

KIT SCIENTIFIC REPORTS 7553

Jahresbericht 2009

Institut für Hochleistungsimpuls- und
Mikrowellentechnik

Manfred Thumm (Hrsg.)

Manfred Thumm (Hrsg.)

Jahresbericht 2009

Institut für Hochleistungsimpuls- und Mikrowellentechnik

Karlsruhe Institute of Technology
KIT SCIENTIFIC REPORTS 7553

Jahresbericht 2009

Institut für Hochleistungsimpuls- und Mikrowellentechnik

Manfred Thumm
(Hrsg.)

Report-Nr. KIT-SR 7553

Impressum

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
KIT Scientific Publishing
Straße am Forum 2
D-76131 Karlsruhe
www.ksp.kit.edu

KIT – Universität des Landes Baden-Württemberg und nationales
Forschungszentrum in der Helmholtz-Gemeinschaft



Diese Veröffentlichung ist im Internet unter folgender Creative Commons-Lizenz
publiziert: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/de/>

KIT Scientific Publishing 2010
Print on Demand

ISSN 1869-9669

Institut für Hochleistungsimpuls- und Mikrowellentechnik (IHM)

Leitung: Prof. Dr. Dr. h.c. M. Thumm (komm.)

Hauptarbeitsgebiete des Institut für Hochleistungsimpuls- und Mikrowellentechnik (IHM) sind die Forschung, Entwicklung, Ausbildung und, in Zusammenarbeit mit der KIT-Dienstleistungseinheit Innovationsmanagement (IMA) und industriellen Partnern, der Technologietransfer auf den Gebieten der Impuls- und Mikrowellentechnik bei hohen Leistungen. Die Vorhaben des Instituts sind in sechs HGF-Programme eingebunden: Erneuerbare Energien (EE), FUSION, NUKLEAR, NANOMIKRO, Rationelle Energieumwandlung und -nutzung (REUN) und Technologie, Innovation und Gesellschaft (TIG). 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 Kernfusion in magnetisch eingeschlossenen Plasmen, der Material-Prozesstechnik und der Energietechnik. 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 (Leitung: Dr. Georg Müller):

- Erforschung und Weiterentwicklung der Hochleistungsimpulstechnik mit Repetitionsfrequenzen bis zu 20 Hz, Impulsleistungen im Gigawatt-Bereich und Feldstärken im Bereich von $10^5 \cdot 10^7$ V/m zur Anwendung in der Umwelt- und Biotechnologie. Die Forschung beschäftigt sich sowohl mit der Kurzpuls (μ s)- als auch mit der Ultra-Kurzpulsbehandlung (ns) biologischer Zellen (Elektroporation). Dabei stehen die großtechnische Anwendung, die Behandlung großer Volumenströme, die Realisierung einer hohen Komponentenlebensdauer und die Prozessintegration im Vordergrund. Hauptarbeitsrichtungen in diesem sind die Elektroporation zum Aufschluss von biologischen Zellen zur Gewinnung von Zellinhaltsstoffen (KEA-Verfahren), die Entwässerung und Trocknung grüner Energiepflanzen, die Behandlung von Mikroalgen zur weiteren energetischen Verwertung und die nachhaltige Keimreduzierung in Problemwässern. Hier konnte der erhebliche wirtschaftliche Vorteil dieses Verfahrens gegenüber konventionellen thermischen Aufschlussverfahren in der Nahrungsmittelindustrie (Zuckerherstellung, Einsparung am Primärenergieverbrauch bis zu 30 %) und die Anwendung gepulster elektrischer Felder als alternative Entkeimungsmethode von belasteten Klinikwässern, bestätigt werden (Programme EE, TIG und IMA).
- Grundlagenuntersuchungen zur Beeinflussung intrazellulärer Prozesse in Pflanzenzellen mittels ultrakurzer gepulster elektrischer Felder. In Zusammenarbeit mit Botanischen Instituten des KIT, konnte in grundlegenden Experimenten eine massive Beeinflussung des pflanzlichen Zytoskeletts und eine Wachstumsstimulation an Pflanzen und Pilzen nachgewiesen werden (Programm EE, KIT-Shared Research Group).
- Entwicklung und Test von gepulsten elektro-dynamischen Fragmentierprozessen und -Anlagen zum Aufschluss von Verbundstoffen und Mineralien (FRANKA). Die seit Beginn 2003 mit dem Schweizer Industriepartner selfFrag AG laufende Kooperation auf dem Gebiet der Entwicklung elektro-dynamischer Fragmentieranlagen wurde im Dezember 2009 planmäßig und erfolgreich abgeschlossen. Die selfFrag AG vertreibt inzwischen weltweit elektro-dynamische Frag-

mentieranlagen für den Batch-Betrieb und seit Ende 2009 auch kontinuierlich arbeitende Anlagen mit Durchsätzen bis zu einer Tonne pro Stunde. Die Einsatzgebiete der Anlagen erstrecken sich von der mineralogischen Exploration bis zur Zerkleinerung von Quarz und Quarzglas mit höchsten Reinheitsanforderungen (Programm EE und IMA).

- 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 und Pb/Bi-gekühlten Kernreaktorsystemen bei Temperaturen bis zu 650 °C erreicht werden. Mechanische Untersuchungen im Flüssigmetall zeigen keine Abnahme der Kriechfestigkeit, selbst bei hohen Belastungen (200 MPa) und hohen Temperaturen (550 °C). Zur Verbesserung der Elektronenstrahlparameter wurden neue Plasmaelektronenquellen entwickelt und die Anlagen GESA I und GESA IV damit bestückt. Eine verbesserte Leistungsdichteverteilung am Target konnte gezeigt werden (Programm NUKLEAR).

Abteilung für Hochleistungsmikrowellentechnik (Leitung: Dr. Gerd Gantenbein (komm.)):

- 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 wurden hierbei in Zusammenarbeit mit dem CRPP der EPFL 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 und die Hochspannungsmodulatoren für die Gyrotrons entwickelt. Die erste Serienröhre lieferten Weltrekord-Langpulsparameter mit 0,92 MW Leistung bei 30 min. Pulslängen, einem Wirkungsgrad von fast 45% und einer Modenreinheit von 97,5%. Mit dem ECRH-System leistet das KIT einen wesentlichen Beitrag zu W7-X (Programm FUSION).
- Entwicklung und Test von 2 MW, 170 GHz Gyrotronröhren mit koaxialem Resonator und stufenweise frequenzdurchstimmbaren 1 MW Gyrotronröhren (105-143 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, die Vor-Prototypröhre des IHM liefert die Rekordparameter 2,2 MW bei 30% Wirkungsgrad, ohne abgestuftem Kollektor zur Energierückgewinnung. Mit diesen KIT-Gyrotron-Arbeiten wird in internationaler Zusammenarbeit eine Verpflichtung der EU gegenüber ITER erfüllt (Programm FUSION).
- Experimentelle und theoretische Untersuchungen zum Verhalten der ersten Wand und des Divertors von Tokamak-Fusionsreaktoren bei Plasmastabilitäten (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 weiteren grundlegenden Experimenten konnten neue 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 energieeffizienten Herstellung von Flugzeugbauteilen aus Kohlefaserverbundwerkstoffen mittels Mikrowellenprozess-technik bei 2,45 GHz. Die neue HEPHAISTOS-CA3-Anlage mit einem Nutz-Volumen von 7000 l und einer Mikrowellenleistung von 25 kW läuft bereits im Routinebetrieb. Damit werden in 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 (Programme REUN, TIG und IMA).

Zur Bearbeitung dieser theoretischen und experimentellen Themen stehen ein Workstation-Verbund und zahlreiche Experimentieranlagen zur Verfügung: 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, eine 0,915 GHz, 60 kW Magnetron-Anlage und eine 5,8 GHz, 3 kW Klystron-Anlage.

Der Institutsleiter Prof. Dr. rer.nat. Dr. h.c. Manfred Thumm (kommissarisch) ist auch Professor für "Mikrowellenmesstechnik" i.R. am Institut für Hochfrequenztechnik und Elektronik in der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik des KIT mit insgesamt 5 Vorlesungen (eine im International Department). Privatdozent Dr.-Ing. habil. Lambert Feher und der Lehrbeauftragte Dr.-Ing. Martin Sack halten jeweils eine Vorlesung im KIT und Dr. Rudolf Schneider zwei Vorlesungen an der Hochschule Karlsruhe (FH).

Zum Jahresende waren am Institut 42 Mitarbeiter/innen beschäftigt, darunter 20 Akademiker/innen, 4 Ingenieure und 18 Sonstige Mitarbeiter/innen, davon 1 Halbtagskraft.

Zusätzlich werden 12 Akademiker, 1 Ingenieur und 11 Sonstige Mitarbeiter/innen aus Fremdmitteln finanziert.

Im Verlaufe des Jahres 2009 waren an den Arbeiten des Instituts insgesamt 8 Gastwissenschaftler, 8 Doktoranden/innen (5 vom KIT Campus Nord, 3 vom KIT Campus Süd), 3 Diplomanden/innen, 2 BA-Studenten, 6 Praktikanten/innen und 7 Auszubildende beteiligt.

Wichtige Ereignisse und Wissenschaftliche Auszeichnungen

PD Dr.-Ing. habil. Lambert Feher, Leiter der Gruppe Industrielle Mikrowellentechnik, organisierte die 12th International Conference on Microwave and High Frequency Heating (AMPERE 2009) in Karlsruhe als größte AMPERE Konferenz seit ihrem Bestehen (150 Teilnehmer aus 38 Ländern, 120 Beiträge und 2 Short Courses).

Dr.-Ing. Martin Sack, Dr. Christoph Schultheiß (i.R.) und Prof. i.R. Dr. Hansjoachim Bluhm sind für das von ihnen entwickelte Verfahren der Elektroporation von pflanzlichen Zellen im industriellen Maßstab mit dem Otto Haxel Preis 2009 des Freundeskreises des Forschungszentrums Karlsruhe e.V. ausgezeichnet worden.

Dr.-Ing. Jaleel Akhtar, PD Dr.-Ing. habil. Lambert Feher und Prof. Dr. rer.nat. Dr. h.c. Manfred Thumm wurden für eine ihrer Veröffentlichungen in der Fachzeitschrift IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques mit dem CST University Publication Award 2009 ausgezeichnet.

Prof. Dr. rer.nat. Dr. h.c. Manfred Thumm wurde Ende 2009 für drei Jahre in das Executive Committee der Fachgesellschaft Nuclear and Plasma Science Society des Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE), USA, gewählt.

Längerfristige Kooperationen mit Wirtschaft, Hochschulen und Forschungsinstituten

- Grundlagen zur Feld-Zelle-Wechselwirkung (Bioelektrik) im Rahmen des Bioelectric Consortiums mit Old Dominion University Norfolk, USA; Kumamoto University, Japan; University of Missouri Columbia, USA; Institute Gustave-Roussy and University of Paris XI, Villejuif, Frankreich; University of Toulouse, Toulouse, Frankreich, Leibniz Institute for Plasma Science and Technology, Greifswald
- Integration des Elektroporationsprozesses bei der Zuckerherstellung mit SÜDZUCKER AG
- Entwicklung von Anlagen und Prozessen zur elektrodynamischen Fragmentierung (FRANKA-Technik) mit Fa. selfrag, Schweiz
- Entwicklung von Core- und Strukturmaterialien für den Einsatz in flüssigem Blei mit der Japanese Atomic Energy Agency (JAEA)
- Entwicklung großflächiger gepulster Elektronenstrahlanlagen mit Efremov Institut, St. Petersburg, Russland
- Korrosionsexperimente in flüssigen Schwermetallen mit Institute for Physics and Power Engineering (IPPE), Obninsk, Russland
- Entwicklung, Aufbau und Inbetriebnahme des kompletten 10 MW, 140 GHz ECRH-Systems für kontinuierlichen Betrieb an Wendelstein W7-X in Zusammenarbeit mit dem Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP) Greifswald und dem Institut für Plasmaforschung (IPF) der Universität Stuttgart
- Entwicklung des Europäischen ITER-Gyrotrons in internationaler Zusammenarbeit im Rahmen des Europäischen Gyrotron-Konsortiums EGYC, koordiniert von Fusion for Energy (F4E). Weitere Mitglieder des Konsortiums sind CRPP, EPFL Lausanne, Schweiz, CNR Milano, Italien, ENEA, Frascati, Italien, HELLAS-Assoc. EURATOM (NTUA/NKUA Athen), Griechenland. Der industrielle Partner ist die Mikrowellenröhrenfirma Thales Electron Devices (TED) in Paris, Frankreich
- Virtuelles Helmholtz-Institut VH-VI-259 „Advanced ECRH for ITER“ in Zusammenarbeit mit IPP Garching und Greifswald, IPF Stuttgart, Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russland und CNR Milano, Italien
- Verbesserung von Elektronenkanonen für Gyrotrons und Wechselwirkungsrechnungen für Gyrotronresonatoren, St. Petersburg Polytechnical University, Russland und University of Latvia, Lettland
- Grundlagenuntersuchungen zur Plasma-Wand-Wechselwirkung in Fusionsreaktoren in Zusammenarbeit mit State Research Center of Russian Federation Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research (TRINITI), Troitsk, Russland und Institute of Plasma Physics, Kharkov, Ukraine
- Grundlagen zur Anwendung von Gyrotrons zur Materialprozess-technik mit Millimeterwellen mit National Institute for Fusion Science (NIFS) in Toki, Japan und der University of Fukui, Japan
- Entwicklung von Anlagen der HEPHAISTOS-Serie zur Materialprozess-technik mit Mikrowellen mit der Firma Vötsch Industrietechnik GmbH, Reiskirchen.

FUSION: Programm Kernfusion

Hochbelastbare Komponenten und Versuchseinrichtungen

Im zukünftigen Tokamak ITER können Plasma-Abrisse (Disruptionen) und Plasma-Randschicht-Instabilitäten (ELMs) Verdampfungserosion an den Oberflächen von Divertor und erster Wand produzieren. Eine andere Art von ITER Wanderosion ist bedingt durch Schmelzen von metallischen Oberflächen (Lithium, Beryllium, Wolfram) nach transienten Belastungen. Zur Modellierung von Schmelzbewegungsschäden wird der inkompressible Fluidmechanikcode MEMOS angewandt. Neue MEMOS-Rechnungen unter Berücksichtigung von Massenwärmtransport werden beschrieben und mit Experimenten verglichen.

Wolfram ist ein Referenzmaterial für den ITER Divertorschutzschild mit Ausnahme des Auftrefforts der Separatrix (SSP), für den CFC vorgesehen ist. Dies begründet die Untersuchung der Widerstandsfähigkeit von Wolfram gegen Schäden bei transienten Wärmelasten. Mit dem thermomechanischen Code PEGASUS wurden Untersuchungen der Rissbildung auf Wolframoberfläche sowie Vergleiche mit experimentellen Beobachtungen durchgeführt.

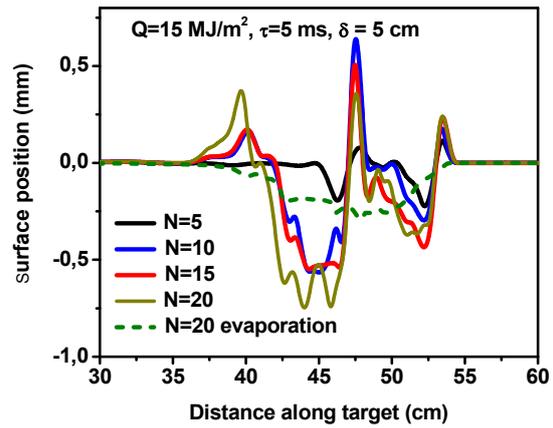
Die Schmelzschaden und Rissbildung auf ITER W-Targets

(EFDA Task WP09-PWI-05-02/FZK/BS: Entwicklung der PWI-Basis zur Unterstützung von integrierten Hoch-Z Szenarien für ITER)

Der Code MEMOS zur Dynamik inkompressibler Flüssigkeiten wurde verwendet für Untersuchungen der Schäden durch Bewegung von geschmolzenem Material unter Einbeziehung von Wärmtransport. Die neuen Berechnungen konzentrierten sich hauptsächlich auf Schwellwert und Ausmaß des Verspritzens der Schmelze unter wiederholten Wärmelasten mit dem Ziel einer Optimierung des Designs von Wolfram(W)-Makrobürsten. Außerdem wurde eine Validierung von MEMOS an Hand von Schmelzspritzexperimenten an der Russischen Plasmakanonenanlage QSPA-T durchgeführt, und der Code verwendet zur Unterstützung der numerischen Modellierung von Schmelzschäden an W-Targets in ITER Simulationsexperimente am Tokamak TEXTOR in Jülich.

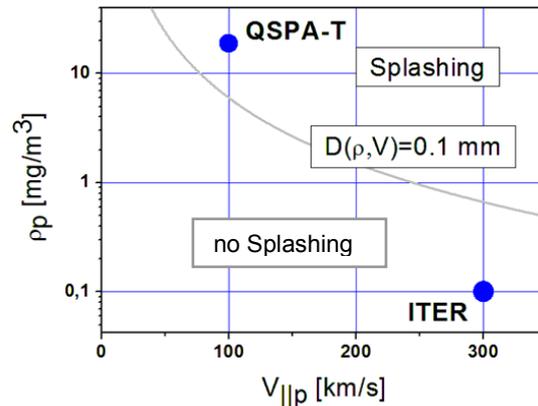
Die Rechnungen erfolgten unter Variation diverser Schadensparameter über einen weiten Bereich. Die Schäden durch Disruptionen können charakterisiert werden durch Bewegungsgeschwindigkeiten der Schmelze $V_{melt} \sim 0.2 - 0.5$ m/s, mittlere Dicke der Schmelzschicht $H \sim 33$ bis $60 \mu m$, Höhe von Schmelzbergen $h+$ bis $16 \mu m$, und Tiefe von Schmelzkratern $h-$ bis $5 \mu m$. Für ITER ELMs mit Referenzpulsform und Energie-deposition $Q = 1,6$ MJ/m² wurden folgende Ergebnisse erhalten: $V_{melt} < 0.36$ m/s, H bis $44 \mu m$, $h+$ bis $50 \mu m$, und $h-$ bis $6.2 \mu m$. Nach vielen Transienten zeigen diese Parameter einen signifikanten Anstieg (siehe Abbildung).

In Wolfram Schmelzspritzexperimenten treten Wolfram Tröpfchen mit Geschwindigkeiten bis zu 20 m/s und Größen bis zu $60 \mu m$ auf. Ein Anwendungsbeispiel: Plasmageschwindigkeit entlang der Oberfläche, $V_{||p}$, etwa 100 km/s für 1.6 MJ/m², Plasmadichte $r_p \sim 20$ mg/m³, und mittlere Schmelzschichtdicke $50 \mu m$. Die Modellparameter wurden an die Experimente angepasst unter der Annahme von Kelvin-Helmholtz (KH)-Insta-



Erosionsprofile nach N Disruptionen.

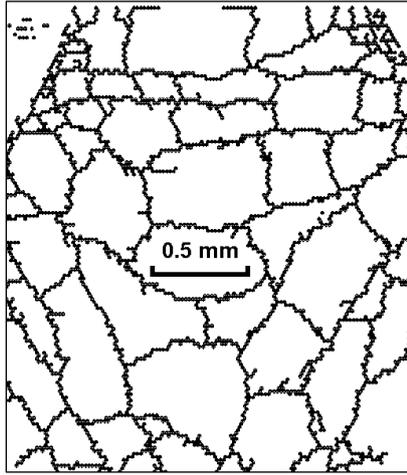
bilität als Haupt-Mechanismus der Tröpfchenemission. Die relevanten ITER Parameter sind $V_{||p} \sim 300$ km/s und $r_p \sim 0.1$ mg/m³. Die Extrapolation des KH-Modell auf ITER-relevante transiente Lasten führt zur Schlussfolgerung, dass Schmelzverspritzen nicht auftritt (siehe nachfolgende Abbildung).



Darstellung der Plasmadichte vs. Geschwindigkeit der Schmelze mit Schwellwert für Schmelzverspritzen.

In einer Zusammenarbeit zwischen der Theoriegruppe des KIT und dem experimentellen TEXTOR Team wurde die frühere MEMOS Vorhersage einer Überprüfung unterzogen, dass eine Abrundung der Castellationsecken der W-Bürstentargets die Überbrückung der Bürstenschichten verhindern würde. Der Versuch legte nahe, dass eine Anpassung von MEMOS an die besondere experimentelle Geometrie zur Berechnung der Überbrückungsschwelle erfolgen muss.

Für den thermomechanischen Code PEGASUS wurde ein Modell der Rissbildung an Wolfram-Oberflächen für gepulste Wärmebelastung unterhalb der Schmelztemperatur Q_{th} entwickelt; für die Behandlung von viskos-elastische Deformationen wurde das Kelvin-Voigt Modell implementiert. Auf dieser Basis, wurden W-Oberflächen-Risse unter ELM-typischen Wärmebelastungen simuliert und mit experimentellen Beobachtungen an der Ukrainischen Plasmakanonenanlage QSPA-Kh50 für thermische Lasten unter $Q_{th} = 0.57$ MJ/m² verglichen. Die Simulationen demonstrierten für das numerische Wolframtarget eine allmähliche Entwicklung der Rissbreiten bei insgesamt stabilem Netzmuster (Abbildung). Die durchschnittliche Zellen-größe des Rissnetzes beträgt $0,5$ mm und die maximalen Rissbreite $7 \mu m$, in Übereinstimmung mit den gemessenen Werten.



Berechnetes Rissbild auf der Oberfläche eines numerischen Wolfram-Targets; $Q = 0,45 \text{ MJ/m}^2$.

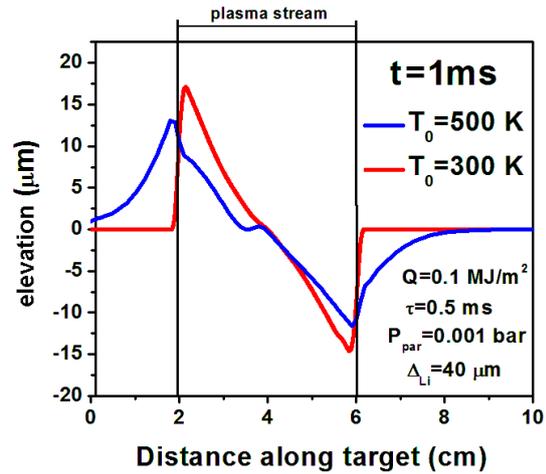
Modellierung von Lithium-Schmelz-Schäden mit dem Code MEMOS

(EFDA Task WP09-PWI-06-01/FZK/BS: Demonstration von flüssigen Plasma-seitigen Komponenten)

Mit dem Code MEMOS zur Dynamik inkompressibler Flüssigkeiten wurden vorläufige numerische Modellierungen für Plasma-seitige Komponenten ("Plasma Facing Components", PFCs) mit Lithium (Li) durchgeführt. Diese Arbeiten waren motiviert von einer Li-Kampagne am italienischen Tokamak FTU, wo eine flüssige Lithium-Begrenzung ("Liquid Lithium Limiter", LLL) mit kapillar-porösem System (CPS) installiert ist. Während der Entladung bildet sich ein dünner Lithium-Film auf der Beschichtung der Kammerwand, "Lithisierung (engl. lithisation)" genannt.

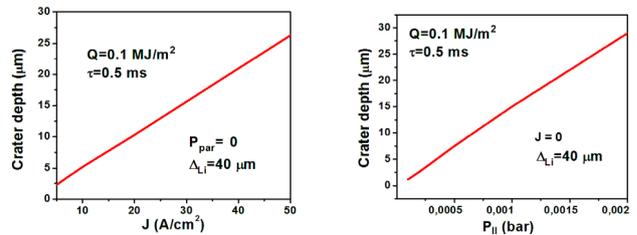
ITER wird voraussichtlich in der H-Mode betrieben, bei der ELMs Schmelzen und Verdampfungserosion am Divertor und den Oberflächen der ersten Wand an Wolfram PFCs produzieren können. Deswegen sollten für Li-PFCs in ITER solche Aspekte der Lithisierung wie etwa die Bewegung von Schmelzen unter Lorentz ($\mathbf{J} \times \mathbf{B}$)-Kräften äußerst wichtig sein. Es scheint, dass für ITER Transienten ein kapillar-poröses System keine effektive Kompensation von Schmelzschicht-Verdampfung oder Schmelz-Ableitung bewirken kann, weswegen der Zufluss von Li aus dem CPS vernachlässigt wurde. Die Simulation von Schmelzbewegung und Verdampfung eines Li-Films auf einer Hauptkammerwand mit Be- oder W-Oberfläche erfolgte unter Berücksichtigung von Lorentzkräften und Druckgradienten tangential zur Oberfläche.

Die MEMOS Simulationen ergaben, dass selbst schwache ITER ELMs mit Energieeintrag Q unter $0,5 \text{ MJ/m}^2$ starke Zerstörungen an solchen Li-Targets hervorrufen können; daher wurde $Q = 0,1 \text{ MJ/m}^2$ verwendet. Für die ursprüngliche Dicke der Beschichtung von Li wurde $40 \mu\text{m}$ angenommen. Als Anfangstemperatur T_0 wurde zu 500 K (zur Simulation eines geschmolzenen Li Films) bzw. 300 K (zur Einbeziehung von Li-Schmelzen in der Transienten-Phase) gewählt. Die aufgebrauchte Kraft und der Energiefluss entsprechen einem Rechteckimpuls von $0,5 \text{ ms}$ Dauer. Das nächste Bild zeigt den Effekt der Schmelzbewegung durch einen Tangentialdruck P_{PAR} von 1 mbar an Hand der Schmelzwelle nach 1 ms . Das Bild darunter zeigt den Einfluss von $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ -Kräften im angelegten Magnetfeld von 5 T , bzw. vom Tangentialdruck, auf die Tiefe der Krater beim Wiedererstarren des Li bei 300 K .



Auswirkung des Tangentialdrucks auf die Li-Film Dynamik.

Basierend auf diesen Simulationen mit MEMOS kann man schließen, dass festes und flüssiges Li sich ähnlich verhalten. Selbst kleine ELMs bewirken vollständige Entfernung des Li vom W-Substrat. Die Simulationen zeigten auch, dass sich vor dem Li-Film keine schützende Dampfschicht entwickelt.



Kratertiefe vs. Kreuzstromdichte J und Tangentialdrucks.

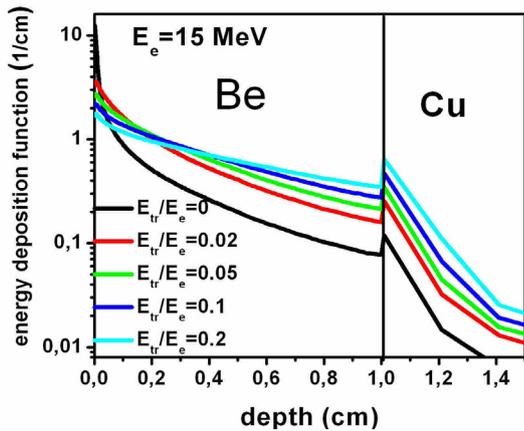
Modellierung der Energiedeposition und von Wandschäden durch relativistische Fluchtelektronen für ITER und JET

(EFDA Task WP09-PWI-08-01/FZK/BS: Belastungsminderung bei Plasmaabrisse in ITER)

Die Abschwächung von ELMs und Plasmaabrisse in ITER verhindert nicht vollständig einen hohen Wärmefluss auf Plasmaseitige Komponenten. Die Energiedeposition durch relativistische Fluchtelektronen (Runaway Electrons) kann erhebliche Schäden an Beryllium (Be-) Wänden verursachen. Dabei erzeugen Lorentz- Kräfte ($\mathbf{J} \times \mathbf{B}$) als Folge der Rayleigh-Taylor-Instabilität Bewegungen der Oberflächenschmelze. Als Ergebnis können geschmolzene Schichten von bis zu 1 mm Dicke von der Oberfläche abspritzen.

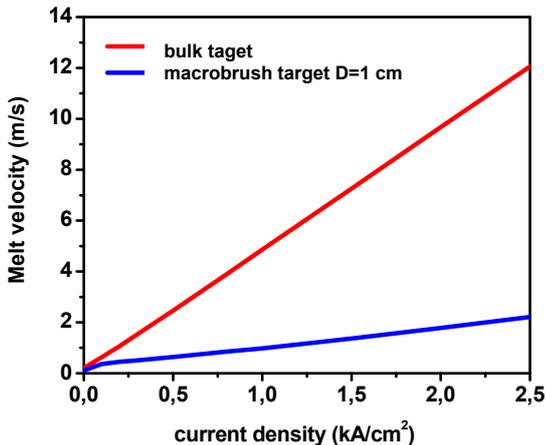
Die Energiedeposition durch Fluchtelektronen auf ein Be PFC wurde mit dem Code ENDEP simuliert, unter der Annahme von einer einfallenden Energiedichte $Q \sim 20 \text{ MJ/m}^2$, Pulsdauer $\Delta t = 0,1 \text{ s}$, Gesamt-Elektronenenergie $E_e = 15 \text{ MeV}$, und transversaler Energie E_{tr} bis zu 3 MeV . Die Simulationen wurden für einen Auftreffwinkel von $1,5 \text{ Grad}$ durchgeführt. Die nächste Abbildung zeigt die absorbierte Energie für verschiedene Verhältnisse E_{tr}/E_e . Anschließend wurde der Code MEMOS zur Dynamik inkompressibler Flüssigkeiten benutzt um das PFC-Schmelzen zu ermitteln für $E_{\text{tr}} = E_e/50$, massives Target, Q bis zu 30 MJ/m^2 , Δt bis zu $0,2 \text{ s}$ (Rechteckpuls), und anfänglicher Wandtemperatur 500 K . Unter diesen Bedingungen erreicht die Temperatur der Be-Oberfläche 2350 K , und die Verdampfung ist erheblich. Die Schmelzschichtdicke übersteigt $0,7 \text{ mm}$ nicht, und etwa 20% des geschmolzenen Materials verdampft. Ohne Verdampfung würde die Schmelzschichtdicke 2 mm erreichen. Eine

angenommene Raleigh-Taylor-Instabilität sollte zum Abspritzen der Schmelzmasse von der Oberfläche führen.



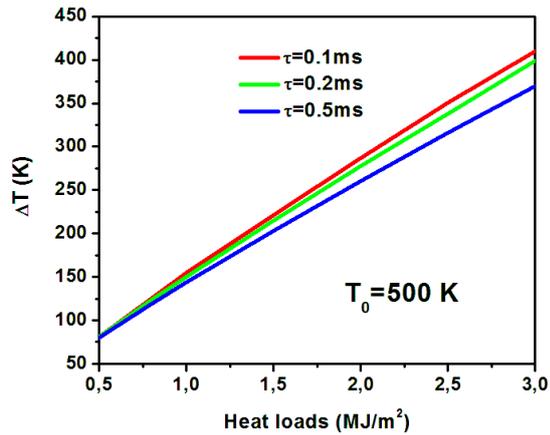
Energiedeposition durch Fluchtelektronen für eine Be Platte auf Cu Kühlkörper.

MEMOS wurde ebenfalls angewendet für numerische Simulationen von Beryllium Schmelzen und Verspritzen nach kleinen ITER ELMs (siehe folgende Abbildung). Die sich ergebenden Bewegungsgeschwindigkeiten der Schmelze sind für massive Targets und Mikrobürstentargets sehr unterschiedlich.



Bewegungsgeschwindigkeit der Schmelze vs. Querstromdichte bei ELM, $Q = 1,25 \text{ MJ/m}^2$, $\Delta t = 0,5 \text{ ms}$.

Außerdem wurden mit ENDEP und MEMOS Abschätzungen der Aufheizung von Graphit-Oberflächen im JET-Tokamak durchgeführt. Die Untersuchungen erfolgten im Rahmen eines "Monats der Modellierung" der experimentellen Kampagne C27b im September 2009 zur Unterstützung und Interpretation der JET Fluchtexperimente, die zusätzlich auch noch der Vorhersage von möglichen Wandschäden in ITER gewidmet war. Als ein Beispiel zeigt die nächste Abbildung die Oberflächentemperatur am Graphit-Target für unterschiedliche Energieflüsse und Energiespektren der Elektronen.



Temperatur der Graphit-Oberfläche durch Fluchtelektronen verschiedener Pulsdauern.

Integrale Plasma-Modellierung

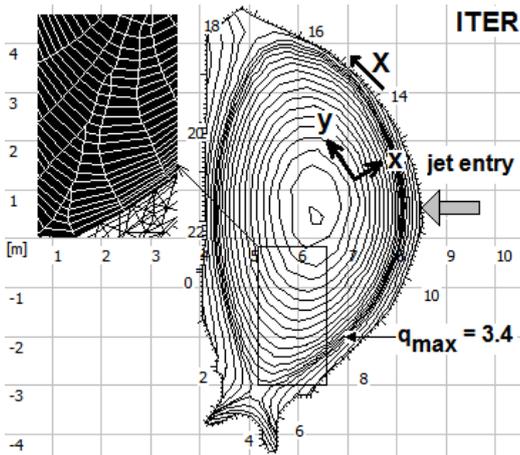
Simulation der Massivgas-Injektion mit dem Code TOKES

(EFDA Task WP09-PWI-09-02/FZK/BS: Thermo-Belastung bei ITER-relevanten ELM Szenarien)

Im zukünftigen Tokamak ITER sollen Schäden durch Disruptionen durch Massivgas-Injektion (MGI) abgeschwächt werden. Am KIT wird mit dem MHD-Codes TOKES eine Abschätzung der tolerierbaren MGI im ITER H-Modus durchgeführt. Der Code beschreibt das Kern- und SOL-Plasma und simuliert Oberflächenprozesse wie Zerstäuben (sputtering) und Verdampfung an den Wandflächen sowie Rückausbreitung der erodierten Spezies in den Kernbereich des Plasmas. Dieser Bericht beschreibt die Weiterentwicklung von TOKES, der nun ein fortgeschrittenes, zweidimensionales (2D) Plasmamodell enthält und zum ersten Mal zur Simulation der MGI angewendet wurde.

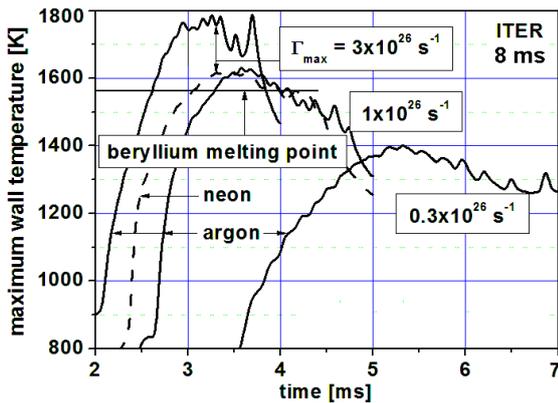
Das Modell für ein heißes 2D Plasma wurde implementiert und angewendet. Im Jahr 2009 lagen die Entwicklungsschwerpunkte auf der Strahlungsbelastung der ersten Wand und der Plasma-Kontamination durch Verunreinigungen bei MGI. Bei der MGI trifft das injizierte kalte dichte Gas auf das heiße eingeschlossene Plasma, wird ionisiert, und deponiert Strahlungsenergie auf die erste Wand. In gewisser Weise ähnelt dieses Problem dem Dampfschild-Problem bei Plasma-Wand-Kontakten.

Die Einbeziehung der Massivgas-Injektion machte ein neues 2D-Modell für toroidal symmetrische Multi-Fluid-Plasmen anstelle des alten 1D Modells erforderlich. Die Modellierung beinhaltet gegenwärtig sowohl schnelle Querdiffusion als auch nicht-stationäre Ausdehnung einer Zwei-Komponenten Plasma-Flüssigkeit aus Deuterium und Argon (oder Neon) entlang der Magnetfeldlinien. Der MGI-induzierte thermische MHD Transport basiert auf einem phänomenologischen Diffusiv-Ansatz. Das aktuelle 2D-Modell verwendet Opazitätstabellen. Die Gasinjektion wird aus einer toroidal-symmetrischen Position horizontal zur magnetischen Achse angenommen (siehe folgende Abbildung).



TOKES-Layout für MGI Simulationen: Gitter für 2D-Plasma-Modellierung. X ist die Wand-Koordinate; die x- und y- Achsen sind orthogonal.

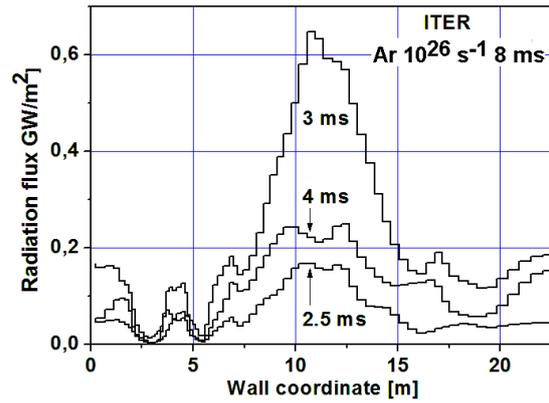
Mit dem MGI Modell erfolgten vorläufige Vergleiche mit experimentellen Ergebnissen am Tokamak DIII-D. Außerdem wurden Simulationen für ITER durchgeführt, mit dem Ergebnis, dass nach einem MGI-induzierten Bestrahlungsereignis die Temperatur in der Wand vor dem Jet-Eintragsort den Beryllium Schmelzpunkt überschreiten kann (siehe nächste Abbildung).



Wandtemperatur in der Nähe von Wandkoordinate X = 10,8 m nach ITER MGI-Simulation (Γ_{max} : maximaler Teilcheneinfall pro s).

In den Rechnungen wurde das Magnetfeld während des thermischen Quenches als konstant angenommen, und der konventionelle Plasmatransport wurde vernachlässigt. Die angenommene Anfangstemperatur der Wand war 500 K. Nachfolgendes Bild zeigt die berechnete sehr inhomogene Verteilung der Strahlungsleistung über die Wand.

Gemäß diesen vorläufigen Simulationen ist eine thermische Quench-Zeit bei Massivgas-Injektion von weniger als 5 ms für Be-Wände zu vermeiden, was durch Optimierung der Menge des injizierten Gases möglich ist (Eintrag von ~ 10 g Ar oder Ne vor Beendigung des thermischen Quenches).



Berechneter Strahlungsfluss in der ersten Wand nach ITER MGI-Simulation.

ECR Heizung und Stromtrieb – Frequenzdurchstimmbare Gyrotrons

Elektron-Zyklotron-Resonanzheizung und Elektron-Zyklotron-Stromtrieb (ECRH und ECCD) haben sich in den vergangenen Jahren zu sehr erfolgreichen Werkzeugen für den Einsatz bei magnetisch eingeschlossenen Plasmen im Fusionsbereich entwickelt. Gyrotrons gelten als einzigartig in der Erfüllung der extremen Anforderungen solcher Anwendungen: Ausgangsleistungen im MW-Bereich, Frequenzbereiche von 100 – 200 GHz, Pulslängen von mehreren Sekunden bis Dauerbetrieb. ECRH kommen heute aufgrund der hervorragenden Ankopplung an das Plasma und der sehr gut definierten Lage der absorbierten Hochfrequenz-(HF)-Leistung im Plasma in vielen Fusionsanlagen zum Einsatz. Auch für zukünftige Fusionsprojekte ist ECRH vorgesehen: es ist das dominante Heizsystem des im Bau befindlichen Stellarators W7-X und wird eine wichtige Rolle im ITER-Tokamak spielen. Fusionsplasmen, insbesondere fortschrittlicher Tokamaks, weisen MHD-Instabilitäten auf, die die Leistungsfähigkeit der Anlage mindern können. Die Stabilität in einem Tokamak wird weitgehend durch die Verteilung der internen Plasmaströme beeinflusst, die durch die gezielte Einstrahlung von HF-Wellen beeinflusst werden können. Der Ort der Absorption von HF-Wellen mit der Kreisfrequenz ω ist abhängig von der Resonanzbedingung $\omega - k_z v_z = \omega_c$ (k_z : z-Komponente der Wellenzahl, v_z : Geschwindigkeit der Elektronen in z-Richtung, ω_c : Zyklotronkreisfrequenz der Elektronen). Durch Ändern der Kreisfrequenz ω kann die Absorption somit an jede radiale Position verschoben werden, an welcher die Zyklotronkreisfrequenz der Elektronen ω_c für den obigen Ausdruck vorliegt.

Industrielle Gyrotrons im für die ECRH benötigten Frequenzbereich mit einer Ausgangsleistung von ca. 1 MW werden normalerweise für eine feste Frequenz gebaut. Frequenzdurchstimmbare Gyrotrons sind also keine Standardprodukte. Breitbandröhren dieser Art erfordern eine zusätzliche gezielte Optimierung der Hauptkomponenten des Gyrotrons, etwa der Elektronenstrahlloptik, des Resonators, des quasioptischen Modenwandlers und des Austrittsfensters.

Für Plasmastabilisierungsexperimente mit hochentwickelter ECRH und ECCD an ASDEX Upgrade (IPP Garching) sind Mehrfrequenzgyrotrons (105 -143 GHz), die im 1 MW-Bereich im Dauerstrich arbeiten unerlässlich.

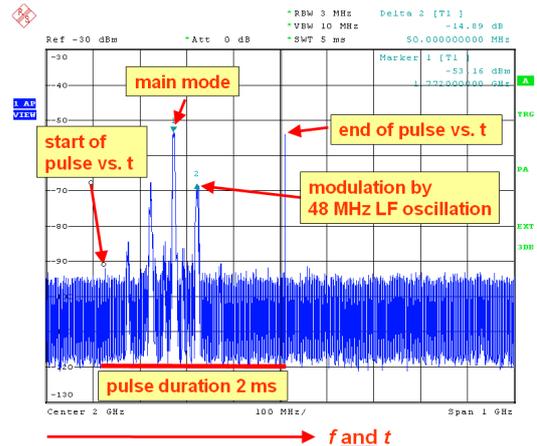
Untersuchungen zu verbesserten Strahl-tunnel-Konzepten

Ein spezielles Versuchsprogramm zur Untersuchung unterschiedlicher Strahl-tunnelkonstruktionen sollte die überraschend aufgetretenen parasitären Schwingungen im Strahl-tunnel des W7-X-Gyrotron und in der coaxialen 2-MW-ITER-Röhre lösen. Um den Hersteller des W7-X Gyrotron, Thales Electron Devices (TED), zu unterstützen, wurde das modulare frequenzdurchstimmbare Kurzpuls-gyrotron zur Untersuchung der parasitären Schwingungen im Strahl-tunnel verwendet. Da die Röhre mit einem Brewster-Fenster ausgestattet und zudem für den Breitbandbetrieb aller Komponenten ausgelegt ist, konnten die Versuche zahlreiche Parameter berücksichtigen und somit ausführliche Daten zum Verhalten der gemessenen unerwünschten Schwingungen liefern.

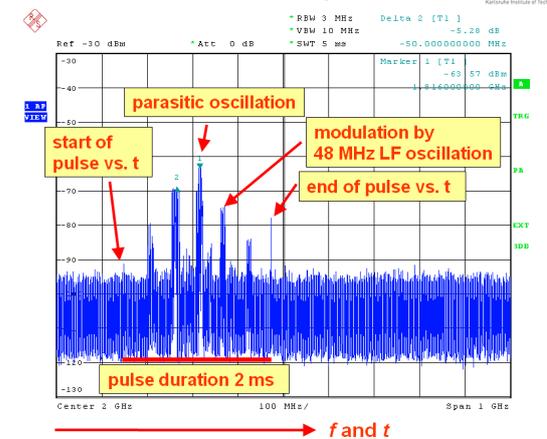
Das frequenzdurchstimmbare Gyrotron ist für unterschiedliche Moden in einem Frequenzbereich von 105 – 143 GHz ausgelegt. Die Frequenzdurchstimmung erfolgt durch Ändern des Magnetfeldes und Anregung der entsprechenden TE-Moden im Resonator. Typisch für den Hochleistungsbetrieb des Gyrotrons sind eine Beschleunigungsspannung von 80 kV und ein Strahlstrom von 40 A. In den Versuchen wurden jedoch auch Strahlströme von bis zu 60 A verwendet.

Im ersten Versuchsaufbau wurde als Referenz ein auch im W7-X-Gyrotron serienmäßig verwendeter azimuthal symmetrischer Strahl-tunnel installiert, der bekanntermaßen parasitäre Schwingungen unterstützt. In einer zweiten Versuchskampagne wurde der azimuthal symmetrische Strahl-tunnel durch eine mod mit gebrochener azimuthaler Symmetrie ersetzt. ifizierte Version

Im azimuthal symmetrischen Referenz-Tunnel traten parasitäre Schwingungen mit deutlich erkennbarem Einfluss auf das Verhalten des Gyrotrons auf. Die folgende Abbildung zeigt beispielhaft eine Messung des Frequenzspektrums einer Resonatormode und einer parasitären Mode. Aufgrund von Mischsignalen und eines sehr niedrigen Leistungsniveaus der parasitären Schwingung mußte dafür das bestehende Frequenzmesssystem (Filter-Bank und Frequenz-Zeit Intervall Analysator) mit einem Spektrumanalysator erweitert werden. Die minimale Durchstimmzeit eines solchen Gerätes ist jedoch von der gleichen Größe wie die Pulslänge des Gyrotrons (~ms). Um trotzdem das gesamte Frequenzspektrum zu erfassen, müssen dann für die Messungen mehrere Gyrotronpulse verwendet werden, wobei der Einsatz der Durchstimmung und der Frequenzbereich des Spektrumanalysators mit dem Gyrotronpuls synchronisiert wurde. Damit läßt sich eine bestimmte Schwingungsfrequenz darstellen und ggf. vorhandene niederfrequente Modulationen sichtbar machen. In der Abbildung oben rechts ist die Resonatormode TE_{22,8} (140,32 GHz) und eine parasitäre Schwingung (134 GHz) mit jeweils einer 48 MHz Modulation gezeigt.

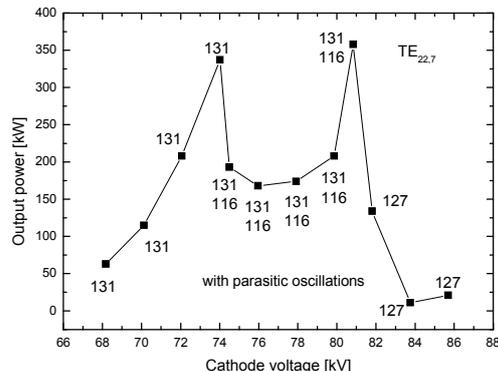
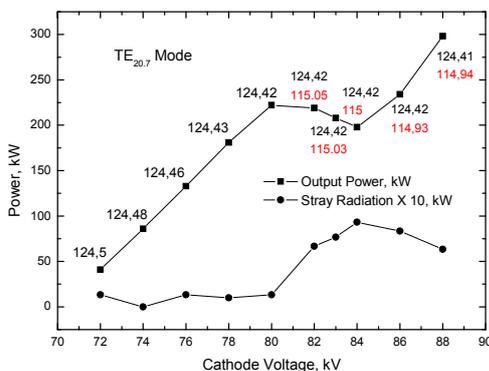


Spektrum einer Resonatormode (TE_{22,8}) moduliert durch eine 48 MHz Schwingung.

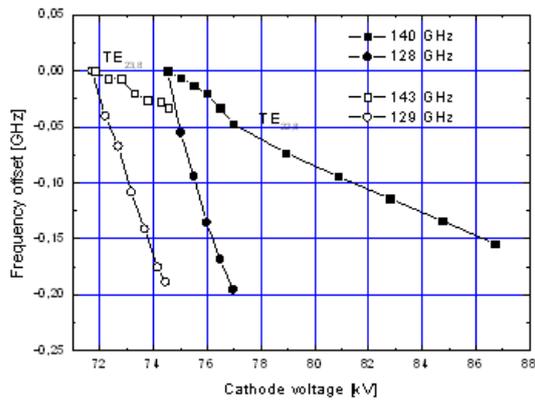


Spektrum einer parasitären Schwingung moduliert durch eine 48 MHz Schwingung. Man beachte den höheren Rauschanteil im Vergleich zur Resonatormode.

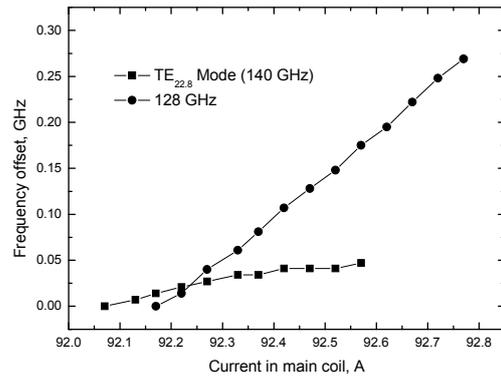
Aus den beiden Abbildungen ist deutlich sichtbar, dass die parasitäre Schwingung einen höheren Rauschanteil zeigt und die Frequenzlinie breiter ist. Man beachte, dass die Frequenzachse bei diesem Verfahren gleichzeitig auch eine Zeitachse repräsentiert, so dass sich temporäre Frequenzen, die während des Ein- bzw. Ausschaltens des Gyrotrons entstehen, als Linien zeigen. Ebenfalls offensichtlich waren die Abnahme der Ausgangsleistung und des Wirkungsgrades sowie die erhöhte Streustrahlungsleistung bei Anwesenheit von parasitären Schwingungen (siehe Abbildung unten). Das Verhalten des Gyrotrons weicht eindeutig ab von der üblichen Norm. Die Resonatorwechselwirkung der gewünschten Mode wird durch die parasitären Schwingungen stark behindert.



Ausgangsleistung aufgetragen gegen die Kathodenspannung für zwei Betriebsmoden im ersten experimentellen Aufbau (Referenz-Strahl-tunnel).



Frequenzänderung der Resonatormode und der Störschwingung (um 128/129 GHz) aufgetragen über der Beschleunigungsspannung (links) und Magnetfeld (rechts).

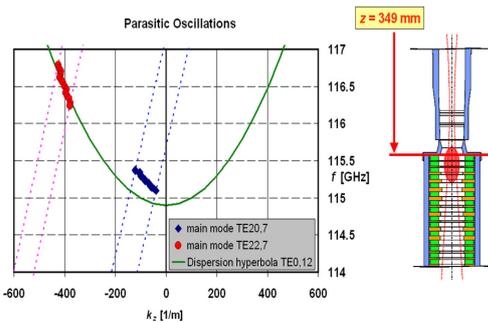


Ebenso wurde beobachtet, dass die Frequenzen der parasitären Schwingungen auf eine Änderung von Parametern wesentlich empfindlicher reagieren als die Frequenzen der Resonatormoden. Die obere Abbildung zeigt die stärkere Abhängigkeit der Frequenz der parasitären Schwingung von Beschleunigungsspannung und magnetischem Feld.

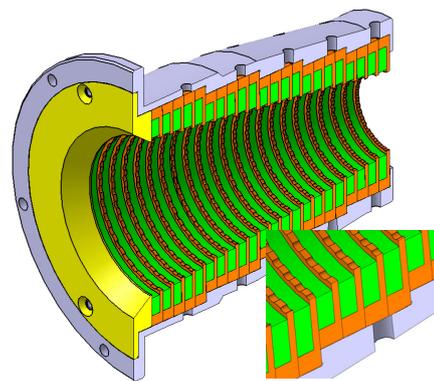
axialen Position z lassen sich die gemessenen Frequenzen sehr gut an diese Kurven anpassen. Diese Ergebnisse legen die Annahme nahe, dass die unerwünschten Schwingungen aus schwach gedämpften, kreisförmigen symmetrischen Rückwärtswellen ($k_z < 0$) bestehen.

Mit Hilfe der sogenannten Brillouin Diagramme wurde eine detaillierte Analyse der gemessenen Frequenzen durchgeführt. In diesem Diagramm wird die Abhängigkeit der Frequenz von der axialen Wellenzahl k_z dargestellt. Über die Resonanzbedingung zwischen Frequenz und Elektronenstrahlparameter der Zyklotronwechselwirkung, $\omega - k_z v_z = \Omega_e$, kann k_z bestimmt werden. Hier ist $\Omega_e = (2\pi [28 \text{ GHz}] B[T])/\gamma$ mit der magnetischen Flussdichte B , dem relativistischen Faktor γ und der axialen Geschwindigkeitskomponente v_z der Elektronen. Man erhält $k_z = (2\pi f - \Omega_e)/v_z$, f entspricht der gemessenen Frequenz. Da sich die Parameter des Elektronenstrahls und das Magnetfeld entlang der z -Achse ändern muss k_z für jede Frequenz neu berechnet werden. In der folgenden Abbildung sind die gemessenen parasitären Frequenzen für zwei Resonatormoden in das Diagramm eingetragen. Gleichzeitig ist die Dispersionskurve der $TE_{0,12}$ Mode gezeichnet. Durch geeignete Wahl der

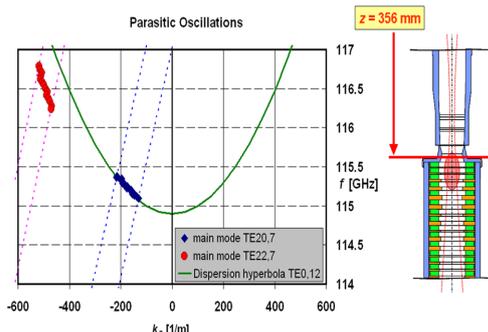
Zur Unterdrückung azimuthal symmetrischer Rückwärtswellen wurde der Strahlentunnel während der zweiten Versuchskampagne durch Brechen der azimuthalen Symmetrie verändert. Durch die zu diesem Zweck in die Kupferringe eingebrachten, ca. $\lambda/4$ -tiefen unregelmäßigen Rillen werden die azimuthalen HF-Ströme unterbrochen, und somit die azimuthal symmetrischen Moden unterdrückt. Zusammen mit dem monoton abnehmenden Innendurchmesser benachbarter Ringe entsteht durch die im Hinblick auf Anzahl, Breite und Periodizität optimierten Rillen eine Anordnung, die eine longitudinale Periodizität verhindert. Eine solche Konstruktion kann auch als „Gitter“ mit einer großen Anzahl unterschiedlicher Gitterkonstanten betrachtet werden. Hierdurch wird der Aufbau einer Resonanzfeldstruktur erschwert, und es kommt zu einer wirksamen Dämpfung der $TE_{m,p}$ -Moden, insbesondere der symmetrischen TE-Moden ($m = 0$). Der modifizierte Strahlentunnel ist in der folgenden Abbildung dargestellt.



Brillouin Diagramm der parasitären Schwingungen (um 115 GHz) für $z = 349 \text{ mm}$.

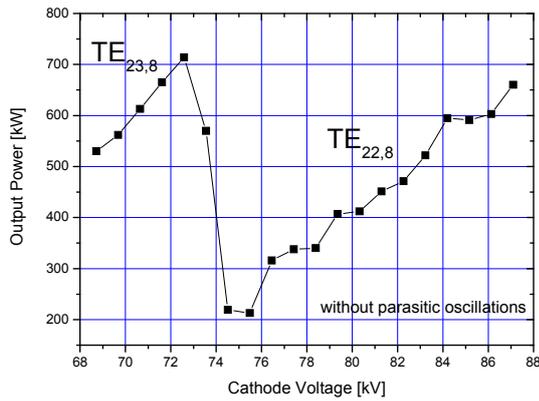


Strahlentunnel mit gerillten Kupferringen.



Brillouin Diagramm der parasitären Schwingungen (um 115 GHz) für $z = 356 \text{ mm}$.

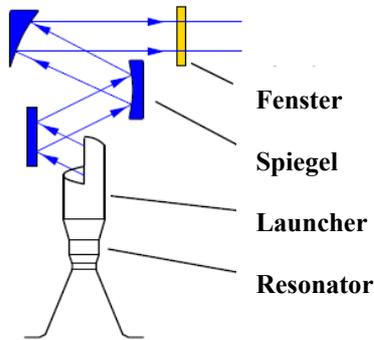
Nach Einbau des verbesserten Strahlentunnels wurde das Gyrotron an den zuvor untersuchten Arbeitspunkten betrieben. Anders als im Falle der zuvor beschriebenen Anordnung mit dem Referenz-Tunnel, traten im Strahlentunnel während der Versuche keinerlei parasitäre Schwingungen auf. Selbst bei einer weit über den Auslegungswert hinaus gehenden Strahlstromstärke (60 A) wurden keine parasitären Schwingungen im Hochfrequenzbereich beobachtet. Eine typische Messung der HF-Ausgangsleistung für die $TE_{22,8}$ -Mode (nächste Abbildung) zeigt, verglichen mit den in der obigen Abbildung dargestellten Ergebnissen, ein normales Ausgangsleistungsverhalten bezogen auf die Beschleunigungsspannung.



HF Ausgangsleistung des Gyrotrons mit verbessertem Strahlentunnel.

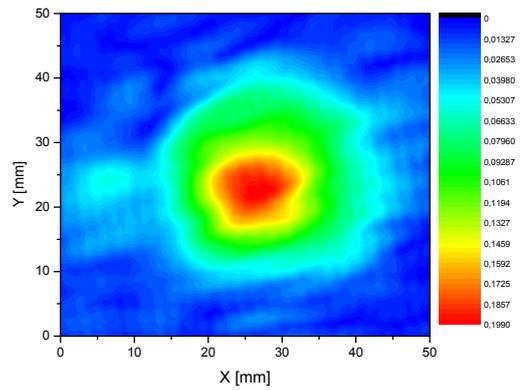
Quasi-optischer Wellentypwandler

Der quasi-optische Wellentypwandler überführt die Resonatormode in einen Gaußschen Strahl zum Transportieren der Leistung durch das Ausgangsfenster. Der Wandler besteht aus einer Hohlleiterantenne mit Wandstörungen, dem so genannten Launcher, und drei Reflektoren, die den Strahl weiter umformen (siehe folgende Abbildung). Für das Mehrfrequenzgyrotron muss der Wellentypwandler dahingehend optimiert werden, dass neun Moden zwischen $TE_{17,6}$ (105 GHz) und $TE_{23,8}$ (143 GHz) jeweils in einen Gaußschen Strahl gewandelt werden können, der für alle Moden möglichst identische Parameter hat. Zunächst wird die Störung an der inneren Wand des Launchers so optimiert, dass er ein möglichst Gauß-förmiges Feld abstrahlt und gleichzeitig nur ein Minimum an Streustrahlung für alle neun Moden produziert. Im Anschluss daran werden 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 Gaußschen Strahls für alle Moden erreicht.



Grundlegende Elemente und Funktionsweise eines quasi-optischen Auskoppelsystems.

Im vergangenen Jahr wurden zwei Wellentypwandler (niedrige Leistung/hohe Leistung) der zweiten Generation fertig gestellt. Beide Systeme wurden mit einem Niederleistungsmessplatz charakterisiert. Die Modenanalyse des Richtstrahls der Mode $TE_{22,8}$ bei 140 GHz hinter drei fokussierenden Spiegeln auf der Ebene des Ausgangsfensters ergab einen experimentellen Gaußschen Anteil von 89 % für beide Versionen. Dieser Wert ist etwas geringer als der aufgrund numerischer Optimierungen erwartete Wert. Die nächste Abbildung zeigt eine typische Messung des Ausgangsstrahls aus dem Wellentypwandler, aufgenommen mit dem Niederleistungs-Messsystem.



HF-Ausgangsstrahl des Wandlersystems (Niederleistungsmessungen).

Die inneren Oberflächen der beiden Launcher wurden mechanisch vermessen. Obwohl für beide Ausführungen die gleichen Daten verwendet wurden, wurden kleine Unterschiede festgestellt.

Zur Überprüfung möglicher Konsequenzen geometrischer Unterschiede wurden mit den Messdaten als Input Modenwandlung sowie Feldausbreitung in der realen Dreispiegel-Anordnung mit Hilfe des Programms SURF3D berechnet. Die Ergebnisse zeigen einen Gaußschen Anteil von 90,7 % für den Cu-Launcher und von 93,3 % für den Al-Launcher. Im Versuch mit hoher Leistung wurde für den Cu-Launcher ein erheblich geringerer Gaußscher Anteil erzielt. Es sind zusätzliche Untersuchungen zur Klärung dieser Abweichung geplant.

CVD-Diamant-Brewster-Fenster

Der effiziente Betrieb eines Gyrotrons bei unterschiedlichen Frequenzen und mit einer entsprechend großen Anzahl von Arbeitsmethoden erfordert die Verwendung eines breitbandigen Auskoppel-Fensters. Hier soll ein Brewster-Fenster aus synthetisch mittels chemischer Dampfabcheidung (Chemical Vapor Deposition - CVD) hergestelltem Diamant eingesetzt werden. Wegen des großen Brewster-Winkels von $67,2^\circ$ wird für eine ausreichende Durchtrittsöffnung des HF-Strahls eine Scheibe relativ großen Durchmessers benötigt. Eine 1,7 mm dicke Scheibe mit einem Durchmesser von 140 mm wurde von der Firma Element Six entwickelt und bereits geliefert. Diese Scheibe wird für die elliptische Kontur des Brewster-Fensters mit einer effektiven Öffnung von 50 mm verwendet.

Aufgrund der elliptischen Lötung variieren die entstehenden mechanischen Spannungen entlang der Lötnaht deutlich, im Gegensatz zu konventionellen runden Scheiben. Rechnungen geben eine bis zu 1,3-fach erhöhte Belastung an. Um zu untersuchen, ob eine Diamantscheibe solchen Belastungen standhält, wurden bei Thales Electron Devices Lötversuche mit einer Quarzscheibe und einer kleineren Diamantscheibe durchgeführt. Die in der Diamantscheibe auftretenden Spannungen waren gegenüber den in der runden Scheibe gemessenen Werten erhöht. Nach den erfolgreichen Lötversuchen ist geplant, die 140-mm-Diamantscheibe mit Kupferhalterungen zu verlöten.

Die kleine Diamantscheibe wurde 2009 erstmals erfolgreich gelötet. Die Konstruktion ist vakuumdicht (siehe Abbildung). Das Löten einer Diamantscheibe der tatsächlich benötigten Größe wird in Zusammenarbeit mit dem Industriepartner erfolgen.



CVD Diamant Scheibe, gelötet unter dem Brewster Winkel von 67,2°.

Schnell durchstimmbarer, supraleitender Magnet

Ein schnell durchstimmbarer Gyrotron-Magnet, mit dem das Magnetfeld im Bereich von 4,15 – 5,67 T durchgestimmt werden kann, wurde bei Cryomagnetics Inc., USA, bestellt. Mit diesem Magnet besteht die einzigartige Möglichkeit, die Frequenz des Gyrotrons von 105 GHz bis 143 GHz in Schritten von ca. 3 GHz innerhalb von 0,5 s im Abstand von je 10 s zu verändern. Das maximale Magnetfeld von 7,2 T ermöglicht darüber hinaus Untersuchungen an Gyrotrons des ITER ECRH-Systems mit einer Frequenz von 170 GHz.

Das Spulensystem wurde 2009 in einem Testkryostaten kalt getestet (Abbildung). Dabei wurde der Magnet bei Maximalfeld betrieben und die schnelle Durchstimbarkeit gezeigt. Messungen des Feldprofils des im Original-Kryostaten installierten Spulensystems zeigten eine gute Übereinstimmung mit den im Testkryostaten ermittelten Werten. Die vollständigen Daten (z.B. Ausrichtung der magnetischen und geometrischen Achsen, Verluststraten) des Komplettsystems werden Anfang 2010 erwartet.



Schnell durchstimmbarer Magnet während Tests beim Hersteller.

Sonderprojekt Mikrowellenheizung (PMW) für Wendelstein 7-X

Elektron-Zyklotron-Resonanzsysteme sind in den vergangenen Jahren zum Standard für lokale Elektron-Zyklotron-Resonanzheizung (ECRH) oder Elektron-Zyklotron-Stromtrieb (ECCD) in fusionsrelevanten Plasmen geworden. Die ECRH ist somit auch das Heizsystem der Wahl des derzeit am IPP Greifswald in Bau befindlichen Stellarators W7-X. W7-X wird während der ersten Phase mit einem 10 MW, 140 GHz ECRH-System für stationären Betrieb ausgestattet. Das gesamte ECRH-System wird vom FZK (seit 1. Oktober 2009 KIT) bereitgestellt, das gemeinsam mit EU-Partnern 1998 das „Projekt Mikrowellenheizung für W7-X“ (PMW) gründete. Die Bereitstellung umfasst die Auslegung, Entwicklung, Konstruktion, Installation sowie umfassende Tests aller für die stationäre Plasmaheizung im IPP Greifswald erforderlichen Komponenten. Darüber hinaus koordiniert PMW die Beiträge des Instituts für Plasmaforschung (IPF) der Universität Stuttgart, das für das Mikrowellenübertragungssystem und für einen Teil des Hochspannungssystems verantwortlich ist, und des Teams des IPP Greifswald, dessen Zuständigkeit im Bereich der In-Vessel-Komponenten (Antennen im Torus) und der Hilfssysteme liegt. PMW profitiert daneben von der Zusammenarbeit mit dem Centre de Recherche de Physique des Plasmas (CRPP) Lausanne, dem Commissariat à l’Energie Atomique (CEA) in Cadarache und mit Thales Electron Devices (TED) in Vélizy.

Ein von CRPP Lausanne, dem damaligen FZK Karlsruhe (heute KIT) und TED, Vélizy abgeschlossenen Vertrag hat die Entwicklung und den Bau der kontinuierlich betriebenen Seriengyrotrons zum Gegenstand. Innerhalb der ersten, bereits erfolgreich abgeschlossenen Phase dieser Kollaboration wurde ein Prototyp-Gyrotron für W7-X mit einer Ausgangsleistung von 1 MW für den CW-Betrieb bei 140 GHz entwickelt.

Bei TED wurden damit sieben Seriengyrotrons bestellt. Die erste Inbetriebnahme und Konditionierung dieser Gyrotrons für den Langpulsbetrieb erfolgt jeweils im KIT-Versuchsstand, der mit Pulslängen bis zu 180 s bei voller Leistung eine Abnahme im Sinne des FAT (Factory Acceptance Test) erlaubt. Für die Abnahme nach SAT (Site Acceptance Test) können die Gyrotrons am IPP bei voller Leistung in Pulslängen bis zu 30 Minuten betrieben werden. Unter Einbeziehung des Vorprototyps der Röhre, der eigentlichen Prototypröhre und der getrennt davon beschafften 140 GHz CPI-Röhre werden zehn Gyrotrons für W7-X zur Verfügung stehen. Um diese Gyrotrons betreiben zu können, wurden acht supraleitende Magnet-systeme bei Cryomagnetics Inc., Oak Ridge, USA, bestellt und geliefert (zusätzlich zu den beiden Magneten von Oxford Instruments und Accel).

Das Projekt machte 2009 weitere Fortschritte. Die Mehrzahl der Komponenten des Übertragungssystem, Hochspannungssystem und des In-Vessel-Systems wurde bestellt, gefertigt und geliefert und steht bereit zum Betrieb am IPP Greifswald. Ein Teil des bestehenden ECRH-Systems wird bereits zur Erprobung neuer ECRH-Konzepte und -Komponenten genutzt. Die Verzögerungen innerhalb der vergangenen 1 – 2 Jahre waren auf unvorhergesehene Schwierigkeiten bei der Fertigung der Seriengyrotrons zurückzuführen.

Seriengyrotrons für ECRH an W7-X

Das 2005 am damaligen FZK und am IPP erfolgreich getestete erste TED-Seriengyrotron SN1 (920 kW/1800 s) erfüllte alle Anforderungen. Während der Abnahme traten keine besonderen Einschränkungen auf. Das Gyrotron wurde aus Gewährleistungsgründen versiegelt, die beiden Prototypen werden routinemäßig für Versuche genutzt.

Bei den darauf folgenden Seriengyrotrons zeigte sich ein etwas andersartiges Verhalten in Bezug auf die im Strahlentunnel angelegten parasitären Schwingungen. Die beobachteten Schwingungen führten zu einer sehr starken Erwärmung der Strahlentunnelkomponenten, insbesondere der absorbierenden Keramikringe. In den im Anschluss an die Testläufe geöffneten Gyrotrons wurden erhebliche Schäden durch Überhitzung an den Keramikringen und deren Lötungen festgestellt. Generell wurde die Pulslänge bei Hochleistungsbetrieb hierdurch auf wenige ms begrenzt.

Um den Hersteller bei der Umsetzung der erforderlichen Änderungen zu unterstützen, wurde am damaligen FZK ein dediziertes F&E-Projekt mit Laufzeit bis Ende Juni 2009 ins Leben gerufen. Innerhalb dieses Projekts sollte ein robuster, parasitäre Schwingungen wirksam unterdrückender Strahlentunnel entwickelt werden. Um eine weitestgehenden Validierung neuer Strahlentunnel zu ermöglichen, wurden Versuche mit dem frequenzdurchstimmbaren Gyrotron und dem koaxialen Vor-Prototyp-Gyrotron unter Verwendung eines baulich modifizierten Strahlentunnels durchgeführt. Einzelheiten zu den Versuchen werden in den entsprechenden Kapiteln beschrieben.

Das F&E-Projekt am damaligen FZK wurde fristgerecht mit eindeutig positivem Ergebnis abgeschlossen. Die Hochleistungsexperimente mit unterschiedlich ausgelegten Strahlentunneln im frequenzdurchstimmbaren Gyrotron (105 – 143 GHz) und koaxialen Gyrotron (170 GHz) zeigen in Bezug auf parasitäre Schwingungen einen eindeutigen Vorteil des verwendeten, mit gerillten Kupferringen versehenen Strahlentunnels.

Strahlentunnel mit gerillten Kupferringen wurden vom damaligen FZK nachdrücklich für alle W7-X-Seriengyrotrons empfohlen.

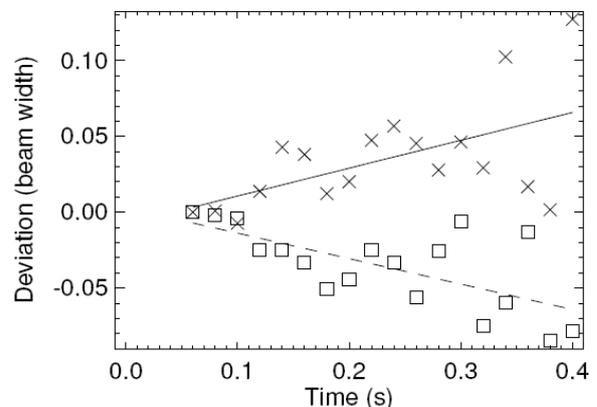
Einem vorläufigen Zeitplan zufolge liefert der Hersteller das nächste Gyrotron, mit verbessertem Strahlentunnel ausgestattet, im April 2010.

Übertragungsleitungen für ECRH an W7-X

Die Übertragungsleitungen bestehen aus Einstrahl- (single beam waveguide – SBWG) und Vielstrahl- (multi-beam waveguide - MBWG) Elementen. Für jedes Gyrotron wird eine Anpassoptik mit fünf Spiegeln verwendet. Zwei der Spiegel formen den Ausgangsstrahl des Gyrotrons zu einem Gaußschen Strahl mit den gewünschten Parametern, zwei weitere Spiegel ermöglichen eine Polarisierungseinstellung, die für die optimale Absorption der Strahlung im Plasma benötigt wird. Ein fünfter Spiegel richtet den Strahl hin zu einer Anordnung aus flachen Spiegeln, der Beam Combining Optics, die sich am Eingang des Vielstrahlübertragungssystems befindet. Die Vielstrahlspiegel sind dafür ausgelegt, bis zu sieben Strahlen (fünf bei 140 GHz, einen bei 70 GHz und einen zusätzlichen Ersatzkanal) vom Gyrotronbereich (Eingangsebene) zur Stellaratorhalle (Ausgangsebene) zu übertragen. Zur Übertragung der Leistung aller Gyrotrons werden zwei symmetrisch angeordnete MBWG-Übertragungsleitungen verwendet. In den Ausgangsebenen der MBWG trennt eine Spiegelanordnung (Beam Distribution Optics – BDO) die Strahlen und verteilt sie über zwei weitere Spiegel und CVD-Diamant-Vakuumbenutzer auf die einzeln verstellbaren Antennen (Launcher) im Torus. Die BDO und die nachgeordneten Spiegel befinden sich in so genannten Türmen, deren Spitzen „Zinnen“ tragen.

2009 war die Fertigung der „Zinnen“ einschließlich der Abschirmgehäuse um die Vakuumbenutzer, der Schnittstellen zu den Stellarator-Ports, der Streustrahlungsabsorber und der in die Oberflächen der Spiegel vor den Fenstern integrierten Richtkoppler nahezu abgeschlossen. Gegenwärtig konzentrieren sich die Arbeiten auf die Entwicklung eines Systems zur Ausrichtung der Gitterkoppler.

Angesichts der Abnahme der Schwingfrequenz der W7-X-Gyrotrons im Bereich von einigen 100 MHz bis zu etwa 1 Sekunde nach dem Einschalten wurden erste Untersuchungen zur Stabilität des Ausgangsstrahls durchgeführt. Die Frequenzabnahme wird durch die thermische Ausdehnung des Resonators verursacht. Die quasi-optischen Strahlübertragungsleitungen, und insbesondere die beiden Anpassspiegel, wurden auf Grundlage von Strahlvermessungen während der ersten Millisekunden eines Pulses ausgelegt. Jede erkennbare Abweichung der Strahlrichtung nach dem Einschalten würde die Verwendung von Anpassspiegeln, wie sie momentan für die endgültige Konstruktion in Betracht gezogen werden, erschweren. Zur Untersuchung von Strahlbewegungen wurde ein Siliziumnitrid-Hochtemperatur-Target mit einem vom TED-Prototypgyrotron erzeugten 350 ms-Puls beaufschlagt. Die Verschiebung des Strahlmittelpunkts wird in der Abbildung dargestellt. Es ist eine eindeutige Abweichung erkennbar. Bedingt durch starkes Rauschen lässt sich jedoch nicht bestimmen, ob der Strahl nach 300 ms in die Ausgangsposition zurückkehrt. Weitere Messungen sollen durchgeführt werden.



Verschiebung des Strahlzentrums (in Einheiten des Strahldurchmessers) in x (Kreuze) und y (Quadrate) Richtung gegen die Pulslänge aufgetragen (x: vertikale Richtung, y: horizontale Richtung am Gyrotron).

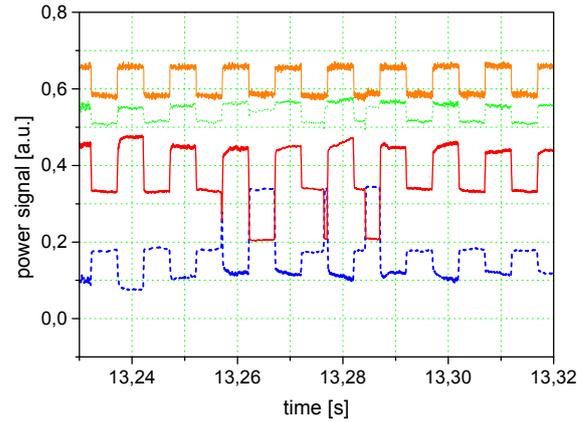
Die Alterung der verfügbarer CW-Absorberlasten führt zu vermehrten Überschlügen bei hoher Leistung. Aus diesem Grund werden die Versuche, diese Lasten durch neue Lasten zu ersetzen fortgesetzt. Dabei besteht eine Option in Form der sogenannten „Langen Last“, die auf einem langen (> 20 m) Edelhohlleiter beruht und bei der die Leistung als Gaußscher Strahl eingekoppelt wird. Durch entsprechende Verjüngung wird die Absorption dem natürlichen Leistungsverlust entlang des Hohlleiters angepasst. Während erste Versuche mit einem einfachen Modell unter Verwendung gewöhnlicher Wasserrohre mit geschweißten Verbindungen von einem Auftreten starker Überschlüge gekennzeichnet waren, war ein zweiter Versuch mit einem ungekühlten, elektropolierten Rohr erfolgreich. Übereinstimmend mit den Versuchsergebnissen soll eine wassergekühlte Ausführung mit geflanschten Verbindungen bereitgestellt werden.

Wie bereits in den vergangenen Jahren, konnte das ECRH-System auch zum Testen spezieller Komponenten eingesetzt werden. Eine der Versuchskampagnen galt der Untersuchung eines kompakten, hochleistungsfähigen Langpuls-Diplexers. Die bestehende Vorrichtung (MkII) ist mit HE₁₁-Schnittstellen versehen und somit mit den Hohlleiterübertragungssystemen kompatibel. Sie ist sowohl als Leistungsaddierer für zwei Gyrotrons als auch als schneller Kanal-Umschalter (FADIS) ausgelegt und daher von potentiell Interesse für ITER. Mit den am IPF Stuttgart durch Niederleistungsmessungen ermittelten Basiseigenschaften wurde der MkII für Hochleistungstests in die quasi-optische Übertragungsleitung

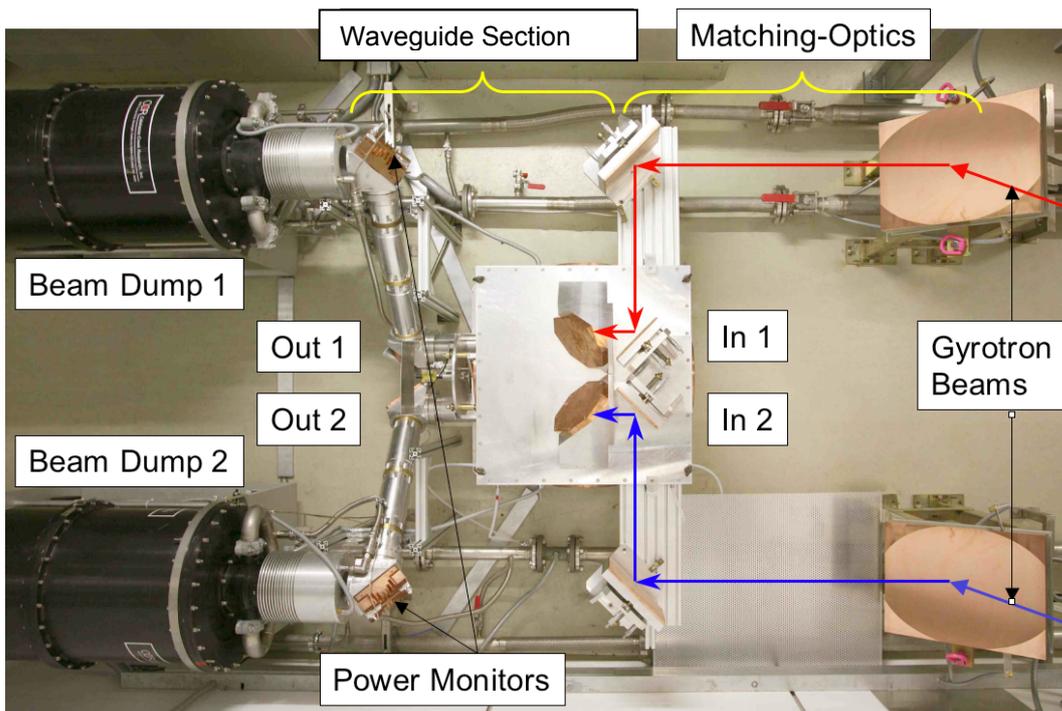
des ECRH-Systems am IPP Greifswald integriert. Die Abbildung unten zeigt den Versuchsaufbau.

Zur Bestimmung der Leistungsparameter bei unterschiedlichen vorgegebenen Resonanzfrequenzen wurde mit der Durchführung von Hochleistungstests mit einem Gyrotron (Maquette) begonnen. Bisher wurden Pulslängen von 75 s bei Spitzenleistungen von 500 kW erreicht. Eine Erhöhung auf 100 s auf diesem Leistungsniveau erscheint machbar. Es wurden Versuche zum schnellen Umschalten durchgeführt. Ein Beispiel ist in der ersten Abbildung auf der nächsten Seite dargestellt.

Einer der Spiegel ist mit einer durchstimmbaren Vorrichtung zur Nachführung der Resonanzfrequenz von MKII versehen. Der Antrieb dieser Vorrichtung wurde von TNO in Delft entwickelt. Erste Versuche zeigten eine schnelle Nachführung mit der Veränderung der Diplexer-Resonanzfrequenz, die für einen optimalen Schaltkontrast benötigt wird. Versuche zur Nachführung der für die Leistungsaddition zweier Gyrotrons erforderlichen Resonanzfrequenz sind in Vorbereitung.

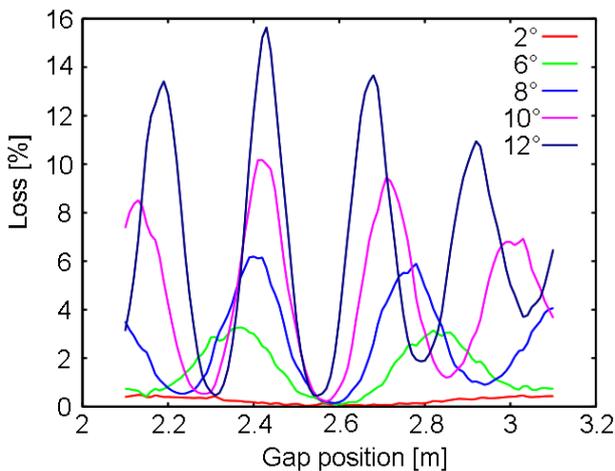


Eingangs- (Orange, In1) und Ausgangs-Signale (Blau, gestrichelt für Out1, rot, durchgehend für Out2) und die Summe der beiden Ausgangsleistungen (grün, gepunktet). Die Bodyspannung des Gyrotrons und daraus folgend die Frequenz wurde mit einer Rechteck Funktion moduliert ($\Delta U_{B1} = 1 \text{ kV}$, $f_{MD} = 100 \text{ Hz}$).



Aufbau des MKII Diplexers im Strahlentunnel des ECRH Systems an W7-X. MKII ist in der Mitte erkennbar. Die Pfeile deuten die Ausbreitungsrichtungen der beiden Freiraumstrahlen an (In1 und In2). Links sind die Hohlleiterausgänge (Out1 und Out2) mit zwei Mitre-Bends pro Kanal und die beiden Absorberlasten (beam dump 1 und 2) zu erkennen.

Für zwei der N-Ports von W7-X sind „ferngesteuerte“ Launcher vorgesehen, da frontgesteuerte Launcher, wie sie in den A- und E-Ports (siehe nächstes Kapitel) verwendet werden, nicht in den engen N-Ports eingebaut werden können. Der Fernsteuerungseffekt basiert auf der zu Streueffekten führenden Ausbreitungscharakteristik der Moden in einem quadratischen Hohlleiter: Für kleine Einstrahlwinkel gilt, dass ein am Eingang des Hohlleiters eintretender Mikrowellenstrahl, dessen Richtung durch ein Spiegelsystem außerhalb des Plasmapvakuum definiert wird, in der Nähe des Plasmas in derselben Richtung aus dem Hohlleiter austritt. Für W7-X müssen das Vakuumfenster, ein Vakuumventil und ein Krümmer in den 5,1 m langen Hohlleiter eingebaut werden. Es wurden Berechnungen zur Optimierung der Position dieser Komponenten und damit zur Verringerung von Antennenverlusten durchgeführt. Übertragungsverluste für verschiedene Einstrahlwinkel und ein 25 mm großer Spalt im Hohlleiter in Abhängigkeit von der axialen Position sind in der folgenden Abbildung dargestellt. Gute Ergebnisse werden in einem Winkelbereich von $\pm 12^\circ$ erzielt, bei dem das Vakuumventil bei $z = 2,56$ m positioniert ist. Es werden weitere Optimierungsberechnungen zur Vergrößerung des Einstellbereiches mittels Modifizierung des Querschnitts des quadratischen Hohlleiters durchgeführt.



Übertragungsverluste für einen Spalt von 25 mm im korrigierten Rechteckhohlleiter als Funktion der axialen Position des Spaltes.

In-Vessel-Komponenten für ECRH an W7-X

Der Zusammenbau von drei der vier ECRH-Antennen (Plug-in-Launcher für A- und E-Ports) wurde abgeschlossen. Die mit jeweils drei Strahllinien ausgestatteten Launcher wurden nach Greifswald zur Endabnahme geschickt. Die ersten beiden Launcher haben den Vakuumtest in der großen MISTRAL-Vakuumkammer erfolgreich absolviert (siehe nächste Abbildung). Da die laserbasierten Vermessungen der Antennen und entsprechenden Ports jedoch Maße außerhalb der Toleranz für beide Komponenten zeigten, müssen die Abmessungen der Antennen verkleinert, die der Ports vergrößert werden. Mechanische Tests der beweglichen Antennenspiegel wiesen ferner einige nicht passgenau montierte Lagerelemente aus. Ein Konzept für entsprechende Reparaturen und geringfügige Änderungen der Konstruktion wurde ausgearbeitet. Die Launcher wurden zur Instandsetzung zurück an BTI-KIT gesendet. Die Ports, die der Verantwortung des IPP obliegen, sollen in Greifswald vergrößert werden.



Test einer Einstrahlantenne (Launcher) in der MISTRAL Vakuum-Test-Kammer am IPP Greifswald.

Die in den Stellarator übertragene ECRH-Leistung wird von einer Hohlleiter-Anordnung, bestehend aus 120 Kupferrohren, gemessen. Vier Hohlleiterbündel durchdringen an den vier Ports die Vakuum-Luft-Übergangsstelle. Die Zwischenflansche für die Hohlleiter-Anordnung, d.h. 30 einzelne CF16-Flansche pro Hohlleiter, sowie die In-Vessel-Hohlleiter-Stützkonstruktion, wurden gefertigt. Mit dem Zusammenbau der Hohlleiter und Ports soll Anfang 2010 begonnen werden.

170 GHz, 2 MW Koaxial-Gyrotron für ITER

F4E-2008-GRT-08(PMS-H.CD)-01 Entwicklung des Europäischen Gyrotrons ("CCGDS6")

Die Entwicklung eines 2 MW-170 GHz Gyrotrons für ITER, mit koaxialem Resonator und für Dauerstrichbetrieb (CW), wird im Rahmen des Europäischen Gyrotron Konsortiums EGYC durchgeführt. EGYC wurde als wissenschaftlicher Ansprech- und Vertragspartner für die Auftrag gebende Institution F4E eingerichtet und setzt sich aus folgenden Institutionen zusammen: CRPP, Schweiz; KIT, Deutschland; HELLAS, Griechenland; CNR und ENEA; Italien. Darüber hinaus besteht eine zusätzliche Kooperation mit ISSP, Lettland. Das Ziel der Entwicklung ist es, Millimeterwellen-Quellen für ECH&CD (Elektronen-Zyklotron-Heizung und Stromtrieb) bei 170 GHz für ITER mit einer Gesamtleistung von 8 MW bereitzustellen. Damit soll der Europäische Anteil der Millimeterwellenleistung erbracht werden. Im Gegensatz zu den anderen Beteiligten Japan und Russland verfolgt das EU Team die Entwicklung von 2 MW Quellen (ITER-Spezifikation: mindestens 1 MW), um Kosten und Platzbedarf zu reduzieren, oder um nötigenfalls die erzeugte Leistung bei gleichem Platzbedarf zu verdoppeln, und schließlich, um die wesentlich leistungsfähigere koaxiale Resonatortechnik zu etablieren.

Während der industrielle Prototyp, hergestellt von Thales Electron Devices (TED, Frankreich) am CRPP getestet wird, beteiligt sich das KIT an Entwicklung und Test durch den Entwurf von wesentlichen Komponenten, durch wissenschaftliche Unterstützung und Mitarbeit bei den Tests wie auch durch eigene Versuche und Messungen sowohl bei kleiner Leistung (Kaltmessung) als auch mit Kurzpuls-Hochleistungsmessungen. Letztere werden mit dem modularen Vor-Prototypen des IHM für Pulse im ms-Bereich durchgeführt. Im Einzelnen ist das IHM verantwortlich für den Entwurf von Resonator, nichtlinearem Uptaper und für das Auskopplungssystem, außerdem beteiligt es sich an den Entwürfen von Kanone, Strahlentunnel und Kollektor.

Parallel zur Entwicklung des koaxialen 2 MW-Gyrotrons wird die Entwicklung eines konventionellen 1 MW-Gyrotrons als Ausweichlösung vorbereitet. Damit soll die strategische Entscheidung über die Weiterführung des 2 MW-Experiments oder einen eventuellen Rückzug auf einen 1 MW-Backup-Entwurf unterstützt werden. Diese Entscheidung soll gegen Ende 2010 nach den nächsten Experimenten mit dem 2 MW-Prototypen getroffen werden.

Stand der Arbeiten zu Anfang 2009

Im Herbst 2008 wurden die Experimente mit dem ersten koaxialen 2 MW-Prototypen am CRPP ohne wesentlichen Erfolg beendet. Es gelang nicht, die Röhre in langen Pulsen zu betreiben (vorgesehen war bis zu 1 s), und auch in kurzen Pulsen (1 – 2 ms) konnte eine Ausgangsleistung von 1.4 MW nicht überschritten werden, aufgrund mangelhafter Hochspannungsfestigkeit während des Betriebs. Nach Öffnen der Röhre wurden diverse Beschädigungen gefunden, welche nicht unmittelbar erklärt werden konnten. Lediglich die Lastkapazität des Kollektors konnte entsprechend den Spezifikationen bestätigt werden: In Experimenten ohne HF-Erzeugung konnte gezeigt werden, dass der Kollektor und das Kühlsystem eine Wärmelast von mindestens 2.2 MW aufnehmen können.

Zur gleichen Zeit wurden am IHM Experimente mit dem Kurzpuls-Vor-Prototypen mit ähnlicher Kanone und gleichem Resonator, Uptaper und Ausgangs-Modenwandler durchgeführt. Dies war teilweise erfolgreich, da eine Ausgangsleistung von 1.4 MW bei 23 % Wirkungsgrad bei reduzierten Arbeitsparametern erreicht wurde, bei einer erwarteten Leistung von 1.5 MW, und eine unerwünschte Niederfrequenz-Schwingung (bei 265MHz) erfolgreich unterdrückt werden konnte. Allerdings wurden die Ausgangsleistung und der Wirkungsgrad nun durch eine andere parasitäre HF-Schwingung bei 160 GHz geringfügig reduziert. Unbefriedigend war außerdem, dass der Nachweis einer Ausgangsleistung von über 2 MW durch eine Begrenzung des verfügbaren Magnetfelds des Oxford-Instruments-Magneten am IHM, welche die Reduzierung der Arbeitsparameter und ein entsprechend angepasstes Kanonendesign erzwang, unmöglich gemacht wurde. Dies erschwerte auch die wirkungsvolle Unterstützung bei der Lösung der Probleme des Prototypen.

Schließlich wurde auch der Modenwandler für ungenügend befunden. Dieser war mit einem konventionellen Antennenhohlleiter (Launcher) mit helikaler Deformation aufgebaut und erzeugte einen Ausgangsstrahl mit nur 77 % Gaußschem Grundmodengehalt, im Gegensatz zu vorhergesagten 86 % und zu der ITER-Spezifikation von > 95 % - ursprünglich war geplant, einen zunächst simulierten Gauß-Gehalt von 88 % durch einen speziellen phasenkorrigierenden Spiegel nachträglich auf > 95 % zu erhöhen. Ein neues Entwurfsprogramm für innovative Launcher mit optimierter Oberfläche in beliebiger, frei wählbarer Form war bereits in Arbeit, und ein erster verbesserter Launcher war bereits entworfen, hergestellt und in kalter Messung verifiziert worden. Im Gegensatz zu helikal deformierten Launchern sind Launcher mit beliebig geformten Oberflächen besser für typische Arbeitsmoden koaxialer

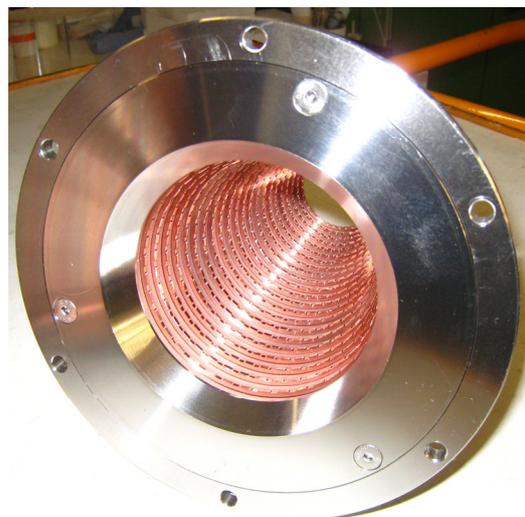
Gyrotrons geeignet, da diese meist einen relativen Kaustikradius von < 0.5 aufweisen, während sich konventionelle Launcher eher für relative Kaustikradien nahe 0.5 eignen.

Aufgrund all dieser Probleme wurde die Wiederaufnahme der Arbeiten am 1 MW-Backup-Design vorgesehen; diese waren im März 2008 auf der Stufe einer Machbarkeitsstudie angehalten worden.

Ergebnisse in 2009

Hochleistungstests mit dem Vor-Prototypen

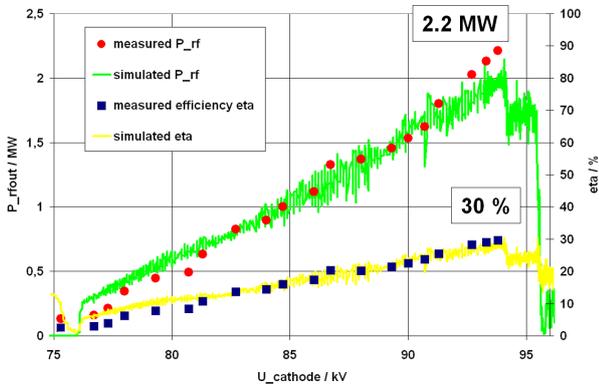
Um die Begrenzung der Magnetfeldstärke im Oxford-Instruments-Magneten des KIT zu überwinden, wurde eine zusätzliche normalleitende (NC) Spule im Bereich des Resonators direkt auf das Gehäuse des Vor-Prototypen gewickelt. Damit konnte in Pulsen von einigen 10 s die magnetische Flussdichte von bisher 6.72 T auf ca. 6.9 T erhöht werden. Parallel dazu wurde die Kanone überarbeitet und für einen Betrieb bei 90 kV ausgelegt – mit dem zuvor schwächeren Magnetfeld konnte bei 170 GHz nur bis 80 kV gearbeitet werden, wegen der darüber zu kleinen relativistischen Elektronen-Zyklotronfrequenz. Mit diesen Verbesserungen konnte in ersten Experimenten im Januar eine Ausgangsleistung von 1.8 MW bei 27 % Wirkungsgrad erreicht werden. Gleichzeitig wurde ein unregelmäßig korrigierter Strahlentunnel, wie er später im frequenzverstellbaren Gyrotron des IHM getestet wurde, eingesetzt (siehe nächste Abbildung). Da aber die HF-Ausgangsleistung in diesen Experimenten noch durch Beschränkungen des Netzteils der normalleitenden Spule begrenzt wurde, konnte hier noch keine eindeutige Verbesserung durch den korrigierten Strahlentunnel nachgewiesen werden.



Prototyp des neuen Strahlentunnels mit unregelmäßig korrigierten Kupferringen.

Bei der nächsten Versuchsreihe im Sommer 2009 wurde dann ein leistungsfähigeres Netzteil für die normalleitende Spule eingesetzt. Damit, mit den zuvor genannten Änderungen und nun auch mit dem neuen Modenwandler (siehe unten) wurde schließlich eine HF-Ausgangsleistung von 2.2 MW bei 30% Wirkungsgrad erreicht - ein neuer Weltrekord für Gyrotrons bei 170 GHz, welche für Dauerstrichbetrieb ausgelegt sind. Hier wurde erstmals ein stabiler Einmodenbetrieb oberhalb 2 MW experimentell nachgewiesen, in guter Übereinstimmung mit der Simulation. Der Vergleich mit der Simulation in der folgenden Abbildung zeigt auch, dass bei dieser Ausgangsleistung die Grenze des Stabilitätsgebiets der Arbeitsmode erreicht wurde, und dass es aufgrund von Modenkonkurrenz nicht möglich ist, die Leistung durch Erhöhen der Beschleunigungsspannung weiter zu steigern. Auch diese Grenze ist damit erstmals

experimentell verifiziert, während bei vorhergehenden Experimenten die Ausgangsleistung durch andere Faktoren begrenzt wurde. Mit einem neuen spektralen Mess-System war es nun auch möglich nachzuweisen, dass keine parasitäre HF-Schwingung bei 160 GHz mehr auftrat. Allerdings wurde eine Niederfrequenzschwingung im MHz-Bereich gefunden, welche aber anscheinend die Funktion des Gyrotrons nicht behindert.

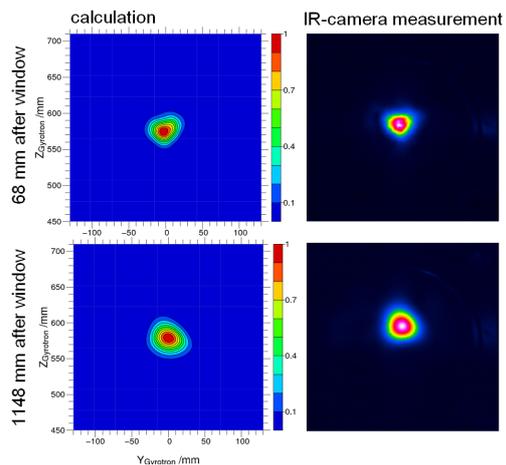


HF-Ausgangsleistung (links) und Wirkungsgrad (rechts) über der Kathodenspannung bei nominellem Magnetfeld (6.88 T) – Messung (Punkte) im Vergleich zur Simulation (Linien).

Der Vollständigkeit halber sollte erwähnt werden, dass die Verluste der HF-Vakuumbenutzer der Kurzpulsröhre, welche aus Siliziumoxid oder Siliziumnitrid bestehen, mit 3.3 % deutlich höher sind als die vernachlässigbaren Verluste eines Standard-Diamantfensters der Langpulsröhre. Mit letzterem wäre also eine entsprechende Ausgangsleistung von 2.3 MW bei einem Wirkungsgrad von 31 % zu erwarten. Man beachte, dass alle Wirkungsgrade bisher ohne Energie-Rückgewinnung durch abgesenkten Kollektor angegeben sind. Es ist bei den jetzigen Messwerten realistisch, von einem Gesamtwirkungsgrad der Langpulsröhre mit abgesenktem Kollektor von > 50 % auszugehen.

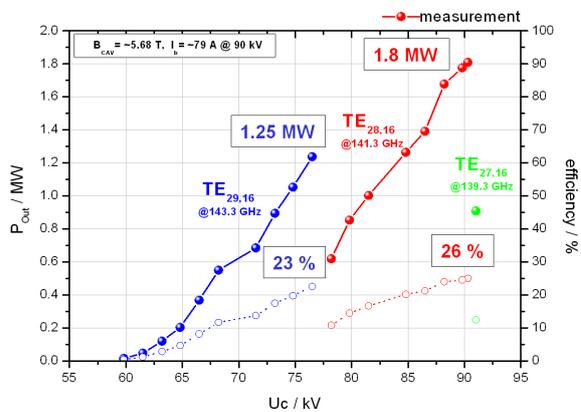
Wie bereits erwähnt, wurde bei den Experimenten im Sommer bereits das neue Modenwandlersystem mit verbessertem Launcher getestet. In diesem Hochleistungsexperiment wurde ein Gaußscher Grundmodengehalt von nahezu 96% gemessen, in guter Übereinstimmung mit Simulation und Kaltmessung dieses Modenwandlers (nächste Abbildung). Der Pegel der Streustrahlung in der Röhre wurde zu 7 ± 2 % der Ausgangsleistung abgeschätzt, im Vergleich zu 8 ± 2 % beim alten Modenwandlersystem. Trotz dieser kleinen Verbesserung ist der Rückgang der Streustrahlung nicht so hoch wie erwartet. Daraus ergeben sich Fragen nach anderen Quellen von Streustrahlung, unabhängig vom Modenwandlersystem.

Unabhängig davon werden die ITER-Spezifikationen nun von diesem System vollständig erfüllt. Die Verbesserung des Launchers wurde dennoch weitergeführt, die neusten Entwürfe versprechen nun einen Modengehalt in der Gaußschen Grundmode von bis zu 99.3 %.

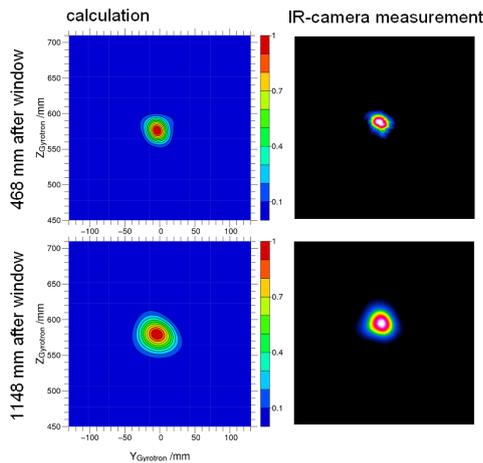


Simulation (links) und Hochleistungs-Messung (rechts, mit PVC-Target und Infrarot-Kamera) des Profils des Millimeterwellenstrahls bei 170 GHz mit der Arbeitsmode $TE_{34,19}$.

Die Experimente im Sommer wurden im August mit breitbandigen Messungen am Vor-Prototypen beendet. Dazu wurde die Röhre mit einem breitbandig durchlässigen Brewster-Fenster aus Siliziumnitrid ausgestattet. Erste Tests wurden bei 141.3 GHz bzw. 143.3 GHz durchgeführt, wobei 1.8 MW bei 26 % Wirkungsgrad bzw. 1.25 MW bei 23 % erreicht wurden (siehe folgende Abbildung). Diese Ergebnisse wurden aus Zeitgründen nicht experimentell optimiert und können weiter gesteigert werden – die Simulation sagt HF-Ausgangsleistungen über 2 MW für eine Reihe von Frequenzen zwischen 130 GHz und 170 GHz voraus (sogar bis 210 GHz, wenn die nötige Magnetfeldstärke dafür zur Verfügung stünde). Erste Messungen des HF-Ausgangsstrahls bei den neuen Frequenzen zeigten ebenfalls dessen gute Form, müssen aber für die Berechnung des Gaußanteils fortgesetzt werden (siehe nächste Abbildung).



HF-Ausgangsleistung und Wirkungsgrad für die Moden $TE_{28,16}$ (141.3 GHz) und $TE_{29,16}$ (143.3 GHz) in Abhängigkeit von der Beschleunigungsspannung.



Simulation (links) und Hochleistungs-Messung (rechts, mit PVC-Target und Infrarot-Kamera) des Profils des Millimeterwellenstrahls bei 143.4 GHz mit der Arbeitsmode $TE_{29,16}$.

In der letzten experimentellen Phase im Oktober und November 2009 wurden Elektronenkanone und Strahlentunnel weiter verändert, um soweit als möglich den Entwurf und die Designprinzipien der veränderten Kanone für die Umarbeitung des industriellen Prototypen zu verifizieren. Insbesondere wurde dabei ein Strahlentunnel mit kleinem Durchmesser eingesetzt, zur Abschirmung von gefangenen Elektronen in der Umgebung des Elektronenstrahls („halo shield“ gegen „halo electrons“). Leider wurden diese Experimente durch ein kleines Leck im Kühlkreislauf der Streustrahlungs-Absorber in der Spiegelbox erheblich verzögert. Durch das eindringende Wasser wurde die erfolgreiche Konditionierung der Röhre verhindert und der Emittor vergiftet. Nachdem das Leck gefunden war, wurde der Kühlkreislauf evakuiert. Dies reichte, um nach weiterer Konditionierung über einige Wochen wieder nominelle Elektronenstrahlparameter zu erreichen, trotz des immer noch schlechten Vakuums. Letzteres machte es erforderlich, die Betriebsparameter etwas zu reduzieren, so dass die Leistungen vom Sommer nicht mehr erreicht werden konnten. Mit bis zu 1.6 MW bei 26 % Wirkungsgrad (bei 170 GHz) wurden jedoch, in Anbetracht der verringerten Betriebsparameter, vergleichbare Werte wie zuvor gemessen, so dass die neue Kanone offenbar vergleichbar gute Eigenschaften bietet wie der im Sommer verwendete ältere Entwurf. Neue Probleme, welche auf das veränderte Kanonendesign zurückführbar wären, wurden nicht beobachtet.

Verbesserung von Modellierung, Simulationstools und Designs

Die Hochleistungsexperimente und die Entwurfsarbeiten zu Verbesserung und Umarbeitung des industriellen Prototypen werden im allgemeinen durch begleitende Arbeiten an den theoretischen Modellen, den Simulationstools und den entsprechenden Entwürfen unterstützt. Im Jahr 2009 wurden Arbeiten an Elektronenkanone, Strahlentunnel, Resonator und Modenwandler durchgeführt, welche alle ein verbessertes Verständnis der Funktion dieser Komponenten erforderten.

Wie zuvor berichtet, waren die Experimente am ersten industriellen Prototypen praktisch vollständig erfolglos. Dies wurde auf Mängel im Entwurf der Elektronenkanone in Bezug auf Geschwindigkeitsstreuung der Elektronen und Potentialfallen zurückgeführt. Dementsprechend wurde ein vollständiger Neuentwurf der Elektronenkanone für die Umarbeitung durchgeführt, unter der Verantwortung des CRPP, aber in enger Zusammenarbeit mit IHM. Für ein besseres Verständnis von Einfluss und Bedeutung von in Potentialfallen gefangenen Elektronen wurden stromlose Experimente am Vor-Prototypen durchgeführt, welche eindeutig das Auftreten unerwünschter

Vakuumströme im Zusammenhang mit Potentialfallen nachwiesen. Zusätzlich wurde der am IHM zur Auslegung von Elektronenkanonen entwickelte ESRAY-Code auf die Simulation gefangener Elektronen erweitert. Der endgültige Entwurf der neuen Kanone ist bisher nicht experimentell getestet, kann aber als der am sorgfältigsten untersuchte Entwurf bisher betrachtet werden. Dieses Ergebnis und die entsprechende Bestimmung und Präzisierung von Entwurfsregeln für Elektronenkanonen ist ein wesentliches Ergebnis der engen internationalen Zusammenarbeit.

Die Arbeiten am Strahlentunnel sind im Abschnitt über das frequenzverstellbare Gyrotron beschrieben. Die dort beschriebene, durch unregelmäßige Korruptionen verbesserte Struktur wurde, wie bereits erwähnt, im koaxialen Gyrotron ebenfalls mit Erfolg eingesetzt, und ist auch für den überarbeiteten industriellen Prototypen vorgesehen.

Resonator und Uptaper werden hingegen bei der Umarbeitung nicht verändert, da die Eignung dieser Komponenten im Vor-Prototypen überzeugend nachgewiesen wurde. Aber die Simulationstools, namentlich das KIT-Programm SELFT, wurden weiter verbessert durch Einführung von gemittelten Trägerfrequenzen und neuen Methoden zur Modellierung der azimuthalen Elektronenverteilung. Solche Details mögen unwichtig erscheinen, sind aber ausschlaggebend für realistische Simulationen – die gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung ist bei diesen Moden hoher Ordnung nur mit den genannten Verbesserungen möglich. Wesentlich dabei ist es, Vertrauen zu den Simulationsergebnissen zu gewinnen, um in Zukunft eine entsprechende Designsicherheit zu erreichen. Es sollte erwähnt werden, dass die theoretischen Arbeiten an Gyrotron-Wechselwirkung und Strahlentunnel in enger Zusammenarbeit mit HELLAS und ISSP durchgeführt wurden und werden.

Die Verbesserungen im Launcher-Entwurf wurden bereits oben genannt. Das neue Programm TWL_DO wurde entwickelt, um Launcher mit beliebig geformten Oberflächen zu entwerfen. Dazu wird in der Analyse das skalare Beugungsintegral iterativ gelöst, die Synthese geeigneter Geometrien beruht auf Optimierungsalgorithmen mit einer dem gewünschten Ausgangsstrahl entsprechenden Zielfunktion. Das Programm wurde ständig weiterentwickelt, mit entsprechend weiter verbesserten Ergebnissen. Weitere Arbeiten zur Berücksichtigung getaperter Geometrien in der Simulation, zur schnelleren und flexibleren Simulation und zu einfacherem Datenaustausch zwischen den Simulationsprogrammen wurden begonnen. Ein wichtiger Punkt ist die nun mögliche Berechnung von Transmission und Reflexion in TWL_DO, welche in Zusammenarbeit mit anderen Programmen hilfreich sein sollte, um die Quelle der Streustrahlung zu bestimmen.

Fortschritte beim 1 MW-Backup-Design

Das 1 MW-Backup-Design für ein konventionelles 1 MW Gyrotron war im März 2008 auf der Stufe einer Machbarkeitsstudie angehalten worden und wurde nun im laufenden Vertrag mit F4E wieder aufgenommen, um das Design fertig zu stellen.

Im Rahmen dieser Aufgabe wurde die Eignung des existierenden Kollektors des W7-X-Gyrotrons für ein 1 MW-Gyrotron bei 170 GHz untersucht. Problematisch dabei war die vorgesehene Leistungsmodulation, welche die Belastung des Kollektors auf 1.45 MW erhöht. Abschätzungen zufolge ist eine solche Belastung möglich, aber nur, wenn der Auftreffpunkt des Elektronenstrahls auch transversal gewobelt wird.

Der in der Machbarkeitsstudie entworfene Resonator wurde durch einen nichtlinearen Uptaper mit ausreichend kleiner Modenkonzersion und guter Abschirmung in Richtung der Elektronenkanone ergänzt. Da diese Geometrie eine

ausreichende Stabilität im Betrieb mit der Arbeitsmode $TE_{32,9}$ mit akzeptablem Sicherheitsabstand zur Grenze des Stabilitätsgebiets im 1 MW-Arbeitspunkt aufweist, wird sie als endgültig angesehen. Allerdings muss dieses Verhalten noch im Zusammenhang mit einem realistischen Kanonenentwurf bestätigt werden. Die Wechselwirkungsrechnungen beim Resonatorentwurf wurden in Zusammenarbeit mit HELLAS und ISSP durchgeführt.

Bevor die Kanone entworfen werden kann, muss eine Entscheidung über den Verlauf des Magnetfelds getroffen werden. Während zunächst angenommen wurde, dass der existierende Magnet am CRPP („ASG-Magnet“) eingesetzt werden sollte, wurde inzwischen die Entscheidung getroffen, diesen Magneten zu ersetzen wegen seines exzessiven Heliumverbrauchs. Dadurch eröffnet sich die Möglichkeit, ein Feldprofil zu verwenden, welches auch mit den vorhandenen IHM-Magneten bereitgestellt werden kann. Der Vorteil läge darin, dass die relevanten Komponenten von Prototyp und Vor-Prototyp, namentlich Elektronenkanone, Strahlentunnel und Kollektor, nicht nur ähnlich oder vergleichbar sein könnten, sondern identisch. Dies ist immer dann von Bedeutung, wenn ein Problem im Betrieb des unflexiblen und teuren Prototypen auftritt, welches besser im modularen und flexiblen Vor-Prototypen untersucht werden sollte. Es stellte sich beispielsweise heraus, dass die Unterschiede zwischen den Elektronenkanonen des ersten Prototypen und des koaxialen Vor-Prototypen zu groß waren, um die Probleme des Prototypen endgültig zu lösen, obwohl die Kanonen als „ähnlich“ bewertet wurden. Allerdings ist die Entscheidung für ein bestimmtes Magnetfeldprofil von vielen Randbedingungen abhängig; sie wurde daher noch nicht getroffen. Erste Entwürfe des CRPP zeigen, dass mehrere Feldprofile verwendbar sein könnten. Die endgültige Entscheidung wird in enger Zusammenarbeit getroffen werden.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Durch die erfolgreichen 2.2 MW-Kurzpuls-Experimente und die guten Ergebnisse des neuen Modenwandlers wurden zwei grundlegende Probleme des koaxialen 2 MW-Gyrotrons für ITER gelöst. Es ist jetzt erwiesen, dass die ausgewählte Arbeitsmode stabil bei und sogar oberhalb der gewünschten Ausgangsleistung betrieben werden kann, und dass ein angemessener HF-Ausgangsstrahl erzeugt werden kann. Dies sind wesentliche Fortschritte, welche die Hoffnung auf eine erfolgreiche Fortführung der Entwicklung unterstützen.

Die wichtigste Aufgabe für die Zukunft ist nun die Unterstützung der Experimente mit Langpuls-Prototypen, welche mit der Lieferung des umgearbeiteten ersten Prototypen an das CRPP im Juli 2010 wieder aufgenommen werden, mit dem Ziel einer Pulslänge von 1 s bei nominellem Betrieb. Die experimentellen und theoretischen Arbeiten am IHM in der zweiten Hälfte von 2010 sollten daher flexibel an die Erfordernisse des Langpulsexperiments angepasst werden.

Davon abgesehen sind immer noch einige Fragen offen, oder es wird zumindest experimentelle Bestätigung benötigt: Der erwartete Wirkungsgrad von 50 % mit abgesenktem Kollektor, bei einem Wirkungsgrad von 31 % ohne Energierückgewinnung, muss noch experimentell bestätigt werden. Außerdem ist der Einsatz eines abgesenkten Kollektors die erste Bedingung für eine Verlängerung der Pulsdauer des Vor-Prototypen, welche am Arbeitspunkt im Moment durch das Netzteil auf 1 ms beschränkt wird. Da ein modulares experimentelles Gyrotron am IHM voraussichtlich während des gesamten Entwicklungs- und Produktionszyklus der ITER-Gyrotrons benötigt wird, wäre es sinnvoll, die Pulsdauer des Vor-Prototypen soweit wie möglich zu vergrößern, um wichtige Effekte wie die Raumladungsneutralisierung des Elektronenstrahls und thermische Effekte ebenfalls in den Experimenten am IHM sichtbar zu machen.

Weiterhin erreicht die Elektronenkanone des Vor-Prototypen das Ende ihrer Lebensdauer und muss ersetzt werden. Schließlich muss das Gehäuse dieses Gyrotrons modifiziert werden, um mit reduziertem Durchmesser im neuen, im Frühjahr 2010 erwarteten schnell-durchstimmbaren Magneten installiert werden zu können. Dieser Magnet erreicht eine höhere Flussdichte von 7.2 T, so dass die normaleitende Spule überflüssig wird. Da all diese Änderungen notwendig sind, bietet sich eine gute Gelegenheit, die Möglichkeit eines Designs für größere Pulsängen zu überdenken.

Im Bereich des Modenwandlers muss das neue Launcher-Design als Hardware hergestellt und getestet werden. Davon abgesehen wird auch ein Experiment mit einem alternativen, vom IAP, Russland, entworfenen und hergestellten Launcher durchgeführt, und weitere Methoden zur Verbesserung des Modenwandlers sind in Untersuchung. Wichtig dabei ist es, die Quelle der Streustrahlung zu bestimmen. Dieses Problem wird sowohl theoretisch als auch im Experiment untersucht werden.

Die ersten Experimente bezüglich der Frequenzverstellbarkeit haben gezeigt, dass der Betrieb des Vor-Prototypen bei unterschiedlichen Frequenzen eine Aufgabe von höchstem Interesse ist. Diese Experimente werden fortgesetzt, um den Nachweis zu erbringen, dass ein Betrieb im Bereich 130 bis 170 GHz oberhalb 2 MW bei gutem Ausgangsstrahl mit hohem Gaußanteil möglich ist.

All diese experimentellen Arbeiten benötigen die angemessene Unterstützung durch Theorie und Simulation. Insbesondere wird eine bessere und verifizierte Modellierung der Streustrahlung gebraucht. Andere Arbeiten an realistischeren Simulationsmodellen betreffen die unerwünschten parasitären Schwingungen sowohl im Niederfrequenz- als auch im Hochfrequenzbereich, wie auch Untersuchungen der Potentialfallen und zur Strahlneutralisierung.

Schließlich kann sich die Möglichkeit ergeben, ein W7-X-Gyrotron bei 174 GHz zu betreiben, als erster Schritt zu einer alternativen Backup-Lösung für ein 1 MW-ITER-Gyrotron. Dies ist allerdings nur möglich, wenn dafür ein W7-X-Gyrotron verfügbar gemacht werden kann.

Design-Studien für ein koaxiales 170 GHz 4 MW-Gyrotron

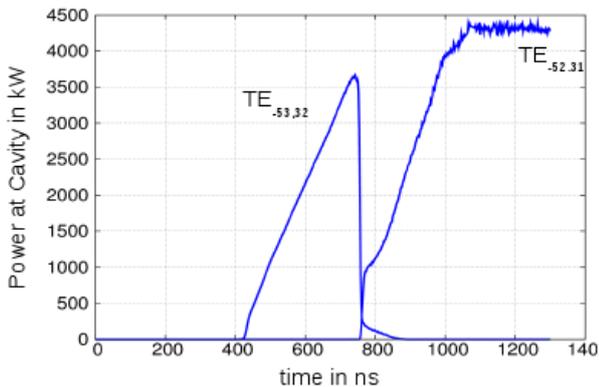
Für zukünftige Fusionsreaktoren ist es wünschenswert, Gyrotrons mit möglichst hoher Ausgangsleistung zu entwickeln, um Kosten und Platzbedarf der benötigten ECRH-Systeme zu minimieren. Das koaxialen 2 MW-Gyrotron für ITER hat inzwischen den Status eines Prototyps erreicht. Es war daher angemessen, im Jahre 2008 eine detaillierte Design-Studie für ein koaxiales 4 MW-Gyrotron zu beginnen. Diese Arbeit wird als Hauptthema einer Promotion im Rahmen des „Euratom Fusion Training Scheme EC-TECH No. 042636 (FU06)“ durchgeführt. Nach physikalischen und technischen Machbarkeits-Studien wurden nun die wesentlichen Komponenten des Gyrotrons (Elektronenkanone, koaxialer Resonator, Quasi-optisches System mit Zweistrahl-Ausgang und Kollektor) entworfen. Die wichtigsten Parameter zur Auslegung der Komponenten sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

In einem detaillierten Auswahlprozess wurde eine Arbeitsmode bestimmt, welche unter den gegebenen Randbedingungen die gewünschte Ausgangsleistung und –frequenz liefern kann, namentlich die $TE_{-52,31}$ –Mode. Durch aufwändige Optimierungen der Resonatorgeometrie konnte ein hoher Wirkungsgrad bei noch akzeptablen Wandverlusten erreicht werden. Alle Berechnungen wurden mit den Programmen des KIT zur Gyrotron-Wechselwirkung durchgeführt. Außerdem wurden die

Arbeitsfrequenz f_0	170 GHz
HF-Ausgangsleistung P_{out}	4 MW
Wirkungsgrad der Wechselwirkung η_{tot}	> 35 % (ohne abgelenkten Kollektor)
Verlustleistungsdichte an der Resonatorwand (realistisch) ρ_{wall}	< 2 kW/cm ²
Verlustleistungsdichte am Innenleiter (realistisch) ρ_{coax}	< 0.2 kW/cm ²
Stromdichte am Emittor j_{beam}	< 5 A/cm ²

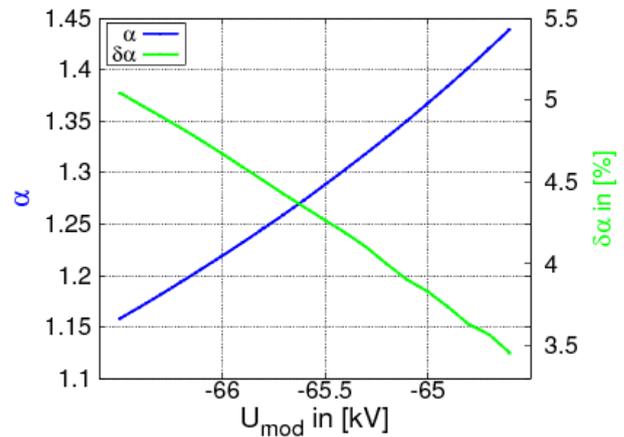
Entwurfsparameter für das 170 GHz-4 MW-CW-Gyrotron mit koaxialem Resonator.

Tapen des Resonators mit Hilfe eines Streumatrix-Codes für minimale Modenkombination in Richtung des Launchers und möglichst niedrige Leistungsabgabe in Richtung der Kanone ausgelegt. Eine Modenkombination von weniger als 0.25 % der Leistung der gewünschten Arbeitsmode wurde erreicht. Im folgenden Bild wird eine typische Simulation des Einschaltvorgangs mit linearem Spannungsanstieg und realistisch simuliertem Elektronenstrahl für die endgültige Resonatorgeometrie gezeigt.



Selbstkonsistente Simulation des Einschaltvorgangs für die $TE_{52,31}$ -Mode.

Im nächsten Schritt wurden verschiedene Elektronenkanonen, ausgeführt sowohl als Diode als auch als Triode, entwickelt. Für beide Varianten konnten geeignete Entwürfe gefunden werden, mit Hilfe von Optimierungsroutinen, welche in Scriptform implementiert wurden. Ausführliche Parameterstudien wurden durchgeführt, um die Einstellbarkeit und Toleranzempfindlichkeit der Eigenschaften des Elektronenstrahls in Abhängigkeit von elektrischen und geometrischen Parametern der Entwürfe zu untersuchen. Mit der Triode kann der Parameter α , welcher das Geschwindigkeitsverhältnis zwischen den Komponenten der Elektronengeschwindigkeit senkrecht und parallel zur z-Achse angibt, stufenlos eingestellt werden. Im nächsten Bild ist der Verlauf von α in Abhängigkeit von der Spannung an der Modulationsanode zu sehen. Wegen der im Vergleich zur Diode niedrigeren Spannung an der Modulationsanode kann die Triode außerdem bei kleinerem Durchmesser als die Diode die Anforderungen an die maximal zulässige Feldstärke erfüllen. Die Triode weist also sowohl bezüglich Platzbedarf als auch bezüglich flexibler Einstellmöglichkeiten für α Vorteile gegenüber der Diode auf, benötigt jedoch eine zusätzliche Spannungsquelle.



Geschwindigkeitsverhältnis α und dessen Streuung in Abhängigkeit von der Spannung an der Modulationsanode U_{mod} .

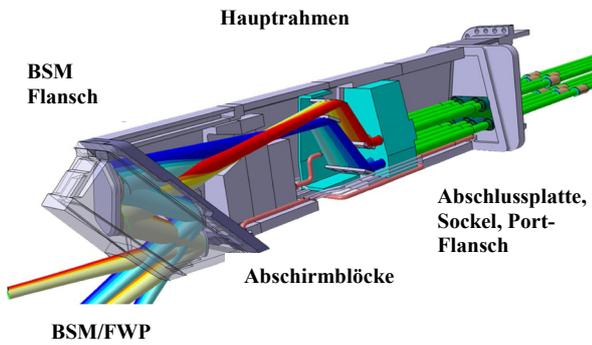
HF-Ausgangsfenster für Gyrotrons werden nach heutigem Stand der Technik aus CVD-Diamantscheiben hergestellt und eignen sich für Gaußsche Mikrowellenstrahlen bis zu 2 MW Ausgangsleistung bei 170 GHz. Daher ist es vorteilhaft, ein 4 MW-Gyrotron mit zwei Fenstern auszustatten und das quasi-optische System so auszulegen, dass die HF-Ausgangsleistung der Volumenmode des Resonators in zwei Strahlen in Form Gaußscher Freiraummoden aufgeteilt wird. Für eine solche Modenwandlung wurde eine Launcher-Antenne mit zwei Abstrahlbereichen (Cuts) entworfen, unter Verwendung des neuen, am KIT entwickelten Programms TWL_DO. Die beiden Strahlen werden zu 97% bzw. 98% (Vektor-Korrelationskoeffizient) als Gaußsche Grundmoden unter einem azimuthalen Winkel von 144° abgestrahlt.

Die Auslegung des Kollektors folgt nun im nächsten Schritt. Dies wird im Rahmen eines Aufenthalts bei Thales Electron Devices (TED) in Velizy, Frankreich, von September 2009 bis März 2010 durchgeführt. Dabei werden Kollektorentwürfe sowohl aus dem üblicherweise verwendeten OFHC-Kupfer als auch aus Al_2O_3 -dispersionsverstärktem Kupfer untersucht. Besonderes Augenmerk wird auf die Entwicklung von Systemen zur transversalen und longitudinalen Modulation des Auftreffpunkts des Elektronenstrahls gelegt. Mit solchen Systemen soll die Wandbelastung des Kollektors reduziert werden.

Verschiedene thermo-mechanische Studien werden durchgeführt, um die Wärmeableitung an der Kollektorwand zu optimieren und Langpulsseffekte zu untersuchen.

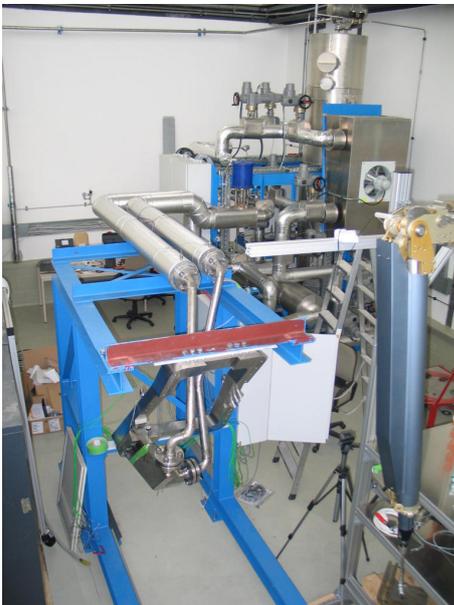
ITER ECH Launcher Handling and Test Facility LHT

Die Entwicklung der Upper Port Plugs für ECH&CD bei ITER (nächste Abbildung) erfolgt in internationaler Zusammenarbeit zwischen KIT (Gesamtkoordination, Strukturkomponenten, Diamantfenster), IPP Garching (Physikaspekte und Koordination), CNR Milano (IT), CRPP Lausanne (CH) und ITER-NL FOM (NL). Die am KIT angesiedelten Aktivitäten werden vom IMF III geleitet und koordiniert. Das IHM ist beim Aufbau und Betrieb der Launcher Handling and Test Facility LHT beteiligt.



Schema des ITER ECH Upper Launchers

Im vergangenen Jahr wurde der Parameterbereich der LHT auf Temperaturen und Drücke von bis zu 240 °C und 4.4 MPa erweitert. Damit können ITER Kühlmitteltemperaturen sowohl bei Normalbetrieb (<150 °C und 3.0 MPa) als auch bei Ausheizbedingungen zur Erzielung eines guten Vakuums erreicht werden.



LHT und Closure-Plate Mock-Up

Zur Vorbereitung weiterer Entwicklungen des Remote Handlings wurde ein „Closure Plate“-Mock-up installiert (Abbildung), an dem Wellenleiter- und Diamantfenster-Dummys angebracht sind. Die Herausforderung dabei ist der äußerst knapp

bemessene Abstand zwischen den Komponenten, entsprechende Experimente sind in Vorbereitung.

Lithium-Flüssigmetalltechnologie für IFMIF

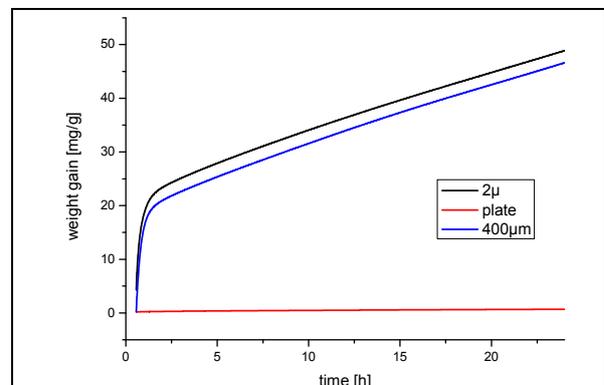
Die Qualifizierung von Strukturmaterialien in einem zukünftigen Fusionsreaktor erfordert eine Langzeitbestrahlung durch Neutronen mit fusionsrelevanten Spektren, die zu Materialschäden von bis zu 150 dpa führt. Die geplante Beschleunigergetriebene Deuterium-Lithium-Hochfluss-Neutronenquelle IFMIF wurde in einer Zusammenarbeit der Europäischen Union mit 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.

Mittelfristiges Ziel des Institutsbeitrages ist 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.

Da aufgrund der geänderten Finanzsituation des Programms Fusion keine FuE-Mittel zur Verfügung standen, konnten die Arbeiten am geplanten Versuchstand zur Bestimmung des Stickstoff-Getter Verhaltens von flüssigem Lithium mittels Massenspektrometrie nicht wie geplant durchgeführt werden. Die Messung des Stickstoffaufnahme verschiedener Metalle in stickstoffhaltiger Atmosphäre wurden dagegen fortgesetzt.

Die wichtigsten Ergebnisse im Berichtszeitraum werden kurz zusammenfassend dargestellt.

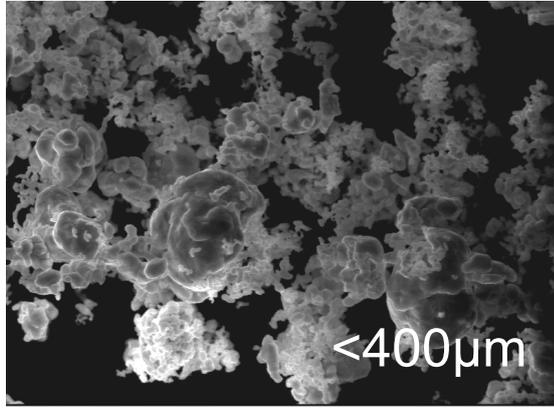
Im vergangen Berichtszeitraum wurde über die Untersuchungen zum Stickstoffgettervermögen verschiedener Metallpulver, Al, Ti, Y, Ta und Zr berichtet. Bei 400°C in einer von Sauerstoff gereinigten N₂ Atmosphäre gemessen zeigte Y das mit Abstand größte Gewichts- und damit Stickstoffzunahme. Das zweitbeste Gettermaterial war Ta, das aufgrund seiner deutlich niedrigeren Tritiumaufnahme als Stickstoffgetter in fließendem Lithium zu bevorzugen ist. Neben materialspezifischen Eigenschaften bestimmt die zur Verfügung stehende Partikeloberfläche maßgeblich die Stickstoffaufnahmekapazität. Aus diesem Grund wurde Ta-Pulver unterschiedlicher Korngröße untersucht (siehe nächste Abbildung). Ausgehend von einer Kugelform hat ein Pulver von 2µm Partikelgröße eine Oberfläche von ca. $1.9 \cdot 10^{-1} \text{m}^2/\text{g}$, ein Pulver mit 400 µm Partikelgröße von $9.4 \cdot 10^{-4} \text{m}^2/\text{g}$ und eine Platte von 10x10x5mm von $5 \cdot 10^{-7} \text{m}^2/\text{g}$.



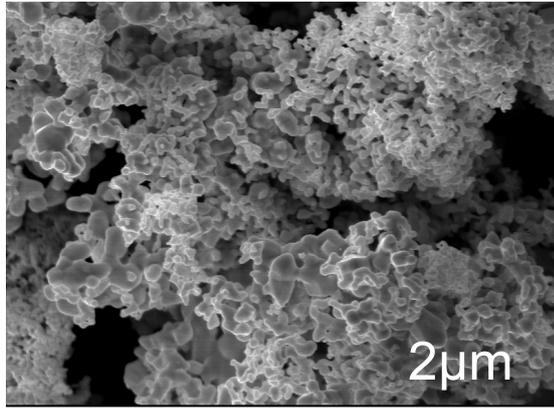
Gewichtszunahme von Ta-Pulver unterschiedlicher Partikelgröße und einer Ta-Platte bei 400°C in Stickstoff als Funktion der Zeit.

Der Unterschied in der Gewichtszunahme beider untersuchter Pulver im Vergleich zu dem der Platte ist sehr deutlich. Nach

20 h haben beide Pulver mindestens 42 mg/g Gewicht zugelegt die Platte jedoch nur 0.65mg/g. Zwischen den Pulvern jedoch besteht nur ein sehr geringer Unterschied der aufgrund der spezifischen Oberflächen deutlich größer ausfallen müsste. REM-Aufnahmen der beiden Pulver machen deutlich, dass die tatsächliche spezifische Oberfläche der Pulver aufgrund der Partikelgrößenverteilung sehr ähnlich sein dürfte (nächste Abbildung). Der Hauptunterschied zwischen beiden Pulvern ist das Vorhandensein weniger größerer Partikel im 400µm Pulver, die für die Größenverteilung eine Rolle spielen die spezifische Oberfläche jedoch weniger stark beeinflussen.



Ta Pulver -325mesh (4000x)



Ta Pulver 2µm (4000x)

REM-Aufnahmen von Ta-Pulvern mit unterschiedlicher mittlerer Korngröße.

Beteiligte Mitarbeiter:

K. Baumann, Dr. B. Bazylev, DI M. Beringer, Prof. Edith Borie, Dr. G. Dammertz, DI J. Flamm (Universität Karlsruhe), **Dr. G. Gantenbein**, Dr. R. Heidinger (IMF I), Dr. H. Hunger, Dr. Yu. Igitkhanov, Dr. S. Illy, Dr. J. Jin, **Dr. S. Kern**, M. Kupper, **Dr. I. Landman**, R. Lang, DI W. Leonhardt, DI M. Losert, DI A. Meier (IMF I), D. Mellein, Simone Miksch, A. Papenfuß, Dr. P. Pestchanyi (Gastwissenschaftler), Dr. B. Piosczyk, **Dr. T. Rzesnicki**, Dr. A. Samartsev, Dr. T. Scherer (IMF I), A. Schlaich (Uni Karlsruhe), 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. Helga 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

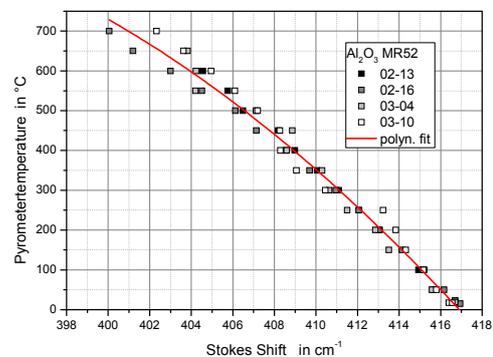
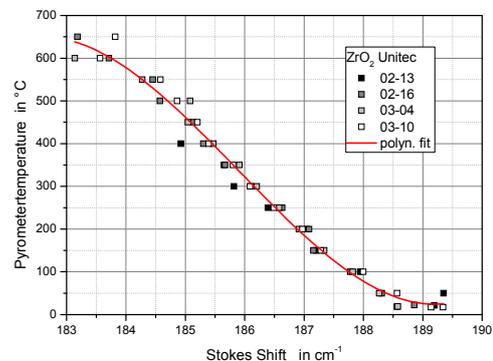
Programm NANOMIKRO

Konstitution, Synthese und Processing

In-situ Ramanspektroskopie

Ziel der im letzten Jahr in Zusammenarbeit mit dem IFG durchgeführten Arbeiten war die Möglichkeit zu untersuchen, über eine geeignete Auswertung der Ramanspektren material-spezifische Temperaturen zu ermitteln. Dies könnte dazu benutzt werden, die selektive Mikrowellenerwärmung, die vielfach zur Erklärung beobachteter, mikrowellenspezifischer Effekte herangezogen wird, erstmals auch experimentell zu verifizieren.

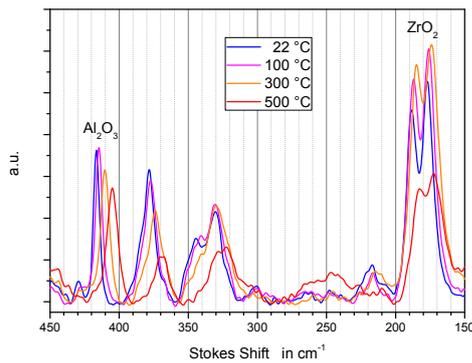
Erste Messungen wurden mit einem FT Raman-Spektrometer durchgeführt. Doch selbst durch den Einsatz eines Kantenfilters, zur Reduktion der Wärmestrahlung auf dem Detektor, konnte der Temperaturbereich nicht wesentlich über 300 °C hinaus erweitert werden. Aus diesem Grund wurden weitere Raman-Messungen mit Hilfe eines dispersiven Raman-Spektrometers vom Typ Senterra, BrukerOptics durchgeführt. Mit einem Anregungslaser der Wellenlängen 785 nm waren hiermit bisher Messungen bis ca. 700 °C möglich. Allerdings lassen sich damit im Gegensatz zu FT Raman-Spektrometern keine Anti-Stokes-Linien messen, so dass nun die Temperaturinformation aus der Lage der Raman-Linien abgeleitet wird. Dies erfordert allerdings eine entsprechende Kalibrationsmessung für jede zu untersuchende Substanz. Diese Kalibrationsmessungen definieren die Lage der Ramanbanden als Funktion der Temperatur. So kann aus überlagerten Ramanspektren von Kompositmaterialien rückwärts phasenselektiv die Temperatur bestimmt werden. Da bisher kein geeigneter Ofen für solche Kalibrationsmessungen zur Verfügung stand, wurden erste Messungen behelfsmäßig mit einem Mikrowellenresonator durchgeführt. Ergebnisse solcher Kalibrationsmessungen sind in den folgenden Graphen für ZrO₂ und Al₂O₃ Pulver zu sehen.



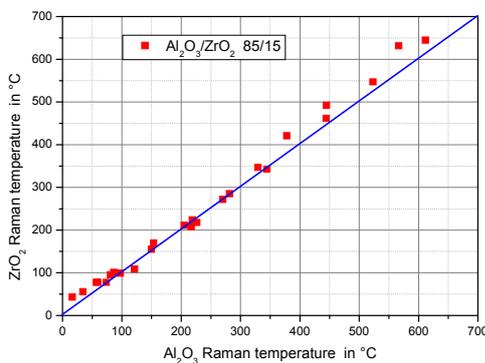
Kalibrationsmessungen für ZrO₂- (oben) und Al₂O₃-Pulver (unten).

In diesen beispielhaft gezeigten Ramanspektren einer mit Mikrowellen geheizten ZrO₂/Al₂O₃-Mischkeramik lassen sich so aus der Lage der Ramanlinien die entsprechenden

Temperaturen für ZrO_2 und Al_2O_3 getrennt bestimmen und gegeneinander auftragen (siehe nächste Abbildungen).



Ramanspektren einer mit Mikrowellen geheizten Al_2O_3/ZrO_2 Mischkeramik bei verschiedenen Temperaturen.



Vergleich der aus Ramanspektren abgeleiteten Temperaturen für Al_2O_3 und ZrO_2 .

Im Rahmen der bisher begrenzten Genauigkeit für die Kalibrationsmessungen kann kein signifikanter Unterschied im Erwärmungsverhalten festgestellt werden. Dennoch zeigt sich im Mittel ein Trend für eine selektiv stärkere Erwärmung des ZrO_2 (siehe Abweichung von der Diagonalen in der vorigen Abbildung). Messungen mit einer speziellen Heizkammer die in 2010 geliefert wird, soll die Messgenauigkeit und Reproduzierbarkeit der Kalibrationsmessungen verbessern helfen.

Mikrowellensintern

Die Untersuchungen zum Einfluss der Feldrichtung auf die Porengeometrie während des Sintervorganges, als Nachweis nichtthermischer Mikrowelleneffekte, wurden fortgesetzt. In weiteren 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 oder eventuell durch den Versuchsaufbau beeinflusst sind. Dazu wurden nun auch Versuche mit horizontal polarisiertem Feld durchgeführt bzw. die Proben halbiert und im gleichen Experiment beide Hälften senkrecht zueinander positioniert. Die Auswertung dieser Sinterergebnisse ist noch nicht vollständig abgeschlossen. Die bisher gefundenen Ergebnisse zeigen jedoch keine eindeutigen Feldeffekte.

Die Zusammenarbeit mit dem IMF III hinsichtlich des Millimeterwellensinterns von Dickschichten aus elektrisch steuerbaren, keramischen Dielektrika wurde weitergeführt. Die Charakterisierung der Proben aus dem vorangegangenen Jahr konnte abgeschlossen werden. Die Daten deuten darauf hin, dass die Eigenschaften der BST Dickschichten mit zunehmender

Kalzinationstemperatur bzw. mit zunehmender Prozessdauer besser werden. So zeigten die in deutlich kürzerer Zeit mit Mikrowellen gesinterten Proben zwar vergleichbare aber keine besseren Eigenschaften. Deshalb wurden nun weitere Sinterversuche mit Mikrowellen bei variablen Prozesszeiten begonnen.

Beteiligte Mitarbeiter

G. Link, Simone Miksch, K. Paulus, K.-T. Schäfer, M. Thumm

Programm NUKLEAR: Nukleare Sicherheitsforschung

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

Zur Sicherstellung der zukünftigen Versorgungssicherheit mit elektrischer Energie werden im Rahmen von GenIV neue Kernspaltungsreakortypen untersucht. Die Entwicklung von Technologien, die der Sicherheit schneller schwermetallgekühlter Reaktoren wie z.B. dem Lead Fast Reactor (LFR) dienen, ist der Schwerpunkt der Arbeiten im Forschungszentrum. 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.

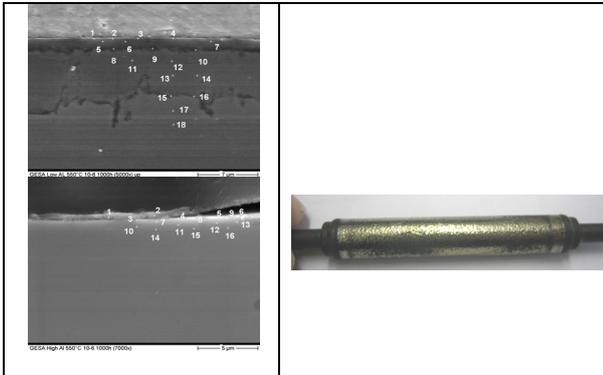
Ziel des Institutsbeitrages ist die Verbesserung der Materialverträglichkeit von neuartigen Strukturwerkstoffen in Kontakt mit flüssigem Pb bzw. PbBi durch die Entwicklung eines Korrosionsschutzes. Gepulste großflächige Elektronenstrahlen (GESA-Verfahren) werden eingesetzt, um die Oberflächen so zu modifizieren,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

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. Erste Gespräche über eine Zusammenarbeit mit AREVA zur Entwicklung verschleißfester Schichten für zukünftige Na-gekühlte Reaktoren wurden geführt und münden in eine erste Phase der Zusammenarbeit im Jahre 2010.

Die wichtigsten Ergebnisse im Berichtszeitraum werden kurz zusammengefasst dargestellt:

Im Rahmen des ELSY Projekts wurden Hüllrohre aus T91-Stahl mit GESA umgeschmolzener FeCrAlY-Schicht bei ENEA-Stahl in fließendem Blei bei 500°C ausgelagert. Parallel dazu wurden Proben mit demselben hohen Al-Gehalt von ca. 7 Gew% und zum Vergleich Proben aus früheren Kampagnen mit einem Al-Gehalt < 4Gew% in den COSTA's ausgelagert.

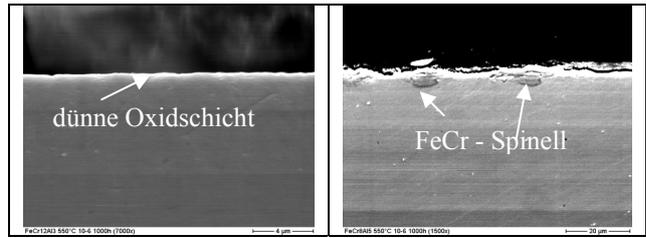


REM- Aufnahmen von Querschliffen von beschichteten T91-Stahl Proben mit unterschiedlich hohem Al-Gehalt nach der Auslagerung bei 550°C in PbBi mit 10-6 Gew% Sauerstoff. Oben links – Al Gehalt < 4 Gew%; unten links – Al-Gehalt > 7 Gew%; rechts- Probe mit hohem Al-Gehalt nach 2000h Auslagerung in IPPE Kreislauf bei 480 °C.

Die Unterschiede in den Auslagerungsergebnissen sind deutlich in der obigen Abbildung zu sehen. Proben mit niedrigem Al-Gehalt zeigen ein mehrlagiges Oxidschichtwachstum, wohingegen solche mit höherem Al-Gehalt durch dünne, bei diesen Vergrößerungen nicht sichtbare, Oxidschichten geschützt werden. Auslagerungen in fließendem PbBi bei 480 °C, die im Rahmen des DEMETRA-Projekts am IPPE in Obninsk durchgeführt wurden, zeigten dass bei Proben mit hohem Al-Gehalt selektiv Al₂O₃ aufwachsen kann (Abbildung rechts). Jedoch zeigen diese Proben auf einer Seite normale Oxidation, die vermutlich durch eine Reduktion des Al-Gehalts während der Umschmelzung zurückzuführen ist. Solche Inhomogenitäten durch die Umschmelzung sollen zukünftig durch die Verwendung der GESA IV, die sich noch in der Optimierungsphase befindet, vermieden werden.

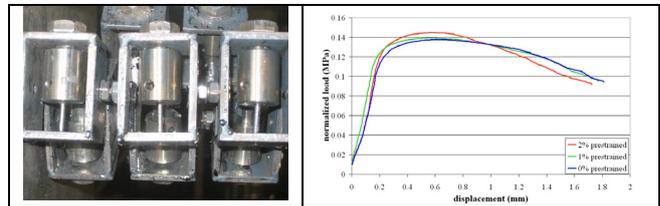
Die Bestimmung des optimalen Al/Cr-Verhältnisses zur Ausbildung einer schützenden Oxidschicht in Pb-Legierungen wurde mittels Proben unterschiedlicher Zusammensetzung, die mit Lichtbogenschmelzen hergestellt worden waren, untersucht. Sechs verschiedene Zusammensetzungen Fe-12Cr, Fe-12Cr-3Al, Fe-12Cr-5Al, Fe-12Cr-7Al, Fe-8Cr-5Al and Fe-16Cr-5Al (in Gew%) wurden für 1000h in 550 °C heißem PbBi mit 10⁻⁶ Gew% Sauerstoff ausgelagert. Ab einem Cr-Gehalt von 12 Gew% zeigen alle Al-haltigen Legierungen die Ausbildung von dünnen Oxidschichten. Eine Reduzierung des Cr – Anteils auf 8 Gew% bei einem Al- Gehalt von 5 % jedoch ließ auf dieser Probe lokal eine FeCr-Spinellschicht wachsen, was den Einfluss des reduzierten Cr-Gehalts auf die Oxidschichtbildung deutlich macht (nächste Abbildung). Die aluminiumfreie Kontrollprobe zeigte wie erwartet nach der Auslagerung ein mehrschichtiges Oxidschichtwachstum.

Im vergangen Berichtszeitraum wurde über den Aufbau eines Versuchstandes zur Messung der Sauerstoffaustauschkinetik abhängig vom Sauerstoffpotential und der Feuchte berichtet. Erste Experimente in diesem Jahr zeigten eine Abhängigkeit von der Feuchte, die jedoch noch nicht quantifiziert werden konnte. Dazu wird der Versuchsaufbau optimiert und im kommenden Jahr mit den Experimenten fortgeführt.



REM- Aufnahmen von Querschliffen von FeCrAl-Proben nach der Auslagerung in PbBi bei 550°C für 1000h: Links Fe-12Cr-3Al mit nicht sichtbarer dünner Oxidschicht, rechts Fe-8Cr-5Al mit lokalen FeCr-Spinellen.

Innerhalb des VELLA-Projekts wurde ein gemeinsames Teilprojekt mit SCK-CEN in Mol begonnen und abgeschlossen. Am IHM wurden vorgespannte Zug und CT-Proben für ca. 3 Monate bei 480 °C in Pb mit einem Sauerstoffgehalt von 10⁻⁶ Gew% ausgelagert und anschließend extrahiert (folgende Abbildung). Diese Proben wurden mechanisch bei ca. 200 °C in Mol nachuntersucht.



Links: Extrahierte Proben nach der Auslagerung. Rechts: normalisierte Last über der Dehnung für verschieden vorbelastete Proben.

Die Tests ergaben keinen Zusammenhang zwischen aufgebrachtener Dehnung während der Auslagerung und den gemessenen mechanischen Eigenschaften. Ein Einfluss des Flüssigmetalls konnte ebenfalls nicht festgestellt werden.

Die Arbeiten zu GETMAT umfassen 3 Bereiche: Untersuchung von Schweißproben im Flüssigmetall, Schutzschichtentwicklung auf ODS- und T92-Stählen, Abriebversuche (Fretting) an oberflächenmodifizierten Stählen. Der Korrosionsteststand für die Auslagerung der Schweißproben ist vorbereitet und wird mit den ersten Proben im Jahr 2010 bestückt werden. In diesem Jahr wurde der im vergangenen Jahr konzipierte Versuchstand entworfen, ein Mock-up gebaut (Abbildung) und getestet.

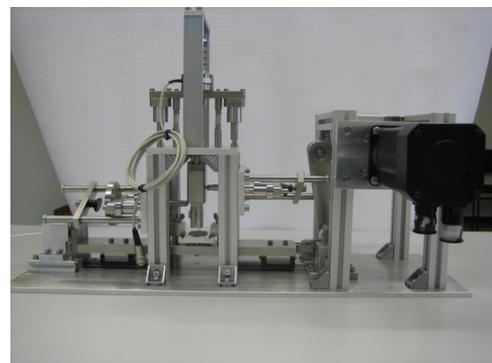
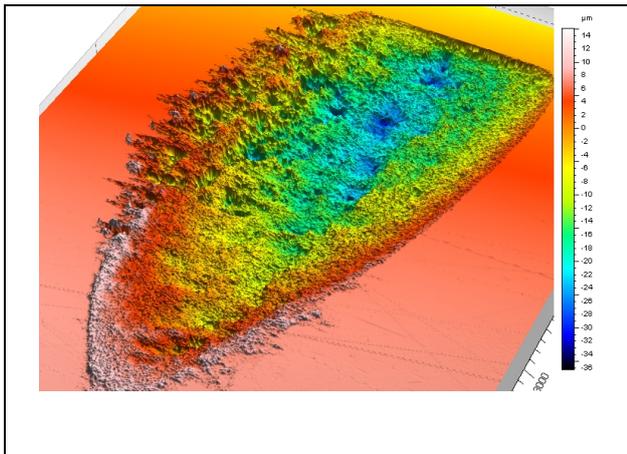


Bild des Versuchsaufbaus für die Reibverschleißtests (Fretting).

Für die Analyse der Frettingversuche wurde ein Laserprofilometer, das mittels Weißlichtinterferometrie die Oberflächenprofile misst, gekauft. Erste Messungen an Proben, die mit dem Mock-Up getestet wurden, sind bereits erfolgt und zeigen sowohl die Eignung des Versuchstandes wie auch der

Diagnostik (nächste Abbildung). Basierend auf den Erfahrungen wird derzeit der Versuchstand für die Experimente in flüssigem Blei entworfen und gebaut.

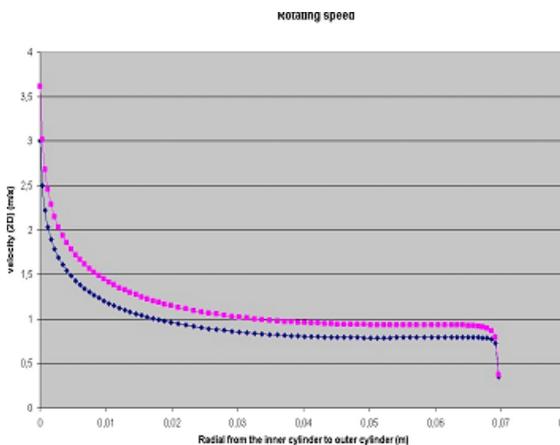


Messung des Frettingverschleißes mittels Laserprofilometrie.

Die Arbeiten zur Schutzschichtentwicklung sehen die Modifizierung von unterschiedlich zusammengesetzten Beschichtungen vor. Die Beschichtungskampagne wurde Ende 2009 durchgeführt und die Proben werden zu Beginn des Jahres 2010 erwartet.

Nach umfangreichen konstruktiven Änderungen am Antrieb der CORELLA wurde ein erster Versuch mit PbBi durchgeführt. Es zeigte sich, dass nur ein langsames Steigern der Drehgeschwindigkeit eine Beschleunigung des Flüssigmetalls bewirkt. Zudem scheint ab einer Rotationsgeschwindigkeit von 300 rpm die Strömung abzubrechen. Mit 300 rpm wurde ein Test an Stählen der JAEA durchgeführt, die an Stellen mit hohem Staudruck (Prallfläche des PbBi) teilweise starke Erosion zeigten.

Die Simulation der Flüssigmetallströmung im Pumpenteststand CORELLA konzentrierte sich in diesem Jahr auf die Evaluierung der Ursachen des errechneten steilen Geschwindigkeitsabfalls in der Nähe des rotierenden Innenzylinders. Um den möglichen Einfluss des Mediums, d.h. die hohe Dichte des PbBi, zu untersuchen wurde eine Simulation mit Wasser unter ansonsten identischen Bedingungen ausgeführt. Tatsächlich lässt sich bei Wasser ein etwas flacherer Geschwindigkeitsverlauf aufgrund der geringeren Dichte feststellen (folgende Abbildung). Ursache ist sehr wahrscheinlich die durch die höhere Dichte bedingte Steigerung der turbulenten Viskosität.



Geschwindigkeitsverteilung in einer Schnittebene in Höhe der Probe (links) (Schnitt jeweils nach $\tau = 1750$ s) für Wasser (obere Kurve) und PbBi (untere Kurve).

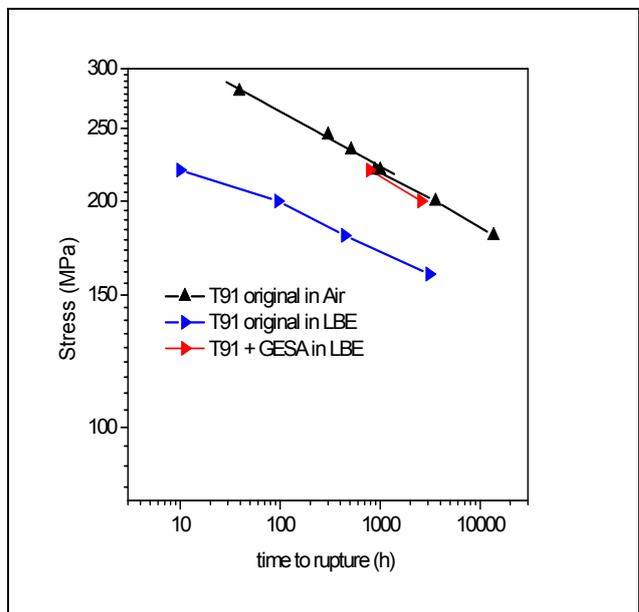
Thermohydraulische und material-spezifische Untersuchungen zur Wärmeabfuhr von thermisch hochbelasteten Oberflächen mit Hilfe der Flüssigmetallkühlung

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

Die wichtigsten Ergebnisse im Berichtszeitraum werden kurz zusammengefasst dargestellt:

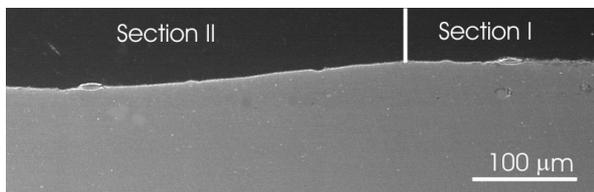


Zeitstanddiagramm von T91 und T91 + GESA getestet in PbBi und Luft.

Im vergangenen Jahr wurde der Einfluss des Blei-Wismuths auf die Zeitstandfestigkeit des Stahls T91 bei 550°C gezeigt. Durch die Abhängigkeit des Einflusses von der aufgetragenen Spannung wurde vermutet, dass es eine untere Grenzspannung geben sollte ab der das Flüssigmetall seinen negativen Einfluss verliert. Tatsächlich konnte in weiteren Experimenten gezeigt werden, dass unterhalb einer Spannung von 120 MPa PbBi

keine Änderung im Kriechbruchverhalten mehr bewirkt. An Querschliffen von T91-Stahl-Proben, die bei hohen Spannung getestet wurden, konnte im vergangenen Jahr gezeigt werden, dass ein direkter Kontakt des PbBi, der für eine Reduzierung der Festigkeit nach dem Rebindereffekt notwendig ist, nur in der Zone der Einschnürung stattfand. Eine Mindestspannung größer als 120 MPa und damit eine Dehnung des Stahls und der gewachsenen Oxidschicht ist somit für eine hinreichend Rissaufweitung notwendig.

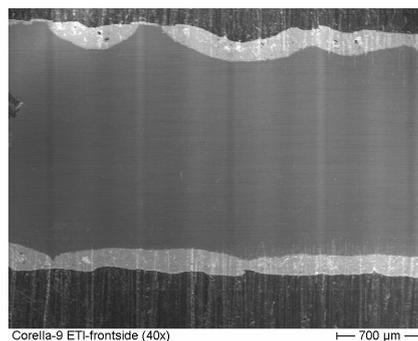
Beim am IHM entwickelten Verfahren für eine höhere Beständigkeit von T91-Stahl in flüssigem Blei-Wismuth wachsen dünne stabile Oxidschichten, die den Kontakt des flüssigen Metalls mit der Stahloberfläche unterbinden. Dünne Oxidschichten haben im Allgemeinen eine höhere Festigkeit und Duktilität. Somit sollte diese Oberflächenmodifikation zusätzlich zum Korrosionsschutz auch das Potential haben, den negativen Einfluss des PbBi auf die Zeitstandfestigkeit zu reduzieren. Tatsächlich zeigen die GESA aluminisierten Proben eine Zeitstandfestigkeit, die nahezu der von in Luft getesteten Proben entspricht (Abbildung). Im Querschliff sind die Unterschiede zum unbehandelten T91-Stahl deutlich zu erkennen. Während beim T91-Stahl im originalen Zustand eine Oxidschicht wächst, die unter der Spannung insbesondere im Bereich der Einschnürung reißt, ist bei der GESA-modifizierte Probe keine Schädigung der oberflächenmodifizierten Schicht und auch der dünnen, im Bild nicht sichtbaren Oxidschutzschicht zu erkennen (Abbildung). Die kritische Spannungen und damit die zur Rissenstehung und -ausweitung notwendige Dehnung ist deutlich höher als bei unbehandeltem T91. Bei höheren Temperaturen und Spannungen sollte hingegen die Verbesserung der Zeitstandfestigkeit durch die oberflächenmodifizierten Schichten immer geringer werden, was durch Experimente bei 600 °C bestätigt wurde. Hier ist der Einfluss der materialspezifischen Kriechparameter, wie Korngrenzen – und Versetzungsgleiten bei höheren Spannungen gegenüber den Oberflächeneffekten dominant.



Querschliff einer GESA-modifizierten T91-Stahl Probe nach Kriechversuch in flüssigem PbBi.

Im Rahmen des MEXT-Projektes wurden die 2 neuen ODS-Legierungen bis zu 10.000h ausgelagert. Beide Stähle zeigten bei einem Sauerstoffanteil von 10⁻⁶Gew% im PbBi bei allen Temperaturen bis 700°C keinen Lösungsangriff, sie waren durch eine dünne Al₂O₃-Schicht geschützt. Bei reduzierenden Bedingungen zeigen beide Stähle bei 550°C nach 3000 h lokalen Lösungsangriff, der jedoch nach 5000h und bei der höheren Temperatur von 650 °C nicht beobachtet werden konnte. Beide Stähle zeigten nach der Auslagerung bei 700 °C in PbBi mit 10⁻⁸ Gew% Sauerstoff großflächigen Lösungsangriff. Zu den statischen Experimenten kamen Auslagerungen in der CORELLA-Anlage bei 650°C und einer nominalen PbBi-Geschwindigkeit von 2m/s hinzu. Der Einbau eines Schauglases in die CORELLA-Apparatur erlaubte es das Experiment in-Situ zu betrachten. Deutlich konnte das turbulente Strömen des Flüssigmetalls in der Nähe des Innenzylinders und damit der Probe beobachtet werden. Diese Proben wurden nach 1000 und 3000 h Auslagerungszeit aus der Anlage herausgenommen und zeigten deutlich einen Angriff durch das fließende PbBi. Unter statischen Bedingungen konnten diese Stähle bis 10.000h ohne Lösungsangriff ausgelagert werden. Die lokalen Geschwindigkeiten waren, wegen der beobachteten turbulenten Strömung, wahrscheinlich deutlich höher als die gewünschten 2 m/s. An

Stählen, die in Obninsk am IPPE im turbulenten Teil der Strömung platziert waren, wurden ähnlich Erosionsattacken gefunden.



Erosion von ODS-Stählen in rotierendem PbBi.

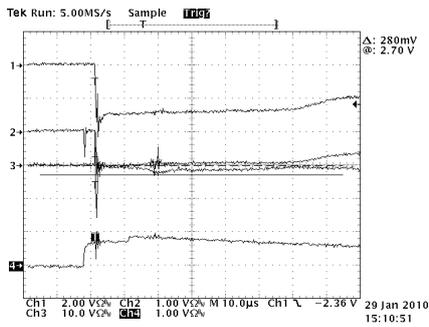
Die Inbetriebnahme der neuen, weiterentwickelten zylindrischen GESA IV-Kathode war ein vorrangiges Ziel der Arbeiten in diesem Jahr. Die Kathode wurde unter Berücksichtigung der diagnostischen Arbeiten des vergangenen Jahres vom Efremov-Institut gebaut und geliefert (folgende Abbildung).



Photos der neuen GESA IV-Kathode.

Erste Experimente zeigten jedoch, dass der Elektronenstrahl sehr inhomogen ist. Daraufhin wurden das Zünd- und das Extraktionsgitter mechanisch stabilisiert und ausgerichtet. In der neuen Konfiguration konnten homogenere Pulse mit einer Pulsdauer von bis zu 100 µs erreicht werden (nächste Abbildung). Solche Pulslängen erfordern jedoch immer einige kürzere Vorpulse zur Reinigung des Targets und Konditionierung der Kathode. Solche Vorpulse werden derzeit bei der vollen Beschleunigungsspannung durchgeführt, was zu einer negativen Beeinflussung der GESA-Behandlung führen kann. Aus diesem Grund wurde der Marx-Generator so umgebaut, dass Vorpulse mit 20 kV Beschleunigungsspannung unmittelbar vor dem eigentlichen Puls appliziert werden können. Versuche mit diesen Vorpulsen werden in der ersten Jahreshälfte 2010 durchgeführt.

Im vergangenen Jahr wurde an einzelnen Kathoden-Kohlefasern deren Zündverhalten untersucht. Diese Experimente wurden auf ein Faserbündel, wie es in den GESA-Kathoden verwendet wird ausgedehnt. Dabei zeigte sich, dass das Zündverhalten eines Faserbündels dem einer Einzelfaser weitestgehend entspricht und auf ähnliche Weise variiert und kontrolliert werden kann. Die Messung des Targetstroms und insbesondere der Stromverteilung wird eine der Aufgabe für das Jahr 2010 sein.



Strom, Spannungsverläufe bei einem GESA IV-Puls.

Beteiligte Mitarbeiter:

DP. W. An, M. Eng. Mattia DelGiaco, Dr. Annette Heinzl, Dr. A. Jianu, DI M. Kieser, DI(FH) F. Lang, Dr. G. Müller, Dr. H. Muscher, Dr. G. Schumacher (Gastwissenschaftler), A. Sivkovich, P. Spieler, **Dr. A. Weisenburger**, DI (FH) F. Zimmermann.

Programm Erneuerbare Energien (EE)

Konditionierung von Biomasse mit Verfahren der Hochleistungsimpulstechnik

Elektroporation von Weinmaische

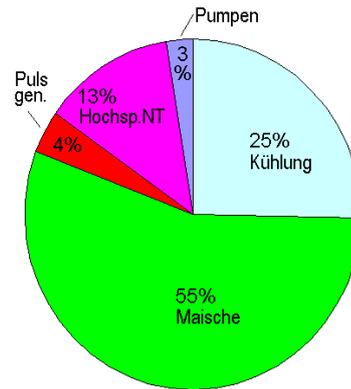
Wie schon in den Vorjahren wurden in Kooperation mit dem Staatlichen Weinbauinstitut Freiburg Versuche zur Elektroporation von Weinmaische durchgeführt. Auch in diesem Jahr konnten erfolgreich ca. 5 m³ Maische verschiedener roter und weißer Traubensorten behandelt werden. Ein Teil der Versuche fand in der Winzergenossenschaft Weingarten statt. Schwerpunkte der Arbeit lagen bei der Erprobung einer neuartigen Verfahrenskombination aus Elektroporation und Maischegärung sowie bei der Abschätzung des Energieverbrauchs der Maischeelektroporation.

Versuchs-Nr.	Variante	Most						Wein					
		Mostgewicht (Maische, °Oe)	Gesamtsäure (g/l)	NOPA (mg/l)	Kalkum (g/l)	Gerbstoffe (g/l)	Farbintensität	vorh. Alkohol (g/l)	Gesamtextrakt (g/l)	Gesamtsäure (g/l)	Kalkum (g/l)	Gerbstoffe (g/l)	Farbintensität
2008 21 5001	Maischeerhitzung (ME) Standzeit 12 h	83,4	11,3	27,4	2,2	1,9	11,9	95,6	23,2	4,4	1,2	1,8	1,5
2008 21 5002	Elektroporation (EP) Standzeit 12 h	84,0	10,4	29,5	2,0	1,6	12,9	98,1	23,7	4,7	1,1	1,5	1,5
2008 21 5003	Maischegärung (MG)	83,4	-	-	-	-	-	86,0	24,3	4,7	1,1	2,3	1,9
2008 21 5004	Elektroporation + Maischegärung (EP + MG)	84,0	-	-	-	-	-	85,9	24,8	4,3	1,2	2,8	2,1

Analysewerte für Spätburgunder-Most und Wein für verschiedene Aufschlussverfahren.

Die Tabelle zeigt vergleichend Analysewerte von Spätburgunder-Most und Wein für die verschiedenen Aufschlussverfahren Maischeerhitzung, Elektroporation und Maischegärung, sowie einer Kombination aus Elektroporation und Maischegärung. Aufgrund der Reifezeiten für den Wein basieren diese Ergebnisse auf Aufschlussversuchen aus dem Jahr 2008. Die Versuche zeigen deutlich, dass durch eine Maischegärung nach dem Zellaufschluss durch Elektroporation eine intensivere Farbe als bei der Anwendung nur eines Aufschlussverfahrens erzielt wird. Auch der Gerbstoffgehalt ist beim kombinierten Verfahren deutlich erhöht. Im Vergleich der Einzelverfahren

erreicht die Elektroporation vergleichbare Ergebnisse wie die Maischeerhitzung.



Prozentualer Energieverbrauch der Anlage KEA-MOBIL.

Die obige Abbildung zeigt den prozentualen Energieverbrauch für verschiedene Anlagenkomponenten. Bei typischen Betriebsbedingungen nimmt die Anlage ca. 17 kW aus dem Netz auf. Der spezifische Energieverbrauch für die Maischebehandlung konnte bei einem Durchsatz von 900 kg/h zu 38 kJ/kg bestimmt werden und führte zu einer Erwärmung der Maische um 11 K. D.h. ca. 55 % der aufgenommenen Energie wird in die Maische eingebracht. Einen vergleichsweise großen Anteil von 25% der Primärenergie benötigen die Kühlung und die Belüftung der Anlage. Es ist geplant, diesen Anteil zu verringern.

Elektroporation von Zuckerrüben im industriellen Maßstab

Die Kooperation mit SÜDZUCKER zum Aufschluss von Zuckerrüben im industriellen Maßstab wurde fortgeführt. Dabei konnte erstmals in einer Zuckerfabrik ein Teilstrom an Zuckerrüben parallel zur Produktion erfolgreich behandelt werden. Hierfür wurde die Elektroporationsanlage bereits in das Prozessleitsystem der Fabrik eingebunden.

Für die Verarbeitung der Zuckerrüben wird bei SÜDZUCKER an einem kombinierten Verfahren aus Elektroporation und alkalischer Extraktion gearbeitet. Nachdem das Zellgewebe durch die Behandlung mit gepulsten elektrischen Feldern geöffnet ist, unterstützt die zugegebene Kalkmilch den Extraktionsprozess und verbessert die Abpressbarkeit der Rübenschnitzel wesentlich. Für diese Verfahrenskombination aus Elektroporation und alkalischer Extraktion zeigen die durchgeführten Versuche, dass eine Primärenergieeinsparung zwischen 25% und 30% für die Zuckerherstellung erreicht werden kann. Im Einzelnen tragen folgende Punkte zu diesem Einsparpotential bei:

- Ein gegenüber dem konventionellen Prozess invertiertes Temperaturprofil über die gesamte Extraktionsstrecke ermöglicht die Absenkung der Extraktions-Temperatur um 10 K und damit eine Einsparung an Prozessdampf. Dabei kann die Kondensatrestwärme von 50°C zur Maischeanwärmung auf bis zu 40°C genutzt werden.
- Die im Vergleich zum konventionellen Verfahren wesentlich verbesserte Zellöffnung (10 ... 15 % erhöhter Diffusionskoeffizient) erleichtert die Zuckerextraktion erheblich. Diese Verbesserung des Stoffübergangs ermöglicht es, die für die Extraktion verwendete Frischwassermenge und daher die zu verdampfende Wassermenge signifikant zu senken.
- Die erzielbaren Schnitzeltrockensubstanzgehalte liegen bei dieser Verfahrenskombination um 10 % absolut höher; dies ist der verbesserten Textur und Permeabilität des Schnitzelmaterials zu verdanken. Dadurch kann die Menge des bei der

Hochtemperaturtrocknung zu verdampfenden Wassers annähernd halbiert werden.

Darüber hinaus sind die nach dem neuen Verfahren gewonnenen Extrakte den herkömmlichen Extrakten qualitativ überlegen. Damit vereinfacht sich die Extraktreinigung. Die Filtrationseigenschaften sind überragend. Die Eindickung und Kristallisation der gereinigten Extrakte bereiten keine Probleme.

Der Übergang vom sauren zum alkalischen Milieu bringt weitere wesentliche Vorteile mit sich: Die üblichen Korrosionsprobleme von Metallkomponenten werden stark herabgesetzt, die lebensfeindlichen Bedingungen für Bakterien erniedrigen die natürlichen Extraktionsverluste und ermöglichen die Einsparung von Hilfsstoffen. Die natürlichen Hydrokolloide aus der Rübe (Proteine, Pektine ...) verbleiben an den Rübenschnitteln. Somit erhöhen sich Qualität und Menge des daraus produzierten Futtermittels. Die beschriebenen Einsparungen werden erst durch die Kombination von Elektroporation und alkalischer Extraktion ermöglicht:

An der Hochskalierung der Technologie wird weiterhin gearbeitet.

Konditionierung von Biomasse mit Verfahren der Hochleistungsimpulstechnik

Die Behandlung biologischer Zellen mit starken gepulsten elektrischen Feldern (PEF) führt, abhängig von den gewählten Behandlungsparametern, zu unterschiedlichen Reaktionen im Zielorganismus.

Feldimpulse mit einer Dauer im Mikrosekundenbereich und Anstiegszeiten in der Größenordnung der Membranladezeitkonstanten (einige 10 ns bis 100 ns) beeinflussen vorwiegend die Plasmamembran der Zelle. Wegen des vergleichsweise langsamen Anstiegs des externen elektrischen Felds können Polarisationsvorgänge an der Grenzschicht zur Plasmamembran der Feldänderung folgen. Die Feldstärke entlang der Zelle wird in die Membran verdrängt, das Zellinnere bleibt dabei feldfrei. Infolge der Membranaufladung kommt es zu einer energetisch günstigeren Reorganisation der Phospholipidmoleküle in der Membran, zur Bildung von Poren. Dieser als Elektroporation bekannte Effekt wird am IHM zur Gewinnung von Zellinhaltsstoffen, zur Entwässerung von Biomasse und zur Keimabtötung genutzt.

Bei kürzeren Impulsanstiegszeiten von wenigen Nanosekunden kann die Membranaufladung der externen Feldstärkeänderung nicht mehr folgen. Der Feldstärkeimpuls kann dann bis ins Zellinnere vordringen und intrazelluläre Beeinflussungen hervorrufen. Auch in Zusammenarbeit mit den Botanischen Instituten des KIT konnte im vergangenen Jahr eine massive Beeinflussung des pflanzlichen Zytoskeletts und eine Wachstumssteigerung bei höheren Pflanzen und Pilzen infolge einer Ultrakurzpulsexposition nachgewiesen werden. Diese Grundlagenarbeiten finden in enger Kooperation mit der KIT-Shared Research Group zur Ultrakurzpulswirkung auf Pflanzenzellen statt.

Die Arbeiten in der Bioelectrics-Gruppe zielen, neben der wirtschaftlichen Umsetzung der Hochleistungsimpulstechnik, auf eine Beschleunigung von Bioreaktorprozessen und auf eine Effizienzsteigerung bei der Zellinhaltsstoffextraktion durch Elektroimpulsbehandlung bei Energiepflanzen und Mikroalgen.

Einsatz der Elektroimpulsbehandlung zur effizienten Verarbeitung von Mikroalgen

Weltweit gewinnt die Herstellung von Biomasse und Biodiesel aus Mikroalgen an Interesse. Derzeit ist allerdings noch keine wirtschaftliche Produktion von Algenbiomasse zur energetischen Nutzung möglich. Gründe hierfür sind die hohen Investitions- und Betriebskosten der derzeit entwickelten Photobioreaktoren und die hohen Kosten für die Ernte und den Aufschluss der Mikroalgen. Es wird davon ausgegangen, dass die Wirtschaftlichkeit mittelfristig nur durch die Nutzung integrierter Algenproduktionsprozesse erreicht werden kann, d.h. durch die Kopplung der Energiegewinnung mit der Produktion von Wirk- und Wertstoffen aus Algen.

Zu den vielfältigen Ansätzen, die auf eine höhere Produktivität und die Reduzierung der Produktionskosten zielen, gehören:

- a) Die Entwicklung neuer Photobioreaktoren mit geringen Investitions- und Betriebskosten und optimiertem Lichteintrag.
- b) Die Erhöhung der Produktivität des Bioprozesses durch angepasste Zufütterungsstrategien und optimierte, teilweise gentechnisch veränderte Algenstämme.
- c) Die Optimierung der Algenaufarbeitung, des sogenannten Down-Stream-Processings (Algenabtrennung, Aufkonzentrierung, Zellaufschluss, Wertstoffextraktion, Trocknung).

Der gesamte Algenproduktionsprozess bietet vielfältige Ansatzpunkte für eine Anwendung der Elektroimpulsbehandlung. Während der Algenkultivierung, dem eigentlichen Bioprozess, bildet die Wachstumsstimulation durch gepulste elektrische Felder im Nanosekundenbereich (nsPEF) eine interessante Option, die am IHM näher untersucht werden soll. Im Down-Stream-Processing sind die Zielarbeitsrichtungen:

- die Verbesserung der Sedimentation durch Elektroimpulsbehandlung,
- die Elektroporation zur einfacheren Extraktion/Gewinnung von Zellinhaltsstoffen,
- die energieeffizientere Trocknung durch Kopplung mit Elektroporation.

Aufbau eines Photobioreaktors zur Kultivierung von Algen

Um Experimente in den oben erwähnten Gebieten durchführen zu können, wird Algenbiomasse benötigt. Mit den vorhandenen Anzuchtmengen aus der Schüttelkolbenkultivierung kann jedoch die notwendige Algenmenge nicht produziert werden. Hinzu kommt, dass die Kultivierungsbedingungen einen großen Einfluss auf die Qualität der Algenbiomasse und damit auf den folgenden Aufarbeitungsprozess haben. Folglich müssen die Algen unter definierten Bedingungen kultiviert werden, um eine Reproduzierbarkeit der Versuche zu gewährleisten. Daher wurde der Aufbau eines Photobioreaktors (PBR) am IHM beschlossen.

Zunächst wurde ein Aufbau von kommerziell verfügbaren PBR-Komplettsystemen geprüft. Es war jedoch in der gewünschten Größe kein geregelter PBR erhältlich, der kontrollierte und reproduzierbare Kultivierungsrandbedingungen bietet, wie beispielsweise die vollständige Heissdampf-Sterilisierbarkeit, oder eine Temperatur- oder pH-Regelung während der Anzucht.

In Zusammenarbeit mit dem Bereich Bioverfahrenstechnik des Institutes für Bio- und Lebensmitteltechnik des KIT wurde am IHM ein 25 Liter Ringspalt-Photobioreaktor weiterentwickelt und aufgebaut (nächste Abbildung). Finanziert wurde das Projekt aus strategischen Mitteln des KIT-Zentrums Energie. Der Reaktor besteht aus einem äußeren Glasrohr und einem innenliegenden Edelstahlrohr, das als Kühl- bzw. Heizrohr dient.



Ringspalt-Photobioreaktor mit 25 l Kultiviervolumen.

Der Reaktor ist CIP- und SIP-fähig (CIP – Cleaning In Place, SIP Sterilization in Place) und wird von außen mit Hilfe von Leuchtstoffröhren beleuchtet. Der Ringspalt, der den eigentlichen Kultivierungsraum bildet, ist ca. 37 mm dick. Dadurch ist gewährleistet, dass die Algen auch bei höheren Zelldichten noch ausreichend Licht zur Photosynthese erhalten. Der Reaktor wird als Blasensäule von unten mit einem CO₂/Luftgemisch begast. Geregelt und erfasst werden die Temperatur, der pH-Wert, und der Feed-Gas-Massenstrom.

Algenkultivierung im Labormaßstab

Zur Durchführung von Aufschlussexperimenten mit Mikroalgen im Labormaßstab sind konstante Eigenschaften der Ausgangsbiomasse von großer Bedeutung. Dazu wurden die verwendeten Algenstämme wöchentlich neu angeimpft. Die hierfür erforderlichen Stammkulturen werden monatlich erneuert, um einem Verlust der Kultivierungsgrundlage durch Verkeimung vorzubeugen. Um den Aufwand zu begrenzen wurde aus der Vielzahl von aus Voruntersuchungen vorhandenen Algenstämmen (vgl. IHM-Jahresbericht 2008) die Grünalge *Auxenochlorella protothecoides* für weitergehende Versuche ausgewählt. Diese bietet mit kurzen Generationszeiten und ausreichender Lipidbildung die erforderlichen Eigenschaften für durchzuführende Extraktionsexperimente nach erfolgter Elektroimpulsbehandlung. Die Kultivierung der Algen erfolgt derzeit in Schüttelkolbenkultur unter mixotrophen Bedingungen. Die erreichten Zelldichten liegen bei 21,4 g_{TS} pro Liter Zellsuspension.

Voruntersuchungen zur Lipidextraktion durch Elektroimpulsbehandlung

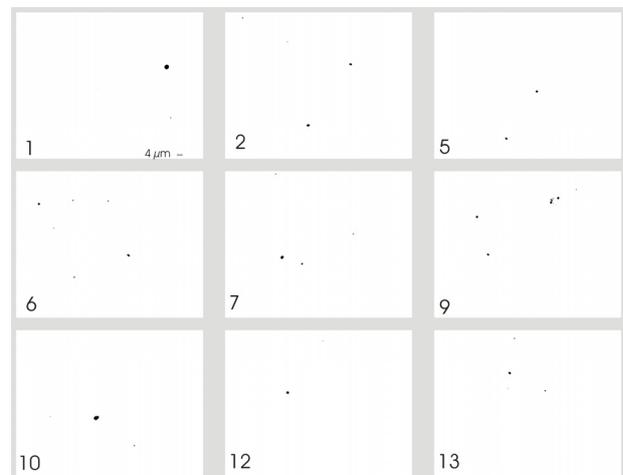
Zur Extraktion von Lipiden aus dem intrazellulären Raum der Algenzellen bieten sich generell zwei Methoden der Hochleistungsimpulstechnik an, die Permeabilisierung der Zellmembran mittels gepulster elektrischer Felder und die Desintegration der Zelle durch Schockwellen infolge gepulster Unterwasserentladungen (FRANKA-Methode).

Zunächst wurde ausschließlich mit gepulsten elektrischen Feldern gearbeitet, um Lipide aus dem intrazellulären Raum der Algenzellen freizusetzen. Zur Erzeugung der gepulsten elektrischen Felder kamen ein Blumlein-Generator und ein Kabelimpulsgenerator zum Einsatz. Die angewandten Feldstärken lagen zwischen 30 und 95 kV/cm. Die eingetragene Energie pro Behandlung wurde dabei zwischen 36 und 315 kJ/kg variiert. Die gewählte Einzelimpulsdauer lag zwischen 400 ns und 10 µs. Im Rahmen der qualitativen fluoreszenzmikroskopischen Untersuchungen nach Färbung der Proben mit dem Lipidmarker Nile Red, waren nach den Behandlungen mit gepulsten elektrischen Feldern keine freien Lipide in der extrazellulären Suspension zu beobachten. Daher wurde in einem weiteren Schritt eine Kombination von Aufschlussmethoden eingesetzt, um eine Extraktion der Lipide aus den Algenzellen zu bewirken. Folgende kombinatorischen Experimente wurden dazu durchgeführt:

- Elektroimpulsbehandlung + Erwärmung auf 60°C
- Elektroimpulsbehandlung + Ultraschall
- Elektroimpulsbehandlung + Ultraschall + Mahlkörper
- Elektroimpulsbehandlung + Vortexen + Mahlkörper
- Elektroimpulsbehandlung + Zentrifugation (5000g)
- Elektroimpulsbehandlung + Wärme + Zentrifugation (5000g)

Auch bei diesen kombinatorischen Extraktionsexperimenten waren nach fluoreszenzmikroskopischer Beobachtung keine extrazellulären Lipide feststellbar. Diese Ergebnisse zeigten, dass entweder keine Lipide freigesetzt wurden, oder die qualitative Untersuchungsmethode mit dem Fluoreszenzfarbstoff Nile Red nicht geeignet ist, um Lipide zu diagnostizieren, die mit Hilfe gepulster elektrischer Felder freigesetzt wurden. Daher wurde entschieden, im kommenden Arbeitsabschnitt eine sensiblere, quantitative Messmethode, die gaschromatografische und massenspektrometrische Untersuchung, einzusetzen. Diese Arbeiten werden in Kooperation mit dem Institut für Funktionelle Grenzflächen (IFG) des KIT durchgeführt. Dort besteht erhebliche Expertise in der Diagnostik von langkettigen Fettsäuren (LCFAs), welche die Grundbestandteile der interessierenden Lipide aus Algen darstellen.

Ergänzend zu den Untersuchungen mit gepulsten elektrischen Feldern wurden weitere Experimente zur Lipidfreisetzung aus Algen durch Einsatz von gepulsten Unterwasserentladungen durchgeführt. Im Rahmen dieser Schockwellenexperimente konnten in ersten Untersuchungen freie Lipidtröpfchen beobachtet werden (Abbildung).



Helligkeitsinvertierte Darstellung aufgeschlossener Lipide aus Algenzellen. Extraktion durch Schockwellen, erzeugt mit Unterwasserentladungen.

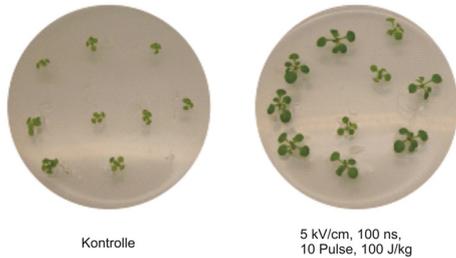
Wegen des hohen erforderlichen Energieeintrags von mehr als 300 kJ/kg wird dieser Ansatz technologisch nicht weiterverfolgt sondern zeigt vielmehr, dass ein fluoreszenzoptischer Nachweis freier Lipidtröpfchen nach Nile Red Färbung prinzipiell möglich ist.

In weiteren Arbeitsschritten soll untersucht werden, inwieweit die technologisch etablierte Lösungsmittelextraktion von Lipiden aus Algen durch Elektroimpulsvorbehandlung zu einer Ertragssteigerung führt.

Wachstumssteigerung durch Ultrakurzpulsexposition bei höheren Pflanzen

Zur Untersuchung der Wirkung von sehr kurzen elektrischen Pulsen (Pulsdauer im ns-Bereich) auf den Phänotyp von Keimlingen der kleinen Ackerschmalwand (*Arabidopsis thaliana*) wurden 7 Tage alte Pflänzchen einer Behandlung mit Pulsen mit einer Pulsdauer von 10 ns, 25 ns und 100 ns unterzogen. Die elektrische Feldstärke wurde variiert zwischen 5 kV/cm und 50 kV/cm, die angewandte spezifische Energie lag im Bereich zwischen 100 J/kg und 10 kJ/kg. Für die Anwendung der Pulse wurden die auf Agarplatten angezogenen Pflänzchen zwischen zwei Elektroden in einem leitfähigen Medium untergetaucht und nach Ende der Pulsapplikation auf Agarplatten weiter gezogen. Fünf und sieben Tage nach der Bepulung wurden die Platten mit den Keimlingen fotografiert und die Gesamtblattfläche der 10 Pflänzchen je Platte mittels einer Software bestimmt.

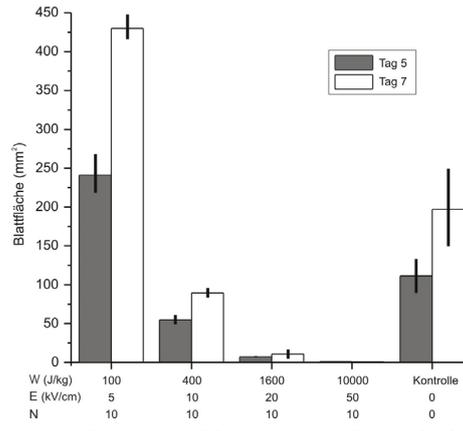
In diesen Versuchen ergab sich - abhängig von den gewählten Parametern - eine deutliche Wachstumssteigerung der Keimlinge.



Zunahme der gebildeten Blattfläche von *A. thaliana* nach vorangegangener Kurzpulsbehandlung der Keimlinge.

Die obige Abbildung zeigt Fotografien von zwei repräsentativen Agarplatten mit Keimlingen von *A. thaliana*, sieben Tage nach Elektroimpulsbehandlung. Die Pflänzchen der Kontrollplatte wurden derselben experimentellen Prozedur unterzogen wie die bepulsten Pflänzchen, allerdings ohne Anlegen eines elektrischen Feldes. Deutlich erkennbar ist auf der rechten Platte die vergrößerte Blattfläche der bepulsten Pflanzen.

Eine Impulsparameterstudie zeigte die Wirkung unterschiedlicher Feldstärken und dementsprechend unterschiedlicher Behandlungsenergien bei 100 ns langen Impulsen (nächste Abbildung). Während bei hohen Feldstärken (20 kV/cm und 50 kV/cm) wenig bis gar keine Blattfläche messbar war, führte das durch die Pulsbehandlung mit 5 kV/cm gesteigerte Pflanzenwachstum zu einer Zunahme der Blattfläche um mehr als 100% in Bezug auf die Kontrolllexperimente ohne Pulsbehandlung. Dieses Verhalten ist durch die Wirkung zweier konkurrierender Effekte zu erklären. Der wachstumssteigernde Effekt tritt schon bei geringsten Behandlungsenergien auf. Mit zunehmender Behandlungsenergie überwiegt eine Schädigung des Keimlings infolge von Elektroporation.



Gesamtblattfläche der Pflanzen einer Platte fünf bzw. sieben Tage nach Elektroimpulsbehandlung mit jeweils 10 Pulsen bei unterschiedlicher Feldstärke und einer Pulsdauer von 100 ns.

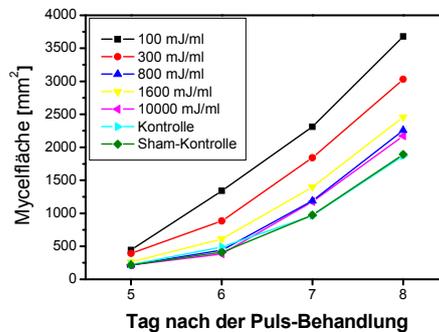
Der Grund für die beobachtete Wachstumssteigerung liegt vermutlich in einem durch die elektrischen Pulse induzierten Stresskompensationsmechanismus.

Für weitere Versuche wird eine Elektrodenanordnung erprobt, die es erlaubt, die Pulse anzuwenden, ohne die Sämlinge aus dem Agar-Medium zu entnehmen. So können mechanische Beschädigungen an Wurzel und Spross minimiert werden.

Wachstumssteigerung durch Ultrakurzpulsexposition bei Pilzen

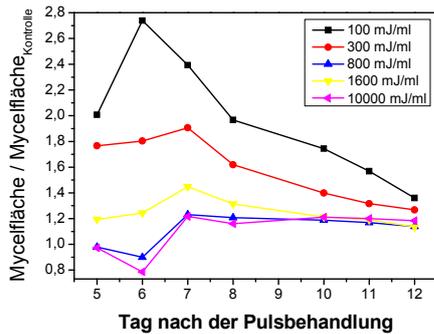
Ähnlich wie bei höheren Pflanzen wurde auch bei Pilzen eine Steigerung des Wachstums phänonenologisch festgestellt. Um den Einfluss von Nanosekundenpulsen auf das Wachstum von Pilzen zu untersuchen, wurden Sporen des Basidiomyceten *Hypsizygos ulmaris* mit Kurzpulsen behandelt. Die Sporen wurden Feldstärken von 5 - 50 kV/cm und Pulslängen von 25 ns und 100 ns ausgesetzt.

Mit Hilfe der Pulsanzahl wurden spezifische Energien von 100 mJ/ml bis 10000 mJ/ml eingebracht. Mit der behandelten Sporenlösung wurde anschließend eine Agarplatte angeimpft. Die behandelten Proben sowie die Kontrollen wurden für 12 Tage bei 25°C im Dunkeln inkubiert und das Mycelwachstum täglich dokumentiert. Mit Hilfe eines Bildbearbeitungsprogramms konnte die Mycelfläche in mm² berechnet werden (nächste Abbildung).



Mycelfläche in mm² für die unterschiedlichen Behandlungsenergien, in Abhängigkeit der Tage nach der Pulsbehandlung.

Wie der folgenden Abbildung zu entnehmen ist, führt eine spezifische eingebrachte Energie von 100 mJ/ml zu einer 2,75-fach größeren Mycelfläche, im Vergleich zur unbehandelten Probe.



Mycellfläche in mm² für die unterschiedlichen Behandlungsenergien, normiert auf die Mycellfläche der Kontrolle, in Abhängigkeit der Tage nach der Pulsbehandlung.

Alle weiteren Energien deuten ebenfalls auf einen wachstumsstimulierenden Effekt hin.

Erstmals konnte gemessen werden, dass es sich bei dem wachstumssteigernden Effekt um einen zeitlich limitierten Wachstumsschub handelt, der am 6. bis 7. Tag nach Pulsbehandlung einen maximalen Einfluss auf das Wachstumsverhalten des Pilzmycels zeigt. Jeder weitere Tag führt zu einer Verringerung der Wachstumsgeschwindigkeit und letztendlich zu einem Angleichen an die Wachstumsgeschwindigkeit der Kontrollprobe.

Des Weiteren konnte eine vermehrte Bildung von rhizomorphem (fruchtbildendem) Mycel beobachtet werden (siehe folgende Abbildung, verdickte Stränge im rechten Bild). Die Ergebnisse, insbesondere die Abnahme des stimulierenden Effektes, deuten auf eine Stressreaktion des Organismus auf die Behandlung mit gepulsten elektrischen Feldern hin.



Aufnahmen der Mycellfläche 12 Tage nach der Pulsbehandlung. Links ist die Kontrollprobe zu sehen, rechts die mit einer eingebrachten Energie von 100 mJ/ml behandelte Probe.

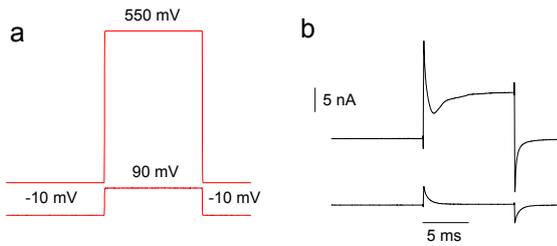
Um die Ergebnisse zu verifizieren, soll das Experiment wiederholt werden. Die bewachsenen Platten sollen anschließend in Gewächshäusern ausgebracht werden, um zu untersuchen, ob die vermehrte Bildung von rhizomorphem Mycel auch zu einem Mehrertrag an gebildeten Fruchtkörpern (Pilzen) führt. Ein weiterer Versuchsansatz soll klären, ob es sich bei der beobachteten Wachstumssteigerung um eine Stimulation der Zellteilung oder um eine Zunahme der Zellgröße handelt.

Aktivitäten im Rahmen der Shared Research Group (SRG 60-1)

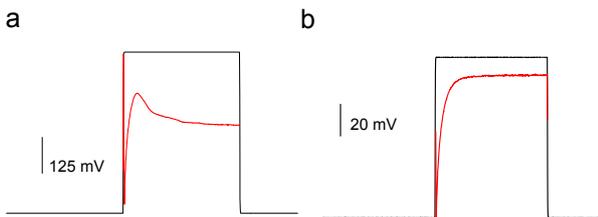
Elektrische Eigenschaften der Plasmamembran pflanzlicher Zellen im supra-physiologischen Spannungsbereich

Unter natürlichen Bedingungen nimmt das Membranpotential (die elektrische Spannungsdifferenz über der Membran) Werte von etwa -200 mV bis +50 mV ein. Wenn Zellen jedoch einem gepulsten elektrischen Feld mit hoher Feldstärke ausgesetzt werden, kommt es kurzzeitig zum Aufbau einer hohen elektrischen Potentialdifferenz über der Zellmembran, bevor Porenbildung einsetzt und die Membranspannung zusammenbricht. Bisher ist nur sehr wenig über die elektrischen Eigenschaften der Zellmembranen bei diesen sogenannten supra-physiologischen Spannungen bekannt, obwohl sie für das Verständnis der Elektroporation von großer Bedeutung sind.

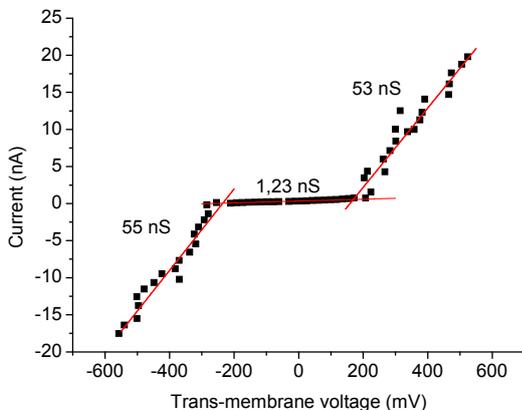
Im Berichtszeitraum wurden hierzu Untersuchungen mit der Patch-Clamp-Technik an Protoplasten, die aus BY-2 Tabak-Kulturzellen gewonnen wurden, durchgeführt. Die Patch-Clamp Technik erlaubt das Anlegen einer definierten Spannung an die Zellmembran und die Aufzeichnung des dadurch erzeugten Stromes als Maß für den Elektrolyttransport über die Membran. Hierzu wurden Ag/AgCl-Elektroden verwendet; eine Elektrode befand sich in der externen Lösung, eine weitere wurde in eine Elektrolyt-gefüllte Glaskapillare integriert. Diese wurde auf die Membran aufgesetzt, und nach Etablierung eines hohen Abdichtwiderstandes zwischen Glas und Membran wurde die von der Kapillarenspitze umschlossene Membranfläche (ca. 1 μm^2) aufgebrochen, um einen elektrischen Zugang zum Zellinneren zu herzustellen (sog. „whole cell Konfiguration“). Daraufhin wurden rechteckförmige Spannungspulse mit einer Pulslänge von 10 ms in Abständen von 25 s an die Zellmembran angelegt (der relativ grosse Zeitabstand wurde gewählt, um zu verhindern, dass die Stromantwort durch den vorangehenden Puls beeinflusst wird). Die Amplitude wurde in Schritten von 40 mV (20 mV von -200 bis +200) variiert, wobei ein Spannungsbereich von +1 V bis -1 V abgedeckt wurde. In der ersten nachfolgenden Abbildung sind beispielhaft zwei Spannungspulse und die zugehörige Stromantwort der Zelle dargestellt. Bei der Auswertung der Daten ist zu berücksichtigen, dass die an der Membran abfallende Spannung von der apparativ vorgegebenen „Klemmspannung“ erheblich abweichen kann, wenn der Widerstand der Messanordnung (der über die gesamte Messung näherungsweise konstant bleibt) gegenüber dem Membranwiderstand nicht zu vernachlässigen ist. Der Widerstand der Messanordnung ist aus dem Umladestrom unmittelbar nach einer Spannungsänderung zugänglich; dies ermöglicht die Berechnung des realen Membranpotentials. Die mittlere Abbildung zeigt beispielhaft einen Vergleich des angelegten Spannungspulses und des Zeitverlaufs der Membranspannung. Nach 5 ms wird eine in etwa konstante Membranspannung aufgebaut, die aber im Falle des 550-mV Pulses nur 54 % der angelegten Kommando-Spannung erreicht. In der Abbildung unten ist die Strom-Spannungskennlinie für einen Protoplasten resultierend aus einer kompletten Puls-Sequenz dargestellt. Es sind deutlich drei Spannungsbereiche zu unterscheiden. In einem mittleren Spannungsbereich, etwa von -220 bis +220 mV, besitzt die Membran eine geringe Leitfähigkeit. Jenseits dieses Spannungsbereiches nimmt die Leitfähigkeit, unabhängig von der Polarität, stark zu und erreicht wieder einen konstanter Wert, der sich im positiven und negativen Spannungsbereich kaum unterscheidet. Der Übergang zwischen diesen Leitfähigkeitszuständen findet in einem engen Spannungsfenster statt. Die Ursache für die Leitfähigkeitszunahme bei supra-physiologischen Spannungen ist noch nicht geklärt und ist Gegenstand weiterer Forschung. Neben der spontanen Bildung von Nano-Poren kommen auch ein Phasenübergang in der Membran sowie die möglicherweise artifizielle Aktivierung von Ionenkanälen in Frage.



Zeitlicher Verlauf der Klemmspannung (a) und daraus resultierende Stromantwort des Protoplasten (b), beispielhaft dargestellt anhand zweier Pulse unterschiedlicher Amplitude. Die rechteckförmige Spannungsänderung führt zunächst zu einer kapazitiven Spitze in der Stromantwort, die innerhalb von 1 ms relaxiert. Während jedoch bei 90 mV der Strom fast auf den Ausgangswert zurückkehrt, durchläuft er bei 550 mV ein Minimum, um dann wieder anzusteigen.



Zeitlicher Verlauf der Klemmspannung (schwarz) und der tatsächlichen Membranspannung (rot) bei einem 10-ms-Spannungspuls zu 550 mV (a) und zu 90 mV (b; unterschiedliche Skalierung!). Insbesondere bei der höheren Amplitude fällt nur ein Teil der Klemmspannung tatsächlich an der Membran ab.



Strom-Spannungs-Kennlinie eines aus BY-2 Tabakzellen isolierten Protoplasten nach einer Pulsdauer von 10 ms.

Das NIMEP-Projekt – Förderung durch das BMBF im Rahmen der Initiative KMU-innovativ

Die am IHM vorhandene Expertise hinsichtlich der fluoreszenzoptischen Messung von Membranpotentialen bietet weitere, interessante Anwendungen in der elektrophysiologischen Messtechnik. In Zusammenarbeit mit dem mittelständischen Unternehmen HEKA Elektronik sowie dem Institut für Mikrosystemtechnik am KIT (AG Guber) soll ein neues Messverfahren entwickelt werden, die Nicht-invasive mikrofluidische Plattform für die Elektrophysiologie (NIMEP) zur präzisen Vermessung der Aktivität von Ionenkanälen in der Plasmamembran von Zellen und ihrer gezielte Beeinflussung durch (neue) Wirkstoffe (sog. Drug-screening). Im Gegensatz zu bestehenden Techniken (z.B. der Patch-Clamp-Technik) erfolgt

die Aufladung der Zelle sowie die Vermessung des dadurch erzeugten Stromes über externe Elektroden. Die Technik ist also nicht-invasiv, d.h. die Zellen stehen nach der elektrophysiologischen Messung für weitere Essays zur Verfügung. Für dieses Projekt, das eine Laufzeit von drei Jahren hat, wurden vom BMBF-Mittel in Höhe von insgesamt 460.000 € für das KIT bereitgestellt. Das Projekt startete offiziell im Oktober 2009. Eine neu eingestellte(r) Wissenschaftler(in) sowie eine Laborantin am IHM werden an diesem Projekt arbeiten.

Messung der Membranaufladung an pflanzlichen Zellen

Das Anlegen eines externen elektrischen Feldes an eine biologische Zelle führt, bei Erreichen einer kritischen Transmembranspannung, zu einer Permeabilitätsänderung der Plasmamembran.

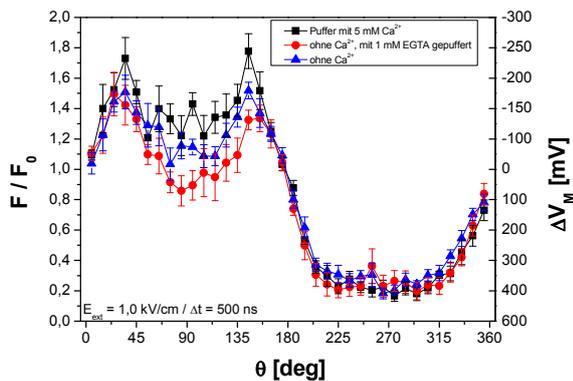
Die derzeit gängigste Theorie erklärt die auftretende Leitfähigkeitserhöhung der Membran als Reaktion auf ein externes elektrisches Feld durch die Bildung vieler kleiner Poren mit Radien von wenigen Nanometern, welche mit der Dauer des angelegten Pulses dynamisch wachsen.

Im Rahmen der Grundlagenforschung wurden der statistisch signifikante Einbruch der Membranspannung bei einer externen Feldstärke von 1 kV/cm sowie die nachfolgende Wiederaufladung der Membran am hyperpolarisierten Zellpol genauer untersucht. Für die Messungen wurden mit dem feldsensitiven Fluoreszenzfarbstoff ANNINE-6 gefärbte Protoplasten der Laborzelllinie *Nicotiana tabacum* L. cv. Bright Yellow 2 (BY-2) verwendet. Zunächst wurde die azimutale Abhängigkeit der Transmembranspannung im Hinblick auf den beobachteten Spannungseinbruch untersucht. Hierzu wurden die Zellen einem 1µs langen Feldstärkepuls ausgesetzt und die hierdurch hervorgerufene Fluoreszenzänderung in 10° Intervallen entlang des Membranumfangs nach 500 ns bzw. zu unterschiedlichen Zeitpunkten (20 ns, 50 ns, 100 ns, 200 ns, 350 ns, 500 ns, 750 ns, 950 ns) nach Einsetzen des Pulses gemessen. Die Versuche erfolgten bei Feldstärkewerten im Bereich von 0,05 kV/cm bis zu 30,0 kV/cm. Die Umrechnung der Fluoreszenzänderungen in Transmembranspannungsänderungen erfolgte mit Hilfe einer farbstoffspezifischen Kalibrierkurve für die verwendete Anregungswellenlänge von 468 nm. Es ist zu beachten, dass alle gezeigten Fluoreszenzänderungen und die entsprechenden Transmembranspannungen messtechnisch bedingt relativ zum Ruhepotential der Zelle dargestellt sind.

Der beobachtete Membranspannungseinbruch konnte zu späteren Zeitpunkten bzw. bei höheren elektrischen Feldstärken auch für die depolarisierte Zellhemisphäre bestätigt werden. Auch an diesem Zellpol ist eine erneute Wiederaufladung der Membran zu erkennen. Diese Beobachtung spricht für eine Membranspannungsabhängigkeit, deren an den Polen zeitlich versetztes Auftreten durch das stark negative Ruhepotential der pflanzlichen Zelle zu erklären ist.

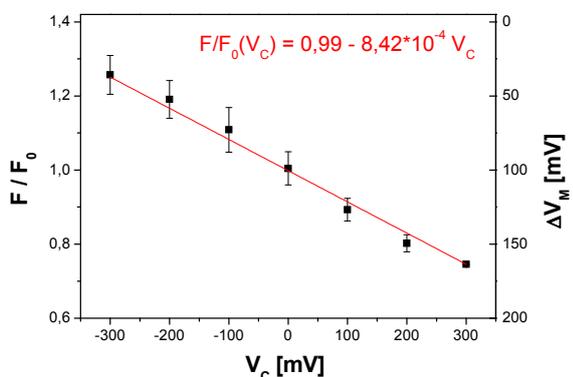
Mit Hilfe eines experimentellen Ansatzes sollte die Theorie, dass spannungsgesteuerte Kalziumkanäle für den kurzzeitigen Spannungseinbruch verantwortlich sind, überprüft werden. Hierzu erfolgten identische Versuche ohne das Vorhandensein von Kalzium im extrazellulären Medium.

Wie der folgenden Abbildung zu entnehmen ist, führt ein kalziumfreies Medium zu einem deutlich verstärkten Membranspannungsrückgang im Polbereich. Aus dieser Beobachtung lässt sich schließen, dass die Aktivierung von spannungsgesteuerten Kalziumkanälen nicht für den Einbruch der Membranspannung verantwortlich ist. Auf Grund der Tatsache, dass das Vorhandensein von Kalzium zu einer verbesserten Membranstabilität führt, sprechen die Ergebnisse für eine verstärkte Störung der Membranintegrität z.B. durch Porenbildungsprozesse.



Einfluss der Kalziumkonzentration im extrazellulären Medium auf die azimuthale Abhängigkeit des Transmembranpotentials von BY-2-Protoplasten 500 ns nach Anlegen des externen Spannungspulses bei einer Feldstärke von 1,0 kV/cm. Das Fehlen von extrazellulärem Kalzium führt zu einer Verstärkung des beobachteten Spannungseinbruches.

Um systematische Fehler bei der Bestimmung der Membranpotentialwerte aus den gemessenen Fluoreszenzdaten auszuschließen, wurde eine Kalibrierung des feldsensitiven Fluoreszenzfarbstoffs ANNINE-6 an BY-2-Protoplasten mit Hilfe der Patch-Clamp-Technik durchgeführt. Hierzu wurde ein gut gefärbter Protoplast gepatcht und in der Whole-Cell-Konfiguration auf unterschiedliche Membranspannungen geclamt (V_c = Kommandospannung). Verwendet wurden Spannungspulse mit einer Pulsdauer von 10 ms. Bei jeder angelegten Spannung wurde die Fluoreszenzintensität 50 μ s vor Ende des Spannungspulses aufgenommen und die Bilddaten in Fluoreszenzintensitätsänderungen (Abbildung) umgerechnet.



Dargestellt ist die relative Fluoreszenzintensitätsänderung in Abhängigkeit der angelegten Kommandospannung V_c . Die Messungen erfolgten an ANNINE-6-gefärbten BY-2 Protoplasten in der Whole-Cell-Konfiguration. Die rot eingezeichnete Gerade zeigt eine lineare Regression der Messwerte.

Die gemessenen Daten zeigen in einem Spannungsbereich von +300 mV bis -300 mV ein nahezu lineares Verhalten. Bei Spannungen über die genannten Werte hinaus zeigt sich ein Sättigungsverhalten. Eine lineare Regression der Messdaten ergibt folgende Abhängigkeit der relativen Fluoreszenzintensitätsänderungen von der angelegten Kommandospannung:

$$F/F_0(V_c) = 0,99 - 8,42 \cdot 10^{-4} V_c$$

F/F_0 = Relative Fluoreszenzintensitätsänderung

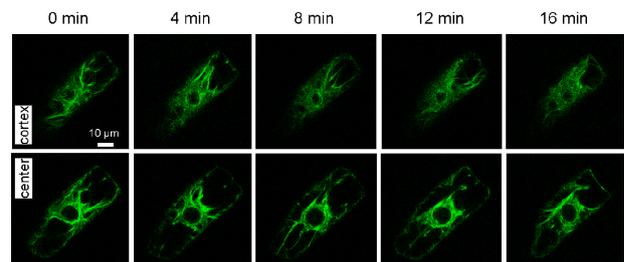
V_c = Kommandospannung (an die Membran angelegte Spannung)

Die berechnete Steigung ist hierbei ein Maß für die Spannungssensitivität des Farbstoffs ANNINE-6 unter den gegebenen Messbedingungen und liegt bei einer Fluoreszenzintensitätsänderung von 8,42 % pro 100 mV.

Weiterführende Experimente mit einer aktinstabilisierten GFP-Markerlinie (BY-2-GF-11) sollen den Einfluss des Cytoskeletts auf den beobachteten Spannungseinbruch bzw. auf die Porenbildungsprozesse zeigen.

Effekte von gepulsten elektrischen Feldern auf das Cytoskelett von Pflanzenzellen

Um den Einfluss von gepulsten elektrischen Feldern auf intrazelluläre Strukturen näher zu untersuchen, wurden transgene Markerlinien des Laborstammes *Nicotiana tabacum* L. cv BY-2, bei denen verschiedene Zellstrukturen mit Hilfe des grün fluoreszierenden Proteins (GFP) markiert wurden, elektrischen Pulsen mit einer Feldstärke von 33 kV/cm und einer Pulsdauer von 10 ns ausgesetzt. Diese Zelllinien erlaubten es, feldinduzierte Effekte auf Aktinfilamente, Mikrotubuli und das endoplasmatische Retikulum zu studieren. Mit Hilfe von konfokalmikroskopischen Aufnahmen nach Pulsapplikation konnte eine Auflösung des Cytoskeletts im Bereich des Zellkortex gefolgt von einer Kontraktion der Aktinfilamente in Richtung des Zellkerns, sowie eine Auflösung der Kernhülle beobachtet werden (nächste Abbildung). Diese Zellreaktionen werden von einer irreversiblen Permeabilisierung der Plasmamembran begleitet, welche sich durch die verstärkte Aufnahme des ansonsten nicht membrangängigen Farbstoffs Trypanblau darstellt. Durch Vorbehandlung der Zellen mit der aktinstabilisierenden Substanz Phalloidin kann das Ablösen von Aktinsträngen sowie die irreversible Permeabilisierung der Plasmamembran unterdrückt werden. Die beschriebenen Effekte werden dem Auslösen von Aktinantworten, die Schlüsselereignisse in der pflanzenspezifischen Form des programmierten Zelltods sind, zugeschrieben.



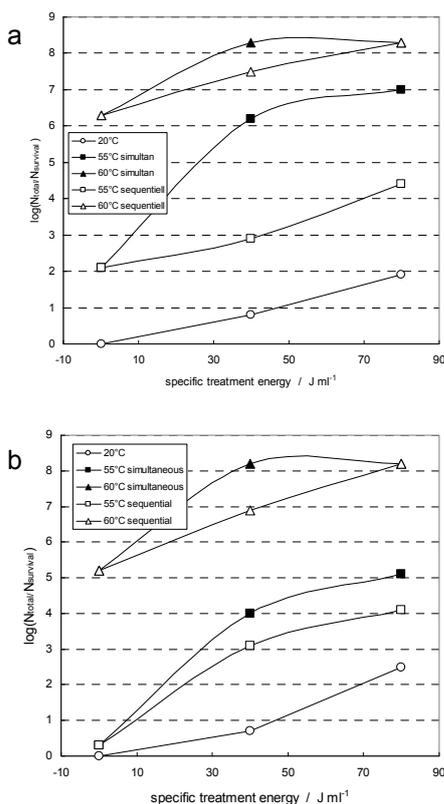
Reaktion der Aktinfilamente im kortikalen (oben) und zentralen (unten) Zellbereich in Abhängigkeit der Zeit nach Applikation eines elektrischen Pulses mit einer Feldstärke von 33 kV/cm und einer Pulsdauer von 10 ns.

Entkeimung mikrobiell hochbelasteter Abwässer mittels gepulster elektrischer Felder

Im Laufe eines 3-jährigen vom BMBF geförderten Verbundprojekts, unter Beteiligung des Karlsruhe Institut für Technologie (IHM, IFG), der Universitätsklinik Mainz und eines mittelständischen Anlagenbauers (Eisenmann AG) wurde ein Großteil der Ziele zum nachhaltigen Schutz von Wasserressourcen erreicht. Die Anwendung gepulster elektrischer Felder als alternative nachhaltige Entkeimungsmethode von Klinikabwässern, die vermehrt mit Antibiotika-resistenten und human-pathogenen Keimen belastet sind, konnte in Rahmen dieses Vorhabens bestätigt werden. Die Entkeimungsleistung der Elektroimpulsbehandlung erreicht mit einer Vorwärmung des Mediums auf 50 °C eine Keiminaktivierung von über 4 Log-Stufen. In Rahmen einer Aufstockung des BMBF-Projektes wurde mit der Untersuchung des Energieeinsparpotentials der Elektroimpulsbehandlung mit Medienerwärmung und Wärmerückgewinnung begonnen. Die Ergebnisse mit dem Gram-positiven *Enterococcus faecium* (BRE, Stamm 211, Mainz) zeigen einen deutlichen Synergieeffekt der kombinatorischen Behandlung, bestehend aus einer Erwärmung des Medium auf über 50°C und der Elek-

troimpulsbehandlung. Zur Klärung der Wirkungskinetik dieser kombinatorischen Behandlung wurden sechs pathogene Bakterien-Stämme (Patientenisolat) aus der Universitätsklinik Mainz ausgewählt. In einer ersten Versuchsreihe wurde die Wirkung einer simultanen Behandlung mit Erwärmung auf 50°C und 60°C und Elektroimpulsen auf die ausgewählten Bakterien untersucht. Für alle untersuchten Bakterienstämme konnte ein Synergieeffekt festgestellt werden. Für die kombinatorische Behandlung mit Erwärmung auf 60°C wurde ab einem elektrischen Energieeintrag von 80 J/ml die maximale Entkeimung der Suspensionen erreicht.

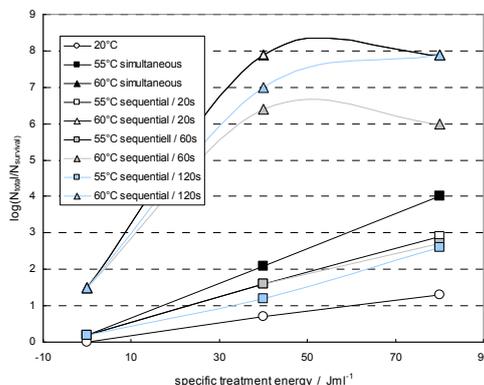
Die Leitfähigkeit des Mediums erhöht sich während der simultanen Behandlung mit steigender Temperatur, was bei Kettenleitergeneratoren eine Lastanpassung erfordert. Dies kann durch eine sequentielle Behandlung, zuerst elektrisch und anschließend thermisch, vermieden werden. Demzufolge wurde in einer zweiten Versuchsreihe die Inaktivierungseffizienz der sequentiellen Behandlung auf die ausgewählten Bakterienstämme untersucht. Bei der sequentiellen Behandlung ab einer Erwärmung auf 60°C für 120 s konnte für alle Bakterienstämme ein Synergieeffekt festgestellt werden. Unterhalb von 55°C hängt das Ausmaß der Synergie vom Bakterienstamm ab. Jedoch hat die thermische Sensitivität der Bakterien keinen Einfluss auf den Synergieeffekt, wie es am Beispiel von *Enterococcus f.* Klon 52 und *Enterococcus f.* ATCC 6057 in den folgenden Abbildungen a) und b) gezeigt werden konnte. Höhere Behandlungstemperaturen als 60°C wurden nicht in Betracht gezogen, weil dann die Nukleaseaktivität zum natürlichen Abbau freier DNA im Abwasser verloren geht.



Inaktivierungseffizienz der Elektroimpulsbehandlung von *E. faecium* Klon 19 (oben, a) bei unterschiedlichen Suspensionstemperaturen (20, 55 und 60 °C) in Abhängigkeit vom elektrischen Energieeintrag. Die vollen Symbole stehen für die simultane Behandlung. Abbildung (b) zeigt die Inaktivierungseffizienz des thermisch sensitiven *E. faecium* ATCC 6057 bei gleichem Behandlungsprotokoll. Bei der sequentiellen Behandlung mit Erwärmung auf 55 °C ist kein Synergieeffekt festzustellen.

Die Inaktivierungseffizienz konnte für alle Bakterienstämme durch die sequentielle Behandlung mit Erwärmung auf 60 °C signifikant erhöht werden (> 5 log).

Ein wichtiger Parameter für die Umsetzung der Ergebnisse in der Pilotanlage ist das Zeitintervall zwischen elektrischer und thermischer Behandlung. Für Verzögerungszeiten kürzer als 20 s blieb die Inaktivierungseffizienz unverändert, wobei längere Intervalle, über 60 s, zu einer Verschlechterung der Inaktivierung führten (siehe folgende Abbildung).



Die Inaktivierungseffizienz von *Enterococcus faecium* ATCC 6057 in Abhängigkeit von der Verzögerungszeit. Das Abwasser wurde auf 55 und 60 °C erwärmt.

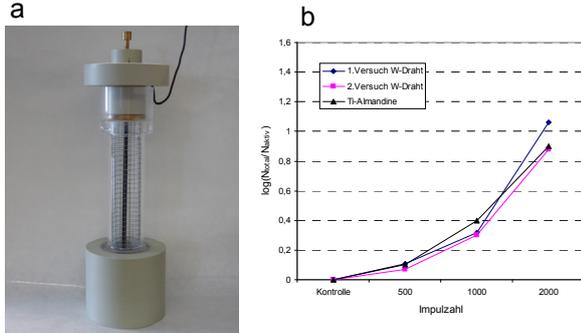
Basierend auf diesen Ergebnissen wurde mit dem Umbau der Pilotanlage begonnen, um die kombinatorische Behandlung mit Erwärmung und Elektroimpulsbehandlung zu ermöglichen. Ziel ist die Inaktivierungseffizienz der Pilotanlage auf das Niveau der Inaktivierungseffizienz die im Laborversuche erreicht wurde, anzupassen. Zusätzlich soll die Möglichkeit der Rückgewinnung der in Wärme umgewandelten elektrischen Energie mittels Wärmetauscher geprüft werden.

Gegen Ende des Jahres wurde der Kreislauf für die thermische Wärmeübertragung und Energierückgewinnung bei der Firma Eisenmann in Betrieb genommen. Die Tests zeigten, dass der Wirkungsgrad der eingebauten Wärmetauscher nicht den Anforderungen entsprach, so dass gegenwärtig mit der Herstellung neuer Wärmetauscher begonnen wurde.

Unterwasser Koronaentladung

Bei der Abwasserentkeimung mittels Unterwasser Koronaentladung wird die kombinatorische Wirkung von hohen elektrischen Feldstärken gepaart mit UV-Strahlung und der Erzeugung von Oxidationsmitteln (Ozon, OH-Radikale) genutzt. In den letzten Jahren konnte gezeigt werden, dass die Entkeimungseffizienz dieser Methode für Abwasser ausreichend ist, jedoch erwiesen sich die teure Keramikbeschichtung und die geringe Lebensdauer der Anoden 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. Anoden aus Wolfram-Draht mit einem Durchmesser zwischen 100 und 300 µm erzeugen vergleichbare Streamer-Dichten im Behandlungsvolumen wie Ti-Almandine Anoden. Um die Entkeimungseffizienz der Wolframdraht-Anoden zu untersuchen wurde ein Behandlungsreaktor aus Acrylglas (PMMA, nächste Abb. a) angefertigt, der kein Totvolumen aufweist und eine fotografische Aufnahme der Streamer-Ausbildung während der Behandlung von Abwasser ermöglicht. Damit konnte gezeigt werden, dass die Anzahl der Streamer bei der Ti-Almandine Anode nach etwa 2000 Impulsen um etwa 50% nachließ, obwohl das mit Streamern gefüllte Wasservolumen zur Beginn der Behandlung höher ist als bei Wolfram-Draht. Die Effizienz

der Entkeimung von *Enterococcus faecium* war für beide Anoden-Typen, Wolfram-Draht und Ti-Almandine vergleichbar (Abb. b). Auch im Vergleich zur Elektroimpulsbehandlung zeigt die Unterwasser-Koronaentladung eine ähnliche Entkeimungseffizienz. Nachteil dieser Entkeimungsmethode ist die Generierung von Oxidationsmitteln, die zwar die Entkeimungsleistung steigern, aber in Verbindung mit organischer Beifracht im Abwasser zu unerwünschten Reaktionsnebenprodukten führen können. Unter diesen Voraussetzungen ist eine erfolgreiche Anwendung dieser Entkeimungsmethode nur in speziellen Fällen möglich.



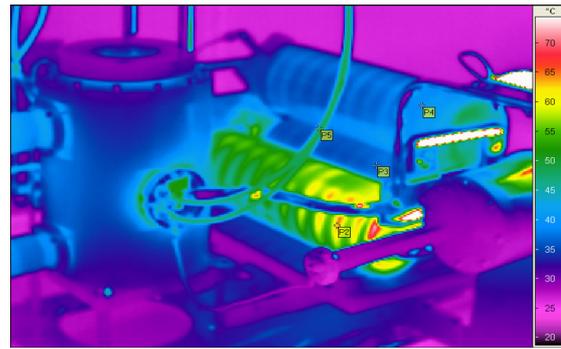
a) Behandlungsreaktor aus Acrylglas. b) Inaktivierungsrate von *E. faecium* in Abhängigkeit von Impulszahl und der Vergleich zwischen Wolfram-Draht und Ti-Almandine Anoden.

Management von Baustoffen und Bauwerken

Die seit Beginn 2003 mit dem Schweizer Industriepartner selfFrag AG laufende Kooperation auf dem Gebiet der Entwicklung elektrodynamischer Fragmentieranlagen (FRANKA-Technologie) wurde im Dezember 2009 planmäßig und erfolgreich abgeschlossen. Die selfFrag AG vertreibt inzwischen weltweit elektrodynamische Fragmentieranlagen für den Batch-Betrieb und seit Ende 2009 auch kontinuierlich arbeitende Anlagen mit Durchsätzen bis zu einer Tonne/h. Die Einsatzgebiete der Anlagen erstrecken sich von der mineralogischen Exploration bis zur Zerkleinerung von Quarz und Quarzglas, also Substanzen mit höchsten Reinheitsanforderungen.

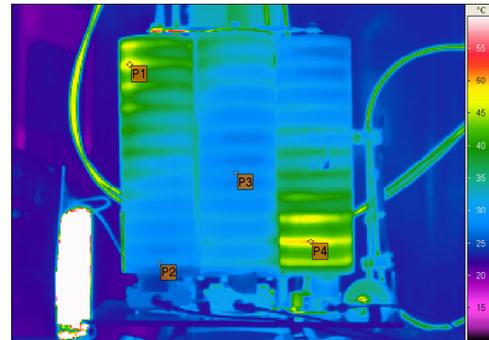
Im Fokus der im Rahmen des F&E Programms 2009 im IHM durchgeführten Arbeiten standen zwei sehr konträr ausgerichtete Themen: (i) Die energetische Optimierung von elektrodynamischen Fragmentieranlagen bei extrem kompaktem Aufbau, hoher Pulsfrequenz und hoher Energie des Einzelpulses und (ii) der durchschlagfreie Betrieb solcher Anlagen unter alleiniger Ausnutzung der an den Elektroden entstehenden extrem hohen elektrischen Felder zwecks niederenergetischer Freisetzung von Wertmineralien aus mineralischen Gefügen.

Im Verlauf der zur 1. Thematik durchgeführten Untersuchungen wurde festgestellt, dass die räumliche Orientierung der Speicherkondensatoren im MARX-Generator bezüglich der Entladestrompfade wesentlichen Einfluss auf deren Betriebserwärmung hat. Die folgende Abbildung verdeutlicht, wie bei einem ungünstig positionierten Kondensator bereits nach einstündiger Betriebszeit die Oberflächentemperatur auf Werte oberhalb der max. zulässigen Betriebstemperatur von 60°C ansteigt.



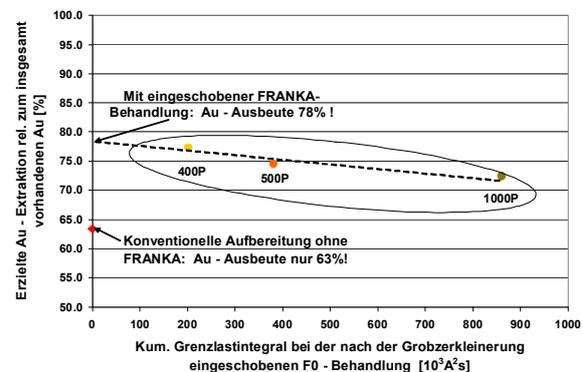
Kondensatoraufheizung @ 12Hz, 1000A²s bei ungünstiger Positionierung, T_{max} >60 °C.

Ursache hierfür sind von den elektrischen Verbindungsleitungen abgestrahlte hochfrequente Wechselfelder, die in den Kondensatorbelägen Wirbelströme hervorrufen. Wie die folgende Abbildung zeigt, kann die durch Wirbelströme bewirkte Aufheizung durch Orientierungsänderung der Kondensatoren entscheidend verringert werden. Auch bei einem derzeit angestrebten Dauerbetrieb solcher Anlagen bei 16 Hz liegt die asymptotische Oberflächentemperatur dann deutlich unter 60°C.



Kondensatoraufheizung @ 16Hz, 1000A²s bei günstiger Positionierung, T_{max} <60°C.

Zur 2. Thematik wurden Versuche durchgeführt, mit deren Hilfe geklärt werden sollte, wie der bei Einwirkung hoher elektrischer Felder beobachtete verbesserte Mineralaufschluss durch homogenere Erzeugung von Streamerkämen optimiert werden kann (nächste Abbildung).



Steigerung der Au-Ausbeute um 15%.

Die Versuche sind noch nicht abgeschlossen.

Für 2010 ist geplant, einen Teil der FRANKA-Anlagen an die selfFrag zu veräußern. An der bis auf weiteres im IHM verbleibenden Anlage FRANKA-0 sowie am selfFrag, Kondensator/Funkenstreckenprüfstand sollen auf Auftragsbasis

spezifische Untersuchungen an hochspannungstechnischen Komponenten und alternativen Marx-Generator-Konzepten durchgeführt werden.

Beteiligte Mitarbeiter:

DI F. Attmann, DP Th. Berghöfer, H. Brüsemeister, Dr. Ch. Eing, DB Bianca Flickinger, **Dr. W. Frey**, DP H. Giese (Gast), DI Martina Göttel, Dr. Chr. Gusbeth, Dr. Petra Hohenberger (Uni KA), Dr. P. Hoppé (Gast), DI (FH) F. Lang, K. Leber, E. Menesklou, **Dr. G. Müller**, K. Paulus, **Dr. M. Sack**, K.-D. Schorb, DI (FH) J. Singer, R. Stängle, DI R. Sträßner, A. Wolf, Dr. L. Wegner (Uni KA), R. Wüstner, H. Zimmermann.

Programm Rationelle Energie-Umwandlung und –Nutzung (REUN):

Industrielle Mikrowellentechnik

An den Anlagen HEPHAISTOS-CA1, -CA2 und –CA3 wurden intensiv Prozessentwicklungen mit der Industrie für verschiedenste Anwendungen und Verfahren auf Dienstleistungsbasis erschlossen. Die Anlage HEPHAISTOS-CA3 besitzt dabei eine Mikrowellenleistung von ca. 25kW und ein Volumen von etwa 7000 l und ermöglicht damit als weltgrößte 2,45 GHz-Mikrowellenprozessanlage auch Untersuchungen für die Windkraftanlagen-Industrie. Hier wurden erste Untersuchungen zusammen mit Enercon realisiert. Die industriellen HEPHAISTOS-Systeme wurden Anfang April vertreten durch die Firma Vötsch Industrietechnik, Reiskirchen, sowie Mitarbeiter des IHM auf der weltweit bedeutendsten Fachmesse für Verbundwerkstoffe, der JEC in Paris vor Ort präsentiert.

Mit dem IMF-III konnten in Anwendung der gefundenen quantenmechanischen Gesetzmäßigkeiten Vorhersagen für eine erhöhte Mikrowellenankopplung durch Nano-Materialien erfolgreich weiterentwickelt werden. Es zeigte sich, dass für magnetische Nanomaterialien nicht die hohe Sättigungsmagnetisierung für eine verbesserte Mikrowellenankopplung verantwortlich ist, sondern die quantische antennenartige Nanopartikelstruktur.

Zur Messung dielektrischer Parameter wurde ein autarkes mechatronisches System aufgebaut, das derzeit halbautomatisch eine dielektrische Messung in einem definierbaren temperaturregelbaren Bereich (derzeit bis 200°C) ermöglicht. In einem weiteren Ausbauschritt wird eine vollautomatische Messung dieser wichtigen Parameter für beliebige Materialien temperaturhochaufgelöst möglich sein.

Mit einem innovativen Mikowellenpultrator konnten erstmalig feste Endlos-Profile aus Faserverbund kontinuierlich ausgehärtet werden. Dadurch kann die Produktionsgeschwindigkeit erhöht und eine stark verbesserte Energieeffizienz realisiert werden. Der Pultratorkopf wird im Weiteren auf industrielle Parameter ausgebaut und experimentell am IHM sowie am ITV (Institut für Textiltechnik) Denkendorf getestet.

Bei dem sich in der Entwicklung befindenden MW-Injektor-Prototyp zur Harzinjektion wurde die Regelung erfolgreich angepasst. Die Feldeinkopplung wurde optimiert, so dass das Fluid eine vollkommen homogene Erwärmung erfährt.

Das TT-Vorprojekt U093 „Mikrowellen Aushärtung von SILGRANIT Spülbecken“ mit dem Industriepartner Firma Blanco wurde Ende 2009 vertragsgemäß beendet. Die vorliegenden

Ergebnisse sind äußerst vielversprechend, so dass für 2010 Vertragsgespräche zur Aufnahme eines TT-Projektes im industriellen Massstab angestrebt sind. Die Vertragsverhandlungen sind Anfang 2010 geplant.

Mit dem ITC-CPV des KIT wurden Harzsysteme erfolgreich mit nanoskaligem Kohlenstoff dispergiert. Damit war es nachweislich möglich, die Mikrowellenankopplung von Harzen deutlich zu steigern. Diese neuartigen Harzsysteme werden einen Durchbruch für die Aushärtung von industriellen Glasfaserstrukturen bedeuten.

Mit Porsche wurde eine Kleinserie von Composit-Heckklappen gefertigt (Abbildung). Dabei wurden die verschiedensten Werkzeugkonzepte entwickelt und getestet. Eine gemeinsame Entwicklung für optimierte Thermoelektrische-Folien wurde patentiert.

Zu den erfolgreichen Arbeiten der „Industriellen Mikrowellentechnik“ erschien im April 2009 das Buch „Energy Efficient Microwave Systems“ im Springer Verlag.



Composit-Heckklappe eines Porsche – Ausgehärtet in der HEPHAISTOS CA3-Mikrowellenanlage.

Beteiligte Mitarbeiter:

Dr.-Ing. J. Akhtar (bis März 2009), **Dr. L. Feher**, Jasmin Dittrich, S. Layer, V. Nuss, T. Seitz, Dr.-Ing. S. Stanculovic, Dr. Bettina Zapfe (von 1.7.2009 bis 31.12.2009), Christine Zöller.

Publikationsliste

FUSION: Programm Kernfusion

Publikationen in begutachteten Zeitschriften:

Bazylev, B., Landman, I., Loarte, A., Klimov, N.S., Podkovyrov, V.L., Safronov, V.M.
Experiments and modeling of droplet emission from tungsten under transient heat loads.
Physica Scripta, T138(2009) S.04061/1-5
DOI:10.1088/0031-8949/2009/T138/014061

Bazylev, B., Janeschitz, G., Landman, I., Pestchanyi, S., Loarte, A.
Erosion simulation of first wall beryllium armour under ITER transient heat loads.
Journal of Nuclear Materials, 386-388(2009) S.919-21
DOI:10.1016/j.jnucmat.2008.12.236

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.
Fusion Engineering and Design, 84(2009) S.441-45
DOI:10.1016/j.fusengdes.2008.12.123

Bazylev, B., Janeschitz, G., Landman, I., Loarte, A., Federici, G., Merola, M., Zhitlukhin, A., Podkovyrov, V., Klimov, N., Linke, J., Hirai, T.
Experimental validation of 3D simulations of tungsten melt erosion under ITER-like transient loads.
Journal of Nuclear Materials, 390-391(2009) S.810-13
DOI:10.1016/j.jnucmat.2009.01.214

Borie, E., Kern, S.
On the effect of RF-space charge on the beam-field interaction in gyrotrons.
Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, 30 (2009) S.915-23; DOI:10.1007/s10762-009-9520-8

Darbos, C., Henderson, M., Albajar, F., Bigelow, T., Bonicelli, T., Chavan, R., Denisov, G.G., Fasel, D., Heindinger, R., Hogge, J.P., Kobayashi, N., Piosczyk, B., Rao, S.L., Rasmussen, D., Saibene, G., Sakamoto, K., Takahashi, K., Thumm, M.
Progress in design and integration of the ITER electron cyclotron H&CD system.
Fusion Engineering and Design, 84(2009) S.651-55
DOI:10.1016/j.fusengdes.2009.02.007

Darbos, C., Magne, R., Arnold, A., Prinz, H.O., Thumm, M., Bouquey, F., Hogge, J.P., Lambert, R., Lennholm, M., Lievin, C., Traisnel, E.
The 118-GHz electron cyclotron heating system on Tore Supra.
Fusion Science and Technology, 56(2009) S.1205-18

Erckmann, V., Kasperek, W., Gantenbein, G., Hollmann, F., Jonitz, L., Noke, F., Purps, F., Weissgerber, M., W7-X ECRH Teams at IPP, FZK and IPF
ECRH for W7-X: transmission losses of high-power 140-GHz wave beams.
Fusion Science and Technology, 55(2009) S.16-22

Erckmann, V., Kasperek, W., Koshurin, Y., Lubyako, L., Petelin, M., Shchegolkov, D., Hollmann, F., Michel, G., Noke, F., Purps, F., ECRH Groups at IPP, IPF, IAP, FZK and IPF
Power combination of two 140-GHz gyrotrons and fast switching of the combined beam.
Fusion Science and Technology, 55(2009) S.23-30

Garkusha, I.E., Bandura, A.N., Byrka, O.V., Chebotarev, V.V., Landman, I., Makhraj, V.A., Pestchanyi, S., Tereshin, V.I.
Damage to preheated tungsten targets after multiple plasma impacts simulating ITER ELMS.
Journal of Nuclear Materials, 386-388(2009) S.127-31
DOI:10.1016/j.jnucmat.2008.12.083

Garkusha, I.E., Makhraj, V.A., Chebotarev, V.V., Landman, I., Tereshin, V.I., Aksenov, N.N., Bandura, A.N.
Experimental study of plasma energy transfer and material erosion under ELM-like heat loads.
Journal of Nuclear Materials, 390-391(2009) S.814-17
DOI:10.1016/j.jnucmat.2009.01.215

Garkusha, I.E., Burdakov, A.V., Ivanov, I.A., Kruglyakov, E.P., Kuklin, K.N., Landman, I.S., Makhraj, V.A., Polosatkin, S.V., Shoshin, A.A., Tereshin, V.I., Aksenov, N.N.
Plasma-surface interaction during ITER transient events: simulation with QSPA Kh-50 and GOL-3 facilities.
Problems of Atomic Science and Technology (2008) Nr. 6, S.58-60

Hawryluk, R., Campbell, D., Janeschitz, G., Thomas, P.R., Albanese, R., Ambrosino, R., Bachmann, C., Baylor, L., Becoulet, M., Benfatto, I., Bialek, J., Boozer, A., Brooks, A., Budny, R., Casper, T., Cavinato, M., Cordier, J.J., Chuyanov, V., Doyle, E., Evans, T., Ferici, G., Fenstermacher, M., Fujieda, H., G'al, K., Garofalo, A., Garzotti, L., Gates, D., Gribov, Y., Heitzenroeder, P., Hender, T.C., Holtkamp, N., Humphreys, D., Hutchinson, I., Ioki, K., Johner, J., Johnson, G., Kamada, Y., Kavin, A., Kessel, C., Khayrutdinov, R., Kramer, G., Lipschultz, B., Loarte, A., Loesser, G.D., Lowry, C., Luce, T., Lukash, V., Maruyama, S., Mattei, M., Menard, J., Merola, M., Mineev, A., Mitchell, N., Nardon, E., Nazikian, R., Nelson, B., Neumeyer, C., Park, J., Pearce, R., Pits, R., Polevoi, A., Portone, A., Okabayashi, M., Rebut, P., Riccardo, V., Roth, J., Sabbagh, S., Saibene, G., Sannazzaro, G., Schaffer, M., Shimada, M., Sen, A., Sips, A., Skinner, C.H., Snyder, P., Stambaugh, R., Strait, E., Sugihara, M., Tsitron, E., Urano, J., Valovic, M., Wade, M., Wesley, J., White, R., Whyte, D.G., Wu, S., Wykes, M., Zakharov, L.
Principal physics developments evaluated in the ITER design review.
Nuclear Fusion, 49(2009) S.065012/1-15
DOI:10.1088/0029-5515/49/6/065012

Heindinger, R., Bertizzolo, R., Bruschi, A., Chavan, R., Cirant, S., Collazos, A., deBaar, M., Elzendoorn, B., Farina, D., Fischer, U., Gafert, J., Gandini, F., Gantenbein, G., Goede, A., Goodman, T., Hailfinger, G., Henderson, M., Kasperek, W., Kleefeldt, K., Landis, J.D., Meier, A., Moro, A., Platania, P., Poli, E., Ramponi, G., Saibene, G., Sanchez, F., Sauer, O., Scherer, T., Serikov, A., Shidara, H., Sozzi, C., Spaeh, P., Strauss, D., Udintsev, V.S., Vaccaro, A., Zohm, H., Zucca, C.
Conceptual design of the ECH upper launcher system for ITER.
Fusion Engineering and Design, 84(2009) S.284-89
DOI:10.1016/j.fusengdes.2008.11.002

Hogge, J.P., Goodman, T.P., Alberti, S., Albajar, F., Avramides, K.A., Benin, P., Bethuys, S., Bin, W., Bonicelli, T., Bruschi, A., Cirant, S., Droz, E., Dumbrajs, O., Fasel, D., Gandini, F., Gantenbein, G., Illy, S., Jawa, S., Jin, J., Kern, S., Lavanchy, P., Lievin, C., Marletaz, B., Marmillod, P., Perez, A., Piosczyk, B., Pagonakis, I., Porte, L., Rzesnicki, T., Siravo, U., Thumm, M., Tran, M.Q.
First experimental results from the European Union 2-MW coaxial cavity ITER gyrotron prototype.
Fusion Science and Technology, 55(2009) S.204-12

- Jawla, S., Hogge, J.P., Alberti, S., Goodman, T., Piosczyk, B., Rzesnicki, T.
Infrared measurements of the RF output of 170-GHz/2-MW coaxial cavity gyrotron and its phase retrieval analysis.
IEEE Transactions on Plasma Science, 37(2009) S.414-24
DOI:10.1109/TPS.2008.2011488
- Jin, J., Thumm, M., Piosczyk, B., Kern, S., Flamm, J., Rzesnicki, T.
Novel numerical method for the analysis and synthesis of the fields in highly oversized waveguide mode converters.
IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 57(2009) S.1661-68
DOI:10.1109/TMTT.2009.2021878
- Kasperek, W., Petelin, M.I., Erckmann, V., Bruschi, A., Noke, F., Purps, F., Hollmann, F., Koshurin, Y., Lubyakov, L., Plaum, B., Wubie, W.
High-power microwave diplexers for advanced ECRH systems.
Fusion Engineering and Design, 84(2009) S.1002-05
DOI:10.1016/j.fusengdes.2008.11.070
- Klimov, N., Podkovyrov, V., Zhitlukhin, 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 PFCs erosion under ITER-like transient loads at plasma gun facility QSPA.
Journal of Nuclear Materials, 390-391(2009) S.721-26
DOI:10.1016/j.jnucmat.2009.01.197
- Landman, I.S., Janeschitz, G.
Modelling of radiation impact on ITER beryllium wall.
Journal of Nuclear Materials, 386-388(2009) S.915-18
DOI:10.1016/j.jnucmat.2008.12.330
- Landman, I.S., Janeschitz, G.
Modelling of SOL transport and radiation losses for ITER with the integrated tokamak code TOKES.
Journal of Nuclear Materials, 390-391(2009) S.384-87
DOI:10.1016/j.jnucmat.2009.01.086
- Leuterer, F., Münich, M., Brandl, F., Brinkschulte, H., Grünwald, G., Manini, A., Monaco, F., Ryter, F., Schütz, H., Stober, J., Wagner, D., Kasperek, W., Gantenbein, G., Empacher, L., Lechte, C., Kumric, H., Schüller, P., Litvak, A., Chirkov, A., Denisov, G., Fix, A., Illin, V., Malygin, S., Myashnikov, V., Nichiporenko, V., Popov, L., Tai, E., Zapevalov, V.
Operation experience with the ASDEX upgrade ECRH system.
Fusion Science and Technology, 55(2009) S.31-44
- Pestchanyi, S.
Divertor armour issues: lifetime, safety and influence on ITER performance.
Problems of Atomic Science and Technology, (2009) Nr. 1, S.52-57
- Pestchanyi, S., Landman, I.
Experimental verification of FOREV-2D simulations for the plasma shield.
Journal of Nuclear Materials, 390-391 (2009) S.822-25
DOI:10.1016/j.jnucmat.2009.01.217
- Prinz, O., Arnold, A., Gantenbein, G., Liu, Y.H., Thumm, M., Wagner, D.
Highly efficient quasi-optical mode converter for a multifrequency high-power gyrotron.
IEEE Transactions on Electron Devices, 56(2009) S.823-34
DOI:10.1109/TED.2009.2015819
- Safronov, V.M., Arkhipov, N.I., Landman, I.S., Pestchanyi, S.E., Toporkov, D.A., Zhitlukhin, A.M.
Evaporation and vapor shielding of CFC targets exposed to plasma heat fluxes relevant to ITER ELMS.
Journal of Nuclear Materials, 386-388(2009) S.744-46
DOI:10.1016/j.jnucmat.2008.12.207
- Safronov, V.M., Arkhipov, N.I., Klimov, N.S., Kovalenko, D.V., Landman, I.L., Moskacheva, A.A., Pestchanyi, S.E., Podkovyrov, V.L., Poznyak, I.M., Toporkov, D.A., Zhitlukhin, A.M.
Investigation of erosion mechanisms and erosion products in divertor armour materials under conditions relevant to ELMS and mitigated disruptions in ITER.
Problems of Atomic Science and Technology, (2008) Nr. 6, S.52-54
- Schmid, M., Hrabal, D., Piosczyk, B., Thumm, M.
Past and future upgrades of the gyrotron high voltage cathode power supplies at the Forschungszentrum Karlsruhe.
Fusion Engineering and Design, 84(2009) S. 1734-38
DOI:10.1016/j.fusengdes.2009.01.059
- Strauss, D., Gantenbein, G., Heidinger, R., Kleefeldt, K., Leonhardt, W., Meier, A., Mellein, D., Scherer, T., Serikov, A., Späh, P., Vaccaro, A.
FEM analyses and prototype tests of the UPP structure for the ECRH in ITER.
Fusion Engineering and Design, 84(2009) S.1799-1802
DOI:10.1016/j.fusengdes.2008.11.041
- Taube, A., Dumbser, M., Munz, C.D., Schneider, R.
A high-order discontinuous Galerkin method with time-accurate local time stepping for the Maxwell equations.
International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields, 22(2009) S.77-103
DOI:10.1002/jnm.700
- Wagner, D.H., Stober, J.K., Leuterer, F., Sips, G., Grünwald, G., Monaco, F., Münich, M.J., Poli, E., Schütz, H., Volpe, F., Treutterer, W., Zohm, H., Franke, T., Thumm, M., Heidinger, R., Gantenbein, G., Meier, A., Kasperek, W., Lechte, C., Litvak, A.G., Denisov, G.G., Chirkov, A., Tai, E., Popov, L., Nichiporenko, V., Myashnikov, V., Solyanova, E., Malygin, S.
Progress and first results with the new multifrequency ECRH system for ASDEX upgrade.
IEEE Transactions on Plasma Science, 37(2009) S.395-402
DOI:10.1109/TPS.2008.2011798

Sonstige Publikationen die in gedruckter Form vorliegen:

- Albajar, F., Bonicelli, T., Saibene, G., Alberti, S., Fasel, D., Goodman, T., Hogge, J.P., Pagonakis, I., Porte, L., Tran, M.Q., Avramides, K., Vomvouridis, J., Claesen, R., Santinelli, M., Dumbrajs, O., Gantenbein, G., Kern, S., Illy, S., Jin, J., Piosczyk, B., Rzesnicki, T., Thumm, M., Henderson, M., Cirant, S., Latsas, G., Tigelis, I.
Review of the European programme for the development of the gyrotron for ITER.
Lohr, J. [Hrsg.] Proc. of the 15th Joint Workshop on Electron Cyclotron Emission and Electron Cyclotron Resonance Heating, Yosemite National Park, Calif., March 10-13, 2008, Singapore [u.a.]: World Scientific Publ., 2009, S. 415-21

- Bazylev, B., Janeschitz, G., Landman, I., Pestchanyi, S., Loarte, A., Igitkhanov, Y., Federici, G., Merola, M., Linke, J., Hirai, T., Zhiltukhin, A., Podkovyrov, V., Klimov, N., Safronov, V., Garkusha, I., Makhlay, V.
Simulations of material damage to divertor and first wall armour under ITER transient loads by modelling and experiments.
22nd IAEA Fusion Energy Conf., Geneva, CH, October 13-18, 2008.
Proc. publ. in the web. Wien. IAEA, 2009 Paper IT/P6-10 (Proceedings Series) http://www-naweb.iaea.org/napc/physics/fec/fec2008/papers/it_p6-10.pdf
- Beringer, M.H., Illy, S., Jin, J., Kern, S., Rode, C., Thumm, M.
Further design steps towards a 4 MW 170 GHz coaxial-cavity gyrotron.
34th Int. Conf. on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2009), Busan, Korea, September 21-25, 2009
Proc. on CD-ROM
- Beringer, M.H., Illy, S., Kern, S., Rode, J.C., Thumm, M.
Recent design steps towards a 4 MW 170 GHz coaxial gyrotron for future fusion devices.
5th IAEA Technical Meeting on ECRH Physics and Technology for Large Fusion Devices, Gandhinagar, IND, February 18-20, 2009
Folien auf CD-ROM
- Beringer, M.H., Illy, S., Kern, S., Rode, J.C., Thumm, M.
Recent design steps towards a 4 MW 170 GHz coaxial-cavity gyrotron.
21st Joint Russian-German Workshop on ECRH and Gyrotrons, Greifswald, May 11-16, 2009
Folien auf CD-ROM
- Braune, H., Erckmann, V., Illy, S., Laqua, H.P., Noke, F., Purps, F., Schmid, M.
Advanced transverse field collector sweeping for high power gyrotrons.
Litvak, A.G. [Hrsg.] Strong Microwaves: Sources and Applications; Proc. of the 7th Int. Workshop, Nizhny Novgorod, July 27 – August 2, 2008, Vol. 1 S.149-53
Nizhny Novgorod : Russian Academy of Sciences, 2009
- Braune, H., Erckmann, V., Illy, S., Laqua, H.P., Michel, G., Noke, F., Purps, F., W7-X ECRH Teams at IPP and FZK
Transverse field collector sweeping for the W7-X gyrotrons. Modulation techniques.
34th Int. Conf. on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2009), Busan, Korea, September 21-25, 2009
Proc. on CD-ROM
- D'Andrea, D.
Modelling of intra- and inter-species charged particle collisions for flow simulation in pulsed plasma thrusters.
Wissenschaftliche Berichte, FZKA-7435 (Oktober 2009)
Dissertation, Universität Stuttgart 2009
- Darbos, C., Henderson, M., Albajar, F., Bigelow, T., Bonicelli, T., Chavan, R., Denisov, G., Farina, D., Gandini, F., Heidinger, R., Goodman, T., Hogge, J.P., Kajiwara, K., Kasugai, S., Kern, S., Kobayashi, N., Oda, Y., Ramponi, G., Rao, S.L., Rasmussen, D., Rzesnicki, T., Saibene, G., Sakamoto, K., Sauter, O., Scherer, T., Strauss, D., Takahashi, K., Zohm, H.
ECRH systems for ITER.
Bobkov, V. [Hrsg.] Radio Frequency Power in Plasmas: Proc. of the 18th Topical Conf., Gent, B., June 24-26, 2009
Melville, N.Y.: AIP, 2009 S.531-38 (AIP Conference Proceedings; 1187)
- Darbos, C., Henderson, M., Albajar, F., Bigelow, T., Bonicelli, T., Denisov, G.G., Heidinger, R., Hogge, J.P., Kobayashi, N., Piosczyk, B., Rao, S.L., Rasmussen, D., Ronden, D., Saibene, G., Sakamoto, K., Takahashi, K.
Status of the ITER electron cyclotron H&CD system.
5th IAEA Technical Meeting on ECRH Physics and Technology for Large Fusion Devices, Gandhinagar, IND, Feb. 18-20, 2009
Book of Abstracts S. 34, Folien auf CD-ROM
- Erckmann, V., Kasperek, W., Petelin, M., Shchegolkov, D., ECRH Groups at IPP Greifswald, FZK Karlsruhe and IPF Stuttgart
High-power test of a fast switch and combiner for millimetre wave beams.
Lohr, J. [Hrsg.] Proc. of the 15th Joint Workshop on Electron Cyclotron Emission and Electron Cyclotron Resonance Heating, Yosemite National Park, Calif., March 10-13, 2008, Singapore [u.a.]: World Scientific Publ., 2009, S. 452-57
- Erckmann, V., Kasperek, W., Petelin, M., Bruschi, A., Cirant, S., Lubyako, L., Thumm, M.
Proposal for ITER ECRH component tests at the 2 MW power level.
5th IAEA Technical Meeting on ECRH Physics and Technology for Large Fusion Devices, Gandhinagar, IND, February 18-20, 2009; Book of Abstracts S. 35
21st Joint Russian-German Workshop on ECRH and Gyrotrons, Greifswald, May 11-16, 2009
Folien auf CD-ROM
- Erckmann, V., Brand, P., Braune, H., Gantenbein, G., Kasperek, W., Laqua, H.P., Lechte, C., 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.
Litvak, A.G. [Hrsg.] Strong Microwaves: Sources and Applications, Proc. of the 7th Int. Workshop, Nizhny Novgorod, July 27 – August 2, 2008, Vol. 1 S. 60-69
Nizhny Novgorod: Russian Academy of Sciences, 2009
- 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 power performance.
Lohr, J. [Hrsg.] Proc. of the 15th Joint Workshop on Electron Cyclotron Emission and Electron Cyclotron Resonance Heating, Yosemite National Park, Calif., March 10-13, 2008, Singapore [u.a.]: World Scientific Publ., 2009, S. 427-32
- Gantenbein, G., Braune, H., Dammertz, G., Erckmann, V., Illy, S., Kern, S., Kasperek, W., Lechte, C., Legrand, F., Leonhardt, W., Lievin, C., Michel, G., Piosczyk, B., Samartsev, A., Schmid, M., Thumm, M.
Recent developments on the W7-X 140 GHz gyrotron.
21st Joint Russian-German Workshop on ECRH and Gyrotrons, Greifswald, May 11-16, 2009
Folien auf CD-ROM
- Gantenbein, G., Rzesnicki, T., Alberti, S., Goodman, T., Hogge, J.P., Illy, S., Jin, J., Kern, S., Piosczyk, B., Samartsev, A., Thumm, M.
Status of development of high power coaxial-cavity gyrotron at FZK.
5th IAEA Technical Meeting on ECRH Physics and Technology for Large Fusion Devices, Gandhinagar, IND, Feb. 18-20, 2009
Folien auf CD-ROM

- Gantenbein, G., Dammertz, G., Illy, S., Kern, S., Leonhardt, W., Piosczyk, B., Schmid, M., Thumm, M., Braune, H., Erckmann, V., Laqua, H.P., Michel, G., Kasperek, W., Lechte, C., Legrand, F., Lievin, C., Prinz, O.
The 140 GHz, 1 MW gyrotron – status and recent results.
Lohr, J. [Hrsg.] Proc. of the 15th Joint Workshop on Electron Cyclotron Emission and Electron Cyclotron Resonance Heating, Yosemite National Park, Calif., March 10-13, 2008, Singapore [u.a.]: World Scientific Publ., 2009, S. 529-34
- Garkusha, I.E., Bandura, A.N., Byrka, O.V., Chebotarev, V.V., Landman, I., Makhilaj, V.A., Pestchanyi, S., Tereshin, V.I.
Damage to preheated tungsten targets after multiple plasma impacts simulating ITER ELMs
13th Int. Conf. on Fusion Reactor Materials (ICFRM-13), Nice, F, December 10-14, 2007
- Garkusha, I.E., Makhilaj, V.A., Chebotarev, V.V., Landman, I., Tereshin, V.I., Aksenov, N.N., Bandura, A.N.
Experimental study of plasma energy transfer and material erosion under ELM-like heat loads
18th Int. Symp. on Plasma Surface Interactions (PSI-18), Toledo, E, May 26-30, 2008
- Goodman, T.P., Alberti, S., Droz, E., Fasel, D., Hogge, J.P., Jawla, S., Porte, L., Siravo, U., Tran, M.Q., 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.
Lohr, J. [Hrsg.] Proc. of the 15th Joint Workshop on Electron Cyclotron Emission and Electron Cyclotron Resonance Heating, Yosemite National Park, Calif., March 10-13, 2008, Singapore [u.a.]: World Scientific Publ., 2009, S. 515-22
- Heidinger, R., Bertizzolo, R., Bruschi, A., Chavan, R., Cirant, S., Collazos, A., deBaar, M., Elzendoorn, B., Farina, D., Fischer, U., Gafert, J., Gandini, F., Gantenbein, G., Goede, A., Goodman, T., Hailfinger, G., Henderson, M., Kasperek, W., Kleefeldt, K., Landis, J.D., Meier, A., Moro, A., Platania, P., Poli, E., Ramponi, G., Saibene, G., Sanchez, F., Sauter, O., Scherer, T., Serikov, A., Shidara, H., Sozzi, C., Spaeh, P., Strauss, D., Udintsev, V.S., Vaccaro, A., Zohm, H., Zucca, C.
Conceptual design of the ECH upper launcher system for ITER.
25th Symp. on Fusion Technology (SOFT 2008), Rostock, September 15-19, 2008
- Henderson, M., Albajar, F., Alberti, S., Baruah, U., Bigelow, T., Becket, B., Bertizzolo, R., Bonicelli, T., Bruschi, A., Caughman, J., Chavan, R., Cirant, S., Collazos, A., Darbos, C., deBaar, M., Denisov, G., Farina, D., Gandini, F., Gassman, T., Goodman, T.P., Heidinger, R., Hogge, J.P., Jean, O., Kajiwara, K., Kasperek, W., Kasugai, A., Kern, S., Kobayashi, N., Landis, J.D., Moro, A., Nazare, C., Oda, J., Paganakis, I., Platania, P., Plaum, B., Poli, E., Porte, L., Piosczyk, B., Ramponi, G., Rao, S.L., Rasmussen, D., Ronden, D., Saibene, G., Sakamoto, K., Sanchez, F., Scherer, T., Shapiro, M., Sozzi, C., Spaeh, P., Straus, D., Sauter, O., Takahashi, K., Tanga, A., Temkin, R., Thumm, M., Tran, M.Q., Zohm, H., Zucca, C.
An overview of the ITER electron cyclotron H&CD system.
34th Int. Conf. on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2009), Busan, Korea, September 21-25, 2009
Proc. on CD-ROM
- Henderson, M.A., Beckett, B., Darbos, C., Kobayashi, N., Saibene, G., Albajar, F., Bonicelli, T., Alberti, S., Chavan, D., Fasel, D., Goodman, T.P., Pagonakis, I.G., Sauter, O., Cirant, S., Farina, D., Ramponi, G., Heidinger, R., Piosczyk, B., Thumm, M., Rao, S.L., Kajiwara, K., Sakamoto, K., Takahashi, K., Denisov, G., Bigelow, T., Rasmussen, D.
A revised ITER EC system baseline design proposal.
Lohr, J. [Hrsg.] Proc. of the 15th Joint Workshop on Electron Cyclotron Emission and Electron Cyclotron Resonance Heating, Yosemite National Park, Calif., March 10-13, 2008, Singapore [u.a.]: World Scientific Publ., 2009, S.458-64
- Igitkhanov, Y., Pestchanyi, S., Landman, I.
Modelling of Boundary Plasma in TOKES
Wissenschaftliche Berichte, FZKA-7504 (Dezember 2009)
- Jain, R., Kartikeyan, M.V., Thumm, M.
Design studies of a quasi-optical launcher for a 170 GHz, 200-250 kW gyrotron.
34th Int. Conf. on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2009), Busan, Korea, September 21-25, 2009
Proc. on CD-ROM
- Jin, J., Thumm, M., Piosczyk, B., Kern, S., Flamm, J., Rzesnicki, T., Li, G.
A new method for the design of quasi-optical mode converter for high power gyrotron.
21st Joint Russian-German Workshop on ECRH and Gyrotrons, Greifswald, May 11-16, 2009;
Folien auf CD-ROM
- Jin, J., Thumm, M., Piosczyk, B., Kern, S., Flamm, J., Rzesnicki, T.
High efficient quasi-optical mode converter for coaxial ITER gyrotron.
10th Int. Vacuum Electronics Conf. (IVEC 2009), Roma, I, April 28-30, 2009
Proc. on CD-ROM, S.279-80, Piscataway, N.J.: IEEE, 2009
- Jin, J., Thumm, M., Piosczyk, B., Kern, S., Li, G., Rzesnicki, T.
Highly efficient quasi-optical mode converter for coaxial ITER gyrotron at FZK.
34th Int. Conf. on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2009), Busan, Korea, September 21-25, 2009
Proc. on CD-ROM
- Kartikeyan, M.V., Mudiganti, J.C., Borie, E., Thumm, M.
Resonator studies of a 170 GHz, 200-250 kW, long-pulse gyrotron.
34th Int. Conf. on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2009), Busan, Korea, September 21-25, 2009
Proc. on CD-ROM
- Kasperek, W., Petelin, M., Erckmann, V., Bruschi, A., Plaum, B., Koposova, L., Lubyako, L., Michel, G., Bin, W., D'Arcangelo, O., ECRH Groups at IPP, IPF, IAP, FZK and IFP
Compact diplexers for power combination and fast switching in ECRH systems: designs, experimental results, and system integration.
5th IAEA Technical Meeting on ECRH Physics and Technology for Large Fusion Devices, Gandhinagar, IND, Feb. 18-20, 2009
Book of Abstracts S.23, Folien auf CD-ROM

- Kasperek, W., Petelin, M., Erckmann, V., Bruschi, A., Plaum, Lechte, C., Wang, Y., Wagner, D., Stober, J., Kuposova, L., Koshurinov, Yu., Lubyako, L., Michel, G., ECRH Groups at IPP, IPF, IAP, FZK and IFP
Compact duplexers for power combination and fast switching in ECRH systems: designs, experimental results, and system integration.
21st Joint Russian-German Workshop on ECRH and Gyrotrons, Greifswald, May 11-16, 2009
Folien auf CD-ROM
- Kasperek, W., Petelin, M., Shchegolkov, D., Erckmann, V., Bruschi, A., Braune, H., Hollmann, F., Jonitz, L., Michel, G., Laqua, H., Noke, F., Purps, F., Schulz, T., Brand, P., Plaum, B., Wubie, W., Koshurinov, Y., Lubyako, L., Bin, W., D'Arcangelo, O., ECRH Groups at IPP, IPF, IAP, FZK and IFP
High power microwave duplexers for advanced ECRH systems.
Litvak, A.G. [Hrsg.] Strong Microwaves: Sources and Applications, Proc. of the 7th Int. Workshop, Nizhny Novgorod, July 27 – August 2, 2009, Vol. 1, S.27-39
Nizhny Novgorod : Russian Academy of Sciences, 2009
- Kern, S., Alberti, S., Beringer, M.H., Borie, E., Braune, H., Dammertz, G., Dumbrajs, O., Erckmann, V., Flamm, J., Giguet, E., Gantenbein, G., Hogge, J.P., Illy, S., Jin, J., Laqua, H.P., Legrand, F., Leonhardt, W., Lievin, C., Michel, G., Piosczyk, B., Prinz, H.O., Rzesnicki, T., Schmid, M., Thumm, M., Tran, M.Q.
Gyrotrons for fusion plasma heating – status of development at the Forschungszentrum Karlsruhe (FZK).
Jahrestagung Kerntechnik 2009, Dresden, 12.-14. Mai 2009
Berlin : INFORUM GmbH, 2009; CD-ROM Paper 801
- Kern, S., Avramides, K.A.
Improving gyrotron interaction calculations.
34th Int. Conf. on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2009), Busan, Korea, September 21-25, 2009
Proc. on CD-ROM
- Kern, S., Schlaich, A., Flamm, J., Gantenbein, G., Latsas, G., Rzesnicki, T., Samartsev, A., Thumm, M., Tigelis, I.
Investigations on parasitic oscillations in megawatt gyrotrons.
34th Int. Conf. on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2009), Busan, Korea, September 21-25, 2009
Proc. on CD-ROM
- Kern, S., Borie, E.
On the effect of RF-space on the beam-field interaction in gyrotrons.
34th Int. Conf. on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2009), Busan, Korea, September 21-25, 2009
Proc. on CD-ROM
- Kern, S., Flamm, J., Gantenbein, G., Illy, S., Jin, J., Piosczyk, B., Prinz, O., Rzesnicki, T., Thumm, M., Dumbrajs, O.
Status of experiments on the EU 2MW coaxial cavity ITER gyrotron pre-prototype at FZK.
Lohr, J. [Hrsg.] Proc. of the 15th Joint Workshop on Electron Cyclotron Emission and Electron Cyclotron Resonance Heating, Yosemite National Park, Calif., March 10-13, 2008, Singapore [u.a.]: World Scientific Publ., 2009, S. 523-28
- Landman, I.S.
Tokamak code TOKES. Models and implementation.
Wissenschaftliche Berichte, FZKA-7496 (September 2009)
- Lechte, C., Kasperek, W., Erckmann, V., Laqua, H., Michel, G., Gantenbein, G., Thumm, M.
Transmission system for ECRH on Wendelstein 7-X.
Institut für Plasmaforschung Universität Stuttgart, Annual Report 2008 S.36-37
- Michel, G., Brand, P., Braune, H., Erckmann, V., Gantenbein, G., Kasperek, W., Laqua, H.P., Marushchenko, N., Oosterbeek, J.W., Thumm, M., Weißgerber, M., ECRH Teams at IPP, IPF and FZK
Electron cyclotron resonance heating for W7-X.
Bobkov, V. [Hrsg.] Radio Frequency Power in Plasmas; Proc. of the 18th Topical Conf., Gent, B, June 24-26, 2009
Melville, N.Y.: AIP, 2009, S.559-62
(AIP Conference Proceedings; 1187)
- Neudorfer, J., Munz, C.D., Stindl, T., Fertig, M., Roller, S., Schneider, R., Auweter-Kurtz, M.
Particle in cell simulation using a discontinuous Galerkin method.
31st Int. Electric Propulsion Conf., Ann Arbor, Mich., September 20-24, 2009, Proc. on CD-ROM
- Pagonakis, I.G., Hogge, J.P., Goodman, T., Alberti, S., Piosczyk, B., Illy, S., Rzesnicki, T., Kern, S., Lievin, C.
Gun design criteria for the refurbishment of the first prototype of the EU 170GHz/2W/CW coaxial cavity gyrotron for ITER.
34th Int. Conf. on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2009), Busan, Korea, September 21-25, 2009
Proc. on CD-ROM
- Pestchanyi, S.E., Safronov, V.M., Landman, I.S., Janeschitz, G., Loarte, A., Igithkanov, 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. Proc. publ. in the web
Wien : IAEA, 2009 Paper IT/P6-11 (Proceedings Series)
http://www-naweb.iaea.org/naweb/org/naweb/physics/fec/fec2008/papers/it_p6-11.pdf
- Plaum, B., Kasperek, W., Erckmann, V., Michel, G., Zohm, H., Lubyako, L., Koshurinov, Yu., Petelin, M., Bruschi, A., Thumm, M., Bongers, W.
A fast switch for high-power microwaves.
Institut für Plasmaforschung Universität Stuttgart, Annual Report 2008 S.43-44
- Porte, L., Alberti, S., Albajar, F., Avramides, K.A., Benin, P., Bin, W., Bonicelli, T., Bruschi, A., Cirant, S., Droz, E., Dumbrajs, O., Fasel, D., Gandini, F., Goodman, T.P., Hogge, J.P., Illy, S., Jawa, S., Jin, J., Kern, S., Lievin, C., Marletaz, B., Marmillod, P., Pagonakis, I., Perez, A., Piosczyk, B., Rzesnicki, T., Siravo, U., Thumm, M., Tran, M.Q.
Testing and development of a 2MW/170GHz coaxial-cavity gyrotron for ITER in the CRPP gyrotron test stand.
5th IAEA Technical Meeting on ECR Physics and Technology for Large Fusion Devices, Gandhinagar, IND, Feb. 18-20, 2009
Book of Abstracts S.28; Folien auf CD-ROM
- Rode, J.C., Beringer, M.H., Illy, S., Kern, S., Piosczyk, B., Thumm, M.
Design study of magnetron injection guns for a 4 MW 170 GHz coaxial gyrotron.
10th Int. Vacuum Electronics Conf. (IVEC 2009), Roma, I, April 28-30, 2009
Proc. on CD-ROM S.96-97; Piscataway, N.J.: IEEE, 2009
- Rode, J.C., Beringer, M.H., Illy, S., Kern, S., Piosczyk, B., Thumm, M.
Diode and triode type magnetron injection guns for a 4 MW 170 GHz coaxial-cavity gyrotron.
21st Joint Russian-German Workshop on ECRH and Gyrotrons, Greifswald, May 11-16, 2009; Folien auf CD-ROM

- Rzesnicki, T., Piosczyk, B., Gantenbein, G., Jin, J., Kern, S., Samartsev, A., Thumm, M.
170 GHz, 2 MW coaxial cavity gyrotron for ITER. Recent results obtained with a short pulse tube.
10th Int. Vacuum Electronics Conf. (IVEC 2009), Roma, I, April 28-30, 2009
Proc. on CD-ROM S.277-78; Piscataway, N.J.: IEEE, 2009
- Rzesnicki, T., Piosczyk, B., Gantenbein, G., Illy, S., Jin, J., Kern, S., Li, G., Samartsev, A., Thumm, M.
Progress in the development of the 170 GHz, 2 MW coaxial cavity gyrotron for ITER
21st Joint Russian-German Workshop on ECRH and Gyro-trons, Greifswald, May 11-16, 2009; Folien auf CD-ROM
- Rzesnicki, T., Piosczyk, B., Gantenbein, G., Jin, J., Kern, S., Samartsev, A., Thumm, M.
Major progress in the development of the 2 MW coaxial-cavity gyrotron for ITER.
34th Int. Conf. on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2009), Busan, Korea, September 21-25, 2009
Proc. on CD-ROM
- Safronov, V.M., Arkhipov, N.I., Landman, I.S., Pestchanyi, S.E., Toporkov, D.A., Zhitlukhin, A.M.
Evaporation and vapor shielding of CFC targets exposed to plasma heat fluxes relevant to ITER ELMs.
13th Int. Conf. on Fusion Reactor Materials (ICFRM-13), Nice, F, December 10-14, 2007
- Sagara, A., Imagawa, S., Kozaki, Y., Mitarai, O., Tanaka, T., Watanabe, T., Yanagi, N., Goto, T., Tamura, H., Takahata, K., Masuzaki, S., Shoji, M., Kobayashi, M., Nishimura, K., Igami, H., Muroga, T., Nagasaka, T., Kondo, M., Nishimura, A., Chikaraishi, H., Yamada, S., Mito, T., Nakajima, N., Fukuda, S., Hashizume, H., Wu, Y., Igitkhanov, Y., Motojima, O., FFHR Design Group
Design integration of the LHD-Type energy reactor FFHR2
Development of Physics and Technology of Stellarators/Heliotrons en route to DEMO
Proc. of the 18th Int. Toki Conf., Toki City, J, December 9-12, 2008; CD-ROM S. 126-29
Toki: National Institute for Fusion Science, 2009
- Samartsev, A., Gantenbein, G., Dammertz, G., Flamm, J., Kern, S., Rzesnicki, T., Schlaich, A., Thumm, M.
Characterization of parasitic oscillations in multifrequency gyrotron.
21st Joint Russian-German Workshop on ECRH and Gyrotrons, Greifswald, May 11-16, 2009
Folien auf CD-ROM
- Schmid, M., Gantenbein, G., Thumm, M.
Operation of the FZK gyrotron high voltage supplies and plans for future upgrades.
21st Joint Russian-German Workshop on ECRH and Gyro-trons, Greifswald, May 11-16, 2009; Folien auf CD-ROM
- Stober, J., Franke, Th., Grünwald, G., Leuterer, F., Manini, A., Monaco, F., München, M., Neu, R., Schütz, H., Wagner, D., Zohm, H., Gantenbein, G., Heidinger, R., Meier, A., Thumm, M., Kasperek, W., Lechte, C., Chirkov, A.V., Denisov, G.G., Litvak, A., Malygin, S.A., Myasnikov, V.E., Nichiporenko, V.O., Popov, L.G., Solyanova, E.A., Tai, E.M., Meo, F., Woskov, P.
On the way to a multi-frequency ECRH system for ASDEX upgrade.
Lohr, J. [Hrsg.] Proc. of the 15th Joint Workshop on Electron Cyclotron Emission and Electron Cyclotron Resonance Heating, Yosemite National Park, Calif., March 10-13, 2008, Singapore [u.a.]: World Scientific Publ., 2009, S. 5433-39
- Strauss, D., Gantenbein, G., Heidinger, R., Kleefeldt, K., Leonhardt, W., Meier, A., Mellein, D., Scherer, T., Serikov, A., Späh, P., Vaccaro, A.
FEM analyses and prototype tests of the UPP structure for the ECRH in ITER.
25th Symp. on Fusion Technology (SOFT 2008), Rostock, September 15-19, 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.
Litvak, A.G. [Hrsg.]: Strong Microwaves: Sources and Applications, Proc. of the 7th Int. Workshop, Nizhny Novgorod, July 27 – August 2, 2008, Vol. 1 S.84-94
Nizhny Novgorod : Russian Academy of Sciences, 2009
- Thumm, M., Brand, P., Braune, H., Dammertz, G., Erckmann, V., Gantenbein, G., Illy, S., Kasperek, W., Kern, S., Laqua, H.P., Lechte, C., Marushchenko, N.B., Michel, G., Samartsev, A., Schlaich, A., Schmid, M., Turkin, Y., Weissgerber, M., W7-X ECH Teams at KIT, IPP and IPF
10 MW, 0.14 THz, CW gyrotron and optical transmission system for fusion plasma heating.
Int. Symp. on Frontier of Terahertz Spectroscopy III: Next Generation Technology in THz Frequency Region and its Application to THz Sensitive Spectroscopy and Sensing, Fukui, J, October 22-23, 2009; Proc. S. 17-22
- Thumm, M.
High power microwaves for fusion plasma heating.
Feher, L. [Hrsg.] Proc. of the 12th Int. Conf. on Microwave and High Frequency Heating (AMPERE 2009), Karlsruhe, September 7-10, 2009; CD-ROM S.9-12
Karlsruhe : Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, 2009
- Thumm, M.
Progress on gyrotrons for ITER and future fusion reactors.
Bobkov, V. [Hrsg.] Radio Frequency Power in Plasmas : Proc. of the 18th Topical Conf., Gent, B, June 24-26, 2009
Melville, N.Y.: AIP, 2009, S.21-28
(AIP Conference Proceedings; 1187)
- Thumm, M.
State-of-the-art of high power gyro-devices and free electron masers. Update 2008.
Wissenschaftliche Berichte, FZKA-7467 (April 2009)
- Vaccaro, A., Heidinger, R., Leonhardt, W., Meier, A., Mellein, D., Scherer, T., Serikov, A., Späh, P., Strauß, D.
Fluid dynamics and thermal analysis for the ITER ECH upper launcher.
5th IAEA Techn: Meeting on ECRH Physics and Technology for Large Fusion Devices, Gandhinagar, IND, Feb. 18-20, 2009, Book of Abstracts S.20; Folien auf CD-ROM
- Wagner, D., Stober, J., Leuterer, F., Sips, G., Grünwald, G., Monaco, F., München, M., Poli, E., Schütz, H., Volpe, F., Treutterer, W., 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.
Multi-frequency ECRH at ASDEX upgrade.
Litvak, A.G. [Hrsg.] Strong Microwaves: Sources and Applications; Proc. of the 7th Int. Workshop, Nizhny Novgorod, July 27 – August 2, 2008, Vol. 2 S.304-11
Nizhny Novgoro : Russian Academy of Sciences, 2009

Wagner, D., Stober, J., Franke, T., Leuterer, F., Poli, E., Monaco, F., München, M., Schütz, H., Zohm, H., Thumm, M., Scherer, T., Meier, A., Gantenbein, G., Flamm, J., Kasperek, W., Lechte, C., Höhnle, H., Litvak, A.G., Denisov, G.G., Cirkov, A., Popov, L.G., Nichiporenko, V.O., Myasnikov, V.E., Tai, E.M., Solyanova, E.A., Malygin, S.A.
Multi-frequency ECRH system at ASDEX upgrade.
34th Int. Conf. on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2009), Busan, Korea, September 21-25, 2009
Proc. on CD-ROM

Vorträge, die nicht in gedruckter Form vorliegen:

Bazylev, B., Landman, I.S., Loarte, A., Klimov, N.S., Podkovyrov, V.L., Safronov, V.M.
Droplet emission from tungsten melt layer under transients.
Experiments and modeling.
12th Int. Workshop on Plasma-Facing Materials and Components for Fusion Applications, Jülich, May 11-14, 2009
Book of Abstracts S. 93

Bazylev, B., Igitkhanov, Yu., Landman, I., Pestchanyi, S., Loarte, A.
Erosion simulation of first wall beryllium armour after ITER transient heat loads and runaway electrons action.
14th Int. Conf. on Fusion Reactor Materials (ICFRM-14), Sapporo, J, September 7-12, 2009

Beringer, M.H., Illy, S., Kern, S., Rode, J.C., Thumm, M.
High power gyrotrons for fusion plasma heating.
KIT PhD Symp., Karlsruhe, 18. März 2009

D'Andrea, D., Maschek, W., Schneider R.
Charged particle collisions for particle simulation methods.
Int. Topical Meeting on Nuclear Research Applications and Utilization of Accelerators, Wien, A, May 4-8, 2009

Gantenbein, G., Dammertz, G., Erckmann, V., Illy, S., Kern, S., Rzesnicki, T., Kasperek, W., Piosczyk, B., Samartsev, A., Schlaich, A., Thumm, M.
Recent investigations on stable operation of high-power gyrotrons.
US-EU-JPN RF Heating Technology Workshop, Dazaifu-City, Fukuoka, J, September 16-18, 2009, Book of Abstracts S.11

Garkusha, I.E., Arkhipov, N.I., Klimov, N.S., Makhilai, V.A., Safronov, V.M., Landman, I., Tereshin, V.I.
Latest results from ELM-simulation experiments in plasma accelerators.
12th Int. Workshop on Plasma-Facing Materials and Components for Fusion Applications, Jülich, May 11-14, 2009
Book of Abstracts S.21

Henderson, M., Albajar, F., Alberti, S., Baruah, U., Bigelow, T., Becket, B., Bertizzolo, R., Bonicelli, T., Bruschi, A., Caughman, J., Chavan, R., Cirant, S., Collazos, A., Darbos, C., deBaar, M., Denisov, G., Farina, D., Gandini, F., Gassman, T., Goodman, T.P., Heidinger, R., Hogge, J.P., Jean, O., Kajiwara, K., Kasperek, W., Kasugai, A., Kern, S., Kobayashi, N., Landis, J.D., Moro, A., Nazare, C., Oda, J., Paganakis, I., Platania, P., Plaum, B., Poli, E., Porte, L., Piosczyk, B., Ramponi, G., Rao, S.L., Rasmussen, D., Ronden, D., Saibene, G., Sakamoto, K., Sanchez, F., Scherer, T., Shapiro, M., Sozzi, C., Spaeh, P., Straus, D., Sauter, O., Takahashi, K., Tanga, A., Temkin, R., Thumm, M., Tran, M.Q., Zohm, H., Zucca, C.
Recent progress in the ITER EC H&CD system.
US-EU-JPN RF Heating Technology Workshop, Dazaifu-City, Fukuoka, J., September 16-18, 2009
Book of Abstracts S.5

Jin, J., Thumm, M., Piosczyk, B., Kern, S., Rzesnicki, T., Flamm, J.
A new method for the design of quasi-optical launchers for high power gyrotrons.
36th Int. Conf. on Plasma Science (ICOPS) and 23rd Symp. on Fusion Engineering (SOFE-23), San Diego, CA, May 31 – June 5, 2009

Kern, S.
Gyrotrons.
3rd Int. Summer School on Fusion Technologies, Karlsruhe, August 31 – September 11, 2009

Landman, I.S., Pestchanyi, S.E., Igitkhanov, Y., Pitts, R.
Modelling of wall and SOL processes and contamination of ITER plasma after impurity injection with the Tokamak code TOKES.
9th Int. Symp. on Fusion Nuclear Technology (ISFNT-9), Dalian, China, October 11-16, 2009

Li, G., Jin, J., Kern, S., Thumm, M.
Frequency and mode characteristics of an oversized quasi-optical launcher towards a step tunable coaxial-cavity gyrotron.
KIT PhD Symp., Karlsruhe, 18. März 2009

Makhilai, V.A., Garkusha, I.E., Malykhin, S.V., Pugachov, A.T., Landman, I., Linke, J., Pestchanyi, S., Chebotarev, V.V., Tereshin, V.I.
Residual stresses in tungsten under exposures with ITER ELM-like plasma loads.
12th Int. Workshop on Plasma-Facing Materials and Components for Fusion Applications, Jülich, May 11-14, 2009
Book of Abstracts S.92

Pestchanyi, S., Landman, I.
Simulation of tungsten armour cracking due to small ELMs in ITER.
9th Int. Symp. on Fusion Nuclear Technology (ISFNT-9), Dalian, China, October 11-16, 2009

Rzesnicki, T., Piosczyk, B., Gantenbein, G., Jin, J., Kern, S., Samartsev, A., Thumm, M.
Towards the 2 MW RF output power of the coaxial cavity gyrotron pre-prototype for ITER.
36th Int. Conf. on Plasma Science (ICOPS) and 23rd Symp. on Fusion Engineering (SOFE-23), San Diego, CA, May 31 – June 5, 2009

Sagara, A., Igitkhanov, Y., Najmabadi, F.
Review of stellarator design issues towards MFE DEMO.
9th Int. Symp. on Fusion Nuclear Technology (ISFNT-9), Dalian, China, October 11-16, 2009

Strauss, D., Gantenbein, G., Heidinger, R., Kleefeldt, K., Leonhardt, W., Meier, A., Mellein, D., Scherer, T., Serikov, A., Späh, P., Vaccaro, A.
Design validation of the structural components in the ITER ECH upper launcher.
36th Int. Conf. on Plasma Science (ICOPS) and 23rd Symp. on Fusion Engineering (SOFE-23), San Diego, CA, May 31 – June 5, 2009

Thumm, M., Rzesnicki, T., Piosczyk, B., Flamm, J., Gantenbein, G., Illy, S., Jin, J., Kern, S., Samartsev, A., Schlaich, A.
2.2 MW record power of the 0.17 THz European pre-prototype coaxial-cavity gyrotron for ITER.
2nd Shenzhen Int. Conf. on Advanced Science and Technology – Terahertz Science and Technology and Application, Shenzhen, China, November 15-20, 2009
Book of Abstracts S. 15

Thumm, M., Rzesnicki, T., Piosczyk, B., Flamm, J., Gantenbein, G., Illy, S., Jin, J., Kern, S., Samartsev, A., Schlaich, A.
2 MW, 170 GHz pre-prototype coaxial-cavity gyrotron for ITER.
US-EU-JPN RF Heating Technology Workshop, Dazaifu-City,
Fukuoka, J, September 16-18, 2009
Book of Abstracts S. 10

Wagner, D., Thumm, M., Gantenbein, G., Flamm, J., Neilson, J., Vernon, R.
Multi-mode generator for the cold test of broadband quasi-optical gyrotron mode converters.
US-EU-JP RF Heating Technology Workshop, Dazaifu-City,
Fukuoka, J, September 16-18, 2009
Book of Abstracts S.22

Wagner, D., Stober, J., Bäuml, S., Franke, T., Leuterer, F., Monaco, F., München, M., Schmid-Lorch, D., Schütz, H., Zohm, H., Thumm, M., Scherer, T., Meier, A., Gantenbein, G., Flamm, J., Kasperek, W., Höhnle, H., Lechte, C., Litvak, A.G., Denisov, G.G., Cirkov, A., Tai, E.M., Popov, L.G., Nichiporenko, V.O., Myasnikov, V.E., Solyanova, E.A., Malygin, S.A.
Recent upgrades and extensions of the new multi-frequency ECRH system at ASDEX upgrade.
US-EU-JPN RF Heating Technology Workshop, Dazaifu-City,
Fukuoka, J, September 16-18, 2009
Book of Abstracts S.14

NANOMIKRO: Programm Nano- und Mikrosysteme

Publikationen in begutachteten Zeitschriften:

Arzhannikov, A.V., Cross, A.W., Ginzburg, N.S., He, W., Kalinin, P.V., Konoplev, I.V., Kuznetsov, S.A., Peskov, N.Y., Phelps, A.D.R., Robertson, C.W., Ronald, K., Sergeev, A.S., Sinitsky, S.L., Stepanov, V.D., Thumm, M., Whyte, C.G., Zaslavsky, V.Y.

Production of powerful spatially coherent radiation in planar and coaxial FEM exploiting two-dimensional distributed feedback.
IEEE Trans. on Plasma Science, 37(2009) S.1792-1800
DOI:10.1109/TPS.2009.2027326

Baryshev, V.R., Ginzburg, N.S., Zaslavski, V.Yu., Malkin, A.M., Sergeev, A.S., Thumm, M.

Mode selection in two-dimensional Bragg resonators based on planar dielectric waveguides.
Quantum Electronics, 39(2009) S.463-68
DOI:10.1070/QE2009v039n05ABEH013932

Ginzburg, N.S., Peskov, N.Yu., Sergeev, A.S., Zaslavsky, V.Yu., Konoplev, I.V., Fisher, L., Ronald, K., Phelps, A.D.R., Cross, A.W., Thumm, M.

Mechanism of azimuthal mode selection in two-dimensional coaxial Bragg resonators.
Journal of Applied Physics, 105(2009) S.124519/1-10
DOI:10.1063/1.3143019

Zitnan, M., Szöcs, V., Janek, M., Bugar, I., Bdzoch, J., Palszegi, T., Link, G., Velic, D.

Fluorescence dynamics of coumarin C522 on reduced-charge montmorillonite in Aqueous dispersion.
Langmuir, 25(2009) S.6800-07
DOI:10.1021/la9006795

Sonstige Publikationen die in gedruckter Form vorliegen:

Alberti, S., Ansermet, J.P., Avramides, K., Fasel, D., Hogge, J.P., Kern, S., Lievin, C., Liu, Y., Macor, A., Pagonakis, I., Silva, M., Tran, M.Q., Tran, T.M., Wagner, D.

Design of a frequency-tunable gyrotron for DNP-enhanced NMR spectroscopy.
34th Int. Conf. on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2009), Busan, Korea, September 21-25, 2009
Proc. on CD-ROM

Ginzburg, N.S., Peskov, N.Yu., Sergeev, A.S., Zaslavsky, V.Yu., Arzhannikov, A.V., Kalinin, P.V., Sinitsky, S.L., Stepanov, V.D., Kuznetsov, S.A., Cross, A.W., He, W., Konoplev, I.V., Phelps, A.D.R., Robertson, C.W., Ronald, K., Whyte, C.G., Thumm, M.

Generation of powerful coherent radiation in FEM exploiting two-dimensional distribution feedback.
Litvak, A.G. [Hrsg.]: Strong Microwaves: Sources and Applications, Proc. of the 7th Int. Workshop, Nizhny Novgorod, July 27 – August 2, 2008, Vol. 1 S.154-61
Nizhny Novgorod : Russian Academy of Sciences, 2009

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 in free electron lasers based on two-dimensional distributed feedback.
31st Free Electron Laser Conf. (FEL09), Liverpool, GB, August 23-28, 2009
Proc. publ. in the web

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; Proc. on CD-ROM S.95-98
European Microwave Association, 2008
Also publ. online (IEEE Xplore)

Kühn, J., van Raay, F., Quay, R., Kiefer, R., Peschel, D., Mikulla, M., Seelmann-Eggebert, M., Bronner, W., Schlechtweg, M., Ambacher, O., Thumm, M.
Design of X-band GaN MMICs using field plates.
European Microwave week (EuMW 2009), Roma, I, September 28 – October 2, 2009
Proc. on CD-ROM S.33-36

Link, G., Heissler, St., Faubel, W., Weidler, P.G., Thumm, M.
IR spectroscopy diagnostics for microwave processing.
Litvak, A.G. [Hrsg.]: Strong Microwaves: Sources and Applications, Proc. of the 7th Int. Workshop, Nizhny Novgorod, July 27 – August 2, 2008, Vol. 2 S.499-503
Nizhny Novgorod : Russian Academy of Sciences, 2009

Link, G., Faubel, W., Heissler, St., Weidler, P.G., Thumm, M.
Verification of selective microwave heating by use of Raman spectroscopy.
Feher, L. [Hrsg.] Proc. of the 12th Int. Conf. on Microwave and High Frequency Heating (AMPERE 2009), Karlsruhe, September 7-10, 2009; CD-ROM S.238-41
Karlsruhe : Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, 2009

Mudiganti, J.C., Kartikeyan, M.V., Thumm, M.
Design of magnetron injection guns – a 3D simulation approach.
34th Int. Conf. on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2009), Busan, Korea, September 21-25, 2009
Proc. on CD-ROM

Schlabach, S., Szabo, D.V., Feher, L.
Microwave plasma synthesized nanoparticles.
Feher, L. [Hrsg.] Proc. of the 12th Int. Conf. on Microwave and High Frequency Heating (AMPERE 2009), Karlsruhe, September 7-10, 2009; CD-ROM S.144-47
Karlsruhe : Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, 2009

Takayama, S., Link, G., Louzguine, D., Sano, S., Sato, M., Thumm, M.
Analysis of iron core heated by millimeter-waves.
Feher, L. [Hrsg.] Proc. of the 12th Int. Conf. on Microwave and High Frequency Heating (AMPERE 2009), Karlsruhe, September 7-10, 2009; CD-ROM S.48-51
Karlsruhe : Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, 2009

Thumm, M.
History, present status and future of gyrotrons.
10th Int. Vacuum Electronics Conf. (IVEC 2009), Roma, I, April 28-30, 2009
Proc. on CD-ROM S.37-40
Piscataway, N.J. : IEEE, 2009

Vorträge, die nicht in gedruckter Form vorliegen:

Kühn, J., van Raay, F., Quay, R., Kiefer, R., Maier, T., Stibal, R., Mikulla, M., Seelmann-Eggebert, M., Bronner, W., Schlechtweg, M., Ambacher, O., Thumm, M.
Design of highly-efficient GaN X-band-power-amplifier MMICs.
Int. Microwave Symposium, Boston, Mass., June 7-12, 2009

Thumm, M.
History, present state-of-the-art and future of gyrotrons.
IPP Kolloquium, Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP), Greifswald, 19. Juni 2009

NUKLEAR: Programm Nukleare Sicherheitsforschung

Publikationen in begutachteten Zeitschriften:

An, W., Engelko, V., Müller, G., Weisenburger, A.
Optical investigation of plasma formation process by interaction of intense electron beams with metallic targets.
Acta Physica Polonica A, 115(2009) S.1183-85

Engelko, V.I., Kuznetsov, V.S., Müller, G.
Electron source of triode type with radial converging electron flow for irradiation of cylindrical targets.
Journal of Applied Physics, 105(2009) S.023305/1-7
DOI:10.1063/1.2996286

Heinzel, A., Müller G., Weisenburger, A.
Compatibility of Ti₃SiC₂ with liquid Pb and PbBi containing oxygen.
Journal of Nuclear Materials, 392(2009) S.255-58
DOI:10.1016/j.nucmat.2009.03.004

Jianu, A., Müller, G., Weisenburger, A., Heinzel, A., Fazio, C., Markov, V.G., Kashtanov, A.D.
Creep-to-rupture tests of T91 steel in flowing Pb-Bi eutectic melt at 550 °C.
Journal of Nuclear Materials, 394(2009) S.102-08
DOI:10.1016/j.jnucmat.2009.08.013

Kessler, G.
Steady state and transient temperature profiles in a multishell spherical system heated internally by reactor-grade plutonium.
Nuclear Engineering and Design, 239(2009) S.2430-43
DOI:10.1016/j.nucengdes.2009.07.018

Kieser, M., Muscher, H., Weisenburger, A., Heinzel, A., Müller, G.
Liquid metal corrosion/erosion investigations of structure materials in lead cooled systems: Part 1.
Journal of Nuclear Materials, 392(2009) S.405-12
DOI:10.1016/j.jnucmat.2008.12.327

Takayama, S., Furukawa, T., Aoto, K., Müller, G., Weisenburger, A., Heinzel, A., Inoue, M., Okuda, T., Abe, F., Ohnuki, S., Fujisawa, T., Kimura, A.
Corrosion behavior of Al-alloying high Cr-ODS steels in lead-bismuth eutectic.
Journal of Nuclear Materials, 386-388(2009) S.507-10
DOI:10.1016/j.jnucmat.2008.12.155

Weisenburger, A., An, W., Engelko, V., Heinzel, A., Jianu, A., Lang, F., Müller, G., Zimmermann, F.
Intense pulsed electron beams application of modified materials.
Acta Physica Polonica A, 115(2009) S.1053-55

Sonstige Publikationen die in gedruckter Form vorliegen:

Jianu, A., Müller, G., Weisenburger, A., An, W., Heinzel, A., Zimmermann, F., Lang, F.
Surface modification of alloys exposed to extreme environment.
Euromat 2009 : European Congress and Exhibition on Advanced Materials and Processes, Glasgow, GB, September 7-10, 2009

Muscher, H., Kieser, M., Weisenburger, A., Müller, G.
3D-Strömungssimulationen von flüssigem Blei im Erosionsprüfstand für ADS-Werkstoffe.
Jahrestagung Kerntechnik 2009, Dresden, 12.-14. Mai 2009
Berlin : INFORUM GmbH, 2009; CD-ROM Paper 1204

Vorträge, die nicht in gedruckter Form vorliegen:

An, W., Müller, G., Weisenburger, A.
Determination of emission behaviour of carbon fibre cathodes.
17th Int. Pulsed Power conf., Washington, D.C., June 28 – July 2, 2009; Book of Abstracts S.211

Jianu, A.
Overview on German expertise on liquid metal coolants.
Current status on R&D.
IAEA Consultancy Meeting, Wien, A, June 10-13, 2009

Kessler, G.
Nonproliferation resistance and different plutonium compositions. Combining deterministic analysis with the multi-attribute utility approach.
Int. Workshop on Nonproliferation embedded at the 11th Int. Conf. on Nuclear Safety and Nuclear Education, Obninsk, Russia, September 30 – October 2, 2009

Kessler, G.
The future development of fission reactors and their fuel cycles.
Workshop on Applied Antineutrino-Physics, Angra dos Reis, BR, March 19-20, 2009

Müller, G., Weisenburger, A., Heinzel, A., Jianu, A., Muscher, H., Kieser, M.
Corrosion, corrosion barrier development and mechanical properties of steels foreseen as structural materials in liquid lead alloy cooled nuclear systems.
17th Int. Conf. on Nuclear Engineering (ICONE-17), Bruxelles, B, July 12-16, 2009

Müller G.
Heavy liquid metal technology: corrosion under high temperature conditions.
2009 Frederic Joliot/Otto Hahn Summer School, Karlsruhe, August 26 – September 4, 2009

Müller, G., Weisenburger, A., Heinzel, A., Konys, J., Schroer, C., Wedemeyer, O.
Oxygen control in large scale loop systems – problems and solutions.
17th Int. Conf. on Nuclear Engineering (ICONE-17), Bruxelles, B, July 12-16, 2009

Muscher, H., Kieser, M., Weisenburger, A., Müller, G.
Liquid lead flows in a cylindrical rotating facility-3D-CFD studies for nuclear ADS applications.
Simulation komplexer Strömungen: 6th NAFEMS Anniversary CFD Seminar, Wiesbaden, 18.-19. März 2009

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 (2007.10.31)
EP-PS 1 849 164 (2008.07.09)
CN-OS 101 138 051 (2008.03.05)
UA-PS 88630 (2009.08.05)

Engelko, V., Heinzel, A., Müller, G., Schumacher, G., Weisenburger, A., Zimmermann, F.
Verfahren zum Aufbringen einer hochtemperaturgeeigneten FeCrAl-Schutzschicht, Hüllrohr mit einer derartig aufgebracht Schutzschicht und Verwendung eines solchen Hüllrohrs.
DE-OS 10 2005 030 231 (2007.01.11)
DE-PS 10 2005 030 231 (2007.05.31)
EP-OS 1 896 627 (2008.03.12)
EP-PS 1 896 627 (2009.20.28)
US-OS 2009/0035604 (2009.02.05)

EE: Programm Erneuerbare Energien

Publikationen in begutachteten Zeitschriften:

Berghöfer, T., Flickinger, B., Hohenberger, P., Wegner, L.H., Frey, W., Nick, P.

Nanosecond electric pulses trigger actin responses in plant cells.

Biochemical and Biophysical Research Communications, 387(2009) S.590-95

Eing, C., Bonnet, S., Pacher, M., Puchta, H., Frey, W.

Effects of nanosecond pulsed electric field exposure on arabidopsis thaliana.

IEEE Transactions on Dielectrics and Electric Insulation, 16(2009) S.1322-28

DOI:10.1109/TDEI.2009.5293945

Frey, W., Sack, M., Wüstner, R., Müller, G.

Gas-insulated selfbreakdown spark gaps – some aspects on low-scattering and long-lifetime switching.

Acta Physica Polonica A, 115(2009) S.1016-18

Gusbeth, C., Frey, W., Schwartz, T., Rieder, A.

Critical comparison between the pulsed electric field and thermal decontamination methods of hospital wastewater.

Acta Physica Polonica A, 115(2009) S. 1092-94

Gusbeth, C., Frey, W., Volkmann, H., Schwartz, T., Bluhm, H.

Pulsed electric field treatment for bacteria reduction and its impact on hospital wastewater.

Chemosphere, 75(2009) S.228-33

DOI:10.1016/j.chemosphere.2008.11.066

Kaufmann, I., Schulze-Till, T., Schneider, U., Zimmermann, U., Jakob, P., Wegner, L.H.

Functional repair of embolized vessels in maize roots after temporal drought stress, as demonstrated by magnetic resonance imaging.

New Phytologist, 184(2009) S.245-56

DOI:10.1111/j.1469-8137.2009.02919.x

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

Electric measurement of the electroporation efficiency of mash from wine grapes.

IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 16(2009) S.1329-37

DOI:10.1109/TDEI.2009.5293946

Sack, M., Attmann, F., Stängle, R., Wolf, A., Frey, W., Müller, G.

Upgrade of the electroporation device KEA-MOBIL.

Acta Physica Polonica A, 115(2009) S. 1081-83

Schulze-Till, T., Kaufmann, I., Sattelmacher, B., Jakob, P.,

Haase, A., Guo, S., Zimmermann, U., Wegner, L.H.

A ¹H NMR study of water flow in Phaseolus vulgaris. L. roots treated with nitrate of ammonium.

Plant and Soil, 319(2009) S.307-21

DOI:10.1007/s11104-008-9871-2

Shabala, S., Pang, J., Zhou, M., Shabala, L., Cuin, T.A., Nick, P., Wegner, L.H.

Electrical signalling and cytokinins mediate effects of light and root cutting on ion uptake in intact plants.

Plant, Cell and Environment, 32(2009) S.194-207

Wegner, L.H., Zimmermann, U.

Hydraulic conductance and K⁺ transport into the xylem depend on radial volume flow, rather than on xylem pressure, in roots of intact, transpiring maize seedlings.

New Phytologist, 181(2009) S.361-73

Westhoff, M., Reuss, R., Zimmermann, D., Netzer, Y., Gessner, A., Geßner, P., Zimmermann, G., Wegner, L.H., Bamberg, E., Schwartz, A., Zimmermann, U.

A non-invasive probe for online-monitoring of turgor pressure changes under field conditions.

Plant Biology, 11(2009) S.701-12

DOI:10.1111/j.1438-8677.2008.00170.x

Westhoff, M., Zimmermann, D., Zimmermann, G., Gessner, P., Wegner, L.h., Bentrup, F.W., Zimmermann, U.

Distribution and function of epistomatal mucilage plugs.

Protoplasma, 235(2009) S.101-05

DOI:10.1007/s00709-008-0029-0

Sonstige Publikationen die in gedruckter Form vorliegen:

Thumm, M. [Hrsg.]

Jahresbericht 2008 Institut für Hochleistungsimpuls- und Mikrowellentechnik.

Wissenschaftliche Berichte, FZKA-7474 (April 2009)

Vorträge, die nicht in gedruckter Form vorliegen:

Berghöfer, T., Eing, C., Flickinger, B., Schneider, S., Frey, W.

Pulsed laser fluorescence microscopy as a tool for transmembrane-potential recordings of mammalian cells.

BioEM 2009: Joint Meeting of the Bioelectromagnetics Society (BEMS) and the European BioElectromagnetics Association (EBEA), Davos, CH, June 14-19, 2009

Flickinger, B., Berghöfer, T., Eing, C., Frey, W.

Transmembrane potential measurements on plant cells using the voltage-sensitive fluorescence dye ANNINE-6.

BioEM 2009: Joint Meeting of the Bioelectromagnetics Society (BEMS) and the European BioElectromagnetics Association (EBEA), Davos, CH, June 14-19, 2009

Frey, W., Berghöfer, T., Flickinger, B.

Detection of the onset of pore formation by nanosecond-time-resolution pulsed laser fluorescence microscopy measurements on plant cell protoplasts.

17th Int. Pulsed Power Conf., Washington, D.C., June 28 – July 2, 2009; Book of Abstracts S.293

Frey, W.

Konditionierung von Biomasse mit gepulsten elektrischen Feldern.

Kolloquium Sustainable BioEconomy, Karlsruhe,

8.-9. Dezember 2009

Frey, W., Sack, M., Gusbeth, C., Eing, C., Berghöfer, T., Flickinger, B.

Untersuchungen zur Wechselwirkung gepulster elektrischer Felder mit biologischen Zellen.

Frühjahrstagung DPG der Fachverbände Plasmaphysik, Kurzzeitphysik und Extraterrestrische Physik, Greifswald, 30. März – 2. April 2009

Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, R.6, B.44(2009) SYMB 1.6

Gusbeth, C.A., Frey, W., Müller, G., Schwartz, T.

Decontamination of wastewater by pulsed electric field treatment: a critical evaluation.

17th Int. Pulsed Power Conf., Washington, D.C., June 28 – July 2, 2009; Book of Abstracts S.279

Sack, M., Eing, C., Frey, W., Schultheiß, C., Bluhm, H.,

Attmann, F., Stängle, R., Wolf, A., Müller, G., Sigler, J., Stukenbrock, L., Frenzel, S., Arnold, J., Michelberger, T.

Development of industrial-scale electroporation devices. Int. Bioelectrics Symp., Columbia, Mo., June 25-26, 2009

Sack, M., Sigler, J., Eing, C., Stukenbrock, L. Stängle, R., Wolf, A., Müller, G.
Operation of an electroporation device for mash.
17th Int. Pulsed Power Conf., Washington, D.C., June 28 – July 2, 2009
Book of Abstracts S.315

Sack, M., Eing, C., Frey, W., Schultheiß, C., Bluhm, H., Attmann, F., Stängle, R., Wolf, A., Müller, G., Sigler, J., Stukenbrock, L., Frenzel, S., Arnold, J., Michelberger, Th.
Research on electroporation devices in industrial scale at Forschungszentrum Karlsruhe and cooperation partners.
Int. Conf. Bio and Food Electrotechnologies (BFE2009), Compiegne, F, October 22-23, 2009

Patente:

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 (2006.12.28)
EP-OS 1 893 998 (2008.03.05)
DE-PS 10 2005 029 414 (2009.03.19)

Feher, L., Nuss, V., Seitz, T., Flach
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 (2005.01.31)
DE-OS 10 329411 (2005.02.10)
Wo-OS 2005/004542 (2005.01.13)
US-PS 7 122 772 (2006.10.17)
CN-OS 1 817 062 (2006.0809)
EP-OS 1 639 865 (2006.03.29)
EP-PS 1 639 865 (2007.02.14)
RU-OS 2006 102 860 (2006.07.10)
RU-PS 2 312 470 (2007.12.10)
AU-OS 2004 300 548 (2009.02.23)
CN-PS 200480 018 940 (2009.12.16)

Giese, H., Hoppe, P.
Aufbau einer elektrodynamischen Fraktionieranlage.
Electrodynamic fractionation plant.
DE-PS 10 346 055 (2004.08.06)
EP-OS 1 667 798 (2006.06.14)
CN-OS 1 863 601 (2006.11.15)
RU-PS 2 311 961 (2007.12.10)
JP-PS 4 388 959 (2009.10.09)

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 (2005.05.19)
EP-OS 1 673 172 (2006.06.28)
EP-PS 1 673 172 (2008.02.13)
US-PS 7 246 761 (2007.07.24)
CN-OS 1 863 602 (2006.11.15)
CA-PS 2 537 045 (2008.08.05)
CN-PS 2004 80 029 492 (2009.02.04)

Grüll, D., Schultheiß, C., Wastyn, M.M., Wittenberger, R.
Verfahren zur Herstellung von Stärke oder stärkehaltigen Produkten aus stärkehaltigen Rohstoffen.
EP-PS 1 399 486 (2009.09.16)

Sack, M.
Einrichtung und Verfahren zur druckgesteuerten und druckgeregelten, elektroporativen Behandlung biologisch pflanzlichen Prozessguts.
DE-OS 10 2008 024 065 (2009.11.19)
WO-OS 2009/141036 (2009.11.26)

Sack, M.
Trigger-/Zündeinrichtung an einem aus n Stufenkondensatoren bestehenden Marx-Generator.
Trigger arrangement for a Marx generator.
DE-OS 10 320 425 (2004.12.16)
CN-OS 1 784 830 (2006.6.7)
CN-PS 100 409 570 (2008.8.6)
EP-OS 1 620 946 (2006.2.1)
EP-PS 1 620 946 (2008.3.26)
US-PS 7 170 187 (2007.1.30)
RU-PS 2 333 597 (2008.9.10)
AU-PS 2004 237 285 (2009.04.30)
JP-PS 4 299 333 (2009.04.24)

Sack, M.
Verfahren zur Reduktion pulsformiger Erdströme an einem elektrischen Großgerät und Kompensationsschaltung zur Erdstromverlagerung.
DE-OS 10 2008 024 348 (2009.12.03)

Schultheiss, C., Kern, M.
Elektroporationsreaktor zur kontinuierlichen Prozessierung von stückigen Produkten.
DE-PS 10 144 479 (2003.04.03)
EP-OS 1 424 910 (2004.06.09)
EP-PS 1 424 910 (2007.04.25)
HU-OS 0 401 095 (2004.09.28)
PL-OS 367 363 (2005.02.21)
PL-PS 199 833 (2008.11.28)
MD-PS 3640 (2009.08.27)

Schultheiss, C.
Verfahren zum Aufbringen einer bioaktiven, gewebeverträglichen Schicht auf Formkörpern und Verwendung solcher Formkörper.
DE-OS 10 2006 028 856 (2008.01.03)
WO-OS 2007/147462 (2007.12.27)
EP-OS 2 032 181 (2009.03.11)
WO-OS 2007/147462 (2009.02.05)

Schultheiss, C., Kern, M., Nüesch, R., Mayer, H.G., Sigler, J.
Verfahren zur besseren und schonenden Freisetzung wertgebender Inhaltsstoffe aus Weinbeeren und ein daraus gewonnener Most sowie daraus erzeugter Wein und eine Einrichtung zur Durchführung der Elektroporation.
DE-OS 10 2004 013 762 (2006.01.12)
DE-PS 10 2004 013 762 (2006.02.22)
EP-OS 1 737 942 (2007.01.03)
US-OS 2008/0279995 (2008.11.13)
ZA-PS 2006 06 882 (2008.01.30)
AU-PS 2005 225 488 (2009.03.12)

REUN:**Programm Rationelle Energie-Umwandlung und Nutzung****Buch, Buchbeitrag:**

Feher, L.E.
Energy efficient microwave systems : materials processing technologies for avionic, mobility and environmental applications.
Berlin [u.a.]: Springer, 2009

Publikationen in begutachteten Zeitschriften:

Akhtar, M.J., Feher, L.E., Thumm, M.
Noninvasive procedure for measuring the complex permittivity of resins, catalysts, and other liquids using a partially filled rectangular waveguide structure.
IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 57(2009) S.458-70
DOI:10.1109/TMTT.2008.2011177

Sonstige Publikationen die in gedruckter Form vorliegen

Akhtar, M.J., Feher, L., Thumm, M.
Effects of hardeners, catalysts and accelerators on dielectric properties of different resin systems for microwave material processing applications.
Feher, L. [Hrsg.] Proc. of the 12th Int. Conf. on Microwave and High Frequency Heating (AMPERE 2009), Karlsruhe, September 7-10, 2009; CD-ROM S. 290
Karlsruhe : Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, 2009

Feher, L.E.
Maxwell's equations and dielectric material properties – a classical horizon resulting by quantum theory.
Feher, L. [Hrsg.] Proc. of the 12th Int. Conf. on Microwave and High Frequency Heating (AMPERE 2009), Karlsruhe, September 7-10, 2009
CD-ROM S.234-37

Feher, L.E.
The quantum nature of microwave heated water. A refinement on energy conversion and structural properties.
Feher, L. [Hrsg.] Proc. of the 12th Int. Conf. on Microwave and High Frequency Heating (AMPERE 2009), Karlsruhe, September 7-10, 2009; CD-ROM S. 283-86
Karlsruhe : Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, 2009

Henningsen, M., Döring, M., Schmidt, A., Arnold, U., Feher, L., Kröger, M.
Tuning the receiver: curing of epoxy composites with microwaves.
Feher, L. [Hrsg.] Proc. of the 12th Int. Conf. on Microwave and High Frequency Heating (AMPERE 2009), Karlsruhe, September 7-10, 2009; CD-ROM S. 13-16
Karlsruhe : Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, 2009

Prastiyanto, D., Akhtar, M.J., Feher, L.E., Stanculovic, S., Nuss, V., Layer, S., Seitz, T.
Mechatronic temperature-dependent dielectric properties measurement at 2.45 GHz using a rectangular waveguide.
Feher, L. [Hrsg.] Proc. of the 12th Int. Conf. on Microwave and High Frequency Heating (AMPERE 2009), Karlsruhe, September 7-10, 2009; CD-ROM S. 291-94
Karlsruhe : Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, 2009

Schwotzer, M., Eckhardt, J.D., Feher, L.
Advanced microwave processing of porous mineral materials as mold materials for metal casting.
Feher, L. [Hrsg.] Proc. of the 12th Int. Conf. on Microwave and High Frequency Heating (AMPERE 2009), Karlsruhe, September 7-10, 2009; CD-ROM S. 262-65
Karlsruhe : Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, 2009

Stanculovic, S., Feher, L.
Modular microwave perfluorator system for industrial processes.
Feher, L. [Hrsg.] Proc. of the 12th Int. Conf. on Microwave and High Frequency Heating (AMPERE 2009), Karlsruhe, September 7-10, 2009; CD-ROM S. 71-74
Karlsruhe : Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, 2009

Vorträge, die nicht in gedruckter Form vorliegen:

Feher, L.
Microwave quantum interactions for polymer and composite curing.
2009 Int. Microwave Symposium (IMS), Boston, Mass., June 7-12, 2009

Prastiyanto, D., Feher, E.L., Thumm, M.
Development of dielectric properties measurement for industrial materials using a rectangular waveguide.
KIT PhD Symp., Karlsruhe, 18. März 2009



Arbeitsgebiete des Instituts für Hochleistungsimpuls- und Mikrowellentechnik (IHM) (Leitung: Prof. Dr. Dr. h.c. Manfred Thumm (komm.)) im KIT sind die Forschung, Entwicklung, Ausbildung und, in Zusammenarbeit mit dem KIT-Innovationsmanagement (IMA) sowie industriellen Partnern, der Technologietransfer auf den Gebieten der Impuls- und Mikrowellentechnik bei hohen Leistungen. Die Vorhaben des IHM sind in sechs Forschungsprogramme der Helmholtz-Gemeinschaft (HGF) eingebunden: FUSION, NANOMIKRO, NUKLEAR, Erneuerbare Energien (EE), Rationelle Energieumwandlung und -nutzung (REUN) und Technologie, Innovation und Gesellschaft (TIG). 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 Kernfusion in magnetisch eingeschlossenen Plasmen, der Transmutation von Kernbrennstoffen, der Material-Prozesstechnik und der nicht-nuklearen Energietechnik. Die Ergebnisse der F&E-Arbeiten in den beiden Abteilungen Hochleistungsimpulstechnik (Leitung: Dr. Georg Müller) und Hochleistungsmikrowellentechnik (Leitung: Dr. Gerd Gantenbein (komm.)) in 2009 sind in diesem Jahresbericht zusammengefasst, geordnet nach den HGF-Programmen. Die Liste der 197 Veröffentlichungen des IHM im Jahre 2009 ist am Ende des Berichts aufgeführt. PD Dr.-Ing. habil. Lambert Feher, Leiter der Gruppe Industrielle Mikrowellentechnik, organisierte die 12th International Conference on Microwave and High Frequency Heating (AMPERE 2009) in Karlsruhe als größte AMPERE-Konferenz seit ihrem Bestehen (150 Teilnehmer aus 38 Ländern, 120 Beiträge und 2 Short Courses). Dr.-Ing. Martin Sack, Dr. Christoph Schultheiß (i.R.) und Prof. (i.R.) Dr. Hansjoachim Bluhm sind für das von ihnen entwickelte Verfahren der Elektroporation von pflanzlichen Zellen im industriellen Maßstab mit dem Otto Haxel Preis 2009 des Freundeskreises des Forschungszentrums Karlsruhe e.V. ausgezeichnet worden. Dr.-Ing. Jaleel Akhtar, PD Dr.- Ing. habil. Lambert Feher und Prof. Dr. rer.nat. Dr. h.c. Manfred Thumm wurden für eine ihrer Veröffentlichungen in der Fachzeitschrift IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques mit dem CST University Publication Award 2009 ausgezeichnet.