wurde an Stelle der ITER-Konfiguration ein eingeschlossenes Plasma mit kreisförmigem Querschnitt und einem sehr großen Hauptradius ($r_0 = 10^3 \text{ m}$) modelliert. Der große Hauptradius gestattete verschiedene analytische Lösungen der Diffusionsgleichung per Hand und war ein erster erfolgreicher Test. Diese Tests wurden außerdem verifiziert mit dem MHD Transport Code ASTRA mit gleicher Plasmakonfiguration und gleichen Diffusionskoeffizienten. Die mit ASTRA so berechneten Plasmadichteprofile waren in guter Übereinstimmung mit den entsprechenden Profilen von TOKES.

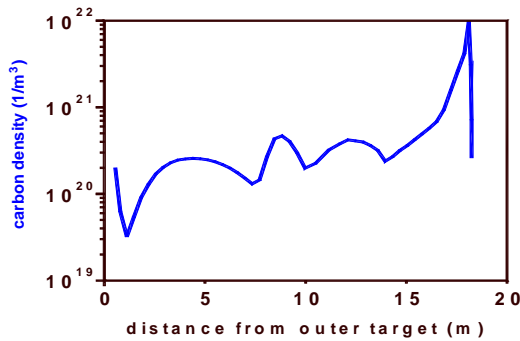
Modellierung des Plasmatransports mit FOREV und TOKES: Frühere Abschätzungen der Kohlenstoffverunreinigung des SOL mit FOREV wurden bislang nur für einen Eintrag in die Podestregion von $N_c = 2.25 \times 10^{20}$ Kohlenstoffatomen durchgeführt und hatten ergeben, dass in diesem Fall eine ELM Wiederholungsperiode τ von 2 s tolerierbar ist. Der Verdampfungsbeginn und die Verdampfungsrate hingen dabei nicht nur von W_{ELM} und τ_{ELM} ab, sondern erwiesen sich auch als sensitiv für die Detailstruktur der zeitlichen und räumlichen Verteilung des durch die ELMs erzeugten Wärmefflusses.

In Rechnungen mit FOREV wurden die Leistungsbelastungen am Divertor bei ELMs mit verbesserten Plasmatransportmodellen simuliert, die auf einem Verhalten des Plasma-Querdiffusionskoeffizienten beruhen, welches an bestehende Tokamaks angepasst wurde. Als Fitparameter wurde der Podest-Diffusionskoeffizient D_{ped} und der SOL-Diffusionskoeffizient D_{SOL} entsprechend den Experimenten von JET gewählt (Abbildung).



Diffusionskoeffizienten D_{SOL} und D_{ped} (dimensionslose Einheiten) und die Wärmeflüsse in FOREV.

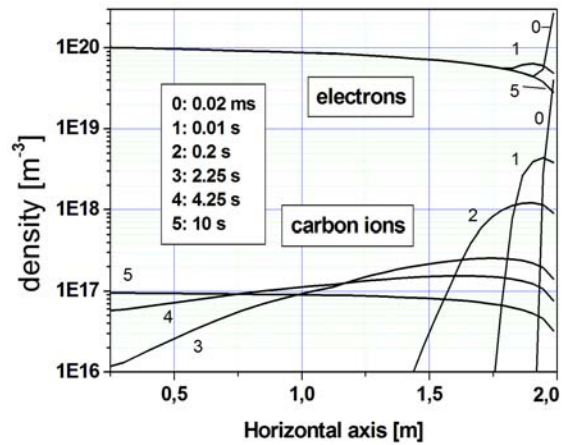
Damit wurde die Kontamination durch ionisierten Kohlenstoffdampf untersucht, der bei Zusammenstößen von neutralem Kohlenstoffdampf mit vom Podest ins SOL diffundiertem D-T-He Plasma entsteht und schließlich in die Peripherie der Einschlussregion gelangt. Die Rechnungen zeigten, dass die Plasmagrenze so große post-ELM Kontaminationen erhält, dass die Kohlenstoffdichte n_C die Wasserstoffdichte n_H (H steht hier für D und T) drastisch übersteigt. Die nächste Abbildung zeigt die berechnete Verteilung der Verunreinigungen entlang des SOL.



Kohlenstoffdichte an der Separatrix entlang des SOL zum Zeitpunkt 1.1 ms nach ELM-Beginn ($W_{ELM} = 12.1$ MJ, $\tau_{ELM} = 0.5$ ms).

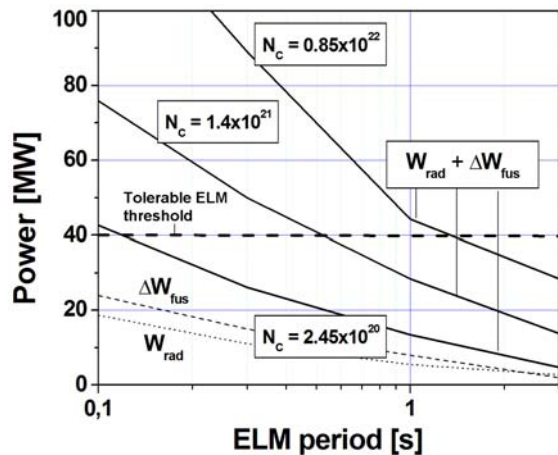
Die Modelle in TOKES zur Simulation von multifluidalem Plasmatransport in der ITER-Konfiguration und die Strahlungsverluste in der Kernregion während der gesamten Entladungsdauer wurden für beliebige Verhältnisse n_C/n_H generalisiert. Es wurde angenommen, dass die Temperatur des eingeschlossenen Plasmas in parabolischer Abhängigkeit von der poloidalen magnetischen Flusskoordinate von 12 keV an der magnetischen Achse auf 7 keV an der Plasmagrenze abfällt, was bei kohlenstofffreiem Plasma der im ITER-Design vorgesehenen α -Fusionsleistung von 80 MW entspricht. Die Plasmakontamination durch Kohlenstoffverunreinigung verringert die Fusionsleistung (wegen Abnahme von $n_D n_T$) und erhöht die Strahlungsverluste. Es wird angenommen, dass die tolerierbare ELM Wiederholungsfrequenz durch das Kriterium $W_{rad} + \Delta W_{fus} < 40$ MW beschrieben werden kann. Die Strahlungsverluste W_{rad} und der Fusionsleistungsabfall durch Kohlenstoffverunreinigung ΔW_{fus} wurde mit dem TOKES-Code berechnet.

Die Targetverdampfung beginnt bei $W_{ELM} = 4.0$ MJ. Bei größerem W_{ELM} kann die Kohlenstoffplasmatemperatur im SOL nach einem ELM durch Strahlungsverluste innerhalb weniger ms auf 1-2 eV abfallen. Mit TOKES wird die Kontamination der Kernregion durch Kohlenstoff nach mehrfachen ELMs während der gesamten ITER-Entladung berechnet, wobei der von FOREV berechnete Wert von N_C benutzt wird. Die TOKES-Simulation startet von anfänglich reinem DT-Plasma mit eingeschalteter Fusionsreaktion und mit stationärer Einspeisung (fuelling), durch homogene Quellen von je 50 % D bzw. T. Innerhalb einer Zeitspanne von wenigen Sekunden entwickelt sich ein stationärer Zustand, der jedoch mit zyklischer Frequenz τ durch momentane Injektionen von N_C Kohlenstoffionen am Plasmarand periodisch unterbrochen wird. Die nächste Abbildung zeigt die Ausbreitung der Verunreinigung durch das eingeschlossene DT-Plasma nach der ersten Injektion von $N_C = 2.45 \times 10^{20}$ Kohlenstoffatomen. Die horizontale Koordinate in der Abbildung beginnt auf der magnetischen Achse und zeigt in Richtung der radialen Tokamakachse.



Elektronen- und Kohlenstoffdichten. Die Legende zeigt die Zeit nach einem ELM.

Wiederholte ELMs produzieren mehr und mehr Kohlenstoffplasma im Plasmainternen. Durch den Reibungssog (entrainment) der sich mit dem DT-Plasma zurück zum SOL bewegenden Kohlenstoffionen sättigen aber die durch Kohlenstoff hervorgerufenen Strahlungsverluste und die Fusionsleistung allmählich. Die Abhängigkeit von W_{rad} und ΔW_{fus} von τ ist in der nächsten Abbildung dargestellt. Daraus ist ersichtlich, daß die tolerierbaren ELM-Wärmeflüsse in der Wand schließlich unter 1 MJ/m² liegen müssen.



Strahlungsverlust und Abnahme der Fusionsleistung als Funktion der ELM-Wiederholungsfrequenz.

Plasmaheiztechnik

170 GHz, 2 MW, CW koaxiales Gyrotron für ITER

In Zusammenarbeit zwischen EURATOM Assoziationen (FZK Karlsruhe, CRPP Lausanne und HUT Helsinki) und der Firma Thales Electron Devices (TED), Velizy, Frankreich, wird ein 170 GHz Gyrotron mit koaxialem Resonator mit einer HF-Ausgangsleistung von 2 MW im Dauerstrich (CW: continuous wave) für einen Einsatz bei ITER entwickelt. Ein Vertrag zur Fertigung eines ersten industriellen Prototyps eines solchen koaxialen Gyrotrons wurde zwischen EFDA (European Fusion Development Agreement) und TED im Sommer 2004 abgeschlossen. Im Rahmen dieses Vertrages werden die physikalische Auslegung und die Spezifikation der Gyrotronkomponenten durch die Assoziationen durchgeführt, während TED für die technische Auslegung und Fertigung zuständig ist. Gleichzeitig zu den Arbeiten am Prototyp wurde ein supraleitender (SL) Magnet spezifiziert und bestellt. Zum Testen des Gyrotrons wird bei CRPP Lausanne ein geeigneter Teststand aufgebaut.

Parallel zu den Arbeiten an einem ersten industriellen Prototyp-Gyrotron wurden die Untersuchungen an einem experimentellen, im Kurzpuls (< 5 ms) betriebenen, 170 GHz Gyrotron mit koaxialem Resonator im FZK fortgesetzt. Ziel dieser Untersuchungen ist es, den Entwurf der wesentlichen Gyrotronkomponenten (Elektronenkanone, Resonator, quasi optisches (q.o.) HF-Auskopplungssystem) sowie das Betriebsverhalten des gesamten Gyrotrons unter realistischen Bedingungen zu überprüfen.

Erster industrieller Prototyp des koaxialen Gyrotrons

Die Fertigung des ersten Prototyps des koaxialen Gyrotrons wurde inzwischen abgeschlossen und Abnahmetests beim Hersteller wurden durchgeführt. Das Gyrotron (siehe Abb.) wurde Ende 2006 nach CRPP Lausanne, Schweiz ausgeliefert. Dort wurde ein Versuchsstand zum Testen des Gyrotrons errichtet. Ein für das Gyrotron geeigneter SL-Magnet wurde spezifiziert und zeitgleich mit dem Gyrotron bei der Firma Ansaldo, Genua, Italien, bestellt. Die Fertigstellung des SL-Magneten hat sich verzögert. Zur Zeit wird mit einer Auslieferung im Mai 2007 gerechnet. Somit könnten die experimentellen Untersuchungen am Prototypgyrotron im Juni 2007 beginnen. Insgesamt sind für die experimentellen Tests etwa 6 Monate vorgesehen.

Zur Vorbereitung der Tests wurde die Durchführung der Justierung des Innenleiters und der Resonatorwand relativ zur Lage des Elektronenstrahls simuliert und die entsprechenden Betriebsparameter (Erregungsströme der einzelnen Spulen des SL-Magneten) wurden berechnet.

Für den Fall, dass sich weitere wesentliche Verzögerungen wegen der Nichtverfügbarkeit des SL-Magneten ergeben sollten, wurde die Möglichkeit untersucht, das Prototypgyrotron in dem im FZK vorhandenen SL-Magneten zu testen. Die Untersuchungen haben ergeben, dass ein Test im FZK Magneten im Prinzip möglich ist. Aufgrund der Unterschiede in der Feldverteilung und insbesondere wegen der Begrenzung des maximalen Feldes auf ca. 6.72 T wäre jedoch nur ein Betrieb bei reduzierten Parametern möglich. Im einzelnen bedeutet es, dass nicht die volle Mikrowellenleistung zu erwarten wäre. Es sollte jedoch möglich sein, die Nominalmode bei 170 GHz anzuregen und z.B. das Verhalten des HF-Auskopplungssystems, die Wirkungsweise der internen HF-Absorber, das Verhalten des Kollektors, usw. zu untersuchen.

Experimenteller Vor-Prototyp des koaxialen Gyrotrons

Gleichzeitig zu den Arbeiten am industriellen Prototyp des koaxialen Gyrotrons wurden im FZK die Untersuchungen an

einem experimentellen koaxialen Kurzpuls-gyrotron ("Vor-Prototyp") fortgesetzt. Unter anderem wurden folgende Experimente durchgeführt und folgende Ergebnisse erhalten:

- Niederfrequente (NF) parasitäre Schwingungen: Ausgehend von experimentellen Beobachtungen zusammen mit Ergebnissen aus Simulationsrechnungen mit dem Programm "CST Microwave Studio" wurden für das industrielle Prototyp-Gyrotron Änderungen an der Geometrie des Innenleiters mit dem Ziel vorgeschlagen, das Anschwingen der parasitären NF Schwingungen zu unterdrücken. Ein entsprechendes Experiment am Vor-Prototyp-Gyrotron zur Überprüfung der durchgeführten Änderungen wurde vorbereitet und wird Anfang 2007 durchgeführt werden.



Prototyp des koaxialen 2 MW, 170 GHz Gyrotrons.

- Resonator und Mikrowellen-Erzeugung:

In Experimenten wurde gezeigt, dass Mikrowellenstreuung das Betriebsverhalten des Gyrotrons wesentlich beeinflussen kann. Insbesondere kann Streustrahlung den Schwingbereich in einer Mode reduzieren und den Wirkungsgrad vermindern. Um den Einfluss der Streustrahlung in Nachbarmoden auf die Anregung der Nominalmode zu untersuchen, wurde ein breitbandiges Brewster-Fenster vorbereitet. Theoretische Untersuchungen der HF-Erzeugung wurden in Zusammenarbeit mit TEKES, Finnland und NTUA, Athen, Griechenland, mit dem Ziel, Resonatoren mit verbesserten Eigenschaften zu entwerfen, fortgesetzt.

- Das quasi optische (q.o.) HF Auskopplungssystem:

Das q.o. HF-Auskopplungssystem - Launcher und Spiegel - welches für das Prototypgyrotron hergestellt wurde, wurde in einem Teststand bei niedrigen HF-Leistungen ("kalt") vermessen. Die gemessene Verteilung des HF-Strahls entspricht innerhalb der Messgenauigkeit den Entwurfsrechnungen.

Ein neues Programm wurde zur Optimierung der Hohlleiterinnenoberfläche und der Abstrahlapertur von Launchern benutzt. Leider führte das im Programm implementierte Optimierungsverfahren nicht zu befriedigenden Ergebnissen. Ein modifiziertes Verfahren zur Optimierung von Launchern wird untersucht. Das Ziel ist es, ein q.o. HF-System zu entwerfen, welches einen HF-Strahl mit einem Gauß'schen Anteil von mindestens 95% erzeugt. Als ein Schritt dahin wurde in der Zwischenzeit ein neuer Launcher mit entsprechenden Spiegeln nach der bisher verwendeten Methode der gekoppelten Moden entworfen und gebaut, welcher einen HF-Strahl mit einem Gauß'schen Anteil von ca. 85% erwarten lässt. Dieses q.o. HF-System wurde im Gyrotron eingebaut, um Messungen daran durchzuführen.

- Messungen am Prototyp einer 2 MW, CW Mikrowellenlast:

Eine sphärische Last zur Absorption von Mikrowellen mit einer Leistung bis zu 2 MW, CW wurde bei CNR, Mailand, Italien, entwickelt und gebaut. Diese Last soll zum Testen des industriellen Prototyps des koaxialen Gyrotrons am CRPP Lausanne, eingesetzt werden. Ein Prototyp dieser Last wurde mit dem experimentellen Gyrotron getestet. Das Ziel der Untersuchungen war, die Verteilung der HF-Leistung entlang der Oberfläche zu messen und zu überprüfen, ob auf der Oberfläche Leistungsspitzen ("hot spots") auftreten. Des Weiteren wurde untersucht, ob und wie viel Leistung zurück in das Gyrotron reflektiert wird. Die Messungen haben ergeben:

(1) Die HF-Leistung wird ausreichend gleichförmig entlang der Oberfläche absorbiert.

(2) Insgesamt werden etwa 3% der HF-Leistung zum Gyrotron zurück reflektiert. Der Hauptanteil wird jedoch nicht von der Last, sondern durch eine Vorlast verursacht. Ausgehend von den Messungen wurden Modifikationen an der Vorlast durchgeführt, um den Anteil der reflektierten Leistung zu reduzieren.

ECR-Heizung und Stromtrieb – „Port Plug“ Entwicklung

Magnetohydrodynamische Instabilitäten (MHD) sind eine der Hauptgründe für die Begrenzung des magnetischen Einschlusses von Kernfusionsplasmen in Tokamaks. Die Stabilität ist zu einem großen Anteil bestimmt durch die Verteilung der Ströme im Plasma, so dass der lokale Antrieb von Strömen ein wichtiges Hilfsmittel ist, um strominduzierte Instabilitäten zu unterdrücken und damit die Eigenschaften eines Tokamaks zu verbessern.

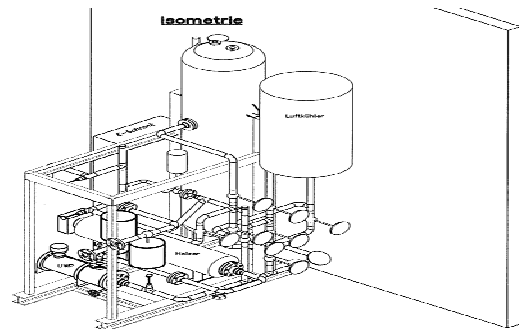
Die Absorption von Hochfrequenzwellen (HF Wellen) mit der Kreisfrequenz ω hängt von der Resonanzbedingung $\omega - k_z v_z = \omega_C$ ab (k_z : z-Komponente der Wellenzahl, v_z : Geschwindigkeit der Elektronen in z-Richtung, ω_C : Zyklotronkreisfrequenz der Elektronen). Externer Stromtrieb an verschiedenen Orten im Plasma, entweder durch Änderung des Einstrahlwinkels der HF Leistung (einstellbare Spiegel) oder durch Änderung der Einstrahlfrequenz, kann deshalb den stabilitätsbegrenzenden Strömen entgegenwirken.

Launcher Handling Test Facility

In ITER wird die Mikrowellenheizung zur Unterdrückung von Instabilitäten dem Plasma vorwiegend über den so genannten Upper Launcher zugeführt. Dieser wird unter Federführung des FZK (IMF I) innerhalb eines europäischen Konsortiums entwickelt. FZK übernimmt dabei im Rahmen eines EFDA Vertrags den Aufbau und Betrieb eines Teststandes für einzelne Komponenten der Einstrahlantennen. Die Arbeiten des FZK beinhalten im Wesentlichen drei Aufgaben: Design einer "Launcher Handling Test Facility (LHT)" für das „Blanket Shield Module (BSM)", Bau der LHT mit dem Ziel, thermomechanische

Tests der Komponenten und Versuche zur Fernhandlung durchzuführen, sowie Entwurf und Herstellung eines Teils des BSM.

Im IHM wird dazu ein Teststand zur Simulation von Betriebszuständen und Erprobung von Fernhandlungstechniken in Zusammenarbeit mit dem IMF I aufgebaut. Die verschiedenen Betriebsszenarien zur Erprobung der Komponenten wurden festgelegt und die erforderlichen Eigenschaften für einen geeigneten Heizkreislauf definiert. Die Datenaufnahme und Steuerung der Anlage wurde festgelegt und wird am IHM entwickelt. Wegen der grundlegenden Bedeutung des Upper Launchers für das ITER ECRH System wird eine möglichst schnelle Verfügbarkeit von experimentellen Daten über die strukturellen Eigenschaften der Komponenten angestrebt. Um diese zu gewährleisten, wurde der Heizkreislauf industriell ausgeschrieben und der Aufbau und die Verrohrung an die Firma AKB Engineering vergeben. Die Abbildung zeigt die Realisierung der Anlage durch AKB.



Heizkreislauf des LHT.

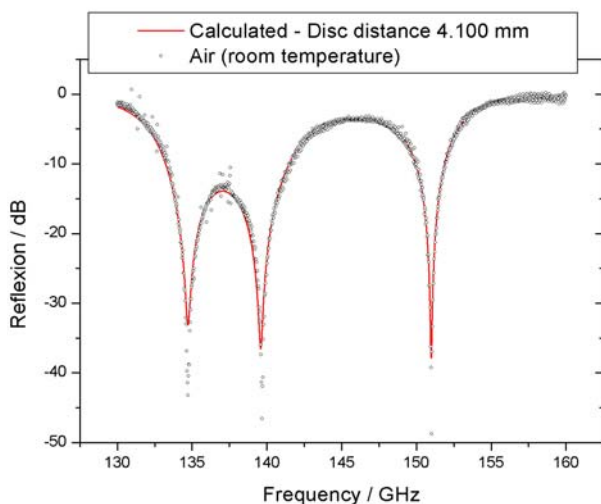
Doppelscheibenfenster für ASDEX Upgrade

Um den in einem großen Parameterbereich auftretenden Instabilitäten bei ASDEX Upgrade (IPP Garching) entgegen zu wirken, werden zum gezielten Stromtrieb Mehrfrequenz-Gyrotrons eingesetzt. Am Gyrotron selbst wird die notwendige Bandbreite mit Hilfe eines Brewsterfensters realisiert. Hingegen am Torus kommt ein Doppelscheibenfenster zum Einsatz, da reflexionsfreie Transmission beim Brewsterfenster nur bei bestimmter Polarisationsrichtung möglich ist, für den Torus jedoch eine beliebige Polarisation erforderlich ist.

Für das IPP Garching wurde für den Tokamak ASDEX-Upgrade in Zusammenarbeit mit dem IMF I und der Firma Reuter ein Doppelscheibenfenster mit zwei Scheiben aus synthetischem Diamant entwickelt und gefertigt (siehe Abbildung). Hierbei lässt sich der Scheibenabstand der beiden 1,8 mm dicken Diamantscheiben zueinander und somit die Durchlassfrequenz des Fensters verändern. In der nächsten Abbildung ist eine Reflexionsmessung des Fensters in Abhängigkeit von der Frequenz für einen Scheibenabstand von $d = 4,1$ mm gezeigt. Es handelt sich hier um Referenzmessungen mit einem eigens entwickelten skalaren Netzwerkanalysator mit quasi-optischem Test-Set. Die Berechnung der Minima der Reflexion (rot) stimmt sehr gut mit der Messung (schwarz) überein. Hierbei ist das Minimum bei $f \approx 140$ GHz der Resonanz der Einzelscheiben und die beiden Minima bei $f \approx 135$ GHz und $f \approx 151$ GHz den Resonanzen aus dem sich bildenden Resonator zwischen den beiden Diamantscheiben zuzuordnen. Durch eine Variation des Abstandes lässt sich nun die Durchlassfrequenz des Fensters auf die jeweilig notwendige Frequenz anpassen.



Doppelscheibenfenster mit feineinstellbarem Scheibenabstand für ASDEX-Upgrade.



Berechnete und gemessene Transmissionseigenschaften eines Doppelscheibenfensters bei einem Scheibenabstand von 4,1 mm.

ECR Heizung und Stromtrieb – Frequenzdurchstimmbare Gyrotrons

Magnetohydrodynamische Instabilitäten (MHD) sind eine der Hauptgründe für die Begrenzung des magnetischen Einschlusses von Kernfusionsplasmen in Tokamaks. Die Stabilität ist zu einem großen Anteil bestimmt durch die Verteilung der Ströme im Plasma so dass der lokale Antrieb von Strömen ein wichtiges Hilfsmittel ist, um strominduzierte Instabilitäten zu unterdrücken und damit die Eigenschaften eines Tokamaks zu verbessern. Die Unterdrückung druckbegrenzender MHD-Instabilitäten in einem Plasma (so genannte 'Neoclassical Tearing Modes') mit Elektron-Zyklotron-Stromtrieb (ECCD) wurde in verschiedenen Anlagen erfolgreich gezeigt (ASDEX-Upgrade, DIII-D und JT-60U).

Die Absorption von Hochfrequenzwellen (HF Wellen) mit der Kreisfrequenz ω hängt von der Resonanzbedingung $\omega - k_z v_z = \omega_c$ ab (k_z : z-Komponente der Wellenzahl, v_z : Geschwindigkeit der Elektronen in z-Richtung, ω_c : Zyklotronkreisfrequenz der Elektronen). Externer Stromtrieb an verschiedenen Orten im Plasma, entweder durch Änderung des Einstrahlwinkels der HF Leistung (einstellbare Spiegel) oder durch Änderung der Ein-

strahlfrequenz, kann deshalb den stabilitätsbegrenzenden Strömen entgegenwirken.

Für Experimente zur Stabilisierung von Plasmen am Tokamak Experiment ASDEX-Upgrade (IPP Garching) mit Elektron-Zyklotron-Resonanz-Heizung (ECRH) und ECCD sind daher frequenzdurchstimmbare Gyrotron sehr hilfreich. Zunächst wurden vom IPP Garching zwei Gyrotrons bei "GYCOM" (Russland) bestellt. Das erste Gyrotron wird als ein Zweifrequenzgyrotron bei 105 GHz und 140 GHz betrieben (die Dicke der CVD-Diamantscheibe des Ausgangsfensters ist diesen Frequenzen angepasst), das zweite wird als Mehrfrequenzgyrotron mit verschiedenen Frequenzen im Bereich zwischen 105 GHz und 140 GHz betrieben. Bei 140 GHz wurde die $TE_{22,8}$ -Mode als Arbeitsmode gewählt, bei 105 GHz ist dies die $TE_{17,6}$ -Mode.

Gyrotronresonator

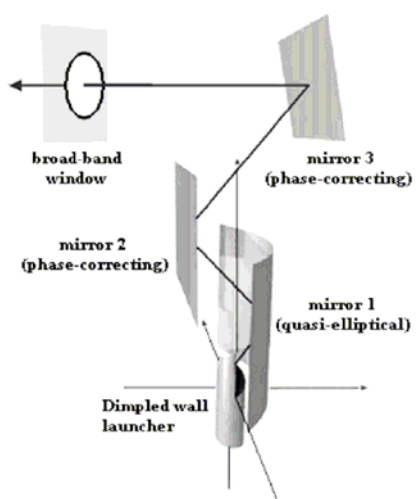
Das am FZK vorhandene $TE_{22,6}$ -Kurzimpuls-gyrotron wurde so umgebaut, dass es, wie das von GYCOM industriell gefertigte Gyrotron, bei 140 GHz in der $TE_{22,8}$ -Mode arbeitet. Mit dieser Auswahl ist es möglich, die Ergebnisse der beiden Gyrotrons direkt zu vergleichen. Mit dem $TE_{22,6}$ -Gyrotron wurde bereits die Frequenzdurchstimmbarkeit innerhalb 1 s in einem Bereich von 15 GHz erfolgreich gezeigt. Strahlentunnel, Kollektor und das supraleitende Magnetsystem des $TE_{22,6}$ -Gyrotrons werden in dem neuen Experiment wieder benutzt. Der Resonator, der quasi-optische Modenwandler und das Ausgangsfenster wurden modifiziert.

Das Verhalten des neuen Resonators einschließlich Uptaper wurde berechnet und die Geometrie im Hinblick auf breitbandige Eigenschaften im Frequenzbereich 105 GHz und 143 GHz optimiert.

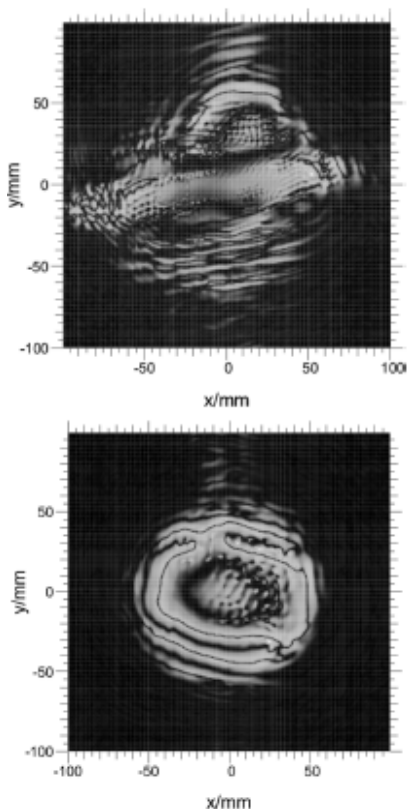
Quasi-optischer Modenwandler

Der quasi-optische Modenwandler des Gyrotrons besteht aus einer Hohlleiterantenne mit periodischen Wandstörungen (Launcher) und einem strahlformenden Spiegelsystem, die für 9 Moden zwischen $TE_{17,6}$ und $TE_{23,8}$ optimiert wurden. Mit Hilfe eines neuen Rechencodes konnten komplexere Wandstrukturen der Hohlleiterantenne untersucht werden. Es war deshalb möglich, einen verbesserten neuen Entwurf, bei dem die Feldamplitude an der helikalen Hohlleiterschnittstelle stark reduziert ist, zu erarbeiten. Dies führt zu einer beträchtlichen Verringerung der Wandverluste und der Streustrahlung.

Es gibt zwei entscheidende Parameter, die vor der Spiegeloptimierung festgelegt werden müssen – die Position des Austrittsfensters und die Größe der Taille des Ausgangsstrahls. In der rechnerischen Auslegung ist der Mittelpunkt des CVD-Brewster-Fensters (siehe unten) 325 mm von der Gyrotronachse entfernt. Um den Gaußschen Strahl an die kleine Fensteröffnung (innerer Durchmesser 50 mm) anzupassen, wurde die Taille ins Fenster gelegt und ihre Größe zu 10,4 mm gewählt. Der erste der Spiegel ist ein großer quasi-elliptischer Spiegel, dessen Kontur von dem bestehenden Design übernommen wurde. Der Hauptzweck dieses Spiegels liegt in der Fokussierung der divergenten Strahlung des Launchers. Der zweite und dritte Spiegel sind angepasste Phasenkorrektoren mit komplizierter nicht-quadratischer Oberflächenkonturfunktion. Kleine Änderungen auf der Oberfläche dieses Spiegel modifizieren die Phase der lokalen ebenen Welle (siehe Abbildung).



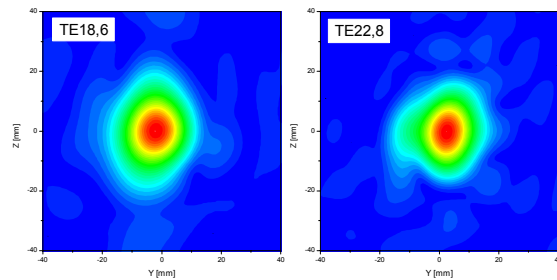
Schematische Darstellung eines internen quasi-optischen Modenwandlers.



Berechnete Oberflächen der Spiegel #2 (oben) und #3 (unten)

Die Rechnungen für dieses Design lassen einen Wirkungsgrad für die Umwandlung der Resonatormode in die Gaußsche Grundmode des Freiraums von mindestens 90 % für alle betrachteten Moden erwarten. Als Beispiel ist in der nächsten Abbildung das gerechnete Strahlbild für die Moden $TE_{18,6}$ (108.22 GHz) und $TE_{22,8}$ (139.99 GHz) gezeigt.

Für dieses quasi-optische Ausgangssystem sind Niederleistungsmessungen mit einem vektoriiellen Netzwerkanalysator, der einen grossen Dynamikbereich umfasst, vorgesehen. Diese Ergebnisse sind erforderlich, um die Hochleistungsexperimente interpretieren und vergleichen zu können (siehe unten).



Gerechnete Leistungsverteilung des Ausgangsstrahls im Abstand 325 mm von der Gyrotronachse (normierte Leistung, lineare Skala).

CVD-Diamant-Brewster-Fenster

Der leistungsfähige Betrieb für eine Vielzahl von Moden bei verschiedenen Frequenzen ist nur durch den Einsatz eines breitbandigen Brewster-Fensters, hergestellt aus CVD-Diamant, möglich. Aufgrund des grossen Brewsterwinkels (67.2°) muss der Scheibendurchmesser gross sein, um eine hinreichend grosse Öffnung für den Hochfrequenzstrahl zu erhalten. Bei der Firma Element Six wurde eine Scheibe mit einer Dicke von 1.7 mm und einem Durchmesser von 140 mm entwickelt und geliefert. Diese Scheibe wird für die elliptische Form eines Brewster-Fensters mit der effektiven Öffnung von 50 mm verwendet.

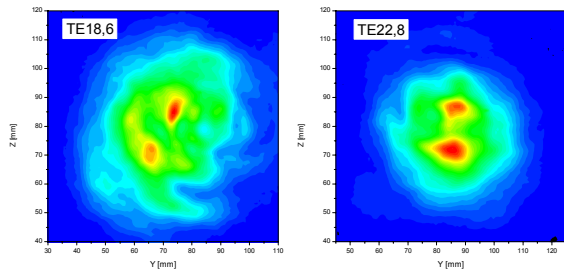
Wegen der elliptischen Umfangsform sind die während der Lötung auftretenden Spannungen von denen bei runden Scheiben deutlich verschieden. Rechnungen zeigen, dass die Spannungen um den Faktor 1.3 erhöht sind. Um zu untersuchen, ob eine Diamantscheibe den auftretenden Spannungen Stand hält, werden zur Zeit Lötversuche bei Thales Electron Devices mit einer Quarzscheibe und einer kleinen Diamantscheibe, bei der die Spannungen im Vergleich zur runden Scheibe erhöht sind, durchgeführt. Im Falle einer erfolgreichen Lötung wird die elliptische Diamantscheibe ($139 \text{ mm} \times 95 \text{ mm}$) an Kupfermanschetten gelötet, so dass eine Umfangskühlung möglich ist.

Allerdings schlug die erste Lötung einer Keramikscheibe fehl, die Vakuumdichtheit war nicht gegeben. Nach verfeinerten FEM-Rechnungen mit dem Ziel, die Orte hoher mechanischer Spannung zu identifizieren, wird ein neuer Versuch unternommen, eine vakuumdichte Lötung zu erzeugen.

Experimentelle Ergebnisse

Für die Experimente in 2006 war das Gyrotron mit einem Brewster-Fenster aus Quarzglas, das eine Durchlassöffnung von 85 mm hatte, ausgestattet.

Es wurden Experimente zur Bestimmung der Strahlparameter der relevanten Moden (9 Moden zwischen $TE_{17,6}$ bei 105.2 GHz und $TE_{23,8}$ bei 143.5 GHz) durchgeführt und mit theoretischen Ergebnissen verglichen. Da während der Experimente keine grossen Anstrengungen unternommen wurden, die Röhre für die individuellen Moden zu optimieren, lag die Ausgangsleistung im Einmodenbetrieb zwischen 300 und 600 kW. Die Analyse der gemessenen Strahlen ergab einen Gaußschen Modenanteil von 77 – 88 % und für alle Moden einen größeren Tailradius als von den Rechnungen erwartet. Typische Strahlbilder der Moden $TE_{18,6}$ und $TE_{22,8}$ sind in der nächsten Abbildung gezeigt. Man beachte, dass die Positionen der Aufnahme entlang der Ausbreitungsrichtung verschieden ist von der vorherigen Abbildung. Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass der Launcher und das Spiegelsystem verbessert werden müssen, um den Gaußschen Anteil zu erhöhen und den Strahlradius an die geplante Fensteröffnung besser anzupassen.



Gemessene Leistungsverteilung des Gyrotronausgangsstrahls im Abstand 635 mm (links) und 665 mm (rechts) von der Gyrotronachse.

Sonderprojekt Mikrowellenheizung (PMW) für Wendelstein 7-X

Das Vorhaben umfasst die Entwicklung, den Bau und die Inbetriebnahme des kompletten 10 MW, 140 GHz Elektronen-Zyklotron-Resonanz-Heizsystems (ECRH) für nahezu stationären Betrieb (30 Minuten) am zukünftigen Stellarator W7-X in Greifswald in Zusammenarbeit mit dem IPP Garching/Greifswald und dem Institut für Plasmaphysik (IPF) der Universität Stuttgart sowie in Abstimmung mit der Projektleitung Aufbau W7-X des Max-Planck-Institutes Garching/Greifswald (IPP). Mit der ECRH soll das Plasma aus dem neutralen Füllgas heraus erzeugt (ionisiert) und aufgeheizt werden. Dadurch kann der für Fusionsreaktoren relevante Plasmameterbereich mit großer freier Weglänge erreicht werden. Außerdem soll mit der ECRH auch ein nicht-induktiver Strom getrieben werden, der im stationären Betrieb durch die Kompensation unerwünschter Plasmaströme die Sicherstellung des optimierten Plasmaeinschlusses erlaubt. Die Mikrowellenleistung soll von zehn 140 GHz Gyrotrons mit einer Leistung von jeweils 1 MW erzeugt und über zwei quasi-optische Vielstrahl-Übertragungsleitungen von etwa 55 m Länge von den Gyrotrons zum Plasmatorus übertragen werden.

Die intrinsische Fähigkeit von Stellaratoren für einen kontinuierlichen experimentellen Betrieb (continuous wave: CW) kann nur mit einem Dauerstrichheizverfahren hoher Leistung demonstriert werden. Derzeit ist die Realisierung nur mit einem ECRH-System möglich. Die Schlüsseltechnologien hierbei sind Hochleistungs-gyrotrons sowie verlustarme Übertragungsleitungen bis hin zur Einstrahlantenne im Torusgefäß mit der Möglichkeit für CW-Betrieb.

Seriengyrotrons für ECRH an W7-X

Das Forschungszentrum Karlsruhe ist vertraglich verpflichtet, dieses 10 MW ECRH-System am IPP Greifswald zu installieren, und in einer europäischen Zusammenarbeit mit dem Centre de Recherches en Physique des Plasmas (CRPP) Lausanne, dem Institut für Plasmaphysik (IPF) der Universität Stuttgart, dem Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA) in Cadarache und der Mikrowellenröhrenfirma Thales Electron Devices (TED) in Vélizy die Entwicklung der Gyrotrons mit einer Ausgangsleistung von 1 MW durchzuführen.

Die Hauptprobleme von Hochleistungs-Hochfrequenz-Gyrotrons sind gegeben durch die Ohmschen Verluste des Resonators, durch die dielektrischen Verluste im Ausgangsfenster, durch die Leistungskapazität des Kollektors und durch die Streustrahlung, die innerhalb des Gyrotrons absorbiert wird. Die technische Begrenzung der Resonator-Leistungsdichte liegt bei 2 kW/cm^2 . Daher arbeiten Gyrotrons in hohen Volumenmoden mit großem Resonatordurchmesser.

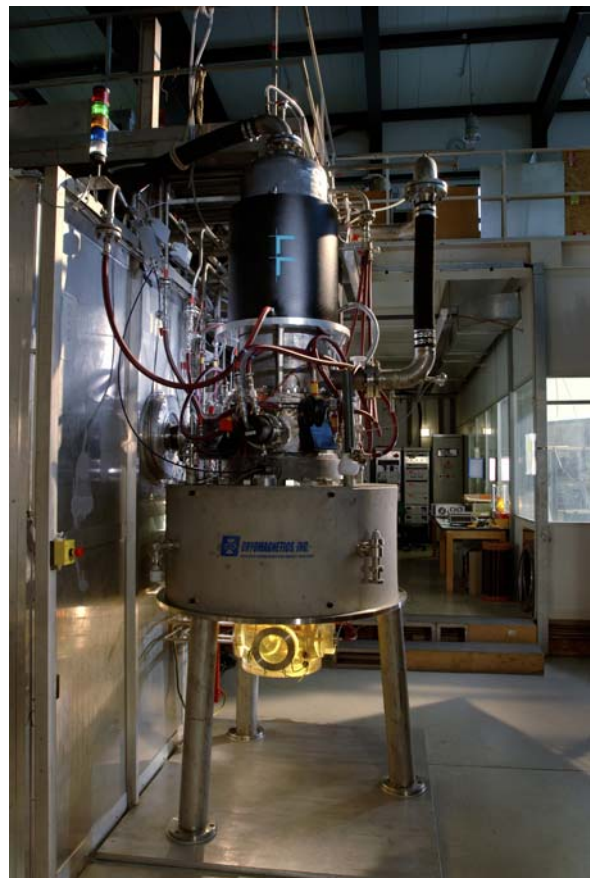
Ein Durchbruch zu hohen Leistungen in kontinuierlichem Betrieb gelang durch die Benutzung von synthetisch hergestellten Diamantfenstern (chemical vapor deposited diamond: CVD-diamond). Diese erlauben den kontinuierlichen Betrieb von Gyrotron-Oszillatoren bei einer Leistung von 1 MW und höher.

Der Betrieb der Gyrotrons mit Energierückgewinnung (single-stage depressed collector operation) erhöht den Wirkungsgrad der Oszillatoren auf über 50% und reduziert die Belastung des Kollektors erheblich.

Die Ergebnisse der Langpulsmessungen an der Vorprototyp- röhre „Maquette“, der Prototyp- röhre und der ersten Serienröhre wurde in den letzten Jahren beschrieben.

Nach den erfolgreichen Tests an der ersten Serienröhre mit Puls-längen von bis zu drei Minuten im Forschungszentrum Karlsruhe wurde diese Röhre an das IPP Greifswald ausgeliefert und dort in Puls-längen bis zu 30 Minuten betrieben. Die gerichtete Ausgangsleistung wurde kalorimetrisch in einer Entfernung von etwa 25 m und einer Übertragungsstrecke mit sieben Spiegeln gemessen. Die Leistung dort betrug 865 kW. Daraus wurde unter Berücksichtigung der Übertragungsverluste eine Ausgangsleistung von etwa 920 kW bei einem Wirkungsgrad von nahezu 45% errechnet. Der Modenanteil der Gaußschen Ausgangsmode (TEM_{00}) betrug 97,5%. Auf Grund dieser erfolgreichen Tests wurde die Röhre akzeptiert und versiegelt, um den Beginn der Garantiezeit hinauszuschieben.

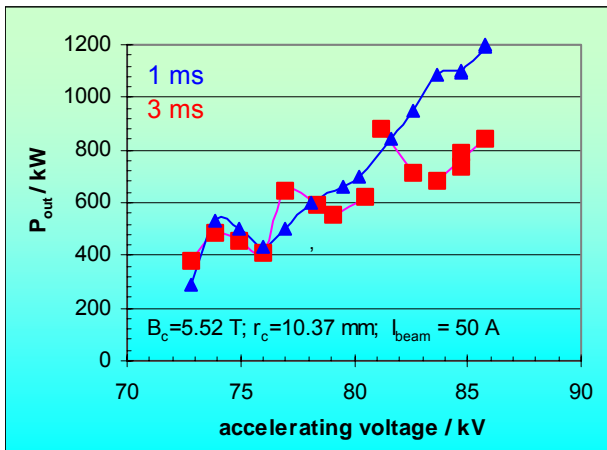
Die zweite Serienröhre wurde im Februar 2006 an das Forschungszentrum ausgeliefert. Die Abbildung zeigt diese Röhre im Teststand des Forschungszentrums.



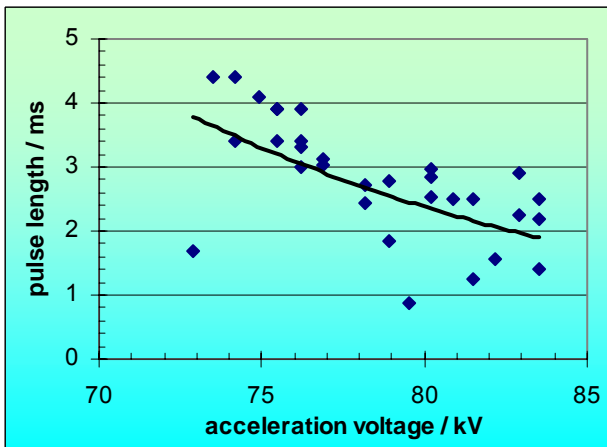
Die zweite Serienröhre im Teststand des Forschungszentrums Karlsruhe.

In Pulslängen von einer Millisekunde konnte eine Ausgangsleistung von 970 kW bei einem Elektronen-Strahlstrom von 40 A erreicht werden. Der Wirkungsgrad ohne Energierückgewinnung betrug 27%. Bei einem Strahlstrom von 50 A lieferte diese Röhre sogar 1200 kW. Die fast lineare Änderung der Ausgangsleistung mit zunehmendem Strahlstrom lässt auf eine gute und homogene Emission der Elektronenkanone schließen.

Bei einer Steigerung der Pulslänge traten bei dieser Röhre starke Modensprünge zu der benachbarten $TE_{27,8}$ -Mode auf. Es war nicht möglich, die Pulslänge bei Beschleunigungsspannungen von mehr als 80 kV auf einige Millisekunden zu erhöhen. Die nächste Abbildung zeigt die Ausgangsleistung bei einem Elektronenstrom von 50 A für Pulslängen von 1 ms und 3 ms. Bei Beschleunigungsspannungen über 80 kV ist die Ausgangsleistung (gemittelt über die Pulslänge) bei 3 ms reduziert. Der Grund dafür liegt in der Tatsache, dass während des Pulses der Nachbarmode mit reduzierter Leistung angeregt wird. Die übernächste Abbildung zeigt die mögliche Pulslänge für die gewünschte Mode, oberhalb der angegebenen Pulslängen schwingt die Nachbarmode, das ist die $TE_{27,8}$ -Mode.



Ausgangsleistung der Röhre #2 als Funktion der Beschleunigungsspannung bei einem Elektronenstrahlstrom von 50 A.



Für die korrekte Mode der Röhre #2 zugängliche Pulslänge als Funktion der Beschleunigungsspannung bei einem Elektronenstrahlstrom von 50 A. Die durchgezogene Linie zeigt einen exponentiellen „least square fit“.

Um Modensprünge bei noch größeren Pulslängen zu vermeiden, musste die Beschleunigungsspannung entsprechend reduziert werden. Bei 50 ms lag die Grenze der Spannung bei 74 kV, wobei die Ausgangsleistung auf 500 kW reduziert wurde.

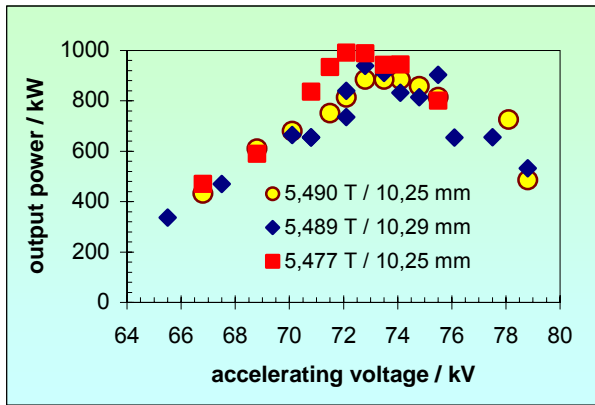
Um den Einfluss von eventuellen externen Störungen durch den Teststand zu eliminieren, wurden die Eigenschaften des Teststandes untersucht. Dabei wurde die Stabilität der Beschleunigungsspannung und der Abbremsspannung (body voltage), der Röhrendruck (Neutralisation der Raumladung des Elektronenstrahls), die Justierung zwischen Magnetfeldachse und Gyrotronachse, Stabilität und Homogenität des Elektronenstrahls, Niederfrequenzschwingungen usw. überprüft. Es wurden keine Anzeichen irgendwelcher Irregularitäten entdeckt.

Ein Vergleich des Frequenzverhaltens zwischen Serienröhre #1 und #2, das vielleicht Aufschluss über ein instabiles Verhalten des Resonators geben könnte, zeigte keine signifikanten Unterschiede. Die Zeitkonstante für die thermische Ausdehnung des Resonators ist mit 160 ms vergleichbar, und auch für die Frequenzverschiebung im Langpulsbetrieb (1s) ergaben sich gleiche Werte, wenn man auf die gleiche Ausgangsleistung extrapolierte.

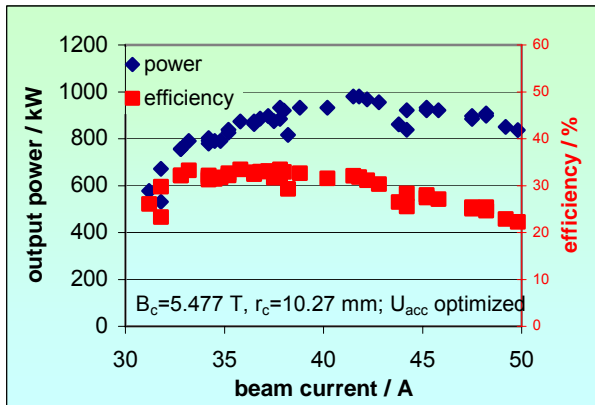
Die Röhre wurde zur Herstellerfirma TED für eine visuelle Inspektion zurückgeschickt. In der Kompressionszone (zwischen Elektronenkanone und Resonator) wurde ein schwerer Schaden festgestellt. Die Lötungen zwischen den Kupfer- und Keramikscheiben sowie die Keramikscheiben selbst wiesen Risse auf. Die Kupferscheiben zeigten Bedampfungen mit Keramikmaterial. Es ist unklar, ob diese Schäden während des Ausheizprozesses oder während der Konditionierung der Röhre mit dem Elektronenstrahl verursacht wurde. Eine klare Verbindung zwischen dem Schaden und den HF-Effekten muss noch näher untersucht werden.

Die Serienröhre #3 wurde im April 2006 an das Forschungszentrum geliefert. Zunächst wurde in Kurzpuls-Experimenten das Verhalten der Ausgangsleistung untersucht. Die Abhängigkeit der Ausgangsleistung von dem Elektronenstrom war vergleichbar mit dem der Prototypröhre nach dem Austausch des Elektronenemitters. Bei ungefähr 42 A ergab sich eine Ausgangsleistung von 1 MW. Die nächste Abbildung zeigt das Ergebnis der Optimierungsprozedur für verschiedene Kombinationen zwischen dem Hauptfeld (Magnetfeld im Resonator) und dem Elektronenstrahlradius im Resonator. Die Abhängigkeit der Ausgangsleistung zeigt oberhalb von 40 A nicht die erwartete nahezu lineare Zunahme mit wachsendem Strom (übernächste Abbildung). Die Abnahme weist auf eine ungenügende Optimierung und damit auf einen schlechten Arbeitspunkt für höhere Ströme hin. Auf eine bessere Optimierung wurde jedoch verzichtet, da es wichtiger schien, das Verhalten der Röhre im Langpulsbereich zu verifizieren.

Im Langpulsbetrieb sind die Betriebsparameter wie z.B. die Magnetfelder im Resonator und an der Elektronenkanone wegen der Neutralisation und der Ausdehnung des Resonators verschieden vom Kurzpulsbetrieb. Das Verfahren zum Auffinden optimaler Betriebsbedingungen im Langpulsbetrieb wird mit Pulslängen von einer Sekunde durchgeführt. Dabei wird angenommen, dass die Frequenzverschiebung proportional zur im Resonator absorbierten Leistung und damit proportional zur Ausgangsleistung ist. (Dabei wird das zeitliche Verhalten der Frequenzabhängigkeit mit einer Exponentialfunktion angenähert, und nur das langsame Verhalten der Frequenzdrift ermittelt.)



Ausgangsleistung (Röhre #3) für verschiedene Kombinationen zwischen dem Magnetfeld und dem Elektronenstrahlradius im Resonator (siehe Legende).



Ausgangsleistung und Wirkungsgrad (ohne Energierückgewinnung) als Funktion des Elektronen-Strahlstroms für Röhre #3.

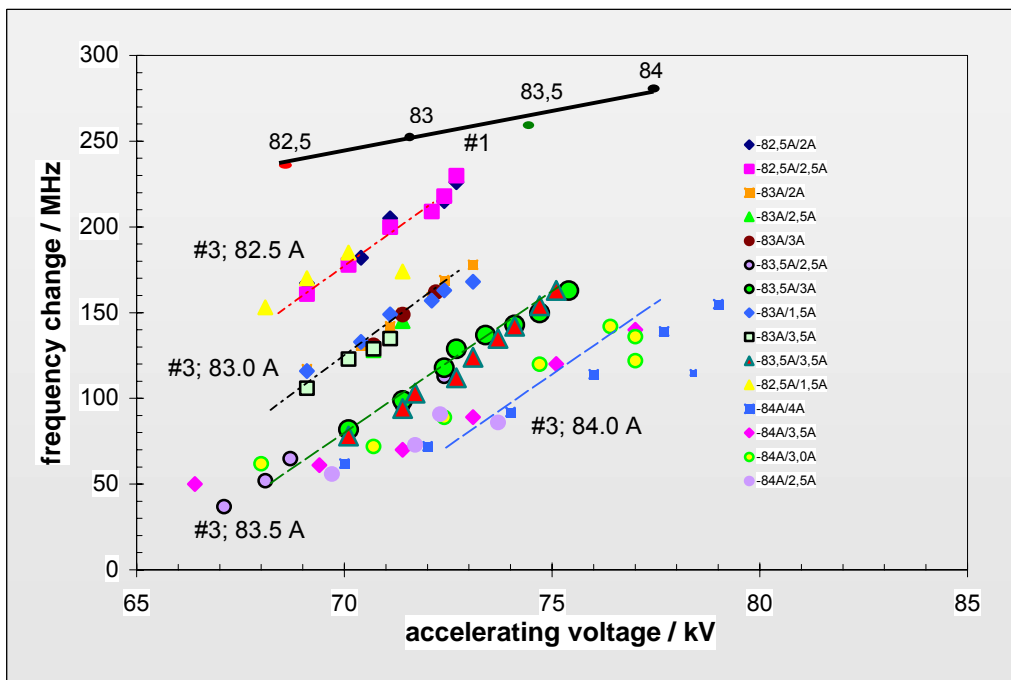
Für die Röhre #1 stieg der Wert der Frequenzverschiebung und damit die Ausgangsleistung mit wachsendem Magnetfeld an (Abbildung unten, durchgezogene schwarze Linie). Bei Röhre #3 wurde ein gänzlich verschiedenes Verhalten gefunden. Die

Ausgangsleistung fiel ab mit steigendem Magnetfeld auf Grund der Tatsache, dass die Beschleunigungsspannung nicht entsprechend erhöht werden konnte. Die Abbildung unten zeigt die Frequenzverschiebung als Funktion der Beschleunigungsspannung für verschiedene Kombinationen der Ströme in den Haupt- und den Kanonenspulen und damit für verschiedene Kombinationen des Magnetfeldes und des Elektronenstrahlradius im Resonator. Der Effekt der Hauptspulenströme ist klar ersichtlich, der Effekt der Kanonenspule ist vernachlässigbar. Eine Erhöhung der Beschleunigungsspannung zu höheren Werten als in der Abbildung dargestellt führte fast immer zu Überschlagen innerhalb des Gyrotrons. Manchmal war dieser Effekt mit einem starkem Stromanstieg zum Body verbunden.

Schon bei Pulslängen von 1 s reduzierte sich die Ausgangsleistung der Röhre #3 auf Werte von etwa 750 kW. Für noch längere Pulse fiel die Ausgangsleistung noch weiter, auf ungefähr 650 kW bei dreiminütigen Pulsen. Der Grund ist noch nicht verstanden.

Um auch hier eventuelle Fehler im Teststand vollständig auszuschließen, wurde die Röhre für weitere Tests ans IPP Greifswald geliefert. Es wurde kein unterschiedliches Verhalten festgestellt. Auch am Teststand des IPP Greifswald war die Ausgangsleistung bei etwa 600 kW begrenzt. Es wird angenommen, dass ähnliche Effekte wirksam werden wie bei der Röhre #2. Auch diese Röhre wurde zu TED für eine visuelle Inspektion zurückgeschickt. Die Kompressionszone wies ähnliche Defekte auf wie auch bei der zweiten Röhre beobachtet.

Alle Röhren lieferten eine ähnliche Ausgangsstrahlverteilung. Die Tabelle fasst die Strahlparameter des HF-Strahls aller Serienröhren sowie die der Prototypöhre zusammen. Die unterschiedlichen Strahlparameter, die im Vergleich zur Spezifikation niedrigeren Tailenweiten w_{0x} und w_{0y} , die unterschiedlichen Abstände der Tailen z_{0x} und z_{0y} in horizontaler (x) und vertikaler (y) Richtung sowie die leicht elliptische Form der Ausgangsverteilung sind mit größter Wahrscheinlichkeit auf Fertigungstoleranzen zurückzuführen. Der bei allen Röhren nahezu gleiche Anteil der Gaußschen Strahlverteilung zeigt, dass der Resonator und der quasi-



Verschiebung der Eigenfrequenz der Röhre #3 bei einer Pulslänge von 1 s. Die durchgezogene schwarze Kurve zeigt das Ergebnis der Röhre #1. Die Zahlen liefern die Magnetströme für die Hauptspulen des supraleitenden Magnetsystems. Die Legende zeigt die Kombinationen der Ströme in der Hauptspule und in der Kanonenspule.

optische Modenwandler in den Röhren effektiv arbeiten und nicht für die Probleme der beiden letzten Röhren verantwortlich sind.

	w_{0x} / w_{0y} [mm]	z_{0x} / z_{0y} [mm]	TEM ₀₀ [%]
Prototypröhre	18,6 / 21,3	202 / 71	97
Serienröhre #1	17,7 / 21,6	127 / 126	97,5
Serienröhre #2	20,2 / 22,5	104 / 40	97
Serienröhre #3	17,5 / 20,6	130 / 90	97

Parameter des Ausgangsstrahls für die verschiedenen Gyrotrons.

Die technische Begrenzung der Ausgangsleistung der W7-X Gyrotrons ist bei einer gut funktionierenden Röhre (Röhre #1) in der Hauptsache durch die Belastung der Kollektorinnenwand durch den Elektronenstrahl gegeben, obwohl die Belastung durch normalleitende DC- und AC-Spulen und die dadurch bewirkte Auf- und Abverschiebung (Sweeping) des Elektronenstrahls entlang der Kollektoroberfläche reduziert wird. Dieses Sweeping wird mit 7 Hz durchgeführt. Höhere Frequenzen sind nicht effektiv wirksam, da die Amplitude des von außen angelegten Magnetfeldes im Inneren durch den „Skinneffekt“ stark reduziert wird. Die maximale Gesamtbelastung des Kollektors wird durch Vorgabe von TED auf 1,3 MW beschränkt. Bei einem Wirkungsgrad von 45% bedeutet dies eine Ausgangsleistung von 1,05 MW im Langpulsbetrieb.

Seitens des Forschungszentrums wurde ein radiales Sweepsystem (mit einem transversal angelegten Magnetfeld) untersucht. Dieses System reduziert zwar zunächst nicht die Verlustleistungsdichte, ist jedoch einfacher und kostengünstiger zu fertigen. Dies gilt besonders, da der untere Teil des Kollektors aus Edelstahl gefertigt ist und damit höhere Sweep-Frequenzen möglich sind. Durch Betrieb bei 50 Hz und einer Auslegung derart, dass die Magnete mit einer Ansteuerung von Drehstrom des gewöhnlichen Stromnetzes betrieben werden, ergab sich eine sehr einfache Anordnung. Die hohe Sweep-Frequenz weist zudem den Vorteil auf, dass die Temperaturschwankungen auf der inneren Oberfläche des Kollektors wesentlich reduziert sind und dadurch das Problem der zyklischen Ermüdung verringert werden kann.

Dieses System war an der Prototypröhre im Forschungszentrum getestet worden und entsprach den Erwartungen. Am IPP Greifswald wurde zum ersten Mal ein kombiniertes System, d.h. ein radiales Sweepsystem mit einer Frequenz von 50 Hz in Verbindung mit einem axialen System bei 7 Hz getestet. Damit wurde die auf dem Kollektor rotierende Elektronenstrahlellipse auch noch in der Höhe auf und ab geschoben. Durch diese Kombination konnte eine wesentliche homogenere Belastung des Kollektors erreicht und die Belastung etwa halbiert werden. Dies erlaubt es, das Gyrotron bei höheren Elektronenströmen zu betreiben, und damit die Ausgangsleistung zu erhöhen. Noch wichtiger ist dieses Verfahren jedoch bei Gyrotrons mit höherer spezifizierter Ausgangsleistung wie z. B. beim 2-MW, 170-GHz Gyrotron mit koaxialer Resonator, das zur Zeit für ITER entwickelt wird.

Übertragungsleitungen für ECRH an W7-X

Die Übertragungsleitungen (Abbildung auf der nächsten Seite) bestehen aus Einstrahl- (single beam waveguides: SBWG) und Vielstrahl-Elementen (multi-beam waveguides: MBWG). Für jedes Gyrotron wird eine Anpassoptik mit fünf Spiegeln benutzt. Zwei dieser Spiegel (M1,M2) formen den Ausgangsstrahl des Gyrotrons zu einem Gaußschen Strahl mit den richtigen Parametern, zwei weitere Spiegel (P1,P2) mit geeigneter Oberflächenrillung ermöglichen eine Polarisierungseinstellung, die für optimale Absorption in dem Plasma benötigt wird. Ein fünfter Spiegel (M3) richtet den Strahl zu dem System aus ebenen Spiegeln (beam combining optics: BCO), das fünf Strahlen zu einem Übertragungssystem zusammenfasst und

sich am Eingang des Vielstrahlübertragungssystems befindet. Die Vielstrahlspiegel sind so ausgelegt, dass sie bis zu sieben Strahlen (fünf bei 140 GHz, einen bei 70 GHz und einen Ersatzkanal) vom Gyrotronbereich (Eingangsebene) zur Stellarator-Halle (Ausgangsebene) übertragen können. In der Ausgangsebene der MBWG trennt eine Spiegelanordnung (beam distribution optics: BDO) die Strahlen und verteilt sie auf die einzelnen Einkoppelanordnungen am Torus und zu den einzeln verstellbaren Antennen im Torus. Um die gesamte Leistung zur Torushalle zu übertragen, sind zwei symmetrisch angeordnete MBWG-Übertragungsleitungen installiert.

Alle Spiegel bis zur Torushalle sind inzwischen gefertigt und installiert, und dies schließt die Kalorimeter, die Absorber für die Streustrahlung und die Retroreflektoren ein. In dieser Anordnung können die MBWGs in einem doppelten Strahldurchgang getestet und der Übertragungswirkungsgrad mit einer stationären HF-Last ermittelt werden. Hochleistungstests dieser Art sind in Vorbereitung. Die Auslegung der Spiegel im Experimentierbereich W7-X sowie die Auslegung der zugehörigen Stütz- und Abschirmstrukturen ("Türme") sind größtenteils durchgeführt, die Anfragen zur Fertigung an die Industrie verschickt. Der Entwurf des Übertragungssystems unmittelbar vor der Torushalle sowie die Strahloptimierung an der Einkoppelantenne mit einer breitbandigen Charakteristik sind fertig gestellt. Ein Modell dieses Teils der Übertragungsstrecke wurde getestet in Hinblick auf Überschlagsprobleme: bis zu der doppelten Feldstärke der maximalen Leistungsdichte traten keine HF-Überschläge auf.

Während der Abnahmetests der Gyrotrons wurden extrem genaue Frequenzmessungen durchgeführt. Die Ergebnisse werden benötigt zur Entwicklung eines Schalters für Mikrowellen hoher Leistung. Er besteht aus einem Diplexer, der mittels kleinster Frequenzverschiebungen die Hochfrequenzzweige auf verschiedene Ausgänge schaltet. Eine solche Anordnung soll im Strahlentunnel des IPP untersucht werden. Wegen des leichten Zugangs zu den Komponenten im Strahlentunnel ist das ECRH-System als Teststand für Mikrowellenkomponenten bestens geeignet und könnte daher zu Untersuchungen von vielen Systemen benutzt werden wie z. B. von im Torus einzubauende Spiegel, von HF-Absorberlasten und von Antennen-Modellen für ITER.

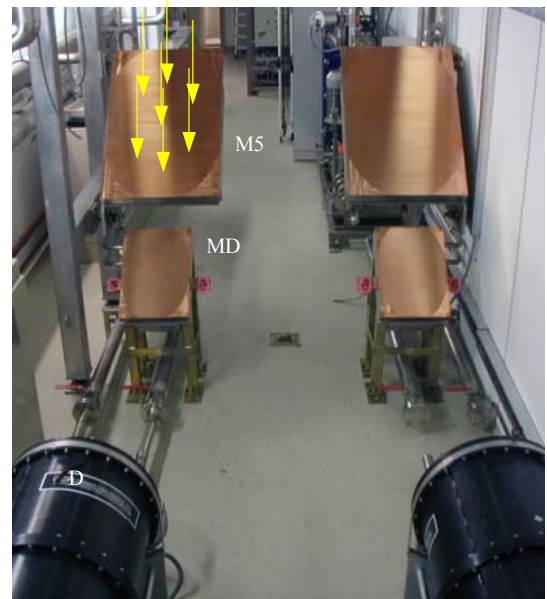
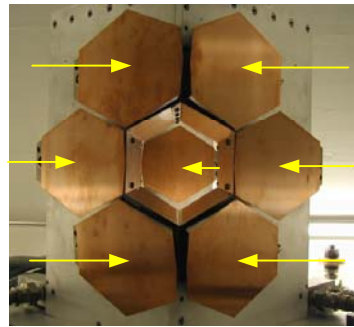
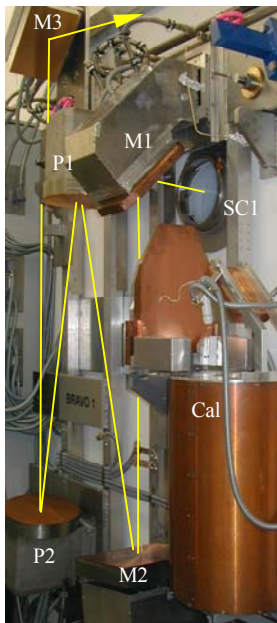
Eine neue, auf schnellen Bolometern basierende Diagnostik für die Messung von Mikrowellenleistung wurde in einer Diplomarbeit in Zusammenarbeit mit der Fachhochschule Stralsund (University of Applied Sciences) untersucht und entwickelt. Etwa 0,01 % der Leistung werden durch eine Oberflächenrillung auf dem ersten Spiegel vom HF-Strahl abgekoppelt und auf eine Fläche von etwa 1 cm² des Bolometers fokussiert. Das Bolometer ist mit einer Mikrowellenabsorberschicht versehen und liefert im Leistungsbereich zwischen 50 kW und 800 kW ein zur Mikrowellenleistung lineares Ausgangssignal. Mit einer zur Übertragungsfunktion des Bolometers angepassten analogen Elektronik konnte eine Ansprechzeit von 15 ms realisiert werden. Weiterhin zeigte dieses Signal eine gute Langzeitstabilität.

In-Vessel-Komponenten für ECRH an W7-X

Der motorgesteuerte Prototyp der ECRH-Antenne wurde unter Vakuumbedingungen und mit Mikrowellenstrahlung in der Testkammer „Mistral“ auf Verlässlichkeit und Betriebssicherheit getestet. Die Antenne war mit spiralfederartigen Röhren für die Kühlung des beweglichen Spiegels versehen. Bis zu einer Leistung von 450 kW/m² - dieser Wert liegt schon oberhalb der erwarteten Streustrahlung für W7-X - wurden weder Überschläge noch irgendwelche Beschädigungen gefunden. Während der zyklischen Tests in Vakuum über den vollen Bewegungsbereich brachen zwei Verbindungen nach etwa 1000 Zyklen. Diese Verbindungen wurde neu ausgelegt und die

Stahlkugeln der Lager durch Keramikugeln ersetzt. Damit überstand das System mehr als 10000 Zyklen in Vakuum und wurde dementsprechend für die Serienherstellung frei gegeben. Die meisten Teile der Serienantennen sind bereits entworfen, die Fertigung der Spiegel im Torus wurde begonnen. Die Motorantriebe sind geliefert.

Mikrowellen werden von standardmäßig eingesetzten O-Dichtungsringen aus Viton stark absorbiert. Die Torus-Ports des ECRH-Systems von W7-X werden mit Vakuumschiebern versehen, die zwischen dem Vakuum-Behälter und den Diamantfenstern eingebaut werden. In diesen Schiebern müssen die Vitonringe durch niedrigabsorbierendes Material



Blick in den Strahlentunnel des ECRH-Systems in Greifswald. a) Das linke Bild zeigt die Anpassoptik M1,M2 und die Polarisatoren P1,P2 sowie M3, den Umschaltspiegel SC1 und das Kurzpulskalorimeter CAL für ein Gyrotron. b) In der Mitte sind die Spiegel zur Zusammenführung von bis zu sieben Strahlen (BCO) gezeigt (gesehen vom ersten MBWG-Spiegel M5). Die einzelnen Strahlen, die von den links und recht angebrachten Spiegeln M3 kommen, fallen auf diese ebenen Spiegel und werden auf M5 des Vielstrahlübertragungssystems gelenkt. c) Das rechte Bild zeigt einen Blick in den Strahlentunnel mit zwei großen Vielstrahlspiegeln M5 und den Spiegeln MD, die einen ausgewählten Strahl in die Hochfrequenzlangpulslast D lenken.



Hochspannungskontrollsystem für die Gyrotrons. Links: Modulator, Crowbar und Zündspule. Rechts: Thyatron mit neu entwickelter externer Anordnung zum Schutz der Gyrotrons.

ersetzt werden. Ein Schieber wurde mit Isolast J9505 ausgerüstet und mit einem Hochleistungs-HF-Strahl, der die Bedingungen von W7-X simuliert, getestet. Unter stationären Bedingungen wurde ein Temperaturanstieg von 62° gemessen. Damit ist dies Material für den Einsatz in Vakuumschiebern geeignet.

Für die Heizszenarien mit der zweiten Harmonischen der ordentlichen Mode (O2) und der dritten Harmonischen der außerordentlichen Mode (X3) erwartet man für den einfachen Durchgang im Plasma eine Absorptionsrate zwischen 40% und 80%. Der nicht-absorbierte Teil der HF-Strahlung würde zur thermischen Überlastung der Graphitziegel an der inneren Wand des Plasmabehälters führen. Aus diesem Grund müssen an bestimmten Positionen die Graphitziegel durch TZM (titanium-zirconium-molybdenum alloy) -Reflektorziegel ersetzt werden. In einer großen Zahl von „ray-tracing“ Rechnungen wurden die Positionen für jeden Strahl derart optimiert, dass die HF-Strahlen auf kontrollierte Weise ins Plasmazentrum reflektiert und in einem zweiten Durchgang stark absorbiert werden. Ein prototypischer Ziegel wurde gefertigt und einem äquivalenten HF-Strahl ausgesetzt. Obwohl der maximale Temperaturanstieg etwa 70% höher war als mit ANSYS Wärmetransport Rechnungen vorhergesagt, scheint der Einsatz von TZM-Ziegeln möglich. In einem nächsten Schritt wird der Wärmeübergang zwischen Ziegel und wassergekühlter Wand verbessert und die Ziegeloberfläche optimiert, um die Mikrowellenabsorption zu minimieren

Kühlsystem für ECRH an W7-X

Das letzte Kühlsystem zur Kühlung der Spiegel in der Torushalle wurde installiert und erfolgreich in Betrieb genommen.

Zum Betrieb der gelieferten Gyrotrons wurden die Kühlleitungen des bereits installierten ECRH-Kühlsystems an die Gyrotrons angeschlossen und erfolgreich in Betrieb genommen.

Energieversorgung für ECRH an W7-X

Für den Betrieb der Gyrotrons mit vorgespanntem Kollektor ist eine präzise geregelte Hochspannung für die Beschleunigung des Elektronenstrahls notwendig. Diese wird von einem "HV-Modulator" geliefert. Der Strahlstrom wird dabei über die Heizung der Kathode kontrolliert. Im Falle eines Durchschlags im Gyrotron schützt ein parallel geschalteter Thyatron-Crowbar das Gyrotron vor Beschädigung.

Die Herstellung der Modulatoren sowie der Kathodenheizung/Crowbar-Einheiten wird im IPF Stuttgart weitergeführt. Anfängliche Schwierigkeiten mit Hochspannungsüberschlägen im Crowbar konnten durch Änderung der Außenbeschaltung des Thyatrons beseitigt werden (Abbildung auf der vorherigen Seite). Die notwendigen Änderungen wurden in allen Crowbar-Einheiten implementiert; die Einheiten sind erfolgreich getestet worden. Acht komplette Systeme sind ans IPP Greifswald geliefert und erfolgreich in Betrieb genommen. Die Abbildung links zeigt das komplette System eines HV-Modulators.

MSR-Technik für ECRH an W7-X

Das Vorhaben umfasst die Entwicklung und den Aufbau der Mess-, Steuer- und Regelungstechnik (MSR), sowie der Mikrowellendiagnostik für die ECRH an W7-X.

Das Steuer- und Kontrollsystem und die Visualisierung wurden installiert. Letzteres wurde wesentlich verbessert und auf die Bedingungen am IPP Greifswald angepasst. Es wurde in die Steuerung der verschiedenen Gyrotrons eingebaut und bei den bereits mit Gyrotrons bestückten Boxen erfolgreich in Betrieb genommen.

Außerdem wurde das Regel- und Kontrollsystem bereits teilweise in das Hauptkontrollsystem von W7-X integriert und erfolgreich getestet.

Beteiligte Mitarbeiter:

DI A. Arnold, K. Baumann, Dr. B. Bazylev, Ing. J. Burbach (IMF I), **Dr. G. Dammertz**, Dr. I. Danilov (IMF I), DI J. Flamm (Universität Karlsruhe), **Dr. G. Gantenbein**, Dr. R. Heidinger (IMF I), Dr. S. Illy, Dr. J. Jin, Dr. R. Kochergov, **Dr. I. Landman**, DI W. Leonhardt, B. Mattem, A. Meier (IMF I), D. Mellein, DI G. Neffe, Dr. P. Pestchanyi (Gastwissenschaftler), **Dr. B. Piosczyk**, DI O. Prinz, DI T. Rzesnicki, Dr. R. Schneider, U. Saller, DI M. Schmid, P. Severloh (IMF I), W. Spiess, M. Stoner, J. Szczesny, Prof. M. Thumm, R. Vincon, W. Wiegand, Dr. X. Yang, C. Zöllner

Externe Mitarbeiter am „Sonderprojekt Mikrowellenheizung (PMW) für Wendelstein 7-X“:

IPF Stuttgart:

Dr. P. Brand, Dr. C. Lechte, M. Grünert, Dr. W. Kasperek, M. Krämer, Dr. H. Kumric, R. Munk, F. Müller, Dr. B. Plaum, P. Salzmann, H. Schlüter, D. Wimmer

IPP Greifswald:

B. Berndt, Dr. H. Braune, Dr. V. Erckmann, F. Hollmann, L. Jonitz, Dr. H.-P. Laqua, Dr. G. Michel, M. Nitz, F. Noke, F. Purps, T. Schulz, P. Uhren

IPP Garching:

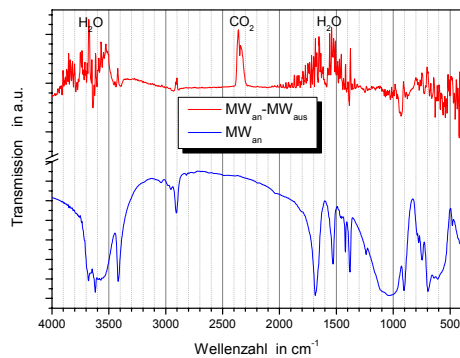
DI M. Weißgerber

NANOMIKRO: Programm Nano- und Mikrosysteme

Applikations- und Transferlaboratorien

Nanomineralogie

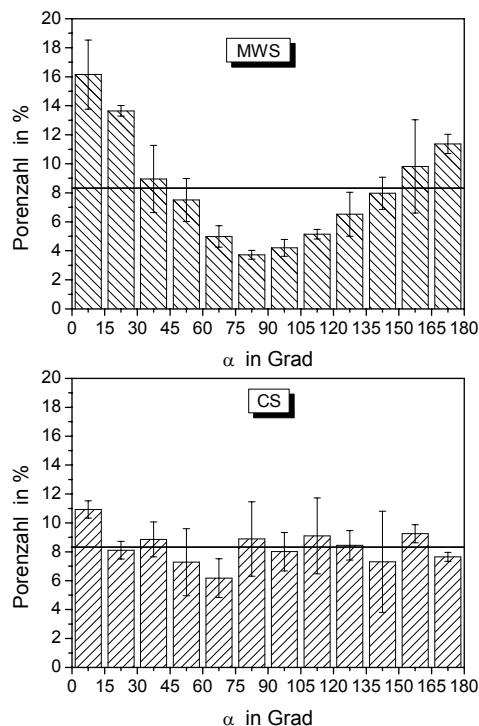
Die in Zusammenarbeit mit der Abteilung Nanomineralogie des ITC-WGT konzipierte Mikrowellenanlage wurde Anfang dieses Jahres fertig gestellt und in Betrieb genommen. Die Strahlführung des eingebauten Spektrometers wurde an die Mikrowelleneinheit angepasst, so dass während der Mikrowellenbestrahlung Infrarot (IR) - Spektren aufgenommen werden können. Sinn und Zweck dieser Anlage ist der Nachweis nicht-thermischer Mikrowelleneffekte. Dazu wird untersucht, ob bzw. inwieweit unter dem Einfluss der Mikrowellenstrahlung sich die einzelnen IR-Spektren beeinflussen lassen. Nach dem Lösen einiger Startprobleme und der Optimierung der entwickelten Software zur Anlagensteuerung wurde eine Serie unterschiedlicher Schichtsilikate in IR-transparenten KBr-Presslingen untersucht. Dazu wurden jeweils ca. 10 Transmissionsspektren abwechselnd mit bzw. ohne eingeschaltete Mikrowellenquelle aufgenommen. Die daraus resultierenden gemittelten Spektren wurden miteinander verglichen. Einige dieser Spektren, die bisher alle bei Proben temperaturen nahe der Raumtemperatur aufgenommen wurden, geben erste Hinweise auf die gesuchten Effekte. Die folgende Abbildung zeigt die Ergebnisse, die mit Kaolinit gewonnen wurden. Die untere, blaue Kurve gibt das mittlere Spektrum bei eingeschalteter Mikrowellenquelle wieder. Die obere, rote Kurve zeigt die Differenz des gemittelten Spektrums ohne Mikrowelle zur ersten Kurve in vergrößerter Darstellung. Die etwas verrauschten Bereiche im Differenzspektrum bei Wellenzahlen größer 3500 cm^{-1} und im Bereich von ca. 1300 bis 2000 cm^{-1} sind ausschließlich auf freies Wasser zurückzuführen. Darüber hinaus ist in den verbleibenden Spektralbereichen zu erkennen, dass einzelne Linien scheinbar unterschiedlich verstärkt (3400 cm^{-1} , 2900 cm^{-1}) bzw. geschwächt (900 cm^{-1}) werden, andere wiederum im Differenzspektrum kaum zu erkennen sind. Dieser Effekt ist nach unserem bisherigen Verständnis durch eine nicht-thermische Mikrowellenkopplung mit dem Material zu erklären. Bei einer nur thermischen Kopplung würde man eine vergleichbare Verstärkung aller Absorptionsbanden erwarten.



Infrarot-Spektrum von Kaolinit unter Einfluss von Mikrowellenstrahlung (unten) und die Differenz zum Spektrum ohne Mikrowellenstrahlung (oben).

Mikrowelleneffekt beim Sintern

Theoretische Überlegungen, von V. Semenov und K. Rybakov, IAP in Nizhny Novgorod, Russland, führen zu der Erwartung, dass sich Poren während des Sinterns im linear polarisierten Mikrowellenfeld (MWS), abhängig von der Feldrichtung asymmetrisch schließen. Ein experimenteller Nachweis solch eines Verhaltens könnte somit einen direkten Zugang zur Verifikation der theoretischen Ansätze liefern. Hierzu wurden die Untersuchungen zum Einfluss linear polarisierter Mikrowellenfelder auf die Mikrostrukturentwicklung in nanoskaliger, Y_2O_3 stabilisierter ZrO_2 -Keramik weitergeführt. Die anfänglich verwendeten statistischen Auswertemethoden zur Porengeometrie wurden verfeinert. So wurden unter anderem die in den Mikrostrukturbildern gefundenen Poren durch Ellipsen genähert. Betrachtet man die statistische Verteilung der Ausrichtung der großen Achse in Bezug zur Horizontalen, (senkrecht zur angelegten Feldrichtung), so ist zu erkennen, dass unter dem Einfluss der linear polarisierten Mikrowellenstrahlung die Poren bevorzugt senkrecht zur Feldrichtung orientiert sind (Abbildung). Bei konventionell gesinterten (CS) Proben zeigt sich im Rahmen der Messgenauigkeit keine Vorzugsrichtung.



Winkelverteilung (α Winkel zu Horizontalen) der großen Halbachse der an die Poren gefitteten Ellipsen nach MWS (oben) bzw. CS (unten).

Funktionskeramiken

Die Zusammenarbeit mit dem IMF III hinsichtlich des Millimeterwellensinterns von Dickschichten aus elektrisch steuerbaren, keramischen Dielektrika wurde weitergeführt. Die detaillierte Charakterisierung der gesinterten Proben, dauert noch an.

Die projektierte Anlage zur mikrowellenunterstützten Gasphaseninfiltration (CVI) für die Herstellung von keramischen Mikrostrukturen befindet sich im Aufbau. Die Komponenten zum dosierten Verdampfen organischer Prekursoren wurden im IMF III bereits installiert und getestet. Diese werden Anfang nächsten Jahres in die dafür konzipierte Mikrowelleneinheit integriert und in Betrieb genommen.

Beteiligte Mitarbeiter

Dr. G. Link, Fr. S. Miksch, K.-T. Schäfer, M. Thamm, Prof. M. Thumm, R. Vincon

NUKLEAR: Programm Nukleare Sicherheitsforschung

Reduzierung der Radiotoxizität

Thermohydraulische und material-spezifische Untersuchungen zur Wärmeabfuhr von thermisch hochbelasteten Oberflächen mit Hilfe der Flüssigmetallkühlung

Langlebige hochradioaktive Spaltprodukte aus bestehenden Leistungsreaktoren sollen mit schnellen Neutronen, die entweder durch ein Spallationstarget in einer beschleunigergetriebenen unterkritischen Anlage oder in einem schnellen kritischen Reaktor erzeugt werden, in kurzlebige Radionuklide umgewandelt werden. Ziel ist es, die Endlagerdauer hochradioaktiven Abfalls (Plutonium, minore Aktiniden) von einigen 10^6 Jahren auf ca. 1000 Jahre zu reduzieren. Als Spallationstarget und als Kühlmittel solcher Anlagen sind unter anderem flüssiges Blei und Blei-Wismuth vorgesehen.

Ziel des Institutsbeitrages ist die Entwicklung eines Korrosionsschutzes insbesondere für hochbelastete Komponenten wie Hüllrohre und Pumpenmaterialien im Kontakt mit flüssigem Blei und Blei-Wismuth. Gepulste großflächige Elektronenstrahlen (GESA-Verfahren) werden eingesetzt, um die Oberflächen so zu modifizieren, dass sie den Anforderungen ihrer Einsatzumgebung genügen. Korrosionsteststände zur Auslagerung der Proben unter relevanten Bedingungen werden entwickelt und betrieben. Die Konditionierung des Flüssigmetalls hinsichtlich Sauerstoffkonzentration ist ein weiterer Schwerpunkt der Arbeiten.

Alle Arbeiten sind eingebunden in europäische und internationale Projekte und Kooperationen, z.B. EUROTRANS. Die wichtigsten Ergebnisse im Berichtszeitraum werden kurz zusammengefasst dargestellt.

In diesem Jahr wurde die Mitarbeit an zwei neuen EU-Projekten, ELSY und VELLA, und eine neue Kooperation mit JAEA, MEXT – Japan, begonnen.

Im Rahmen von ELSY (Blei gekühlter schneller Reaktor zur Transmutation) wird die Entwicklung eines effektiven Korrosionsschutzes für Hüllrohre mittels GESA untersucht und es werden mögliche Materialien für Flüssigmetallpumpen hinsichtlich Korrosion und Erosion getestet. VELLA hat zum Ziel, die Zusammenarbeit in Europa auf dem Gebiet der Flüssigmetall gekühlten Systeme durch den Austausch von Personal und das zur Verfügung stellen von Versuchseinrichtungen zu verbessern. Beide Projekte begannen dieses Jahr im Oktober und haben eine Laufzeit von 3 Jahren.



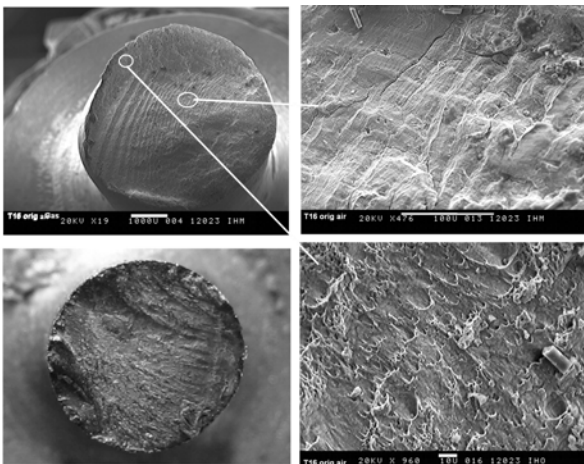
Neu aufgebauter Teststand für Korrosionstests in Blei-Wismuth.

Das Ziel des MEXT Projektes ist die Optimierung von ODS Stählen für Ihren Einsatz in Flüssigmetallen durch gezielte Variation ihrer Zusammensetzung. Die Auslagerung der Proben und deren Nachuntersuchungen werden am IHM durchgeführt. Für dieses Projekt wurde ein neuer Teststand COSTA 4-8 aufgebaut (obige Abbildung), der bei 2 Temperaturen und jeweils 2 Sauerstoffkonzentrationen betrieben wird. Acht unterschiedliche ODS Stähle wurden bis 3000h ausgelagert und werden nachuntersucht.

Im vergangen Jahr wurden Experimente zur Niedrig-Lastwechsel- Ermüdung durchgeführt und erste vorläufige Ergebnisse vorgestellt. Die detaillierte Auswertung der Daten bestätigte, dass bei 550 °C die Korrosionsschutzschicht (eine mit GESA modifizierte FeCrAlY Schicht) auf T91 Stahl keinen negativen Einfluss auf die Niedrig-Lastwechsel-Ermüdung hat. Einzig bei kleinen Dehnungen zeigt die Fraktographie kleine Unterschiede. Die Bruchfläche von GESA modifizierten Proben ist stärker gegen die Lastachsenrichtung geneigt als T91 Proben ohne modifizierte Schicht. Ansonsten sind die üblichen Ermüdungsbruchflächen, wie sie bei duktilem Bruch erwartet werden, zu erkennen (Abbildung).



Morphologie der Bruchflächen nach dem Test, links T91 original, rechts T91 mit GESA modifizierter Schicht.



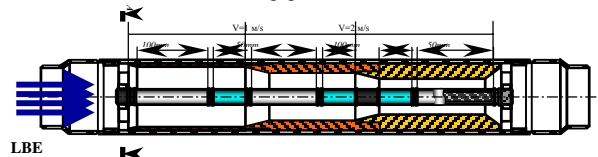
Bruchoberflächen nach dem Test bei unterschiedlichen Vergrößerungen.

In den Langzeitauslagerungsexperimenten von Hüllrohren aus austenitischem 1.4970 Stahl mit GESA modifizierter FeCrAlY-Schicht am IPPE in Obninsk konnte bei 500°C, 550°C und 650 °C und einer Auslagerungsdauer von ca. 10000 h, bis auf wenige lokale Spots, keinerlei Korrosionsangriff festgestellt werden (Abbildung).



GESA modifizierte FeCrAlY beschichtete 1.4970 Hüllrohre nach 10000h bei 550 °C in Blei-Wismuth.

In diesem Jahr wurden Langzeitauslagerungsversuche von GESA modifizierten FeCrAlY beschichteten T91 Proben bei 3 unterschiedlichen Temperaturen (500, 550 und 600°C) bei IPPE begonnen. Die ersten Proben wurden nach 2000 Stunden entnommen, weitere Proben werden nach 5000 und 10000h Auslagerung untersucht. Zusätzlich wird am IPPE der mögliche Einfluss der Fließgeschwindigkeit auf das Korrosionsverhalten untersucht. Dazu wurde ein Teststand konzipiert (Abbildung) und erste Proben 2000h lang getestet.



Teststand für Auslagerungsexperimente in Flüssigmetall bei unterschiedlichen Fließgeschwindigkeiten.

Um die modifizierten Hüllrohre unter Innendruck zu testen, wurde ebenfalls am IPPE ein Versuchstand konzipiert und die ersten 2000 h Tests durchgeführt. Auch diese Proben werden in den nächsten Wochen nachuntersucht.

Im Rahmen einer von der KSB Stiftung geförderten Promotionsarbeit und in Zusammenarbeit mit dem oben bereits erwähnten ELSY Projekt wurden aussichtsreiche Pumpenmaterialien auf ihre Tauglichkeit in Flüssigmetallen untersucht. Ein Reaktordesign sieht vor, die Pumpe im heißen Teil des Reaktors einzusetzen, was völlig neue Anforderungen an das Material stellt. Es muss korrosions- und erosionsbeständig sein bei Temperaturen bis 600 °C und Relativgeschwindigkeiten von bis 20 m/s. Erste Auslagerungsexperimente bei relevanten Temperaturen (bis 600°C) in stagnierendem Blei zeigten das Potential einiger Kandidaten. In diesem Zusammenhang wurde auch eine neuartige Werkstoffgruppe (MAX-Phases) Maxthal getestet. Dieses Material zeigt selbst bei 750 °C keinerlei Korrosionsangriff nach 2000h.

Ein Erosionsteststand, der die Untersuchung bei realistischen Bleigeschwindigkeiten erlauben soll, wurde konstruiert und nahezu vollständig aufgebaut. Damit können unter voller Sauerstoffkontrolle bis zu 12 Proben bei bis zu 20m/s und Temperaturen bis 650 °C getestet werden. Zur Simulation der Strömungsverhältnisse und zur Vorhersage der realen Relativgeschwindigkeiten von Blei und Probe je nach Lage wird seit diesem Jahr das Multiphysics Tool Fluidyn eingesetzt.

Beteiligte Mitarbeiter:

Fr. Dr. A. Heinzel, R. Huber, DI M. Kieser, **Dr. G. Müller**, Dr. G. Schuhmacher (Gast), P. Spieler, Dr. H. Muscher, A. Sivkovich, Dr. A. Weisenburger, DI (FH) F. Zimmermann

UMWELT: Programm Nachhaltigkeit und Technik

Verfahren der Hochleistungsimpulstechnik zur Regenerierung von Abwässern und zum Kohlenstoffmanagement

Die Behandlung biologischer Zellen mit starken gepulsten elektrischen Feldern kann zur irreversiblen Bildung großer Poren in der Zellmembran führen. Dieser in der Literatur mit Elektroporation bezeichnete Vorgang kann einerseits zur effektiven Gewinnung der Zellinhaltsstoffe, andererseits zur Abtötung von Mikroorganismen genutzt werden. Mittelfristige Ziele der Institutsarbeiten auf diesem Gebiet sind die umweltschonende Keimreduktion in Abwässern aus Kläranlagen und die effektive Gewinnung der Inhaltsstoffe biologischer Zellen für die Nahrungsmittelindustrie sowie die pharmazeutische und chemische Industrie. Daneben sollen die elektroporationsunterstützte mechanische Entwässerung und Trocknung von Energiepflanzen für die weitere energetische Verwertung untersucht werden. Voraussetzung für die industrielle Nutzung der Elektroporation ist die Verfügbarkeit zuverlässiger und wirtschaftlicher Hochspannungsgeneratoren.

Keimabtötung mittels hoher elektrischer Felder

Bestimmung der optimalen Parameter für die Entkeimung mittels Elektroimpulsbehandlung. Zu Beginn des Jahres wurden die Untersuchungen zur Optimierung der Elektroimpulsbehandlung weitergeführt. Es wurde bestätigt, dass der Rechteckimpuls, gegenüber exponentiell abfallenden Impulsen, statistisch betrachtet keine erhöhte Keiminaktivierung bewirkt. Des Weiteren wurde die Wirkung der Zellsuspensionsparameter, wie Leitfähigkeit, Zellkonzentration und Suspensionsinhaltsstoffe (EDTA, Chlorid) auf die Inaktivierung von *Pseudomonas putida* in PBS (phosphate buffer solution) untersucht. Als Ergebnis ist festzuhalten, dass die Wirkung der Elektroimpulsbehandlung bei unterschiedlichen Leitfähigkeiten gleich bleibt, wenn die eingetragene Energie konstant ist. Weiterhin haben Zusatzstoffe in der Zellsuspension, wie EDTA oder Chlorid keinen Einfluss auf die Inaktivierung. Die Keimreduktion ist von der Anfangszellkonzentration unabhängig.

Verhalten verschiedener Vertreter der Gram-positiven Bakterien bei der Elektroimpulsbehandlung. Die Elektroimpulsbehandlung von Abwasser aus Kläranlagen führt auf eine deutlich niedrigere Deaktivierung (1-2 log Stufen) als die Behandlung von Laborbakterienstämmen (*P. putida* 3,5±0,5 log Stufen). Die große Anzahl an Keimtypen mit spezifischen elektrischen Empfindlichkeiten könnte ein Grund für die geringe Deaktivierung von Abwässern sein. Es ist bekannt, dass Gram-positive Bakterien unempfindlicher sind als Gram-negative. Um die Wirkung elektrischer Impulse auf die Deaktivierung von Gram-positiven Bakterien aus Abwasser zu untersuchen wurden drei Enterokokken-Typen ausgewählt (*E. faecalis*, *E. faecium* und *E. casseliflavus*). Die Behandlung erfolgte mit elektrischen Rechteckimpulsen mit Impulsdauer zwischen 600 ns und 10 µs und Feldstärken zwischen 40 und 100 kV/cm. Die Tabelle zeigt die Deaktivierung von Laborbakterienstämmen mittels Elektroimpulsbehandlung in Abhängigkeit von der spezifischen Energie. Für eine gleiche Inaktivierung von Gram-positiven Bakterien wie bei Gram-negativen Bakterien, ist eine höhere

spezifische Energie notwendig. Die elektrische Empfindlichkeit variiert jedoch auch innerhalb dieser Bakterien Typen.

Stamm	W (J/ml)	Deakt. (log)	%
<i>Pseudomonas putida</i> DSM 291	120	3,2	99,94
<i>E. faecalis</i> DSM20478	124	0,7	80
<i>E. faecium</i> DSM20477	121	0,3	50
<i>E. faecium</i> 1265	116	0,8	84
<i>E. faecium</i> 1266	126	0,7	80
<i>E. faecium</i> B7641	125	2,0	99
	514	4,0	99,99
<i>E. casseliflavus</i> DSM 20680	116	0,6	75
	509	2,9	99,87

ermittelt im Plattengussverfahren

Deaktivierung von Laborbakterienstämmen mittels Elektroimpulsbehandlung.

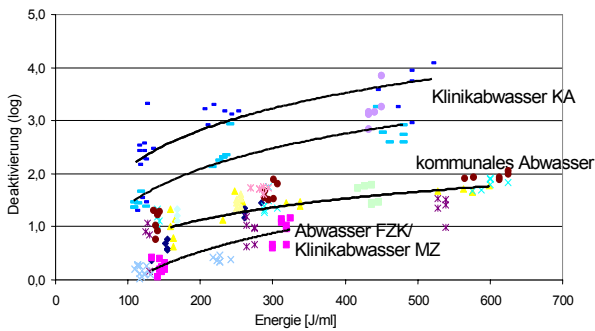
Elektroimpulsbehandlung von Abwasser aus Kläranlagen und Kliniken zur Keimreduktion. Dazu wurden Abwasserproben aus den Kläranlagen aus Neureut (Zulauf und Ablauf), Kandel, Berghausen (Zulauf) und FZK (Zulauf), so wie Abwasserproben aus einer Karlsruher Klinik und dem Uniklinikum in Mainz entnommen. Die Elektroimpulsbehandlung erfolgte mit einem Kabelimpuls-generator, der Rechteckimpulse mit bis zu 100 kV/cm und einer Impulsdauer zwischen 0,6-2 µs liefert. Für die Ermittlung der Deaktivierungsraten wurde das Plattengussverfahren auf Agar Medien verwendet. In der nächsten Tabelle ist die Inaktivierung in Abwässern in Abhängigkeit von der eingesetzten Energiedichte dargestellt. Die Ergebnisse zeigen eine spezifische und heterogene Inaktivierung von Abwässern. Die Inaktivierung ist vom Entnahmezitpunkt und von der Keimmischpopulation abhängig. Bei einer erhöhten Konzentration an elektrisch unempfindlichen Keimen wird die gesamte Inaktivierung im Abwasser von der geringen Inaktivierung dieser unempfindlichen Keime dominiert. Unter Verwendung von Chromocult Enterokokken-Agar konnte gezeigt werden, dass sich die Keimpopulation nach der Impulsbehandlung zu einem höheren Anteil an Gram-positiven Bakterien (Enterokokken) verschiebt.

Abwasser	Lf (µS/cm)	Energie (J/ml)	Deaktivierung log	%
Neureut, Zulauf	1340	150 - 300	0,6 - 2,5	75 - 99,7
Neureut, Zulauf	1400	120 - 480	1,1 - 2,9	92 - 99,87
FZK, Zulauf	1300	150 - 600	0,6 - 2,0	75 - 99
Kandel Zulauf	1250	150 - 580	1,0 - 1,9	90 - 98,7
Berghausen Zulauf	613	150 - 580	0,8 - 2,1	84 - 99,2
Neureut Ablauf	1100	130 - 530	0,16 - 1,3	31 - 95
Klinikabwasser KA	1600	100 - 380	2,7 - 3,4	99,8 - 99,96
Enterokokken (KAA)	1400	168	0,43	63
Klinikabwasser Mainz	2100	120 - 250	0,1 - 0,47	20 - 66
Enterokokken*	2100	126	0,1	20
„Gram-Positive“*	2100	126	0,06	13

* mit Chromocult Enterokokken-Agar

Inaktivierung in Abwässern in Abhängigkeit von der eingesetzten Energiedichte.

Die Inaktivierungseffizienz wird zur Verdeutlichung der Abhängigkeit von der spezifischen Energie und der Abwasserprobe in der folgenden Abbildung grafisch dargestellt.



Deaktivierungseffizienz von Elektroimpuls-Behandlung in Abhängigkeit der eingesetzten spezifischen Energie.

Untersuchung zur Gentoxizität von Elektroimpuls-behandeltem Abwasser. Dazu wurden die behandelten Abwasserproben auf Gentoxizität mittels umu-Test untersucht. Der Nachweis von Gentoxizität wird anhand der β -Galactosidase-Aktivität, die an die Synthese von Reparatur-Genen gekoppelt ist, ermittelt. Der G_{EU} -Wert stellt den Verdünnungsfaktor dar, bei dem keine signifikante Induktion der β -Galactosidase mehr detektiert werden kann.

Abwasser	G_{EU} vor Impulsbehandlung	G_{EU} nach Impulsbehandlung
Neureut Zulauf	-	-
Blankenloch Zulauf	-	-
Klinikabwasser KA	12	24
Klinikabwasser MZ	6	96

Die Tabelle zeigt die G_{EU} -Werte für verschiedene Abwasserproben vor und nach Impulsbehandlung. Kommunale Abwässer zeigen weder vor noch nach Elektroimpulsbehandlung eine Gentoxizität. Bei den getesteten Klinikabwässern war schon vor der Impulsbehandlung ein gentoxisches Potential nachweisbar, das durch die Impulsbehandlung weiter erhöht wurde.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass zur Keimreduktion in realen Abwässern mehr Energie aufgewandt werden muss als bei der Behandlung von rein Gram-negativen Laborstämmen, wie beispielsweise *P. putida*. Eine endgültige energetische und wirtschaftliche Betrachtung des Verfahrens wird erst im kommenden Jahr, nach erfolgtem Dauerbetrieb der Entkeimungs-Prototypanlage an einem Abwasserteilstrom im Uniklinikum Mainz, vorgenommen. Ein Anstieg der Gentoxizität in Abwasserproben mit eingangs bereits vorhandener Toxizität ist nicht als problematisch einzustufen.

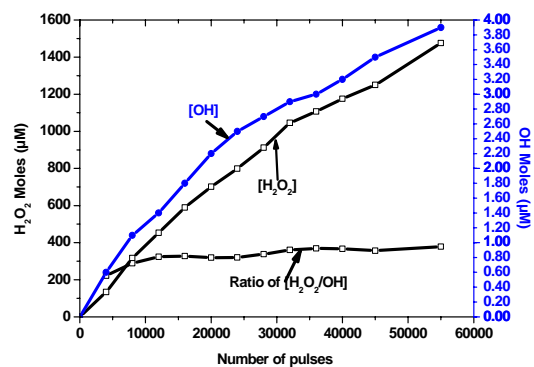
Keimabtötung mittels Unterwasserkoronaentladungen

Der Einsatz von Unterwasserkoronaentladungen ist eine Möglichkeit zur Steigerung der Effizienz bei der Keimabtötung. Unterwasserkoronaentladungen sind durch hohe elektrische Feldstärken an der Streamerspitze, Druckimpulse, intensive UV-Strahlung und die Erzeugung von Oxidantien wie OH-Radikale, H_2O_2 , O_3 , etc. gekennzeichnet. Es wird erwartet, dass die kombinatorische Wirkung dieser Effekte zu einer effizienteren Abtötung von Mikroorganismen führt.

Für die Entkeimung von Wässern und Abwässern sind jedoch große Durchsätze erforderlich. Daher wurde am IHM mit der Entwicklung eines, zu großen Volumina skalierbaren, Koronareaktors begonnen. In diesem Reaktor wird eine mit einer porösen dünnen Keramikschiicht beschichteten Anode zur gleichzeitigen Erzeugung zahlreicher Streamer verwendet. Dadurch ist es möglich, Koronaentladungen in einem relativ großen Volumen hervorzurufen.

Neben der Optimierung der Reaktorordnung ist die quantitative Bestimmung der spezifischen, auf die eingesetzte Energie bezogenen, Produktionsrate von Oxidantien ein weiteres Ziel der im Rahmen einer Doktorarbeit durchgeführten Untersuchungen. Hierfür wurden selektive chemische Reagenzien entwickelt. Primäres Produkt der Koronaentladungen sind OH-Radikale, die ihrerseits über verschiedene Reaktionsketten zu sekundären Oxidantien wie H_2O_2 führen können. Wegen der hohen Reaktivität und der extrem kurzen Lebensdauer ist der selektive Nachweis der OH-Produktionsrate besonders schwierig. Ein geeignetes Reagenz ist das Bi-Natriumsalz der Terephtalsäure (NaTA), das nach der Reaktion mit OH-Radikalen zu 2-Hydroxyterephtalsäure umgewandelt wird, welche eine intensive Fluoreszenz zeigt. Die Eichung des synthetisierten NaTA wurde im vergangenen Berichtszeitraum abgeschlossen. Die H_2O_2 - Konzentration wurde über Kolorimetrie mit Hilfe der Reaktion $TiO(SO_4)+H_2O_2 \rightarrow TiO_2(SO_4)+H_2O$ bestimmt. Es zeigte sich, dass das Verhältnis von OH- und H_2O_2 -Produktionsraten unabhängig von der Pulszahl konstant blieb. Dies wird als Hinweis auf die Abhängigkeit der sekundären H_2O_2 -Produktion von der primären OH-Produktion gesehen (Abbildung). Primärer Ort der Produktion von OH-Radikalen ist der Streamerkanal. Mit chemischen Reagenzien nachweisbar ist jedoch nur der Bruchteil der ursprünglich produzierten OH-Radikale, der die Streamer-Randschicht oder das Wasser selber erreicht oder über andere Effekte (UV, Stoßwellen, etc.) dort gebildet wird. Die Vermutung, dass der Hauptort der OH-Produktion im Streamer-Kanal liegt, wurde durch die Beobachtung untermauert, dass die nachgewiesenen Konzentrationen von OH und H_2O_2 der mittleren Streamerlänge proportional sind.

Zur Verstärkung der Produktion von Oxidantien wurden auch verschiedene Gase (O_2 , O_3 , Argon u.a.) in Form von Mikroblasen durch den Reaktor geleitet. Dabei konnte keine signifikante Erhöhung der Konzentration der Oxidantien beobachtet werden. Ein Standardverfahren zur Bestimmung der keimtötenden Fluenz polychromatischer UV-Strahlung ist die Verwendung von Uridin als Nachweissubstanz. Es wurde jedoch gefunden, dass dieses Verfahren bei Anwesenheit von Stoßwellen ungeeignet ist.



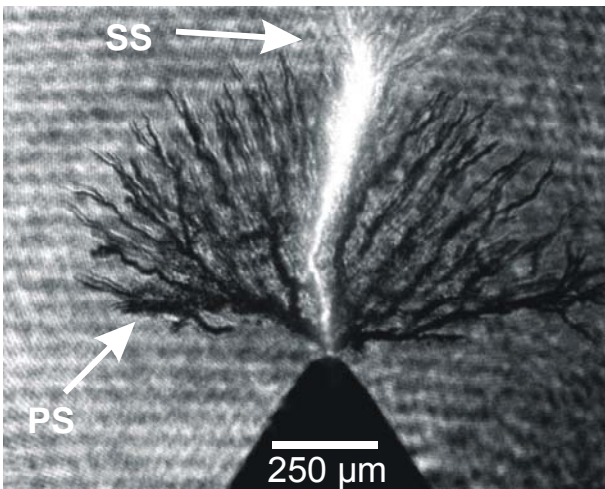
Verhältnis der Produktionsraten von H_2O_2 und OH als Funktion der Pulszahl.

Im Berichtszeitraum wurde auch mit Untersuchungen zum Nachweis der Wirksamkeit von Koronaentladungen für die Abtötung von Bakterien begonnen. Hierzu wurde zunächst der Laborstamm *Pseudomonas Putida* eingesetzt. Dabei wurde in ersten Versuchen eine Reduktion der Bakterienkonzentration um mehr als 4,5 Logstufen bei einem Energieeinsatz von 20 J/ml gefunden.

Modell zum Mechanismus der Streamerentwicklung in Wasser

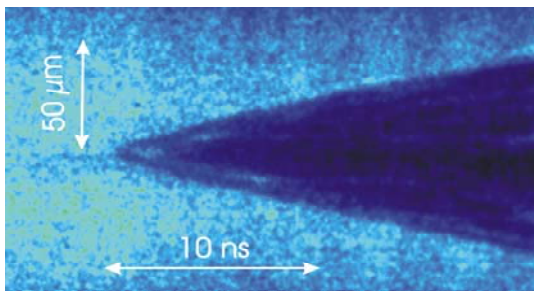
Die detaillierte Auswertung und Analyse der umfangreichen Ergebnisse optischer Messungen wurde fortgeführt, um ein phänomenologisches Modell der Streamerentstehung und -ausbreitung bei Unterwasser-Koronaentladungen zu erarbeiten.

Bereits im frühen Stadium der Untersuchungen und in Übereinstimmung mit Berichten aus der Literatur waren im flüssigen Dielektrikum zwei unterschiedliche Entladungsarten zu beobachten. *Primäre Streamer* (PS) besitzen eine büschelförmige Struktur aus 100-200 radialen Filamenten mit einer ideal sphärischen Symmetrie (2π), die einer statischen, raumladungsfreien Feldverteilung um die metallische Spitze folgen (Abbildung). Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der PS liegt bei 3 km/s. Der *sekundäre Streamer* (SS) startet an der Peripherie des PS und breitet sich sowohl zur Anode als auch zur Kathode gerichtet aus. Seine Fortpflanzungsgeschwindigkeit zur Kathode beträgt bis zu 30 km/s.



Schattenbild eines Primärstreamers mit einsetzendem Sekundärstreamer.

Zur weiteren Klärung der Vorgänge zur Entstehung und Ausbreitung der Unterwasser-Koronaentladung ist die Kenntnis der Plasma-Parameter der Entladung notwendig.



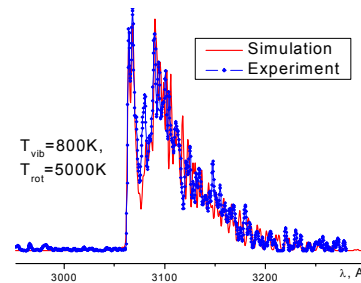
Hochauflösende Streakaufnahme der Druckwellenausbreitung ausgehend von einem Sekundärstreamer.

Der interferometrisch gemessene Anfangsdruck im Streamerkanal (s. JB-2005) liegt im Bereich von 20-30 kbar. Bei der Betrachtung der Zustandsgleichungen von Wasser wird schnell klar, dass dieser Druck bei Dichten, die lediglich ein Zehntel der Normaldichte betragen, nur bei sehr hohen Temperaturen zustande kommen kann. Zur Bestimmung des Anfangsdrucks aus interferometrischen Messungen wurde eine Zylindersymmetrie der Druckwellenausbreitung angenommen. Zur Absicherung wurde dieses Ergebnis mit Hilfe räumlich und zeitlich hochauflösender Streakaufnahmen von Schlierenbildern verifiziert (obige Abbildung). Aus der Geometrie des

Anfangskonus kann direkt auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit geschlossen werden. Daraus ergibt sich ein Anfangsdruck von 27 kbar, was im interferometrisch bestimmten Druckbereich liegt.

Die Spektren von PS und SS in den Ästen weisen zu jedem Zeitpunkt eine deutlich erkennbare Linienstruktur auf. In einem dichten Plasma ist dies nur dann möglich, wenn die Plasmatemperatur unter 1 eV, entsprechend <10000 K, liegt.

Ein weiteres Indiz für eine geringe Plasmatemperatur liefert die Anpassung gemessener, hoch aufgelöster OH-Spektren von SS mit Hilfe des LIFBASE-Codes (Abbildung). Die Spektren wurden bei verschiedenen Rotations- und Vibrationstemperaturen simuliert. Eine Simulation mit $T_{\text{vib}} \sim 800$ K und $T_{\text{rot}} \sim 5000$ K gibt das gemessene OH-Spektrum am besten wieder. Dieses Ergebnis zeigt, dass kein thermodynamisches Gleichgewicht im SS herrscht. Die Rotationstemperatur fällt in die erwartete Größenordnung, die Vibrationstemperatur erscheint viel zu niedrig. Geht man jedoch davon aus, dass die Anregung der Rotationszustände vor allem durch Wechselwirkung mit Elektronen stattfindet, muss die Elektronentemperatur im dichten Plasma ebenfalls bei etwa 5000 K liegen.



Vergleich eines gemessenen OH-Spektrums mit einer LIFBASE-Simulation.

Das Ergebnis dieser Überlegungen ist, dass es sich beim vorliegenden Streamerplasma mit derart niedrigen Temperaturen um ein sehr dichtes Plasma mit Dichten in der Größenordnung von Wasser unter Normalbedingungen handeln muss. Als wichtiges Ergebnis folgt daraus, dass der Durchschlag zur Entstehung und Ausbreitung des SS *direkt im flüssigen Dielektrikum* stattfindet und nicht wie weit verbreitet angenommen von einem Gebiet mit *geringer Dichte* ausgeht. Somit ergibt sich folgendes Bild für die Entstehung und Fortpflanzung der Unterwasser-Koronaentladung:

Primär Streamer (PS)

Die auftretende Kugelsymmetrie und die Vielzahl synchron aufgebauter Filamente sprechen dafür, dass die einzelnen Äste der Büschel Konglomerate aus Mikroblasen mit geringer Leitfähigkeit sind, die durch direkte Wechselwirkung zwischen starkem elektrischem Feld und flüssigem Dielektrikum entstehen. Ein möglicher Mechanismus für eine solche Wechselwirkung ist die anisotrope Instabilität von flüssigem Wasser. In diesem Fall wird die Flüssigkeit in Folge der hohen elektrischen Feldstärke phaseninstabil. Entlang der elektrischen Feldlinien bilden sich Gaskanäle aus.

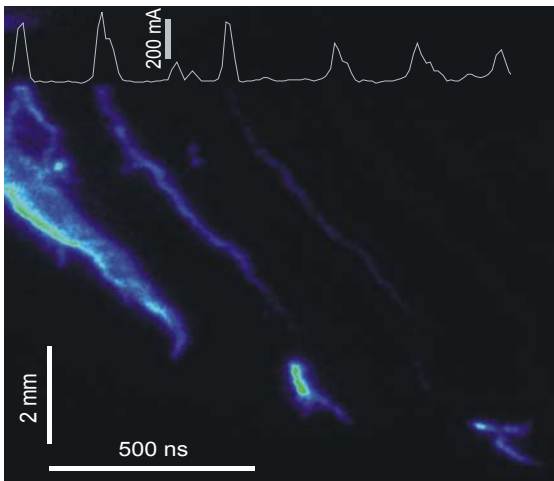
Gleichzeitig mit der Fortpflanzung entlang des elektrischen Feldes dehnen sich die Kanäle auch lateral aus. Dadurch entsteht ein Dichtegradient mit niedrigsten Werten an der Wurzel des Büschels. Von dort breitet sich ein Gebiet mit zunehmend effektiver werdender Aufheizung des Gases aus. Mit steigender Temperatur des Plasmas nimmt auch das Kanal - Potential zu. Durch das Zusammenspiel von zunehmendem Potential entlang des Kanals und Ausdehnung der Kanäle wird die Durch-

schlagsfestigkeit des Gases an einer Stelle überschritten. Eine lokale Mikroentladung wird gezündet. In beiden Richtungen der Mikroentladung wird das Gas schnell aufgeheizt. Dadurch erhöht sich die Leitfähigkeit. Dies führt dazu, dass das elektrische Feld aus dem Kanal verdrängt wird. Vor dem Streamerkopf, außerhalb des Kanals, ist die Feldstärke am höchsten. Im Gebiet unmittelbar vor dem Streamerkopf wird basierend auf feldinduzierter Dissoziation oder direkter Ionisation im Wasser die Entladung weiter fortschreiten. Damit beginnt die SS-Phase.

Sekundär Streamer (SS)

In hochohmigen Flüssigkeiten ist der intermittierende Charakter der SS Entwicklung besonders deutlich zu beobachten. Zu Zeitpunkten, zu denen der Streamer gerade um eine bestimmte Länge wächst, registriert man zeitgleich einen Stromimpuls und eine Lichtemission.

In der Pausenzeit sind kein Stromfluss und keine Lichtemission zu verzeichnen. Die Dauer der Pause ist abhängig von der Leitfähigkeit der Flüssigkeit und kann im Falle eines hochohmigen Dielektrikums einige hundert ns betragen. Die Tatsache, dass der Streamerkanal nur dann sichtbar ist, wenn Strom fließt, zeigt, dass der Kanal in den Pausen kalt und hochohmig bleibt. Nur in der aktiven Phase wird Gas im Kanal kurzzeitig durch den Strom erhitzt, der fließt, um die Ladungsträger in neu geschaffenen Gebieten von der Streamerspitze zu polarisieren. Die Zuwachslänge des SS während eines Stromimpulses kann bis zu einige Millimeter betragen.



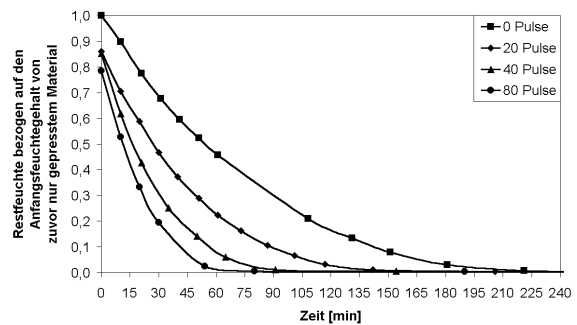
Streakaufnahme eines Sekundärstreamers mit zugehörigem Stromverlauf, oben.

Das weitere Vorwachsen des Streamers stellt sich folgendermaßen dar: Trotz niedriger Plasmatemperaturen ist der bestehende Streamerkanal zum Teil polarisiert (aufgeladen). Dieser Aufladevorgang läuft kontinuierlich, solange der Potentialabfall entlang des Kanals besteht. Je nach Leitfähigkeit des Plasmakanals kann dieser Prozess einige hundert ns dauern. Wenn an der Streamerspitze die Durchschlagsgrenze überschritten ist, kommt es zu einer schlagartigen Ladungsträgervermehrung im flüssigen Wasser vor der Streamerspitze. Damit wird die derzeit verbreitete Vorstellung, dass der Durchschlag in einem Bereich mit geringerer Dichte stattfindet, widerlegt.

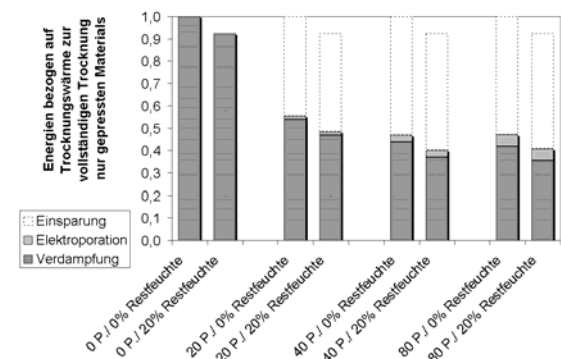
Zellaufschluss

In 2006 begann die Förderung für das Verbundprojekt BIOLOG zur Trocknung von Energiepflanzen. Für die energetische Nutzung von Biomasse, beispielsweise durch das am ITC/CVP des Forschungszentrums entwickelte BIOLIQ-Verfahren, ist ein trockenes Ausgangsmaterial erforderlich. Durch die Nutzung von jungen und im Saft stehenden Grünpflanzen, wie sie

beispielsweise bei der Zwei-Felder-Wirtschaft nach Scheffer als Vorfrucht erzeugt werden können oder beim Rasenschnitt anfallen, soll das Aufkommen an Biomasse für die energetische Nutzung erheblich vergrößert werden. Solches Material muss jedoch zur Lagerung haltbar gemacht und für die Weiterverarbeitung trocken zur Verfügung gestellt werden. Im Rahmen des Kooperationsprojekts mit Partnern aus Forschung und Industrie ist daher geplant, zwei alternative Verarbeitungslinien zu untersuchen: In einer Linie wird die frische Biomasse zur Haltbarmachung siliert und vor der Weiterverarbeitung entwässert. Im anderen Fall erfolgt die Haltbarmachung durch anfängliche Trocknung auf unter 20 % Restfeuchte. Die Aufgabe des IHM ist es, die Grundlagen für einen elektrischen Zellaufschluss zur Anwendung in beiden Linien zu erarbeiten und Daten für eine Effizienzbetrachtung der Elektroporation bereitzustellen. Bisher wurden Laboruntersuchungen zur elektroporationsunterstützten Trocknung von Mais, Gras und Luzerne mit einer Probengröße von ca. 200 g durchgeführt. Hierfür wurden die Pflanzen geschnitten, im eigenen Saft elektroporiert, durch Pressen entsaftet und schließlich im Umluft-Ofen bei 105 °C getrocknet. Anhand der aufgenommenen Trocknungskurven wurde die Effektivität des Zellaufschlusses beurteilt. Elektroporierte Proben zeigen ein deutlich beschleunigtes Trocknungsverhalten. Zudem zeigen die Versuche bei Betrachtung von eingesetzter Trocknungswärme und zugeführter Pulsenergie einen energetischen Vorteil bei der Applizierung elektrischer Pulse. Die folgenden Bilder zeigen am Beispiel von jungen Maispflanzen Trocknungskurven und Energien für thermische Trocknung und Elektroporation abhängig von der Pulsanzahl und bezogen auf die Daten einer Prozessierung ohne Elektroporation.



Trocknungskurven von jungen Maispflanzen bei Warmluft-trocknung: Relative Restfeuchteverläufe bei Variation der Pulsanzahl.



Gegenüberstellung des relativen Energiebedarfs für Warmlufttrocknung und Bepulsung für junge Maispflanzen in Abhängigkeit von der Pulsanzahl und bei unterschiedlichen Ziel-Restfeuchten, jedoch ohne Berücksichtigung von Wirkungsgraden und Verlusten.

Die Laboruntersuchungen können jedoch nicht die Verluste und Wirkungsgrade technischer Anlagen nachbilden. Zur Untersuchung und zur Optimierung eines technischen Gesamtprozesses zur Bereitstellung von Ausgangsprodukten für die

energetische Nutzung von Biomasse, beteiligt sich das IHM seit Mitte des Jahres an einem neuen Verbundprojekt namens BIOLOG. Das Projekt BIOLOG wird vom Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) über die Projektträgerschaft der "Fachagentur Wachsende Rohstoffe (FNR)" gefördert.

Auch im Jahr 2006 wurde an den bestehenden Projekten weitergearbeitet:

Im Rahmen der Kooperation mit der SÜDZUCKER AG zur Elektroporation von Zuckerrüben wurden dieses Jahr weitere Laboruntersuchungen zur Elektroporation von Zuckerrüben im Zusammenhang mit einer Methode zur elektrischen Aufschlussgradbestimmung (Phasenwinkelmessung) durchgeführt. Die Entscheidung zum Aufbau eines Funktionsmusters mit einem Durchsatz von 1500 t Rüben pro Tag wurde verschoben. Stattdessen soll im Jahr 2007 ein durch SIEMENS gelieferter Marx-Generator auf dem Gelände der SÜDZUCKER AG einem Langzeittest unterzogen werden. Von Seite des IHM werden die Planungen und die Versuchsdurchführung begleitet.

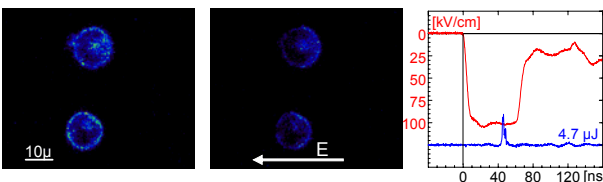
Der Entwurf des Zündtransformators zur Überspannungstriggerung von Marx-Generatoren wurde dieses Jahr überarbeitet. Die verbesserte Version wird derzeit in den Werkstätten des IHM neu gefertigt.

Zur Elektroporation von Rotweitrauben wurden dieses Jahr in Zusammenarbeit mit dem Staatlichen Weinbauinstitut Freiburg Versuche im Labormaßstab durchgeführt. Dabei wurden verschiedene Sorten unter Variation der Pulsparameter behandelt und mit thermischen Aufschlüssen als Referenz verglichen. Die Labordaten befinden sich derzeit in der Auswertung.

Messung der Membranaufladung von Zellen in Suspension

Die Aufladung der Plasmamembran biologischer Zellen ist eine notwendige Voraussetzung für die feldinduzierte Erzeugung von Poren in der Zellmembran (Elektroporation). Das Aufladeverhalten im Nanosekundenbereich ist bislang unbekannt. In Zusammenarbeit mit dem Frank Reidy Center for Bioelectrics der Old Dominion University in Norfolk wurden die Versuche zur Membranaufladung von Einzelzellen (*Jurkat*-Zelllinie) in Suspension bei Beaufschlagung mit sehr hohen ns-gepulsten externen Feldern fortgeführt.

Die Zellmembranen werden mit einem schnellen, feldsensitiven Fluoreszenzfarbstoff (ANNINE-6) gefärbt und in einer Mikroelektrodenanordnung direkt unter dem Fluoreszenzmikroskop mit gepulsten elektrischen Feldern beaufschlagt. Zur Messung der Fluoreszenzantwort zu einem bestimmten Zeitpunkt während des elektrischen Impulses wird die Zellsuspension mit einem 5 ns langen Laserimpuls beleuchtet und das Lichtsignal mit einer Bildverstärkerkamera aufgenommen (JB 2004).

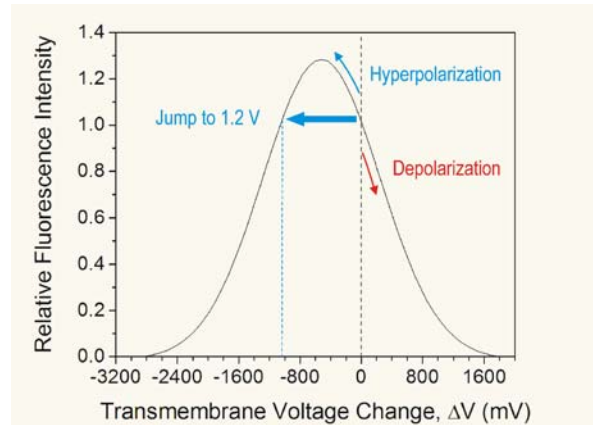


Fluoreszenzbilder von Zellen vor und während eines elektrischen Impulses von 100 kV/cm. Der Zeitpunkt der Aufnahme liegt bei 45 ns nach Impulsbeginn.

Auffällig in der Fluoreszenzantwort ist, dass sowohl die anodenseitige als auch die kathodenseitige Zellhemisphäre eine Verringerung der Fluoreszenzintensität zeigt, obwohl auf der Anodenseite, wie aus Kleinsignalmessungen bekannt, eine Zunahme der Intensität (Hyperpolarisation) zu erwarten gewesen wäre.

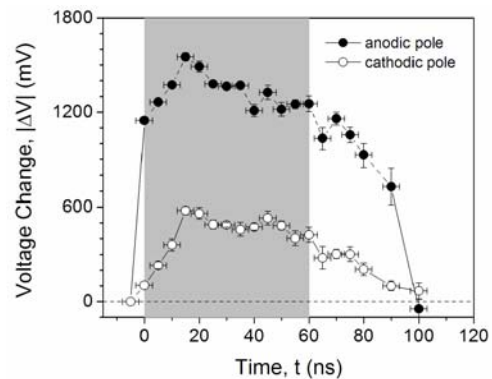
Eine mögliche Erklärung für dieses Verhalten liegt in der Doppeldeutigkeit der Kalibrierfunktion. Rein rechnerisch kann

die Transmembranspannung auf der anodenseitigen Hemisphäre bereits innerhalb der ersten Nanosekunde während des Impulsanstiegs auf Werte größer 1,2 V ansteigen. Damit besitzt der rechte Ast der Kalibrierkurve in der nächsten Abbildung Gültigkeit.



Kalibrierkurve von ANNINE-6 bei einer Anregungswellenlänge von $\lambda = 440 \text{ nm}$.

Unter dieser Annahme ergibt sich eine stark asymmetrische Aufladung an den Zellhemisphären. Während die kathodenseitige Zellhemisphäre auf Werte um 600 mV aufgeladen wird, liegt die Transmembranspannung auf der Anodenseite bei mehr als 1,5 V, was nur mit einer unterschiedlichen Porenbildungs-dynamik auf den Zellhemisphären erklärt werden kann.



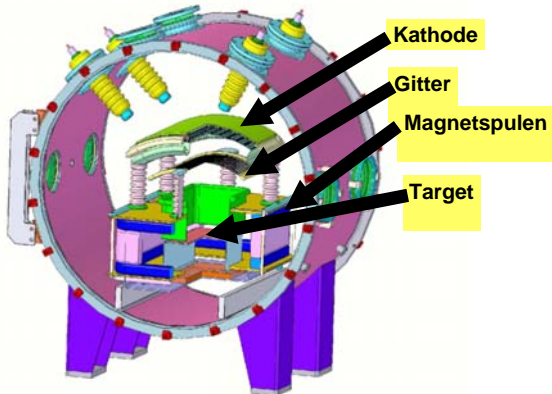
Zeitlicher Verlauf der Membranspannung auf der anodenseitigen und kathodenseitigen Zellhemisphäre bei Beaufschlagung mit einem 60 ns langen Feldimpuls von 100 kV/cm.

Unter der Voraussetzung, dass der verwendete Membranfarbstoff bei hohen Transmembranspannungen ebenso linear antwortet, wie es für Spannungen von bis zu $\pm 300 \text{ mV}$ in der Literatur belegt ist, ergibt sich für die Porenbildung bei hohen Feldern folgendes Bild: Bereits während der ersten 15 Nanosekunden werden sehr viele kleine Poren erzeugt, die bereits einen begrenzten Strom durch die Membran, getragen von vorwiegend kleinen Ionen – Spezies, zulassen. Die Membranspannung kann trotz dieses Stromflusses durch die Poren bis zu einem Zeitpunkt von 15 ns weiter ansteigen, jedoch langsamer als während der Impulsflanke. Danach beginnt das Wachstum der Poren. Der Strom wird jetzt von allen vorhandenen Ionen Spezies getragen. Eine weitere Aufladung der Membran wird damit unterbunden. Mit dem weiteren Wachstum der Poren nimmt der Strom zu, die Membranspannung geht deshalb gegen Ende des Impulses leicht zurück. Die Asymmetrie in der Membranspannung wird derzeit damit erklärt, dass auf der anodenseitigen Hemisphäre generell kleinere Poren gebildet werden als auf der Kathodenseite der Zelle.

Die Prüfung des Großsignal- und Zeitverhaltens des verwendeten Fluoreszenzfarbstoffes ist Gegenstand künftiger Arbeiten.

Verbesserung der Eigenschaften von Werkstoffoberflächen mit GESA inklusive Arbeiten zu ASTERIXE

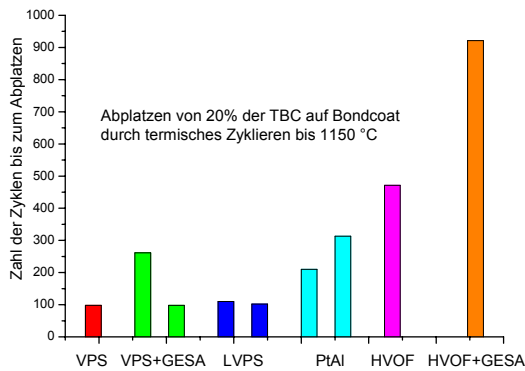
- Dünnschicht Solarzellen basierend auf amorph abgeschiedenem Silizium haben das Potential, langfristig Strom zu konkurrenzfähigen Kosten zu liefern. Dazu müssen diese amorphen Schichten kristallisiert werden. Erste Untersuchungen im vergangenen Jahr zur Rekristallisation von dünnen Siliziumschichten zeigten das Potential von niederenergetischen Elektronenstrahlen (<40keV). Eine neue Elektronenstrahlquelle (flache großflächige Kathode ca. 1000cm²), die einen stabilen 40 keV Elektronenstrahl liefert, wurde konzipiert. Diese neue Kathode wurde so ausgelegt, dass sie in die bestehende GESA IV integriert werden kann (Abbildung).



Integration einer niederenergetischen Kathode zur Rekristallisation dünner Schichten in GESA IV.

- Im Rahmen der Arbeiten zu ASTERIXE war die Untersuchung der Haftfestigkeit von TBC - Schichten (Thermal barrier coatings), die auf Turbinenschaufeln zur Wirkungsgradsteigerung durch Erhöhung der Gastemperatur aufgebracht werden, von zentraler Bedeutung.

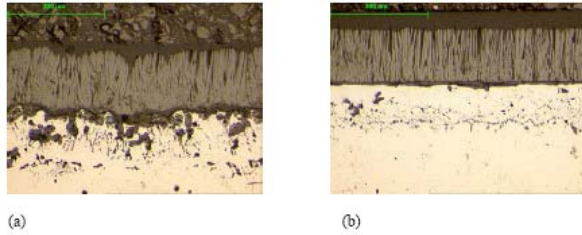
Der Einfluss des Beschichtungsverfahrens auf die Haftfestigkeit von TBC's wurde in Zusammenarbeit mit Kollegen in Cranfield, England untersucht. Als Referenzprobe wurde ein PtAl MCrAlY Bondcoat verwendet. Einen signifikanten Unterschied in der Zyklenzahl bis zum Abplatzen der TBC kann nur bei einer Beschichtungsmethode gefunden werden. HVOF gespritzte Schichten sind deutlich hafter (Abbildung). Eine Verdoppelung dieser bereits verbesserten Haftfestigkeit lässt sich durch eine nachgeschaltete GESA Umschmelzung erreichen. So hergestellte Proben haben eine doppelt so lange Lebensdauer im Vergleich mit nicht GESA behandelten. Vergleicht man diese Proben mit den Referenz - Proben, ist der Gewinn an Lebensdauer noch deutlicher(> einem Faktor 3).



Zyklenzahl bis zum Abplatzen von 20% der TBC auf unterschiedlich hergestellten Bondcoats.

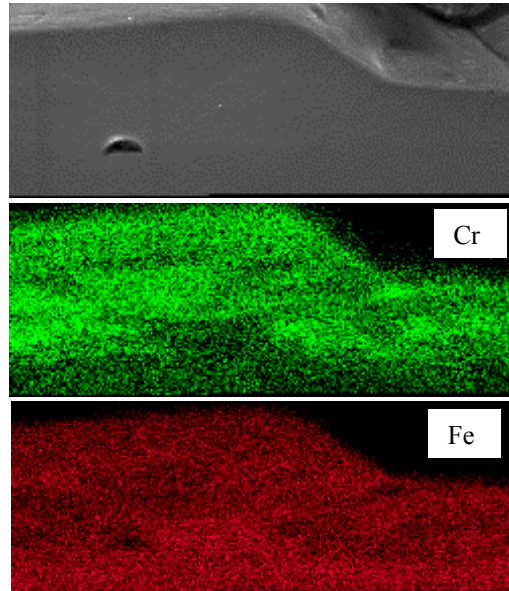
REM-Aufnahmen (nächste Abbildung) zeigen die Bondcoats nach der Auslagerung. HVOF gespritzte zeigen ohne GESA deutliche innere Oxidation und sehr tief reichende Oxidnester.

Die GESA behandelte HVOF Probe zeigt keine innere Oxidation, eine dünne recht gleichmäßige Oxidschicht und kaum Oxidnester. Aus Probenmangel konnte bisher jeweils nur eine dieser Proben untersucht werden. Diese thermozyklischen Experimente werden im nächsten Jahr weitergeführt.



REM eines Querschnittes nach thermozyklischen Experimenten a) HVOF 471 Zyklen b) HVOF + GESA 921 Zyklen.

Erste Experimente zum Umschmelzverhalten von Noricromschichten auf Duplexstahl zeigten die generelle Machbarkeit. In Zusammenarbeit mit KSB und der CEA wurde die reproduzierbare Abscheidung und anschließende Verdichtung mittels GESA untersucht. Nur abgeschiedene Schichten zeigten zwar eine sehr hohe Abriebfestigkeit im Test, offenbarten jedoch in Nachuntersuchungen Probleme hinsichtlich ihrer Haftfestigkeit, was sich insbesondere bei Scherkräften, wie sie im Alltags-einsatz erwartet werden, negativ auswirken würde.



REM eines Querschnittes einer GESA umgeschmolzenen Noricomschicht und Elementverteilung von Cr und Fe.

Die GESA Umschmelzung erzeugt eine metallische Anbindung der Schicht wobei durch die noch immer inhomogene Abscheidung Poren entstehen in denen einige bis zu 10 µm große Karbide liegen. Da der Beschichtungspartner (CEA) mit dem Prozess (EBPVD) mehr Probleme als erwartet hatte, werden diese für die Industrie aussichtsreichen Arbeiten über das offizielle Ende des Projektes weitergeführt und abgeschlossen.

Ein zentraler Arbeitsschwerpunkt im ASTERIXE - Projekt in diesem Jahr war die Auslegung einer kombinierten Beschichtungs- und Nachbehandlungsanlage. Erste Betrachtungen jedoch zeigten, dass Magnetron - Beschichtungsanlagen und GESA Umschmelzanlagen aufgrund ihrer sehr unterschiedlichen Magnetfeldkonfigurationen nicht in einem Gerät vereinigt werden können. Das endgültige Design für eine Industrie-GESA basiert deshalb auf einem getrennten Konzept, welches zudem genug Flexibilität gewährleistet. Den Auslegungsdaten wurden die Ergebnisse der Umschmelzung von HVOF gespritzten MCrAlY-Schutzschichten zugrunde gelegt.

Management von Baustoffen und Bauwerken

Mit der Firma Ammann, CH, als exclusivem Lizenznehmer im Bereich der elektrodynamischen Fragmentierung (FRANKA-Technologie) wurden die Arbeiten fortgeführt, die für die unmittelbare Umsetzung dieser Technologie in industrielle Anwendungen erforderlich sind.

Bearbeitung von Materialproben. An der Anlage FRANKA-0 wurden weiterhin grundlegende Proof-of-Principle Experimente zur Fragmentierung und zum Aufschluss der unterschiedlichsten Materialien (Gesteinsproben, Mineralien, Schlacken, Verbrennungsrückstände, Verbundwerkstoffe etc.) durchgeführt, die sich aus der Anfrage von potentiellen Anwendern aus der Industrie ergaben. Mit ähnlicher Zielsetzung wurde von Ammann deren erste selbstentwickelte Prototyp-Laboranlage 'LAURA' betrieben, die gegen Ende 2006 an einen Kunden ausgeliefert wurde. Die Fertigung derartiger Anlagen in Kleinserie soll in 2007 aufgenommen werden.

Dauertests. Von grundlegender Bedeutung für die Wirtschaftlichkeit von Anlagen, die nach dem elektrodynamischen Prinzip arbeiten, ist der Abbrand der Elektroden des Marxgenerators sowie der Hochspannungselektroden im Prozessraum, die in direktem Kontakt mit dem zu bearbeitenden Material stehen. Durch den Elektrodenabbrand werden die Wartungskosten derartiger Anlagen entscheidend beeinflusst. An der Anlage FRANKA-0 wurden -in Abhängigkeit von den elektrischen Parametern wie etwa des Grenzlastintegrals oder des Ladungsbetrags- der Abbrand für unterschiedliche Elektrodenmaterialien bestimmt. Für die große Zahl der zu erfassenden Pulse musste auch das zugehörige Datenerfassungssystem FrankaMon in geeigneter Weise modifiziert werden.

Baustoffrecycling und Abreinigung. Die experimentellen Arbeiten zur Aufarbeitung von Betonbruch an der Anlage FRANKA-5 wurden mit wesentlich erweiterter Zielsetzung fortgesetzt. Neben der weiterhin zu erfüllenden Forderung nach einer möglichst sortenreinen und energetisch kostengünstigen Zerlegung des Betons in seine Zuschlagstoffe Sand und Kies wurde zusätzlich gefordert, dass der freigelegte Zementstein nur noch möglichst geringfügig karbonatisiert sein darf. Für die entsprechenden Versuche mit einem speziellen hierfür vom Kunden hergestellten Beton wurde die FRANKA-5 Anlage in geeigneter Form umgebaut und betrieben. Die Ergebnisse der Versuche werden gegenwärtig noch analysiert.

Bei der Aufbereitung von neu erschlossenen quarzführenden Gesteinsadern wurden in Kooperation mit einem Partner aus der Quarzindustrie umfangreiche Arbeiten mit einem speziell hierfür entwickelten, besonders kontaminationsarmen Versuchsaufbau an der FRANKA-0 (Abbildung) durchgeführt, die in 2007 fortgesetzt werden sollen.



Aufbau des Kreislaufs an der Franka-0 für die kontaminationsarme Fragmentierung von hochreinem Quarz.

Abtragen und Bohren. In Absprache mit dem Marktführer im Tiefbohren wurde vereinbart, die Arbeiten in diesem Bereich wegen der aktuellen Überlastung aller Beteiligten und infolge der gegebenen Marktsituation zunächst zurückzustellen und bei Bedarf zu einem späteren Zeitpunkt wieder aufzugreifen. Die bisher durchgeführten Experimente und Ergebnisse wurden entsprechend dokumentiert.

Bezüglich der Abbrandraten der Marxelektroden wurden überraschend ausgeprägte Unterschiede festgestellt, die vom jeweils verwendeten Elektrodenmaterial abhängig sind. Zum Verständnis dieser Unterschiede wurde mit detaillierten Untersuchungen der Elektrodenoberflächen und mit Modellrechnungen begonnen. Die bisher vorliegenden Resultate aus diesen sehr systematisch durchgeführten Abbrandversuchen zeigen bereits, dass diese mit den wenigen aus der Literatur bekannten Ergebnissen im interessierenden Arbeitsbereich nur sehr bedingt zu vergleichen sind. Sie zeigen weiterhin, dass vermutlich keine allgemeinen Skalierungsgesetze über einen größeren Arbeitsbereich abgeleitet werden können. Die Abbrandmessungen werden an einem speziell hierfür entwickelten Teststand fortgesetzt, mit dem auch industriell relevante Pulszahlen untersucht werden können.

Die ersten grundlegenden Untersuchungen zum Abbrandverhalten der Hochspannungsarbeitselektroden aus unterschiedlichen Materialien konnten an einer neu entwickelten Anordnung durchgeführt werden, bei der jegliche Querkontamination zwischen den verschiedenen Werkstoffen ausgeschlossen werden kann. Mit dieser Anordnung sollen weiterhin Experimente zur Untersuchung des Einflusses von Pulsenergie und Pulsleistung auf die abbrandbedingten Gewichtsverluste der Elektroden durchgeführt werden. Weiterhin sollen die chemischen Eigenschaften der Abbrandprodukte analysiert werden. Schließlich soll auch der abriebbedingte Einfluss der Materialbelastung auf den Elektrodenverschleiß noch bestimmt werden.

Die von Ammann neu entwickelten unterschiedlichen Konzepte industriell einsetzbarer Elektroden wurden an der FRANKA-0 und an einer modifizierten FRANKA-5 Anordnung aufgebaut und in Betrieb genommen. Mit der Erprobung der Elektrodenkonzepte wurde begonnen.

Industrielle Mikrowellentechnik

Ein neues kompaktes und industrielles Mikrowellensystem HEPHAISTOS-CA1P (Abbildung) wurde im ersten Quartal 2006 erfolgreich fertig gestellt und konnte auf der weltweit bedeutendsten Fachmesse für Verbundwerkstoffe auf der JEC in Paris präsentiert werden.



Kompakter industrieller Mikrowellenofen HEPHAISTOS-CA1P.

Das Großsystem HEPHAISTOS-CA2 wurde im April an das Institut für Flugzeugbau (IFB) der Universität Stuttgart überstellt und wird seitdem erfolgreich betrieben. Vom IFB wird das weiterführende Ziel der Integration in eine neue ganzheitliche Fertigungsstrasse (IFB Faserverbund Technikum) zur Demonstration verfolgt. Der Vergleich von mikrowellenprozessierten mit konventionell hergestellten Materialien wurde in Zusammenarbeit mit dem IFB am Großsystem HEPHAISTOS-CA2 vertieft, um zu klären, wie die Zuführung von Mikrowellenenergie den Aushärtungsvorgang ganz oder teilweise bestimmt und ob Materialeigenschaften durch die Mikrowellenprozessierung positiv oder negativ beeinflusst werden. Für die Ermittlung von Materialeigenschaften mikrowellenprozessierter CFK-Testplatten und deren Vergleich mit Eigenschaften konventionell gehärteter Proben wurden geeignete Prüfmethode ausgewählt. Da der Haupteinfluss der Mikrowelle auf die Festigkeitswerte der Testkörper im Bereich der verwendeten Matrixsysteme anzusiedeln ist, wurden auch vorrangig matrixdominierende Materialeigenschaften in die Festigkeitsanalysen einbezogen. In weiteren Versuchen wurden Untersuchungen durchgeführt, die zur Optimierung von Versuchsaufbauten am CA2 in HEPHAISTOS-Systemen beitragen. Als Ergebnis kann die Aussage getroffen werden, dass die Qualität der Mikrowellenproben auf jeden Fall dem konventioneller Umluftofenprozesse entspricht. Ein weiterer Forschungspunkt bestand in der Entwicklung mikrowellen- und thermoaktiver Foliensysteme, bei denen unter Verwendung von Silikonmaterialien, sowie Kohlenstoff- und Siliziumbeimengungen plastische, flächige Materialien für die Modellierung freier Temperaturfelder bei komplexen Kompositaufbauten entstanden. Weitere Untersuchungen auf Kautschukbasis sind derzeit sehr erfolgversprechend, um bestehende Probleme und Anforderungen der Injektionstechnik von trockenen Kohlefasergelegen und –geweben kostengünstig und hochqualitativ lösen zu können. Ebenfalls wurden weitere rheologische Untersuchungen für Temperierungs- und Infiltrationszwecke an neuen Harzsystemen vorgenommen. Dazu wurde ein neuer prototypischer Mikrowelleninjektor (in 2006 beim Patentamt eingereicht) gebaut und getestet. Das Gerät kann als Hochleistungstemperierungssystem für Luftfahrt- und Automobilfertigungsstrassen genutzt werden. Das System befindet sich in Optimierungsarbeiten, um verschiedene Modenwandlungsverfahren austesten zu können. Die technologische Weiterentwicklung der innovativen 2.45 GHz HEPHAISTOS-Technologie (High Electromagnetic Power Heating Autoclaveless Injected Structures Oven System) konnte durch die Fertigung eines weiteren Satzes von homogen abstrahlenden Wellenleitern, die statt wie bislang vertikal polarisiert auch in horizontaler Richtung abstrahlen, realisiert werden. Dabei wird eine sehr homogene Raumabstrahlung erhalten, bei fast reflexionsfreier Anpassung der transmittierten Leistung an den Applikator und seine zu temperierende Last. Auf teure Hohlleiterkomponenten, wie Isolatoren, Zirkulatoren und Tuner kann somit verzichtet werden.

Das BMBF-Projekt „Innovative, modulare Mikrowellentechnik zur Aushärtung von Faserverbundstrukturen“ startete zum 1.9.2006 mit einer Laufzeit von 4 Jahren. Als weitere Partner kamen die BASF, sowie die Fa.SGL Carbon hinzu. Das Gesamtbudget des Projektes liegt bei ca. 6 Mio. Euro.

Beteiligte Mitarbeiter:

Dr. J. Akhtar, DP W. An, Dr. K. Baumung, DP T. Berghöfer, **Prof. Dr. H. Bluhm**, DP P. Brenner, H. Brüsemeister, DI L. Buth, Dr. C. Eing, **Dr. L. Feher**, Frau DP B. Flickinger, Dr. W. Frey, Dipl.-aer. M. Funke, DP H. Giese, MSc. S. Gupta, Dr. C. Gusbeth, **Dr. P. Hoppé**, DI F. Lang, K. Leber, E. Menesklou, **Dr. G. Müller**, Dr. H. Muscher, V. Nuss, Dr. M. Sack, K.D. Schorb, T. Seitz, DI J. Singer, Dipl.-Ing. S. Stanculovic, R. Stängle, DI R. Sträßner, Dr. A. Weisenburger, A. Wolf, R. Wüstner, H. Zimmermann.

Publikationsliste

FUSION: Programm Kernfusion

Publikationen in begutachteten Zeitschriften:

Dammertz, G.; Alberti, S.; Arnold, A.; Bariou, D.; Brand, P.; Braune, H.; Erckmann, V.; Dumbrajs, O.; Gantenbein, G.; Giguet, E.; Heidinger, R.; Hogge, H.P.; Illy, S.; Jin, J.; Kasperek, W.; Koppenburg, K.; Laqua, H.P.; Legrand, F.; Leonhardt, W.; Lievin, C.; Michel, G.; Neffe, G.; Piosczyk, B.; Prinz, O.; Rzesnicki, T.; Schmid, M.; Thumm, M.; Tran, M.Q.; Yang, X.; Yovchev, I.

High power gyrotron development at Forschungszentrum Karlsruhe for fusion applications.
IEEE Transactions on Plasma Science, 34 (2006) S. 173-86
DOI:10.1109/TPS.2006.872176

Dammertz, G.; Piosczyk, B.; Thumm, M.
Weltrekorde in der Gyrotronforschung.
Nachrichten – Forschungszentrum Karlsruhe, 38 (2006) S. 22-24

Jin, J.; Piosczyk, B.; Thumm, M.; Rzesnicki, T.; Zhang, S.
Quasi-optical mode converter/mirror system for a high-power coaxial-cavity gyrotron.
IEEE Transactions on Plasma Science, 34(2006) S.1508-15
DOI:10.1109/TPS.2006.877627

Jin, J.; Thumm, M.; Piosczyk, B.; Rzesnicki, T.
Theoretical investigation of an advanced launcher for a 2-MW 170 GHz TE_{34,19} coaxial cavity gyrotron.
IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 54(2006) S.1139-45
DOI:10.1109/TMTT.2005.864114

Kartikeyan, M.V.; Singh, G.; Borie, E.; Piosczyk, B.; Thumm, M.
Conceptual design studies of an 84 GHz, 500 kW, CW gyrotron.
International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 27(2006) S.657-70

Louksha, O.I.; Piosczyk, B.; Sominski, G.G.; Thumm, M.K.; Samsonov, D.B.
On potentials of gyrotron efficiency enhancement: Measurements and simulations on a 4-mm gyrotron.
IEEE Transactions on Plasma Science, 34(2006) S.502-11
DOI:10.1109/TPS.2006.875779

Pestchanyi, S.; Landman, I.
Improvement of the CFC structure to withstand high heat flux.
Fusion Engineering and Design, 81 (2006)S.275-79
DOI:10.1016/j.fuengdes.2005.06.365

Piosczyk, B.
A coaxial magnetron injection gun (CMIG) for a 2 MW, 170 GHz coaxial cavity gyrotron
International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 27 (2006) S. 1041-61

Plaum, B.; Gantenbein, G.; Kasperek, W.; Schwörer, K.; Grünert, M.; Braune, H.; Erckmann, V.; Hollmann, F.; Jonitz, L.; Laqua, H.; Michel, G.; Noke, F.; Purps, F.; Bruschi, A.; Cirant, S.; Gandini, F.; Verhoeven, A.G.A.; ECRH Groups
High-power tests of a remote-steering antenna at 140 GHz.
Fusion Science and Technology, 50 (2006) S. 1-14

Rzesnicki, T.; Jin, J.; Piosczyk, B.; Thumm, M.
Low power measurements on the new RF output system of a 170 GHz, 2 MW coaxial cavity gyrotron.
International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 27(2006) S. 1-11

Sabchevski, S.; Zhelyazkov, I.; Benova, E.; Atanassov, V.; Dankov, P.; Thumm, M.; Dammertz, G.; Piosczyk, B.; Illy, S.; Tran, M.Q.; Alberti, S.; Hogge, J.P.
Development of new generation software tools for simulation of electron beam formation in novel high power gyrotrons.
Journal of Physics: Conference Series, 44(2006) S.96-101
DOI:10.1088/1742-6596/44/1/011

Sabchevski, S.; Zhelyazkov, I.; Benova, E.; Atanassov, V.; Dankov, P.; Thumm, M.; Arnold, A.; Jin, J.; Rzesnicki, T.
Quasi-optical converters for high-power gyrotrons: a brief review of physical models, numerical methods and computer codes.
Journal of Physics: Conference Series, 44(2006) S.102-09
DOI:10.1088/1742-6596/44/1/012

Schwartzkopff, T.; Lörcher, F.; Munz, C.D.; Schneider, R.
Arbitrary high order finite-volume methods for electromagnetic wave propagation.
Computer Physics Communications, 174(2006) S.689-703
DOI:10.1016/j.cpc.2005.12.020

Tereshin, V.I.; Bandura, A.N.; Byrka, O.V.; Chebotarev, V.V.; Garkusha, I.E.; Makhilaj, V.A.; Solyakov, D.G.; Tsarenko, A.V.; Landman, I.
Simulation of ITER transient heat loads to the divertor surface with using the powerful quasi-steady-state plasma accelerator.
Czechoslovak Journal of Physics, 56(2006) S.B162-B169
DOI:10.1007/s10582-006-0193-4

Wagner, D.; Leuterer, F.; Manini, A.; Monaco, F.; Munich, M.; Ryter, F.; Schutz, H.; Zohm, H.; Franke, T.; Heidinger, R.; Thumm, M.; Kasperek, W.; Gantenbein, G.; Litvak, A.G.; Popov, L.G.; Nichiporenko, V.O.; Myasnikov, V.E.; Denisov, G.G.; Tai, E.M.; Solyanova, E.A.; Malygin, S.A.
New frequency step tunable ECRH system for ASDEX Upgrade.
International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 27(2006) S.173-82

Yang, X.; Thumm, M.K.; Arnold, A.; Borie, E.; Dammertz, G.; Drumm, O.; Koppenburg, K.; Wagner, D.
Progress towards optimization of phase-correcting mirrors for a multifrequency 1-MW gyrotron.
IEEE Transactions on Plasma Science, 34(2006) S.652-58
DOI:10.1109/TPS.2006.874848

Zaginailov, G.; Shcherbinin, V.; Schuenemann, K.; Thumm, M.
Influence of background plasma on electromagnetic properties of 'cold' gyrotron cavity.
IEEE Transactions on Plasma Science, 34(2006) S.512-17
DOI:10.1109/TPS.2006.875760

Sonstige Publikationen die in gedruckter Form vorliegen:

Bongers, W.A.; Graswinckel, M.F.; Fernandez, A.; Bruschi, A.; Elzendoorn, B.S.Q.; Heidinger, R.; Schwörer, K.; Kruyt, O.G.; Lamers, B.; Piosczyk, B.; Ronden, D.M.S.; Schmid, M.; Verhoeven, A.G.A.
Low- and high-power measurements on a remote steering upper port launcher mockup for ITER.
7th Biennial ECH Transmission Line Workshop, Virginia Beach, Va., September 14-16, 2005
Proc. on CD ROM, 2006

- Bongers, W.A.; Graswinckel, M.F.; Fernandez Curto, A.; Danilov, I.; Elzendoorn, B.S.Q.; Heidinger, R.; Kruijt, O.; Lamers, B.; Piosczyk, B.; Ronden, D.M.S.; Schmid, M.; Verhoeven, A.G. Optimization and measurements on a remote steering upper port launcher mockup for ITER. Shen, S.C. [Hrsg.] IRMMW-THz 2006: Conf. Digest of the 2006 Joint 31st Internat. Conf. on Infrared and Millimeter Waves and 14th Internat. Conf. on Terahertz Electronics, Shanghai, China, September 18-22, 2006. Piscataway, N.J.: IEEE Operations Center, 2006 S. 46 Auch auf CD-ROM
- Dammertz, G.; Arnold, A.; Bariou, D.; Giguët, E.; Heidinger, R.; Illy, S.; Jin, J.; Legrand, F.; Leonhardt, W.; Lievin, C.; Neffe, G.; Piosczyk, B.; Rzesnicki, T.; Schmid, M.; Thumm, M. Gyrotron research at Forschungszentrum Karlsruhe. Wiesbeck, W. [Hrsg.] German Microwave Conf. (GeMIC 2006), Karlsruhe, March 28-30, 2006. Proc. on CD-ROM
- Dammertz, G.; Alberti, S.; Arnold, A.; Erckmann, V.; Gantenbein, G.; Giguët, E.; Heidinger, R.; Hogge, J.P.; Illy, S.; Kasperek, W.; Laqua, H.; Legrand, F.; Leonhardt, W.; Lievin, C.; Magne, R.; Michel, G.; Neffe, G.; Piosczyk, B.; Schmid, M.; Thumm, M.; Tran, M.Q. Recent results of the 1-MW, 140 GHz, CW gyrotrons for the stellarator W7-X. Lazaros, A. [Hrsg.] Proc. of the 14th Joint Workshop on Electron Cyclotron Emission and Electron Cyclotron Resonance Heating (EC 14), Santorini, GR, May 9-12, 2006 Athinai: Heliotos Conferences Ltd., 2006 S. 542-47
- Dammertz, G.; Alberti, S.; Arnold, A.; Erckmann, V.; Gantenbein, G.; Giguët, E.; Heidinger, R.; Hogge, J.P.; Illy, S.; Kasperek, W.; Laqua, H.; Legrand, F.; Leonhardt, W.; Lievin, C.; Michel, G.; Neffe, G.; Piosczyk, B.; Schmid, M.; Thumm, M.; Tran, M.Q. Status of the series production of 1-MW, 140 GHz, CW gyrotrons for W7-X. Shen, S.C. [Hrsg.] IRMMW-THz 2006: Conf. Digest of the 2006 Joint 31st Internat. Conf. on Infrared and Millimeter Waves and 14th Internat. Conf. on Terahertz Electronics, Shanghai, China, September 18-22, 2006 Piscataway, N.J.: IEEE Operations Center, 2006 S. 21 Auch auf CD-ROM
- Dammertz, G.; Arnold, A.; Braune, H.; Erckmann, V.; Gantenbein, G.; Heidinger, R.; Illy, S.; Kasperek, W.; Laqua, H.; Leonhardt, W.; Michel, G.; Neffe, G.; Piosczyk, B.; Brand, P.; Schmid, M.; Thumm, M. The electron-cyclotron-resonance-heating system for the stellarator W7-X. Jahrestagung Kerntechnik 2006, Aachen, 16.-18. Mai 2006 Berlin: INFORUM GmbH, 2006 S. 601-07. CD-ROM
- D'Andrea, D.; Munz, C.D.; Schneider, R. Modeling of electron-electron collisions for particle-in-cell simulations. Wissenschaftliche Berichte, FZKA-7218 (September 2006)
- Danilov, I.; Heidinger, R.; Meier, A.; Piosczyk, B.; Schmid, M.; Späth, P.; Bongers, W.; Graswinckel, M.; Lamers, B.; Verhoeven, A.G.A. Thermo-hydraulic performance and high power transmission characteristics of the RS torus window prototype. Lazaros, A. [Hrsg.] Proc. of the 14th Joint Workshop on Electron Cyclotron Emission and Electron Cyclotron Resonance Heating (EC 14), Santorini, GR, May 9-12, 2006 Athinai. Heliotos Conference Ltd., 2006, S. 507-11
- Erckmann, V.; Brand, P.; Braune, H.; Dammertz, G.; Gantenbein, G.; Kasperek, W.; Laqua, H.P.; Michel, G.; Thumm, M.; Weissgerber, M.; W7-X ECRH Teams at IPP, FZK and IPF ECRH for W7-X: status and relevance for ITER. Lazaros, A. [Hrsg.] Proc. of the 14th Joint Workshop on Electron Cyclotron Emission and Electron Cyclotron Resonance Heating (EC 14), Santorini, GR, May 9-12, 2006 Athinai. Heliotos Conferences Ltd., 2006 S. 412-17
- Flamm, J.; Piosczyk, B.; Rzesnicki, T.; Arnold, A.; Dammertz, G.; Prinz, H.O.; Thumm, M. Measurements on a Brewster window for a high power gyrotron. Shen, S.C. [Hrsg.] IRMMW-THz 2006: Conf. Digest of the 2006 Joint 31st Internat. Conf. on Infrared and Millimeter Waves and 14th Internat. Conf. on Terahertz Electronics, Shanghai, China, September 18-22, 2006 Piscataway, N.J.: IEEE Operations Center, 2006 S. 89. Auch auf CD-ROM.
- Gantenbein, G.; Kasperek, W.; Plaum, B.; Schwörer, K.; Erckmann, V.; Laqua, H.; Michel, G.; ECRH Groups at IPP Greifswald, FZK Karlsruhe and IPF Stuttgart High-power tests and analysis of a remote steering launcher mock-up for ECRH on ITER. 7th Biennial ECH Transmission Line Workshop, Virginia Beach, Va.; September 14-16, 2005. Proc. on CD ROM, 2006
- Gantenbein, G.; Dammertz, G.; Alberti, S.; Arnold, A.; Erckmann, V.; Giguët, E.; Heidinger, R.; Hogge, J.P.; Illy, S.; Kasperek, W.; Koppenburg, K.; Laqua, H.; Legrand, F.; Leonhardt, W.; Lievin, C.; Michel, G.; Neffe, G.; Piosczyk, B.; Schmid, M.; Thumm, M.; Tran, M.Q. Status of the 1-MW, 140 GHz, CW gyrotron for W7-X. 2006 IEEE Internat. Vacuum Electronics Conf. held jointly with the 2006 IEEE Internat. Vacuum Electron Sources Conf. (IVEC/IVESC 2006), Monterey, Calif., April 25-27, 2006 New York, N.Y.: IEEE, 2006, S. 533-34
- Gordeev, S.; Heinzel, V.; Krüßmann, R.; Norajitra, P.; Weggen, J. Thermal-hydraulic analysis of He-cooled divertor mock-up tested in the He-loop HEBLO. Jahrestagung Kerntechnik 2006, Aachen, 16.-18. Mai 2006 Berlin: INFORUM GmbH, 2006 S. 553-57. CD-ROM
- Graswinckel, M.F.; Bongers, W.A.; Fernandez Curto, A.; Danilov, I.; Elzendoorn, B.S.Q.; Heidinger, R.; Kruijt, O.; Lamers, B.; Piosczyk, B.; Ronden, D.M.S.; Schmidt, M.; Verhoeven, A.G.A. High power measurements on a remote steering upper port launcher mockup for ITER. Lazaros, A. [Hrsg.] Proc. of the 14th Joint Workshop on Electron Cyclotron Emission and Electron Cyclotron Resonance Heating (EC 14), Santorini, GR, May 9-12, 2006 Athinai: Heliotos Conferences Ltd., 2006 S. 430-35
- Heidinger, R.; Danilov, I.; Meier, A.; Spaeh, P.; Piosczyk, B.; Schmid, M.; Thumm, M.; Bongers, W.A.; Graswinckel, M.; Lamers, B.; Verhoeven, A.G.A. Transmission and cooling studies of the torus window for a remotely steered EC launcher. 7th Biennial ECH Transmission Line Workshop, Virginia Beach, Va., September 14-16, 2005. Proc. on CD ROM, 2006
- Jin, J.B.; Thumm, M.; Rzesnicki, T.; Piosczyk, B. Internal quasi-optical mode converter for a coaxial gyrotron. Wiesbeck, W. [Hrsg.] German Microwave Conf. (GeMIC 2006), Karlsruhe, March 28-30, 2006. Proc. on CD-ROM

- Kartikeyan, M.V.; Borie, E.; Piosczyk, B.; Thumm, M.K.
An 84 GHz, 500 kW, CW gyrotron.
Wiesbeck, W. [Hrsg.]
German Microwave Conf. (GeMIC 2006), Karlsruhe, March 28-30, 2006. Proc. on CD-ROM
- Kasperek W.; Petelin, M.; Erckmann, V.; Shchegolkov, D.; Bruschi, A.; Cirant, S.; Thumm, M.; Plaum, B.; Grünert, M.; Malthaner, M.; W7-X ECRH Teams at IPP, FZK and IPF
Fast switching of high-power millimetre waves between two launchers: concepts, numerical investigations and first experiments.
Lazaros, A. [Hrsg.]
Proc. of the 14th Joint Workshop on Electron Cyclotron Emission and Electron Cyclotron Resonance Heating (EC 14), Santorini, GR, May 9-12, 2006
Athina: Heliotos Conferences Ltd., 2006 S. 424-29
- Kasperek, W.; Erckmann, V.; Gantenbein, G.; Plaum, B.; Schwörer, K.; Wacker, R.; Grünert, M.; Hollmann, F.; Jonitz, L.; Laqua, H.P.; Michel, G.; Noke, F.; Purps, F.; Wagner, D.; Chirkov, A.V.; Denisov, G.G.; Kuzikov, S.V.; Ohkubo, K.; Bruschi, A.; Cirant, S.; Gandini, F.; Verhoeven, A.G.A.; W7-X ECRH Teams at IPP, FZK and IPF
Low- and high-power investigations of an ITER remote steering launcher mock-up.
Litvak, A.G. [Hrsg.]
Strong Microwaves in Plasmas: Proc. of the Internat. Workshop, Nizhny Novgorod, Russia, July 25- August 1, 2005. Vol. 2 S. 489-98. Nizhny Novgorod: Inst. of Applied Physics, Russian Acad. of Sciences, 2006
- Kumar, A.; Kartikeyan, M.V.; Borie, E.; Thumm, M.K.
Mode selection for 120 GHz, 1.0-1.5 MW, CW, gyrotron for plasma startup in ITER.
Nat.Symp. on Vacuum Electronic Devices and Applications (VEDA), Central Electronics Engineering Research Institute (CEERI), Pilani, IND, October 11-13, 2006. Proc. S. TS-5.4
- Louksha, O.; Piosczyk, B.; Sominski, G.; Thumm, M.
An experimental facility for investigation of gyrotron cathode emission non-uniformities.
Shen, S.C. [Hrsg.]
IRMMW-THz 2006: Conf.Digest of the 2006 Joint 31st Internat. Conf. on Infrared and Millimeter Waves and 14th Internat.Conf. on Terahertz Electronics, Shanghai, China, September 18-22, 2006. Piscataway, N.J.: IEEE Operations Center, 2006 S.86. Auch auf CD-ROM
- Louksha, O.; Piosczyk, B.; Sominski, G.; Thumm, M.; Samsonov, D.
Electron emission inhomogeneity and low-frequency parasitic oscillations in a gyrotron.
Abe, D.K. [Hrsg.]
High Energy Density and High Power RF : 7th Workshop, Kalamata, GR, June 13-17, 2005.
Melville, N.Y.: American Institute of Physics, 2006 S. 219-20 (AIP Conference Proceedings; 807). Incl. CD-ROM
- Louksha, O.; Piosczyk, B.; Samsonov, D.; Sominski, G.; Thumm, M.
Improvement of gyrotron beam quality by suppression of parasitic low-frequency oscillations.
Shen, S.C. [Hrsg.]
IRMMW-THz 2006: Conf.Digest of the 2006 Joint 31st Internat. Conf. on Infrared and Millimeter Waves and 14th Internat.Conf. on Terahertz Electronics, Shanghai, China, September 18-22, 2006. Piscataway, N.J.: IEEE Operations Center, 2006 S.85. Auch auf CD-ROM
- Louksha, O.I.; Piosczyk, B.; Sominski, G.G.; Thumm, M.; Samsonov, D.B.
Effect of electron emission inhomogeneity on electron beam characteristics and output parameters of a 4-mm gyrotron.
Litvak, A.G. [Hrsg.]
Strong Microwaves in Plasmas : Proc.of the Internat. Workshop, Nizhny Novgorod, Russia, July 25 – August 1, 2005. Vol. 1 S. 135-40
Nizhny Novgorod: Inst.of Applied Physics, Russian Acad.of Sciences, 2006
- Michel, G.; Prinz, O.; Rzesnicki, T.
A design scheme for quasi-optical mode converters of coaxial cavity gyrotrons.
Litvak, A.G. [Hrsg.]
Strong Microwaves in Plasmas: Proc. of the Internat.Workshop, Nizhny Novgorod, Russia, July 25-August 1, 2005. Vol. 1 S.337-41
Nizhny Novgorod: Inst.of Applied Physics, Russian Acad.of Sciences, 2006
- Petkow, D.; Fertig, M.; Stindl, T.; Auweter-Kurtz, M.; Quandt, M.; Munz, C.D.; Roller, S.; D'Andrea, D.; Schneider, R.
Development of a 3-dimensional, time accurate particle method for rarefied plasma flows.
9th AIAA/ASME Joint Thermodynamics and Heat Transfer Conf., San Francisco, CA; June 5-8, 2006
Proc.publ.as Paperback, CD-ROM and digital AIAA, 2006
- Piosczyk, B.; Alberti, S.; Bariou, D.; Benin, P.; Bonicelli, T.; Dammertz, G.; Dumbrajs, O.; Fasel, D.; Giguet, E.; Goodman, T.; Heidinger, R.; Henderson, M.; Hogge, J.P.; Illy, S.; Jin, J.; Leonhardt, W.; Lievin, C.; Michel, G.; Mondino, P.L.; Porte, L.; Rzesnicki, T.; Schmid, M.; Thumm, M.; Tran, M.Q.; Yang, X.
170 GHz, 2 MW, CW coaxial cavity gyrotron for ITER. Status and results obtained on a pre-prototype tube.
Lazaros, A. [Hrsg.]
Proc. of the 14th Joint Workshop on Electron Cyclotron Emission and Electron Cyclotron Resonance Heating (EC 14), Santorini, GR, May 9-12, 2006
Athina: Heliotos Conferences Ltd., 2006 S.536-41
- Piosczyk, B.; Alberti, S.; Benin, P.; Bonicelli, T.; Dammertz, G.; Dumbrajs, O.; Gantenbein, G.; Giguet, E.; Goodman, T.; Hogge, J.P.; Illy, S.; Lievi, C.; Michel, G.; Porte, L.; Rzesnicki, T.; Schmid, M.; Thumm, M.; Tran, M.Q.
Progress in development of the 170 GHz, 2 MW coaxial gyrotron for ITER.
Shen, S.C. [Hrsg.]
IRMMW-THz 2006: Conf.Digest of the 2006 Joint 31st Internat. Conf. on Infrared and Millimeter Waves and 14th Internat.Conf. on Terahertz Electronics, Shanghai, China, September 18-22, 2006
Piscataway, M.J.: IEEE Operations Center, 2006 S. 197
Auch auf CD-ROM
- Piosczyk, B.; Alberti, S.; Bariou, D.; Benin, P.; Bonicelli, T.; Dammertz, G.; Dumbrajs, O.; Fasel, D.; Giguet, E.; Goodman, T.; Heidinger, R.; Henderson, M.; Hogge, J.P.; Illy, S.; Jin, J.; Lievin, C.; Michel, G.; Mondino, P.L.; Porte, L.; Rzesnicki, T.; Thumm, M.; Tran, M.Q.; Yang, X.; Yovchev, I.
Progress in the development of the 170 GHz coaxial cavity gyrotron for ITER.
Litvak, A.G. [Hrsg.]
Strong Microwaves in Plasmas: Proc. of the Internat.Workshop, Nizhny Novgorod, Russia, July 25-August 1, 2005, Vol. 1, S.91-99
Nizhny Novgorod: Inst.of Applied Physics, Russian Acad.of Sciences, 2006

- Prinz, H.O.; Arnold, A.; Dammertz, G.; Michel, G.; Neilson, J.; Thumm, M.; Yang, X.
Analysis of the quasi-optical output system of a TE_{22,6} 118 GHz gyrotron.
Lazaros, A. [Hrsg.]
Proc. of the 14th Joint Workshop on Electron Cyclotron Emission and Electron Cyclotron Resonance Heating (EC 14), Santorini, GR, May 9-12, 2006
Athina. Heliotopos Conference Ltd., 2006, S. 512-16
- Prinz, O.; Arnold, A.; Dammertz, G.; Neilson, J.; Thumm, M.
3D-analysis of quasi-optical output systems for high power gyrotrons.
Shen, S.C. [Hrsg.]
IRMMW-THz 2006: Conf:Digest of the 2006 Joint 31st Internat. Conf. on Infrared and Millimeter Waves and 14th Internat. Conf. on Terahertz Electronics, Shanghai, China, September 18-22, 2006. Piscataway, N.J.: IEEE Operations Center, 2006 S.518.
Auch auf CD-ROM
- Rzesnicki, T.; Jin, J.; Piosczyk, B.; Thumm, M.; Michel, G.; Wagner, D.
170 GHz, 2 MW coaxial cavity gyrotron. Test of the RF output system for the first industrial prototype tube.
2006 IEEE Internat. Vacuum Electronics Conf. held jointly with the 2006 IEEE Internat. Vacuum Electron Sources Conf. (IVEC/IVESC 2006), Monterey, Calif., April 25-27, 2006
New York, N.Y.: IEEE, 2006 S.415-16
- Rzesnicki, T.; Jin, J.; Piosczyk, B.; Thumm, M.; Michel, G.; Wagner, D.
Low power verification of a new rf output system for a 170 GHz, 2 MW coaxial cavity gyrotron.
Wiesbeck, W. [Hrsg.]
German Microwave Conf. (GeMIC 2006), Karlsruhe, March 28-30, 2006. Proc. on CD-ROM
- Tereshin, V.I.; Bandura, A.N.; Byrka, O.V.; Chebotarev, V.V.; Garkusha, I.E.; Makhaj, V.A.; Solyakov, D.G.; Tsarenko, A.V.; Landman, I.
Simulation of ITER transient heat loads to the divertor surfaces with using the powerful quasi-steady-state plasma accelerator.
22nd Symposium on Plasma Physica and Technology, Praha, CZ, June 26-29, 2006
- Thumm, M.; Arnold, A.; Dammertz, G.; Gantenbein, G.; Heidinger, R.; Illy, S.; Leonhardt, W.; Neffe, G.; Piosczyk, B.; Schmid, M.; Alberti, S.; Hogge, J.P.; Tran, M.Q.; Braune, H.; Erckmann, V.; Laqua, H.; Michel, G.; Brand, P.; Kasperek, W.; Magne, R.; Giguët, E.; Legrand, F.; Lievin, C.
EU megawatt-class 140 GHz CW gyrotron for W7-X.
Nat.Symp.on Vacuum Electronic Devices and Applications (VEDA), Central Electronics Engineering Research Institute (CEERI), Pilani, IND, October 11-13, 2006. Proc. S.PS2/1
- Thumm, M.; Alberti, S.; Arnold, A.; Bariou, D.; Dammertz, G.; Darbos, C.; Dumbrajs, O.; Flamm, J.; Gantenbein, G.; Erckmann, V.; Giguët, E.; Heidinger, R.; Hogge, J.P.; Illy, S.; Jin, J.; Kasperek, W.; Lievin, C.; Magne, R.; Michel, G.; Piosczyk, B.; Prinz, O.; Rzesnicki, T.; Schwörer, K.; Tran, M.Q.; Yovchev, I.
Gyrotron development in EU for present and future fusion plasma experiments.
Shen, S.C. [Hrsg.]
IRMMW-THz 2006: Conf:Digest of the 2006 Joint 31st Internat. Conf. on Infrared and Millimeter Waves and 14th Internat. Conf. on Terahertz Electronics, Shanghai, China, September 18-22, 2006. Piscataway, N.J.: IEEE Operations Center, 2006 S.7.
Auch auf CD-ROM
- Thumm, M.; Alberti, S.; Arnold, A.; Bariou, D.; Dammertz, G.; Darbos, C.; Dumbrajs, O.; Gantenbein, G.; Erckmann, V.; Giguët, E.; Heidinger, R.; Hogge, J.P.; Illy, S.; Jin, J.; Kasperek, W.; Lievin, C.; Magne, R.; Michel, G.; Piosczyk, B.; Prinz, O.; Rzesnicki, T.; Schwörer, K.; Tran, M.Q.; Yovchev, I.
Gyrotron development in EU for present fusion experiments and for ITER.
Abe, D.K. 8Hrsg.]
High Energy Density and High Power RF: 7th Workshop, Kalamata, GR, June 13-17, 2005
Melville, N.Y.: American Institute of Physics, 2006 S.16779
(AIP Conference Proceedings; 807). Incl. CD-ROM
- Thumm, M.; Arnold, A.; Dammertz, G.; Jin, J.; Koppenburg, K.; Michel, G.; Piosczyk, B.; Prinz, O.; Rzesnicki, T.; Wagner, D.; Yang, X.
Quasi-optical mode converters in advanced high-power gyrotrons for fusion plasma applications.
7th Biennial ECH Transmission Line Workshop, Virginia Beach, Va., September 14-16, 2005. Proc. on CD ROM, 2006
- Thumm, M.
State-of-the-art of high power gyro-devices and free electron masers. Update 2005.
Wissenschaftliche Berichte, FZKA-7198 (Februar 2006)
- Thumm, M.; Alberti, S.; Arnold, A.; Dammertz, G.; Erckmann, V.; Gantenbein, G.; Giguët, E.; Heidinger, R.; Hogge, J.P.; Illy, S.; Kasperek, W.; Laqua, H.P.; Lievin, C.; Magne, R.; Michel, G.; Piosczyk, B.; Schwörer, K.; Tran, M.Q.; Yang, X.
Status of 1 MW, 140 GHz, CW gyrotron for W7-X.
Litvak, A.G. [Hrsg.]
Strong Microwaves in Plasmas : Proc.of the Internat.Workshop, Nizhny Novgorod, Russia, July 25 – August 1, 2005. Vol.1 S.33-45. Nizhny Novgorod: Inst.of Applied Physics, Russian Acad. of Sciences, 2006
- Verhoeven, A.G.A.; Elzendoorn, B.S.Q.; Bongers, W.A.; Bruschi, A.; Cirant, S.; Danilov, I.; Fernandez, A.; Gantenbein, G.; Graswinckel, M.F.; Heidinger, R.; Kasperek, W.; Kleefeldt, K.; Kruijt, O.G.; Lamers, B.; Piosczyk, B.; Plaum, B.; Ronden, D.M.S.; Saibene, G.; Zohm, H.
Millimeter-wave design of the ITER upper ECRH launcher.
Litvak, A.G. [Hrsg.]
Strong Microwaves in Plasmas : Proc.of the Internat.Workshop, Nizhny Novgorod, Russia, July 25 – August 1, 2005. Vol.2 S.499-506. Nizhny Novgorod: Inst.of Applied Physics, Russian Acad. of Sciences, 2006
- Wagner, D.; Leuterer, F.; Manini, A.; Monaco, F.; Münich, M.; Ryter, F.; Schütz, H.; Stober, J.; Zohm, H.; Franke, T.; Heidinger, R.; Thumm, M.; Gantenbein, G.; Kasperek, W.; Litvak, A.G.; Denisov, G.G.; Tai, E.M.; Popov, L.G.; Nichiporenko, V.O.; Myasnikov, V.E.; Solyanova, E.A.; Malygin, S.A.
Commissioning of the new multi-frequency ECRH system for ASDEX upgrade.
Shen, S.C. [Hrsg.]
IRMMW-THz 2006: Conf:Digest of the 2006 Joint 31st Internat. Conf. on Infrared and Millimeter Waves and 14th Internat. Conf. on Terahertz Electronics, Shanghai, China, September 18-22, 2006.
Piscataway, N.J.: IEEE Operations Center, 2006 S.172.
Auch auf CD-ROM
- Wagner, D.; Grünwald, G.; Leuterer, F.; Manini, A.; Monaco, F.; Münich, M.; Schütz, H.; Ryter, F.; Zohm, H.; Franke, T.; Heidinger, R.; Koppenburg, K.; Thumm, M.; Kasperek, W.; Gantenbein, G.; Denisov, G.G.; Litvak, A.; Zapevalov, V.
First tests with the new ECRH system for ASDEX upgrade.
7th Biennial ECH Transmission Line Workshop, Virginia Beach, Va., September 14-16, 2005. Proc. on CD ROM, 2006

Yang, X.; Arnold, A.; Dammertz, G.; Koppenburg, K.; Piosczyk, B.; Wagner, D.; Thumm, M.

Improved beam-forming mirror system for a multi-frequency gyrotron at FZK.

2006 IEEE Internat. Vacuum Electronics Conf. held jointly with the 2006 IEEE Internat. Vacuum Electron Sources Conf. (IVEC/IVESC 2006), Monterey, Calif., April 25-27, 2006
New York, N.Y.: IEEE, 2006 S. 411-12

Yang, X.; Arnold, A.; Dammertz, G.; Koppenburg, K.; Thumm, M.
Recent progress in optimizing phase-correcting mirrors for a multi-frequency gyrotron.

Wiesbeck, W. [Hrsg.]

German Microwave Conf. (GeMIC 2006), Karlsruhe, March 28-30, 2006. Proc. on CD-ROM

Vorträge, die nicht in gedruckter Form vorliegen:

Arnold, A.; Prinz, H.O.

Analysis of the 118 GHz TE_{22,6} quasi-optical mode converter. Low power measurements.

Vortr.: Centre D'Etudes Nucleaires (CEA), Cadarache, F, 8. September 2006

Bazylev, B.; Janeschitz, G.; Landman, I.; Federici, G. Loarte, A.; Merola, M.; Klimov, N.; Podkovyrov, V.; Zhitlukhin, A.; Linke, J.; Compan, J.; Hirai, T.

Erosion of CFC and W macrobrush target after multiple exposures related to ITER ELMs. Numerical simulations vs. experiments.

33rd European Physical Society Conf. on Plasma Physics, Roma, I, June 19-23, 2006

Bazylev, B.; Janeschitz, G.; Landman, I.; Pestchanyi, S.; Loarte, A.; Federici, G.; Merola, M.; Linke, J.; Zhitlukhin, A.; Podkovyrov, V.; Klimov, N.; Safronov, V.; Garkusha, I.

ITER transient consequences for material damage. Modelling vs. experiments.

11th Internat. Workshop on Plasma-Facing Materials and Components for Fusion Applications, Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Greifswald, October 10-12, 2006

Bazylev, B.; Janeschitz, G.; Landman, I.; Pestchanyi, S.; Loarte, A.; Federici, G.; Merola, M.; Linke, J.; Ogorodnikova, O.; Zhitlukhin, A.; Podkovyrov, V.; Klimov, N.; Safronov, V.; Garkusha, I.

Modelling of material damage of CFC and W macro-brush divertor targets under ELMs and disruptions at plasma gun facilities and prediction for ITER.

21st IAEA Fusion Energy Conf., Chengdu, China, October 16-21, 2006

Bazylev, B.; Janeschitz, G.; Landman, I.; Federici, G.; Loarte, A.; Merola, M.; Klimov, N.; Podkovyrov, V.; Zhitlukhin, A.; Linke, J.; Compan, J.; Hirai, T.

Multiple ELMs consequences for CFC and W macrobrush target damage in ITER. Numerical simulations vs. experiments.

11th Internat. Conf. and School on Plasma Physics and Controlled Fusion, Alushta, UA, September 11-16, 2006

Bazylev, B.N.; Janeschitz, G.; Landman, I.S.; Loarte, A.; Pestchanyi, S.E.

Melt damage simulation of W-macrobrush and divertor gaps after multiple transient events in ITER.

17th Internat. Conf. on Plasma Surface Interactions in Controlled Fusion Devices, Hefei, China, May 22-26, 2006

Bin, W.; Bruschi, A.; Cirant, S.; Erckmann, V.; Gandini, F.; Granucci, G.; Hollmann, F.; Laqua, H.P.; Mellera, V.; Muczini, V.; Nardone, A.; Noke, F.; Piosczyk, B.; Purps, F.; Rzesnicki, T.; Schmid, M.; Sozzi, C.; Spies, W.; Spinicchia, N.; Stoner, M.

Advances in high power calorimetric matched loads for short pulses and CW gyrotrons

24th Symp. on Fusion Technology (SOFT 2006), Warszawa, PL, September 11-15, 2006

Book of Abstracts S.45

Bonicelli, T.; Alberti, S.; Cirant, S.; Dormicchi, O.; Fasel, D.; Hogge, J.P.; Illy, S.; Lievin, C.; Mondino, P.L.; Piosczyk, B.; Rzesnicki, T.; Santinelli, M.; Taddia, G.; Thumm, M.; Tran, M.Q.
EC power sources: European technological developments towards ITER.

24th Symp. on Fusion Technology (SOFT 2006), Warszawa, PL, September 11-15, 2006

Book of Abstracts S.74

Bonicelli, T.; Alberti, S.; Alonso, J.; Antoni, V.; Bariou, D.; Barabschi, P.; Benfatto, I.; Benin, P.; Boilson, D.; Bruschi, A.; Chantant, M.; Chuilon, B.; Cirant, S.; Claesen, R.; Cordier, J.J.; Cox, S.; Dal Bello, S.; Day, C.; DeLorenzi, A.; Dormicchi, O.; Dremel, M.; de Esch, H.; Falter, H.; Fantz, U.; Fasel, D.; Franzen, P.; Giguet, E.; Gaio, E.; Goodman, T.; Heidinger, R.; Hemsworth, R.; Henderson, M.; Henry, D.; Hogge, J.P.; Illy, S.; Jones, T.; Kovari, M.; Lievin, C.; Liniers, M.; Lopez Fraguas, A.; Loughlin, M.J.; Marcuzzi, D.; Martens, C.; Martin, D.; Masiello, A.; Milnes, J.; Mondino, P.L.; Piosczyk, B.; Rzesnicki, T.; Sandri, S.; Santinelli, M.; Speth, E.; Svensson, L.; Tanga, A.; Taddia, G.; Toigo, V.; Thumm, M.; Tran, M.Q.; Waldon, C.; Xue, Y.; Zaccaria, P.L.

Review of the EU activities in preparation of ITER in the field of EC power sources and NB systems.

21st IAEA Fusion Energy Conf., Chengdu, China, October 16-21, 2006

Braune, H.; Brand, P.; Erckmann, V.; Leonhardt, W.; Mellein, D.; Michel, G.; Müller, G.; Schlüter, K.H.; Winkler, M.; W7-X ECRH Teams at IPP, IPF and FZK

Architecture of central control system for the 10 MW ECRH-plant at W7-X.

18th Joint Russian-German STC Workshop on ECRH and Gyrotrons, Nizhny Novgorod, Russia, June 20-27, 2006

Braune, H.; Brand, P.; Erckmann, V.; Leonhardt, W.; Mellein, D.; Michel, G.; Müller, G.; Schlüter, K.H.; Winkler, M.

Architecture of central control system for the 10 MW ECRH-plant at W7-X.

24th Symp. on Fusion Technology (SOFT 2006), Warszawa, PL, September 11-15, 2006

Book of Abstracts S. 22

Dammertz, G.; Heidinger, R.; Gantenbein, G.; Piosczyk, B.; Thumm, M.

Status and progress of megawatt gyrotrons for fusion plasma devices at FZK.

US-EU-JPN RF Heating Technology Workshop, Nara, J, September 26-30, 2006

Dammertz, G.; Alberti, S.; Arnold, A.; Erckmann, V.; Gantenbein, G.; Giguet, E.; Heidinger, R.; Hogge, J.P.; Illy, S.; Kasperek, W.; Koppenburg, K.; Laqua, H.; Legrand, F.; Leonhardt, W.; Lievin, C.; Michel, G.; Neffe, G.; Piosczyk, B.; Schmid, M.; Thumm, M.; Tran, M.P.

Status of the 1-MW, 140-GHz, CW series-gyrotrons for W7-X.

18th Joint Russian-German STC Workshop on ECRH and Gyrotrons, Nizhny Novgorod, Russia, June 20-27, 2006

- Erckmann, V.; Brand, P.; Braune, H.; Dammertz, G.; Gantenbein, G.; Kasperek, W.; Laqua, H.P.; Michel, G.; Thumm, M.; Weissgerber, M.; W7-X ECRH Teams at IPP, FZK and IPF The 140 GHz, 10 MW, CW ECRH plant for W7-X: a training field for ITER. 21st IAEA Fusion Energy Conf., Chengdu, China, October 16-21, 2006
- Gantenbein, G.; Alberti, S.; Arnold, A.; Dammertz, G.; Erckmann, V.; Giguët, E.; Heidinger, R.; Hogge, J.P.; Illy, S.; Kasperek, W.; Laqua, H.P.; Legrand, F.; Leonhardt, W.; Lievin, C.; Michel, G.; Neffe, G.; Piosczyk, B.; Schmid, M.; Thumm, M.; Tran, M.Q. Experimental results of the 1-MW, 140 GHz, CW gyrotron for W7-X. 21st IAEA Fusion Energy Conf., Chengdu, China, October 16-21, 2006
- Halbritter, J. DC and RF transport in normal and superconducting HTS, MgB₂ and Nb networks. DPG Spring Meeting of the Division Condensed Matter, 21st General Conf. of the Condensed Matter Division of the European Physical Society, Dresden, March 26-31, 2006 Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, R.6, B.41 (2006) TT 7.15
- Heidinger, R.; Danilov, I.; Meier, A.; Piosczyk, B.; Späth, P.; Thumm, M.; Bongers, W.; Graswinckel, M.; Henderson, M.; Leuterer, F.; Verhoeven, A.G.A.; Wagner, D. Development of high-power window prototypes for ECH&CD launchers. 24th Symp. on Fusion Technology (SOFT 2006), Warszawa, PL, September 11-15, 2006. Book of Abstracts S. 28
- Henderson, M.A.; Alberti, S.; Benin, P.; Bonicelli, T.; Chavan, R.; Campbell, D.; Cirant, S.; Dormicchi, O.; Dumbrajs, O.; Fasel, D.; Goodman, T.P.; Heidinger, R.; Hogge, J.-P.; Kasperek, W.; Lievin, C.; Piosczyk, B.; Poli, E.; Ramponi, G.; Saibene, G.; Sauter, O.; Taddia, G.; Thumm, M.; Tran, M.Q.; Verhoeven, A.G.A.; Zohm, H. EU developments of the ITER ECRH system. 24th Symp. on Fusion Technology (SOFT 2006), Warszawa, PL, September 11-15, 2006
- Illy, S.; Piosczyk, B.; Rzesnicki, T.; Dammertz, G.; Dumbrajs, O.; Gantenbein, G.; Jin, J.; Prinz, O.; Leonhardt, W.; Michel, G.; Schmid, M.; Thumm, M. 2 MW, CW, 170 GHz coaxial cavity gyrotron – results obtained with an experimental pre-prototype. 24th Symp. on Fusion Technology (SOFT 2006), Warszawa, PL, September 11-15, 2006. Book of Abstracts S. 29
- Kasperek, W.; Brand, P.; Braune, H.; Dammertz, G.; Erckmann, V.; Gantenbein, G.; Grünert, M.; Hollmann, F.; Kumric, H.; Jonitz, L.; Laqua, H.P.; Lechte, C.; Mangold, O.; Michel, G.; Noke, F.; Plaum, B.; Purps, F.; Schulz, T.; Schwörer, K.; Weissgerber, M. Recent developments and results from the 140 GHz / 10 MW CW transmission system for ECRH on the stellarator W7-X. 18th Joint Russian-German STC Workshop on ECRH and Gyrotrons, Nizhny Novgorod, Russia, June 20-27, 2006
- Kasperek, W.; Petelin, M.; Erckmann, V.; Shchegolkov, D.; Litvak, A.; Bruschi, A.; Thumm, M.; Plaum, B.; Grünert, M.; Malthaner, M.; ECRH groups at IPP Greifswald, FZK Karlsruhe, and IPF Stuttgart FADIS: Program for fast switching of high-power microwaves 18th Joint Russian-German STC Workshop on ECRH and Gyrotrons, Nizhny Novgorod, Russia, June 20-27, 2006
- Kochergov, R.; Landman, I.S.; Janeschitz, G. Implementation of plasma diffusion models in the code TOKES. 33rd European Physical Society Conf. on Plasma Physics, Roma, I, June 19-23, 2006
- Landman, I.S.; Janeschitz, G. Numerical simulations of plasma wall interactions for ITER. 17th Internat. Conf. on Plasma Surface Interactions in Controlled Fusion Devices, Hefei, China, May 22-26, 2006
- Landman, I.S.; Janeschitz, G. Plasma transport modelling with multiple-mapping magnetic surfaces. 33rd European Physical Society Conf. on Plasma Physics, Roma, I, June 19-23, 2006
- Laqua, H.P.; Brand, P.; Braune, H.; Dammertz, G.; Erckmann, V.; Gantenbein, G.; Hollmann, F.; Jonitz, L.; Michel, G.; Noke, F.; Purps, F.; Schulz, T.; Weissgerber, M. Status of the Wendelstein7-X ECRH system. 18th Joint Russian-German STC Workshop on ECRH and Gyrotrons, Nizhny Novgorod, Russia, June 20-27, 2006
- Laqua, H. for the ECRH-Team at FZK, the ECRH Team at IPF Stuttgart, and the ECRH Team at IPP ECRH for W7-X: Status and Relevance for ITER 18th Joint Russian-German STC Workshop on ECRH and Gyrotrons, Nizhny Novgorod, Russia, June 20-27, 2006
- Leuterer, F.; Wagner, D.; Manini, A.; Monaco, F.; München, M.; Ryter, F.; Schütz, H.; Zohm, H.; Franke, T.; Thumm, M.; Heidinger, R.; Gantenbein, G.; Kasperek, W.; Litvak, A.G.; Popov, L.G.; Nichiporenko, V.O.; Myasnikov, V.E.; Denisov, G.G.; Tai, E.M.; Solyanova, E.A.; Malygin, S.A. First tests of the new multi-frequency ECRH system at ASDEX upgrade. 33rd IEEE Internat. Conf. on Plasma Science (ICOPS 2006), Traverse City, Mich., June 4-8, 2006. Book of Abstracts S.190
- Louksha, O.; Sominski, G.; Samsonov, D.; Lygin, V.; Kufin, A.; Zapevalov, V.; Piosczyk, B.; Thumm, M. Improvement of gyrotron efficiency by enhancement of beam pitch factor 18th Joint Russian-German STC Workshop on ECRH and Gyrotrons, Nizhny Novgorod, Russia, June 20-27, 2006
- Pestchanyi, S.; Landman, I. ELM induced carbon contamination of ITER core. 17th Internat. Conf. on Plasma Surface Interactions in Controlled Fusion Devices, Hefei, China, May 22-26, 2006
- Pestchanyi, S. Simulation of cracks in tungsten under ITER specific heat loads. 24th Symp. on Fusion Technology (SOFT 2006), Warszawa, PL, September 11-15, 2006. Book of Abstracts S.217
- Piosczyk, B.; Alberti, S.; Bariou, D.; Benin, P.; Bonicelli, T.; Dammertz, G.; Dumbrajs, O.; Fasel, D.; Flamm, J.; Gantenbein, G.; Giguët, E.; Goodman, T.; Henderson, M.; Hogge, J.P.; Illy, S.; Jin, J.; Leonhardt, W.; Lievin, C.; Michel, G.; Porte, L.; Prinz, O.; Rzesnicki, T.; Schmid, M.; Thumm, M.; Tran, M.Q. 170 GHz, 2 MW, CW coaxial cavity gyrotron for ITER. Status and experimental results. 21st IAEA Fusion Energy Conf., Chengdu, China, October 16-21, 2006

Piosczyk, B.; Dammertz, G.; Dumbrajs, O.; Gantenbein, G.; Illy, S.; Jin, J.; Leonhardt, W.; Michel, G.; Prinz, O.; Rzesnicki, T.; Schmid, M.; Thumm, M.
2 MW, CW, 170 GHz coaxial-cavity gyrotron – experimental results with the pre-prototype and status.
18th Joint Russian-German STC Workshop on ECRH and Gyrotrons, Nizhny Novgorod, Russia, June 20-27, 2006

Piosczyk, B.
Ein 2 MW, CW 170 GHz Gyrotron mit koaxialem Resonator für ITER. Stand der Entwicklung.
Vortr.: Universität Stuttgart, 20. Juli 2006

Prinz, H.O.; Arnold, A.; Flamm, J.; Thumm, M.
3D simulation of quasi-optical output systems for MW-gyrotrons.
18th Joint Russian-German STC Workshop on ECRH and Gyrotrons, Nizhny Novgorod, Russia, June 20-27, 2006

Prinz, H.O.; Arnold, A.; Thumm, M.
Analysis of the 118 GHz TE_{2,6} quasi-optical mode converter. Simulation results.
Vortr.: Centre D'Etudes Nucleaires (CEA), Cadarache, F,
8. September 2006

Schmid, M.; Illy, S.; Dammertz, G.; Erckmann, V.; Thumm, M.
Transverse field collector sweep system for high power CW gyrotrons.
24th Symp.on Fusion Technology (SOFT 2006), Warszawa, PL, September 11-15, 2006
Book of Abstracts S.35

Thumm, M.; Arnold, A.; Dammertz, G.; Gantenbein, G.; Heidinger, R.; Illy, S.; Leonhardt, W.; Neffe, G.; Piosczyk, B.; Schmid, M.; Alberti, S.; Hogge, J.P.; Tran, M.Q.; Braune, H.; Erckmann, V.; Laqua, H.; Michel, G.; Kasperek, W.; Magne, R.; Giguët, E.; Legrand, F.; Lievin, C.
EU megawatt-class 140 GHz CW gyrotron.
33rd IEEE Internat.Conf.on Plasma Science (ICOPS 2006), Traverse City, Mich., June 4-8, 2006
Book of Abstracts S.374

Thumm, M.
Gyrotron development in EU for W7-X and ITER.
Vortr.: Centre D'Etudes Nucleaires (CEA), Cadarache, F,
8.September 2006

Thumm, M.; Alberti, S.; Arnold, A.; Bariou, D.; Dammertz, G.; Darbos, C.; Dumbrajs, O.; Flamm, J.; Gantenbein, G.; Erckmann, V.; Giguët, E.; Heidinger, R.; Hogge, J.P.; Illy, S.; Jin, J.; Kasperek, W.; Lievin, C.; Magne, R.; Michel, G.; Piosczyk, B.; Prinz, O.; Rzesnicki, T.; Schwörer, K.; Tran, M.Q.; Yovchev, I.
High power gyrotron development in EU for present fusion experiments and for ITER.
Workshop on Electron Cyclotron Masers (ECMs) for Fusion Engineering and other Applications (EFEA-2006), Roorkee, IND, April 18, 2006

Verhoeven, A.G.A.; Bongers, W.A.; Bruschi, A.; Cirant, S.; Danilov, I.; Elzendoorn, B.S.Q.; Fernandez Curto, A.; Gantenbein, G.; Graswinckel, M.F.; Heidinger, R.; Kasperek, W.; Kruijt, O.G.; Lamers, B.; Plaum, B.; Ronden, D.M.S.; Schüller, F.C.; Westerhof, E.; Zohm, H.
Remote steering design of the ITER ECRH upper-port launcher.
14th Joint Workshop on Electron Cyclotron Emission and Electron Cyclotron Resonance Heating (EC 14), Santorini, GR, May 9-12, 2006
Book of Abstracts S. 48

Verhoeven, T.; Bongers, W.; Bruschi, A.; Elzendoorn, B.; Fernandez, A.; Gantenbein, G.; Graswinckel, M.; Henderson, M.; Heidinger, R.; Kasperek, W.; Kruijt, O.; Lamers, B.; Plaum, B.; Ronden, D.; Saibene, G.; Schuller, C.; Westerhoff, E.; Zohm, H.
Design and test of the remote-steering ITER ECRH upper-port launcher.
24th Symp.on Fusion Technology (SOFT 2006), Warszawa, PL, September 11-15, 2006
Book of Abstracts S.13

Zohm, H.; Gantenbein, G.; Leuterer, F.; Manini, A.; Maraschek, M.; Yu, Q.; ASDEX Upgrade Team
Control of MHD instabilities by ECCD: ASDEX upgrade results and implications for ITER.
21st IAEA Fusion Energy Conf., Chengdu, China, October 16-21, 2006

NANOMIKRO: Programm Nano- und Mikrosysteme

Buchbeitrag:

Thumm, M.
Historical German contributions to physics and applications of electromagnetic oscillations and waves.
Sarkar, T.K. [Hrsg.]
History of Wireless
Hoboken, N.J.: Wiley, 2006 S.327-48

Link, G.; Bauer, W.; Weddigen, A.; Ritzhaupt-Kleissl, H.-J.; Thumm, M.
MM-wave processing of ceramics
David E. Clark, Diane C. Folz, Carlos E. Folgar, Morsi M. Hahmoud [Hrsg.]
Microwave Solutions for Ceramic Engineers
The American Ceramic Society, 2006, 355-363.

Publikationen in begutachteten Zeitschriften:

Augieri, A.; Celentano, G.; Ciontea, L.; Galluzzi, V.; Gambardella, U.; Halbritter, J.; Mancini, A.; Petrisor, T.; Rufoloni, A.; Vannozzi, A.
Superconducting and normal state transport properties of epitaxial 10 at.%Ca substituted YBCO thin films.
Physica C, 437-438(2006) S.17-20
DOI:10.1016/j.physc.2005.12.010

Ciovati, G.; Halbritter, J.
Analysis of the medium field Q-slope in superconducting cavities made of bulk niobium.
Physica C, 441(2006) S.57-61
DOI:10.1016/j.physc.2006.03.053

Ginzburg, N.S.; Denisov, G.G.; Kuzikov, S.V.; Peskov, N.Yu.; Sergeev, A.S.; Zaslavsky, V.Yu.; Arzhannikov, A.V.; Kalinin, P.V.; Sinitky, S.P.; Thumm, M.
Specific features of mode spectrum of planar structures with two-dimensional bragg corrugation (theory and 'cold' experiment).
Radiophysics and Quantum Electronics, 48(2005) S.748-61
DOI:10.1007/s11141-006-0004-6

Takayama, S.; Link, G.; Miksch, S.; Sato, M.; Ichikawa, J.; Thumm, M.
Millimetre wave effects on sintering behaviour of metal powder compacts.
Powder Metallurgy, 49(2006) S.274-80
DOI:10.1179/174329006X110835

Zemanova, M.; Link, G.; Takayama, S.; Nüesch, R.; Janek, M.
Modification of layer charge in smectites by microwaves.
Applied Clay Science, 32(2006) S.271-82
DOI:10.1016/j.clay.2006.01.002

Zhang, S.C.; Thumm, M.
Large-orbit coaxial-structure cyclotron autoresonance maser.
Applied Physics Letters, 88(2006) S.0335141/1-3
DOI:10.1063/1.2166687

Sonstige Publikationen die in gedruckter Form vorliegen:

Agarwal, K.; Rao, G.P.; Kartikeyan, M.V.; Thumm, M.K.
A proximity fed circularly polarized microstrip patch antenna with a cross slot in the ground plane.
Wiesbeck, W. [Hrsg.]
German Microwave Conf. (GeMIC 2006), Karlsruhe, March 28-30, 2006. Proc. on CD-ROM

Agarwal, K.; Rao, G.P.; Kartikeyan, M.V.; Thumm, M.
Wideband dual feed electromagnetically coupled circularly polarized microstrip patch antenna.
Shen, S.C. [Hrsg.]
IRMMW-THz 2006: Conf.Digest of the 2006 Joint 31st Internat. Conf. on Infrared and Millimeter Waves and 14th Internat. Conf. on Terahertz Electronics, Shanghai, China, September 18-22, 2006. Piscataway, N.J.: IEEE Operations Center, 2006 S.438
Auch auf CD-ROM

Arzhannikov, A.F.; Ginzburg, N.S.; Kalinin, P.V.; Kuznetsov, S.A.; Peskov, N.Yu.; Rozental, R.M.; Sergeev, A.S.; Sinitky, S.L.; Stepanov, V.D.; Thumm, M.; Zaslavsky, V.Yu.; Zotova, I.V.
Intercavity scattering scheme for two-stage generation of submillimeter radiation on the base of planar 2D Bragg FEM.
Litvak, A.G. [Hrsg.]
Strong Microwaves in Plasmas: Proc. of the Internat.Workshop, Nizhny Novgorod, Russia, July 25-August 1, 2005
Vol. 1 S.228-32
Nizhny Novgorod: Inst. of Applied Physics, Russian Acad. of Sciences, 2006

Augieri, A.; Celentano, G.; Ciontea, K.; Galluzzi, V.; Gambardella, U.; Halbritter, J.; Mancini, A.; Petrisor, T.; Rufoloni, A.; Vannozzi, A.
Superconducting and normal state transport properties of epitaxial 10 at.% Ca substituted YBCO thin films.
4th Internat.Conf. on Vortex Matter in Nanostructured Superconductors (VORTEX IV), Aghia Pelaghia, GR, September 3-9, 2005

Kartikeyan, M.V.; Borie, E.; Thumm, M.
Design studies of a 250 GHz, 50-100 W, CW second harmonic gyrotron.
Shen, S.C. [Hrsg.]
IRMMW-THz 2006: Conf.Digest of the 2006 Joint 31st Internat. Conf. on Infrared and Millimeter Waves and 14th Internat.Conf. on Terahertz Electronics, Shanghai, China, September 18-22, 2006. Piscataway, N.J.: IEEE Operations Center, 2006 S.479
Auch auf CD-ROM

Kartikeyan, M.V.; Kumar, A.; Borie, E.; Illy, S.; Piosczyk, B.; Thumm, M.K.
Progress in the IHM-IITR collaborative research on the design of application specific gyrotrons.
Nat. Symp.on Vacuum Electronic Devices and Applications (VEDA), Central Electronics Engineering Research Institute (CEERI), Pilani, IND, October 11-13, 2006. Proc. S.TS-5.2

Kartikeyan, M.V.; Borie, E.; Thumm, M.K.
Studies on a 250 GHz, 50 W, CW second harmonic gyrotron for spectroscopy.
Wiesbeck, W. [Hrsg.]
German Microwave Conf. (GeMIC 2006), Karlsruhe, March 28-30, 2006. Proc.on CD-ROM

Konoplev, I.V.; Cross, A.W.; Ginzburg, N.S.; He, W.; McGrane, P.; Peskov, N.Yu.; Phelps, A.D.R.; Robertson, C.W.; Ronald, K.; Sergeev, A.S.; Thumm, M.; Whyte, C.G.; Zaslavsky, V.Yu.
Study of co-axial free electron maser based on two-dimensional distributed feedback.
Litvak, A.G. [Hrsg.]
Strong Microwaves in Plasmas: Proc.of the Internat.Workshop, Nizhny Novgorod, Russia, July 25-August 1, 2005
Vol.1 S. 208-13
Nizhny Novgorod: Inst.of Applied Physics, Russian Acad.of Sciences, 2006

- Link, G.; Miksch, S.; Takayama, S.; Thumm, M.
Anisotropic sintering in polarized microwave fields. Evidence for non-thermal microwave effects.
Shen, S.C. [Hrsg.]
IRMMW-THz 2006: Conf.Digest of the 2006 Joint 31st Internat. Conf. on Infrared and Millimeter Waves and 14th Internat. Conf. on Terahertz Electronics, Shanghai, China, September 18-22, 2006
Piscataway, N.J.: IEEE Operations Center, 2006 S.285
Auch auf CD-ROM
- Link, G.; Rhee, S.; Thumm, M.
Dilatometer measurements in a mm-wave oven.
Willert-Porada, M. [Hrsg.]
Advances in Microwave and Radio Frequency Processing : Report from the 8th Conf. on Microwave and High Frequency Heating, Bayreuth, September 3-7, 2001
Berlin [u.a.]: Springer, 2006, S.506-13
- Link, G.; Wolff, M; Takayama, S; Falk, G; Clasen, R; Thumm, M.
Evidence for non-thermal effects during microwave sintering of zirconia ceramics.
Litvak, A.G. [Hrsg.]
Strong Microwaves in Plasmas: Proc.of the Internat. Workshop, Nizhny Novgorod, Russia, July 25-August 1, 2005
Vol. 2, S.722-26
Nizhny Novgorod: Inst.of Applied Physics, Russian Acad.of Sciences, 2006
- Link, G.; Miksch, S.; Takayama, S.; Thumm, M.
Non-thermal effects of microwave fields onto the pore structure during sintering.
Freimann, S. [Hrsg.]
Proc.of the 1st Internat.Congress on Ceramics: A Global Roadmap, Toronto, CDN, June 25-29, 2006
Chichester [u.a.]: Wiley, 2006 CD-ROM
- Ogawa, I.; Idehara, T.; Myodo, M.; Ando, H.; Wagner, D.; Thumm, M.
Development of a quasi-optical transmission system for gyrotron application as a radiation source.
Shen, S.C. [Hrsg.]
IRMMW-THz 2006: Conf.Digest of the 2006 Joint 31st Internat. Conf. on Infrared and Millimeter Waves and 14th Internat. Conf. on Terahertz Electronics, Shanghai, China, September 18-22, 2006
Piscataway, N.J.: IEEE Operations Center, 2006 S.552
Auch auf CD-ROM
- Peskov, N.Yu.; Ginzburg, N.S.; Denisov, G.G.; Kuzikov, S.V.; Rozental, R.M.; Sergeev, A.S.; Thumm, M.
Demonstration of selectivity of planar 2D Bragg structures.
18th Joint Russian-German STC Workshop on ECRH and Gyrotrons, Nizhny Novgorod, Russia, June 20-27, 2006
- Peskov, N.Yu.; Ginzburg, N.S.; Denisov, G.G.; Kuzikov, S.V.; Sergeev, A.S.; Arzhannikov, A.V.; Kalinin, P.V.; Rozental, R.M.; Sinitsky, S.L.; Thumm, M.; Zaslavsky, V.Yu.
Peculiarities of mode spectrum of planar 2D Bragg resonator (theory and experiment).
Litvak, A.G. [Hrsg.]
Strong Microwaves in Plasmas: Proc. of the Internat.Workshop, Nizhny Novgorod, Russia, July 25-August 1, 2005
Vol. 1 S.321-29
Nizhny Novgorod: Inst. of Applied Physics, Russian Acad. of Sciences, 2006
- Phelps, A.D.R.; Konoplev, I.V.; McGrane, P.; Cross, A.W.; He, W.; Whyte, C.G.; Ronald, K.; Thumm, M.K.; Ginzburg, N.S.; Peskov, N.Yu.; Sergeev, A.S.
Co-axial Ka-band free-electron maser using two-dimensional feedback.
Abe, D.K. [Hrsg.]
High Energy Density and High Power RF : 7th Workshop, Kalamata, GR, June 13-17, 2005
Melville, N.Y.: American Institute of Physics, 2006, S.238-45
(AIP Conference Proceedings; 807) Incl. CD-ROM
- Rao, G.P.; Agarwal, K.; Kartikeyan, M.V.; Thumm, M.
Design of multiple beams forming network for switched beam antenna system with E-shaped microstrip antenna.
Shen, S.C. [Hrsg.]
IRMMW-THz 2006: Conf.Digest of the 2006 Joint 31st Internat. Conf. on Infrared and Millimeter Waves and 14th Internat. Conf. on Terahertz Electronics, Shanghai, China, September 18-22, 2006
Piscataway, N.J.: IEEE Operations Center, 2006 S.439
Auch auf CD-ROM
- Rao, G.P.; Agarwal, K.; Kartikeyan, M.V.; Thumm, M.K.
Wideband single patch e-shaped compact microstrip antenna for high speed wireless local area networks.
Wiesbeck, W. [Hrsg.]
German Microwave Conf. (GeMIC 2006), Karlsruhe, March 28-30, 2006
Proc. on CD-ROM
- Thumm, M.; Feher, L.
Millimeter-wave-sources development: present and future.
Willert-Prada, M. [Hrsg.]
Advances in Microwave and Radio Frequency Processing: Report from the 8th Conf. on Microwave and High Frequency Heating, Bayreuth, September 3-7, 2001
Berlin [u.a.]: Springer, 2006 S.15-23
- Zemanova, M.; Janek, M.; Link, G.; Nüesch, R.; Thumm, M.; Takayama, S.
Enhanced layer charge modification in smectites by using microwaves.
Nanofair 2006: New Ideas for Industry; 5th Internat. Nanotechnology Symp., Karlsruhe, November 21-22, 2006
Düsseldorf : VDI Verl., 2006 S.63-66 (VDI-Berichte; 1940)
- Vorträge, die nicht in gedruckter Form vorliegen:**
- Arnedo, I.; Arregui, I.; Gil, J.; Ortiz, N.; Lopetegui, T.; Laso, M.A.G.; Thumm, M.; Sorolla, M.; Schmitt, D.; Guglielmi, M.
Filtro paso bajo para alta potencia en banda ku con espurios suprimidos.
21.Simp.Nacional de la Union Cientificia Internacional de Radio URSI, Auditorio Principe Felipe, Oviedo, E, 12-15 Septiembre, 2006
- Ginzburg, N.S.; Malkin, A.M.; Peskov, N.Y.; Sergeev, A.S.; Zaslavsky, V.Y.; Rozental, R.M.; Arzhannikov, A.V.; Kalinin, P.V.; Sinitsky, S.L.; Thumm, M.
Modeling of powerful free-electron masers with advanced Bragg structures.
16th Internat. Conf. on High-Power Particle Beams, (Beams 2006), Oxvord, GB, July 10-13, 2006
- Hettenbach, J.; Kumric, H.; Gantenbein, G.
First investigations of metamaterials for application in microwave components in the frequency range of 15-20 GHz.
3rd Workshop on Metamaterials and Special Materials for Electromagnetic Applications and TLC, Roma, I, March 30-31, 2006

Link, G.; Miksch, S.; Takayama, S.; Thumm, M.
Direct experimental demonstration of non-thermal microwave effects during sintering of ceramics.
33rd IEEE Internat. Conf. on Plasma Science (ICOPS 2006),
Traverse City, Mich., June 4-8, 2006
Book of Abstracts S.263

Link, G.; Miksch, S.; Takayama, S.; Thumm, M.
Influence of polarized high power microwave fields onto ceramic pore structures during sintering.
18th Joint Russian-German STC Workshop on ECRH and Gyrotrons, Nizhny Novgorod, Russia, June 20-27, 2006

Schlabach, S.; Szabo, D.V.; Feher, L.
Nanoparticle assisted curing of fibre composites using the autoclaveless fabrication process of HEPHAISTOS.
Internat. Microwave Power Symp., Boston, Mass., August 9-11, 2006

Thumm, M.
Non-fusion applications of high-power micro- and millimeter waves.
Vortr.: Central Electronics Engineering Research Institute (CEERI), Pilani, IND, 18. Oktober 2006

Thumm, M.
Worldwide status of gyro-devices.
Vortr.: Central Electronics Engineering Research Institute (CEERI), Pilani, IND, 18. Oktober 2006

Patente:

Link, G.; Nüesch, R.; Janek, M.; Zemanova, M.
Verfahren zur Veränderung der Strukturladung von mineralischen Silikatverbindungen.
DE-OS 10 2005 017 412 (19.10.2006)
EP-OS 1 712 598 (18.10.2006)

NUKLEAR: Programm Nukleare Sicherheitsforschung

Publikationen in begutachteten Zeitschriften:

Broeders, C.; Kessler, G.
The generation of denatured reactor plutonium by different options of the fuel cycle.
ATW – International Journal for Nuclear Power, 51(2006)
S. 711-16

Engelko, V.I.; Kuznetsov, V.S.; Kuryshev, V.O.; Müller, G.; Vyazmenova, G.A.
Electron source of triode type with radial converging electron flow.
Elektrotechnica & Elektronika, (2006) Nr. 5-6, S. 28-32

Engelko, V.I.; Müller, G.; Kuznetsov, V.S.; Vyazmenova, G.A.; Tregubov, V.F.
Limiting currents in electron sources of triode type with radial converging electron flow.
Elektrotechnica & Elektronika, (2006) Nr.5-6, S.25-27

Heinzel, A.; Kondo, M.; Takahashi, M.
Corrosion of steels with surface treatment and Al-alloying by GESA exposed in lead-bismuth.
Journal of Nuclear Materials, 350(2006) S.264-70
DOI:10.1016/j.jnucmat.2006.01.014

Kessler, G.
Analysis for a future proliferation resistant plutonium fuel cycle.
ATW – International Journal for Nuclear Power, 51(2006)
S. 337-40

Weisenburger, A.; Aoto, K.; Müller, G.; Heinzel, A.; Schumacher, G.; Furukawa, T.
Behaviour of chromium steels in liquid Pb-55.5Bi with changing oxygen content and temperature.
Journal of Nuclear Materials, 358(2006) S.69-76
DOI:10.1016/j.jnucmat.2006.07.001

Sonstige Publikationen die in gedruckter Form vorliegen:

Engelko, V.I.; Kuznetsov, V.S.; Kuryshev, V.O.; Müller, G.; Vyazmenova, G.A.
Electron source of triode type with radial converging electron flow.
8th Internat. Conf. on Electron Beam Technologies, Varna, BG, June 5-10, 2006

Engelko, V.I.; Müller, G.; Kuznetsov, V.S.; Vyazmenova, G.A.; Tregubov, V.F.
Limiting currents in electron sources of triode type with radial converging electron flow.
8th Internat. Conf. on Electron Beam Technologies, Varna, BG, June 5-10, 2006

Stieglitz, R.; Knebel, J.; Fazio, C.; Müller, G.; Konys, J.
Heavy liquid metal technologies development in KALLA.
Internat. Congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP '06), Reno, Nev., June 4-8, 2006
Proc. on CD-ROM S.478-87 (Paper 6277)
LaGrange Park, Ill.: American Nuclear Soc., 2006

Vorträge, die nicht in gedruckter Form vorliegen:

Broeders, D.; C.H.M.; Kessler, G.
The generation of denatured reactor plutonium by different options of the fuel cycle.
IAEA Consultancy Meeting on Protected Plutonium Production, Wien, A, June 15-16, 2006

Engelko, V.I.; Kuznetsov, V.S.; Vyazmenova, G.A.
Limiting currents in electron sources of triode type with converging electron beam.
16th Internat. Conf. on High-Power Particle Beams, (Beams 2006), Oxford, GB, July 10-13, 2006

Heinzel, A.; Fazio, C.; Müller, G.; Weisenburger, A.; Markov, V.G.; Kastanov, A.D.
Low cycling fatigue tests of surface modified T91 steel in Pb₄₅Bi₅₅ at 550 °C.
Internat. Workshop on Spallation Material Technology (IWSMT), Taos, N.M.; October 16-20, 2006

Heinzel, A.
Schwerpunkte der nuklearen Sicherheitsforschung am Forschungszentrum Karlsruhe.
Kolloquium 'Perspektiven in der Kerntechnik', Regensburg, 13.-15. März 2006

Kessler, G.
Analysis for a future proliferation resistant plutonium fuel cycle.
IAEA Consultancy Meeting on Protected Plutonium Production, Wien, A, June 15-16, 2006

Kessler, G.
Can plutonium be denatured and be incinerated totally by multi recycling.
Vortr.: Argonne National Laboratory, Argonne, Ill., 18. Januar 2006

Kessler, G.
Evaluation of proliferation resistance of fuels (MOX), links to the isotopic plutonium compositions and the associated characteristics.
Vortr.: CEA Saclay, F, 30. Mai 2006

Konys, S.; Müller, G.; Möslang, A.; Konobeev, A.
Korrosions-, mechanisches und Bestrahlungsverhalten von Materialien für kerntechnische Anlagen.
3. Sitzung des Beirates für das Programm Nukleare Sicherheitsforschung, Karlsruhe, 17. Februar 2006

UMWELT: Programm Nachhaltigkeit und Technik

Buchbeitrag:

Bluhm, H.
Pulsed Power Systems: Principles and Applications.
Berlin [u.a.]: Springer, 2006. Ink. CD-ROM

Publikationen in begutachteten Zeitschriften:

Akhtar, J.M.; Feher, L.E.; Thumm, M.
A waveguide-based two-step approach for measuring complex permittivity tensor of uniaxial composite materials.
IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 54(2006) S.2011-22
DOI:10.1109/TMTT.2006.873623

Feher, L.; Thumm, M.; Drechsler, K.
Gigahertz and nanotubes. Perspectives for innovations with novel industrial microwave processing technology.
Advanced Engineering Materials, 8(2006) S.26-32
DOI:10.1002/adem.200500148

Frey, W.; White, J.A.; Price, R.O.; Blackmore, P.F.; Joshi, R.P.; Nuccitelli, R.; Beebe, S.J.; Schoenbach, K.H.; Kolb, J.F.
Plasma membrane voltage changes during nanosecond pulsed electric field exposure.
Biophysical Journal, 90(2006) S.3608-15
DOI:10.1529/biophysj.105.072777

Katsuki, S.; Tanaka, K.; Fudamoto, T.; Namihira, T.; Akiyama, H.; Bluhm, H.J.
Shock waves due to pulsed streamer discharges in water.
Japanese Journal of Applied Physics, 45(2006) S.239-42
DOI:10.1143/JJAP.45.239

Sonstige Publikationen die in gedruckter Form vorliegen

Akhtar, M.J.; Feher, L.; Thumm, M.
Electromagnetic characterization of aerospace certified epoxy resins at 2.45 GHz.
4th Annual Internat. Microwave Symp., Boston, Mass., August 9-11, 2006. Proc. on CD-ROM S. 11-14
Mechanicsville, Va.: Internat. Microwave Power Inst., 2006

Akhtar, M.J.; Feher, L.; Thumm, M.
Measurement of dielectric constant and loss tangent of epoxy resins using a waveguide approach.
IEEE Internat. Symp. on Antennas and Propagation (AP-S), USNC/URSI National Radio Science Meeting, American Electromagnetics Meeting (AMEREM), Albuquerque, N.M., July 9-14, 2006. Proc. on CD-ROM
New York, N.Y.: IEEE, 2006 S.3179-82

Feher, L.; Thumm, M.
Design of avionic microwave de-/anti-icing systems.
Willert-Porada, M. [Hrsg.]
Advances in Microwave and Radio Frequency Processing : Report from the 8th Conf. on Microwave and High Frequency Heating, Bayreuth, September 3-7, 2001
Berlin [u.a.]: Springer, 2006 S.695-702

Feher, L.; Thumm, M.
Industrial higher frequency microwave processing of composite materials.
Willert-Porada, M. [Hrsg.]
Advances in Microwave and Radio Frequency Processing : Report from the 8th Conf. on Microwave and High Frequency Heating, Bayreuth, September 3-7, 2001
Berlin [u.a.]: Springer, 2006 S.681-86

- Feher, L.; Stanculovic, S.; Wiesehöfer, R.
The industrial HEPHAISTOS microwave system technology.
4th Annual Internat. Microwave Symp., Boston, Mass., August
9-11, 2006. Proc. on CD-ROM S. 1-6
Mechanicsville, Va.: Internat. Microwave Power Inst., 2006
- Gupta, S.B.; Bluhm, H.
Diagnostic of oxidant production in under water pulsed corona
discharge.
Proc. of the 5th Internat. Symp. of Non-Thermal Plasma Techno-
logy for Pollution Control of Sustainable Development, Ile
d'Oleron, F, June 19-23, 2006. CD-ROM, Universite de Poitiers
- Gupta, S.B.; Bluhm, H.
Investigation of underwater streamer discharges for water
disinfection.
Cold Atmospheric Pressure Plasmas: Sources and Applications
(CAPPSA 2005): Proc. of the 2nd Internat. Workshop, Bruges, B,
August 30 – September 2, 2005
Gent : Universiteit Gent, 2005 S.226-29
- Gupta, S.B.; Bluhm, H.
Pulsed underwater corona discharges as a source of strong
oxidants: OH, and H₂O₂.
Vogelpohl, A. [Hrsg.]
Oxidation Technologies for Water and Wastewater Treatment
Special Topic: Recalcitrant and Antropogenic Micropollutants:
Proc. of the 4th Internat. Conf., Goslar, May 15-17, 2006
Clausthal-Zellerfeld: Papierflieger Verl., 2006 S.320-25
(CUTEC Serial Publication; 68)
- Hunyar, C.; Feher, L.; Thumm, M.
Processing of carbon-fiber reinforced composite (CFRP)
materials with innovative millimeter-wave technology.
Willert-Porada, M. [Hrsg.]
Advances in Microwave and Radio Frequency Processing:
Report from the 8th Conf. on Microwave and High Frequency
Heating, Bayreuth, September 3-7, 2001
Berlin [u.a.]: Springer, 2006 S.735-44
- Sack, M.; Bluhm, H.
New measurement methods for an industrial-scale
electroporation facility for sugar beets.
10th Internat.Conf.on Optimization of Electrical and Electronic
Equipment (OPTIM'06), Brasov, R, May 18-19, 2006
Proc.on CD-ROM
- Stanculovic, S.; Feher, L.; Thumm, M.
Directly coupled nonresonant slotted waveguide feeds for
2.45 GHz universal industrial applicators.
4th Annual Internat. Microwave Symp., Boston, Mass., August
9-11, 2006. Proc. on CD-ROM S.7-10
Mechanicsville, Va.: Internat.Microwave Power Inst., 2006
- Stanculovic, S., Feher, L.; Thumm, M.
Highly efficient slotted waveguide feeding systems for 2.45 GHz
industrial applicators.
Wiesbeck, W. [Hrsg.]
German Microwave Conf. (GeMIC 2006), Karlsruhe,
March 28-30, 2006. Proc. on CD-ROM
- Stanculovic, S.
Theoretical synthesis and experimental measurements of slotted
waveguide feeding systems for 2.45 GHz industrial microwave
heating installations.
Wissenschaftliche Berichte, FZKA-7263 (Dezember 2006)
Dissertation, Universität Karlsruhe 2006
- Thumm, M.; [Hrsg.]
Jahresbericht 2005 Institut für Hochleistungsimpuls- und
Mikrowellentechnik.
Wissenschaftliche Berichte, FZKA-7235 (April 2006)
- Vorträge, die nicht in gedruckter Form vorliegen:**
- An, W.; Baumung, K.; Bluhm, H.
Pressure release from pulsed underwater corona discharges.
Bioelectrics Consortium Meeting, Norfolk, Va., June 2-3, 2006
- Baumung, K.; An, W.
Diagnostik von Unterwasser-Koronaentladungen mit schnellen
bildgebenden Verfahren.
Frühjahrstagung der Fachverbände Kurzzeitphysik,
Plasmaphysik der DPG, Augsburg, 27.-30. März 2006
Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaften,
R.6, B.41(2006) P26.4
- Bluhm, H.; An, W.; Baumung, K.; Gupta, S.B.
A review of pulsed corona discharges in water: basics and
applications.
1st Euro-Asian Pulsed Power Conf. (EAPPC), Chengdu, China,
September 18-21, 2006
- Feher, L.; Thumm, M.
Industrial CFRP large part fabrication with the innovative
HEPHAISTOS-CA2 microwave processing system.
33rd IEEE Internat.Conf.on Plasma Science (ICOPS 2006),
Traverse City, Mich., June 4-8, 2006
Book of Abstracts S.263
- Frey, W.
Inactivation of bacteria by pulsed electric field treatment. Basics
and some technological aspects.
COE Forum on Pulsed Power Science, Kumamoto, J,
September 14, 2006
- Frey, W.; Gusbeth, C.; Schwartz, T.; Volkmann, H.; Kirchen, S.;
Wüstner, R.; Sträßner, R.; Bluhm, H.
Inactivation of microorganisms by pulsed electric field treatment:
the influence of pulse parameters on the inactivation rate.
33rd IEEE Internat. Conf. on Plasma Science (ICOPS 2006),
Traverse City, Mich., June 4-8, 2006
Book of Abstracts S.268
- Frey, W.
Status of pulsed laser fluorescence microscopy at FZK
Karlsruhe. Experiments on the characteristics of ANNINE-6.
Bioelectrics Consortium Meeting, Norfolk, Va., June 2-3, 2006
- Gupta, S.B.; Bluhm, H.
Advanced oxidation processes resulting from underwater-pulsed
corona discharges.
1st Euro-Asian Pulsed Power conf. (EAPPC), Chengdu, China,
September 18-21, 2006
- Gusbeth, C.A.; Frey, W.; Wüster, R.; Sträßner, R.; Bluhm, H.J.;
Schwartz, T; Volkmann, H.; Kirchen, S.; Marten, M.; Kohnen, W.
Investigation of possible mutagenic changes induced to
Pseudomonas putida by pulsed electric field treatment.
33rd IEEE Internat.Conf. on Plasma Science (ICOPS 2006),
Traverse City, Mich., June 4-8, 2006
Book of Abstracts S.357
- Sack, M.; Bluhm, H.
Electroporation of slices of sugar beets with rectangular pulses.
33rd IEEE Internat.Conf.on Plasma Science (ICOPS 2006),
Traverse City, Mich., June 4-8, 2006
Book of Abstracts S.358
- Sack, M.; Bluhm, H.
New methods to monitor the performance of industrial-scale
facilities for sugar beet electroporation.
Bioelectrics Consortium Meeting, Norfolk, Va., June 2-3, 2006

Thumm, M.
Overmoded waveguide components I.
Votr.: Central Electronics Engineering Research Institute
(CEERI), Pilani, IND, 18. Oktober 2006

Thumm, M.
Overmoded waveguide components II.
Votr.: Central Electronics Engineering Research Institute
(CEERI), Pilani, IND, 19. Oktober 2006

Patente

Feher, L.; Nuss, V.; Seitz, T.; Flach, A.
Mikrowellenresonator, eine aus einem solchen Mikrowellen-
resonator modular aufgebaute Prozessstraße, ein Verfahren
zum Betreiben nach diesem Verfahren thermisch prozessierte
Gegenstände/Werkstücke mittels Mikrowelle.
DE-PS 10 329 411 (31.1.2005); DE-OS 10 329 411 (10.2.2005)
WO-OS 2005/004542 (13.1.2005)
US-PS 7 122 772 (17.10.2006)CN-OS 1 639 865 (29.3.2006)
RU-OS 2006 102 860 (10.7.2006)

Giese, H.; Hoppé, P.
Aufbau einer elektrodynamischen Fraktionieranlage.
DE-PS 10 346 055 (6.8.2004)
EP-OS 1 667 798 (14.6.2006)

Giese, H.; Edinger, W.; Hoppé, P.; Singer, J.; Stemmermann,
P.; Schweike, U.
Prozessreaktor und Betriebsverfahren für die elektrodynamische
Fragmentierung.
DE-OS 10 346 650 (19.5.2005)
EP-OS 1 673 172 (28.6.2006)

Giese, H.; Frey, W.; Sträßner, R.; Schormann, A.; Giron, K.
Verfahren zum Betreiben einer Fragmentieranlage und
Fragmentieranlage zur Durchführung des Verfahrens.
DE-PS 10 342 376 (3.2.2005)
EP-OS 1 663 498 (7.6.2006)
RU-OS 2006 112 208 (27.8.2006)

Sack, M.
Trigger-/Zündeinrichtung an einem aus n-Stufenkondensatoren
bestehenden Marx-Generator
DE-OS 10 320 425 (16.12.2004)
CN-OS 1 784 830 (7.6.2006)
EP-OS 1 620 946 (1.2.2006)

Schultheiß, C.; Sack, M.
Einrichtung zum Elektroporieren von biologisch pflanzlichen
Prozessgut.
DE-OS 10 2004 025 046 (15.12.2005)

Schultheiss, C.; Buth, L.H.O.
Kanalfunkenquelle zur Erzeugung eines stabil gebündelten
Elektronenstrahls.
DE-PS 10 207 835 (15.1.2003)
EP-OS 1 479 090 (24.11.2004)
EP-PS 1 479 090 (22.3.2006)

Schultheiss, C.; Adelhelm, C.; Bergfeldt, B.; Strässner, R.;
Neubert, V.; Kotte, B.; Denning, H.
Verfahren zur Aufbereitung von Asche aus Müllverbrennungs-
anlagen und von mineralischen Rückständen durch Entsalzung
und künstliche Alterung mittels elektrodynamischer Unter-
Wasser-Prozesse und Anlage zur Durchführung des Verfahrens.
DE-OS 19 902 010 (10.8.2000)
DE-PS 19 902 010 (24.8.2000)
EP-PS 1 153 149 (2.7.2003)
US-PS 6 761 858 (13.7.2004)
JP-PS 3 811 355 (2.6.2006)

Schultheiss, C.; Neubert, V.; Edinger, W.; Sträßner, R.
Verfahren zur selektiven Abtrennung von Partikeln aus einer
Suspension.
EP-PS 1 243 339 (7.12.2005)

Väth, W.; Frey, W.
Verfahren zur rechnergestützten Prozessführung einer
Fragmentieranlage.
DE-PS 10 302 867 (17.11.2003)
EP-OS 1 585 597 (19.10.2005)
EP-PS 1 585 597 (10.5.2006)
CN-OS 1 741 855 (1.3.2006)