



Forschungszentrum Karlsruhe
in der Helmholtz-Gemeinschaft

Wissenschaftliche Berichte

FZKA 7474

Jahresbericht 2008
Institut für
Hochleistungsimpuls- und
Mikrowellentechnik

M. Thumm

Institut für Hochleistungsimpuls- und
Mikrowellentechnik

April 2009

Forschungszentrum Karlsruhe

in der Helmholtz-Gemeinschaft

Wissenschaftliche Berichte

FZKA 7474

Jahresbericht 2008 des Institutes für Hochleistungsimpuls- und Mikrowellentechnik

Redaktion: M. Thumm
Institut für Hochleistungsimpuls-
und Mikrowellentechnik

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

2009

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

urn:nbn:de:0005-074741

Institut für Hochleistungsimpuls- und Mikrowellentechnik (IHM)

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

Hauptarbeitsgebiete des Institut für Hochleistungsimpuls- und Mikrowellentechnik (IHM) sind die Forschung, Entwicklung, Ausbildung und, in Zusammenarbeit mit der Stabsabteilung Innovation (IV) und industriellen Partnern, der Technologietransfer auf den Gebieten der Impuls- und Mikrowellentechnik bei hohen Leistungen. Die Vorhaben des Instituts sind in vier HGF-Programme eingebunden: UMWELT, FUSION, NUKLEAR und NANOMIKRO. Es 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 laufende 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, IV und eine KIT-Shared Research Group).
- 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).

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 0,92 MW Leistung bei 30 min. Pulslängen, einem Wirkungsgrad von fast 45% und einer Modenreinheit von 97.5% (Programm FUSION).
- Entwicklung und Test von 2 MW, 170 GHz Gyrotronröhren mit koaxialem 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). In Zusammenarbeit mit CRPP und TED wurde eine erste Prototypröhre des europäischen 2 MW, 170 GHz ITER-Gyrotrons mit koaxialem Resonator gefertigt und in Betrieb genommen. Bei noch reduzierten Röhrenparametern wurde eine Ausgangsleistung von 1,4 MW im Kurzpulsbetrieb (2 ms; 0.5 MW über 60 ms) erreicht (Programm FUSION).

- Experimentelle und theoretische Untersuchungen zum Verhalten der ersten Wand und des Divertors von Tokamak-Fusionsreaktoren bei Plasmainstabilitäten (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 neuen grundlegenden Experimenten konnten weitere nicht-thermische Mikrowelleneffekte 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 Kohlefaser-verbundwerkstoffen mittels Mikrowellenprozesstechnik bei 2,45 GHz. Die neue HEPHAISTOS-CA3-Anlage mit einem Volumen von 7000 l und einer Mikrowellenleistung von 25 kW wurde in Betrieb genommen. Damit werden in Zukunft Prozessentwicklungen mit der Industrie für verschiedenste Anwendungen und Verfahren auf Dienstleistungsbasis erschlossen werden können. Mit den neuen Anlagen der 2,45 GHz HEPHAISTOS-Systemlinie werden gegenüber der herkömmlichen Herstellung in Autoklaven wesentlich verkürzte Prozesszeiten bei leicht verbesserten Materialeigenschaften erreicht (Programm UMWELT und IV).

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 Bachelor/Master-Studierenden, 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 41 Mitarbeiter/innen beschäftigt, darunter 19 Akademiker/innen, 5 Ingenieure und 17 Sonstige Mitarbeiter/innen, davon 1 Halbtagskraft.

Wie oben erwähnt, ist ein Akademiker der Universität Karlsruhe Mitarbeiter des Instituts. Zusätzlich werden 11 Akademiker, 1 Ingenieur und 10 Sonstige Mitarbeiter/innen aus Fremdmitteln finanziert.

Im Verlaufe des Jahres 2008 waren an den Arbeiten des Instituts insgesamt 10 Gastwissenschaftler, 11 Doktoranden/innen (7 vom Forschungszentrum, 4 von der Universität Karlsruhe), 3 Diplomanden/innen, 1 BA-Student, 6 Praktikanten/innen und 7 Auszubildende beteiligt.

FUSION: Programm Kernfusion

Hochbelastbare Komponenten und Versuchseinrichtungen

Im zukünftigen Tokamak ITER können die Randschicht-Instabilitäten (ELMs) des Plasmas Verdampfungserosion an den Oberflächen von Divertor und erster Wand produzieren. Eine andere Art von ITER Wanderosion ist bedingt durch Schmelzen von metallischen Oberflächen (Beryllium und Wolfram) nach transienten Belastungen. Zur Modellierung von Schmelzbewegungsschäden wird der inkompressible Fluidynamikcode "MEMOS" verwendet. Die neuen Rechnungen mit MEMOS einschließlich des Massenwärmetransports und der Schmelzbewegung an der Oberfläche werden beschrieben und mit neuen Experimenten an der Plasmakanonenanlage QSPA-T des TRINITI verglichen.

Wolfram ist ein Referenzmaterial für den ITER Divertorschutzschild mit Ausnahme des Auftrefforts der Separatrix (SSP), der mit kohlefaserverstärkten Schutzschichten (CFC) gepanzert wird. Dies begründet die Untersuchung der Widerstandsfähigkeit von Wolfram gegen Schäden bei transienten Wärmelasten. Mit dem thermomechanischen Code PEGASUS wurden Untersuchungen der Wolfram Staubproduktion sowie erste Vergleiche mit experimentellen Beobachtungen der Staubproduktion an der Elektronenstrahl-Anlage JUDITH (FZ-Jülich) und am QSPA-T TRINITI Troitsk, Russland durchgeführt.

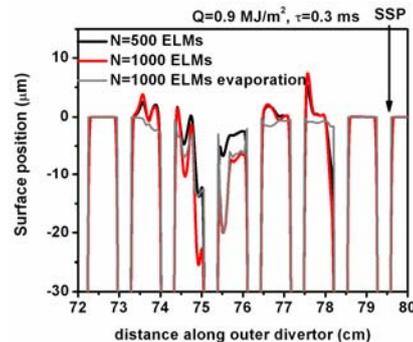
Simulation von Schmelzbewegungsschäden mit dem Code MEMOS

Vorherige dreidimensionale Simulationen mit MEMOS für die Schmelzerosion von Wolfram-Makrobürsten nach Belastungen durch einzelne ELMs mit Zeitdauer 0,5 ms haben gezeigt, dass ein Schmelzen der frontalen und seitlichen Bürstenkanten bei $Q > 0,45 \text{ MJ/m}^2$ einsetzt, jedoch Schmelzen der oberen Bürstenoberflächen bei $Q > 1 \text{ MJ/m}^2$, was gut mit den bei den QSPA-T-Experimenten festgestellten Schmelzschwellenwerten übereinstimmt. Die Berechnungen ergaben eine erhebliche Schädigung an den Bürstenkanten, verursacht durch die Wechselwirkung des einfallenden Plasmas mit den seitlichen Oberflächen. Die MEMOS Simulationen haben gezeigt, dass für Wärmelasten $Q < 1,6 \text{ MJ/m}^2$ in erster Linie die Verdampfung für die Massenverluste von W verantwortlich ist. Die berechnete durchschnittliche Verdampfung von $0,06 \mu\text{m}$ pro Entladung ist vergleichbar mit den experimentellen Ergebnissen. Die berechnete Größe der Schmelzerosion hängt linear vom tangentialen Druck des einfallenden Plasma an der Oberfläche ab. Für $Q = 1,5 \text{ MJ/m}^2$ zum Beispiel, erhöht sich nach jeder Plasma-Entladung die Oberflächenrauigkeit entlang eines einzigen Büschels auf $0,2 \mu\text{m}$ bei $0,05 \text{ MPa}$ (das ist der erwartete Plasmapdruck von ITER ELMs), und auf $1,5 \mu\text{m}$ bei $0,4 \text{ MPa}$ (der am QSPA-T gemessene Druck). Daher kann sich die PFC Lebensdauer mit den für ITER erwarteten wiederholten transienten Lasten deutlich verringern, z. B. $0,2 \text{ mm} \times 10^3 \text{ ELMs} = 0,2 \mu\text{m}$.

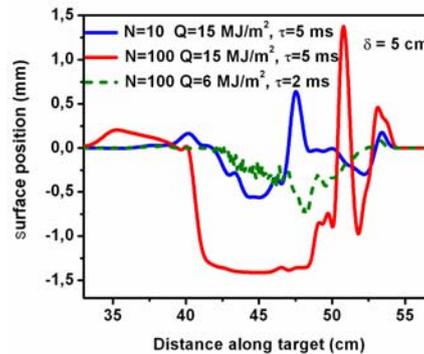
Die Lorentz ($\mathbf{J} \times \mathbf{B}$) Kraft, hervorgerufen durch die im starken Magnetfeld von $B = 5 \text{ T}$ das Target durchquerende Stromdichte $J = 1 \text{ MA/m}^2$, entspricht einem Druckgradienten von 5 MPa/m . Für ein Wolframtarget bei Plasmabelastung liegt dies eine Größenordnung unter dem typischen Druckgradienten an der Oberfläche und kann somit vernachlässigt werden. Zudem wird eine solche Größenordnung von J erwartet für Lasten von $\sim 10 \text{ MJ/m}^2$.

Daher ist für ITER ELMs die $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ -Kraft nicht wichtig, sogar für starke ELMs (ELMs mit Plasmaschild, die für eine Referenzpulsdauer von 0,5 ms bei $Q > 2,5$ bis 3 MJ/m^2 vorkommen), und der Plasmagradiant die wichtigste treibende Kraft. Im Falle von ELMs ohne Dampfschild ($Q < 1,6$ bis $1,8 \text{ MJ/m}^2$) ist der direkte Impulsübertrag vom auftreffenden Plasmastrom die treibende Kraft.

Weitere numerische Simulationen mit MEMOS für W Targets konzentrierten sich auf Abschätzung von Schäden nach wiederholten Wärmebelastungen. Die Schäden an W Makrobürstentargets nach ITER-artigen mehrfachen ELM- oder Plasmaabbruchbelastungen wurden an der Plasmakanonenanlage QSPA-T untersucht. Die Oberflächenrauigkeitsänderung nach jedem Belastungspuls und die anschließende Erosionsentwicklung wurden berechnet. Es wurde gefunden, dass die Erosion monoton mit der Anzahl der Pulse zunimmt. Die Oberflächenrauigkeit ist proportional zur Pulszahl. Dies zeigt die erste Abbildung für gemäßigte ELMs mit durchschnittlicher Wärmebelastung von $Q_a = 0,9 \text{ MJ/m}^2$ und entsprechender maximaler Wärmebelastung von $Q_{\text{max}} = 2 \text{ MJ/m}^2$ für die Referenzpulsdauer 0,5 ms und einer Dampfabschirmung, wie mit dem Code FOREV berechnet. Die Bürstenrauigkeit nach wiederholter transienten Lasten ist proportional zur Belastungsenergie. Für $Q_a = 0,9 \text{ MJ/m}^2$ und nach 10^3 ELMs erreicht die Rauigkeit der Oberfläche den Wert $30 \mu\text{m}$ (siehe Abb.), und für $Q_a = 1,8 \text{ MJ/m}^2$ ($Q_{\text{max}} = 4,2 \text{ MJ/m}^2$, 0,5 ms) $60 \mu\text{m}$.



Erosion der äußeren Divertor W-Bürstenarmierung durch Schmelzbewegung unter ITER-ähnlichen wiederholten Transienten.



Verteilung der Erosion entlang des äußeren Divertors nach 10/100 Disruptionen, SSP Bewegung innerhalb $\delta = 5 \text{ cm}$.

Die MEMOS Simulationen für eine W Makrobürste zeigten auch, dass zufällige Bewegungen der SSP Position entlang des Divertortargets während eines transienten Ereignisses die Erosion durch Schmelzen und Verdampfen deutlich senken können gegenüber einer festen SSP Position. Dieser Effekt wird signifikant, wenn die mittlere Amplitude der SSP Bewegung die gesamte Breite des Gebiets in dem ein einzelnes transientes Ereignis erhebliche Rauigkeit bewirkt, übersteigt. Die nächste Abbildung demonstriert das Ergebnis für disruptionsartige Belastungen. Nach 100 kleinen Disruptionen mit jeweils einer Energielast $Q = 6 \text{ MJ/m}^2$ bei Lastdauer $\tau = 2 \text{ ms}$ ist der Effekt gering: die Tiefe der Krater durch Schmelzen ist etwa $0,8 \text{ mm}$, während für ein einzelnes Ereignis die Kratertiefe etwa $10 \mu\text{m}$ beträgt, was etwa 1 mm nach 100 gleichen Disruptionen ergäbe. Für eine Serie von ebenfalls 100 Disruptionen, jedoch mit großem $Q = 15 \text{ MJ/m}^2$ bei $\tau = 5 \text{ ms}$ wird der Effekt beträchtlich: Ein etwa $1,5 \text{ mm}$ tiefer Krater und ein etwa gleich hoher in der

Nähe der Kraterrand gelegener Berg erscheinen (Abb.), während für ein einzelnes Ereignis die Kratertiefe etwa 35 μm beträgt, also etwa 3,5 mm nach 100 Störungen.

Im Falle von plötzlicher Abkühlung durch Disruptionen wurde gefunden, dass der Einfluss von $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ Kräften entlang der Makrobürstenoberfläche, verursacht durch den Stromfluss senkrecht zur Oberfläche, auf die Beschleunigung der W-Schicht vernachlässigbar ist für $J < 4 \text{ MA/m}^2$ und ein toroidales Magnetfeld mit $B \sim 5 \text{ T}$. Jedoch verursachen $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ Kräfte senkrecht zur Makrobürstenoberfläche, hervorgerufen von durch Abflachung des Stromprofils induzierten Wirbelströmen, erhebliches Verspritzen auf Grund von Rayleigh-Taylor (RT) Instabilität. Während der plötzlichen thermischen Abkühlung wird am SSP J zu $\sim 0,1 \text{ MA/m}^2$ abgeschätzt. Das ist mehr als eine Größenordnung über RT Instabilitätsschwelle von $J_{\text{th}} = \sim 4 \text{ kA/m}^2$ für das typische poloidale Feld von 0,5 T am SSP.

Die Kelvin-Helmholtz (KH) Instabilität wurde ebenfalls als ein wichtiger Mechanismus zur Tröpfchenbildung unter transienten ITER-Lasten befunden. Die durch KH-Instabilität bedingte Schwelle für Tröpfchenejektion für QSPA-T Bedingungen wurde zu $Q = 1/3 \text{ MJ/m}^2$ berechnet mit erwarteten Tröpfchengrößen von 20 bis 50 μm , und Tropfengeschwindigkeiten im Bereich von 4 bis 6 m/s. Diese Werte stimmen recht gut überein mit experimentellen Daten sowohl für ein senkrecht auf ein ebenes W Target als auch ein gegen eine Makrobürste geneigt auftreffendes Plasma. MEMOS Simulationen für Energiebelastungen wie bei ITER ELM Plasmabedingungen ergaben, dass weder Plasmadruck noch Lorentzkräfte der geschmolzenen Schicht auf ein für KH-Instabilität erforderliches Niveau anheben können. Dies erlaubt den Schluss, dass während ITER ELMs keine Tröpfchenejektion zu erwarten ist.

Die RT Instabilität an den Rändern der Makrobürsten kann zur Ausdehnung der Schmelzschicht auf die nächste Bürste führen und damit zu Brücken zwischen benachbarten Bürsten, wie bei QSPA-T-Experimenten gefunden. Die Analyse zeigt, dass bei einer hohen Schmelzschichtgeschwindigkeit $V_m > 1 \text{ m/s}$ die scharfen Makrobürstenkanten zu einem schnellen Wachstum der RT-Wellen führen und zu Tropfenejektion an den Kanten mit typischer Tröpfchengröße $r < 100 \mu\text{m}$. Bei niedrigeren Geschwindigkeiten führt die RT Instabilität zu Bildung von Brücken zwischen benachbarten Bürsten. Auf Grund von niedrigerem Plasmadruck und kleineren Lorentzkräften sind bei ITER die erwarteten Geschwindigkeiten der Schmelzschicht klein und können keine starke Tröpfchenejektion durch RT-Instabilität erzeugen. In der Simulation von W beschichteten Bürsten zeigte sich nach 1000 Impulsen und Energielasten von 0,9 MJm^{-2} weder Brücken noch Tröpfchenejektion.

Staub Produktion von W-Oberflächen

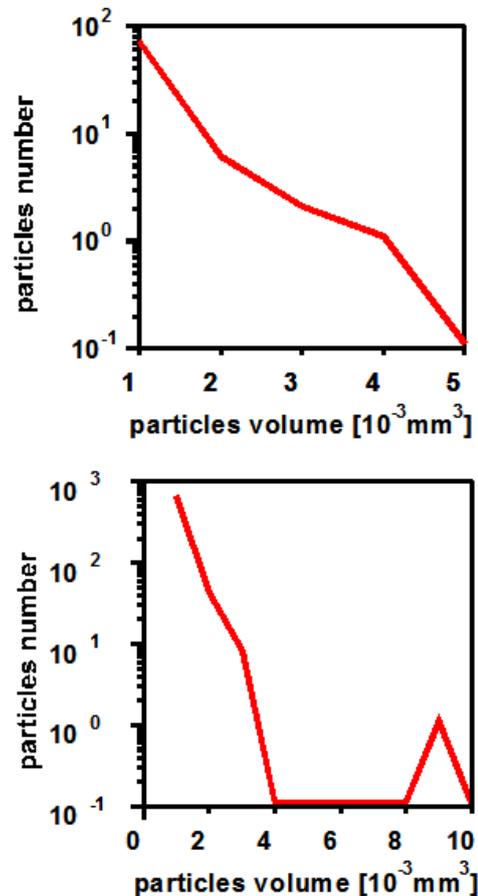
Experimente mit Wolfram-Werkstücken an Plasmakanonen- und Elektronenstrahl-Anlagen haben intensive Rissbildung, Verspritzen von Schmelztropfen und Staubproduktion gezeigt. Das Verspritzen von Tropfen tritt unter für ITER ELMs typischen schweren Wärmebelastungen mit Oberflächenschmelzen auf. Staubproduktion auf Grund von Rissbildung ist wichtig für kleinere ELMs. Der Grund für Rissbildung nahe einer Oberfläche unter schwerer Wärmelast ist die Temperaturspannung (Thermostress) aufgrund starker Temperaturunterschiede durch die starke und schnelle Aufheizung. Anscheinend kommt Rissbildung und Staubproduktion im stationären Regime nicht vor, sondern nur bei anormalen Ereignissen.

Wolframtröpfchen werden bei extrem hohen Plasmalasten produziert, die den größtmöglichen ELMs bei ITER entsprechen. Die Tropfenproduktion geschieht durch Kelvin-Helmholtz(KH)-Instabilität in einer dicken geschmolzenen Schicht an der Wolfram-Oberfläche durch Einwirkung des Plasmastroms ent-

lang der Schmelzoberfläche. Der Mechanismus der Staubproduktion durch W-Tropfen ist äußerst effektiv: die Zahl von W-Staubpartikeln aus Tröpfchenbildung ist viel größer sind als die aus Rissbildung. Bei kleineren, zum Schmelzen der W-Oberfläche nicht ausreichenden ELM Wärmelasten, wird Rissbildung durch Temperaturspannung der wichtigste Mechanismus für die Staubproduktion. In diesem Fall entsteht die Temperaturspannung jedoch durch plastische Verformung während der Aufheizung auf Temperaturen in der Nähe der Schmelztemperatur, die aber nicht erreicht wird. Dann jedoch ergibt sich im Verlauf der schnellen Abkühlung nach der ELM induzierten Heizung, zusätzlicher Thermostress durch plastische Verformung, und eventuelle neue Risse und damit verbundene Staubbildung. Ein ähnlicher Mechanismus für die Staubproduktion tritt auf, wenn die Heizung zum Schmelzen der W-Oberfläche ausreicht, aber für die eine KH-Instabilität in der geschmolzenen Schicht. Die Zugspannung in der dünnen wieder erstarrten W-Schicht erzeugt größere Risse und größere Mengen von Staub als in Fällen ohne Schmelzen.

Eine Beobachtung von W-Staubpartikeln wurde vor Kurzem bei einem Experiment mit Energiedeposition von 0,88 MJ/m^2 an der Elektronenstrahl-Anlage JUDITH berichtet. Diese Heizung erzeugt eine dünne Schicht geschmolzenen Materials; die Schmelzschwelle beträgt 0,71 MJ/m^2 .

Erste Simulationen der W-Staubproduktion mit PEGASUS wurden durchgeführt mit gleichen Parametern wie bei Simulationen des Rissnetzwerks, mit zwei verschiedenen Skalen der Wolfram-Rissbildung unter ELM-ähnlichen Oberflächenheizungen. Die nächste Abbildung zeigt zwei Beispiele für eine Staubpartikelverteilung.



Zwei Simulationen von W Staubproduktion bei ITER-ELM-ähnlicher Oberflächenwärmelast. Gezeigt ist die Korngrößenverteilung im W-Staub von einer dünnen Schicht unterhalb der Oberfläche.

In der Simulation belegten die meisten Staubteilchen 1 bis 4 numerische Zellen und waren damit klein. Es gab nur sehr wenigen Teilchen mit bis zu 9 Zellen. Staubpartikel mit mehr als 10 Mikrometer Größe gab es praktisch nicht. Eine Erhöhung der Zellenzahl Z in der Simulationen ist nicht machbar wegen zu großer Rechenzeit. Deswegen haben wir eine grobe Abschätzung der W-Stauberzeugung für ELMs mit 0,5 ms Dauer mit Schmelzschichtproduktion von $15 \mu\text{m}$ an der W-Oberfläche durchgeführt. In der bislang erfolgten PEGASUS Rechnung hat die Stauproduktion bei $\sim 10^2$ Staubpartikel pro ELM, mit Größen von $10 \times 10 \times 10 \mu\text{m}^3$ bis $10 \times 10 \times 30 \mu\text{m}^3$ aus einer Stichprobe von $\sim 10 \text{ mm}^2$ Fläche. Die Korngrößenverteilung nach einer ELM-artigen Wärmebelastung von 1 MJ/m^2 und 0,5 ms Dauer kann annähernd zu $N_0 \times \exp(-\alpha r + 10)$ angenommen werden, mit der Anzahl N der von pro m^2 emittierten Teilchen der Größer (in μm), und der Konstanten $N_0 = 7.7 \times 10^6 \text{ m}^{-2}$, $\alpha \sim 1$.

Integrale Plasma-Modellierung

Im zukünftigen Tokamak ITER kontaminieren erodierte Spezies wie Kohlenstoff, Wolfram und Beryllium, die Plasma-Abschältschicht (SOL) und das eingeschlossene Plasma. Die Kontamination verschlechtert die Reaktorleistung, was den Fusionsenergiegewinn reduziert und sogar zum Zusammenbruch des Plasmaeinschlusses führen kann. Am Forschungszentrum wird mit den zweidimensionalen (2D) MHD-Codes FOREV und TOKES eine Abschätzung der tolerierbaren ELM Häufigkeiten im ITER H-Modus betrieben. Die Codes beschreiben das Kern- und SOL Plasma und simulieren Oberflächenprozesse wie Zerstäuben (sputtering) und Verdampfung an den Wandflächen sowie die Rückausbreitung der erodierten Spezies in den Kernbereich. Dieser Bericht beschreibt die Validierung von FOREV mit neuen Experimenten an der Plasmakanonenanlage MK-200UG (TRINITI), und die Weiterentwicklung von TOKES, der nun detaillierte Ionenpopulations- und Strahlungstransportmodelle enthält und erstmals zur Simulation der SOL angewendet wurde.

Experimente am MK-200 UG und FOREV Validierung

Die Plasmakanone MK-200UG reproduziert Energiefluss, auftreffende Ionenenergie und Plasmadichte und -druck von ITER ELMs, jedoch mit 10-mal kleinerer Zeitdauer. Deshalb sind die Verdampfungsschwellenpulsenenergie-dichte (vaporization threshold pulse energy density) q_{vap} und die Dampfschildschwelle q_{vs} um einen Faktor 3 niedriger als nach ELMs. Das Kohlefaserverbundmaterial CFC NB31 wurde mit unterschiedlichen Wärmeflüssen an flachen rechteckigen Proben mit einer Stirnfläche von $2,5 \times 2,5 \text{ cm}^2$ und 1 cm Dicke getestet. Zur Messung der absorbierten Energie sind die Targets mit Thermoelementen bestückt. Die Oberflächentemperatur T_s wird mit einem Pyrometer mit einer zeitlichen Auflösung von $0,1 \mu\text{s}$ gemessen. Zur Analyse von verdampftem Kohlenstoff wurden Spektrometer im sichtbaren (4000-7000Å) und EUV-(10-400Å) Bereich mit einer räumlichen Auflösung von $0,1 \text{ cm}$ verwendet.

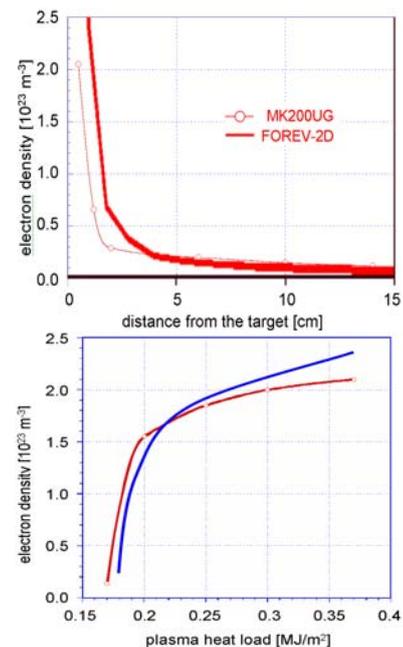
In FOREV werden Prozesse über eine Zeitskala von 1 ms für eine CFC Wand modelliert. Der Code berechnet den Dampfschild, der sich vor der ITER Divertoroberfläche aufbaut und diese nach starken ELMs und während Disruptionen schützt, und auch die anschließende Ausbreitung des erodierten ionisierten Kohlenstoffs in die SOL und die Randzone des Plasmaeinschlussbereichs.

Im Experiment tritt eine schwache Verdampfung schon bei $q \sim 0,15 \text{ MJ/m}^2$ ($T_s \approx 3600 \text{ K}$) auf; intensive Verdampfung beginnt bei $q \approx 0,2 \text{ MJ/m}^2$ ($T_s \approx 4000 \text{ K}$). T_s bleibt mit weiterem Anstieg von q unverändert, was auf ein $q_{\text{vap}} \approx 0,2 \text{ MJ/m}^2$ hindeutet. Bei $q = 0,2$ bis $0,3 \text{ MJ/m}^2$ besteht das Kohlenstoff-Plasma aus $\text{C}^{+1} - \text{C}^{+5}$ Ionen und erreicht eine Temperatur von $10 - 30 \text{ eV}$. Die Dichte von C nahe der Oberfläche ist $n_c = 2 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$, und C propagiert entlang des Magnetfelds mit

einer Geschwindigkeit von $1 - 2 \times 10^4 \text{ m/s}$ und einer Dichte von $n_c > 10^{21} \text{ m}^{-3}$. Zwei Serien von Experimenten wurden durchgeführt mit einem Plasmaström von jeweils 5 cm Durchmesser, die eine mit einem schmalen Target um welches das Plasma herumfließen konnte, und die andere mit einem breiten Target welches das Plasma stoppt. Im ersten Fall wird der Dampfschild dünner, was die Dampfschildschwelle in etwa vervierfacht.

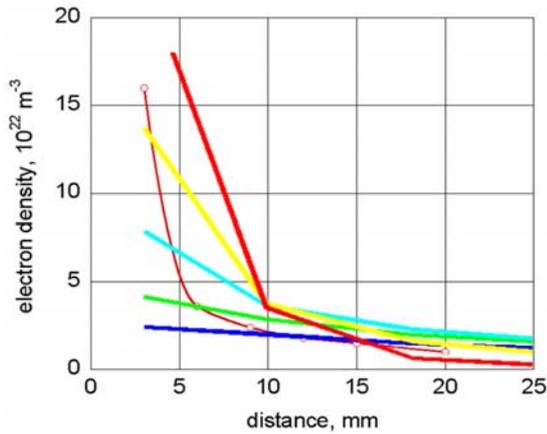
Die FOREV Validierung für Kohlenstoffplasmaparameter wurde mit den MK-200UG Ergebnissen für das breite Target durchgeführt. Zur Abschätzung einer realistischen thermischen Leitfähigkeit λ von CFC wurde die CFC Verdampfungsschwelle gemessen. Dann wurde der Wert von λ in FOREV so angepasst, dass die gemessene Verdampfungsschwelle in der FOREV Simulation für die MK-200UG Konfiguration erhalten wurde.

Die Kohlenstoffdichte des Dampfschildes vor dem Target wurde für nur einen Zeitpunkt gemessen. Die erste Abbildung (oberer Teil) zeigt die räumliche Verteilung der Elektronendichte für die gemessenen und simulierten Plasmaschilddichten, es gibt eine gute Übereinstimmung. Auch die gemessenen und für verschiedene Wärmeleistungsbelastungen berechneten Dampfschilddichten in 1 cm Abstand von der Oberfläche stimmen gut überein (Abb. unterer Teil). Für eine grobe Abschätzung der Korrelation zwischen den Messungen und Simulationen zu verschiedenen Zeiten kann man Messungen benutzen, in denen das Integral der Elektronendichte über die Pulszeit in verschiedenen Entfernungen von der Targetoberfläche erhalten wurde.



Gemessene und simulierte Elektronendichte vor dem CFC-Target bei $10 - 15 \mu\text{s}$ und $q = 0,3 \text{ MJ/m}^2$, $\lambda = 0,35\lambda_{\text{ref}}$, als Funktion der Entfernung zum Target (oben) und gegen die Plasmawärmebelastung in 1 cm Entfernung (unten).

Die nächste Abbildung zeigt die gemessene Abhängigkeit der zeitintegrierten Elektronendichte von der Entfernung zum Target im Vergleich mit den simulierten Kurven zu verschiedenen Zeiten. Aus diesem Vergleich kann man schließen, dass es keine großen Unterschiede zwischen den berechneten Dichten und den MK-200UG Messungen gibt.



Die experimentelle Kurve (gekennzeichnet durch Kreise) entspricht dem Zeitintegral über den vollständigen Puls von 0,8 MJ/m² Wärmebelastung insgesamt. Die simulierten Kurven gehören zu den Zeitpunkten 6, 12, 25, 31 und 38 μ s.

TOKES Entwicklung für integrale ITER Simulationen

TOKES wurde für die integrale Simulation über einen Entladungszeitraum von 10³ s und mit mehreren ELMs entwickelt. In dem Code kann sich das Magnetfeld zusammen mit dem eingeschlossenen Plasma entwickeln, da die Ströme nach jedem Zeitschritt neu berechnet werden. Die Plasmaform wird automatisch über die poloidalen Feldspulen kontrolliert. Die betrachteten Flüssigkeiten reichen von ionisierten Plasmaspezies von Wasserstoffisotopen bis zu Wolfram in verschiedenen Ladungszuständen und gebundenen Elektronenanzuständen. Die detaillierte Beschreibung der Spezies in der Einschlussregion erlaubt die Implementierung eines Koronamodells unter Einbeziehung von Ionisationsgleichgewicht. Die Abschätzung des SOL Transports basiert auf einem Leitstrahlmodell für Ionen.

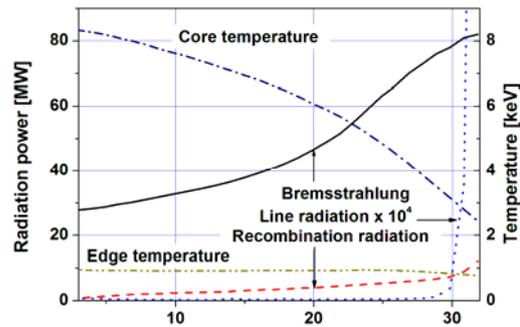
TOKES enthält nun ein Modell für Ionenpopulationen N_{mzk} und Strahlungstransport, mit Isotopenindex m von H, D, T bis W, Ladungszustand z , und dem Index k für gebundene Elektronenniveaus. Die N_{mzk} werden zusammen mit T_e und den Übergangsraten zwischen Energieniveaus E_{mzk} berechnet. Die Absorption und Emission von Photonen wird durch Opazitäten beschrieben, das sind Emissionskoeffizienten β und Absorptionskoeffizienten κ' unter Einbeziehung von spontaner und induzierter Strahlung. Die Datenbasis von TOKES enthält auch die Oszillatorstärken $f_{mzkk'}$ und Übergangsfrequenzen $\nu_{mzkk'}$ für Resonanzanregungen und ν_{mzk} für die Ionisation von Atomen und Ionen durch Elektron- und Photonstöße, die aus unterschiedlichen Quellen und Annäherungen zusammengestellt wurden. Die Ionisationspotentiale im Grundzustand $I_{nz} = E_{m,z+1,0} - E_{m,z,0}$ (mit der Protonenzahl n und der Massenzahl m) sind für alle m und z verfügbar, aber für Übergänge vom Grundzustand zu angeregten Zuständen von neutralen Atomen ($z = 0$) sind in der Regel nur die Frequenzen bekannt. Deswegen werden für Ionen ($z > 0$) Skalierungsgesetze über die Verhältnissen $I_{n+z,z}/I_{n0}$ angewandt entlang von isoelektronischen Sequenzen $n-z = \text{const}$. Die Komplexität der atomaren Daten verhindert selbst konsistente direkte Multispezies-Transportsimulationen, weswegen in TOKES die Daten reduziert und angenähert werden durch Zusammenfassung der Energieniveaus.

Bislang wurde dieses Strahlungspopulationsmodell nur für das eingeschlossene Plasma entwickelt. Strahlungsverluste aus dem SOL sind noch nicht implementiert. Das Plasma, das aus dem Podestbereich entlang der Separatrix in das SOL eingebracht wird, ist vorläufig repräsentiert durch vollständig ionisierte Ionen und deren Energie. Zur Letzteren wird die mit dem mittlere

ren Ladungszustand multiplizierte thermische Energie der Elektronen und die interne Energie der Plasmaionen addiert. Auf diese Weise bringt ein auf die Wand auftreffendes Ion m die volle Energie ein, bestehend aus a) dem Beitrag der Elektronen, den die Ionen in Realität beim Durchqueren des vor der Wand befindlichen Elektronenschilds von der Wand aufnehmen, und b) den Beitrag durch Rekombination (weil die interne Energie der Ionen an der Wandoberfläche frei wird und diese aufheizt).

Die Ionisation und die Ladungsaustauschprozesse in der SOL sind auch vorläufig simuliert, wobei dem SOL Plasma eine Temperatur gemäß den Ionenenergien vorgeschrieben wird, was eine Abschätzung des Recyclings von abgeladenem Plasma erlaubt, dem eine hohe Temperatur – die Separatrixtemperatur T_{edge} – zugeordnet wird. Die Erhaltung der Teilchenzahl für jede Art m und von Energie und Impuls ist über den gesamten Behälter gegeben.

Mit den neuen Modellen wurden drei Benchmark-Rechnungen einer vollständigen ITER-H-Mode Entladung ohne ELMs durchgeführt für eine Heizung durch einen 1 MeV Deuterium Strahl der 80, 96 und 144 MW Leistung; die Simulation der Einspeisung von Pellets erfolgte durch homogen Ausbreitung von 1 eV D-Atomen über die Einschlussregion. Die Plasmaform war festgelegt. Die Simulation ergab für 80 MW Heizung eine Beendigung der Entladung nach 33 s durch zunehmende Strahlungsverluste. Die folgende Abbildung zeigt die Entwicklung der Strahlungsleistung und der Randtemperatur T_{edge} . Die wichtigsten Strahlungsverluste entstehen durch Bremsstrahlung. In der Endphase wird der Deuterium-Strahl in erster Linie an der Plasmaperipherie gestoppt und kann deshalb den Strahlungskollaps nicht verhindern. Für 96 und 144 MW Heizung wird nach etwa 20 s ein Gleichgewichtszustand (Steady State) erreicht.



Strahlungsverluste und Plasma-Temperaturen, erhalten mit TOKES, 80 MW Heizung.

BP	B	R	n_D	T_{core}	T_{edge}	$\Gamma_{\text{SOL/D}}$	$\Delta\Gamma_{\text{SOL/D}}$
MW	MW	MW	10 ²⁰ m ⁻³	keV	keV	10 ²⁰ s ⁻¹	10 ²⁰ s ⁻¹
96	21	4.7	1.1	10.5	1.07	103	0,12
144	8.5	0.31	0.65	18.5	1.54	103	0.06

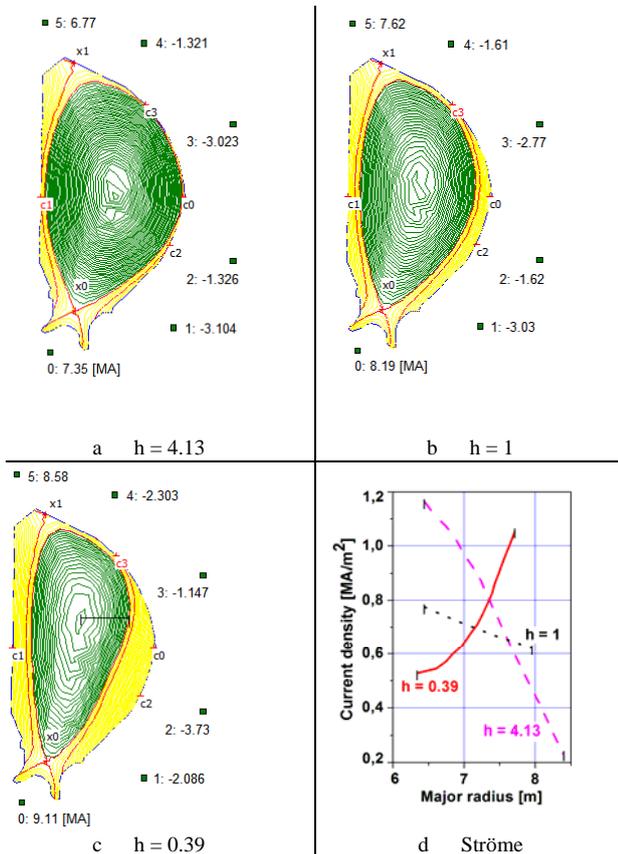
Berechnete Steady-State-Parameter von Deuterium-Spezies

Die Tabelle zeigt einige Ergebnisse der Steady-State-Entladungen. BP ist die Strahlleistung. Bremsstrahlung (B) dominiert über Rekombinationsstrahlung (R). n_D und T_{core} sind, gemittelt über das Plasmavolumen. Die Randtemperatur ist über 1 keV, was einen erheblichen Eintrag von Verunreinigungen durch Zerstäuben bewirkt. Das SOL spielt beim Abstoppen verlorener D-Ionen eine geringe Rolle, deren Zufluss (Γ_{SOL}) ist viel größer als der atomare Abfluss ($\Delta\Gamma_{\text{SOL}}$) zur Wand nach Ladungsaustauschkollisionen mit Neutralteilchen im SOL. So erreicht in den aktuellen TOKES Berechnungen fast alles eingetragene Plasma frei die Divertorplatten.

Berechnung des Poloidalfelds in TOKES

Neben den Plasmafragen ist für TOKES das poloidale Feld (PF) im gesamten Bereich von wesentlicher Bedeutung, weil es in jedem Zeitschritt die Form des eingeschlossenen Plasmas bestimmt. Die Ströme I_n in den PF-Spulen werden mit den Plasmaströmen I_i berechnet. Es sei darauf hingewiesen, dass bei festgelegtem I_n , jedoch freiem I_i , auf Grund der Entwicklung der Plasmaform der Plasmarand die Wand in ein paar Zeitschritten berühren kann, was nicht akzeptabel ist. Um das Plasma vor der Wand fern zu halten, erfolgt in TOKES eine dynamische Aktualisierung von I_n .

Die Abbildung zeigt die mit TOKES zu verschiedenen aktuellen Plasma-Profilen berechneten Plasmakonfigurationen und die Abschätzung der Ströme I_n bei einem gesamten Plasmastrom von 15 MA, unter Annahme einer linearen Abhängigkeit der Plasmaleitfähigkeit $\sigma(w)$ von w (der Bootstrap-Strom wird ignoriert). An festen Punkten \mathbf{p}_{xm} , \mathbf{p}_{ej} und Spulenpositionen \mathbf{P}_n bestimmt das Verhältnis $h = \sigma(w_{max})/\sigma(w_{x0})$ die Plasmaströme, das Magnetfeld und die Plasmaform vollständig. Wie diese Berechnungen zeigen, ist die Separatrix, die durch den x-Punkt x_0 geht, stets nicht angemessen im äußeren Divertorschlenkel lokalisiert. Daher ist eine zusätzliche PF Spule n der Nähe des Divertorschlenkels notwendig für die erforderliche Verlagerung des SSP.



Berechnung des poloidalen Magnetfeldes mit TOKES.

ECR Heizung und Stromtrieb – Frequenzdurchstimmbare Gyrotrons

In den letzten Jahren hat sich die Elektron-Zyklotron-Resonanz Heizung (ECRH) und der Stromtrieb (ECCD) zu einem sehr erfolgreichen Werkzeug bei magnetisch eingeschlossenen Plasmen im Fusionsbereich entwickelt. Gyrotrons spielen dabei eine außergewöhnliche Rolle, da sie die einzigen Mikrowellenquellen sind, die die extremen Anforderungen bei diesen Anwendungen erfüllen: Frequenzbereich 100 – 200 GHz, Puls-

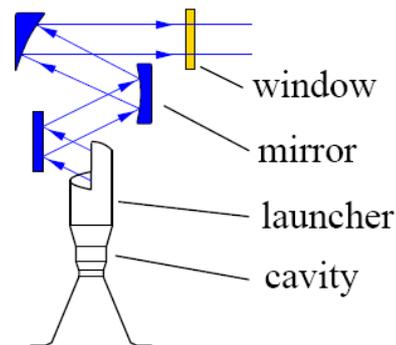
länge von einigen Sekunden bis Dauerbetrieb bei Ausgangsleistungen im MW Bereich und darüber. Aufgrund der ausgezeichneten Ankopplung an das Plasma und der sehr gut definierten Lage der absorbierten Leistung im Plasma wird ECRH in vielen Fusionsanlagen gegenwärtig verwendet. Auch für zukünftige Fusionsprojekte ist ECRH vorgesehen: bei dem im Moment in Bau befindlichen Stellarator-Projekt W7-X ist die ECRH das dominante Heizsystem und im geplanten ITER Tokamak wird ECRH eine wichtige Rolle spielen. Fortschrittliche Tokamaks werden heutzutage in einem Bereich betrieben, wo MHD Instabilitäten, die die Leistungsfähigkeit der Anlage begrenzen, auftreten. Zu einem großen Teil ist die Stabilität in einem Tokamak durch die Verteilung der internen Plasmaströme, die durch die gezielte Einstrahlung von Hochfrequenzwellen (HF Wellen) beeinflusst werden können, bestimmt. Der Ort der Absorption von 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.

Für Experimente zur Stabilisierung von Plasmen am Tokamak Experiment ASDEX Upgrade (IPP Garching) mit ECRH & ECCD sind daher frequenzdurchstimmbare Gyrotrons erforderlich.

Industrielle Gyrotrons im gefragten Frequenzbereich mit einer Ausgangsleistung von ca. 1 MW werden normalerweise für eine feste Frequenz gebaut. Frequenzdurchstimmbare Gyrotrons sind also kein Standardprodukt, da diese breitbandigen Röhren eine zusätzliche Optimierung der Hauptkomponenten des Gyrotrons, wie z.B. Elektronenstrahloptik, Resonator, quasi-optischer Modenwandler und Austrittsfenster, erfordern.

Quasi-optischer Wellentypwandler

Der quasi-optische Wellentypwandler überführt die Resonatormode sehr hoher Ordnung in eine Gauß'sche Grundmode, die die Leistung durch das Ausgangsfenster transportiert. Er besteht aus einer Hohlleiterantenne mit Wandstörungen, dem so genannten Launcher, und drei Reflektoren, die den Ausgangsstrahl weiter umformen (siehe Abbildung). Für das



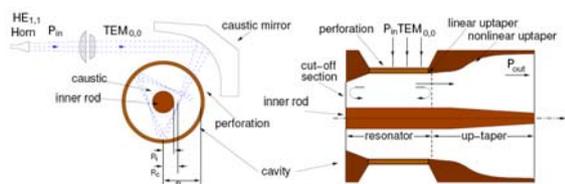
Grundelemente und Funktionsweise eines quasi-optischen Systems.

Multifrequenzgyrotron wurde der Wellentypwandler so optimiert, dass er neun Moden zwischen $TE_{17,6}$ (105 GHz) und $TE_{23,8}$ (143,3 GHz) jeweils in einen Gauß'schen Strahl wandelt, der für alle Moden möglichst identische Parameter hat. Die Optimierung, um einen solchen Ausgangsstrahl zu erzeugen, kann in zwei Einzeloptimierungen unterteilt werden. Zuerst kann die Störung an der inneren Wand des Launchers so optimiert werden, dass er ein möglichst Gaußförmiges Feld abstrahlt und

gleichzeitig nur ein Minimum an Streustrahlung für alle neun Moden produziert. Als zweites werden dann die Reflektoren so ausgelegt, dass möglichst die gesamte Leistung durch die Apertur des Fensters abgestrahlt wird. Dies wird durch eine Optimierung der Größe und Position der Taille des Gauß'schen Strahls für alle Moden erreicht.

Im vergangenen Jahr wurde das Design der zweiten Generation des quasi-optischen Wellentypwandlers für das Multifrequenzgyrotron fertig gestellt, eine Prototyp-Version wurde hergestellt und mit einem Niederleistungsmessplatz charakterisiert. Die Ergebnisse werden im folgenden dargestellt.

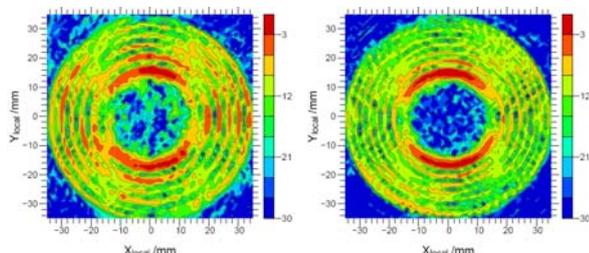
Es wurde ein Modenerzeuger, der im Frequenzbereich 105 – 143 GHz neun ausgewählte Moden mit einem minimalen Falschmodenanteil erzeugt, gebaut. Dieses Gerät nutzt einen Gauß'schen Freiraumstrahl welcher durch die perforierte Wand eines koaxialen Resonators mit einer hohen Güte eingestrahlt wird und auf den Kaustikradius der gewünschten Mode fokussiert ist. Der koaxiale Innenleiter erleichtert die Anregung der gewünschten Mode durch Reduzierung der Güte der konkurrierenden Moden. Um Modenwandlung zu verhindern, vergrößert sich der Innendurchmesser der Anordnung nichtlinear, die Abstrahlantenne ist direkt auf dem Wellenleiter befestigt. Die Schlüsselkomponenten der Anordnung sind in der folgenden Abbildung dargestellt.



Modenerzeuger für die breitbandige Anregung von verschiedenen Gyrotron-Resonatormoden.

Die Ausgangsleistungsverteilungen des Modenerzeugers wurden für neun Moden im Bereich 104.829 GHz ($TE_{17,6}$) bis 139.929 GHz ($TE_{22,8}$) gemessen. Die Aufnahmeantenne wurde durch einen Netzwerkanalysator gespeist, eine x-y Verfahrereinheit bewegte die Antenne innerhalb der Messfläche. Beispielhaft zeigt die nächste Abbildung die gemessenen Strahlbilder der Moden $TE_{17,6}$ und $TE_{22,8}$. Die Analyse dieser Messungen ergibt einen geringen Anteil der gegenrotierenden Mode zwischen 2,5 % und 1,5 %.

Um die Strahlbilder der Hohlleiterantenne und das optische System zu beurteilen, wurden ausgiebige Messungen an unterschiedlichen Positionen und mit allen Moden durchgeführt. Dabei wurde auch der Gauß'sche Anteil bestimmt und mit numerischen Simulationen verglichen.

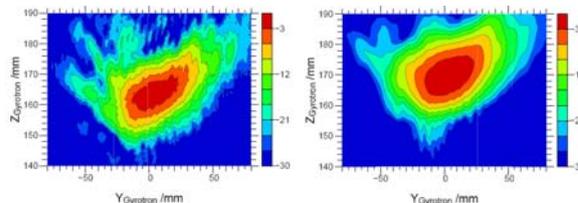


Strahlbild des Modenerzeugers für die $TE_{17,6}$ Mode bei 104.829 GHz (links) und die $TE_{22,8}$ Mode bei 139.929 GHz (rechts).

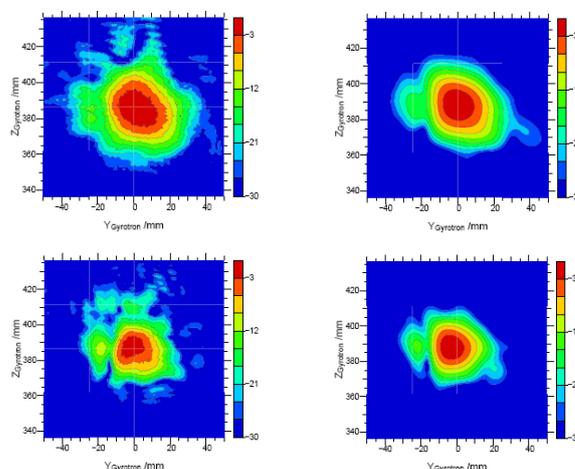
Die nächste Abbildung zeigt einen Schnitt durch den HF Strahl, unmittelbar nach der Abstrahlung aus der Hohlleiterantenne, vor der Reflexion am ersten Spiegel. Der Vergleich der Experimente und der Simulationen ergibt eine gute Übereinstimmung. Das Strahlbild in der Fensterebene ist in der folgenden Abbildung zu

sehen. Diese zeigt einen Vergleich der Messungen mit numerischen Simulationen für die Moden $TE_{17,6}$ und $TE_{22,8}$. Beide zeigen eine sehr gute Übereinstimmung, wie die folgende Tabelle bestätigt, in welcher der Gauß'sche Anteil der Messungen mit den rechnerischen Ergebnissen verglichen wird.

Eine Version dieses Systems für hohe Leistungen wurde gefertigt und wird demnächst in das Gyrotron eingebaut und getestet. Weitere Optimierungen dieses Systems, die einen Gauß'schen Anteil von mehr als 93 % für alle Moden versprechen, sind im Gange (dritte Generation des quasi-optischen Wellentypwandlers).



Profil der $TE_{22,8}$ Mode an der Hohlleiterantenne: Messung (links) und Simulation (rechts).



Strahlbild in der Fensterebene: Messung (links) und Simulation (rechts) für die $TE_{17,6}$ Mode (oben) und $TE_{22,8}$ Mode (unten).

Frequenz [GHz]	Mode	Gauss'scher Anteil (Messung)	Gauss'scher Anteil (Simulation)
108.398	$TE_{18,6}$	0.896	0.929
124.185	$TE_{20,7}$	0.894	0.934
127.680	$TE_{21,7}$	0.877	0.917
136.305	$TE_{21,8}$	0.894	0.930
139.927	$TE_{22,8}$	0.875	0.933
143.342	$TE_{23,8}$	0.852	0.915

Gauß'scher Anteil einiger Moden.

CVD-Diamant-Brewster-Fenster

Der leistungsfähige Betrieb einer großen Anzahl von Moden bei verschiedenen Frequenzen ist nur möglich, wenn man ein breitbandiges Austrittsfenster in Brewster-Anordnung wählt. In der Regel wird dafür künstlicher Diamant, mit einem CVD Verfahren erzeugt, benutzt. Aufgrund des großen Brewsterwinkels ($67,2^\circ$) muss der Durchmesser der Scheibe relativ groß sein, um eine ausreichend große Durchtrittsöffnung für den HF Strahl zu gewährleisten. Eine Scheibe mit einer Dicke von 1,7 mm und einem Durchmesser von 140 mm wurde bei der Fa. Element Six entwickelt und bereits geliefert. Diese Scheibe wird für die elliptische Kontur des Brewsterfensters mit einer effektiven Öffnung von 50 mm benutzt.

Aufgrund der elliptischen Lötung sind die auftretenden Spannungen deutlich unterschiedlich im Vergleich zu einer runden Scheibe. Rechnungen sagen eine Erhöhung um den Faktor 1,4 voraus. Um zu untersuchen, ob eine Diamantscheibe diesen Belastungen Stand hält, werden gegenwärtig Lötversuche bei Thales Electron Devices durchgeführt. Für diese Versuche werden eine Quarzscheibe und eine kleinere Diamantscheibe verwendet. Im Falle einer erfolgreichen Lötung wird dann die 140 mm Diamantscheibe mit Kupferhalterungen verlötet, so dass die Randkühlung der Scheibe möglich ist.

Schnell durchstimmbarer Magnet

Ein schnell durchstimmbarer supraleitender Magnet, mit dem das Magnetfeld im Bereich 4,15 – 5,67 T durchgestimmt werden kann, wurde bei der Fa. Cryomagnetics in den USA bestellt. Mit diesem Magnet besteht die einzigartige Möglichkeit die Frequenz des Gyrotrons von 105 GHz bis zu 143 GHz in Schritten von ca. 3 GHz innerhalb 0,5 s zu verändern. Das maximale Feld wird 7.2 T betragen und damit auch für Untersuchungen am 170 GHz Gyrotron des ITER ECRH Systems geeignet sein. In 2008 wurde der Zusammenbau der Spulen beendet und erste Tests am kalten System in einem Testkryostat durchgeführt (siehe Abbildung).



Montiertes Spulensystem des schnell durchstimmbaren Magneten (Fa. Cryomagnetics).

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 Plasmaforschung (IPF) der Universität Stuttgart sowie in Abstimmung mit der Unternehmung W7-X des Max-Planck-Institutes für Plasmaphysik 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 Plasmaparameterbereich 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 inhärente Eignung 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 Hochleistungsgyrotrons sowie verlustarme Übertragungsleitungen bis hin zur Einstrahlantenne im Torusgefäß mit der Möglichkeit für CW-Betrieb.

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 Plasmaforschung (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 140 GHz Gyrotrons mit einer Ausgangsleistung von 1 MW durchzuführen.

Seriengyrotrons für ECRH an W7-X

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-Verlustleistungsdichte 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 bei einfacher Randkühlung mit Wasser den kontinuierlichen Betrieb von Gyrotron-Oszillatoren mit einer Leistung von 1 MW und höher.

Der Betrieb der Gyrotrons mit abgestuftem Kollektorpotential zur Energierückgewinnung (single-stage depressed collector operation) erhöht den Wirkungsgrad der Oszillatoren ca. 30% auf nahezu 50% und reduziert die Belastung des Kollektors erheblich.

Die Ergebnisse der Langpulsmessungen an der Vorprototypröhre „Maquette“, der Prototypröhre und der ersten Serienröhre wurden in den letzten Jahren beschrieben.

Nach den erfolgreichen Tests an der ersten Serienröhre mit Pulslängen von bis zu drei Minuten im Forschungszentrum Karlsruhe wurde diese Röhre an das IPP Greifswald ausgeliefert und dort in Pulslängen 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

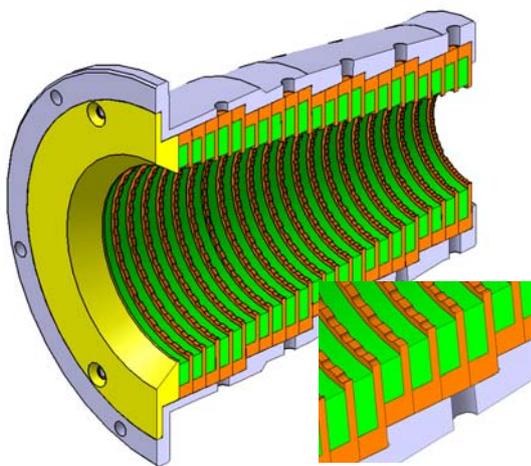
eine Ausgangsleistung von etwa 920 kW bei einem Wirkungsgrad von nahezu 45% errechnet. Der Modenanteil der Gaußschen Ausgangsmode (TEM₀₀) betrug 97,5%. Auf Grund dieser erfolgreichen Tests wurde die Röhre akzeptiert und versiegelt, um den Beginn der Garanzzeit hinauszuschieben.

Die folgenden Röhren zeigten jedoch ein ungünstiges Verhalten bezüglich parasitäre Schwingungen, die im Strahlentunnel angelegt werden. Diese Schwingungen haben eine sehr starke Erwärmung der Komponenten, insbesondere der Keramikbauteile, zur Folge. Die nach dem Betrieb geöffneten Gyrotrons zeigten deutliche Schäden durch Überhitzung an den Keramikringen und deren Lötungen. Dies begrenzt normalerweise die erreichbare Ausgangsleistung auf 600-700 kW.

In einem ersten Versuch die Situation zu verbessern wurden vom Gyrotronhersteller die Serienröhren SN2 und SN3 wieder geöffnet und Keramikringe mit verbesserter Lötung (SN2a, SN3a) und anderer Anordnung der Ringe (SN5) eingebaut. Allerdings haben beide Maßnahmen keine spürbare Verbesserung erbracht.

Deshalb wurden am FZK in 2008 erste Entwürfe mit dem Ziel eines robusteren Strahlentunnels, der parasitäre Schwingungen nicht zulässt, begonnen. Um einen solchen Strahlentunnel für die W7-X Röhre zu qualifizieren, sind Tests mit dem koaxialen und dem frequenzdurchstimmbaren Gyrotron vorgesehen. Dabei wird ein geringfügig modifizierter Strahlentunnel verwendet, dessen Form soweit als möglich mit derjenigen des W7-X Gyrotrons übereinstimmt. In einem letzten Schritt wird dann dieser Strahlentunnel in einer der Seriengyrotrons eingebaut.

Im folgenden wird über die experimentellen Ergebnisse der Seriengyrotrons SN2a, SN3a und SN 5, die alle mit dem Original-Strahlentunnel ausgestattet sind, berichtet.



Neuer Entwurf eines Strahlentunnels mit gerillten Kupferringen.

In 2008 wurden Abnahmetests mit dem reparierten Seriengyrotron SN2a am IPP Greifswald fortgesetzt. Das Gyrotron erreicht 830 kW bei 3 Minuten Pulslänge und 704 kW bei 25 Minuten. Allerdings stieg während der Konditionierung der Röhre der Vakuumdruck stark an und verhinderte weitere Fortschritte. Ein Vakuumleck konnte mit dem Kontrollsystem nicht festgestellt werden. Die weiteren Abnahmetests wurden durch einen Riss in der Diamantscheibe, welcher während des Betriebs ohne ein Warnsignal des Überwachungssystems auftrat, beendet. Zur Öffnung und detaillierten Fehleranalyse wurde das Gyrotron an den Hersteller zurückgeschickt, die Diamantscheibe wurde auch im IMF 1 des FZK untersucht. Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen Zerstörungen im Strahlentunnel der Röhre, ein Vakuumleck an einem Zusatzfenster (Saphirscheibe), Verschmutzung und Korrosion an verschiedenen Teilen des Gyrotrons. Starke Korrosion trat an der Lötung der Diamantscheibe und innerhalb des Kühlkanals der Fenstereinheit auf. Die Vakuumseite der Diamantscheibe zeigte eine dünne Kupferbeschichtung, welche die Hochfrequenzverluste um den Faktor 10 erhöht. Die verlustbehaftete Diamantscheibe unterstützt die Vermutung, dass der Bruch aufgrund thermischer Überlastung zustande kam.

Das reparierte Seriengyrotron SN3a wurde am FZK bei kurzen Pulsen im Bereich von Millisekunden und langen Pulsen (bis zu 30 Minuten) bei entsprechenden Leistungen bis zu 800 kW bzw. 500 kW getestet. Die Verteilung der Ausgangsstrahlung wurde gemessen und analysiert. Die Strahlparameter sind nahezu identisch mit denen der ersten Version der Röhre und zeigen damit ein stabiles und zuverlässiges quasi-optisches Abstrahlsystem. Einige der Parameter der bisher gemessenen TED Gyrotrons sind in der Tabelle angegeben. Es wurden parasitäre Schwingungen etwas unterhalb der Sollfrequenz (120 – 130 GHz) beobachtet. Vermutlich wurden diese Schwingungen, die die Leistungsfähigkeit des Gyrotrons beeinträchtigen, im Strahlentunnel vor dem Resonator erzeugt. Nach einigem Konditionieren des Gyrotrons, war Betrieb mit ca. 720 kW und 3 Minuten bzw. 500 kW und 30 Minuten möglich. Die spezifizierte Ausgangsleistung von 900 kW konnte nicht erreicht werden. Die Langpulstests wurden mit einer Dummy-Last, die von CNR Mailand bereit gestellt wurde, durchgeführt.

Am FZK wurden Abnahmetests der Röhre SN5 begonnen. Dieses Gyrotron ist mit einem Strahlentunnel mit einer kleinen Änderung der inneren Kontur, die das Anschwingen der parasitären Störungen im Strahlentunnel erschweren sollte, ausgestattet. Im Kurzpulsbetrieb waren Ausgangsleistungen von bis zu 950 kW möglich. Jedoch beeinträchtigten parasitäre Schwingungen immer noch den Betrieb der Röhre. Darüberhinaus und unabhängig von den Problemen des Strahlentunnels musste die Parameteroptimierung des Gyrotrons gestoppt werden, da der Ausgangsstrahl in der Fensterebene deutlich aus der zentralen Lage versetzt war. Der Versatz des Ausgangsstrahls aus der Mitte führt zu Bogenentladungen am Fenster, die das Risiko einer Beschädigung der Diamantscheibe erhöhen.

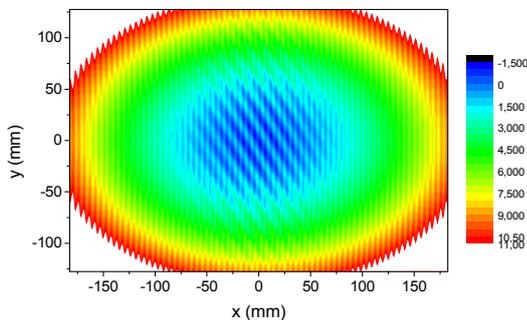
Gyrotron	Strahltaille W _{0x} ; W _{0y}	Lage der Strahltaille Z _{0x} ; Z _{0y}	Versetzung des Strahls im Fenster Δx; Δy	φ _{hor} ; θ _{vert} [mrad]	TEM ₀₀ [%]
Maquette	19,3; 17,4	-82,8; 61,2	0,0; 4,9	8,1; -23,8	95
Prototype	18,6; 21,3	202; 71	18,2; 16,4	3,5; -1,7	97
TED SN1	17,7; 21,6	126,9; 126,0	-7,0; 8,0	12; -2	95
TED SN2	20,2; 22,5	103,5; 39,8	10,0; 9,0	7; 7	97
TED SN 2a	18,7; 22,2	127,0; 30,0	3,4; 11,9	8,5; 6,7	95
TED SN3	17,5; 20,6	130; 90	5,4; 9,0	0,1; 13	97
TED SN3a	17,6; 20,5	24; 77	6,0; 3,0	-1; 17	96
TED SN 4	18,1; 18,5	105; 51	-1; 2	-4; 5	97

Gauß'sche Strahlparameter der TED Seriengyrotrons, errechnet aus den gemessenen Leistungsverteilungen.

Übertragungsleitungen für ECRH an W7-X

Das Übertragungssystem besteht aus Einstrahl- und Vielstrahl-Spiegelleitungen (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, mit zwei gerillten Spiegeln wird die für optimale Absorption im Plasma benötigte Polarisation eingestellt. Ein fünfter Spiegel richtet den Strahl auf eine Spiegelgruppe (BCO), die fünf Strahlen zu einem Bündel zusammenfasst und in den MBWG einkoppelt. Die Vielstrahlspiegel sind so ausgelegt, dass sie bis zu sieben Strahlen (fünf bei 140 GHz, einen bei 70 GHz und einen Ersatzkanal) von der Gyrotronebene (Eingangsebene) zur Stellarator-Halle (Ausgangsebene) übertragen können. In der Ausgangsebene der MBWG trennt eine Spiegelanordnung (BDO) die Strahlen und verteilt sie auf die einzeln verstellbaren Antennen im Vakuum-Gefäß von W7-X. Um die gesamte Leistung zum W7-X zu übertragen, sind zwei symmetrisch angeordnete MBWGs notwendig.

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt sind alle Spiegel für die Übertragung der zehn Millimeterwellenstrahlen bis zur Torushalle installiert, ebenso Kalorimeter und Streustrahlungsabsorber. In 2008 wurden die Spiegel Typ M13 und Typ M14, die die Millimeterwellen in den Torus einstrahlen, sowie die ECRH-Türme, die in der W7-X Torushalle diese Spiegel aufnehmen, fertig gestellt. Den fokussierenden Ellipsoid-Oberflächen der Spiegel M14 wurden zwei unterschiedliche Gitter überlagert, die zur Auskopplung eines fokussierten Strahls für die Leistungsmessung sowie für die Justierkontrolle über Reflektometrie mit einem 188 GHz-Teststrahl dienen. Die nächste Abbildung zeigt die Struktur einer solchen Oberfläche.



3-D-Kontur eines Spiegels Typ M14, bei dem der Ellipsoid-Oberfläche ein fokussierendes Phasengitter (schräg, Amplitude von $6 \mu\text{m}$) zur Auskopplung eines 140-GHz-Strahls zur Leistungsmessung und ein Littrow-Gitter (ca. vertikal, Amplitude ca. $20 \mu\text{m}$) für die Reflektometrie bei 188 GHz überlagert ist. Die Gitteramplituden sind stark übertrieben dargestellt.

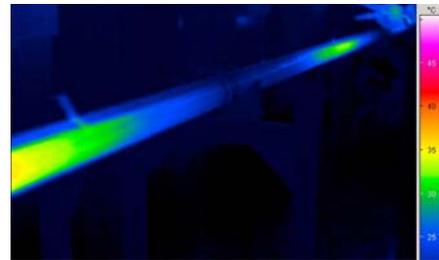
Die Abschirmgehäuse um die Spiegel M14 und die Vakuumfenster auf den Türmen sowie die Streustrahlungsabsorber sind in Fertigung. Auch die Empfänger für die Leistungsmessung an Spiegel M1 wurden mit optimierten Multimode-Hörnern gefertigt. Im Zuge der Inbetriebnahme von zwei Gyrotrons wurden Strahlvermessungen sowie die Auslegung und Fertigung der entsprechenden Anpassspiegel durchgeführt. Erste thermographische Messungen zur Richtungsänderung bzw. Verschiebung der Gyrotron-Ausgangsstrahlen während der Aufheizung von Resonator und Modenwandler am Pulsanfang ($t < 1 \text{ s}$) zeigen einen messbaren Effekt: Während einer ersten Phase des Pulses ($t < 0,25 \text{ s}$) nimmt die Abweichung der Strahlrichtung von der ursprünglichen Richtung kontinuierlich zu. Danach scheint die Abweichung wieder zurückzugehen; dies ließe sich mit ähnlichen thermischen Ausdehnungen von Gyrotron-Resonator und -Modenwandler, allerdings mit verschiedenen Zeitkonstanten, erklären. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt sind genaue Aussagen

jedoch wegen der Zunahme der Fehler mit der Pulslänge nicht möglich. Die Messungen sollen im kommenden Jahr mit einem größeren Parameterbereich weitergeführt werden.

Für verschiedene Varianten hinsichtlich der Lage von Vakuum-Fenster und Vakuum-Schieber in den Remote-Steering-Antennen für die beiden N-Stützen (von oben) wurden Optimierungsrechnungen durchgeführt. Es zeigt sich, dass die Integration eines Vakuum-Schiebers auf halber Länge des Quadrat-Hohlleiters mit Einschränkungen möglich ist, das Fenster aber in jedem Fall am Hohlleiter-Eingang montiert werden muss. Details sollen im Zuge der Konstruktion optimiert werden.

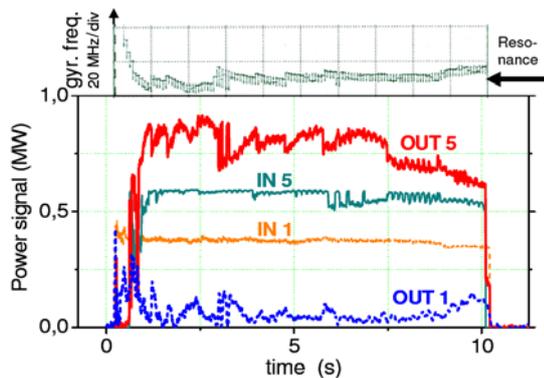
Wie im vergangenen Jahr konnte das ECRH - System auch für Hochleistungstests von neuen Komponenten eingesetzt werden. Ein einfacher Aufbau für eine neue Absorberlast, die auf einem langen absorbierenden Edelstahlhohlleiter beruht, wurde getestet. In der folgenden Abbildung sieht man eine thermographische Aufnahme der Wand des Absorberhohlleiters, die entsprechend der Schwebungswellenlänge der wesentlichen Hohlleitermoden im Rohr (TE_{11} und TM_{11}) wie erwartet aufgeheizt wird. Allerdings war die Pulslänge durch Überschläge an Schweißnähten und Oberflächenrauigkeiten auf Millisekunden begrenzt; mit weiteren Tests unter Verwendung eines glattwandigen Rohrs soll das Konzept weiter evaluiert werden.

Der Prototyp des Duplexers bzw. schnellen Kanal-Umschalters (FADIS) wurde auf seine Verwendung als Leitungsaddierer mit dem Gyrotron B1 (TED Maquette) und dem Gyrotron B5 (TED Prototyp) erfolgreich getestet. Die Möglichkeit, die kombinierte Leistung beider Gyrotrons zwischen den beiden Ausgangskanälen hin- und her zu schalten sowie der Einsatz als Leistungssteiler konnte ebenfalls experimentell nachgewiesen werden. Die nächste Abbildung zeigt die Leistungssignale am Eingang und Ausgang des Duplexers während eines Pulses. Man sieht, dass mehr als 90 % der Gesamtleistung, die an den



Thermographische Aufnahme des Absorber-Hohlleiters der "Langen Last". Zu Erkennen ist die Schwebung zwischen der TE_{11} und der TM_{11} -Mode, die durch die Einkopplung eines Gaußschen Strahls im Rundhohlleiter angeregt werden.

Eingängen (IN1, ca. 370 kW und IN5, ca. 560 kW) eingekoppelt wird, am Ausgang "OKT5" zur Verfügung steht. Wie der Vergleich des Frequenzverlaufs des Gyrotrons B1 (folgende Abbildung oben) mit dem Ausgangssignal OUT5 zeigt, ist die Qualität der Leistungsaddition begrenzt durch die Frequenzdrift und spontane Frequenzsprünge von B1 (das durch den resonanten Kanal des Duplexers transmittiert wird). Dieses Problem soll in einem kompakten Duplexer, der dieses Jahr gebaut wurde und im kommenden Jahr getestet werden soll, durch eine (soweit wie möglich automatische) Nachführung der Resonanzfrequenz reduziert werden. Auch die Pulslänge, die bisher durch die Verwendung von Aluminiumspiegeln auf 10 s begrenzt war, wird durch Kupferspiegel erhöht werden können.



Leistungsaddition von zwei Gyrotrons B1 und B5. Oben: Frequenzverlauf für Gyrotron B1 relativ zur Resonanzfrequenz des Diplexers. Unten: IN1 und IN5: Leistung der Gyrotrons B1 und B5; OUT1 und OUT5: Ausgangsleistung des Diplexers, die in die Absorberlasten eingekoppelt wird. Die übersprechende Leistung in Kanal OUT1 wird durch spontane Frequenzsprünge von Gyrotron B1 und ein Ansteigen der Frequenz zum Ende des Pulses bewirkt.

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.



Hochspannungsmodulator, Thyatron-Crowbar mit Kathoden-Heizmodul und Zündspule für das Thyatron installiert im IPP Greifswald.

Mittlerweile wurden vom IPF Stuttgart alle 10 Hochspannungseinheiten zusammen mit den zugehörigen Crowbars an das IPP in Greifswald geliefert und in Betrieb genommen. Auch der Prototyp-Modulator wurde auf denselben Stand wie die Serienmodulatoren gebracht. Die neuen Überwachungseinheiten, die es ermöglichen, eine auftretende Störung der entsprechenden Funktionseinheit zuzuordnen, wurden weitgehend fertig gestellt.

Die Arbeiten an den Dokumentationsunterlagen (Technische Zeichnungen, Schaltpläne, Aufbaupläne, Testprozeduren) wurden fortgesetzt. Die Abbildung zeigt einen kompletten Hochspannungsmodulator installiert im IPP Greifswald. Es wird erwartet, dass die Arbeiten an den Hochspannungsmodulatoren und Crowbars im kommenden Jahr weitgehend abgeschlossen werden.

In-vessel Komponenten für ECRH an W7-X

Der Zusammenbau der 4 ECRH Antennen geht weiter voran. Jede einzelne Antenne besteht aus drei verstellbaren Spiegeln, die sowohl in toroidaler als auch in poloidaler Richtung schwenkbar sind (siehe Abbildung). Damit erreicht man eine größtmögliche Flexibilität hinsichtlich der für W7-X geforderten Heiz- und Stromtrieb Szenarien.



Zusammenbau einer W7-X ECRH Antenne.

Die Strahlposition und die im Plasma absorbierte Leistung wird mittels einer Anordnung von Horn-Antennen, die den Einstrahlantennen gegenüberliegend in TZM-Kacheln eingebettet sind, gemessen. Ein erster Prototyp eines Hohlleiterbündels mit 16 runden Kupferrohren mit einem äußeren Durchmesser von 4 mm und einem inneren Durchmesser von 2 mm wurde bereits hergestellt und steht für den Einbau in einer original W7-X Vakuumkammer zur Verfügung.

Insgesamt durchdringen an den vier W7-X Öffnungen für die ECRH 120 Hohlleiter die Vakuum – Luft Übergangsstelle. Aufgrund einer Designänderung der Kühlung des Stützens wurden die Flansche abgeändert. Zusätzliche Zwischenflansche ermöglichen nun sowohl die Kühlwasserversorgung als auch Anschlüsse für die Mikrowellendiagnostik. Die Herstellung dieser Zwischenflansche wurde in die Wege geleitet.

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 für einen Einsatz zur Elektronenzyklotronresonanzheizung (ECRH) und zum Stromtrieb (ECCD) 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 wurden die physikalische Auslegung und die Spezifikation der Gyrotronkomponenten durch die Assoziationen durchgeführt, während TED für die technische Auslegung und Fertigung zuständig war. Gleichzeitig zu den Arbeiten am Prototyp wurde ein supraleitender (SL) Magnet spezifiziert und bestellt, und zum Testen des Gyrotrons wurde bei CRPP Lausanne ein geeigneter Teststand aufgebaut.

Parallel zu den Arbeiten an einem ersten industriellen Prototyp wurden die Untersuchungen an einem experimentellen, im Kurzpuls (< 5 ms) betriebenen, 170 GHz koaxialen Gyrotron (Vor-Prototyp) 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.

Auf lange Sicht ist es von höchstem Interesse, Gyrotrons für Fusionsanwendungen mit höherer Ausgangsleistung zu entwickeln. Der nächste Entwicklungsschritt nach dem 2 MW Gyrotron mit koaxialen Resonator wird in einer detaillierten Designstudie für ein koaxiales 170 GHz, 4 MW Gyrotron angegangen. Die Studie wird durchgeführt im Rahmen einer Dissertation, gefördert von der Europäischen Gemeinschaft durch das EURATOM FUSION Training Scheme Project EC-TECH, Vertrag Nr. 042636 (FU06).

Um im Falle unerwarteter Schwierigkeiten bei der Entwicklung des koaxialen 2 MW Gyrotrons den Anforderungen von ITER (Installation von Gyrotrons mit 8 MW HF-Leistung bis Ende 2015) nachkommen zu können, wurde mit dem Entwurf eines konventionellen 1 MW, 170 GHz Gyrotrons mit zylindrischem Resonator begonnen. Eine Entscheidung zwischen den beiden Gyrotrontypen wird Ende 2009 getroffen.

Vor-Prototyp des koaxialen Gyrotrons

Die sogenannte Vor-Prototyp-Röhre wurde wegen begrenzter Magnetfeldstärke am FZK ursprünglich für eine Ausgangsleistung von 1,5 MW ausgelegt. Sie dient hauptsächlich als flexibles Werkzeug für die Untersuchung von Problemen, die möglicherweise bei den Experimenten mit der industriellen Prototyp-Röhre am CRPP auftreten.

Die wichtigsten Themen dieser Untersuchungen am FZK in 2008 waren:

- I. Unterdrückung unerwünschter parasitärer Niederfrequenzschwingungen (LF Schwingungen)
- II. Untersuchung parasitärer Hochfrequenzschwingungen im Strahlentunnel
- III. Hochleistungstests und Untersuchung der Eigenschaften am nominellen Arbeitspunkt
- IV. Untersuchungen zur Verbesserung des Modenwandlers

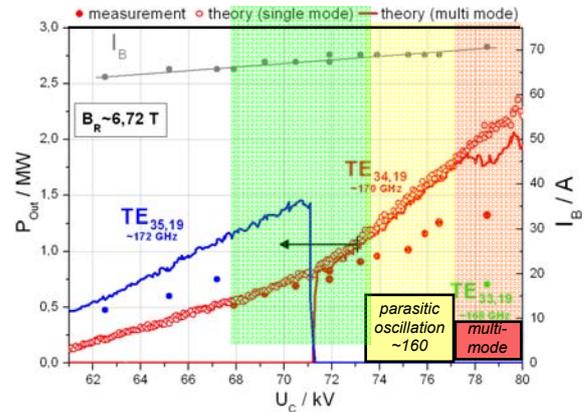
Untersuchungen zum Modenwandler, insbesondere zur Verbesserung des Launchers, werden ebenfalls durch die Entwicklung einer neuen Software zum Design von Launchern mit beliebigen Wanderverformungen durchgeführt.

I) Unterdrückung unerwünschter parasitärer Niederfrequenzschwingungen

In den ersten Experimenten zu Beginn des Jahres 2008 wurde der Vor-Prototyp mit der vorhergehenden „165 GHz“-Elektronenkanone betrieben. Dadurch wurden alle Probleme mit Niederfrequenz-Schwingungen beseitigt. Allerdings näherte sich der Emitter dieser Kanone dem Ende seiner Lebenszeit, so dass zusätzliche Experimente mit der ursprünglichen neuen Kanone unternommen wurden. Durch Modifikation des Innenleiters des Gyrotrons konnte der Startstrom der Niederfrequenz-Schwingung erhöht werden, die Schwingung wurde aber nicht vollständig beseitigt. Mit Hilfe externer Absorber im Kanonenbereich kann die Instabilität jedoch beseitigt werden, so dass das Experiment nicht weiter dadurch behindert wird. Weitere Untersuchungen sind in Planung.

II) Untersuchung parasitärer Hochfrequenzschwingungen im Strahlentunnel

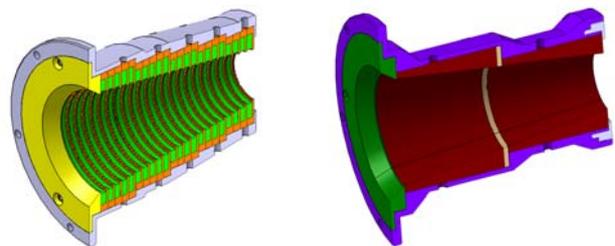
Bei höheren Leistungen wurden im Experiment geringere Leistungen und Wirkungsgrade erreicht als in der Simulation, während gleichzeitig eine zusätzliche Frequenz von 160 GHz auftrat (Abbildung). Es wird angenommen, dass es sich dabei um eine parasitäre Schwingung im Strahlentunnel handelt, ähnlich den am 140 GHz W7-X-Gyrotron beobachteten parasitären Schwingungen.



Messwerte der HF-Ausgangsleistung in unterschiedlichen Moden (gefüllte Kreise) im Vergleich mit simulierten Werten (leere Kreise und Linien). Die Obergrenze des Stabilitätsgebiets der Arbeitsmode ist in der Simulation korrekt vorhergesagt.

In einem ersten Versuch wurde der Strahlentunnel durch einen glatten, konischen Tunnel aus Edelstahl ersetzt, in der Hoffnung, dass der hohe Taperwinkel des Tunnels jede Oszillation unmöglich machen würde. Das Ergebnis war katastrophal, was als Hinweis gedeutet werden kann, dass die Zylindersymmetrie im Strahlentunnel gebrochen werden muss. Im laufenden Experiment wurde der ursprüngliche Strahlentunnel, der aus abwechselnd geschichteten Ringen aus Kupfer und verlustbehafteter Keramik besteht, modifiziert, indem in die Kupferringe unregelmäßige Schlitze gefräst wurden (Abbildung, links). Zwischenzeitlich wurde es möglich, die parasitären Schwingungen näherungsweise durch Simulationen vorherzusagen. Da die parasitären Schwingungen in diesen Simulationen als Gyro-Rückwärtswellen in symmetrischen $TE_{0,n}$ -Moden auftreten, die durch die zylindrischen Kupferringe unterstützt werden, darf man annehmen, dass unregelmäßige Störungen der Zylindersymmetrie dieser Ringe auch diese Schwingungen unterdrücken würden.

Das Experiment wird derzeit betrieben (siehe nächsten Abschnitt). Zusätzliche Experimente mit vollständig keramischem Strahlentunnel aus SiC, ohne metallische Komponenten, sind ebenfalls in Planung (Abbildung, rechts).



Links: Erste Ausführung des Strahlentunnel aus abwechselnd aufeinander geschichteten Kupfer- bzw. Keramikringen (orange bzw. grün). Die Kupferringe werden nun verändert, indem unregelmäßige Schlitze mit einer Tiefe von 0,5 mm eingefräst werden. Rechts: Vollständig keramischer Strahlentunnel aus SiC (braun).

III) Hochleistungspulse und Untersuchung der Eigenschaften am nominellen Arbeitspunkt

Die Vor-Prototyp-Röhre wurde ursprünglich für ein Magnetfeld von 6,7 T ausgelegt, weil dies die höchste Feldstärke ist, die mit dem SL Magneten des FZK erreicht werden kann. Aus diesem Grund wurde eine Ausgangsleistung von lediglich 1,5 MW bei 30 % Wirkungsgrad (ohne single-stage depressed) erwartet, im Gegensatz zum Prototyp am CRPP, bei dem in einem Magnetfeld von 6,87 T 2 MW erwartet wurden. Die höchste erreichte Leistung bei 6,7 T war 1,36 MW bei einem Wirkungsgrad von 26 % und einer Pulslänge von 2 ns. Dies ist ein recht respektables Ergebnis, trotz der beobachteten Probleme mit parasitären Hochfrequenzschwingungen.

Die Probleme der Experimente am Prototyp erfordern nun allerdings Kurzpulsexperimente, die besser vergleichbar sind. Daher wurde damit begonnen, den supraleitenden (SL) Magneten des Forschungszentrums durch eine zusätzliche normalleitende (NL) Spule in dessen innerer Öffnung (an Raumtemperatur) zu ergänzen, um das erreichbare Magnetfeld zu erhöhen. Zuerst wurde eine separate NL Spule gefertigt und erfolgreich getestet: Im Bereich des Resonators konnten damit 6,87 T erreicht werden, in Pulsen bis zu einer Sekunde und ohne den SL Magneten zum Quenchen zu bringen. Parallel dazu wurde der gesamte Teststand für einen möglichen Betrieb der Prototyp-Röhre vorbereitet, als Rückfalloption für den Fall, dass der SL Magnet des CRPP abgelehnt worden wäre.

Da mit diesem Test nachgewiesen wurde, dass eine Erhöhung des Magnetfeldes möglich ist, wurde eine zweite NL Spule direkt auf die Vor-Prototyp-Röhre gewickelt. Aus Platzmangel – der Vor-Prototyp hat einen größeren Durchmesser als der Prototyp – ist dies die einzige Möglichkeit, eine zusätzliche NL Spule in das Kurzpulsexperiment einzubringen. Gleichzeitig musste die Anode der Elektronenkanone des Vor-Prototypen an den Betrieb bei höherem Magnetfeld angepasst werden. Dieses „Nominalfeld-Experiment“ ist bereits installiert und wird derzeit betrieben. Ziel ist jetzt eine Ausgangsleistung von 2 MW im Kurzpulsbetrieb, bei einem Wirkungsgrad von 30 % (ohne SDC) und ohne parasitäre Schwingungen. Dadurch würden sowohl der veränderte Strahlentunnel als auch das Design der Elektronenkanone verifiziert und könnten dann mit großer Designsicherheit in der Prototyp-Röhre verwendet werden.

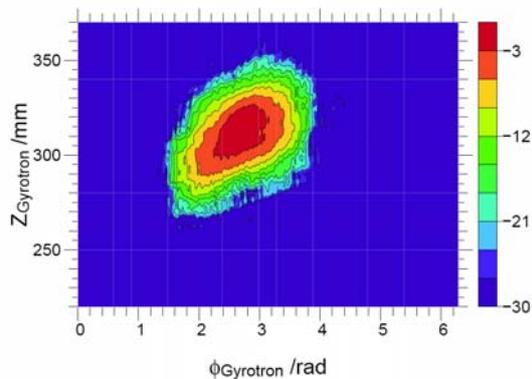
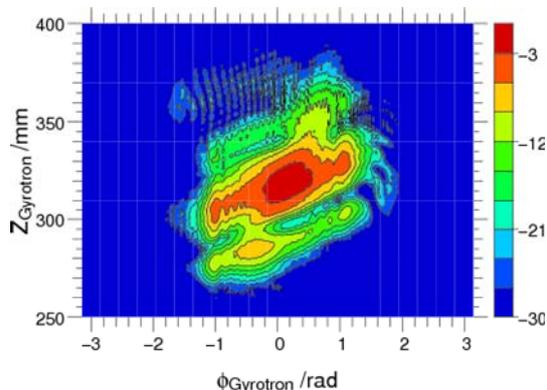
IV) Untersuchungen zur Verbesserung des Modenwandlers

Es ist bekannt, dass der existierende quasi-optische Modenwandler, der am FZK entworfen und sowohl im Vor-Prototyp als auch in der Prototyp-Röhre installiert wurde, keine ausreichende Modeneinheit liefert. Der HF-Ausgangsstrahl hat nur 77 % Gaußanteil, während die Streustrahlung in der Röhre einen inakzeptabel hohen Anteil von 8 % der Ausgangsleistung erreicht. Aufgrund des hohen Zeitdrucks in diesem Projekt wurden mehrere Methoden zur Verbesserung des Modenwandlers parallel untersucht:

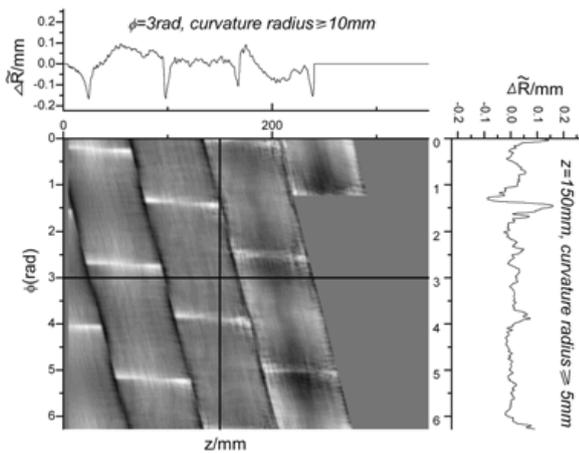
Das quasi-optische System wurde sorgfältig untersucht mit dem vektoruellen Niederleistungs-Netzwerkanalysator des Forschungszentrums. Das Ergebnis ist, dass die schlechte Performance möglicherweise durch eine Verschiebung des zweiten Spiegels von etwa 0,3 mm oder durch einen suboptimalen Entwurf des dritten, phasenkorrigierenden Spiegels verursacht wird. Dieser dritte Spiegel wurde neu entworfen. Allerdings lässt auch der beste Entwurf mit nur 88 % Gaußanteil weit weniger als die gewünschten 95 % erwarten.

Vom IAP (Nizhny Novgorod, Russland) wurde ein unabhängiger Entwurf des quasi-optischen Systems bestellt. Der Entwurf des IAP wurde mit 95 % Gaußanteil im HF-Strahl simuliert und soll noch im Dezember 2008 geliefert werden, so dass sowohl Niederleistungs- als auch Hochleistungstests im Jahre 2009 gemacht werden können.

Eine neue Software, basierend auf der Berechnung des skalaren Beugungsintegrals, wurde unter dem Namen TWL_DO für den Entwurf von Launchern mit beliebigen Wandverformungen entwickelt. Dies vermeidet die Probleme der bisher verwendeten Entwurfsmethoden für Launcher, bei denen periodische, helikale Wandverformungen verwendet werden. Es stellte sich heraus, dass solche Methoden ungeeignet sind für typische Arbeitsmoden koaxialer Gyrotrons, die üblicherweise einen relativen Kaustikradius von $1/3$ aufweisen, im Gegensatz zu einem relativen Kaustikradius von $1/2$ bei konventionellen Gyrotrons. Die koaxialen Moden können nicht mehr durch eine ganze Anzahl von Strahlreflexionen an der Wellenleiterwand über 360° beschrieben werden, wodurch periodische Wandverformungen nur zu ineffizienten Launchern führen. Mit der neuen Software wurde ein Launcher und das zugehörige Spiegelsystem entworfen. Dieses neue System bietet laut Simulation 97 % Gaußanteil (siehe folgende Abbildungen).



Links: Hochfrequentes Ausgangsfeld des originalen Launchers (mit helikalen periodischen Wandverformungen erster und dritter Ordnung), Rechts: HF Ausgangsfeld des neuen Launchers. Schon hinter dem Launcher wird hier ein Anteil der Gaußschen Grundmode von 97 % erreicht.



Entrolltes Wandprofil des neuen Launchers mit beliebigen Wandverformungen.

Alle drei Ansätze können bisher als erfolgreich angesehen werden. Allerdings wurde noch keiner experimentell getestet. Der neue Launcher mit beliebigen Wandverformungen befindet sich in der Fertigung und wird Anfang 2009 sowohl bei kleiner Leistung als auch mit Hochleistung im Gyrotron. Der Test des IAP Systems ist danach vorgesehen.

Industrieller Prototyp des koaxialen Gyrotrons

Der erste industrielle Prototyp des koaxialen Gyrotrons wurde von November 2007 bis September 2008 getestet, nach einer Verzögerung durch die verspätete Lieferung des supraleitenden (SL) Magneten. Detaillierte Ergebnisse dieser Experimente sind im Abschlussberichts des EFDA-Tasks CCGT1 (J.-P. Hogge, Oktober 2008) beschrieben. Die wichtigsten Ergebnisse sind: Eine Ausgangsleistung von 1,4 MW / 2 ms und 0,5 MW / 60 ms wurde erreicht. Höhere Ausgangsleistungen oder Pulslängen wurden durch die mangelhafte Hochspannungsfestigkeit der Röhre verhindert. Die Ursache dafür ist noch zu untersuchen. Die erwartete Leistungsaufnahmefähigkeit des Kollektors (2,4 MW / 2 s) konnte nachgewiesen werden.

Das FZK wird die Unterstützung der Experimente am CRPP in den kommenden Projektphasen fortsetzen: Nach Öffnung und Umbau des industriellen Prototypen, entsprechend den experimentellen Ergebnissen an CRPP und FZK, sind zwei weitere Prototypen im Rahmen dieses Projekts vorgesehen.

Status zum Ende des Jahres 2008

Aufgrund der Verzögerung bei der Lieferung des SC-Magneten standen die Experimente mit dem Prototyp-Gyrotron zu Beginn des Jahres erst am Anfang. Netzteil und Teststand waren teilweise einsatzfähig, mussten aber im Laufe der Experimente weiter verbessert werden.

I. Diskussion des Testprogramms und Vorschlag zur benötigten Ausstattung für die diagnostische Messtechnik

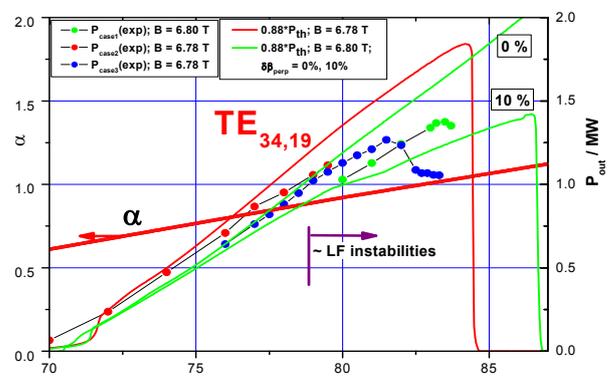
Experten des FZK nahmen teil an den Diskussionen zum experimentellen Programm und der benötigten Ausstattung. Detaillierte Vorschläge zu Zeitplan, Aufbau und Diagnostik der Versuche wurden im Verlauf der Experimente beigeleitet.

II. Durchführung der Tests am CRPP und Entscheidungsprozess während der Experimente

Während der experimentellen Phase von Januar bis Juli 2008 nahmen Experten des FZK gelegentlich teil an den Versuchen am CRPP.

III. Interpretation der Ergebnisse und Vergleich mit numerischen Simulationen

Als Beispiel für die Vergleiche mit numerischen Simulationen ist in der folgenden Abbildung die experimentell gemessene HF-Ausgangsleistung im Vergleich mit Simulationsergebnissen aus dem selbstkonsistenten, zeitabhängigen Mehrmodenprogramm des FZK (SELFT) aufgetragen. Für die Simulation wurden die Parameter des Elektronenstrahls ebenfalls numerisch berechnet. Für die Geschwindigkeitsstreuung der senkrechten Komponente der Elektronengeschwindigkeit wurde der ideale Wert 0% und ein realistischerer Wert von 10% angesetzt. Der ebenfalls dargestellte Wert des Geschwindigkeitsverhältnisses α wurde ermittelt mit dem Raytracing Code des FZK ESRAY. Wie man sieht, ist die Übereinstimmung zwischen experimentellen Werten und den Simulationen ausreichend gut. Allerdings machte es die Begrenzung der Beschleunigungsspannung durch mangelnde Hochspannungsfestigkeit der Röhre unmöglich, das Gyrotron bei Nominalparametern (90 kV, 75 A, 6,86 T) zu betreiben. Es wird angenommen, dass diese Begrenzung der Hauptgrund für die zu geringe HF-Ausgangsleistung ist. Die Gründe für die Begrenzung der Hochspannung sind noch zu untersuchen.



Mehrmoden-Simulationen U_c / kV (SELFT) der HF-Ausgangsleistung. Die experimentell erreichten Werte (blaue, grüne und rote Punkte) entsprechen geringfügig unterschiedlichen Magnetfeldern von 6,78 T bzw. 6,80 T. Die Mehrmoden-Simulationen wurden mit unterschiedlichen Geschwindigkeitsstreuungen (0% und 10% der Senkrechtkomponente) durchgeführt, für die internen HF-Verluste wurde 12% angenommen.

Zusätzlich wurden Wechselwirkungs-Simulationen unter dem Einfluss von HF-Reflexionen durchgeführt. Das Ergebnis dieser Berechnungen ist, dass eine Reflexion von 8% der ausgehenden HF-Leistung ausreichen würde, um den Abfall der mit einer kugelförmigen Last (siehe Abbildung umseitig) gemessenen Leistung im Vergleich zu den Messwerten mit dem Kurzpuls-Kalorimeter des FZK zu erklären (siehe nächsten Abschnitt).

IV. Bereitstellung eines geeigneten KurzpulsKalorimeters für HF-Messungen

Ein Kurzpuls-Kalorimeter, identisch dem am FZK verwendeten (mit angepasstem Interface und einem Isolationsring), wurde vorbereitet und ans CRPP geliefert. Diese Last hat eine geringe Leistungsreflexion und kann für Pulslängen bis zu einigen ms bei den hier diskutierten Leistungen verwendet werden. Alle Kurzpuls-messungen am CRPP wurden mit diesem Kalorimeter durchgeführt. Spätere Messungen mit einer Kurzpuls-last für größere Pulslängen von CNR (Abbildung) wichen von diesen Messungen ab, vermutlich aufgrund von Reflexionen an der CNR-Last. Der Grund für die Abweichung wird noch untersucht.



Fotographie der ersten industriellen Prototypröhre des 2 MW, CW, 170 GHz Gyrotrons mit koaxialem Resonator (hergestellt von TED), montiert im SL Magneten am CRPP Lausanne. Die blaue Kugel ist die angeschlossene Kurzpulslast des CNR.

V. Untersuchung des Störpegels von Hochspannungsversorgung und Teststand

Das Hochspannungsnetzteil des Gyrotron-Teststands am CRPP wurde mit Hilfe des schnellen 25 MHz Spannungsteilers des FZK vermessen. Der Störpegel an der Hauptstromversorgung der Kathode ergab sich zu 1,2 kV pp in einem Frequenzbereich von 250 kHz, und für das Netzteil der Bodyspannung 0,65 kV pp. Da letzteres nicht schnell genug ist, die hochfrequente Störspannung an der Kathode zu kompensieren, muss davon ausgegangen werden, dass die Störspannung der Beschleunigungsspannung insgesamt 1,8 kV pp beträgt, im Vergleich zu 0,4 kV Störspannung bei W7-X und < 0,1 kV am FZK. Im Moment werden diese Störpegel zwar nicht als Begrenzung der Messungen angesehen. Einflüsse auf die Messeinrichtungen sind jedoch noch in Diskussion.

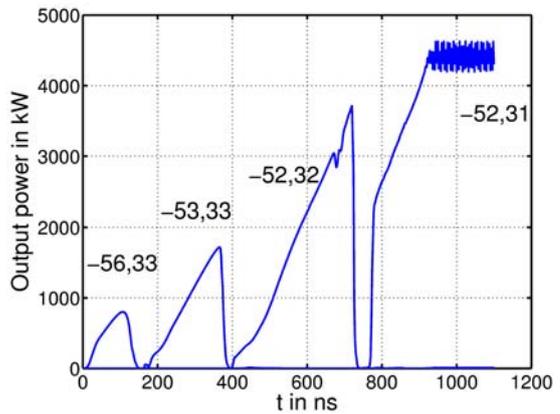
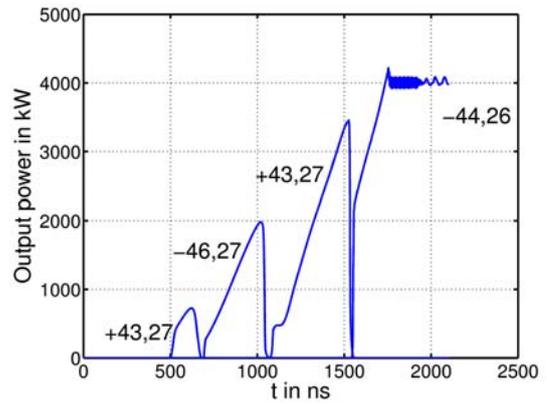
Design-Studien für ein koaxiales 170 GHz 4 MW Gyrotron

Ziel der Arbeit ist der Nachweis der physikalischen und technischen Machbarkeit eines solchen Gyrotrons. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die wichtigsten Designparameter.

Ausgangsfrequenz f_0	170 GHz
Ausgangsleistung P_{out}	4 MW
Wirkungsgrad der Wechselwirkung η_{tot}	> 35 % (ohne abgesenkten Kollektor)
Verlustleistungsdichte an der Resonatorwand ρ_{wall}	< 2 kW/cm ² (realistisch)
Verlustleistungsdichte am Innenleiter ρ_{coax}	< 0,2 kW/cm ² (realistisch)
Stromdichte am Emitter j_{beam}	< 5 A/cm ²

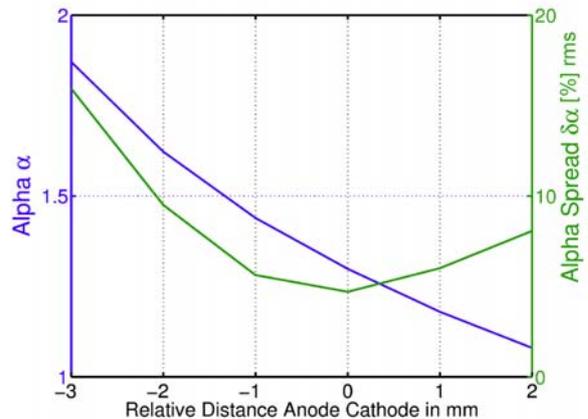
Designparameter für ein 170 GHz 4 MW CW Gyrotron mit koaxialem Resonator.

Nach ausführlichen Resonator-Designstudien und Simulationen der Modenkonzurrenz wurden zwei geeignete Arbeitsmoden ausgewählt, welche die gewünschte Ausgangsleistung unter Einhaltung der technischen Grenzwerte aus der Tabelle erzeugen können: TE_{-44,26} und TE_{-52,31}. Die Abbildung zeigt typische Simulationen des Einschaltvorgangs mit diesen beiden Moden.



Einschaltvorgänge der beiden ausgewählten Arbeitsmoden. Beide Moden erreichen die gewünschte HF-Ausgangsleistung.

Daraufhin wurde ein detaillierter Entwurf einer Elektronenkanone für jede der beiden Arbeitsmoden durchgeführt. Das Design der Kanonen wurde sorgfältig optimiert durch Parameterstudien, wie beispielsweise in der folgenden Abbildung gezeigt. Die nächsten Schritte sind die Verifikation der Wechselwirkungsrechnungen im Resonator unter Verwendung der realistischen Parameter der entworfenen Kanonen sowie der Entwurf eines geeigneten abgesenkten Kollektors. Die weitere Planung sieht die Überprüfung der technischen Machbarkeit des Designs im Rahmen eines mehrmonatigen Besuchs bei Thales Electron Devices (TED) in 2009 / 2010 vor.



Einfluss des relativen Abstands von Kathode zu Anode auf das Geschwindigkeitsverhältnis Alpha und dessen Streuung.

170 GHz, 1 MW Gyrotrons mit konventionellem Resonator

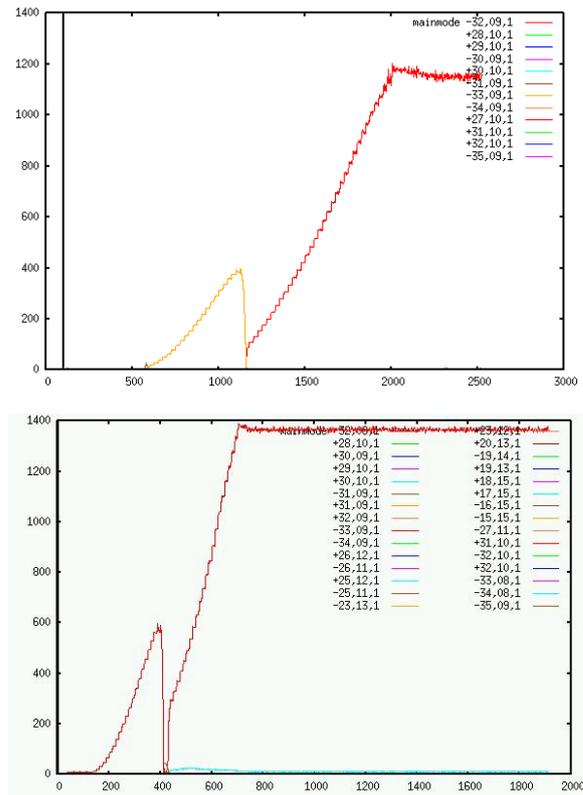
Als Startpunkt wurde von den technischen Randbedingungen ausgegangen, wie sie TED für das 140 GHz W7-X-Gyrotron gefordert hatte. Die wichtigsten Ziele des Entwurfs waren:

- 1 MW simulierte Ausgangsleistung am HF-Fenster, bei maximalen Verlustleistungsdichten im Resonator von etwa 2 kW/cm² (realistische Wandverluste, doppelt so hoch wie für ideales Kupfer bei Raumtemperatur berechnet) und bei vernünftigen Gesamtwirkungsgrad (> 30 % ohne abgesenkten Kollektor). In dieser Rechnung müssen die Verluste im Resonator, Leistungsverluste durch Wechselwirkungen außerhalb des Resonators (after cavity interaction) und Verluste zwischen Resonator und HF-Fenster berücksichtigt werden. Die Summe all dieser Verluste wurde zu 15% der erzeugten Leistung abgeschätzt.
- Sicherheitshalber 1,3 MW simulierte Ausgangsleistung am Resonatorausgang, in stabilem Einmodenbetrieb. Bei dieser Leistung sind höhere Wandverluste zulässig.
- Stromdichte am Emittor unter 3 A/cm². Mit höheren Stromdichten bzw. niedrigeren Kathodenspannungen mag ein geringfügig höherer Wirkungsgrad der Wechselwirkung erreichbar sein, es wurde aber entschieden, nicht zu sehr von den Werten des W7-X-Gyrotrons abzuweichen.
- Relativer Kaustik-Radius $m/\chi_{m,p}$ nahe bei 0,5, um die Machbarkeit des quasi-optischen Modenwandlers ähnlich zum 140 GHz W7-X-System sicherzustellen.

In einer ersten Moden-Auswahl wurden fünf mögliche Arbeitsmoden bestimmt, welche die Vorgaben erfüllen können: TE_{32,09}, TE_{33,09}, TE_{33,10}, TE_{34,09} und TE_{34,10}. Verschiedene Resonator-Entwürfe für TE_{32,09}, TE_{33,09} und TE_{34,10} wurden geprüft. Während für die Moden TE_{32,09} und TE_{33,09} Geometrien gefunden wurden, welche die Vorgaben fast vollständig erfüllen, scheint die TE_{34,10}-Mode in den Rechnungen des FZK bei hohen Leistungen instabil zu sein. Es wurde entschieden, die TE_{32,09}-Mode als ersten Kandidaten auszuwählen, und die TE_{33,09} als Rückfalllösung zu verwenden (siehe Tabelle und Abbildung). Alle drei Moden wurden erfolgreich auf ihre Brauchbarkeit zum Entwurf eines quasi-optischen Systems überprüft.

Magnet Feld B_r (T)	6,76
Strahlenergie U_b (kV)	79,0
Strahlstrom I_b (A)	40,0
Strahlradius r_b (mm)	9,5
Geschwindigkeitsverhältnis der Elektronen α	1,3
Ausgangsleistung am HF-Fenster (MW)	1,0
Gesamtwirkungsgrad ohne abgesenkten Kollektor (%)	31,6
Maximale Wandverluste (kW/cm ²)	2,2
Ausgangsfrequenz (GHz)	170,04
Selbstkonsistent berechnete Güte Q	1514

Nomineller Arbeitspunkt für die TE_{32,09}-Mode im Resonator-Entwurf des FZK.



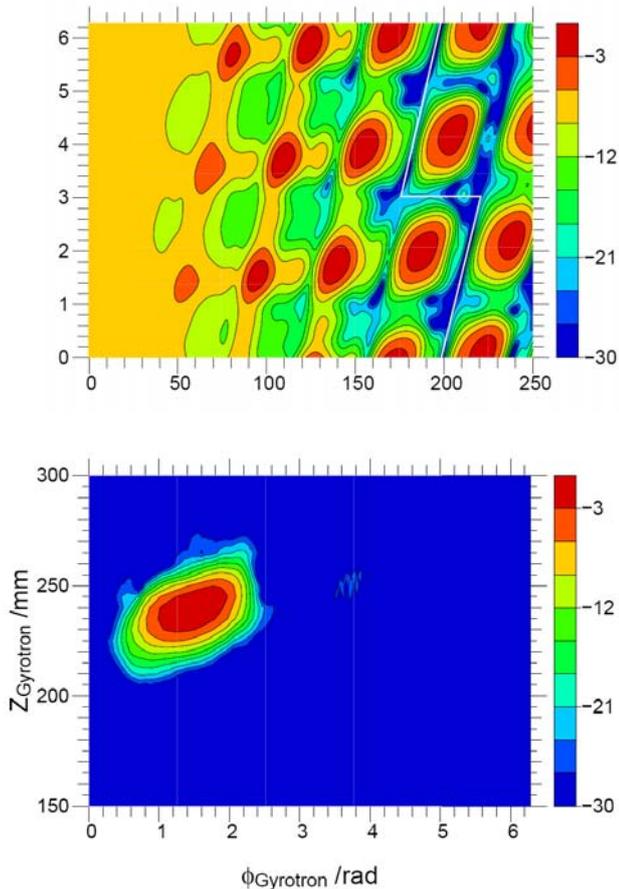
Einschaltvorgang für die TE_{32,09}-Mode: bei 40 A Strahlstrom wird eine Ausgangsleistung >1 MW erreicht (oben) sowie >1,3 MW bei 45 A Strahlstrom (unten). Die Beschleunigungsspannung steigt linear während der ersten 2000 ns auf 79 kV an (andere Parameter wie in der Tabelle).

Der Resonatorentwurf für die TE_{32,09}-Mode muss noch abschließend durch die Bestimmung des Stabilitätsgebiets über größere Parameterbereiche verifiziert werden, danach ist der Entwurf noch fertig zu stellen. Dies umfasst den Entwurf eines nichtlinearen Uptapers (Radius-Vergrößerung) und die Minimierung der unerwünschten Modenkonversion.

Die Magnetfeldstärke im Resonator muss etwa 6,76 T betragen. Es wird erwartet, dass der Feldverlauf des ASG-Magneten am CRPP Lausanne benutzt werden kann, aber andere Konfigurationen sind auch möglich.

Im nächsten Schritt müssen die Anforderungen an den Magnetfeldverlauf im Rahmen von Kanonen- und Kollektorentwurf festgelegt werden. Wenn möglich, sind Feldverläufe wie vom ASG-Magnet erzeugt vorzuziehen.

Für einen vorläufigen Entwurf eines quasi-optischen HF-Auskoppelsystems (Launcher und Spiegel) wurden verschiedene Moden zwischen TE_{32,09} und TE_{34,10} untersucht. Quasi-optische Modenwandler für all diese Moden sind machbar, aber die bevorzugte Mode TE_{32,09} scheint bessere Eigenschaften in Bezug auf Launcherlänge und Gaußanteil des Ausgangsstrahls zu besitzen. Dies rechtfertigt nochmals die Entscheidung zu dieser Mode.



Wandströme des entrollten Launchers für die $TE_{32,09}$ -Mode (oben) und abgestrahltes Feld auf einem Zylinder mit 100 mm Radius mit hohem Gaußanteil (unten).

Die Auslegung eines optimierten Launchers und eines Spiegelsystems für die letztendlich ausgewählte Mode muss noch gemacht werden. Der detaillierte Entwurf muss auch die Form des Elektronenstrahls hinter dem Resonator und die Geometrie des supraleitenden Magneten berücksichtigen, so dass das endgültige Design in Wechselwirkung mit dem Entwurf von Kollektor und dem Magneten gemacht werden muss.

Erste Berechnungen der Elektronenkanone am CRPP wurden durch das FZK verifiziert.

In den kommenden Untersuchungen wird die Entwurfsarbeit für die Elektronenkanone am CRPP weiter durch das FZK unterstützt. Dies umfasst einerseits die Verifikation des Kanonendesigns, andererseits Simulationen des Einschaltvorgangs und der Parameter der Strahlneutralisierung.

Bisher wurde kein neues Kollektor-Design begonnen. Es wird erwartet, dass der Kollektor des 170 GHz-Gyrotrons praktisch identisch dem Kollektor des 140 GHz W7-X-Gyrotrons sein kann, insbesondere einschließlich des unteren Edelstahlbereichs. Dieser ermöglicht radiales Sweeping des Elektronenstrahls, eine Technik, die wie bei der 140 GHz-Röhre verwendet werden sollte, um damit eine bessere Temperaturverteilung bei höheren Sweepfrequenzen zu erreichen.

Die Verwendbarkeit des 140 GHz-Kollektors muss verifiziert werden, unter Berücksichtigung des bevorzugten Magnetfeld-

verlaufs. Modifizierungen für höhere Sicherheitsreserven oder andere Verbesserungen sind noch zu untersuchen.

Launcher Handling Test Facility für ITER

Die Entwicklung des Upper Launchers für die Mikrowellenheizung und Plasmastabilisierung in ITER erfordert in jedem Designzyklus eine Überprüfung und Einschätzung der verschiedenen Bauteile. Der Aufbau der Launcher Handling Test Facility (LHT) im IHM stellt hierfür einen zentralen Baustein bereit, der zum Test von Fertigungsstudien und Prototypen, aber auch zur Verifizierung numerischer Analysen genutzt werden soll.

Aufbau LHT

Im abgelaufenen Jahr wurde der Aufbau der Kernkomponenten (Prototypenflansch, Heizkreislauf, Ansteuerung, Datenaufnahme und einfache Fernhandlung) des LHT abgeschlossen. Die Anlage wurde für einen unteren Temperaturbereich bis 100°C in Betrieb genommen. Die elektronische Ansteuerung erlaubt den automatischen Ablauf definierter Testprogramme, die Datenaufnahme erlaubt eine einfache spätere Auswertung der Ergebnisse.

Prototypen

Die kompliziertesten Strukturkomponenten im Upper Launcher sind die aktiv gekühlten Doppelwandstrukturen, die eine spezielle Herausforderung für die Fertigung darstellen. Ein erstes Ziel der Prototypenfertigung ist es, geeignete Herstellungsverfahren auszumachen, mit deren Hilfe eine kostengünstige aber auch reproduzierbar gute Qualität erreicht werden kann.



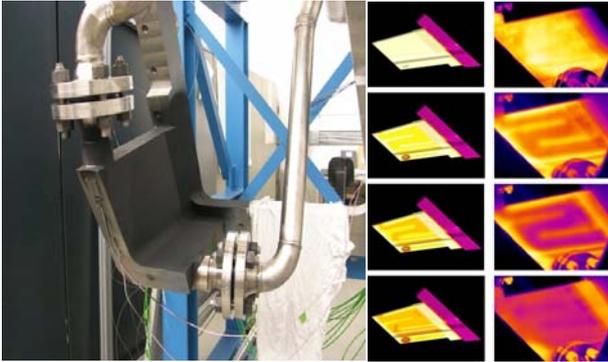
Mittels pulvermetallurgischer Fertigung (HIP, hot isostatic pressing) wurde ein Prototyp gefertigt und am Teststand eingesetzt (siehe Abbildung). Für einen weiteren Prototypen mit Hilfe von Lötung einzelner Wandkomponenten ergab sich eine Undichtigkeit durch Verzug während des Abkühlens.

HIP (Koeppern, links), gelöteter (Reuter, mitte) und massiver HIP (Bodycote, rechts) Prototyp.

Prototypentests an der Launcher Handling Test Facility

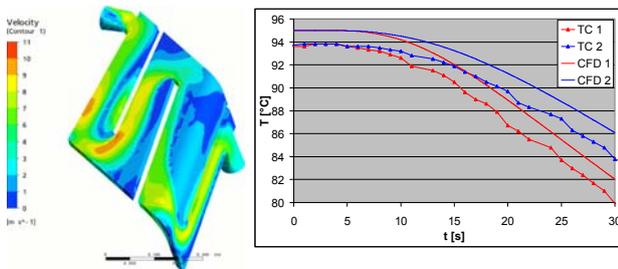
Der HIP-Prototyp mit rechteckigen Kühlkanälen wurde an der LHT installiert und mit externen Thermoelementen versehen; zusätzlich erlaubte eine Infrarotkamera großflächige Temperaturmessungen auf der zuvor mit Graphit gleichmäßig geschwärzten Prototypoberfläche.

In Experimenten sollte die zuvor durchgeführte Strömungssimulation auf ihre Gültigkeit überprüft werden. Der Prototyp wurde hierfür zunächst in einem kleinen Wasserkreislauf auf 100°C aufgeheizt und danach im großen Wasserkreislauf (mit dem großen Wasserreservoir auf Raumtemperatur) auf rund 40°C schnell abgekühlt.



Prototyp und Vergleich von Simulation mit Infrarotaufnahmen.

Im Vergleich zwischen Simulation und Experiment konnte die Tauglichkeit der Strömungsanalyse zur Beschreibung der Wärmeabfuhr sowohl über direkte Temperaturmessungen mit Thermoelementen als auch im großflächigen Bild der Infrarotkamera bestätigt werden (siehe Abbildungen). In der Auswertung der Simulation konnten darüber hinaus auch Erkenntnisse wie auftretende quasistationäre Wirbel mit reduziertem Wärmetransport gewonnen werden. Sie bieten einen direkten Ansatzpunkt zur Verbesserung des Designs durch z.B. Umgestaltung der Kühlrippen.



Berechnete Geschwindigkeitsverteilung und Temperatur und Vergleich mit einer Temperaturmessung mit Thermoelementen.

Entwurf einer Laborproduktionsanlage zur Herstellung von BeTi Kugeln

Zukünftige Fusionsreaktoren benötigen zum effizienten Brüten von Tritium Neutronenervielfacher. Ein Material das dafür intensiv untersucht wird ist Beryllium. In den letzten Jahren sind aufgrund einer möglicherweise besseren Tritium-freisetzung BeTi Legierungen in den Focus der Untersuchungen gerückt. Geeignete Herstellungsmethoden sind insbesondere in Japan entwickelt worden. Auf dem Gelände des Forschungszentrums Karlsruhe und in enger Zusammenarbeit mit diesem hat die Fa. GORAIEB VERSUCHSTECHNIK Vorarbeiten zur Entwicklung eines Herstellungsverfahrens mittels pulvermetallurgischer Prozesstechniken für Be₁₂Ti Kugeln geleistet. Langfristiges Ziel des IHM-Beitrages ist die Entwicklung einer Mikrowellensinterertechnik für die Herstellung von BeTi Kugeln für ein Fusionsblanket im Labormaßstab.

Im Berichtszeitraum wurde die bestehende Mikrowellentechnik auf den neusten Stand gebracht. Eine Magnetron-Mikrowellenquelle mit 2 kW Ausgangsleistung und ein Schalt-netzteil, welches einen Betrieb der Mikrowellenröhre im Dauerstrich erlaubt, wurden angeschafft und in Betrieb genommen. Zur automatischen Anpassung der Mikrowellen-quelle an den Wellenleiterresonator wurde ein automatischer 3-Stub-Tuner installiert, der darüber hinaus über zwei integrierte Richtkoppler eine Leistungsmessung in Vorwärts-

und Rückwärtsrichtung ermöglicht. Dank dieser Erneuerung ist nun eine Prozesssteuerung über einen Industrie-Regler möglich bei gleichzeitiger Datenerfassung von Temperatur und absorbierter Mikrowellenleistung. Dies erlaubt nun eine systematische Variation der Prozessparameter für das Sintern von Metallpulverproben. Aufgrund der Toxizität des Berylliums wurden zur Prozessoptimierung bisher ausschließlich Versuche mit Titanpulverproben durchgeführt. So konnten diese ersten Versuche auch außerhalb der Handschuhbox gefahren werden.



Versuchstand zur Mikrowellensinterung von BeTi Kugeln.

Lithium-Flüssigmetalltechnologie für IFMIF

Die Qualifizierung von Strukturmaterialien in einem zukünftigen Fusionsreaktor erfordert eine Langzeitbestrahlung durch Neutronen mit fusionsrelevanten Energie-Spektren, die zu Materialschäden von bis zu 150 dpa führt. Die geplante Beschleuniger-getriebene Deuterium-Lithium-Hochfluss-Neutronenquelle IFMIF wurde in Zusammenarbeit mit der Europäischen Union, den USA, Japan und Russland unter der Schirmherrschaft der IEA intensiv untersucht. Sie verspricht, die Anforderungen für fusionsrelevante Materialtests hinsichtlich der Parameter Strahlungsschäden, Testvolumina und Neutronenfluss zu erfüllen.

Langfristiges Ziel des IHM-Beitrages ist die experimentelle Bestimmung der Erosionsfestigkeit von Stählen in Kontakt mit fließendem, flüssigem Lithium. Dazu wird die Entwicklung geeigneter Reinigungssysteme für flüssiges Lithium, insbesondere zur kontrollierten Reduzierung des N-, C-, H-, O-Gehalts, benötigt. Solche Reinigungssysteme sollen in einen Erosionsteststand und in zukünftige Flüssiglithiumkreisläufe integrierbar sein.

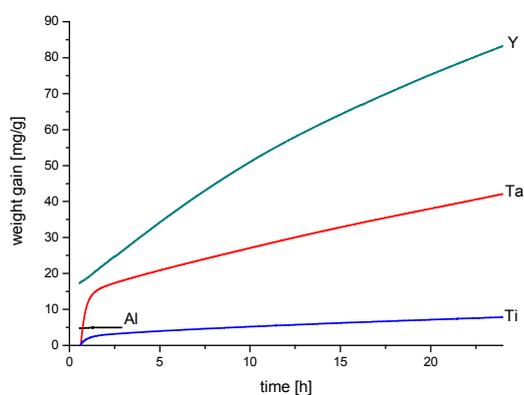
Die wichtigsten Ergebnisse im Berichtszeitraum werden kurz zusammenfassend dargestellt.

Aus dem Vergleich der freien Bildungsenthalpien für die Oxidation verschiedener Metallen mit Lithium ergibt sich, dass jeglicher Sauerstoffkontakt mit Lithium vermieden werden muss. Eine kontrollierte Reinigung oder gar Einstellung einer

spezifischen Sauerstoffkonzentration ist unrealistisch. Als Sauerstoffgettermaterialien kommen Mg, Ce, Ca oder Y in Frage.

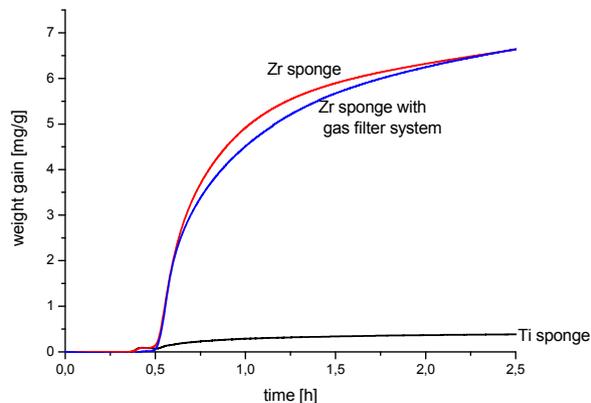
Die Einstellung und Kontrolle eines definierten Stickstoffgehalts ist jedoch aus thermodynamischer Sicht durchaus realistisch und sie ist zudem notwendig. In früheren Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass die Korrosionsrate von Stählen vom Stickstoffgehalt des Lithiums abhängt. Eine Reinigung des Lithiums ist deshalb notwendig. Als Stickstoffgetter kommen alle Elemente, die eine größere freie Bildungsenthalpie ihres Nitrids haben in Frage, wie z.B. Va, Ta, Nb, Y, Al, Ti and Zr.

Mit einer Thermowaage wurden verschiedene Metallpulver, Al, Ti, Y, Ta und Zr auf ihr Stickstoffgettervermögen hin untersucht. Bis auf Al sind alle untersuchten Metalle bis auf Al in Lithium nicht löslich. Die Gewichtszunahme wurde bei 400°C in einer von Sauerstoff gereinigten N₂ Atmosphäre gemessen (Abbildungen).



Gewichtszunahme verschiedener Metalle bei 400°C in N₂ als Funktion der Zeit.

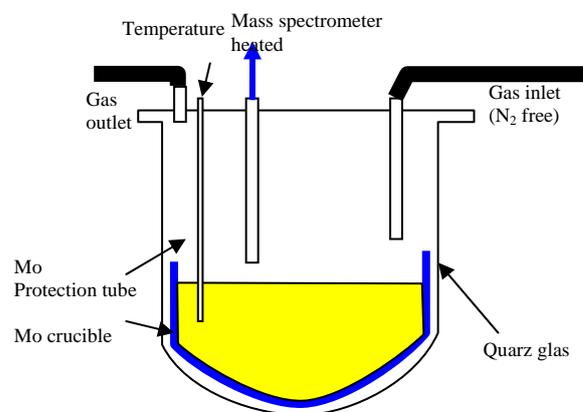
Ta, Zr, Ti und Al zeigen eine deutliche Sättigung in der Gewichtszunahme nach wenigen Stunden. Dies deutet darauf hin, dass alle diese Metalle dichte Nitrid-Schichten bilden. Yttrium hingegen zeigt eine nahezu lineare Gewichtszunahme was auf eine volumetrische Durchnitrierung schließen lässt, d.h. jedes Yttrium Atom, nicht nur die Oberflächennahen nimmt an der Nitridbildung teil. Von allen untersuchten Materialien hat Y das mit Abstand höchste Gettervermögen für Stickstoff. Da Y allerdings auch ein Wasserstoff und damit Tritiumgetter ist, sollte es eher zur Vorreinigung des Lithiums vor den Tests als zur kontinuierlichen Reinigung während des Betriebs eingesetzt werden.



Gewichtszunahme verschiedener Metallschäume bei 400°C in N₂ als Funktion der Zeit.

Zr und Ti wurden zudem in Schwammform getestet. Beide Metallschwämme waren aus Altbeständen des Instituts und somit war deren Oberflächenzustand (Oxidation) nicht bekannt. Ti-Schwamm zeigte dabei eine 8fach niedrigere Stickstoffaufnahme als ein Ti Pulver mit mittlerer Partikelgröße von 44 µm. Ob dies an der unterschiedlichen spezifischen Oberfläche oder an möglicher Oberflächenkontamination liegt kann zu diesem Zeitpunkt noch nicht gesagt werden.

Um die Reduktion des Stickstoffes im flüssigen Lithium zu untersuchen wurde ein kleiner Versuchstand konzipiert und die notwendigen Teile dafür bestellt (Abbildung). Der Versuchstand soll zu Beginn des kommenden Jahres aufgebaut werden. Nach dem Reinigen des Lithiums von Stickstoff wird eine definierte Menge Li₃N zugegeben und die Reaktion in der Gasphase mittels eines Massenspektrometers gemessen. Durch Zugabe der verschiedenen in Frage kommenden Metalle wird deren Gettervermögen und deren Getterkinetik durch die Reaktion in der Gasphase bestimmt.



Schema des Versuchstandes zur Untersuchung der Stickstoffreduktion in flüssigem Lithium.

Mitarbeiter:

- DI A. Arnold, K. Baumann, Dr. B. Bazylev, DI M. Beringer, Prof. E. Borie, Dr. G. Dammertz, DI J. Flamm (Universität Karlsruhe), **Dr. G. Gantenbein**, GORAIEB Versuchstechnik, Dr. R. Heindinger (IMF I), Dr. S. Illy, Dr. J. Jin, **Dr. S. Kern**, Dr. R. Kochergov, **Dr. I. Landman**, R. Lang, DI W. Leonhardt, MSc G. Li, **Dr. G. Link**, Y.-H. Liu, DI A. Meier (IMF I), D. Mellein, S. Miksch, Dr. P. Pestchanyi (Gastwissenschaftler), **Dr. B. Piosczyk**, Dr. O. Prinz (Universität Karlsruhe), Dr. T. Rzesnicki, Dr. A. Samartsev, Dr. T. Scherer (IMF I), Dr. R. Schneider, DI M. Schmid, DI P. Späh (IMF I), Dr. D. Strauss (IMF I), W. Spiess, J. Szczesny, Prof. M. Thumm, DI J. Weggen, **Dr. A. Weisenburger**

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

- IPF Stuttgart:
Dr. P. Brand, Dr. C. Lechte, **Dr. W. Kasperek**, M. Krämer, Dr. H. Kumric, R. Munk, F. Müller, Dr. B. Plaum, S. Prets, 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, G. Roth, T. Schulz, P. Uhren
- IPP Garching:
DI M. Weißgerber

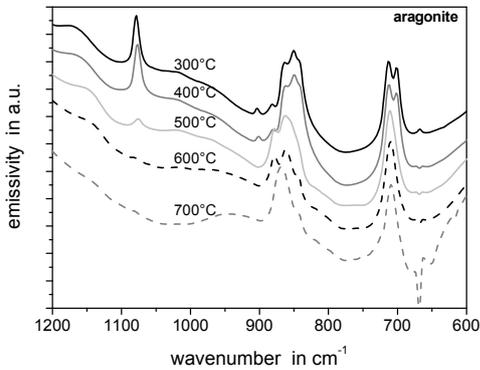
Programm NANOMIKRO

Konstitution, Synthese und Processing

Nanomineralogie

In Zusammenarbeit mit der Abteilung Nanomineralogie des ITC-WGT wurde die mit dem FTIR Spektrometer gekoppelte Mikrowellenanlage für weitere Tastversuche genutzt. Ziel dieser Untersuchungen ist es, zusätzliche Informationen aus verschiedenen Prozessen während der Mikrowellenbestrahlung zu erzielen. Um den für die Untersuchungen angestrebten Temperaturbereich nach oben zu erweitern, wurde nun das Anlagenkonzept sowohl auf FTIR-Emission-Messungen als auch auf FT-Raman-Spektroskopie erweitert.

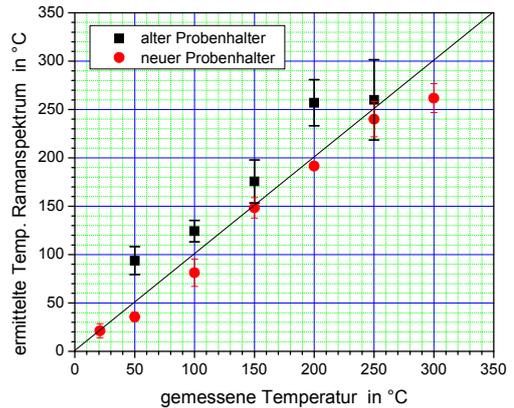
Die Probenpräparation für die Emissionsmessung gestaltete sich entgegen der ursprünglichen Erwartungen deutlich schwieriger. Um eine möglichst signifikante Feinstruktur in den Emissionsspektren zu erhalten, sollten die Proben idealerweise eine Dicke im Bereich der Eindringtiefe der emittierten Strahlung nicht überschreiten und vor einem möglichst nicht emittierenden Hintergrund angebracht sein. Die bisher besten Emissionsspektren konnten mit Hilfe eines Probenhalters aus SiC Keramik erreicht werden, bei dem die dem Spektrometer zugewandten Seite mit einer Goldschicht bedampft wurde. Auf diese Goldschicht wurden nun über eine alkoholische Suspension dünne Schichten diverser Pulver aufgebracht und während der Mikrowellenerwärmung bei verschiedenen Temperaturen IR Spektren aufgenommen. Die in der folgenden Abbildung gezeigten Spektren von Aragonit zeigen für dieses Mineral charakteristischen Emissionsbanden und deren Änderungen (Verschwinden der Bande bei 1075 cm^{-1} und Verschiebung der Banden im Bereich von $860\text{ bis }870\text{ cm}^{-1}$) die mit einer Phasenumwandlung von der orthorhombischen in die trigonale Form bei ca. 500°C einhergehen. Des Weiteren deutet sich wegen des Erscheinens der CO_2 Bande bei 670 cm^{-1} bereits bei 700°C die Zersetzung in CaO und CO_2 an.



Emissionsspektren von Aragonit bei verschiedenen Temperaturen.

Darüber hinaus wurden mit dem gleichen Spektrometer Ramanmessungen durchgeführt. Ziel hierbei ist, die Möglichkeit zu untersuchen, über eine geeignete Auswertung der Ramanspektren materialspezifische Temperaturen zu ermitteln. Dies könnte dazu benutzt werden, die selektive Mikrowellenerwärmung experimentell zu verifizieren. Eine Temperaturerfassung über das Intensitätsverhältnis der Anti-Stokes- und Stokes-Banden ist bisher nur mit dem vorhandenen Ramanmodul des FT Spektrometers möglich, da dieses über ein geeignetes Notchfilter zur Unterdrückung der Rayleighstreuung verfügt. Zusätzlich wurde ein Kantenfilter eingesetzt, um den mit zunehmender Temperatur wachsenden Anteil der Schwarzkörperstrahlung auf dem Detektor zu minimieren und somit den erfassbaren Temperaturbereich auf 300°C bis 400°C zu erweitern. Durch eine Optimierung der

Probenhalterung und eine geeignete spektrale Kalibrierung konnte die anfängliche Messungsgenauigkeit von teilweise bis zu $\pm 50^\circ\text{C}$ auf einen Wert unter 10°C reduziert werden.



Vergleich der aus Ramanspektrum berechneten mit den gemessenen Temperaturen.

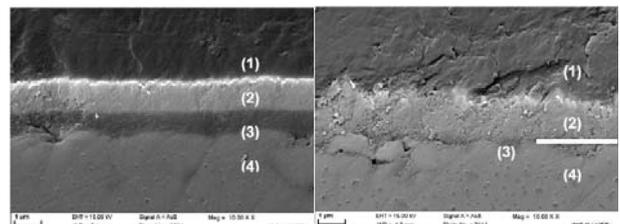
Mikrowellensintern von Keramik

Die Untersuchungen zum Einfluss der Feldrichtung auf die Porengeometrie während des Sintervorganges, als Nachweis nichtthermischer Mikrowelleneffekte, wurden fortgesetzt. In neuen Versuchen zum Sintern von elektroforetisch abgeschiedenen Proben aus Zirkondioxid in einem linear polarisierten Mikrowellenfeld wird aktuell das Ziel verfolgt, herauszufinden, ob und wenn ja inwieweit die bisher gewonnenen Ergebnisse eventuell durch die Richtung der Pulverabscheidung bei der Probenherstellung beeinflusst sind. Dazu laufen Sinterversuche mit unterschiedlichen Orientierungen der Proben bzw. horizontaler Polarisation des Mikrowellenfeldes. Die Auswertung dieser Sinterergebnisse ist noch nicht abgeschlossen.

Die Zusammenarbeit mit dem IMF III auf dem Gebiet des Millimeterwellensinterns von Dickschichten aus elektrisch steuerbaren, keramischen Dielektrika wurde weitergeführt. In weiteren Versuchen wurde der Einfluss unterschiedlicher Versuchsaufbauten auf die Temperaturverteilung in der Dickschicht, bzw. auf die Materialeigenschaften untersucht. Die Charakterisierung der Materialeigenschaften, welche die Grundlage für die weitere Versuchsplanung ist, konnte noch nicht abgeschlossen werden.

CVI Prozess Ergebnis EDX tiefaufgelöst

Mit der im letzten Jahr aufgebauten Mikrowellenunterstützten Anlage zur Gasphaseninfiltration wurden im IMF III im Rahmen der Diplomarbeit von Herrn Sascha Hacker erste Prozessstudien durchgeführt. Dazu wurden auf Aluminiumoxidsubstraten abgeschiedene SiO_2 -Aerogelschichten mit TiO_2 versucht zu infiltrieren. Der Vergleich mit einem entsprechenden Prozess in einem konventionell beheizten Ofen zeigt ein deutlich unterschiedliches Ergebnis, wie in folgender Abbildung zu erkennen ist.



CVI Proben aus konventionellem Prozess (links) und Mikrowellenprozess (rechts). (1) Einbettmasse, (2) infiltrierte Schicht, (3) nicht infiltriertes Aerogel, (4) Substrat.

Wie aus den Abbildungen zu erkennen ist, konnte die im Mikrowellenofen infiltrierte Probe nahezu vollständig infiltrierte werden, während die im konventionellen Ofen infiltrierte Probe deutlich einen nichinfiltrierten Bereich (3) der Aerogelschicht aufweist. Die wurde durch EDX Messungen bestätigt.

Beteiligte Mitarbeiter

G. Link, Fr. S. Miksch, K. Paulus, K.-T. Schäfer, M. Thamm, M. Thumm

Programm NUKLEAR: Nukleare Sicherheitsforschung

Materialspezifische Untersuchungen zur Wärmeabfuhr von thermisch hochbelasteten sicherheitsrelevanten Bauteilen für neue Reaktortechnologien

Zur Sicherstellung der zukünftigen Versorgungssicherheit mit Strom werden im Rahmen von GenIV neue Reaktortypen untersucht. Die Entwicklung von Technologien, die der Sicherheit schneller schwermetallgekühlter Reaktoren wie dem Lead Fast Reactor (LFR) dienen, sind der Schwerpunkt der Arbeiten im Forschungszentrums. Insbesondere die Entwicklung leistungsfähiger Materialien, wie z.B. ODS Stähle und die Untersuchung und Verbesserung von deren Verträglichkeit mit den Kühlmedien steht im Mittelpunkt der Arbeiten.

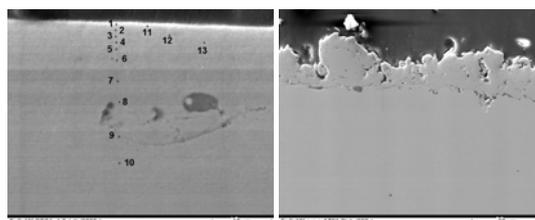
Ziel des IHM-Beitrages ist die Verbesserung der Materialverträglichkeit von neuartigen Strukturwerkstoffen in Kontakt mit flüssigem Pb bzw. PbBi durch die Entwicklung eines Korrosionsschutzes. Gepulste großflächige Elektronenstrahlen (GESA-Verfahren) werden eingesetzt, um die Oberflächen so zu modifizieren, dass sie den Anforderungen ihrer Einsatzumgebung genügen. Korrosionsteststände zur Auslagerung der Proben unter relevanten Bedingungen werden entwickelt und betrieben. Teststände, die kombinierte Belastungen wie Reibverschleiß (Fretting), Erosion und Korrosion ermöglichen, werden entwickelt, gebaut 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. ELSY, VELLA, GETMAT.

Die wichtigsten Ergebnisse im Berichtszeitraum werden kurz zusammengefasst dargestellt:

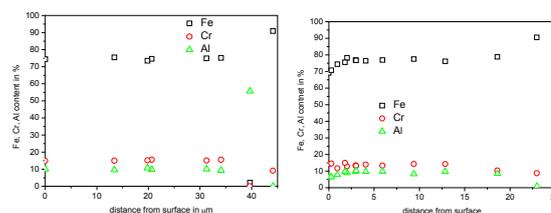
Im Rahmen von ELSY (Blei gekühlter schneller Reaktor zur Transmutation) wird die Entwicklung eines effektiven Korrosionsschutzes für Hüllrohre mittels GESA untersucht und es werden mögliche Materialien für Flüssigmetallpumpen hinsichtlich Korrosion und Erosion getestet. VELLA hat zum Ziel, die Zusammenarbeit 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 im Oktober 2007 und haben eine Laufzeit von 3 Jahre. Im Rahmen des GETMAT Projekts, das im 7. Rahmenprogramm angesiedelt ist und bei einer Laufzeit von 5 Jahren im Januar 2008 begann, werden Materialien für zukünftige Reaktorkonzepte, insbesondere ODS Stähle, untersucht.

Im vergangenen Jahr wurden im Rahmen des ELSY Projekts Hüllrohre aus T91 mit FeCrAlY beschichtet, mit der GESA umgeschmolzen und an ENEA geliefert zur Auslagerung in fließendem Blei bei 500°C.



REM- Aufnahmen von Querschliffen und Elementverteilung von beschichteten T91 Proben vor und nach der GESA-Behandlung.

Auslagerungsergebnisse, die im Rahmen des DEMETRA Projekts durchgeführt wurden, zeigten dass ein Mindestgehalt von 4 bis 5 gew. % Al in der Oberfläche notwendig ist, um bei Temperaturen < 500°C selektiv Al₂O₃ aufzuwachsen zu lassen. Umfangreiche Parameterstudien zur Optimierung der GESA-Behandlung zeigten, dass mit dem bisherigen Al-Gehalt der gespritzten Schicht von 7 gew. % nach dem Umschmelzen ein Mindestgehalt von 5 gew. % nicht garantiert werden kann. Deshalb wurde in einem ersten Schritt der Al-Gehalt der Schicht auf 10 gew. % erhöht. Nach dem Umschmelzen mit GESA weisen solche Schichten einen Mindestgehalt von 7 gew. % auf (Abbildung). T91 Hüllrohre mit einer solchen umgewandelten Oberflächenschicht werden im Rahmen des ELSY Projekt von ENEA untersucht.



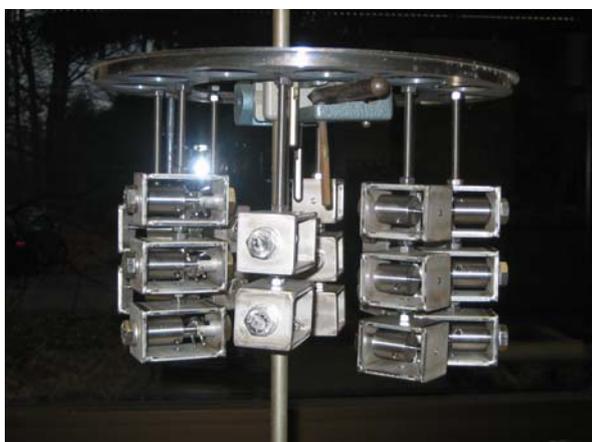
Projektübergreifend ist die Sauerstoffkontrolle für große Kreisläufe und zukünftige Reaktoren ein wichtiges Thema. Der Betrieb des CORRIDA Kreislaufes am Forschungszentrum offenbarte dass die Sauerstoffkontrolle, die an kleinen Systemen problemlos funktioniert, nicht 1:1 auf große Systeme übertragbar ist.



Photographie der Versuchskammer zur Bestimmung der Austauschrate von Sauerstoff zwischen Flüssigmetall und Gasphase.

Die Austauschprozesse basierend auf Gleichgewichtsreaktionen der Gasphase und der Metallschmelze scheinen für solche System mit großem Pb bzw. PbBi Inventar zu langsam zu sein. An CORRIDA wurden erste Untersuchungen mit Gasphasen, die eine höhere Aktivität als notwendig haben, durchgeführt. Es zeigte sich, dass auf diese Weise die notwendigen Austauschraten auch bei großen Flüssigmetallmengen erzielt werden können. Für eine detaillierte Untersuchung aller bei diesen Prozessen beteiligten Reaktionen wurden thermodynamische Berechnungen durchgeführt und ein Versuchstand aufgebaut (Abbildung). Damit soll im kommenden Jahr die Austauschrate in Abhängigkeit von der Aktivität, des Feuchtegehalts und anderer Parameter bestimmt werden.

Innerhalb des VELLA Projekts wurde ein gemeinsames Projekt mit SCK-CEN in Mol genehmigt und begonnen. Am IHM werden vorgespannte Zug und CT- Proben für ca. 3 Monate bei 480 °C in Pb mit einem Sauerstoffgehalt von 10^{-6} gew. % ausgelagert (nächste Abbildung). Anschließend werden diese Proben mechanisch bei ca. 200 °C in Mol nachuntersucht.



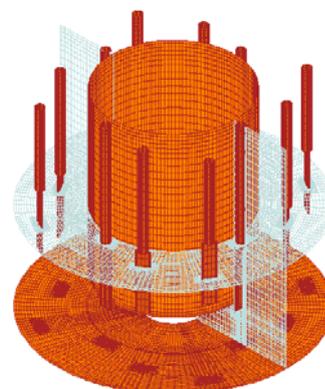
Vorgespannte Zug und DCT-Proben vor dem Einbau in den Flüssigmetallkorrosionsteststand.

Die Arbeiten zu GETMAT umfassen 3 Bereiche; Untersuchung von Schweißproben im Flüssigmetall, Schutzschichtentwicklung auf ODS und T92 Stählen, Abriebversuche (Fretting) an oberflächenmodifizierten Stählen. In diesem Jahr wurde mit einer Literaturstudie zum Reibverschleiß von Hüllrohren begonnen und basierend darauf ein Versuchstand konzipiert. Die Arbeiten zur Schutzschichtentwicklung sehen die Modifizierung von 4 unterschiedlich zusammengesetzten Beschichtungen vor. Die Beschichtungskampagne ist für Anfang nächstes Jahr geplant.

Erste Untersuchungen zur kombinierten Erosions-Korrosionbelastung wurden im neu-entwickelten Teststand CORELLA durchgeführt. Aus diesen getesteten Werkstoffen wurde SiSiC, ein martensitischer Stahlguss, ein Chromstahlguss und die Legierung Noriloy ausgewählt. Die Proben waren 1200h ausgelagert. Leider stellte sich am Ende des Versuchs heraus, dass die Magnetkupplung offensichtlich recht frühzeitig versagte. Umfangreiche konstruktive Änderungen wurden durchgeführt und erste Tests in Wasser zeigten eine signifikante Verbesserung. Tests mit der geänderten Apparatur werden im kommenden Jahr durchgeführt. Zur Simulation der Strömungsverhältnisse und zur Vorhersage der realen Relativgeschwindigkeiten von Blei und Probe je nach Lage wird seit einem Jahr das Multiphysics Tool Fluidyn eingesetzt.

In diesem Jahr wurde der Prüfstand in 3D diskretisiert (folgende Abbildung) und der Strömungsverlauf mit Proben simuliert. Anfänglich wurde angenommen, dass nur ein 90°-Segment des Prüfstands für die Simulation der Strömungen

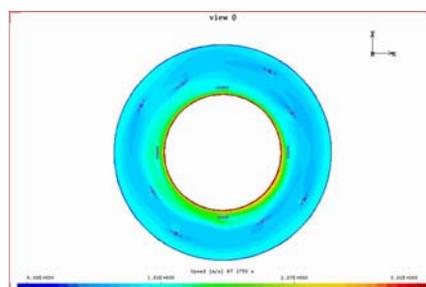
im gesamten Raum ausreicht. Dies war jedoch nicht der Fall, da das Medium Pb eine sehr hohe Dichte besitzt. Daher musste trotz rotations-symmetrischer Anordnung der gesamte Ringspalt über 360° nachgebildet werden. Die Abbildung zeigt die Einteilung der für das Postprocessing zugrunde gelegten Schnittebenen, um das Geschehen im Prüfstand repräsentativ sichtbar zu machen.



Diskretisiertes 3D Modell des Versuchstandes.

Es wurden die v , Δp -Verteilungen im Zylinderspalt untersucht. Man konnte auch klären, inwieweit die Einbauten und die kreisförmige Innenzylinderkante (Mantel/ basale Scheibe) zur Generierung von Sekundärströmungen führten.

Die letzte Abbildung zeigt die 2D-Verläufe von Δp , v im Ringspalt des Erosionsprüfstands bei hinreichender numerischen Diskretisierung für den stationären Fall mit einer konstanten Drehzahl von 1000 min^{-1} . Die Profile selbst wurden in Freiräumen entlang des Zylinderspalts zwischen den Proben in der mittleren Schnittebene gelegt (nicht durch die Proben).



Geschwindigkeitsverteilung in einer Schnittebene in Höhe der Probe (links) (Schnitt jeweils nach $\tau = 1750 \text{ s}$).

Wird die Geschwindigkeit über dem Radius aufgetragen wird ein sehr steiler Abfall im Innenzylinder erkennbar. Ob die aus numerischer Steifigkeit, anderen simulationsbedingten Problemen oder realen physikalischen Hintergrund hat wird im kommenden Jahr intensiv untersucht.

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 Spallati-

onstarget und als Kühlmittel solcher Anlagen sind unter anderen Blei und Blei-Wismuth vorgesehen.

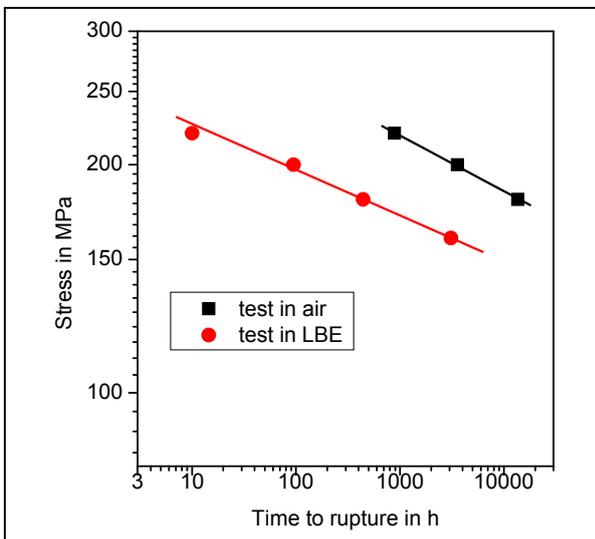
Ziel des Institutsbeitrages ist die Entwicklung eines Korrosionsschutzes insbesondere für hochbelastete Komponenten wie Hüllrohre und Pumpenmaterialien im Kontakt mit flüssigem Blei und Blei-Wismuth. Gepulste großflächige Elektronenstrahlen (GESA-Verfahren) werden eingesetzt, um die Oberflächen so zu modifizieren, dass sie den Anforderungen ihrer Einsatzumgebung genügen. Korrosionsteststände zur Auslagerung der Proben unter relevanten Bedingungen werden entwickelt und betrieben. Teststände die kombinierte Belastungen wie Erosion und Korrosion ermöglichen werden entwickelt gebaut 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. DEMETRA, MEXT (JAEA), ISTC.

Die wichtigsten Ergebnisse im Berichtszeitraum werden kurz zusammengefasst dargestellt:

Für DEMETRA einem Teilprojekt in EUROTRANS wird die Optimierung des GESA Verfahrens insbesondere die Weiterentwicklung hin zu einer vor-industriellen Anlage untersucht. Ein wichtiger Aspekt der Arbeiten zur Oberflächenmodifizierung ist neben der Verbesserung der Kompatibilität solcher modifizierter Stähle deren mechanisches Verhalten im Flüssigmetall.

Das Ziel des MEXT Projektes ist die Optimierung von ODS Stählen für Ihren Einsatz in Flüssigmetallen durch gezielte Variation ihrer Zusammensetzung. Die Beiträge des Instituts sind die Auslagerung der Proben in COSTA und deren Nachuntersuchungen.



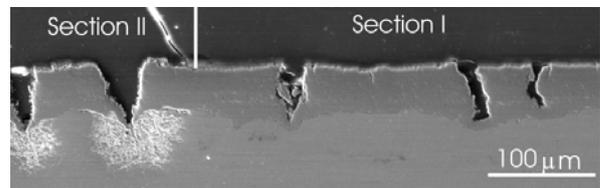
Zeitstanddiagramm von T91 getestet in PbBi und Luft.

In Zusammenarbeit mit Prometey St. Petersburg wurde das Kriechverhalten bei hohen Spannungen (creep to rupture) von T91 bei 550°C in PbBi und Luft untersucht. Die ermittelten Zeitstandfestigkeiten in Luft entsprechen den Werten, die aus der Literatur bekannt sind. In PbBi ist T91 bei allen gemessenen Spannungen (140 bis 220MPa) deutlich früher gebrochen (Abbildung). Bei 220 MPa bricht die Probe in Luft nach über 885h in PbBi bereits nach 10h. Aber nicht nur die Zeitstandfestigkeit wird durch das Flüssigmetall deutlich reduziert auch die stationäre Kriechrate (2nd creep rate) ist in PbBi signifikant höher (Tabelle).

Spannung [MPa]	Verhältnis der stationären Kriechrate, PbBi/Luft
140	27
160	35
180	44
200	53

Kriechverhalten von T91 Stahl bei 550° C.

Deutlich ist am Verhältnis der Kriechraten im PbBi und Luft der Einfluss der Spannung zu erkennen. Bei 200 MPa ist die Kriechrate in PbBi 53 fach höher bei 140 MPa sind es nur noch 27 mal. Das bedeutet dass zu den üblichen Kriechmechanismen wie Versetzungs- und Krongrenzgleiten, Erzeugung und Bewegung von Fehlstellen, etc. Oberflächeneffekte hinzukommen. PbBi reduziert bei direktem Kontakt mit dem Stahl dessen Oberflächenenergie und schwächt damit die Struktur des Materials (Rebinder-Effekt). Damit das Flüssigmetall bei den experimentellen Bedingungen in Kontakt kommen kann muss die gewachsene Oxidschicht reißen (nächste Abbildung).

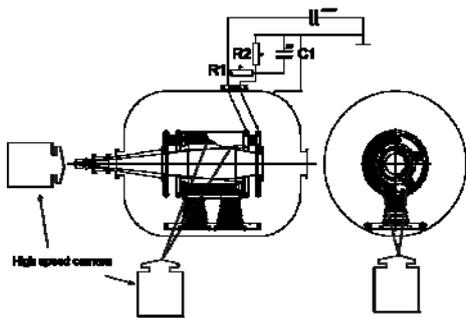


Querschliff einer T91 Probe nach Kriechversuch in flüssigem PbBi.

In Sektion II (Einschnürungszone) der obigen Abbildung ist das Eindringen von PbBi im Bereich der Risspitzen zu erkennen, wohingegen die Risspitzen im Bereich niedrigerer Dehnungen (Sektion I) wieder oxidiert sind. Es ist, auch aufgrund des mit sinkender Belastung abnehmenden Einflusses des Flüssigmetalls damit zu rechnen, dass es eine untere Spannung gibt ab der dieser Einfluss gegen Null geht. Ebenso sollte das Aufwachsen von dünneren, flexibleren Schutzschichten, wie z.B. nach dem Oberflächenlegieren von Al mittels GESA, die Kriechfestigkeit in PbBi verbessern. Diese Untersuchungen werden im kommenden Jahr durchgeführt.

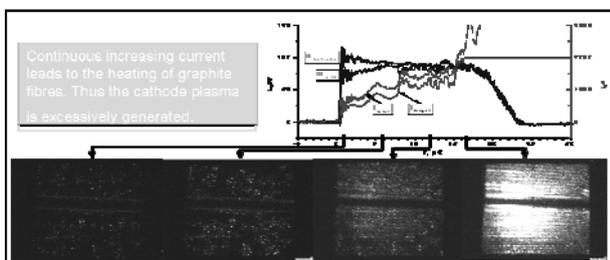
Im Rahmen des MEXT Projektes werden 2 neue ODS Legierungen bei 3 unterschiedlichen Temperaturen ausgelagert. Der Einfluss von Hf und Zr auf die Schutzschichtbildung dieser ODS Stähle ist Gegenstand der Untersuchungen. Beide Stähle zeigten nach 3000h in 700°C heißem PbBi keinen Lösungsangriff, sie waren durch eine dünne Al₂O₃-Schicht geschützt. Der Einfluss der Korngröße auf die Oxidation wird durch den Vergleich ausgelagerter ODS Rohre mit großen Körnern und ODS Stäben mit kleinerer Korngröße untersucht. Auch diese Proben wurden und werden ausgelagert und nachuntersucht.

Die Optimierung des GESA Verfahrens insbesondere die Weiterentwicklung der „zylindrischen“ GESA 4 war ein vorrangiges Ziel der Arbeiten im Bereich Diagnostik in diesem Jahr. Mit einer Hochgeschwindigkeitskamera wurde das Zündverhalten der Kathode und die nachfolgenden Ausbreitungsprozesse untersucht. Im Messaufbau (Abbildung) sind die beiden Positionen der Kamera skizziert. Für die Frontalaufnahmen wurde die Hälfte der Kathode ausgebaut, Aufnahmen von der Seite wurden mit vollbestückter Kathode gemacht.



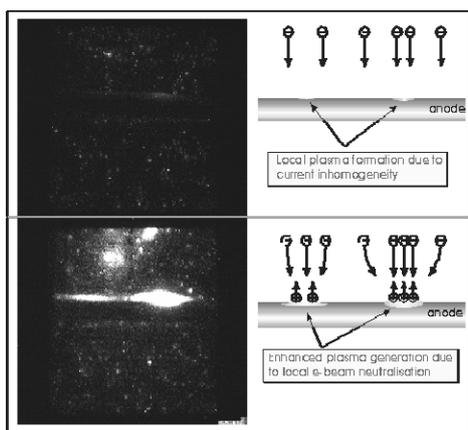
Schema des GESA IV-Aufbaus mit Hochgeschwindigkeitskameras.

Die gleichmäßige Zündung der Kathode, die Erhöhung des Stromes bis hin zum frühzeitigen Abbruch der Entladung aufgrund sehr intensiver Plasmabildung sind in der folgenden Abbildung gut zu erkennen. Diese intensive Plasmabildung aufgrund des zunehmenden Stromes durch die Kohlefaserbündel ist eine der Ursachen für Kurzschlüsse und damit das frühzeitige Ende der Pulsdauer.



Kurzzeitphotografie und gemessene elektrische Signale.

Die intensive Plasmabildung kann durch Veränderung des Verhältnisses von Gitter zu Kathodenspannung beeinflusst werden. Eine weitere Ursache für zu kurze Pulse ist die Entstehung von Plasma an der Targetoberfläche (nächste Abbildung). Selbstverstärkende Strominhomogenitäten und Adsorbate bzw. Verunreinigungen sind dafür ursächlich. Eine Reduzierung des Druckes in der Vakuumkammer und das Abreinigen der Oberfläche mit energetisch schwachen Vorpulsen werden als Möglichkeiten in Betracht gezogen, die Plasmabildung am Target zu verringern.



Plasmaentstehung an der Targetoberfläche.

Eine neue Kathode, die eine bessere Stromkontrolle bei geringerer Strahldivergenz ermöglichen soll, wurde zusammen mit dem Efremov Institut in St. Petersburg entwickelt, dort gebaut und an das IHM ausgeliefert. Ihr Einbau und Inbetriebnahme wird zu Beginn des Jahre 2009 erfolgen.

Beteiligte Mitarbeiter:

Fr. Dr. A. Heinzel, Dr. A. Jianu, DI M. Kieser, **Dr. G. Müller**, Dr. G. Schuhmacher (Gastwissenschaftler), Dr. H. Muscher, A. Sivkovich, **Dr. A. Weisenburger**, DI (FH) F. Zimmermann

Programm UMWELT: Nachhaltigkeit und Technik

Verbesserung der Eigenschaften von Werkstoffoberflächen mit GESA

Im Rahmen einer Projektarbeit für ein BA-Studium wurde ein automatisierter 2D-Manipulator entwickelt und gebaut (nächste Abbildung). Er dient der Positionierung von Proben in der Versuchskammer der GESA I mithilfe eines 2D-Achsensystems (eine Linearachse, eine Rundachse). Die Verfahrstrecke der Linearachse beträgt 405,7mm. Der Antrieb der einzelnen Achsen erfolgt durch 5-Phasen-Schrittmotoren. Die zugehörigen Motorverstärker sind am Tisch des 2D-Manipulators angebaut. Um Potentialschwankungen zwischen Motoren und Verstärker zu verhindern, sind diese elektrisch so miteinander verknüpft, dass Potentialschwankungen ausgeglichen werden. Die Verstärker sind über Lichtwellenleiter mit einer CNC-Steuerung in der Messkabine der GESA verbunden. Die CNC-Steuerung ist über einen Computer einstell- und programmierbar.

Die Schrittmotoren können, solange keine Spannung anliegt, von Hand positioniert werden. Liegt Spannung an, sollten die Motoren nicht von Hand bewegt werden, um Schäden zu vermeiden. Zur Bewegung der Achsen kann das CNC-Programm benutzt werden oder eine Handsteuerung, die an die Verstärker der Motoren angeschlossen werden kann.

Die Linearachse ist mit Endschaltern versehen, sodass der Schlitten im Falle einer Fehlbedienung oder einer Störung ca. 10 mm vor dem Anschlag zum Stehen kommt.

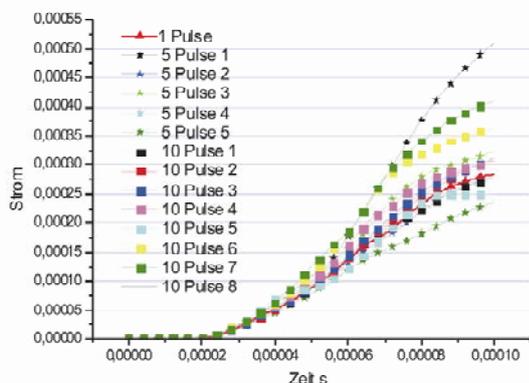


Photografie des 2D-Manipulators für Proben in GESA 1.

Erste Versuche zum Umschmelzverhalten von Hartmagneten wurden unternommen. Ziel der Arbeiten ist es, die wegen des

geringen Widerstands gegenüber Korrosion an Luft notwendige Beschichtung solcher Magnete durch Oberflächenlegierung zu optimieren. Aufgrund der noch geringen Zahl von Umschmelzversuchen mit GESA kann das Potential der Arbeiten noch nicht abgeschätzt werden.

Die Targetstromstärke und deren Verlauf während eines Pulses sind starken Schwankungen von Experiment zu Experiment unterworfen. Die Dauer zwischen den Pulsen ist dabei ein wichtiger Parameter. Lange Pausen (> einige Minuten) resultieren immer in relativ stromstarken Entladungen. Eine Reduzierung des Abstandes zwischen den Pulsen reduziert den Entladestrom. Ob Temperatureffekte oder Adsorbate an den Kohlefaserbüscheln oder andere Effekte dafür verantwortlich sind, kann noch nicht exakt gesagt werden. Im Rahmen dieser Betrachtungen wurde noch mal untersucht, ob nur die maximal deponierte Energie eines Pulses oder auch die Anzahl der Pulse einen Einfluss auf die Umschmelztiefe hat. Dazu wurde ein VA-Blech mit 1, 5 und 10 Pulsen behandelt. Zum besseren Vergleich wurde der Targetstrom der Pulse über der Zeit integriert (Abbildung).



Integrierter Targetstrom auf VA-Blech als Funktion der Zeit.

Deutlich ist die Schwankung des Energieeintrages von Puls zu Puls bis zu einem Faktor 2 zu sehen. Die Auswertung der Schlibfbilder zeigt eine Umschmelztiefe von 14 μm bei einem Puls, 28 μm bei fünf Pulsen und 23 μm bei zehn Pulsen. Die Umschmelztiefen korrelieren deutlich mit den integrierten Targetströmen. Der höchste Targetstrom wurde im Experiment mit 5 Pulsen gemessen. Damit ist deutlich belegt dass die Anzahl von Pulsen keinen Einfluss auf die Umschmelztiefe hat.

Zur Untersuchung des Zündverhaltens von Kohlefaserbüschelkathoden, wie sie in den GESA - Anlagen verwendet werden, wurde ein Einzelfaserbüschelexperiment aufgebaut (Abbildung). Die Beschaltung der Kohlefaser entspricht der der GESA IV, wobei die Anode in der Messanordnung die Aufgabe des Gitters übernimmt. Durch Veränderung von R_a und R_g lässt sich das Potential an der Kohlefaser variieren. Die Plasmaentstehung wird mittels Kurzzeitphotografie entlang der Faserachse gemessen.

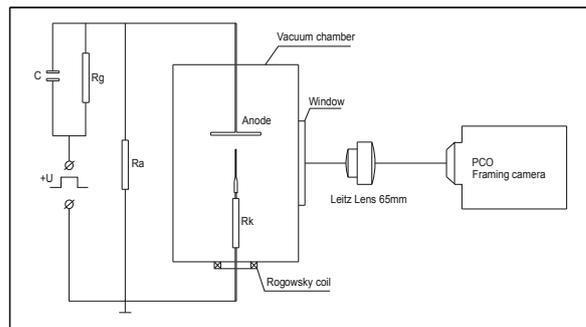
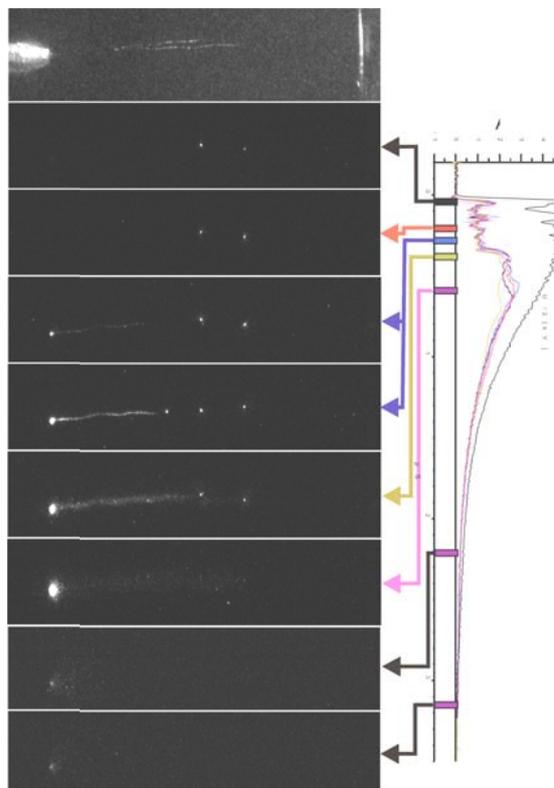


Fig1 Messanordnung für die Untersuchung der Emissionsverhalten von Kohlenstofffaser. $C=50\text{nF}$; $R_g=626$; $R_k=2.3\text{k}$; $R_a=12.1, 23, 42.8$. PCO-Frames 20-40ns. Abstand zwischen Faserspitze und Anode 5-15mm.

Messaufbau für Einzelfaser – und büschelexperimente.

Die einzelnen Kohlefasern haben einen Durchmesser von 7 μm bei einer Länge von ca. 20 mm. Ein Faserbüschel, wie es auch in der GESA eingebaut ist, besteht aus einigen hundert Einzelfasern. In der ersten Phase der Entladung bei zwei einzelnen Kohlefasern ist das Leuchten einzelner Kohlefaser-spitzen zu sehen (nächste Abbildung). Durch die Zunahme des Stromes beginnt die Faser um diese Punkte herum zu leuchten. Gleichzeitig bildet sich am Fußpunkt, wo die abgeschnittenen Fasern herausragen ein intensiver Lichtpunkt der während der gesamten Entladung leuchtet. Abschätzungen zeigen, dass die Temperaturen die erreicht werden ausreichen, um die gesamte Kohlefaser auf Sublimationstemperatur anzuheben. Eine punktuelle Emission an der Faserspitze über die Gesamtdauer der Entladung ist höchst wahrscheinlich ausgeschlossen.



Framingaufnahmen mit 40ns Belichtungszeit. Oben – ein Referenzbild von Kohlenstofffasern, Messinghülse (links) und Anodenplatte (rechts)

Elektroporationsunterstützte Trocknung von Grünpflanzen

Im letztjährigen Jahresbericht wurde über Versuche zur elektroporationsunterstützten Trocknung von Grünpflanzen im Labormaßstab berichtet. Es konnte gezeigt werden, dass sich die Abpressbarkeit von Wasser aus dem Zellgewebe nach der Elektroporation signifikant gegenüber der Abpressung von unbehandeltem Gewebe verbessert. Der Zellsaft tritt durch die irreversibel gebildeten Poren in der Zellmembran leichter aus. Darüber hinaus beschleunigen die Poren den Trocknungsprozess im Umluftofen auch aufgrund eines verbesserten Diffusionsverhaltens.

Um die vielversprechenden Ergebnisse der Laborversuche im größeren Maßstab zu bestätigen, wurde in diesem Jahr die Elektroporationsanlage KEA-MOBIL (Abbildung) für die Elektroporation im pflanzeigenen Saft umgerüstet. Wie die Laborversuche zeigten kann bei diesem Verfahren auf die Zugabe von Suspensionswasser verzichtet werden, denn der abgepresste Pflanzensaft garantiert einen guten elektrischen Kontakt zwischen den Elektroden und dem Pflanzenmaterial. Für die Vorentsaffung des Pflanzenmaterials wurde eine elektrisch isolierte Stempelpresse entworfen und aufgebaut, die das vorhandene Versuchsgefäß mit 2,5 kg Nutzinhalt aufnimmt. Die Pulsapplikation erfolgt unter mechanischem Druck. Dabei dienen der Pressstempel und der Gefäßboden als Elektroden. Um den Produktdurchsatz zu erhöhen, wurde die Anlage mit einer automatischen Wechselvorrichtung ausgestattet, die zwei Versuchsgefäße abwechselnd in die Presse einsetzt und zur manuellen Befüllung und Entleerung bereitstellt. Während bei den Laborversuchen die manuelle Vorpressung und Handhabung des Versuchsgefäßes ca. 30 Minuten benötigte, dauert eine automatisierte Behandlung eines Gefäßinhalts weniger als drei Minuten.

In einer Versuchskampagne im Rahmen des BIOLOG-Projekts auf einem Versuchshof behandelte die Anlage erfolgreich ca. 80 kg Grünroggen und ca. 54 kg Klee gras. Dabei konnte der Trockensubstanzgehalt von 39 % beim frischen Grünroggen und 34 % beim frischen Klee gras nach Elektroporation und Abpressung auf 44 % beim Grünroggen und 50 % beim Klee gras erhöht werden.



KEA-MOBIL: Wechselvorrichtung und Presse mit Versuchsgefäßen.

Elektroporation von Weinmaische

Nach den letztjährigen Umbauarbeiten kam die Anlage KEA-WEIN (Abbildung) dieses Jahr bei zwei Versuchskampagnen erfolgreich zum Einsatz. Auf dem Weingut „DOMAINE DE LA COLOMBETTE“ bei Béziers in Südfrankreich wurden mehr als 3 m³ Maische der Sorten Pinot Noir, Chardonnay und Alicante behandelt. Es schlossen sich Versuche im Winzerkeller Breisach an, bei denen neben kleineren Chargen für Parameterstudien Maischen der Sorten Spätburgunder, Riesling und Muskateller für den Ausbau zu insgesamt 600 l Wein verarbeitet wurden, alles zusammen mehr als 2 m³ Maische.

Im Zuge der diesjährigen Versuchsvorbereitungen wurde die Prozesssteuerung der Anlage KEA-WEIN um Regelungen für den Maischedruck und den Druck des Schaltergases im Funkenstreckenturm sowie eine Zündspannungsmessung erweitert. Darüber hinaus wurde die Anlage mit verschiedenen Messgeräten zur Prozessüberwachung sowie einem automatischen Maischeentlüftungsventil ergänzt. Das Maischeentlüftungsventil ermöglichte erstmals einen Betrieb fast ohne elektrische Durchschläge im Zellaufschlussreaktor.

Die Versuche wurden auch in diesem Jahr vom Staatlichen Weinbauinstitut Freiburg mit chemischen und sensorischen Analysen der Moste und Weine begleitet. Außerdem führt das Weinbauinstitut Versuchsbauten von Proben der behandelten Maischen durch.



Maischeelektroporationsanlage KEA-WEIN im Winzerkeller Breisach.

Elektroporation von Zuckerrüben

Im Rahmen der Kooperation mit SÜDZUCKER wurden auch in diesem Jahr die Entwicklungsarbeiten für eine industrielle Anlage zur Elektroporation von Zuckerrüben fortgeführt.

Verfahren der Hochleistungsimpulstechnik zur Gewinnung von Lipiden aus Mikroalgen.

Die drastische Abnahme der weltweiten Rohölreserven in den kommenden 50 Jahren ist eine starke Motivation für die Suche nach alternativen Quellen zur Gewinnung flüssiger Kraftstoffe und zur Rohstoffsicherung der chemischen Industrie. Schon seit den 80er Jahren des letzten Jahrhunderts werden zu diesem Zweck Mikroalgen untersucht, die zur Entschärfung der Mineralölverknappung beitragen können. Viele Algen besitzen die Fähigkeit mit Hilfe der Photosynthese Lipide aufzubauen, mit deren Hilfe auch Kraftstoffe erzeugt werden könnten. Die Möglichkeit der Bindung von CO₂ aus der Atmosphäre mit Hilfe solcher Mikroalgen regte die Phantasie angesichts der jüngsten Klimadiskussionen zusätzlich an.

Auswahl und Anzucht relevanter Algenspezies

Weltweit sind derzeit ca. 80000 Algenspezies bekannt und ihre Gesamtzahl wird auf 400000 geschätzt. Aus diesem Pool wurden, gestützt durch Recherchen und eigene Anzuchtexperimente, verschiedene Algenspezies für Aufschlussexperimente ausgewählt. Der Schwerpunkt lag zunächst auf Grünalgen, die ein beträchtliches Lipidinventar aufbauen können.

Von der Grünalge *Botryococcus braunii* wird beispielsweise behauptet, sie sei in der Lage, bis zu 80% ihrer Trockenmasse in Form von Lipiden auszubilden. Da diese Algenspezies jedoch einen vergleichsweise langen Generationszyklus von mehreren Tagen bis zu einer Woche aufweist, ist sie sowohl für Laboruntersuchungen, als auch für eine großtechnische Umsetzung nicht geeignet. Nach einer Reihe von Anzuchtexperimenten erwies sich die Grünalge *Auxenochlorella protothecoides* als geeigneter Organismus. Diese hat eine kurze Generationszeit von nur 4 – 5 Stunden. Bei Verwendung eines geeigneten Nährmediums bzw. einer geeigneten Prozessführung baut diese Mikroalge ebenfalls Lipidinventar auf.

Informationen aus der Literatur über Nährmedien für Algen sind spärlich, großteils widersprüchlich und meist nur auf einen Erhalt der betreffenden Spezies ausgelegt. Sie entsprechen deshalb nicht unseren Anforderungen nach schnellem Wachstum und verstärkter Lipidbildung. Es mussten deshalb umfangreiche Kultivierungsversuche und Nährmedienvariationen unternommen werden. In einem weiteren Schritt sollen Diatomeen (Kieselalgen) untersucht werden. Diese besitzen einen anderen strukturellen Aufbau als Grünalgen und sind hinsichtlich potentieller Lipidbildung sehr interessant. Diatomeen haben anstatt eines Zellulosegerüsts, wie bei Grünalgen, eine Zellwand aus SiO_2 . Von dieser Zellwand wird erwartet, dass sie sehr einfach durch eine Schockwellenbehandlung mittels gepulster Unterwasser Entladungen aufgeschlossen werden kann.

Lipiddiagnostik

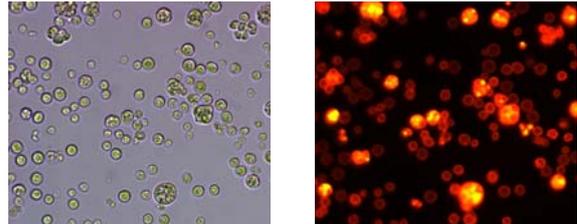
Ziel aller Untersuchungen zum Algenaufschluss mit Hilfe der Methoden der Hochleistungsimpulstechnik ist die Freisetzung der im Innern der Algenzellen gespeicherten Lipidvorräte. Vor einem Experiment muss zunächst der Lipidstatus bekannt sein. Sind ausreichend Lipide in den Algenzellen vorhanden, werden diese behandelt und im Anschluss daran auf die Freisetzung von Lipiden untersucht. Zur Bewertung der Zuchtergebnisse und des Behandlungserfolges war deshalb der Aufbau einer geeigneten Lipiddiagnostik erforderlich. In diesem Zusammenhang bot sich die Verwendung der Fluoreszenzmikroskopie an.

Mit der Auswahl des Fluoreszenzfarbstoffes Nile Red stand ein spezifischer Marker zur Verfügung. Dieser koppelt an neutrale Lipide in der Algenzelle, den sog. Triacylglyceriden, und färbt diese. Nach Anregung im blauen Spektralbereich strahlt Nile Red ein kräftiges orangefarbenes Fluoreszenzlicht aus, siehe Abbildung. Aufgrund des kräftigen Leuchtens des Fluoreszenzfarbstoffes sind die Konturen der Lipidtröpfchen nicht exakt erkennbar, was eine genaue Bestimmung des Lipidgehaltes nicht ermöglicht. Damit ist bisher jedoch eine ausreichende qualitative Bestimmung des Lipidinventars der Algenzellen möglich.

In weiteren Arbeiten soll der exakte Lipidgehalt von Mikroalgen bestimmt werden, um experimentelle Ergebnisse quantitativ belegen zu können. Zu diesem Zweck soll eine Soxhlet-Apparatur am IHM etabliert werden, in der mit Hilfe bestimmter fettlösender Chemikalien die Bestimmung des absoluten Lipidgehalts in der Trockenmasse der Algen mit gravimetrischen Methoden möglich sein wird.

Experimentelle Ansätze für den Aufschluss von Mikroalgen

Um die Lipide aus dem Innern der Algenzellen frei zu setzen, sind zwei Barrieren, die Zellmembran und die darüber liegende Zellwand, zu überwinden. Wie aus anderen Anwendungen bekannt ist, kann die Zellmembran mit hohen gepulsten elektrischen Feldern sehr effektiv aufgeschlossen werden. Erste Voruntersuchungen lassen bereits jetzt vermuten, dass die Zellwand ein merkliches Hindernis für den diffusiven Lipidtransport darstellt. In kommenden Versuchen ist daher geplant, mit verfeinerter Lipid-Diagnostik den Einfluss einer Schockwellenexposition auf den Lipidtransport durch die Zellwand und den Aufschluss der Plasmamembran durch gepulste elektrische Felder detailliert zu untersuchen.



Aufnahmen eines identischen Ausschnitts einer Suspension der Grünalge *Auxenochlorella protothecoides*, gefärbt mit dem Fluoreszenzfarbstoff Nile Red, links im Durchlicht und rechts als Fluoreszenzaufnahme. Im Fluoreszenzlicht werden die markierten Lipide im Innern der Algenzelle, sowie die Phospholipidmembran der Algenzellen in hellem Orange sichtbar.

Verfahren der Hochleistungsimpulstechnik zur Regenerierung von Abwässern

Die Behandlung biologischer Zellen mit starken gepulsten elektrischen Feldern führt zur irreversiblen Bildung großer Poren in der Zellmembran. Dieser in der Literatur mit Elektroporation bezeichnete Vorgang kann einerseits zur effektiven Gewinnung von Zellinhaltsstoffen, 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 von Inhaltsstoffen biologischer Zellen für die Nahrungsmittelindustrie sowie die pharmazeutische und chemische Industrie. Daneben soll die elektroporationsunterstützte mechanische Entwässerung und Trocknung von Energiepflanzen für eine weitere energetische Verwertung untersucht werden. Voraussetzung für die industrielle Nutzung der Elektroporation ist die Verfügbarkeit zuverlässiger und wirtschaftlicher Hochspannungsimpulsgeneratoren.

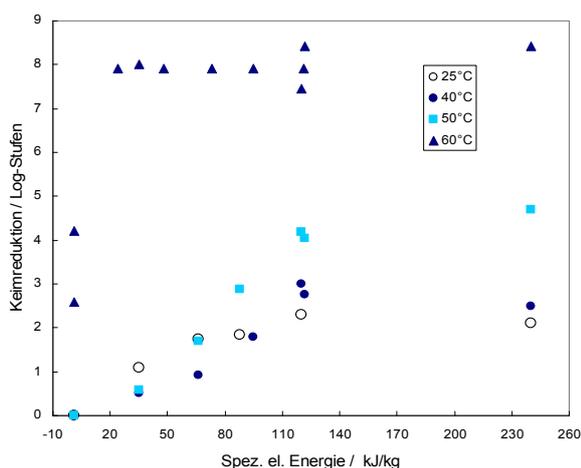
Entkeimung mikrobiell hochbelasteter Abwässer mittels gepulster elektrischer Felder

Die Dekontamination hoch belasteter Abwässer aus Kliniken und Krankenhäusern mittels herkömmlich angewandter Methoden, wie Chlorung oder Ozonisation, ist wegen der Bildung toxischer Nebenprodukte nicht möglich. Der Einsatz von UV-Strahlung zur Entkeimung ist wegen der starken Trübung von Abwasser eingeschränkt. Die Entkeimung mittels gepulster elektrischer Felder ist eine alternative Methode zur nachhaltigen Entkeimung von Klinikabwässern, die vermehrt mit Antibiotika resistenten und human pathogenen Keimen belastet sind. Im Laufe eines 3-jährigen BMBF-geförderten Verbundprojekts, unter Beteiligung des Forschungszentrums (IHM, ITC-WGT), der Universitätsklinik Mainz und eines mittelständischen Anlagebauers wurde ein Großteil der Ziele zum nachhaltigen Schutz von Wasserressourcen bereits erreicht.

Nach der Optimierung der elektrischen Parameter im Labormaßstab, konnte eine Reduktion Gram-negativer Bakterien mittels Elektroimpulsbehandlung von 3-4 log Stufen gewährleistet werden. Diese Entkeimungsraten konnten vor Ort in Untersuchungen mit der Pilotanlage, die im Durchflussverfahren arbeitet, mit Abwässern der Universitätsklinik Mainz bestätigt werden. Diese Inaktivierungen sind jedoch nur mit elektrischen Energieeinträgen im Bereich von 80-120 kJ/kg möglich. Im Gegensatz zu den Laborversuchen führt der schnelle Energieeintrag von 120 kJ/kg an der Pilotanlage zu einer Erwärmung des Abwassers um etwa 28°C während des Durchlaufs durch den Reaktor. Die Erwärmung entsteht aufgrund der hohen Repetitionsrate $f_R = 10$ Hz der Feldimpulse und des geringen Wärmeabflusses über die Elektroden. Es wurde eine Steigerung der Keimabtötungsrate festgestellt. Der synergetische Effekt einer kombinatorischen Behandlung, bestehend aus Erwärmung und Elektroporation, ist zwar bekannt, jedoch nicht der Wirkungsanteil thermisch bzw. elektrisch eingebrachter Energie. Die Klärung der Wirkungskinetik der kombinatorischen Behandlung öffnet weitere Optimierungs- und Energie-Einsparmöglichkeiten für die Elektroimpulsbehandlung. Für diesen Zweck wurden mehrere Versuchsreihen geplant und im Labormaßstab durchgeführt.

Unter Verwendung kommerzieller Elektroporations-Küvetten mit einem geringen Volumen (400 µL) und einer leistungsfähigen Küvettemperierung wurden Untersuchungen zur Keimreduktion bei konstant gehaltener Medientemperatur im Bereich von 20°C bis 60°C durchgeführt. Dieser Versuchskreis ermöglicht die getrennte Betrachtung der Wirkung thermisch und elektrisch eingebrachter Energie. Höhere Behandlungstemperaturen als 60°C wurden nicht in Betracht gezogen, weil dann die Nukleaseaktivität zum natürlichen Abbau freier DNA im Abwasser verloren geht.

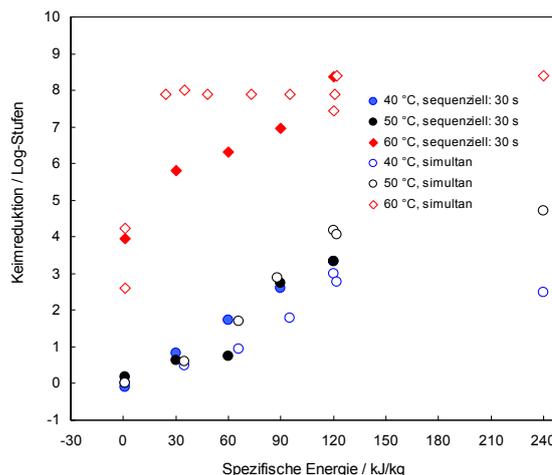
In der ersten Versuchsreihe wurde die Wirkung einer simultanen Behandlung mit Wärme und Elektroimpulsen auf Gram-positive Bakterien untersucht. Hierfür wurde der Laborstamm *Enterococcus faecium* (BRE; Stamm 211, Mainz) ausgewählt, der als Gram-positives, pathogenes Bakterium im Klinikabwasser vorkommt.



Inaktivierungseffizienz der Elektroimpulsbehandlung von E. faecium (log Skalierung) bei unterschiedlichen Suspensionstemperaturen in Abhängigkeit vom elektrischen Energieeintrag.

Mit der Auswertung der Ergebnisse konnte gezeigt werden, dass die Inaktivierungsrate von *E. faecium* unterhalb von 40°C nur von der elektrisch eingetragenen Energie (Abbildung) abhängt. Die Elektroimpulsbehandlung bei 50°C führt dagegen zu einer erhöhten Inaktivierungsrate, obwohl die letale Wirkung von Wärme bei *E. faecium* bei 56°C einsetzt.

Der Synergieeffekt einer simultanen Behandlung mit Wärme und elektrischen Impulsen wird oberhalb dieser Temperatur deutlicher. Die Erwärmung auf 60°C für 4 Minuten und eine simultane Elektroimpulsbehandlung führt zu einer vollständigen Inaktivierung schon bei einem spezifischen Energieeintrag von 30 kJ/kg. Bei der simultanen Behandlung tritt eine Erhöhung der Leitfähigkeit des Mediums mit steigender Temperatur was bei Kettenleitergeneratoren eine Lastanpassung erfordert. Dieser zusätzliche Aufwand könnte bei einer sequenziellen Behandlung, zuerst elektrisch und anschließend thermisch vermieden werden. Dabei wird das Medium erst nach der Elektroimpulsbehandlung auf die erforderliche Behandlungstemperatur erwärmt. Die Leitfähigkeit während der Elektroimpulsbehandlung bleibt dadurch vergleichsweise gering.



Vergleich der Inaktivierungseffizienz bei einer gleichzeitigen Behandlung von E. faecium mit Wärme und gepulsten elektrischen Feldern (simultan) und bei einer Wärmebehandlung 30 s nach einer Elektroimpulsbehandlung bei 20°C (sequenziell).

Um die Inaktivierungseffizienz der sequenziellen Behandlung zu untersuchen, wurde eine zweite Versuchsreihe durchgeführt. Für diese Untersuchungen wurde derselbe Bakterienstamm, *E. faecium*, verwendet. Das Temperaturprofil während der thermischen Behandlung war gleich wie bei der simultanen Behandlung in der Versuchsreihe zuvor. Die Ergebnisse zeigen (Abbildung), dass sich die Inaktivierungseffizienz beider Prozeduren, sequenziell oder simultan, für Temperaturen unterhalb von 50°C, nicht signifikant unterscheidet. Die Inaktivierungseffizienz der sequenziellen Prozedur ist für Behandlungstemperaturen oberhalb von 56°C geringer und hängt vom elektrischen Energieeintrag ab. Jedoch erreicht die Inaktivierungsrate mehr als 5 Log-Stufen bei einer spezifischen elektrischen Energie von 30 kJ/kg mit anschließender thermischer Behandlung bei 60°C. Damit konnte die spezifische elektrische Energie, bei einer erhöhten Inaktivierungseffizienz, auf ¼ reduziert werden. Ein weiterer entscheidender Parameter ist das Zeitintervall zwischen elektrischer und thermischer Behandlung. Die Kürzung des Zeitintervalls auf 15 s brachte keine signifikante Verbesserung der Inaktivierungseffizienz. Für längere Intervalle (>60 s) wurde die Inaktivierungseffizienz jedoch schlechter.

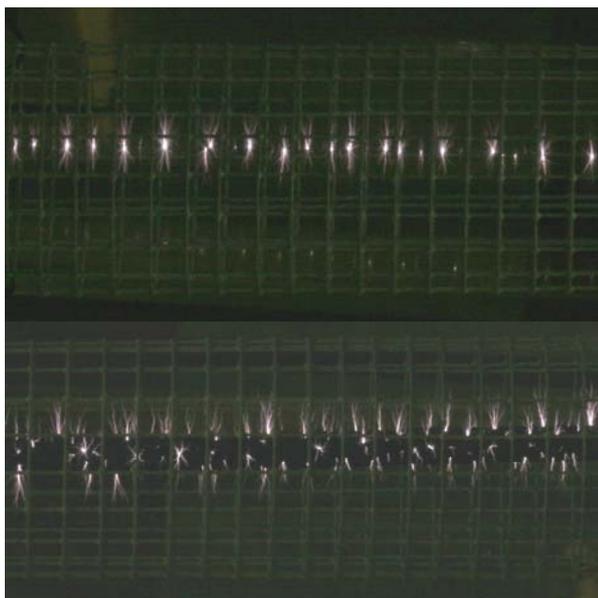
Mit einer Medientemperierung erreicht die Technik der Elektroimpulsbehandlung eine Desinfektionsleistung, die aller Voraussicht nach weit über der Zielgröße von 4 Log-Stufen liegt. Zur Demonstration der Synergie von Medientemperierung und Elektroimpulsbehandlung im Pilotmaßstab wurde beim Projektträger PTKA WTE eine Aufstockung beantragt, die für Anfang nächsten Jahres zugesagt ist. In der bestehenden Pilotanlage soll eine Wärmerückgewinnung

integriert und das Energieeinsparpotential mit Medientwärmung detailliert untersucht werden.

Unterwasser Koronaentladung

Die Behandlung von Abwässern mit Unterwasser-Koronaentladungen beruht auf einer kombinatorischen bakteriziden Wirkung von hohen elektrischen Feldstärken, Druckimpulsen, intensiver UV-Strahlung und Oxidantien, wie OH-Radikale. In den letzten Jahren wurde gezeigt, dass die Summe dieser Effekte zu einer effizienteren Reduktion von Gram-negativen Bakterien, wie *Pseudomonas Putida*, führt. Für die industrielle Anwendung dieser Technik ist jedoch die Lebensdauer der Anoden mit etwa 0,5 Mio. Impulsen zu gering.

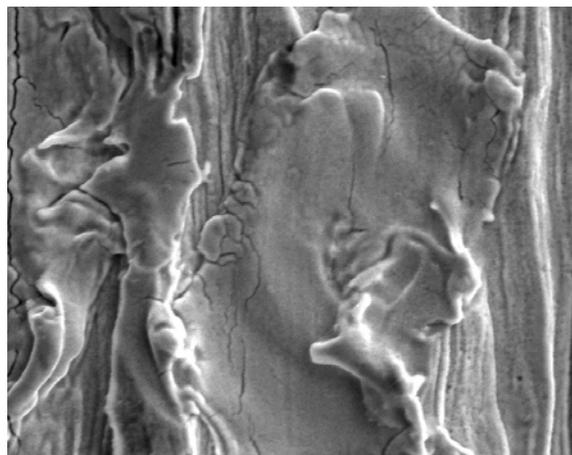
Zur Erzeugung der erforderlichen hohen Feldstärken für den Streamereinsatz an der Anode wurde bislang die Anodenoberfläche mit einer Almandine-Keramik beschichtet. Beim Anlegen einer Impulsspannung an das Wasser-Almandine-Schichtdielektrikum fällt wegen des hohen spezifischen Widerstands der Keramik anfänglich nahezu die gesamte Spannung über der Keramikschicht ab. Mit derartigen Anoden wird eine homogene Streamerverteilung mit einer hohen Dichte, erzeugt (Abbildung). Die teure und aufwändige Keramikbeschichtung erwies sich jedoch wegen der geringen Lebensdauer als unwirtschaftlich. Als günstigere Anoden-Alternative bieten sich Metalldrähte mit einem Durchmesser kleiner als 300 µm an, die im laufenden Betrieb kontinuierlich gewechselt bzw. nachgeführt werden können.



Unterwasser-Koronaentladung: Ausbildung von Streamern an der Oberfläche einer Ti-Almandine-Anode (oben) bzw. einer Wolfram-Anode (unten).

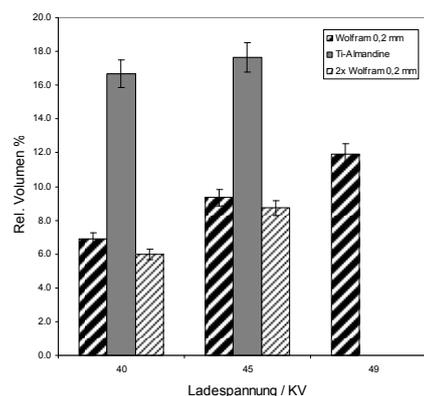
Vor diesem Hintergrund wurden diverse Metalldrähte mit unterschiedlichen Durchmessern und Anordnungen auf die Länge und Dichte der erzeugten Streamerentladungen hin mittels Bildverarbeitung unter Zeiss-Axiovision untersucht.

Wolfram-Draht mit einem Durchmesser zwischen 100 µm und 300 µm erwies sich, wegen des hohen Schmelzpunkts von Wolfram ($T_w=3422\text{ °C}$), als geeignet für die Anwendung als Anode. Elektronenmikroskopaufnahmen (Abbildung) haben gezeigt, dass die hohe Temperatur ($T>T_w$) im Streamerkanal zu lokalen Umschmelzungen der Anodenoberfläche führt. Anoden aus Metallen mit geringerem Schmelzpunkt erodieren schneller.

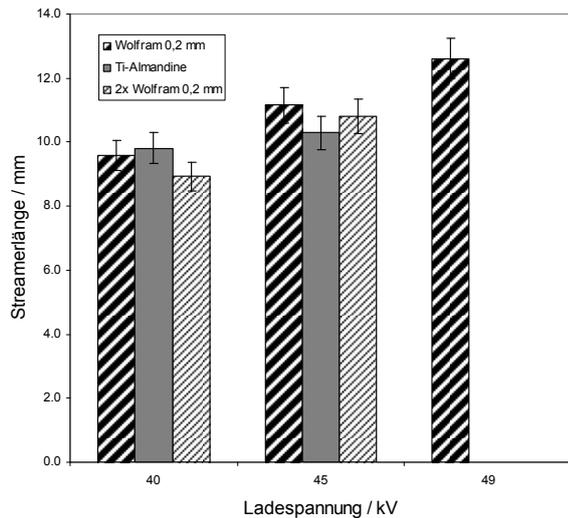


Elektronenmikroskopische Aufnahme einer aufgeschmolzenen Stelle an der Oberfläche von Wolframdraht nach dem Einsatz als Anode für die Unterwasser-Koronaentladung.

Die Auswertung der Aufnahmen der Unterwasser-Koronaentladungen zeigt, dass die Länge der Streamer für alle Anodentypen mit der Höhe der Ladespannung zunimmt (Abbildung) und vom Anodentyp nahezu unabhängig ist. Das von Streamern durchsetzte Wasservolumen, bezogen auf das Gesamtvolumen des Reaktors, ist jedoch bei Ti-Almandine-Anoden, trotz gleicher Streamerlänge wegen des großen Anodendurchmessers von 6 mm merklich erhöht. Das mit Streamern gefüllte Wasservolumen steigt mit zunehmender Ladespannung und mit zunehmendem Anodendurchmesser an (Abbildung).



Streamerlänge in Abhängigkeit von der Ladespannung und vom Anoden-Typ. Hier: Wolfram-Draht (Ø 0,2 mm), zwei verdrehte Wolfram-Drähte (jeweils Ø 0,2 mm) und Ti-Almandine-Anode (Ø 6 mm).



Volumen, in dem sich die Streamer ausbreiten, bezogen auf das Gesamtvolumen des Koronareaktors, in Abhängigkeit von der Ladespannung und vom Anoden-Typ.

Eine Vergrößerung der Anodenoberfläche und die Bereitstellung definierter Feldinhomogenitäten als Streamerstartpunkte, etwa durch Verdrehung zweier Drähte, brachte nicht die erwartete Verbesserung. Anoden mit einer heterogenen Spitzenstruktur auf der Oberfläche führten durchweg zu einer Verringerung der Streamerlänge und -dichte. Gegenwärtig wird die Entkeimungseffizienz der Wolframdraht-Anoden untersucht und parallel an der Verbesserung der Keramikbeschichtung gearbeitet.

Streuung von Schaltfunkenstrecken im Selbstdurchbruch

Ein industrieller Einsatz der Hochleistungsimpulstechnik erfordert streuungsarme, langlebige und kostengünstige Schaltelemente. Trotz großer Fortschritte auf dem Sektor der Halbleiterschalter kommen für Spannungen im Bereich von 50 kV und Stromanstiegsgeschwindigkeiten von mehreren 10 kA/μs aus Kostengründen nur gasisolierte Schaltfunkenstrecken im Selbstdurchbruchbetrieb in Frage.

Zur Ableitung von Designkriterien wurde das Schaltverhalten von SF₆-isolierten Funkenstrecken auf der Grundlage des Volumen-Zeit-Gesetzes von Boeck analysiert.

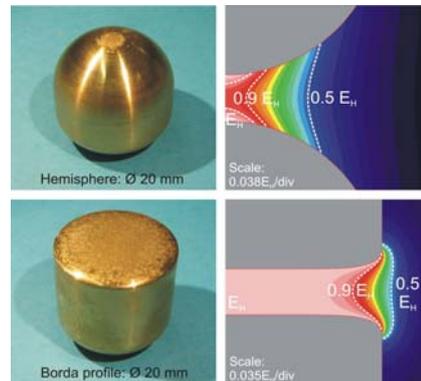
$$\frac{dN_e(t)}{dt} = \dot{n}_0(t) \cdot g(E(\vec{r})) \cdot dV$$

Die Anzahl der Startelektronen pro Zeiteinheit $dN_e(t)/dt$, aus denen ein stromtragfähiger Kanal hervorgeht, ist proportional zur Startelektronenerzeugungsrates $\dot{n}_0(t)$ und einer Gewichtsfunktion $g(E)$, die von der Feldstärke E im jeweiligen Volumenelement dV des Zwischenelektrodenraums abhängt. Damit besitzt die Feldverteilung zwischen den Elektroden und die Erzeugung von Startelektronen eine zentrale Bedeutung bei der Auslegung streuungsarmer und langlebiger Funkenstrecken.

Bei halbkugelförmigen Elektroden werden Entladungskanäle vor allem in einem vergleichsweise kleinen Volumen mit hoher Feldstärke nahe der Rotationsachse initiiert. Dementsprechend hoch ist die Streuung der Zündspannung bei einer rampenförmigen Spannungsbeanspruchung der Funkenstrecke, wie im Ladebetrieb bei Impulsgeneratoren üblich.

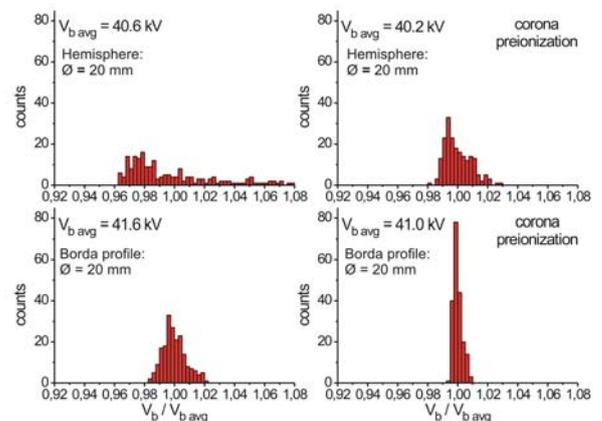
Ein Bordaelektrodenprofil besitzt bei gleichem Außendurchmesser ein vergleichsweise großes Volumen mit homo-

gener elektrischer Feldstärke E_H . Bei gleicher Startelektronenerzeugungsrates wie im Fall der Halbkugelelektroden, ist hier die Anzahl der entladungs-wirksamen Startelektronen N_e in einem bestimmten Zeitintervall wesentlich höher. Daraus resultiert eine geringere Streuung der Selbstdurchbruchspannung bei sonst unveränderten Parametern.



Abbrandbild und Verteilung der elektrischen Feldstärke bei halbkugelförmigen Elektroden, oben, und bei einem Borda-Homogenfeld-Elektrodenprofil, unten.

Wird die Startelektronenerzeugungsrates durch Vorionisation des Zwischenelektrodenraums mittels einer Koronaentladung erhöht, ist eine weitere Verringerung der Schaltstreuung, sowohl bei halbkugelförmigen, als auch bei Bordaprofil-Elektroden festzustellen. Wegen des gleichwahrscheinlichen Auftretens von Entladungskanälen im gesamten Homogenfeldvolumen sind beim Borda-Elektrodenprofil die Entladungsfußpunkte entlang der Elektrodenoberfläche nahezu gleich verteilt. Eine erosionsbedingte Formänderung der Elektroden, die bei fortgeschrittener Betriebsdauer zur Änderung der Schaltereigenschaften führt, tritt damit wesentlich später in Erscheinung als bei sphärischen Elektrodenanordnungen.



Auf die mittlere Selbstdurchbruchspannung $V_{b,avg}$ normierte Häufigkeitsverteilung der Selbstdurchbruchspannung V_b von Schaltfunkenstrecken beim Einsatz von sphärischen Elektroden, $\varnothing = 20$ mm, oben, und bei Borda-Elektrodenprofilen, Reihe unten. In der rechten Spalte ist die Schaltstreuung mit Korona-Vorionisation, in der linken Spalte die Streuung ohne Vorionisation dargestellt.

Der Einsatz von Homogenfeldprofilen in Schaltfunkenstrecken verbindet ein streuungsarmes Schaltverhalten mit hoher Langzeitstabilität bei geringen baulichen Abmessungen. Eine Ausweitung der Untersuchungen auf nicht-elektronegative Gase, wie z.B. Stickstoff, ist für das kommende Jahr geplant.

Shared Research Group

In diesem Jahr konnte die durch Mittel aus der Exzellenzinitiative der Universität Karlsruhe ins Leben gerufene „Shared Research Group“ (SRG) 60-1 zum Thema „Physiologische Wirkung hoher, gepulster elektrischer Felder auf Pflanzenzellen“ in Kooperation mit dem Institut für Botanik I der Universität Karlsruhe ihre Arbeit aufnehmen. Aus der Anschubfinanzierung durch das KIT konnte für elektrophysiologische Messungen an pflanzlichen Zellen eine „Patch-Clamp“ Apparatur angeschafft werden, um das am Institut bereits etablierte biophysikalische Methodenspektrum zu erweitern. Mit dieser Technik können definierte Spannungsimpulse an pflanzliche Zellen angelegt und die Stromantwort der Zelle aufgezeichnet werden. Die Komponenten für diese Apparatur wurden in der ersten Jahreshälfte geliefert, und ein zuverlässig funktionierender Messplatz konnte inzwischen aufgebaut werden.

Erste Messungen wurden an Protoplasten aus Tabak-Kulturzellen durchgeführt. Auch Protoplasten, die mit dem spannungssensitiven Membranfarbstoff ANNINE-6 gefärbt worden waren, konnten mit der Technik bereits bearbeitet werden; nach den bisherigen Ergebnissen beeinflusst der Membranfarbstoff nicht die Aktivität von Ionenkanälen in der Plasmamembran dieser Protoplasten. Damit sind die wichtigsten technischen und physiologischen Voraussetzungen gegeben, um die Spannungsabhängigkeit des Farbstoffes in absoluten Werten zu kalibrieren und ihn zur Bearbeitung weiterer zellphysiologischer und biotechnologischer Fragestellungen einzusetzen. Die „Patch-Clamp“ Apparatur wurde auch schon im Rahmen der Ausbildung von Biologiestudenten in der Fachrichtung „pflanzliche Zellbiologie“ eingesetzt.

Parallel zu dem oben beschriebenen elektrophysiologischen Ansatz zur Kalibrierung des Membranfarbstoffes ANNINE-6 wurde auch ein biochemischer Ansatz verfolgt. Hierzu wurde die Plasmamembran von gefärbten Protoplasten zusätzlich mit dem K^+ -selektiven Ionophor Valinomycin dotiert, so dass das Membranpotential von der K^+ -Leitfähigkeit dominiert wird. Durch die Änderung der K^+ Aktivität im Außenmedium kann das Membranpotential dann gezielt manipuliert werden. Hierzu wurde eine transparente und mikroskopischtaugliche Perfusionskammer entwickelt, mit der das Medium schonend ausgetauscht und gleichzeitig die Fluoreszenzintensität gemessen werden konnte. Der erwartete Zusammenhang zwischen der Fluoreszenzintensität als Maß für das Membranpotential und der K^+ Aktivität im Außenmedium konnte jedoch nicht reproduzierbar hergestellt werden. Daher wurden diese Versuche eingestellt. Höchstwahrscheinlich komplexiert das in die Membran eindringende Valinomycin mit dem Membranfarbstoff und verliert so seine Funktionalität.

Die Arbeiten im Rahmen der SRG 60-1 am IHM werden durch Aktivitäten am Institut für Botanik I ergänzt. Hier wurden fluoreszenzoptische Techniken zum Nachweis der Porenbildung infolge gepulster elektrischer Feldexposition an Protoplasten aus Tabak-Kulturzellen entwickelt. Es konnte gezeigt werden, dass niedermolekulare, mit dem Fluoreszenzfarbstoff FITC markierte Dextrane (10 bis 40 kD), nach Applikation eines Spannungsimpulses in die Zelle eindringen. Erste Experimente zeigten, dass die Fluoreszenzintensität als Maß für die Menge des aufgenommenen Dextrans mit zunehmendem Molekulargewicht abnahm. Diese Experimente erlauben Rückschlüsse auf die Größenverteilung der feldinduzierten Poren. Auch Plasmide konnten erfolgreich in die Protoplasten eingeschleust werden; dies wurde durch die Expression eines Plasmid-codierten, fluoreszierenden Markerproteins nachgewiesen. Die Technik wurde auch eingesetzt, um die Aufnahme von Nanopartikeln durch Zellen und Protoplasten zu beschleunigen. Nanopartikel können z.B. als Träger für immobilisierte Enzyme dienen.

Weiterhin wurden am konfokalen Laser-Scanning-Mikroskop des Botanischen Institutes 1 der Universität Karlsruhe Vorversuche zur Reaktion des pflanzlichen Cytoskeletts auf ultrakurze elektrische Pulse durchgeführt. Die Experimente erfolgten mit verschiedenen Linien von Tabak-Zellkulturen (BY2), bei denen jeweils unterschiedliche Komponenten des Zellskeletts fluoreszenzmarkiert sind. Um die Bepulsung der Zellen während der mikroskopischen Betrachtung zu ermöglichen, wurde eine neue Objekthalterung für den Kreuztisch des Mikroskops entwickelt und gebaut.

Alle untersuchten Cytoskelett-Elemente zeigten eine ausgeprägte Reaktion auf die applizierten Pulse (10 ns bei 30kV/cm). Zur Quantifizierung der Ergebnisse sind weitere Versuchsreihen geplant.

Um in Zukunft auch am IHM Arbeiten mit fluoreszenzmarkierten Zelllinien und anderen gentechnisch veränderten Organismen durchführen zu können, wurde in Bau 630 für die Räume 223, 224 und 226 ein gentechnischer Sicherheitsbereich der Stufe 1 (S1-Labor) angemeldet. Nach kleineren Modifikationen der Laboreinrichtung wurde der Sicherheitsbereich vom Regierungspräsidium mit Beschluss vom 17.10.2008 anerkannt. Als Projektleiter des Labors fungiert Dr. Lars Wegner, Leiter der KIT Shared-Research-Group 60-1, als Beauftragter für die biologische Sicherheit wurde Dr. Christian Eing ernannt.

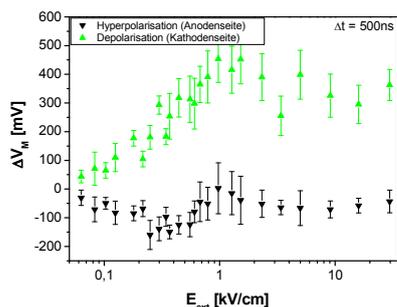
Messung der Membranaufladung an pflanzlichen Zellen

Das Anlegen eines externen elektrischen Feldes an eine biologische Zelle führt, bei Erreichen einer bestimmten Membranspannung, zu einer starken Permeabilitätsänderung der Plasmamembran. Die derzeit gängigste Theorie erklärt die auftretende Leitfähigkeitserhöhung der Membran als Reaktion auf ein externes elektrisches Feld durch die Bildung vieler kleiner Poren mit Radien von wenigen Nanometern, welche mit der Dauer des angelegten Pulses dynamisch wachsen.

Im Rahmen der Grundlagenforschung wurden die an Säugerzellen durchgeführten Experimente zur Membranaufladung auf ein pflanzliches System ausgedehnt. Für die Messungen wurde die Laborzelllinie *Nicotiana tabacum* L. cv. Bright Yellow 2 (BY-2) ausgewählt, bei der es sich um ein gut charakterisiertes pflanzliches Modellsystem der Biologie handelt. Die Messungen wurden an Protoplasten durchgeführt, welche durch enzymatische Verdauung der Zellwand gewonnen und anschließend mit dem feldsensitiven Fluoreszenzfarbstoff ANNINE-6 gefärbt wurden.

Zunächst wurde die Feldstärkeabhängigkeit der Membranspannung ermittelt. Hierzu wurden die Zellen einem $1\mu\text{s}$ langen Feldstärkepuls ausgesetzt und die hierdurch hervorgerufene Fluoreszenzänderung 500 ns nach Einsetzen des Pulses bestimmt. Die Versuche erfolgten bei Feldstärkewerten im Bereich von 0,05 kV/cm bis zu 30 kV/cm. Die Umrechnung der Fluoreszenzänderungen in Membranspannungsänderungen erfolgte mit Hilfe einer farbstoffspezifischen Kalibrierkurve für die verwendete Anregungswellenlänge von 468 nm. In der ersten Abbildung ist die Feldstärkeabhängigkeit des Transmembranpotentials der Protoplasten an den beiden Zellpolen dargestellt. Es zeigt sich ein deutlich asymmetrisches Aufladeverhalten der pflanzlichen Plasmamembran, welche durch das, im Vergleich zu Säugerzellen, höhere Ruhepotential der Zelle von ungefähr -150 mV erklärt werden kann. Am depolarisierten Zellpol zeigen die Messungen eine Aufladung der Membran bis zu einem externen elektrischen Feld von ungefähr 1 kV/cm, während sich die Membran am hyperpolarisierten Zellpol nur bis zu einer äußeren Feldstärke von 0,3 kV/cm aufladen lässt, bevor ein Rückgang und ein anschließender Sättigungseffekt auftritt. Es ist

zu beachten, dass alle gezeigten Fluoreszenzänderungen und die entsprechenden Membranspannungen messtechnisch bedingt relativ zum Ruhepotential der Zelle dargestellt sind.

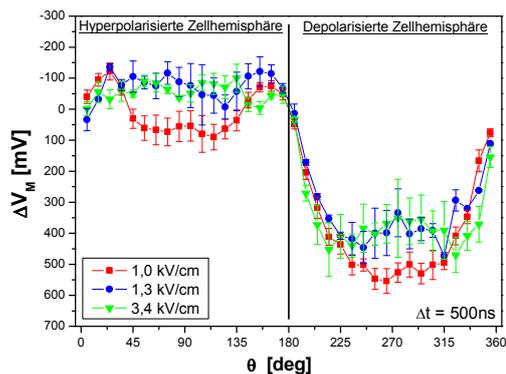
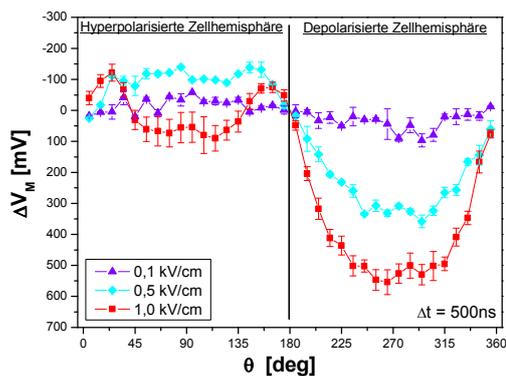


Feldstärkeabhängigkeit des Transmembranpotentials von BY-2 Protoplasten 500 ns nach Anlegen des externen Spannungspulses. Am depolarisierten Pol findet ab einer externen Feldstärke von ca. 1 kV/cm keine weitere Aufladung der Membran mehr statt. Am hyperpolarisierten Pol tritt Sättigung schon bei einer externen Feldstärke von 0,3 kV/cm ein.

Unter Berücksichtigung des Ruhepotentials ergibt sich für die kritische Membranspannung, bei der es zur verstärkten Bildung von Poren und somit zu einer Begrenzung der weiteren Aufladung der Membran kommt, ein Wert $|V_M|$ von ca. 300 mV. Dieser Wert ist in guter Übereinstimmung mit dem an Säugerzellen gemessenen Wert für die kritische Membranspannung und liegt deutlich unter dem in der Literatur häufig verwendeten Wert von 1 V.

Um Aussagen über die Winkelabhängigkeit der Membranspannung, bezogen auf die Richtung des externen elektrischen Feldes, zu treffen, wurden die Fluoreszenzänderungen in azimutalen Winkelintervallen von 10° entlang des Membranrings gemessen (Abbildung). Der Rückgang der Amplitude der Membranspannung bei höheren Feldstärken wurde als deutliches Zeichen für eine verstärkt einsetzende Porenbildung gewertet.

Bei einer externen Feldstärke von ungefähr 1 kV/cm konnte auf der hyperpolarisierten Seite ein statistisch signifikanter Einbruch der Membranspannung beobachtet werden (rote Kurve, 45°-135°). Zum jetzigen Zeitpunkt besteht die Annahme, dass bei einer Membranspannung, die bei einer angelegten Feldstärke von 1 kV/cm, nach 500 ns erreicht wird, hyperpolarisations-aktivierte Ca^{2+} -Kanäle geöffnet werden, welche die für physiologische Funktionen benötigte Depolarisation der pflanzlichen Plasmamembran steuern. Mit weiter zunehmenden Feldstärken war ein weiteres Aufladen der Membran wieder möglich, was mit einer Beschädigung der Kanalstruktur und damit einer Beeinträchtigung der Funktion verursacht durch die hohen elektrischen Felder erklärt werden könnte.



Azimutale Abhängigkeit der Membranspannung von BY-2 Protoplasten, 500 ns nach Anlegen des externen Spannungspulses, gemessen in Winkelintervallen von 10°. Bei einer externen Feldstärke von ca. 1 kV/cm (rote Linie) konnte mit hoher statistischer Sicherheit ein Einbruch der Membranspannung gemessen werden.

Um systematische Fehler bei der Bestimmung der Membranspannungswerte aus den gemessenen Fluoreszenzdaten auszuschließen, wird derzeit an einer Kalibrierung des feldsensitiven Fluoreszenzfarbstoffes ANNINE-6 an BY-2 Protoplasten mittels der Patch-Clamp Technik gearbeitet.

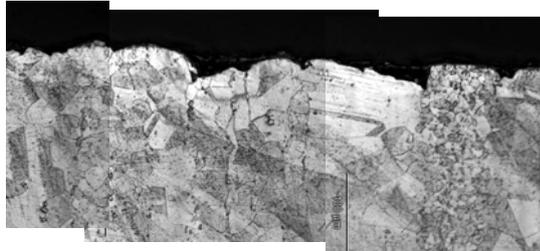
Management von Baustoffen und Bauwerken

Die Arbeiten an den elektrodynamischen Fragmentieranlagen FRANKA-0, FRANKA-XYZ und FRANKA-5 und am Kondensator/Funkenstreckenprüfstand wurden in enger Kooperation mit dem Schweizer Industriepartner selFrag AG, einer Tochter der AMMAN AG fortgesetzt. Die selFrag AG ist inzwischen wegen dort zu beengten räumlichen Verhältnissen vom ursprünglichen Standort Langenthal/CH nach Bern/Kerzers/CH umgezogen, wo in neu erstellten Fertigungshallen die Produktion von Batchanlagen parallel mit Betriebstests der ersten kontinuierlich arbeitenden Anlage läuft. Angesichts des sich ständig erweiternden Kundenkreises sieht sich selFrag mit einer wachsenden Anzahl von Anfragen bezüglich eines potentiellen Einsatzes der FRANKA-Technologie in neuen Industriezweigen konfrontiert. Aufgrund der begrenzten Kapazitäten der selFrag AG wurden die im Zusammenhang mit solchen Anfragen zur Verfügung gestellten Materialproben an den FRANKA-Anlagen bearbeitet. Zu diesen Materialien gehörten u.a. Edelmetallhaltige Erze aus Grönland und Spezialglas für die Lichtleiterfertigung.

Die Mehrzahl der Arbeiten an den FRANKA - Anlagen befasste sich wie bereits in den vorangegangenen Jahren mit den für die Markteinführung essentiellen Fragen der Komponenten – Lebensdauer. Im Vordergrund standen hier wiederum die Arbeitselektroden und die Schalterelektroden des MARX – Generators.

Verschleißtests wurden für Arbeitselektroden aus jetzt erstmals eingesetzten niedrig legierten Stählen sowohl bei unterschiedlicher elektrischer Belastung, unterschiedlicher Prozessraumbeladung und Prozessraumtopologie durchgeführt. Dabei bestätigten sich zwar die nahezu lineare Abhängigkeit des Elektrodenabbrands vom Grenzlastintegral und die prädominante Rolle der Materialbelastung bei der Fragmentierung stark abrasiver Materialien, jedoch wurde jetzt erstmals ein deutlicher Einfluss der materiellen Reaktionsraumbegrenzungen beobachtet. Bei Einengung des Reaktionsraums nahm der Elektrodenverschleiß auch ohne Materialbelastung bei sonst gleichen Versuchsbedingungen deutlich zu. Die Ergebnisse liefern Hinweise für eine zweckmäßige Formgebung des Reaktionsraums zukünftiger elektrodynamischer Fragmentieranlagen.

In besonderem Detail wurde der Abbrand der MARX – Elektroden in der FRANKA-0 Anlage und an dem im IHM aufgestellten Kondensator/Funkenstreckenprüfstand der selFrag AG untersucht. Wesentliches Ergebnis dieser Arbeiten war eine Vertiefung des Kenntnisstandes der bei diesen Elektroden auftretenden Verschleißmechanismen. Im Verlauf dieser Untersuchungen wurden u.a. Elektrodenkalotten aus austenitischem Stahl 1.4301 (18% Cr, 9% Ni) in GESA-1 umgeschmolzen und nachfolgend im Lebensdauerzustand mit etwa 2×10^5 Entladungspulsen bei einem Grenzlastintegral von ca. $650 \text{ A}^2 \text{ s}$ beaufschlagt. Es zeigte sich zwar, dass nach dieser Pulszahl die von GESA-1 umgeschmolzene Oberflächenschicht (30–40 μm) nahezu aufgezehrt war und dass sich der globale Abbrand kaum von einer unbehandelten Stahlkalotte unterschied, ein Querschliff durch die Elektrodenoberfläche (Abbildung) zeigte aber eine deutliche Schädigung entlang von Korngrenzen. Während bisher davon ausgegangen wurde, dass der Elektrodenabbrand im Wesentlichen auf Abschmelzen der Elektroden zurückgeht, zeigt dieses Ergebnis dass lokale thermische Spannungen zum Strukturversagen und in dessen Folge zu Kornverlust führen können. Bei grobkörnigen austenitischen Stählen ist dieser Schädigungsmechanismus offensichtlich besonders gravierend.



Querschliff der 1.4301 Stahlprobe ohne GESA-Umschmelzung nach 200 000 Entladungspulsen.

Zur weiteren Vertiefung des Verständnisses der Abbrandmechanismen sind weitergehende Tests an in GESA-2 bis zu einer Tiefe von über 100 μm umgeschmolzenen Stahlelektroden aus feinkörnigem unlegiertem Stahl vorgesehen.

Die selFrag AG rechnet damit, im kommenden Jahr von ihrem Steering-Committee die Genehmigung zum Bau von Großanlagen erteilt zu bekommen. In diesem Fall kann die bereits im vergangenen Jahr begonnene Fertigung von Komponenten für eine solche Anlage fortgesetzt und die Studien zum Ausschluss von Baustoffen intensiviert werden.

Industrielle Mikrowellentechnik

Im Bereich der Industriellen Mikrowellentechnik wurde im IHM das HEPHAISTOS-Versuchszentrum zu Jahresbeginn in Betrieb genommen. An den Anlagen HEPHAISTOS-CA1, -CA2- und -CA3 werden seitdem intensiv Prozessentwicklungen mit der Industrie für verschiedenste Anwendungen und Verfahren auf Dienstleistungsbasis kommerziell erschlossen. Die Anlage HEPHAISTOS-CA3 besitzt dabei eine Mikrowellenleistung von ca. 25 kW und ein Volumen von etwa 7000l und ist damit die weltgrößte Mikrowellenprozessanlage. Die Anlage besitzt zudem die Fähigkeit, erstmals Durchflussverfahren für zukünftige Anwendungen realisieren und testen zu können. Aus der Vielzahl der Experimente konnten mehrere neue potentielle industrielle Produktionsanwendungen für einen Einsatz der HEPHAISTOS-Technologie gefunden werden. Die industriellen HEPHAISTOS-Systeme wurden Anfang April vertreten durch die Fa. Vötsch, sowie Mitarbeiter des IHM auf der weltweit bedeutendsten Fachmesse für Verbundwerkstoffe, der JEC in Paris vor Ort präsentiert.

Im April wurden über 10 Tage auf Einladung der Boeing Company Versuche im NASA-Eiskanal in Seattle mit einem In-Flight Enteisungssystem auf Compositbasis (**MIDAS-Technologie, MICrowave De-/Anticing System**) durchgeführt. Die Versuche zeigten eine sehr schnelle Erwärmung der duroplastischen Flügelvorderrand – eine Enteisung der Leading Edge konnte innerhalb von 3 Sekunden durchgeführt

werden. Damit lag das MIDAS-System zeitlich deutlich unter anderen technologischen Ansätzen. Eine Fortführung dieser Forschungsaktivitäten ist für einen späteren Zeitpunkt vereinbart worden, um hier eine passende Lösung für Triebwerkseinläufe entwickeln zu können. Hierfür sind aber hochwertige monolithische thermoplastische Materialien erforderlich.

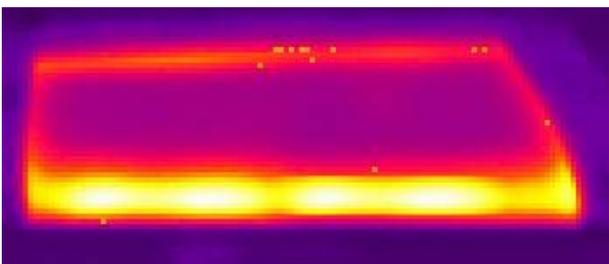
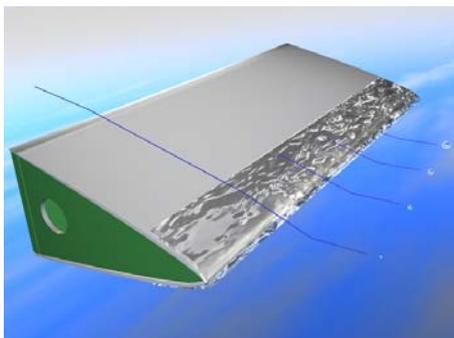
Mit dem IMF-III konnten in Anwendung der gefundenen quantenmechanischen Gesetzmäßigkeiten Vorhersagen für eine erhöhte Mikrowellenankopplung durch Nano-Materialien erfolgreich bestätigt werden. Die am IHM entwickelten Verfahren zur Messung dielektrischer Parameter wurden verfeinert. An einem temperaturregelbaren System wird zurzeit intensiv gearbeitet.

Für einen MW-Injektor-Prototyp zur Harzinjektion wurde die Regelung erfolgreich angepasst, um auch für sehr niedrige Durchflüsse eine optimale Versuchsführung sicherzustellen. Ein auf dem Injektor basierendes neues Mikrowellensystem für Pultrusionsanwendungen für CFK-Materialien (MW-Pultruder) wurde gefertigt und experimentell am IHM und am ITV (Institut für Textiltechnik) in Denckendorf, untersucht.

In 2008 wurde das Habilitationsverfahren von Dr. Feher und seiner Habilitationsschrift „Energy Efficient System and Materials Processing Technologies for Avionic, Mobility and Environmental Applications“ erfolgreich abgeschlossen. Anlässlich des Global Congress on Microwave Energy Applications (GCMEA) in Otsu, Japan, wurde Dr. Feher mit dem „Ricky Metaxas Pioneer Award“ für seine Arbeiten zur „Quanten-Natur der Mikrowellenerwärmung“ ausgezeichnet. Die Ergebnisse haben Auswirkung auf das Grundverständnis von Wasser als Flüssigkeit, das sich aus kleinsten quantenartigen Strukturen von 4-5 Molekülen vorgestellt werden kann. Mit der Universität Stuttgart (Prof. Kröplin) sind weiterführende Zusammenarbeiten für 2009 in dieser Thematik der Quanten-Natur der Mikrowellenankopplung geplant.

Das TT-Projekt U093 „Mikrowellen Aushärtung von SILGRANIT Spülbecken“ mit dem Industriepartner Firma Blanco musste für 2009 um 1 Jahr verlängert werden, da bei

der Evaluierung des Werkzeugmaterials Probleme aufgetreten sind, woraus erhebliche Projektverzögerungen folgten. Die für die Werkzeugmaterialien zuständige Zulieferfirma konnte bislang das erforderliche Material in Form und Qualität nicht ausliefern.



Typische Vereisung einer Flügelvorderkante und Thermobild eines avionischen MIDAS-Compositprototypen. Mittels Mikrowellen kann die Wärme berührungslos und schnell in die Struktur zur Enteisung übertragen werden.

Beteiligte Mitarbeiter:

Dr. J. Akhtar, DI F. Attmann, DP W. An, DP Th. Berghöfer, H. Brüsemeister, J. Dittrich, Dr. Ch. Eing, **Dr. L. Feher**, DB B. Flickinger, Dr. W. Frey, Dr. Ch. Gusbeth, DI (FH) F. Lang, S. Layer, E. Menesklou, **Dr. G. Müller**, Dr. H. Muscher, V. Nuss, K. Paulus, Dr. M. Sack, K.-D. Schorb, T. Seitz, DI (FH) J. Singer, R. Stängle, Dr. S. Stanculovic, DI R. Strässner, Dr. A. Weisenburger, A. Wolf, R. Wüstner, H. Zimmermann, Ch. Zöller

Publikationsliste

FUSION: Programm Kernfusion

Publikationen in begutachteten Zeitschriften:

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

Behaviour of melted tungsten plasma facing components under ITER-like transient heat loads: simulations and experiments.

Fusion Engineering and Design, 83(2008) S.1077-81

DOI:10.1016/j.fusengdes.2008.05.044

Borie, E.

Effect of resonator parameters on frequency and quality factor of gyrotron resonators.

Int. J. of Infrared and Millimeter Waves, 29(2008), S. 113-30

DOI:10.1007/s10762-007-9293-x

Cirant, S.; Sauter, O.; Thumm, M.; Luce, T.C.

Summary of the 4th IAEA technical meeting on ECRH physics and technology for ITER.

Nuclear Fusion, 48(2008) S.054001/1-4

DOI:10.1088/0029-5515/48/5/054001

Henderson, M.A.; Heidinger, R.; Strauss, D.; Bertizzolo, R.; Bruschi, A.; Chavan, R.; Ciattaglia, E.; Cirant, S.; Collazos, A.; Danilov, I.; Dolizy, F.; Duron, J.; Farina, D.; Fischer, U.; Gantenbein, G.; Hailfinger, G.; Kaparek, W.; Kleefeldt, K.; Landis, J.D.; Meier, A.; Moro, A.; Platania, P.; Plaum, B.; Poli, E.; Rampino, G.; Saibene, G.; Sanchez, F.; Sauter, O.; Serikov, A.; Shidara, H.; Sozzi, C.; Spaeh, P.; Uditsev, V.S.; Zohm, H.; Zucca, C.

Overview of the ITER EC upper launcher.

Nuclear Fusion, 48(2008) S.0540-131/1-14

DOI:10.1088/0029-5515/48/5/054013

Kasperek, W.; Petelin, M.I.; Shchegolkov, D.Yu.; Erckmann, V.; Plaum, B.; Bruschi, A.; ECRH Groups at IPP Greifswald, FZK Karlsruhe and IPF Stuttgart

A fast switch, combiner and narrow-band filter for high-power millimetre wave beams.

Nuclear Fusion, 48(2008) S.054010/1-9

DOI:10.1088/0029-5515/48/5/054010

Landman, I.S.; Janeschitz, G.

Contamination of ITER core by impurities of Tungsten and Carbon.

Fusion Engineering and Design, 83(2008) S. 1797-1800

DOI:10.1016/j.fusengdes.2008.08.047

Pestchanyi, K.; Landman, I.S.

Simulation of dust production in ITER transient events.

Fusion Engineering and Design, 83(2008) S.1054-58

DOI:10.1016/j.fusengdes.2008.07.043

Thumm, M.; Dammertz, G.; Gantenbein, G.; Illy, S.; Kern, S.; Leonhardt, W.; Neffe, G.; Piosczyk, B.; Schmid, M.; Braune, H.; Erckmann, V.; Hollmann, F.; Jonitz, L.; Laqua, H.P.; Michel, G.; Noke, F.; Purps, F.; Schulz, T.; Weissgerber, M.; Brand, P.; Grünert, M.; Kasperek, W.; Kumric, H.; Lechte, C.; Plaum, B.

10 MW, 0,14 THz, CW gyrotron and optical transmission system for millimeter wave heating of plasmas in the stellarator W7-X.

Terahertz Science and Technology, 1(2008) Nr. 2, S. 73-99

Thumm, M.; Freude, W.; Grau, G.; Leuthold, J.; Wiesbeck, W.; Zwick, T.

Geschichte der Hochfrequenztechnik an der Universität Karlsruhe.

Frequenz – Journal of RF-Engineering and Telecommunications, 62(2008) S. 266-73

Thumm, M.; Brand, P.; Braune, H.; Dammertz, G.; Erckmann, V.; Gantenbein, G.; Illy, S.; Kasperek, W.; Laqua, H.P.; Lechte, C.; Leonhardt, W.; Michel, G.; Neffe, G.; Piosczyk, B.; Schmid, M.; Weissgerber, M.

Progress in the 10-MW 140 GHz ECH system for the stellarator W7-X.

IEEE Transactions on Plasma Science, 38(2008) S.341-55

DOI:10.1109/TPS.2008.917950

Wagner, D.H.; Grünwald, G.; Leuterer, F.; Manini, A.; Monaco, F.; München, M.J.; Schütz, H.; Stober, J.; Zohm, H.; Franke, T.;

Thumm, M.; Gantenbein, G.; Heidinger, R.; Meier, A.;

Kasperek, W.; Lechte, C.; Litvak, A.G.; Denisov, G.G.;

Chirkov, A.V.; Tai, E.M.; Popov, L.G.; Nichiporenko, V.;

Myasnikov, V.E.; Solyanova, E.A.; Malygin, S.A.; Meo, F.;

Woskov, P.P.

Status of the new multi-frequency ECRH system for ASDEX upgrade.

Nuclear Fusion, 48(2008) S.054006/1/1-6

DOI:10.1088/0029-5515/48/5/054006

Wagner, D.H.; Grünwald, G.; Leuterer, F.; Manini, A.; Monaco, F.; München, M.J.; Schütz, H.; Stober, J.; Zohm, H.; Franke, T.;

Thumm, H.; Heidinger, R.; Gantenbein, G.; Meier, A.;

Kasperek, W.; Lechte, C.; Litvak, A.G.; Denisov, G.G.;

Chirkov, A.V.; Tai, E.M.; PoPov, L.G.; Nichiporenko, v.O.;

Myasnikov, V.E.; Solyanova, E.A.; Malygin, S.A.; Meo, F.;

Woskov, P.P.

Present status of the new multi-frequency ECRH system for ASDEX upgrade.

IEEE Transactions on Plasma Science, 36(2008) S.324-41

DOI:10.1109/TPS.2008.917514

Zohm, H.; Gantenbein, G.; Leuterer, F.; Maraschek, M.; Poli, E.; ASDEX Upgrade Team, Urso, L.

Control of NTMs by ECCD on ASDEX Upgrade in view of ITER application.

Plasma Physics and Controlled Fusion, 49(2007) S.B341-47

DOI:10.1088/0741-3354/49/12B/S31

Sonstige Publikationen die in gedruckter Form vorliegen:

Alberti, S.; Albajar, F.; Avramides, K.A.; Benin, P.; Bonicelli, T.; Cirant, S.; Droz, E.; Dumbrajs, O.; Fasel, D.; Gandini, F.;

Goodman, T.; Hogge, J.P.; Illy, S.; Jawa, S.; Jin, J.; Kern, S.;

Lievin, C.; Marletaz, B.; Marmillod, Ph.; Pagonakis, I.; Perez, A.;

Piosczyk, B.; Porte, L.; Rzesnicki, T.; Siravo, U.; Thumm, M.;

Tran, M.Q.

Status of development of the 2 MW, 170 GHz coaxial-cavity gyrotron for ITER.

Int. Conf. on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves

(IRMMW-THz), Pasadena, CA, September 15-19, 2008

Proc. on USB-Stick, Piscataway, N.J., IEEE, 2008

Bazylev, B.; Igitkhanov, Y.; Janeschitz, G.; Landman, I. Simulation of hot-spot formation at ITER vessel surface during multiple transient events.

Lalouis, P. [Hrsg.] 35th European Physical Society Conf. on Plasma Physics combined with the 10th Int. Workshop on Fast Ignition of Fusion Targets, Hersonissos, GR, June 9-13, 2008

Contributed Papers on CD-ROM P-1.015; European Physical Society, 2008 (Europhysics Conference Abstracts; 32D)

- Beringer, M.H.; Kern, S.; Liu, Y.H.; Thumm, M.
Towards a 4 MW 170 GHz coaxial gyrotron resonator design.
Int. Conf. on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz), Pasadena, CA, September 15-19, 2008
Proc. on USB-Stick, Piscataway, N.J.; IEEE, 2008
- Braune, H.; Erckmann, V.; Illy, S.; Laqua, H.; Noke, F.; Purps, F.; Schmid, M.; W7-X ECRH Teams at IPP, IPF and FZK
Advanced transverse field collector sweeping for high power gyrotrons.
20th Joint Russian-German Meeting on ECRH and Gyrotrons, Nizhny Novgorod, Russia, July 26 – August 3, 2008
Folien auf CD-ROM
- Erckmann, V.; Brand, P.; Braune, H.; Gantenbein, G.; Kasperek, W.; Laqua, H.P.; Marushchenko, N.B.; Michel, G.; Thumm, M.; Turkin, Y.; Weissgerber, M.; ECRH Groups at IPP Greifswald, FZK Karlsruhe and IPF Stuttgart
The 10 MW, CW, ECRH-plant for W7-X: status and high power performance.
7th Int. Workshop on Strong Microwaves: Sources and Applications, Nizhny Novgorod, Russia, July 27 – August 2, 2008, Book of Abstracts S. 19
20th Joint Russian-German Meeting on ECRH and Gyrotrons, Nizhny Novgorod, Russia, July 26 – August 3, 2008, Folien auf CD-ROM
- Erckmann, V.; Braune, H.; Laqua, H.P.; Marushchenko, N.B.; Michel, G.; Turkin, Y.; Weissgerber, M.; Gantenbein, G.; Thumm, M.; Brand, P.; Kasperek, W.; Lechte, C.; W7-X ECRH Teams at IPP, FZK and IPF
The 10 MW, CW, ECRH-plant for W7-X: status and high performance.
15th Joint Workshop on Electron Cyclotron Emission and Electron Cyclotron Resonance Heating, Yosemite National Park, CA, March 10-13, 2008
Book of Abstracts TECH/GYRO-II-2
- Flamm, J.; Schlaich, A.; Arnold, A.; Prinz, O.; Heidinger, R.; Thumm, M.
Characterization of windows for fusion applications using a D-band network analyzer.
Int. Conf. on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz), Pasadena, CA, September 15-19, 2008
Proc. on USB-Stick, Piscataway, N.J., IEEE, 2008
- Henderson, M.; Darbos, C.; Albajar, F.; Bigelow, T.; Bonicelli, T.; Chavan, R.; Denisov, G.G.; Fasel, D.; Heidinger, R.; Kobayashi, N.; Rao, S.L.; Rasmussen, D.; Saibene, G.; Sakamoto, K.; Takahashi, K.; Thumm, M.; Ujwal, B.
Recent progress in the ITER ECH&D system.
Workshop on RF-Heating Technology for Fusion Plasmas 2008, San Diego, CA, September 10-12, 2008
Folien auf USB-Stick
- Henderson, M.A.; Heidinger, R.; Strauss, D.; Bertizzolo, R.; Bruschi, A.; Chavan, R.; Ciattaglia, E.; Cirant, S.; Collazos, A.; Danilov, I.; Dolizy, F.; Duron, J.; Farina, D.; Fischer, U.; Gantenbein, G.; Hailfinger, G.; Kasperek, W.; Kleefeldt, K.; Landis, J.D.; Meier, A.; Moro, A.; Platania, P.; Plaum, B.; Poli, E.; Rampini, G.; Saibene, G.; Sanchez, F.; Sauter, O.; Serikov, A.; Shidara, H.; Sozzi, C.; Spaeh, P.; Udintsev, V.S.; Zohm, H.; Zucca, C.
Overview of the ITER EC upper launcher.
4th IAEA Technical Meeting on ECRH Physics and Technology in ITER, Wien, A, June 6-8, 2007
- Illy, S.; Schmid, M.; Braune, H.; Erckmann, V.; Laqua, H.P.; Noke, F.; Purps, F.
Enhanced transversal collector sweeping for high power CW gyrotrons.
Int. Conf. on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz), Pasadena, CA, September 15-19, 2008
Proc. on USB-Stick, Piscataway, N.J.; IEEE, 2008
- Jin, J.; Thumm, M.; Piosczyk, B.; Flamm, J.; Prinz, O.; Rzesnicki, T.
Improved quasi-optical launcher for coaxial cavity ITER gyrotron.
Int. Conf. on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz); Pasadena, CA, September 15-19, 2008
Proc. on USB-Stick, Piscataway, N.J.; IEEE, 2008
- Kartikeyan, M.V.; Borie, E.; Gantenbein, G.; Kern, S.; Piosczyk, B.; Thumm, M.K.
Studies on a 170 GHz, 1.0-1.3 MW, CW conventional cavity gyrotron.
Int. Conf. on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz), Pasadena, CA, September 15-19, 2008
Proc. on USB-Stick, Piscataway, N.J., IEEE, 2008
- Kasperek, W.; Petelin, M.; Shchegolkov, D.; Erckmann, V.; Bruschi, A.; Braune, H.; Hollmann, F.; Jonitz, L.; Michel, G.; Laqua, H.P.; Noke, F.; Purps, F.; Brand, P.; Plaum, B.; Wubie, W.; Koshurinov, Y.; Lubyako, L.; Bin, W.; D'Arcangelo, O.; ECRH Groups at IPP Greifswald, FZK Karlsruhe, IFP Milano, IAP Nizhny Novgorod and IPF Stuttgart
Power combiners and fast switches for advanced ECRH systems.
7th Int. Workshop Strong Microwaves: Sources and Applications, Nizhny Novgorod, Russia, July 27 – August 2, 2008; Book of Abstracts S. 24
20th Joint Russian-German Meeting on ECRH and Gyrotrons, Nizhny Novgorod, Russia, July 26 – August 3, 2008
Folien auf CD-ROM
- Kasperek, W.; Petelin, M.I.; Shchegolkov, D.Yu.; Erckmann, V.; Plaum, B.; Bruschi, A.; ECRH Groups at IPP Greifswald, FZK Karlsruhe and IPF Stuttgart
A fast switch, combiner and narrow-band filter for high-power millimetre wave beams.
4th IAEA Technical Meeting on ECRH Physics and Technology in ITER, Wien, A, June 6-8, 2007
- Kern, S.; Borie, E.
After cavity interaction in gyrotrons: on the influence of different models for non-uniform magnetic fields.
Int. Conf. on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz), Pasadena, CA, September 15-19, 2008
Proc. on USB-Stick; Piscataway, N.J., IEEE, 2008
- Kern, S.; Borie, E.; Illy, S.; Prinz, O.; Thumm, M.
Theoretical study of 174 GHz operation of the W7-X 1 MW, 140 GHz gyrotron.
Int. Conf. on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz), Pasadena, CA, September 15-19, 2008
Proc. on USB-Stick; Piscataway, N.J.; IEEE, 2008
- Kern, S.; Avramides, K.; Beringer, M.; Dumbrajs, O.; Liu, Y.
Gyrotron mode competition calculations: investigations on the choice of numerical parameters.
Int. Conf. on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz), Pasadena, CA, September 15-19, 2008
Proc. on USB-Stick; Piscataway, N.J., IEEE, 2008
- Kern, S.
Gyrotrons
2nd Int. Summer School on Fusion Technologies, Karlsruhe, September 1-12, 2008; Folien online

- Landman, I.; Janeschitz, G.
Calculation of poloidal magnetic field in Tokamak code TOKES.
- Lalousis, P. [Hrsg.]
35th European Physical Society Conf. on Plasma Physics combined with the 10th Int. Workshop on Fast Ignition of Fusion Targets, Hersonissos, GR, June 9-13, 2008
Contributed Papers on CD-ROM P-5.057
European Physical Society, 2008
(Europhysics Conference Abstracts; 32D)
- Leuterer, F.; AUG-ECRH team
Operation experience with the ASDEX upgrade ECRH system.
20th Joint Russian-German Meeting on ECRH and Gyrotrons, Nizhny Novgorod, Russia, July 26 – August 3, 2008
Folien auf CD-ROM
- Pestchanyi, S.; Landman, I.
Simplified model for carbon plasma production by ELMs in ITER.
Lalousis, P. [Hrsg.]
35th European Physical Society Conf. on Plasma Physics combined with the 10th Int. Workshop on Fast Ignition of Fusion Targets, Hersonissos, GR, June 9-13, 2008
Contributed Papers on CD-ROM P-4.024
European Physical Society, 2008
(Europhysics Conference Abstracts; 32D)
- Piosczyk, B.; Alberti, S.; Albajar, F.; Avramidis, K.; Benin, P.; Bonicelli, T.; Cirant, S.; Dumbrajs, O.; Fasel, D.; Flamm, J.; Gantenbein, G.; Goodman, T.; Hogge, J.P.; Illy, S.; Jawla, S.; Jin, J.; Kern, S.; Lievin, C.; Pagonakis, I.; Prinz, O.; Rzesnicki, T.; Thumm, M.; Tran, M.Q.
Status of the European 2 MW, 170 GHz coaxial cavity gyrotron for ITER.
7th Int. Workshop Strong Microwaves: Sources and Applications, Nizhny Novgorod, Russia, July 27 – August 2, 2008; Book of Abstracts S. 18
20th Joint Russian-German Meeting on ECRH and Gyrotrons, Nizhny Novgorod, Russia, July 26 – August 3, 2008
Folien auf CD-ROM
- Plaum, B.; Bruschi, A.; Erckmann, V.; Kasperek, W.; Petelin, M.; ECRH Groups at IPP Greifswald, FZK Karlsruhe, IFP Milano, IAP Nizhny Novgorod and IPF Stuttgart
Power combiners and fast switches for high power ECRH systems.
Workshop on RF-Heating Technology for Fusion Plasmas 2008, San Diego, CA, September 10-12, 2008
Folien auf USB-Stick
- Rzesnicki, T.; Piosczyk, B.; Flamm, J.; Jin, J.; Kern, S.; Prinz, O.; Thumm, M.
Recent experimental results on the 170 GHz, 2 MW coaxial cavity pre-prototype gyrotron for ITER.
Int. Conf. on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz), Pasadena, CA, September 15-19, 2008
Proc. on USB-Stick, Piscataway, N.J., IEEE, 2008
- Sabchevski, S.; Illy, S.; Piosczyk, B.; Borie, E.; Zhelyazkov, I.
Towards the formulation of a realistic 3D model for simulation of magnetron injection guns for gyrotrons (a preliminary study).
Wissenschaftliche Berichte, FZKA-7409 (Juli 2008)
- Thumm, M.; Braune, H.; Dammertz, G.; Erckmann, V.; Gantenbein, G.; Illy, S.; Kern, S.; Kasperek, W.; Laqua, H.P.; Lechte, C.; Legrand, F.; Leonhardt, W.; Lievin, C.; Michel, G.; Piosczyk, B.; Prinz, O.; Schmid, M.
1 MW, 140 GHz series gyrotrons for the W7-X stellarator.
7th Int. Workshop on Strong Microwaves: Sources and Applications, Nizhny Novgorod, Russia, July 27 – August 2, 2008; Book of Abstracts S. 27
20th Joint Russian-German Meeting on ECRH and Gyrotrons, Nizhny Novgorod, Russia, July 26 – August 3, 2008
Folien auf CD-ROM
- Thumm, M.; Flamm, J.; Gantenbein, G.; Illy, S.; Jin, J.; Kern, S.; Piosczyk, B.; Prinz, O.; Rzesnicki, T.; Alberti, S.; Fasel, D.; Goodman, T.; Hogge, J.P.; Jawla, S.; Pagonakis, I.; Tran, M.Q.; Albajar, F.; Bonicelli, T.; Avramidis, K.; Benin, P.; Lievin, C.; Cirant, S.; Dumbrajs, O.
Progress of the European 2 MW, 170 GHz coaxial cavity gyrotron for ITER.
Workshop on RF-Heating Technology of Fusion Plasmas 2008, San Diego, CA, September 10-12, 2008
Folien auf USB-Stick
- Thumm, M.; Gantenbein, G.; Illy, S.; Piosczyk, B.; Schmid, M.; Braune, H.; Erckmann, V.; Laqua, H.P.; Marushchenko, N.B.; Michel, G.; Turkin, Y.; Weissgerber, M.; Brand, P.; Kasperek, W.; Lechte, C.; W7-X ECRH Teams at IPP, IPF and FZK.
Progress of the 10-MW 140 GHz ECH system for the stellarator W7-X.
Workshop on RF-Heating Technology for Fusion Plasmas 2008, San Diego, CA, September 10-12, 2008
Folien auf USB-Stick
- Thumm, M.
State-of-the-art of high power gyro-devices and free electron masers update 2007.
Wissenschaftliche Berichte, FZKA-7392 (März 2008)
- Wagner, D.; Franke, T.; Leuterer, F.; Monaco, F.; München, M.; Schütz, H.; Stober, J.; Volpe, F.; Zohm, H.; Thumm, M.; Heidinger, R.; Meier, A.; Gantenbein, G.; Flamm, J.; Kasperek, W.; Lechte, C.; Litvak, A.; Denisov, G.; Cirkov, A.; Popov, L.; Nichiporenko, V.; Myasnikov, V.; Tai, E.; Solyanova, E.; Malygin, S.
Multi-frequency ECRH as ASDEX upgrade.
7th Int. Workshop Strong Microwaves: Sources and Applications, Nizhny Novgorod, Russia, July 27 – August 2, 2008; Book of Abstracts S. 72
20th Joint Russian-German Meeting on ECRH and Gyrotrons, Nizhny Novgorod, Russia, July 26 – August 3, 2008
Folien auf CD-ROM
- Wagner, D.; Franke, T.; Leuterer, F.; Monaco, F.; München, M.; Schütz, H.; Stober, J.; Volpe, F.; Zohm, H.; Thumm, M.; Gantenbein, G.; Flamm, J.; Heidinger, R.; Meier, A.; Kasperek, W.; Lechte, C.; Litvak, A.; Denisov, G.; Cirkov, A.; Tai, E.; Popov, L.; Nichiporenko, V.; Myasnikov, V.; Solyanova, E.; Malygin, S.
Progress with the new multi-frequency ECRH system for ASDEX upgrade.
Int. Conf. on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz), Pasadena, CA, September 15-19, 2008
Proc. on USB-Stick, Piscataway, N.J., IEEE, 2008

Wagner, D.; Grünwald, G.; Hicks, N.; Leuterer, F.; Monaco, F.; München, M.; Schütz, H.; Sips, G.; Stober, J.; Volpe, F.; Zohm, H.; Franke, T.; Thumm, M.; Heidinger, R.; Gantenbein, G.; Meier, A.; Kasperek, W.; Lechte, C.; Litvak, A.; Denisov, G.; Chirkov, A.; Tai, E.; Popov, L.; Nichiporenko, V.; Myasnikov, V.; Solyanova, E.; Malygin, S.

Status of the new multi-frequency ECRH system at ASDEX upgrade.

Workshop on RF-Heating Technology for Fusion Plasmas 2008, San Diego, CA, September 10-12, 2008

Folien auf USB-Stick

Wörner, E.; Wild, C.; Müller-Sebert, W.; Kriele, A.; Brink, D.; Heidinger, R.; Thumm, M.; Biener, J.; Hamza, A.
CVD diamond disks and shells for nuclear fusion experiments
35th IEEE Int. Conf. on Plasma Science (ICOPS), Karlsruhe, June 15-19, 2008; IEEE Conf. Records – Abstracts S. 122

Vorträge, die nicht in gedruckter Form vorliegen:

Alberti, S.; Albajar, F.; Avramidis, K.A.; Benin, P.; Bonicelli, T.; Cirant, S.; Droz, E.; Dumbrajs, O.; Fasel, D.; Goodman, T.; Hogge, J.P.; Illy, S.; Jawla, S.; Jin, J.; Kern, S.; Lievin, C.; Marletaz, B.; Marmillod, Ph.; Pagonakis, I.; Perez, A.; Piosczyk, B.; Porte, L.; Rzesnicki, T.; Siravo, U.; Thumm, M.; Tran, M.Q.

Status of development of the 2 MW, 170 coaxial-cavity gyrotron for ITER.

35th IEEE Int. Conf. on Plasma Science (ICOPS), Karlsruhe, June 15-19, 2008; IEEE Conf. Records – Abstracts S. 199

Avramides, K.A.; Vomvoridis, J.L.; Kern, S.; Pagonakis, I.G.
Electron-beam modeling in gyrotron interaction simulations.
35th IEEE Int. Conf. on Plasma Science (ICOPS), Karlsruhe, June 15-19, 2008

IEEE Conference Records – Abstracts S. 249

Avramides, K.A.; Dumbrajs, O.; Kern, S.; Pagonakis, I.Gr.; Vomvoridis, J.L.

Mode selection for a 170 GHz, 1 MW gyrotron.

7th School of Fusion Physics and Technology, Volos, GR, April 14-19, 2008

35th European Physical Society Conf. on Plasma Physics, Hersonissos, GR, June 9-13, 2008

Bazylev, B.; Janeschitz, G.; Landman, I.S.; Loarte, A.; Klimov, N.S.; Podkovyrov, V.L.; Safronov, V.M.

Experimental and theoretical investigation of droplet emission from tungsten melt layer.

25th Symp. on Fusion Technology (SOFT 2008), Rostock, September 15-19, 2008. Book of Abstracts P1.59

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

Experimental validation of 3D simulations of tungsten melt erosion under ITER-like transient loads.

18th Int. Symp. on Plasma Surface Interactions (PSI-18), Toledo, E, May 26-30, 2008

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

Simulations on material damage to divertor and first wall armour under ITER transient loads by modelling and experiments.

22nd IAEA Fusion Energy Conf., Geneve, CH, October 13-18, 2008; Book of Abstracts S. 164

Beringer, M.H.; Kern, S.; Illy, S.; Thumm, M.

Towards a 4 MW, 170 GHz coaxial gyrotron resonator and gun design.

1st ITG Int. Vacuum Electronics Workshop, Bad Honnef, November 10-11, 2008

D'Andrea, D.; Schneider, R.; Munz, C.D.

Intra-species charged particle collisions for PIC simulations.
35th IEEE Int. Conf. on Plasma Science (ICOPS), Karlsruhe, June 15-19, 2008

IEEE Conference Records – Abstracts S.429

Darbos, C.; Henderson, M.; Albajar, F.; Bigelow, T.; Bonicelli, T.; Chavan, R.; Denisov, G.G.; Fasel, D.; Heidinger, R.; Hogge, J.P.; Kobayashi, N.; Piosczyk, B.; Rao, S.L.; Rasmussen, D.; Saibene, G.; Sakamoto, K.; Takahashi, K.
Progress in design and integration of the ITER electron cyclotron H&CD system.

25th Symp. on Fusion Technology (SOFT 2008), Rostock, September 15-19, 2008; Book of Abstracts P3.11

Erckmann, V.; Brand, P.; Braune, H.; Gantenbein, G.; Kasperek, W.; Laqua, H.P.; Marushchenko, N.B.; Michel, G.; Petelin, M.I.; Shchegolkov, D.Yu.; Thumm, M.; Turkin, Y.; W7-X ECRH Teams at IPP, FZK and IPF

Steady state ECRH for next step magnetic fusion devices.

25th Symp. on Fusion Technology (SOFT 2008), Rostock, September 15-19, 2008

Book of Abstracts I3.3

Fertig, M.; Petkow, D.; Stindl, T.; Auweter-Kurtz, M.; Quandt, M.; Munz, C.D.; Neudorfer, J.; Roller, S.; D'Andrea, D.; Schneider, R.

Hybrid code development for the numerical simulation of stationary magnetoplasma dynamic thrusters.

High Performance Computing in Science and Engineering: The 11th Results and Review Workshop of the HLRS, Stuttgart, September 29-30, 2008

Gantenbein, G.; Braune, H.; Dammertz, G.; Erckmann, V.; Illy, S.; Kern, S.; Kasperek, W.; Laqua, H.P.; Lechte, F.; Leonhardt, W.; Lievin, C.; Michel, G.; Piosczyk, B.; Prinz, O.; Schmid, M.; Thumm, M.

1 MW 140 GHz gyrotron development for W7-X at FZK.

1st ITG Int. Vacuum Electronics Workshop, Bad Honnef, November 10-11, 2008

Gantenbein, G.; Braune, H.; Dammertz, G.; Erckmann, V.; Illy, S.; Kern, S.; Kasperek, W.; Laqua, H.P.; Lechte, C.; Legrand, F.; Leonhardt, W.; Lievin, C.; Michel, G.; Piosczyk, B.; Prinz, O.; Schmid, M.; Thumm, M.

Experimental results of series gyrotrons for the stellarator W7-X.

22nd IAEA Fusion Energy Conf., Geneve, CH, October 13-18, 2008, Book of Abstracts S. 115

Gantenbein, G.; Braune, H.; Dammertz, G.; Erckmann, V.; Illy, S.; Kern, S.; Kasperek, W.; Laqua, H.P.; Lechte, C.; Legrand, F.; Leonhardt, W.; Lievin, C.; Michel, G.; Piosczyk, B.; Prinz, O.; Schmid, M.; Thumm, M.

Recent results in high power gyrotron development for W7-X at FZK.

35th IEEE Int. Conf. on Plasma Science (ICOPS), Karlsruhe, June 15-19, 2008

IEEE Conference Records – Abstracts S. 201

- Gantenbein, G.; Dammertz, G.; Illy, S.; Leonhardt, W.; Piosczyk, B.; Schmid, M.; Thumm, M.; Braune, H.; Erckmann, V.; Michel, G.; Kasperek, W.; Legrand, F.; Lievin, C.; Prinz, O.; Thumm, M.
The W7-X 140 GHz, 1 MW gyrotron – status and recent results.
15th Joint Workshop on Electron Cyclotron Emission and Electron Cyclotron Resonance Heating, Yosemite National Park, CA, March 19-13, 2008
Book of Abstracts PII-TECH/GYRO-5
- Goodman, T.; Alberti, S.; Droz, E.; Fasel, D.; Hogge, J.; Porte, L.; Siravo, U.; Tran, M.; Albajar, F.; Bonicelli, T.; Benin, P.; Bethuys, S.; Lievin, C.; Cirant, S.; Dumbrajs, O.; Gantenbein, G.; Illy, S.; Jin, J.; Kern, S.; Piosczyk, B.; Rzesnicki, T.; Thumm, M.
First experimental results from the EU 2 MW coaxial cavity ITER gyrotron prototype.
5th Joint Workshop on Electron Cyclotron Emission and Electron Cyclotron Resonance Heating, Yosemite National Park, CA, March 19-13, 2008
Book of Abstracts PII-TECH/GYRO-3
- Heidinger, R.; Cirant, S.; Chavan, R.; De Baar, M.; Elzendoorn, B.; Gantenbein, G.; Henderson, M.; Kleefeldt, K.; Leonhardt, W.; Meier, A.; Mellein, D.; Saibene, G.; Scherer, T.; Spaeh, P.; Strauss, D.; Vaccaro, A.; Zohm, H.
Design and testing of the ECH upper port plug for ITER.
35th IEEE Int. Conf. on Plasma Science (ICOPS), Karlsruhe, June 15-19, 2008
IEEE Conference Records – Abstracts S. 121
- Henderson, M.A.; Alberti, S.; Chavan, R.; Fasel, D.; Goodman, T.P.; Pagonakis, I.G.; Sauter, O.; Siravo, U.; Udintsev, V.S.; Zucca, C.; Saibene, G.; Albajar, F.; Bonicelli, T.; Cirant, S.; Farina, D.; Ramponi, G.; Heidinger, R.; Piosczyk, B.; Thumm, M.
A revised ITER EC system baseline design proposal.
15th Joint Workshop on Electron Cyclotron Emission and Electron Cyclotron Resonance Heating, Yosemite National Park, CA, March 10-13, 2008
Book of Abstracts TECH/GYRO-IV-1
- Igitchkanov, Yu.; Sagara, A.; Murakami, S.; Sudo, S.; Motojima, O.
Assessment of impurity concentration in the helical reactor FFHR.
Development of Physics and Technology of Stellarators/Heliotrons en route to DEMO: 18th Int. Toki Conf., Toki City, J, December 9-12, 2008, Book of Abstracts S. 64
- Igitchkanov, Yu.; Bazylev, B.; Murakama, S.
Calculation of the runaway electrons stopping power in ITER.
Development of Physics and Technology of Stellarators/Heliotrons en route to DEMO: 18th Int. Toki Conf., Toki City, J, December 9-12, 2008, Book of Abstracts S. 56
- Igitchkanov, Yu.; Sagara, A.; Murakami, S.; Sudo, S.; Motojima, O.
Impurity control in helical reactor.
Development of Physics and Technology of Stellarators/Heliotrons en route to DEMO: 18th Int. Toki Conf., Toki City, J, December 9-12, 2008. Book of Abstracts S. 51
- Illy, S.; Borie, E.; Dammertz, G.; Piosczyk, B.; Schmid, M.
Particle-in-cell simulation tools for design and optimization of high power CW gyrotron oscillators.
7th School of Fusion Physics and Technology, Volos, GR, April 14-19, 2008
- Illy, S.; Piosczyk, B.
Simulating the effect of secondary emission in the collector of high power CW gyrotrons.
35th IEEE Int. Conf. on Plasma Science (ICOPS), Karlsruhe, June 15-19, 2008
IEEE Conference Records – Abstracts S. 415
- Jawla, S.K.; Hogge, J.P.; Goodman, T.; Alberti, S.; Piosczyk, B.; Rzesnicki, T.; Lievin, C.
Beam profile measurements of the output microwave beam of 2 MW/170 GHz coaxial-cavity gyrotron for ITER.
35th IEEE Int. Conf. on Plasma Science (ICOPS), Karlsruhe, June 15-19, 2008
IEEE Conference Records – Abstracts S. 249
- Jin, J.; Thumm, M.; Piosczyk, B.; Rzesnicki, T.
Improved launcher/mode converter for coaxial cavity ITER gyrotron.
35th IEEE Int. Conf. on Plasma science (ICOPS), Karlsruhe, June 15-19, 2008
IEEE Conference Records – Abstracts S. 250
- Kartikyan, M.V.; Kumar, A.; Borie, E.; Thumm, M.K.
Studies on a 127.5 GHz, 1.9-1.3 MW, longpulse start-up gyrotron for ITER.
35th IEEE Int. Conf. on Plasma Science (ICOPS), Karlsruhe, June 15-19, 2008; IEEE Conf. Records – Abstracts S. 202
- Kasperek, W.; Petelin, M.I.; Erckmann, V.; Bruschi, A.; Noke, F.; Purps, F.; Hollmann, F.; Koshurinov, Y.; Lybyakov, L.; Shchegolkov, D.Y.; Plau, B.; Wubie, W.; ECRH Groups at IPP Greifswald, FZK Karlsruhe, IFP Milano, IAP Nizhny Novgorod and IPF Stuttgart
Power combiners, fast switches and filters for advanced ECRH systems.
25th Symp. on Fusion Technology (SOFT 2008), Rostock, September 15-19, 2008; Book of Abstracts P2.62
- Kern, S.; Rzesnicki, T.; Dumbrajs, O.; Flamm, J.; Gantenbein, G.; Illy, S.; Jin, J.; Piosczyk, B.; Prinz, O.; Thumm, M.
Recent improvements on the 170 GHz, 1,5 MW coaxial cavity gyrotron at FZK.
35th IEEE Int. Conf. on Plasma Science (ICOPS), Karlsruhe, June 15-19, 2008; IEEE Conf. Records – Abstracts S. 199
- Kern, S.; Rzesnicki, T.; Gantenbein, G.; Illy, S.; Jin, J.; Piosczyk, B.; Thumm, M.; Dumbrajs, O.; Flamm, J.; Prinz, O.
Status of experiments on the EU 2 MW coaxial cavity ITER gyrotron pre-prototype at FZK.
15th Joint Workshop on Electron Cyclotron Emission and Electron Cyclotron Resonance Heating, Yosemite National Park, CA, March 10-13, 2008
Book of Abstracts PII-TECH/GYRO-4
- Klimov, N.; Podkovyrov, V.; Zhilukhin, A.; Kovalenko, D.; Bazylev, B.; Janeschitz, G.; Landman, I.; Pestchanyi, S.; Federici, G.; Loarte, A.; Merola, M.; Linke, J.; Hirai, T.; Compan, J.
Experimental study of PEFCs erosion under ITER-like transient loads at plasma gun facility QSPA.
18th Int. Symp. on Plasma Surface Interactions (PSI-18), Toledo, E, May 26-30, 2008
- Landman, I.S.; Janeschitz, G.
Modelling of SOL transport and radiation losses for ITER with the integrated tokamak code TOKES.
18th Int. Conf. on Plasma Surface Interactions, Toledo, E, May 26-30, 2008

- Liu, Y.; Kern, S.; Beringer, M.H.; Thumm, M.
Multimode calculations of frequency tunable gyrotrons for dynamic nuclear polarization applications.
35th IEEE Int. Conf. on Plasma Science (ICOPS), Karlsruhe, June 15-19, 2008; IEEE Conf. Records – Abstracts S. 252
- Louksha, O.I.; Sominski, G.G.; Samsonov, D.B.; Dammertz, G.; Piosczyk, B.; Thumm, M.K.
Effect of ion bombardement on emission characteristics of gyrotron cathodes.
35th IEEE Int. Conf. on Plasma Science (ICOPS), Karlsruhe, June 15-19, 2008; IEEE Conf. Records – Abstracts S. 226
- Pagonakis, I.G.; Hogge, J.P.; Alberti, S.; Avramides, K.A.; Piosczyk, B.
Preliminary numerical study of the beam neutralization effect in the EU 170 GHz, 2 MW coaxial gyrotron.
35th IEEE Int. Conf. on Plasma Science (ICOPS), Karlsruhe, June 15-19, 2008; IEEE Conf. Records – Abstracts S. 248
- Pestchanyi, S.; Landman, I.
Experimental verification of FOREV-2D simulations for the plasma shield.
18th Int. Symp. on Plasma Surface Interactions (PSI-18), Toledo, E, May 26-30, 2008
- Pestchanyi, S.
ITER divertor armour issues: lifetime, safety and influence on its performance.
Conf. on Plasma Physics and Control Fusion, Alushta, UA, September 20-27, 2008
- Pestchanyi, S.E.; Safronov, V.M.; Landman, I.S.; Janeschitz, G.; Loarte, A.; Igitkhanov, Y.; Bazylev, B.N.
Integrated modelling of ITER plasma dynamics and wall processes following type I ELMs and consequences for tokamak operation.
22nd IAEA Fusion Energy Conf., Geneva, CH, October 13-18, 2008; Book of Abstracts S. 165
- Piosczyk, B.
Development of multi-megawatt gyrotrons at FZK. Present status and goals.
7th School of Fusion Physics and Technology, Volos, GR, April 14-19, 2008
- Piosczyk, B.
High power gyrotrons for EC H&CD applications in fusion plasmas – basic design, status and goals.
7th School of Fusion Physics and Technology, Volos, GR, April 14-19, 2008
- Prinz, O.; Gantenbein, G.; Thumm, M.
Advanced quasi-optical mode converter for a multi-frequency gyrotron.
9th IEEE Int. Vacuum Electronics Conf. (IVEC 2008), Monterey, CA, April 22-24, 2008; Book of Abstracts S. 64-65
- Prinz, O.; Arnold, A.; Flamm, J.; Gantenbein, G.; Thumm, M.
Recent development of the step-tunable gyrotron at FZK.
35th IEEE Int. Conf. on Plasma Science (ICOPS), Karlsruhe, June 15-19, 2008; IEEE Conf. Records – Abstracts S. 202
- Quandt, M.; Munz, C.D.; Schneider, R.
Convergence, stability and accuracy of a new high order relativistic particle push method.
35th IEEE Int. Conf. on Plasma Science (ICOPS), Karlsruhe, June 15-19, 2008
IEEE Conference Records – Abstracts S. 430
- Rzesnicki, T.; Piosczyk, B.; Flamm, J.; Jin, J.; Kern, S.; Prinz, O.; Thumm, M.
170 GHz, 2 MW coaxial cavity gyrotron – experimental investigations on the pre-prototype tube.
9th IEEE Int. Vacuum Electronics Conf. (IVEC 2008), Monterey, CA, April 22-24, 2008
Book of Abstracts S. 30-31
- Rzesnicki, T.; Kern, S.; Piosczyk, B.; Flamm, J.; Jin, J.; Prinz, O.; Thumm, M.
A prototype of a 2 MW, 170 GHz coaxial cavity gyrotron for ITER. A close perspective.
1st ITG Int. Vacuum Electronics Workshop, Bad Honnef, November 10-11, 2008
- Rzesnicki, T.; Piosczyk, B.; Flamm, J.; Jin, J.; Kern, S.; Prinz, O.; Thumm, M.
Experimental investigation on the pre-prototype of the 170 GHz, 2 MW coaxial cavity gyrotron for ITER.
22nd IAEA Fusion Energy Conf., Geneva, CH, October 13-18, 2008; Book of Abstracts S. 99
- Schmid, M.; Hrabal, D.; Piosczyk, B.; Thumm, M.
Past and future upgrades of the gyrotron high voltage cathode power supplies at the Forschungszentrum Karlsruhe.
25th Symp. on Fusion Technology (SOFT 2008), Rostock, September 15-19, 2008; Book of Abstracts P1.18
- Schmid, M.; Dammertz, G.; Gantenbein, G.; Hrabal, D.; Illy, S.; Kern, S.; Kasperek, W.; Leonhardt, W.; Müller, G.; Piosczyk, B.; Thumm, M.
The gyrotron test facility and its power supplies at the Forschungszentrum Karlsruhe.
1st ITG Int. Vacuum Electronics Workshop, Bad Honnef, November 10-11, 2008
- Shchegolkov, D.; Kasperek, W.; Petelin, M.; Erckmann, V.; ECRH Groups at IPP Greifswald, FZK Karlsruhe and IPF Stuttgart
High-power test of a fast switch and combiner for millimetre wave beams.
15th Joint Workshop on Electron Cyclotron Emission and Electron Cyclotron Resonance Heating, Yosemite National Park, CA, March 10-13, 2008
Book of Abstracts TECH/GYRO-III-4
- Stober, J.; Grünwald, G.; Leuterer, F.; Manini, A.; Monaco, F.; München, M.; Neu, R.; Schütz, H.; Wagner, D.; Zohm, H.; Franke, T.; Thumm, M.; Gantenbein, G.; Heidinger, R.; Meier, A.; Kasperek, W.; Lechte, C.; Litvak, A.; Denisov, G.G.; Chirkov, A.V.; Tai, E.M.; Popov, L.G.; Nichiporenko, V.O.; Myasnikov, V.E.; Solyanova, E.A.; Malygin, S.A.; Meo, F.; Woskov, P.
On the way to a multi-frequency ECRH system for ASDEX upgrade.
15th Joint Workshop on Electron Cyclotron Emission and Electron Cyclotron Resonance Heating, Yosemite National Park, CA, March 10-13, 2008
Book of Abstracts TECH/GYRO-III-1
- Thumm, M.; Dammertz, G.; Gantenbein, G.; Illy, S.; Leonhardt, W.; Neffe, G.; Piosczyk, B.; Schmid, M.; Braune, H.; Erckmann, V.; Laqua, H.P.; Michel, G.; Weissgerber, M.; Brand, P.; Kasperek, W.; Lechte, C.
10 MW, 140 GHz, CW millimeter wave heating system for the stellarator W7-X.
Development of Physics and Technology of Stellarators/ Heliotrons en route to DEMO: 18th Int. Toki Conf., Toki City, J, December 9-12, 2008

Thumm, M.

Facilities' perspectives of the association Euratom-FZK.

Overview and mission orientation. Important facility enhancements.

European Fusion Facility Review Meeting, Bruxelles, B, May 27-28, 2008

Thumm, M.; Brand, P.; Braune, H.; Erckmann, V.; Gantenbein, G.; Illy, S.; Kasperek, W.; Laqua, H.P.; Lechte, C.; Marushchenko, N.B.; Michel, G.; Piosczyk, B.; Schmid, M.; Turkin, Y.; Weissgerber, M.; W7-X ECRH Teams at IPP, IPF and FZK.

Status and high power performance of the 10-MW 140 GHz ECH system for the stellarator W7-X.

Development of Physics and Technology of Stellarators/ Heliotrons en route to DEMO: 18th Int. Toki Conf., Toki City, J, December 9-12, 2008; Book of Abstracts S. 75

Wagner, D.; Leuterer, F.; Stober, J.; Manini, A.; Monaco, F.; Münich, M.; Schütz, H.; Zohm, H.; Franke, T.; Thumm, M.; Heiding, R.; Meier, A.; Gantenbein, G.; Flamm, J.; Kasperek, W.; Litvak, A.G.; Cirkov, A.V.; Popov, L.G.; Nichiporenko, V.O.; Myasnikov, V.E.; Denisov, G.G.; Tai, E.M.; Solyanova, E.A.; Malygin, S.A.

Progress with the new multi-frequency ECRH system for ASDEX upgrade.

35th IEEE Int. Conf. on Plasma Science (ICOPS), Karlsruhe, June 15-19, 2008

Patente:

Pestchanyi, S.

Verbesserter plattenförmiger Carbonfaser-Verbundwerkstoff.

DE-OS 10 2005 019 730 (2.11.2006)

DE-PS 10 2005 019 730 (2008)

EP-OS 1 877 354 (16.1.2008)

EP-PS 1 877 354 (30.7.2008)

NANOMIKRO: Programm Nano- und Mikrosysteme

Buchbeitrag:

Link, G.; Miksch, S.; Thumm, M.

Experimenteller Nachweis nicht-thermischer Effekte beim Mikrowellensintern von ZrO₂ Keramik.

Kriegesmann, J. [Hrsg.]

Technische Keramische Werkstoffe.

107. Ergänzungslieferung – Keramische Werkstoffe – November 2008 Kapitel 3.6.2.2

Köln: Deutscher Wirtschaftsdienst (Loseblattsammlung)

Publikationen in begutachteten Zeitschriften:

Chauhan, N.; Mittal, A.; Wagner, D.; Kartikeyan, M.V.; Thumm, M.K.

Design and optimization of nonlinear tapers using particle swarm optimization.

International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 29(2008) S.792-98.

DOI:10.1007/s10762-008-9366-5

Ginzburg, N.S.; Peskov, N.Yu.; Sergeev, A.S.; Denisov, G.G.; Kuzikov, S.V.; Zaslavsky, V.Yu.; Arzhannikov, A.V.; Kalinin, P.V.; Sinitsky, S.L.; Thumm, M.

Observation of the high-Q modes inside the resonance zone of two-dimensional Bragg structures.

Applied Physics Letters, 92(2008) S.103512/1-3

DOI:10.1063/1.2891103

Kartikeyan, M.V.; Kumar, A.; Kamakshi, S.; Jain, P.K.; Illy, S.; Borie, E.; Piosczyk, B.; Thumm, M.K.

RF behavior of a 200-kW CW gyrotron.

IEEE Transactions on Plasma Science, 36(2008) S.631-36

DOI:10.1109/TPS.2008.923762

Link, G.; Miksch, S.; Thumm, M.

Proof of non-thermal effects in microwave sintered zirconia ceramics by microstructure analysis.

Ceramic Forum International: cfi / Berichte der Deutschen Keramischen Gesellschaft, 85(2008) Nr. 13, S. 55-59

Seron, D.; Oates, D.E.; Halbritter, J.

Effect of bulk Ca-substitution in YBaCuO thin films for microwave applications.

Physica C, 468(2008) S.54-59

DOI:10.1016/j.physc.2007.10.014

Sonstige Publikationen die in gedruckter Form vorliegen:

Ginzburg, N.S.; Peskov, N.Yu.; Sergeev, A.S.; Zaslavsky, V.Yu.; Arzhannikov, A.V.; Kalinin, P.V.; Sinitsky, S.L.; Phelps, A.D.R.; Konoplev, I.V.; Cross, A.W.; Thumm, M.

Generation of powerful coherent radiation based on 2D distributed feedback.

7th Int. Workshop on Strong Microwaves: Sources and Applications, Nizhny Novgorod, Russia, July 27 – August 2, 2008; Book of Abstracts S. 42

20th Joint Russian-German Meeting on ECRH and Gyrotrons, Nizhny Novgorod, Russia, July 26 – August 3, 2008

Folien auf CD-ROM

Link, G.; Heissler, St.; Faubel, W.; Weidler, P.; Thumm, M.

IR spectroscopy diagnostics for microwave processing.

7th Int. Workshop on Strong Microwaves: Sources and Applications, Nizhny Novgorod, Russia, July 27 – August 2, 2008; Book of Abstracts S. 114

20th Joint Russian-German Meeting on ECRH and Gyrotrons, Nizhny Novgorod, Russia, July 26 – August 3, 2008

Folien auf CD-ROM

- Link, G.; Ichikawa, J.; Thumm, M.
Millimeter wave sintering of metal powder compacts utilizing a modified dilatometer for resistivity measurements.
1st Global Congress on Microwave Energy Applications, Otsu, J, August 4-8, 2008, Proc. S. 561-64
Tokyo: Japan Society of Electromagnetic Wave Energy Applications, 2008
- Link, G.; Heissler, S.; Faubel, W.; Weidler, P.; Miksch, S.; Thumm, M.
Novel methods to investigate microwave specific effects.
1st Global Congress on Microwave Energy Applications, Otsu, J, August 4-8, 2008, Proc. S. 275-78
Tokyo: Japan Society of Electromagnetic Wave Energy Applications, 2008
- Link, G.; Miksch, S.; Takayama, S.; Thumm, M.
Sintering in polarized microwave fields. A novel method to proof non-thermal microwave effects.
Heinrich, J.G. [Hrsg.]
Proc. of the 10th Int. Conf. of the European Ceramic Society, Berlin, June 17 – 21, 2007
Baden-Baden: Göller Verl., 2008, CD-ROM S. 165-70
- Schultheiss, C.
Mass attraction caused by ultralong-wave photons?
Advanced Studies in Theoretical Physics, 2(2008) Nr. 10, S.491-505
- Vorträge, die nicht in gedruckter Form vorliegen:**
- Feher, L.
Microwave power applications in aerospace manufacturing.
Seminar on Recent Advances in High Power Microwave Research and Applications, Melbourne, AUS,
January 29-31, 2008
- Ginzburg, N.S.; Peskov, N.Yu.; Sergeev, A.S.; Zaslavsky, V.Yu.; Arzhannikov, A.V.; Kalinin, P.V.; Sinitsky, S.L.; Phelps, A.D.R.; Konoplev, I.V.; Cross, A.W.; Thumm, M.
Production of powerful spatially coherent radiation based on two-dimensional distributed feedback.
35th IEEE Int. Conf. on Plasma Science (ICOPS), Karlsruhe, June 15-19, 2008
IEEE Conference Records – Abstracts 114
- Ginzburg, N.S.; Zaslavsky, V.; Peskov, N.; Sergeev, A.S.; Arzhannikov, A.V.; Kalinin, P.V.; Sinitsky, S.L.; Thumm, M.
Two-dimensional Bragg structures for powerful planar FEM (modeling and experimental testing).
35th IEEE Int. Conf. on Plasma Science (ICOPS), Karlsruhe, June 15-19, 2008
IEEE Conference Records – Abstracts S. 149
- Idalgo, W.; Link, G.; Aroni, J.
Powder injection molding of SiC sintered in microwave oven.
Materials Science and Technology Conf., Pittsburgh, Pa., October 5-10, 2008
- Kartikyan, M.V.; Kumar, A.; Borie, E.; Illy, S.; Piosczyk, B.; Thumm, M.K.
Design studies of a 42 GHz, 200-250 kW, CW/longpulse gyrotron.
35th IEEE Int. Conf. on Plasma Science (ICOPS), Karlsruhe, June 15-19, 2008
IEEE Conference Records – Abstracts S. 251
- Kühn, J.; van Raay, F.; Quay, R.; Kiefer, R.; Bronner, W.; Seelmann-Eggebert, M.; Schlechtweg, M.; Mikulla, M.; Ambacher, O.; Thumm, M.
Balanced microstrip AlGaIn/GaN HEMT power amplifier MMIC for X-band applications.
European Microwave Week, Amsterdam, NL, October 27-31, 2008
- Link, G.; Heissler, St.; Faubel, W.; Weidler, P.; Thumm, M.
IR-spectroscopy for in-situ investigation of microwave processes.
35th IEEE Int. Conf. on Plasma Science (ICOPS), Karlsruhe, June 15-19, 2008
IEEE Conference Records – Abstracts S. 372
- MacInnes, P.; Konoplev, I.V.; Cross, A.W.; He, W.; Phelps, A.D.R.; Whyte, C.; Ronald, K.; Robertson, C.; Thumm, M.
Coaxial-2D-1D two-mirror cavity free-electron maser experiment.
35th IEEE Int. Conf. on Plasma Science (ICOPS), Karlsruhe, June 15-19, 2008
IEEE Conference Records – Abstracts S. 116
- Takayama, S.; Link, G.; Matsubara, A.; Louzguine, D.; Sani, S.; Sato, M.; Thumm, M.
Investigation of making iron by millimeter-wave heating.
35th IEEE Int. Conf. on Plasma Science (ICOPS), Karlsruhe, June 15-19, 2008
IEEE Conference Records – Abstracts S. 372
- Thumm, M.
Megawatt microwave power.
Seminar on Recent Advances in High Power Microwave Research and Applications, Melbourne, AUS, January 29-31, 2008

NUKLEAR: Programm Nukleare Sicherheitsforschung

Publikationen in begutachteten Zeitschriften:

Weisenburger, A.; Heinzl, A.; Fazio, C.; Müller, G.; Markow, V.G.; Kastanov, A.D.

Low cycle fatigue tests of surface modified T91 steel in 10^{-6} wt% oxygen containing $Pb_{45}Bi_{55}$ at 550 °C.

Journal of Nuclear Materials, 377(2008) S.261-67

DOI:10.1016/j.jnucmat.2008.02.075

Weisenburger, A.; Heinzl, A.; Müller, G.; Muscher, H.; Rousanov, A.

T91 cladding tubes with and without modified FeCrAlY coatings exposed in LBE at different flow, stress and temperature conditions.

Journal of Nuclear Materials, 376(2008) S.274-81

DOI:10.1016/j.jnucmat.2008.02.026

Sonstige Publikationen die in gedruckter Form vorliegen:

Heinzl, A.; Müller, G.; Weisenburger, A.

Compatibility of Ti_3SiC_2 (Maxthal 312) with oxygen containing liquid Pb and PbBi.

Int. Congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP'08), Anaheim, CA, June 8-12, 2008

Transactions of the American Nuclear Society, 98(2008)

S.1046

Heinzl, A.; Müller, G.; Weisenburger, A.

Corrosion investigations of Ti_3SiC_2 (Maxthal 312) in oxygen containing stagnant Pb and PbBi at temperatures between 550 and 750°C.

Jahrestagung Kerntechnik 2008, Hamburg, 27.-29. Mai 2008

Berlin: INFORUM GmbH, 2008 S.797-800, CD-ROM

Muscher, H.; Kieser, M.; Weisenburger, A.; Müller, G.;

Strömungssimulation zur Modellierung der Flüssigmetall-Korrosion/Erosion von Strukturmaterialien in Blei.

Jahrestagung Kerntechnik 2008, Hamburg, 27.-20. Mai 2008

Berlin: INFORUM GmbH, 2008 S. 801-04

Weisenburger, A.; Heinzl, A.; Müller, G.; Rousanov, A.

First results on T91 claddings with and without modified FeCrAlY coatings exposed in PbBi under varying conditions.

Structural Materials for Innovative Nuclear Systems (SMINS):

Workshop Proc. Karlsruhe, June 4-6, 2007

Paris: OECD/NEA, 2008 S. 147-57

Vorträge, die nicht in gedruckter Form vorliegen:

Heinzl, A.

Aktuelle Arbeiten und Perspektiven in der Reaktorsicherheitsforschung am FZK.

Kolloquium 'Perspektiven in der Kerntechnik', Hameln,

9.-12. März 2008

Kessler, G.

Nutzung der zivilen Kernenergie im 21. Jahrhundert.

Vortrag Universität Heidelberg, 30. Oktober 2008

Müller, G.

Liquid metal corrosion and corrosion protection.

Topical Day on Compatibility of Structural Materials with

Heavy Liquid Metals, Mol, B, April 29, 2008

Müller, G.; Weisenburger, A.; Heinzl, A.; Jianu, A.; Knebel,

J.U.; Fazio, C.; Konyas, J.; Schroer, C.; Rusanov, A.E.;

Engelko, V.I.; Markov, V.G.; Kastanov, A.D.

Status on liquid metal corrosion, mechanical properties and corrosion protection research at FZK and in collaboration with partners.

3rd Conf. on Heavy Liquid-Metal Coolants in Nuclear

Technologies (HLMC-2008), Obninsk, Russia, September 15-19, 2008

Weisenburger, A.

Corrosion barrier development

Material issues on HLM cooled nuclear systems (MIHNEAS),

VELLA Thematic School, Karlsruhe, November 12-14, 2008

Weisenburger, A.; Engelko, V.; An, W.; Heinzl, A.; Jianu, A.;

Lang, F.; Müller, G.; Zimmermann, F.

Pulsed electron beams and their use for material modification.

1st ITG Int. Vacuum Electronics Workshop, Bad Honnef,

November 10-11, 2008

Patente:

Engelko, V.; Heinzl, A.; Müller, G.; Schumacher, G.;

Weisenburger, A.; Zimmermann, F.

Verfahren zum Aufbringen einer hochtemperaturgeeigneten

FeCrAl-Schutzschicht, Hüllrohr mit einer derartig

aufgebrachten Schutzschicht und Verwendung eines solchen Hüllrohres.

DE-OS 10 2005 030 231 (11.1.2007)

DE-PS 10 2005 030 231 (31.5.2007)

EP-OS 1 896 627 (12.3.2008)

UMWELT: Programm Nachhaltigkeit und Technik

Buch, Buchbeitrag:

Akhtar, J.
Microwave imaging: Reconstruction of one dimensional permittivity profiles.
Saarbrücken: VDM Verl.Dr.Müller, 2008

Bluhm, H., Sack, M.
Industrial-scale treatment of biological tissues with pulsed electric fields.
Vorobiev, E. [Hrsg.]
Electrotechnologies for extraction from food plants and biomaterials
New York, N.Y.: Springer, 2008, S. 237-69
(Food Engineering Series)

Publikationen in begutachteten Zeitschriften:

Akhtar, M.J.; Feher, L.E., Thumm, M.
A univied nondestructive approach to evaluate dielectric properties of industrial resins and common liquids.
Frequenz – Journal of RF-Engineering and Telecommunications, 62(2008) S.246-51

Gupta, S.B.; Bluhm, H.J.
The potential of pulsed underwater streamer discharges as a disinfection technique.
IEEE Transactions on Plasma Science, 36(2008) S.1621-32
DOI:10,1109/TPS.2008.2001231

Pliquett, U.; Gusbeth, C.; Nuccitelli, R.
A propagating heat wave model of skin electroporation.
Journal of Theoretical Biology, 251(2008) S.109-201
DOI:10,1016/j.jtbi.2007.11.031

Rieder, A.; Schwartz, T.; Schönhözl, K.; Marten, S.; Süß, J.; Gusbeth, C.; Kohnen, W.; Swoboda, W.; Obst, U.; Frey, W.
Molecular monitoring of inactivation efficiencies of bacteria during pulsed electric field treatment of clinical wastewater.
Journal of Applied Microbiology, 105(2008) S.2035-45
DOI:10,1111/j.1365-2672.2008.03972.x

Sack, M.; Eing, C.; Berghöfer, T.; Buth, L.; Stängle, R.; Frey, W.; Bluhm, H.
Electroporation-assisted dewatering as an alternative method for drying plants.
IEEE Transactions on Plasma Science, 36(2008) S.2577-85
DOI:10,1109/TPS.2008.2002440

Sack, M.; Bluhm, H.
New measurement methods for an industrial-scale electroporation facility for sugar beets.
IEEE Transactions on Industry Applications, 44(2008) S.1074-83; DOI:10,1109/TIA.2008.926222

Sonstige Publikationen die in gedruckter Form vorliegen

Akhtar, M.J.; Feher, L.; Thumm, M.
A novel approach for measurement of temperature dependent dielectric properties of polymer resins at 2.45 GHz.
1st Global Congress on Microwave Energy Applications, Otsu, J, August 4-8, 2008, Proc. S. 529-32
Tokyo: Japan Society of Electromagnetic Wave Energy Applications, 2008

Akhtar, M.J.; Feher, L.E.; Thumm, M.
Approximate closed-form expressions for nondestructive evaluation of dielectric properties of epoxy resins and common liquids.
GeMic 2008: German Microwave Conf., Hamburg-Harburg, March 10-12, 2008
CD-ROM S.228-31; Berlin [u.a.]: VDE Verl., 2008
(ITG-Fachbericht; 206)

Akhtar, M.J.; Feher, L.E.; Thumm, M.
Nondestructive approach for measuring temperature-dependent dielectric properties of epoxy resins.
Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy, 42(2008) Nr. 3, 3-17

Berghöfer, T.; Eing, C.; Flickinger, B.; Gusbeth, C.; Schneider, S.; Sträßner, R.; Frey, W.
Pulsed laser fluorescence microscopy as a tool for transmembrane-potential recordings of biological cells.
2nd Euro-Asian Pulsed Power Conf., Vilnius, LT, September 22-26, 2008
Book of Abstracts S. 93, Folien auf CD-ROM

Feher, L.; Szabo, D.V.; Schlabach, S.
Development of microwave selectively activated resins.
1st Global Congress on Microwave Energy Applications, Otsu, J, August 4-8, 2008, Proc. S. 665-68
Tokyo: Japan Society of Electromagnetic Wave Energy Applications, 2008

Feher, L.; Nuss, V.; Seitz, T.; Akhtar, J.; Stanculovic, S.; Zöllner, C.; Layer, S.; Thumm, M.; Wiesehöfer, R.
Microwave curing of aerospace and automotive composite structures at HEPHAISTOS experimental centre (HEC).
1st Global Congress on Microwave Energy Applications, Otsu, J, August 4-8, 2008, Proc. S. 741-49
Tokyo: Japan Society of Electromagnetic Wave Energy Applications, 2008

Feher, L.; Seitz, T.; Nuss, V.
Microwave de-/anti-icing using the MIDAS-technology.
1st Global Congress on Microwave Energy Applications, Otsu, J, August 4-8, 2008, Proc. S. 431-34
Tokyo: Japan Society of Electromagnetic Wave Energy Applications, 2008

Feher, L.
The quantum nature of microwave heating, processing and effects in discussion with classical electrodynamics.
1st Global Congress on Microwave Energy Applications, Otsu, J, August 4-8, 2008, Proc. 389-92
Tokyo: Japan Society of Electromagnetic Wave Energy Applications, 2008

Frey, W.; Sack, M.; Wüstner, R.; Müller, G.
Gas-insulated selfbreakdown spark gaps – some aspects on low-scattering and long-lifetime switching.
2nd Euro-Asian Pulsed Power Conf.; Vilnius, LT, September 22-26, 2008
Book of Abstracts S. 53; Proc. on CD-ROM

Gusbeth, C.; Frey, W.; Sträßner, R.; Schwartz, T.; Rieder, A.
Critical comparison between the pulsed electric field and thermal decontamination methods of hospital wastewater.
2nd Euro-Asian Pulsed Power Conf., Vilnius, LT, September 22-26, 2008; Book of Abstracts S.38; Proc. on CD-ROM

Komarov, V.; Thumm, M.; Feher, L.; Akhtar, J.
Heating patterns of microwave exposed liquid polymers.
1st Global Congress on Microwave Energy Applications, Otsu, J, August 4-8, 2008, Proc. S. 845-48
Tokyo: Japan Society of Electromagnetic Wave Energy Applications, 2008

- Sack, M.; Müller, G.
Optimisation of an electroporation device for mash.
Cernat, M. [Hrsg.]
Proc. of the 11th Int. Conf. on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM '08), Brasov, R, May 22-24, 2008, CD-ROM
Brasov: Transilvania University of Brasov, 2008
- Sack, M.; Attmann, F.; Stängle, R.; Wolf, A.; Frey, W.; Müller, G.
Upgrade of the electroporation device KEA-MOBIL.
2nd Euro-Asian Pulsed Power Conf., Vilnius, LT, September 22-26, 2008
Book of Abstracts S.32; Proc. on CD-ROM
- Stanculovic, S.; Feher, L.; Thumm, M.
Industrial microwave heated fluid injector.
1st Global Congress on Microwave Energy Applications, Otsu, J, August 4-8, 2008, Proc: S. 427-30
Tokyo: Japan Society of Electromagnetic Wave Energy Applications, 2008
- Stanculovic, S.; Feher, L.
Microwave heated resin injector for advanced composite production.
Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy, 42(2008) Nr. 4, 55-61.
- Thumm, M.
Jahresbericht 2007 Institut für Hochleistungsimpuls- und Mikrowellentechnik
Wissenschaftliche Berichte, FZKA-7395 (April 2008)
- Weisenburger, A.; An, W.; Heinzel, A.; Jianu, A.; Lang, F.; Müller, G.; Zimmermann, F.; Engelko, V.
Intense pulsed electron beams – application of modified materials.
2nd Euro-Asian Pulsed Power Conf., Vilnius, LT, September 22-26, 2008
Book of Abstracts S. 88; Folien auf CD-ROM
- Weisenburger, A.; An, W.; Müller, G.; Engelko, V.
Optical investigation of plasma formation process by interaction of intense electron beams with metallic targets.
2nd Euro-Asian Pulsed Power Conf., Vilnius, LT, September 22-26, 2008
Book of Abstracts S. 121; Proc. on CD-ROM
- Vorträge, die nicht in gedruckter Form vorliegen:**
- Akhtar, M.J.; Feher, L.; Thumm, M.
Measurement of dielectric properties of liquid polymers with their temperature dependence at 2.45 GHz.
35th IEEE Int. Conf. on Plasma Science (ICOPS), Karlsruhe, June 15-19, 2008
IEEE Conference Records – Abstracts S. 371
- An, W.; Engelko, V.; Müller, G.; Weisenburger, A.
Optical investigation of plasma formation process by interaction of intense electron beams with metallic targets.
35th IEEE Int. Conf. on Plasma Science (ICOPS), Karlsruhe, June 15-19, 2008
IEEE Conference Records – Abstracts S. 262
- An, W.; Engelko, V.; Heinzel, A.; Jianu, A.; Lang, F.; Müller, G.; Weisenburger, A.; Zimmermann, F.
Overview on applications of materials modified by intense pulsed electron beams.
35th IEEE Int. Conf. on Plasma Science (ICOPS), Karlsruhe, June 15-19, 2008
IEEE Conference Records – Abstracts S. 263
- Berghöfer, T.; Eing, C.; Flickinger, B.; Gusbeth, C.; Sträßner, R.; Frey, W.; Schneider, S.
Transmembrane potential measurements on mammalian cells using the voltage sensitive dye annine-6.
35th IEEE Int. Conf. on Plasma Science (ICOPS), Karlsruhe, June 15-19, 2008
IEEE Conference Records – Abstracts S. 191
- Engelko, V.; Müller, G.
Generation and transport of pulsed intense electron beams of microsecond duration.
35th IEEE Int. Conf. on Plasma Science (ICOPS), Karlsruhe, June 15-19, 2008
IEEE Conference Records – Abstracts S. 219
- Feher, L.; Nuss, V.; Wiesehöfer, R.
Microwave curing of composite structures at HEPHAISTOS experimental centre (HEC).
35th IEEE Int. Conf. on Plasma Science (ICOPS), Karlsruhe, June 15-19, 2008
IEEE Conference Records – Abstracts S. 440
- Flickinger, B.; Berghöfer, T.; Eing, C.; Gusbeth, C.; Sträßner, R.; Frey, W.
Transmembrane potential measurements on plant cells using the voltage sensitive dye annine-6.
35th IEEE Int. Conf. on Plasma Science (ICOPS), Karlsruhe, June 15-19, 2008
IEEE Conference Records – Abstracts S. 191
- Flickinger, B.; Berghöfer, T.; Eing, C.; Frey, W.
Transmembrane potential measurements on plant cells using the voltage sensitive dye annine-6.
Junior Scientist Conf. 'Science and Technology for the Future', Wien, A, November 15-18, 2008
- Frey, W.; Sack, M.; Wüstner, R.; Müller, G.
Design criteria for low-scattering and long-lifetime gas-insulated self-breakdown spark gaps.
35th IEEE Int. Conf. on Plasma Science (ICOPS), Karlsruhe, June 15-19, 2008
IEEE Conference Records – Abstracts S. 299
- Gusbeth, C.; Frey, W.; Sträßner, R.; Schwartz, T.; Rieder, A.
Optimization of the pulsed electric field decontamination method in continuous flow.
35th IEEE Int. Conf. on Plasma Science (ICOPS), Karlsruhe, June 15-19, 2008
IEEE Conference Records – Abstracts S.239
- Müller, G.
Pulsed power technology and applications at the Research Center Karlsruhe.
Colloquium, National Institute of Materials Physics (INFM), Bucuresti, R, May 8, 2008
- Rieder, A.; Schwartz, T.; Schön-Hözl, K.; Marten, S.M.; Süß, J.; Kohnen, W.; Swoboda, W.; Obst, U.; Frey, W.
Molecular monitoring of inactivation efficiencies of bacteria during pulsed electric field (PEF) treatment of clinical wastewater.
12th Int. Symp. on Microbial Ecology (ISME 12), Cairns, AUS, August 17-22, 2008
- Sack, M.; Sigler, J.; Waidelich, G.; Eing, C.; Stukenbrock, L.; Stängle, R.; Wolf, A.; Müller, G.
Electroporation de la vendantge pour la vinification.
Vinitch 2008, Bordeaux, F, December 2-4, 2008

Sack, M.; Eing, C.; Stängle, R.; Wolf, A.; Müller, G.; Sigler, J.; Stukenbrock, L.

On the electroporation of mash for the production of red wine. 35th IEEE Int. Conf. on Plasma Science (ICOPS), Karlsruhe, June 15-19, 2008
IEEE Conference Records – Abstracts S. 189

Stanculovic, S.; Feher, L.; Thumm, M.
High power microwave system for fluid injection applications. 35th IEEE Int. Conf. on Plasma Science (ICOPS), Karlsruhe, June 15-19, 2008
IEEE Conference Records – Abstracts S. 371

Patente:

Bluhm, H.J.; Fütterer, M.; Hoppe, P.; Singer, J.
A head-end process for the reprocessing of reactor core material.
EP-OS 1 849 164 (31.10.2007)
EP-PS 1 849 164 (9.7.2008)
CN-OS 101 138 051 (5.3.2008)

Bluhm, H.J.; Sack, M.
Messzelle und damit durchgeführte Verfahren zur Bestimmung des durch Elektroporation bewirkenden Aufschlussgrades biologischer Zellen.
DE-OS 10 2005 029 414 (28.12.2006)
EP-OS 1 893 998 (5.3.2008)

Feher, L.; Nuss, V.; Seitz, T.; Flach, A.
Mikrowellenresonator, eine aus einem solchen Mikrowellenresonator 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 (9.8.2006)
EP-PS 1 639 865 (29.3.2006)
EP-PS 1 639 865 (14.2.2007)
RU-OS 2006 102 860 (10.7.2006)
RU-PS 2 312 470 (10.12.2007)

Frey, W.; Sack, M.
Schaltfunkenstrecke mit einer Koronaelektrode.
DE-OS 10 2006 023 392 (22.11.2007)
EP-OS 1 858 129 (21.11.2007)

Giese, H.; Hoppe, P.
Aufbau einer elektrodynamischen Fraktionieranlage.
Electrodynamic fractionation plant.
DE-PS 10 346 055 (6.8.2004)
EP-OS 1 667 798 (14.6.2006)
CN-OS 1 863 601 (15.11.2006)
RU-PS 2 311 961 (10.12.2007)

Giese, H.; Edinger, W.; Hoppe, P.; Singer, J.; Stemmermann, P.; Schweike, U.
Prozessreaktor und Betriebsverfahren für die elektrodynamische Fragmentierung. Process reactor and method for the electrodynamic fragmentation.
DE-OS 10 346 650 (19.5.2005)
EP-OS 1 673 172 (28.6.2006)
EP-PS 1 673 172 (13.2.2008)
US-PS 7 246 761 (24.7.2007)
CN-OS 1 863 602 (15.11.2006)
CA-PS 2 537 045

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)
RU-PS 2 326 736 (20.6.2008)
AU-PS 2004 274 091 (17.7.2008)

Sack, M.
Trigger-/Zündeinrichtung an einem aus Stufenkondensatoren bestehenden Marx-Generator. Trigger arrangement for a Marx generator.
DE-OS 10 320 425 (16.12.2004)
CN-OS 1 784 830 (7.6.2006)
CN-PS 100 409 570 (6.8.2008)
EP-OS 1 620 946 (1.2.2006)
EP-PS 1 620 946 (26.3.2008)
US-PS 7 170 187 (30.1.2007)
RU-PS 2 333 597 (10.9.2008)

Sack, M.
Verfahren für den kontinuierlichen, getriggerten Betrieb eines Marx-Generators insbesondere von mehreren Marx-Generatoren zur Druckregelung und Abbranddetektion in den Funkenstrecken.
DE-OS 10 2005 025 998 (21.12.2006)
EP-OS 1 889 363 (20.2.2008)

Schultheiß, C.
Verfahren zum Aufbringen einer bioaktiven, gewebeverträglichen Schicht auf Formkörpern und Verwendung solcher Formkörper.
DE-OS 10 2006 028 856 (3.1.2008)
WO-OS 2007/147462 (27.12.2007)

Schultheiß, C.
Verfahren zur Erniedrigung des Wärmedurchgangs in einer Isolierschicht durch Wärmetauschung mit gegenströmendem Gas.
DE-OS 10 2006 028 857 (3.1.2008)

Väth, W.; Frey, W.
Verfahren zur rechnergestützten Prozessführung einer Fragmentieranlage. Method for the computer-based process control of a fragmentation apparatus.
DE-PS 10 302 867 (17.11.2003)
EP-OS 1 585 597 (19.10.2005)
EP-OS 1 585 597 (10.5.2006)
CN-OS 1 741 855 (1.3.2008)
CN-PS 100 376 328 (26.3.2008)
US-PS 7 140 564 (28.11.2006)

Veröffentlichungen außerhalb der Programme

Publikationen in begutachteten Zeitschriften:

Kessler, G.; Broeders, C.; Hoebel, W.; Goel, B.; Wilhelm, D.
A new scientific solution for preventing the misuse of reactor-grade plutonium as nuclear explosive.
Nuclear Engineering and Design, 238(2008) S.3429-444
DOI:10.1016/j.nucengdes.2008.08.07.021

Kessler, G.; Höbel, W.; Goel, B.; Seifritz, W.
Potential nuclear explosive yield of reactor-grade plutonium using the disassembly theory of early reactor safety analysis.
Nuclear Engineering and Design, 238(2008) S.3475-99

Kessler, G.
Proliferation resistance of americium originating from spent irradiated reactor fuel of pressurized water reactors, fast reactors, and accelerator-driven systems with different fuel cycle options.
Nuclear Science and Engineering, 159(2008) S.56-82

Vorträge, die nicht in gedruckter Form vorliegen:

Kessler, G.; Broeders, C.; Hoebel, W.; Goel, B.; Wilhelm, D.
A scientific strategy for preventing the misuse of reactor-grade plutonium as nuclear explosive.
2nd Int. Science and Technology Forum on Protected Plutonium Utilization for Peace and Sustainable Prosperity, Tokyo, J, September 16-18, 2008

Kessler, G.; Chen, X.N.
Temperature profiles in an internally heated and outside cooled multishell spherical system.
Int. Workshop on Non-Proliferation of Nuclear Materials, Obninsk, Russia, September 29 – October 2, 2008