



Forschungszentrum Karlsruhe
in der Helmholtz-Gemeinschaft

Wissenschaftliche Berichte
FZKA 7395

Jahresbericht 2007
Institut für
Hochleistungsimpuls- und
Mikrowellentechnik

M. Thumm

Institut für Hochleistungsimpuls- und
Mikrowellentechnik

April 2008

Forschungszentrum Karlsruhe

in der Helmholtz-Gemeinschaft

Wissenschaftliche Berichte

FZKA 7395

Jahresbericht 2007 des Instituts für Hochleistungsimpuls- und Mikrowellentechnik

Redaktion: M. Thumm
Institut für Hochleistungsimpuls-
und Mikrowellentechnik

**Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe
2008**

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe

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

ISSN 0947-8620

ISSN 1860-8310

urn:nbn:de:0005-073953

Institut für Hochleistungsimpuls- und Mikrowellentechnik (IHM)

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

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

Abteilung für Hochleistungsimpulstechnik:

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

Abteilung für Hochleistungsmikrowellentechnik:

- Planung, Aufbau und Test des gesamten 10 MW, 140 GHz Elektronen-Zyklotron-Resonanz-Heizsystems (ECRH) für den Dauerbetrieb (CW) am neuen Stellarator W7-X des IPP Greifswald. Insbesondere wurde hierbei in Zusammenarbeit mit dem CRPP Lausanne und der Fa. Thales Electron Devices (TED) in Paris eine 1 MW, 140 GHz, CW Gyrotronröhre und mit dem IPF der Universität Stuttgart das quasi-optische Übertragungssystem entwickelt. Die erste Serienröhre liefert Weltrekord-Langpulsparameter mit 0.92 MW Leistung bei 30 min. Pulslängen, einem Wirkungsgrad von fast 45% und einer Modenreinheit von 97.5% (Programm FUSION).

- Entwicklung und Test von 2 MW, 170 GHz Gyrotronröhren mit koaxialen Resonator und stufenweise frequenzdurchstimmbaren 1 MW Gyrotronröhren (105-140 GHz), einschließlich der randgekühlten Mikrowellen-Vakuumfenster aus synthetischem Diamant, für ECRH-Anlagen an Tokamak-Großexperimenten (ITER, ASDEX Upgrade). In Zusammenarbeit mit CRPP und TED wurde eine erste Prototypröhre des europäischen 2 MW, 170 GHz ITER-Gyrotrons mit koaxialen Resonator gefertigt und ausgeliefert. Experimentelle Untersuchungen wurden im Dezember 2007 begonnen (Programm FUSION).
- Experimentelle und theoretische Untersuchungen zum Verhalten der ersten Wand und des Divertors von Tokamak-Fusionsreaktoren bei Plasmainstabilitäten (Programm FUSION).
- Sintern von fortschrittlichen Funktions- und Strukturkeramiken, insbesondere von nanostrukturierten Keramiken und Metallpulvern und Prozesstechnik in der Nanomineralogie mittels Hochleistungsmillimeterwellen bei einer Frequenz von 30 GHz. In grundlegenden Experimenten konnte erstmals direkt ein nicht-thermischer Mikrowelleneffekt nachgewiesen werden (Programm NANOMIKRO).
- Systemstudien zu Mikrowellen-Applikatoren für verschiedenste Anwendungen bei den ISM (Industrial, Scientific, Medical)-Frequenzen 0,915 GHz, 2,45 GHz und 5,8 GHz, wie z.B. zur Herstellung von Flugzeugbauteilen aus Kohlefaserverbundwerkstoffen mittels Mikrowellenprozesstechnik bei 2,45 GHz. Die neue HEPHAISTOS-CA3-Anlage mit einem Volumen von 7000 l und einer Mikrowellenleistung von 25 kW wurde in Betrieb genommen. Damit werden in Zukunft Prozessentwicklungen mit der Industrie für verschiedenste Anwendungen und Verfahren auf Dienstleistungsbasis erschlossen werden können (Programm UMWELT und MAP).

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

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

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

Zum Jahresende waren am Institut 38 Mitarbeiter/innen beschäftigt, darunter 20 Akademiker/innen, 4 Ingenieure und 16 Sonstige Mitarbeiter/innen, davon 1 Halbtagskraft.

Wie oben erwähnt, ist ein Akademiker der Universität Karlsruhe Mitarbeiter des Instituts. Zusätzlich wurden 11 Akademiker, 2 Ingenieure und 11 Sonstige Mitarbeiter/innen aus Fremdmitteln finanziert.

Im Verlaufe des Jahres 2007 waren an den Arbeiten des Instituts insgesamt 9 Gastwissenschaftler, 11 Doktoranden/innen (6 vom Forschungszentrum, 5 von der Universität Karlsruhe), 2 Diplomanden/innen, 1 BA-Student, 6 Praktikanten/innen und 6 Auszubildende beteiligt.

FUSION: Programm Kernfusion

Hochbelastbare Komponenten und Versuchseinrichtungen

Zur Demonstration der Energieerzeugung durch thermonukleare Fusion mit dem zukünftigen Tokamak-Reaktor ITER ist der sog. ELMy H-Modus die bevorzugte Betriebsweise. Dabei können jedoch instabile Zustände auftreten, entweder vollständige Zusammenbrüche des Plasmas (Disruptions) oder ELM-Instabilitäten (Edge Localized Modes), bei denen nur die Plasma-peripherie betroffen ist. Bei Disruptionen werden in der Wand Energien Q bis zu 30 MJ/m^2 in Zeiten τ bis zu 10 ms deponiert. Bei ELM Ereignissen wird der Divertor und anderen Wandflächen mit Energien Q von etwa $0.5 - 4 \text{ MJ/m}^2$ in Zeiten τ von $0.3 - 0.6 \text{ ms}$ belastet. Dabei werden Wiederholraten von 1 bis 100 Hz erwartet. Solche transienten Belastungen können zu starken Beschädigungen der ITER Schutzplatten des Divertor führen. Die daraus resultierende Erosion führt entweder zur Verdampfung und Rissbildung bei kohlefaserverstärkten Schutzschichten (CFC), die in der Umgebung des Separatrix-Stoßpunktes eingesetzt werden sollen, oder zum Schmelzen der metallischen Divertoroberfläche aus Wolfram. Zusätzlich wird eine große Menge an Kohlenstoff- oder Wolframstaub produziert, welche erhöhte Mengen von Tritium binden kann und somit zu einem Sicherheitsproblem während der Wartungsphasen werden könnte durch erhöhte Explosionsgefahr bei Anwesenheit von Sauerstoff.

Zur Untersuchung der Erosionsmechanismen bei kohleverstärkten Schutzschichten (CFC NB31) und bei Wolframoberflächen (hergestellt von der Firma Plansee AG, Österreich) unter ITER-relevanten Bedingungen wurden im Jahr 2007 weitere Aktivitäten in Zusammenarbeit von FZK (numerischen Simulationen), TRINITY (Experimente an den Anlagen MK-200UG und QSPA zur Validierung der FZK-Codes) und FZ-Jülich (Analyse der am QSPA eingesetzten Materialproben) durchgeführt. Zusätzlich wurde am FZK Beryllium rechnerisch untersucht. Beryllium ist für die Blanket-Module in der Hauptkammerwand von ITER vorgesehen.

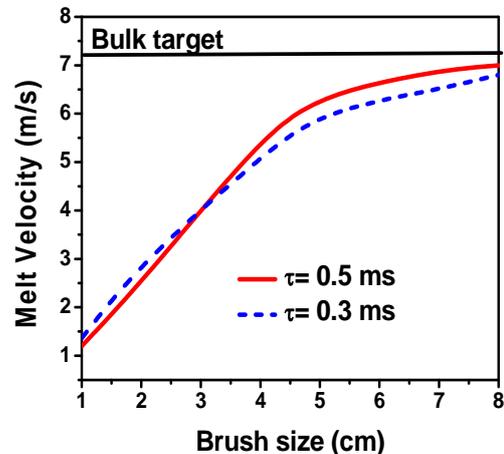
Zur Modellierung der Zerstörungen an Wolfram- und Berylliumoberflächen wurde der Schmelzbewegungscode MEMOS eingesetzt. Zur Untersuchung der Staubbildung an CFC Oberflächen durch Rissbildung (brittle destruction) erfolgte eine spezielle Erweiterung des thermomechanischen Codes PEGASUS. Für dreidimensionale Simulationen bei CFC und Wolfram wurden beide Codes signifikant verbessert und mit den Experimenten validiert.

Beryllium Wand Modellierung:

Schäden an Be-Oberflächen entstehen durch Verdampfung und durch Bewegung und Wegspritzen von geschmolzenem Material. Mit MEMOS wurden, unter Berücksichtigung einer abschirmenden Dampfschicht, Schmelzschichtdicke und Verdampfungsdicke für Energiedepositionen am Target von $Q = 0.2$ bis 2 MJ/m^2 und Pulsdauern von $\tau = 0.2$ bis 0.6 ms abgeschätzt. Der Einfluss der Lorentzkraft auf Schäden an massivem Be und auf Makrokammstrukturen wurde untersucht und verglichen mit Schäden durch tangentielle Reibungskräfte für Querströme mit bis zu 2 kA/cm^2 . Die Simulationen zeigten, dass beide Kräfte vergleichbar sind und sich sogar kompensieren können wenn sie entgegengesetzt gerichtet sind.

Die Abhängigkeit der maximalen Oberflächentemperatur an der oberen Be-Wand vom ELM Wärmefluss wurde für verschiedene ELM Dauer berechnet. Die Schmelzschichtdicke lag unter $50 \mu\text{m}$ und Verdampfung trat auf bei einer Wärmebelastung größer als 1 MJ/m^2 . Die durch tangentielle Reibungskräfte

hervorgerufenen Schäden durch Schmelzbewegungen wurden für verschiedene Kammgrößen untersucht. Für eine Kammstruktur unter 2 cm Größe wurde die Geschwindigkeit der Schmelzbewegung signifikant kleiner als bei massiven Be. Damit sind auch die Oberflächenschäden deutlich geringer. Bei Vergrößerung der Kammstruktur bis auf 4 cm verschwand dieser vorteilhafte Effekt (Abbildung).



Maximale Geschwindigkeit der Schmelzbewegung in Abhängigkeit der Größe der Kammstruktur. $Q = 1 \text{ MJ/m}^2$

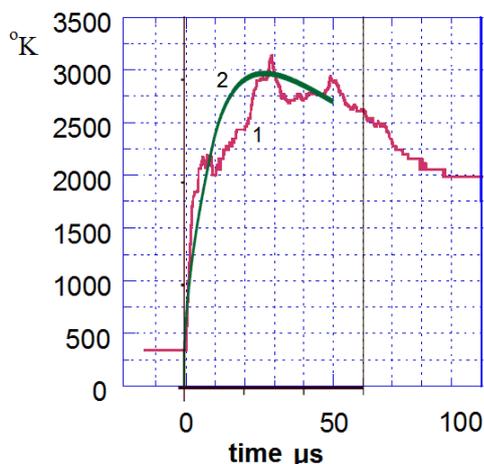
Simulationen für CFC mit PEGASUS und Validierung mit MK-200UG Experimenten:

CFC Materialien haben eine komplexe Struktur bestehend aus einem Gerüst aus Kohlefasern die in eine Matrix eingebettet sind. Die Hauptkomponenten des Gerüsts sind die aus senkrecht zur Oberfläche ausgerichteten "Pitchfasern". Sie bewirken die hohe thermische Leitfähigkeit des CFC-Materials. Um die mit dem Code PEGASUS früher erhaltene Verdampfungsschwelle von NB31 experimentell zu überprüfen, wurden, an der Plasmakanonenanlage MK-200UG, CFC-Proben heißen Strömen eines Wasserstoffplasmas ausgesetzt. Die Temperaturen der CFC Oberflächen wurden dabei bei gepulsten Wärmelasten, welche die ITER Type I ELMs simulierten, gemessen. Die Zeitabhängigkeit der Oberflächentemperatur unter verschiedener Wärmelast wurde aufgezeichnet. Daraus wurden Abschätzungen der Wärmeleitfähigkeit von CFC durchgeführt.

Bei entsprechenden Simulationen mit PEGASUS ergab sich zunächst eine große Diskrepanz zwischen den gemessenen und den numerisch ermittelten Oberflächentemperaturen. Für diese ersten Simulationen wurde bis zu einer Temperatur von $1.5 \times 10^3 \text{ K}$ die bekannte Wärmeleitfähigkeit von CFC genommen. Für Temperaturen bis 4500 K wurden extrapolierte Werte verwendet. Um den Grund für die Diskrepanz zu finden, wurde eine morphologische und eine post-mortem-Analyse der CFC-Proben durchgeführt. Es zeigte sich, dass in einer dünnen Oberflächenschicht von $50-100 \mu\text{m}$ die Pitchfasern teilweise beschädigt worden waren, und eine dünne Schicht von $\sim 5 \mu\text{m}$ Dicke aus redeponiertem Kohlenstoff die CFC-Oberfläche bedeckte.

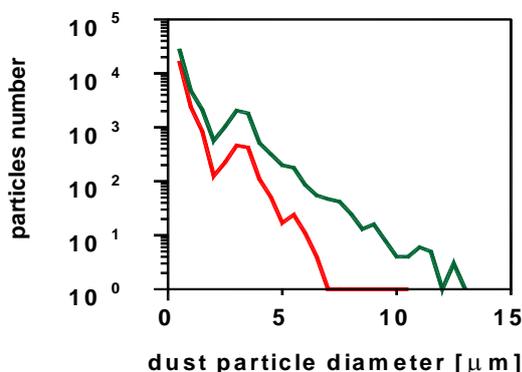
Die Analyse erlaubt den Schluss, dass die Wärmeleitfähigkeit in der Nähe der CFC-Oberfläche im gesamten Temperaturbereich, von Zimmertemperatur bis zu 4500 K , signifikant herabgesetzt ist, und zwar durch das beobachtete Aufbrechen von massivem CFC nahe der Oberfläche nach mehrfachen Schüssen mit der Plasmakanone. Abschätzungen zeigten jedoch, dass die redeponierte Kohlenstoffschicht von einigen Mikrometern die gemessene Oberflächentemperatur nicht wesentlich beeinflussen kann, denn dazu müsste ihre thermische Leitfähigkeit unrealistisch niedrig sein.

Deswegen wurde bei weiteren Validierungsrechnungen mit PEGASUS die im Code implementierte funktionale Abhängigkeit der thermischen Leitfähigkeit von der Temperatur in der Sub-Oberflächenschicht mit einem Faktor 0.45 multipliziert. Mit diesem Faktor wurden die gemessenen Zeitabhängigkeiten der CFC-Oberflächentemperatur bei verschiedenen Leistungsdichten in der Simulation sehr gut wiedergegeben (Abbildung).



CFC-Oberflächentemperatur (1) gemessen bei einer Energiedeposition von 0.145 MJ/m^2 , und (2) simuliert mit einer um den Faktor 0.45 reduzierten Wärmeleitfähigkeit.

Abschätzung der Staubentstehung: Das Zurückhalten von Tritium ist für ITER ein kritischer Faktor, insbesondere eine Anreicherung im Kohlenstoffstaub in Form verschiedener Kohlenwasserstoffe. Der Staub entsteht im Vakuumbehälter hauptsächlich in Folge von Rissbildung an den Divertorschutzplatten, hervorgerufen durch stark lokalisierte Thermospannung an den unter gepulster Belastung stehenden Oberflächen. Dieser Prozess wird, als Ergebnis der durchgeführten Untersuchungen, als die einzige Ursache für Staubproduktion in ITER durch ELMs angenommen. PEGASUS wurde um ein neues Modell für die zur Tritiumakkumulation relevanten Stauboberflächen erweitert, wodurch die Entstehung von Stäuben mit verschiedenen Größen und Formen beschrieben werden kann. Dazu wurden statistische Verteilungen der Größen der die Oberflächen verlassenden Staubpartikel gesammelt. Die Abbildung zeigt eine mit dem erweiterten Code simulierte Größenverteilung von Graphitkörnern für eine mittlere Korngröße von $\lambda = 3 \mu\text{m}$.

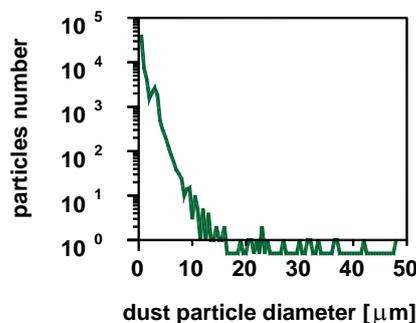


Simulierte Größenverteilung von Graphitstaubteilchen für eine mittlere Korngröße von $\lambda = 3 \mu\text{m}$. Obere Kurve: $\sigma_b = 3 \cdot 10^{-3} E_{||}$. Untere Kurve: $\sigma_b = 4 \cdot 10^{-3} E_{||}$.

Zur Überprüfung wurden wichtige numerische Parameter, welche die Korngröße λ bestimmen, an vorhandene Daten aus früheren Experimenten mit der Plasmakanonenanlage MK-200UG mit Graphit MPG-8 bei für ITER-Disruptionen relevanten

Wärmelasten angepasst. Dazu wurden Simulationen dieser Experimente mit PEGASUS durchgeführt, mit einer mittleren Versagensspannung für die Korngrößengrenzen von $\sigma_b = 3 \cdot 10^{-3} E_{||}$ und Werten für λ von 3, 5, und $8 \mu\text{m}$ ($E_{||}$ ist der Young Modul in Flächenrichtung des Kohlenstoffkristalls). Die Anzahl der Staubteilchen nimmt exponentiell mit der Partikelgröße ab. Die PEGASUS-Rechnungen mit $\lambda = 3 \mu\text{m}$ stimmten am besten mit den Experimenten überein. Mikroskopische Messungen ergaben Teilchengrößen von 2 bis $3 \mu\text{m}$. Die simulierte Erosionsrate passte gut zum am MK-200UG gemessenen Wert von $0.4 \mu\text{m}$ pro Schuss.

Die Übereinstimmung mit den Ergebnissen für MPG-8-Graphit erlauben es PEGASUS für die Berechnung von Staubentstehung bei CFC zu nehmen. Ein wesentlicher Unterschied zwischen MPG-8 Graphit und CFC besteht darin, dass die Bruchpartikel bei CFC mit $\sim 100 \mu\text{m}$ viel größer sind. Deswegen wurden die Simulationen der CFC Struktur mit PEGASUS (Abbildung) unter der Annahme durchgeführt, dass die Matrix-Parameter, die mittlere Korngröße, und die mittlere Versagensspannung für Matrixkorngrößen die gleichen sind wie für MPG-8 ($\lambda = 3 \mu\text{m}$ und $\sigma_b = 3 \cdot 10^{-3} E_{||}$), aber σ_b der PAN-Fasern 12 mal größer ist als die der Matrix.



Simulierte Größenverteilung der Staubteilchen für CFC.

Die Simulationen mit PEGASUS reproduzierten sowohl die experimentell beobachtete Morphologie der erodierten Graphitoberfläche und die Größen der Bruchpartikel, als auch die gemessene Erosionsrate. Dabei wurde Verdampfung der Kohlenstoffstaubteilchen nicht berücksichtigt. Dieser Effekt kann die Verteilungsfunktion beeinflussen und sollte separat untersucht werden.

Gemäß der Simulationen, beginnt merkliche Rissbildungs-erosion von CFC bei einem Schwellen der Oberflächentemperatur von ungefähr 4000 K (etwas unter der Verdampfungstemperatur). Nach Erreichen der Schwellentemperatur für Rissbildung wird die CFC Erosionsrate ungefähr konstant und die Verteilungsfunktion der Staubteilchen entwickelt sich ziemlich unabhängig von der Wärmebelastung. Anfänglich erscheinen eher kleinere Staubteilchen (kleiner als $10\text{-}12 \mu\text{m}$) mit ungefähr exponentieller Größenverteilung, später nimmt die Partikelgröße zu. Die Bildungszeit für die exponential verteilten Partikel und die Zeit bis zum Auftreten größerer Partikel ist umgekehrt proportional zur Wärmebelastung. Jedoch traten sogar bei den niedrigsten Wärmeflüssen in den Simulationen irgendwann größere Partikel auf, wenn auch zu Zeiten die viel größer waren als die Dauer von ELMs.

Integrale Plasma-Modellierung

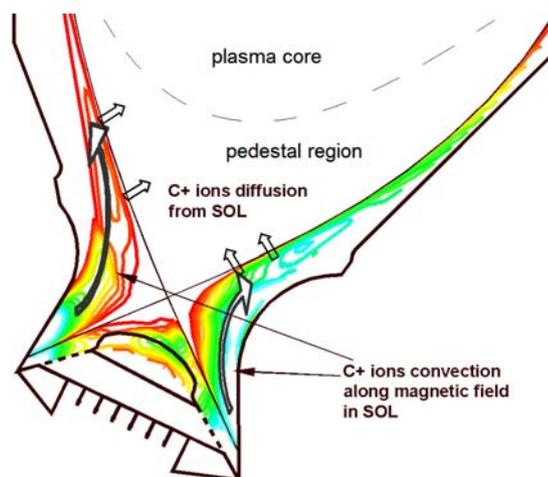
Im zukünftigen Tokamak-Reaktor ITER ist der ELMy H-Modus die bevorzugte Betriebsweise. Dabei können jedoch instabile Zustände auftreten, entweder Plasmazusammenbrüche mit

vollständiger Zerstörung des eingeschlossenen Plasma ("plasma disruptions") oder so genannte ELM ("Edge Localized Modes") Instabilitäten, bei denen nur der Plasmarand betroffen ist. Bei kohlefaserverstärkten Schutzschichten (CFC) und bei Wolfram, welches als Divertormaterial bei ITER vorgesehen ist, führt die aus den Instabilitäten resultierende Erosion vorwiegend zur Verdampfung und zur Rissbildung im Material. Das erodierte Material kann eine Dampfschicht bilden, die vor weiterer exzessiver Materialabtragung schützt. In den Zeitabschnitten zwischen den ELMs besteht der Erosionsmechanismus im wesentlichen aus Zerstäubung. Die durch die Ionisation der erodierten Atome entstehenden Verunreinigungen breiten sich entlang der magnetischen Feldlinien in die Plasma-Abschälschicht (SOL) aus, und können dort die Stabilität des Plasmas, insbesondere durch Strahlungsverluste, gefährden.

Diese Prozesse - Erosion und Verunreinigung mit Kohlenstoff - werden mit dem Programm FOREV untersucht. Außerdem wird ein neuer zweidimensionaler Code TOKES (TOKamak Equilibrium and Surface Processes Code) zur Berechnung von Plasmagleichgewichts- und Wandprozessen entwickelt. Im Berichtszeitraum wurden damit die ersten integrierten Vergleichsrechnungen der ITER Plasmakontamination durchgeführt wobei erodiertes Beryllium, Kohlenstoff und Wolfram von der gesamten Kammeroberfläche angenommen wurde.

FOREV Modellierung der Plasmakontamination nach ITER Disruptionen:

Nach einer Plasmodisruption, die durch vorhergehende Kontamination des Kernplasmas nach mehrfachen ELMs hervorgerufen werden kann, ist die Wärmelast an den Targetflächen drastisch höher als bei einem ELM. Die Oberflächenbelastung wird jedoch begrenzt durch eine schützende Dampfschicht, die sich aus erodiertem und ionisiertem Material in der Umgebung des Separatrix Stosspunktes (SSP) bildet. Ein großer Teil der Energie des auftreffenden Deuterium-Titium (DT) Plasmas regt den ionisierten Kohlenstoff im Plasmaschild zur Strahlung an, die auf die dem Divertor benachbarten Strukturen sowie auf die erste Wand trifft. Der Kohlenstoff expandiert in das SOL und gelangt in die Tokamak-Separatrix (Abbildung).



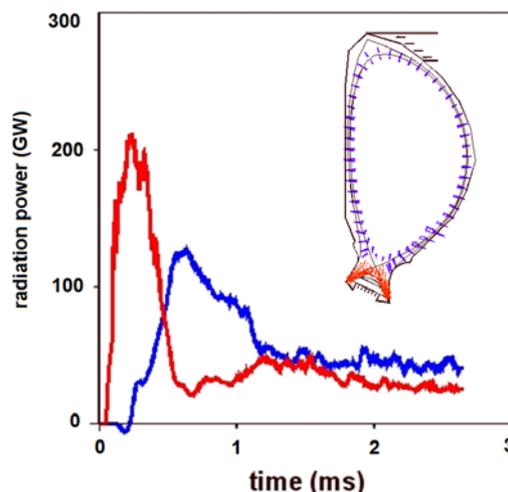
Transport von C-Ionen im ITER Behälter: Rot: Bereich mit minimaler Ionendichte n_{min} . Hellblau: Bereich mit maximaler Ionendichte n_{max} (bis zu $3 \times 10^{22} \text{ m}^{-3}$).

Auf diese Weise wird die thermische Energie des eingeschlossenen DT Plasma direkt aus der Podestregion (siehe Abbildung), in welcher der Dichtegradient am höchsten ist, auf die gesamte erste Wand zurückgestrahlt. Im FOREV Code wird zur Simulation dieser komplexen Prozesse davon ausgegangen, dass der Zusammenbruch des Plasmaeinschlusses durch einen

drastischen Anstieg des DT-Querdiffusionskoeffizienten D_{\perp} bedingt wird. Die Stärke von D_{\perp} wurde an die bei ITER-Disruptionen erwarteten Leistungen von $q = 30$ bis 130 GW angepasst, wobei angenommen wurde, dass beim Einsetzen einer Disruption D_{\perp} während der ersten 0.2 ms linear ansteigt und dann für 3 ms konstant bleibt.

Mit diesen Annahmen ergibt sich aus den Rechnungen mit FOREV, dass eine Verdampfung der Oberfläche nach 0.06 ms bei $q = 130 \text{ GW}$ bzw. nach 0.2 ms bei $q = 30 \text{ GW}$ einsetzt. Der in das SOL expandierende Kohlenstoff hat eine Temperatur von wenigen eV und abhängig von q eine Dichte von 10^{21} bis 10^{22} m^{-3} . Der Wärmefluss über das DT Plasma vom Pedestal in das SOL reicht nicht aus, um die Temperatur des dichten Kohlenstoffplasmas zu erhöhen, weil die Energie unmittelbar in Strahlung umgewandelt wird. Als Resultat davon reduziert sich die Leistung am Divertor auf etwa $10^{-2}q$. Eine geringe Verdampfungsrates besteht jedoch weiter.

Später diffundiert das Kohlenstoffplasma aus der SOL in die Separatrix hinein, und in der Umgebung des X-Punktes, auch zur ersten Wand. Im Podest übernimmt der Kohlenstoff die hohe Temperatur des DT Plasma und expandiert deswegen schneller als entlang der magnetischen Oberflächen im SOL. Dies führt schnell zu einem signifikanten Energieverlust des eingeschlossenen Plasma durch Strahlung (Abbildung).



Simulierte Strahlungsleistung aus der Divertor Region (rot) und dem Kern (blau) für eine Disruption mit $q = 63 \text{ GW}$.

Disruptionen mit $q < 60 \text{ GW}$ produzieren Strahlung hauptsächlich in der Divertorregion. Mit zunehmendem q steigen die Strahlungsverluste aus dem Podest und erreichen einen Beitrag von 85% bei $q = 130 \text{ GW}$. In diesem Fall wird das Podestplasma auf wenige eV abgekühlt, was einen völligen Verlust des Plasmaeinschlusses innerhalb von 3 ms zur Folge hat.

TOKES Entwicklungen für integrierte Simulationen des ITER ELM My H-Modus:

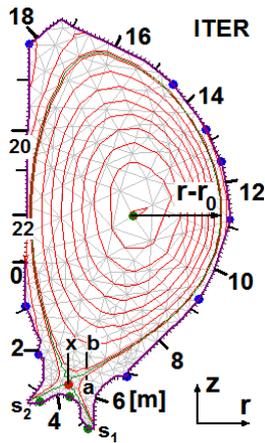
Das Programm TOKES ist für eine integrierte Simulation von Plasma Gleichgewichts- und Oberflächenprozessen im Tokamak konzipiert und zwar insbesondere mit Hinblick auf Abschätzungen einer Plasmakontaminationen nach transienten Ereignissen wie ELMs welche im Unterschied zu FOREV über viel größere Zeiträume auftreten können. Zur Zeit sind bereits implementiert ein Pfirsch-Schlüter Plasma-Diffusionsmodell, ein Fluss von Neutralteilchen von den Wänden, eine Teilcheninjektion im Rahmen eines einfachen Pelletmodells sowie durch Neutralteilchenheizung (NBI). Die Wände und die Konturen des poloidalen magnetischen Flusses $w(r,z)$ entsprechen toroidaler Symmetrie und können beliebige poloidal Formen aufweisen.

Ein mit den Konturen gekoppeltes dreidimensionales Gitter erlaubt einheitliche Berechnungen.

Es gab zwei weitere wesentliche Erweiterungen:

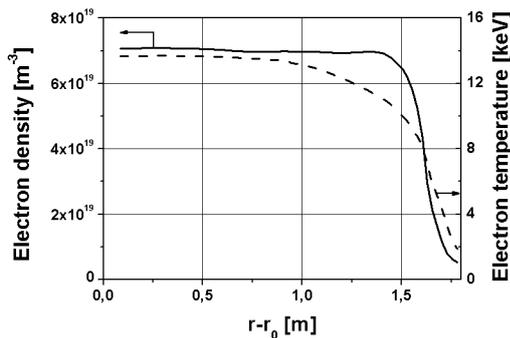
1) Ein neues Gyro-Bohm Plasma Transport Modell, das die Berücksichtigung neo-klassischer Effekte beinhaltet und eine Kontrolle der Fusionsleistung sowie eine Rückkopplung mit der NBI ermöglicht.

2) Ein verbessertes Plasmastosmodell für solche Ionen, die durch die Separatrix verloren gehen und dann in die Umgebung der Separatrixstosspunkte SSP gelangen (Abbildung).



ITER Layout und Wandkoordinate X. Die Kreise markieren die Extreme des magnetischen Flusses w , „ s_1 “ und „ s_2 “ sind die beiden SSP - Punkte.

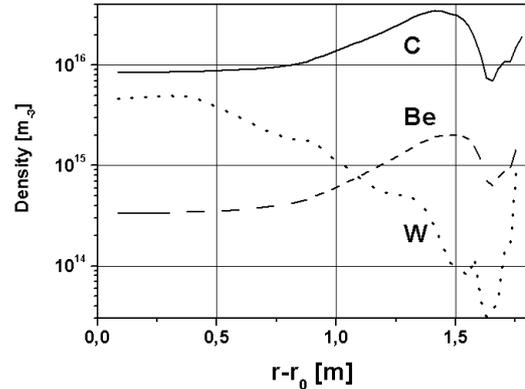
Zusätzlich zu den bisher implementierten Wandmaterialien Beryllium und kohlefaserverstärkten Kohlenstoffverbundmaterialien (CFC) wurde das Programm für Wolfram erweitert. Simulationen wurden durchgeführt für einen Divertor bestehend nur aus Wolfram sowie für einen gemischten Divertor mit Fragmenten aus Kohlenstoff bei $X = (2.8-3.4)$ und $(5.3-5.9)$ m anstelle von Wolfram. Für das Schutzmaterial der ersten Wand ($X < 2$ and $X > 7$ m) wurde Beryllium angesetzt.



Abhängigkeit der Elektronendichte und -temperatur von der Koordinate $r - r_0$ (Podest).

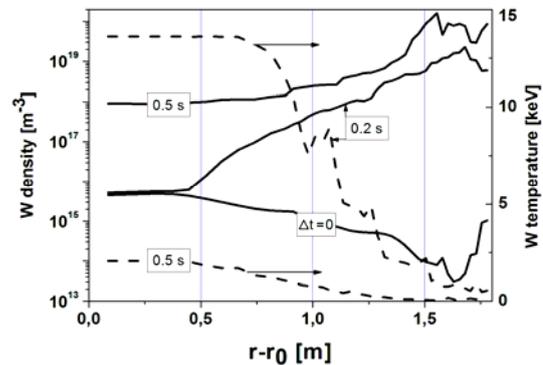
Rechnungen mit dem verbesserten Code haben für den Fall ohne ELMs Oberflächentemperaturen unterhalb der Verdampfungstemperatur ergeben. In solchen Fällen wird in TOKES sowohl Zerstäubungserosion als auch Rückstreuung auftreffender Ionen berücksichtigt. Dabei können Ionen die vom SSP gestreut werden mit signifikanter Wahrscheinlichkeit den Dom treffen und zu einer Freisetzung von W-Atomen führen, obwohl es im Bereich des SSP nur Kohlenstoffwände gibt. Diese sekundäre Zerstäubung ist so signifikant, dass ein ausrei-

chend geringes Kontaminationsniveau nur mit großen Zwischenräumen zum Dom, die bis zu 90% der Oberfläche einnehmen bei $X = (3.5-4.0)$ und $(4.7-5.2)$ m erreicht werden kann. Dabei wurde angenommen, dass die Verunreinigungen durch die Zwischenräume effektiv entfernt werden. Im Plasmagefäß breiten sich die Atome entweder frei bis zur letzten Wand der Einschlussregion aus („b“, siehe entsprechende Abbildung), oder es wird angenommen dass sie vollständig im SOL abgebremst werden. Bei einer Be-C-W-Wand sind bei einer Entladungszeit von $t = 200$ s Dichten und Temperaturen vollständig in Sättigung (Abbildung oben).



Verteilung der Verunreinigungen über die Einschlussregion.

Die Kontamination steigt nicht beliebig bei den Simulationen. Die Grenzen der Verunreinigungsdichten haben sich ergeben zu: $n_W < 5 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$, $n_C < 3 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$, und $n_{Be} < 2 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$ (Abbildung). Das wird der Mitführung der Verunreinigungen mit den abfließenden D- und T-Ionen zugeschrieben. Der Leistungsverlust durch Wärme aus dem Plasma erreicht 82 MW und der durch Strahlung 5 MW. Diese Verluste werden ausgeglichen durch eine Fusionsleistung von 57 MW von α -Teilchen und eine Heizung durch Neutralteilchen von 30 MW. Die Temperatur der Wandoberfläche erreichte beim SSP des äußeren Divertors maximal einen Wert von 3254 K. Bei $t = 400$ s ergab sich ein Energiegewinnfaktor aus der Fusion von 9.5.



Zerfall der Entladung nach 200 s bei Ersetzen eines Kohlenstoff-Wandfragments durch Wolfram, für die angegebenen anschließenden Zeitintervalle Δt .

Die ELMs in den TOKES-Simulationen können zu vorzeitigen Unterbrechungen der Entladung führen. Zur Abschätzung einer tolerierbaren ELM-Energie W_{ELM} [MJ] wurden Rechnungen über einen weiten Bereich von W_{ELM} durchgeführt. Dabei wurde die ELM Dauer τ_{ELM} konstant bei 0.3 ms gehalten. Folgende Ergebnisse wurden erhalten:

- Im Bereich $4 < W_{ELM} < 15$ beträgt die Zeit t_{max} [s] bis zu Plasmaunterbrechung: $t_{max}[s] \approx 3 \times (15 - W_{ELM})^2 / (W_{ELM} - 4)^2$.
- Für $W_{ELM} < 4$ ist t_{max} unendlich.

- Bei $W_{ELM} > 15$ wird die Entladung unmittelbar nach Erreichen der Verdampfungstemperatur der C-Fragmente von 4100 K während des ersten ELMs unterbrochen. Konsequenterweise liegt die tolerierbare Energie der ELMs bei $W_{ELM} < 4$ MJ.

Ein Versuch die Kohlenstofffragmente durch eine Wolframwand zu ersetzen, resultierte in einer sofortigen Unterbrechung sogar einer ELM-freien Entladung innerhalb von einer Sekunde. Dies wird hervorgerufen durch einen drastischen Anstieg der Wolframdichte in der Einschlussregion (Abbildung oben). In der Simulation nimmt die Strahlungsleistung während der Zerfallszeit der Entladung Δt dramatisch bis zu einem Maximum von ungefähr 1 GW bei $\Delta t = 0.1$ s zu, und fällt dann ab auf 0.1 GW bei $\Delta t = 0.5$ s. Der Grund für die abrupte Kontamination liegt in der Entwicklung einer Selbstzerstäubung von W bei der hohen Randtemperatur TS von 1.5 keV infolge einer Beschleunigung der auftreffenden Ionen auf 4.5 keV in der Sub-Oberflächenschicht. Laut der Datenbasis in TOKES beträgt der Zerstäubungsertrag $Y_{WV} \approx 3$ bei einer Energie der auftreffenden W-Ionen von 4.5 keV. Innerhalb von $\Delta t \sim 10^{-2}$ s wird daher die Wolframzerstäubung durch W-Verunreinigungen aus dem heißen Plasma dominiert. Daher scheint der gegenwärtige Entwicklungsstand des Wolframdivertordesigns nicht geeignet zu sein.

170 GHz, 2 MW, CW koaxiales Gyrotron für ITER

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

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

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

Erster industrieller Prototyp des koaxialen Gyrotrons

Der erste Prototyp des koaxialen Gyrotrons wurde Ende 2006 nach CRPP Lausanne, Schweiz ausgeliefert wo ein geeigneter Versuchsstand errichtet wurde. Wegen großer Verzögerung bei der Fertigung wurde ein geeigneter SL-Magnete erst Anfang November 2007 ausgeliefert. Obwohl der Magnet die Spezifikationen nicht vollständig erfüllt (die IHe-Verluste sind deutlich

höher als spezifiziert), ist er geeignet, die Tests mit dem Prototyp-gyrotron durchzuführen. Inzwischen wurde das Gyrotron im Magneten betriebsfertig installiert und das Konditionieren des Gyrotrons hat begonnen. In den letzten Tagen wurde der Innenleiter erfolgreich justiert. Insgesamt sind für die Messungen etwa 7 Monate vorgesehen.

Für den Fall unerwarteter Schwierigkeiten mit dem SL-Magneten, wurde die Möglichkeit, das Prototypgyrotron in dem im FZK vorhandenen SL-Magneten zu testen, untersucht und notwendige Anpassungen vorbereitet. Unter anderem wurde eine normalleitende Spule entworfen und hergestellt, welche es ermöglicht, das Magnetfeld im Resonator auf den Nominalwert von ca. 6,85 T anzuheben.



Prototyp des koaxialen 2 MW, 170 GHz Gyrotrons installiert im SL-Magneten mit allen notwendigen Anschlüssen

Vor-Prototyp des koaxialen Gyrotrons

Messungen an dem experimentellen koaxialen Gyrotron ("Vor-Prototyp") wurden im FZK fortgesetzt. Unter anderem wurden dabei die nachfolgenden Ergebnisse erzielt:

- Niederfrequente (NF) parasitäre Schwingungen:

Eine Hypothese zum Entstehen der parasitären NF-Schwingungen bei ~ 260 MHz wurde experimentell überprüft. Dazu wurde die Geometrie des Innenleiters leicht modifiziert. In Übereinstimmung mit den Erwartungen wurde im Experiment eine deutliche Abnahme der Amplitude der NF-Schwingungen beobachtet. Insbesondere erhöhte sich der Startstrom für die parasitären NF-Schwingungen um mehr als einen Faktor 3 auf Werte über 40 A. Da bereits ein entsprechend modifizierter Innenleiter im Prototypgyrotron eingesetzt ist, wird eine entsprechende Reduktion der parasitären Schwingungen erwartet. In kürzlich durchgeführten Messungen mit der Elektronenkanone, welche ursprünglich in dem 165 GHz koaxialen Gyrotron verwendet wurde, wurden keine NF-Oszillationen beobachtet. Dies bestätigt die Ergebnisse der Messungen in dem koaxialen Gyrotron bei 165 GHz und weist auf eine empfindliche Abhängigkeit der NF-Schwingungen von den geometrischen Gegebenheiten hin.

- Resonator und Mikrowellen-Erzeugung:

Um den Einfluss der Streustrahlung in Nachbarmoden auf das Schwingverhalten des Gyrotrons und insbesondere die Anregung der Nominalmode zu untersuchen, wurden Messungen mit einem Brewsterfenster durchgeführt. Dabei wurden keine signifikanten Änderungen beobachtet. Bei 170 GHz wurde eine maximale Ausgangsleistung von ca. 1,3 MW mit 23% Wirkungsgrad gemessen. Gleichzeitig wurde beobachtet, dass über einen großen Parameterbereich simultan zur nominalen Mode eine Oszillation bei etwa 160,5 GHz angeregt wird. Es wird vermutet, dass diese Oszillation im Strahlentunnel angeregt wird. Zur Überprüfung wurde ein konischer metallischer Strahlentunnel eingebaut. Messungen werden zur Zeit durchgeführt.

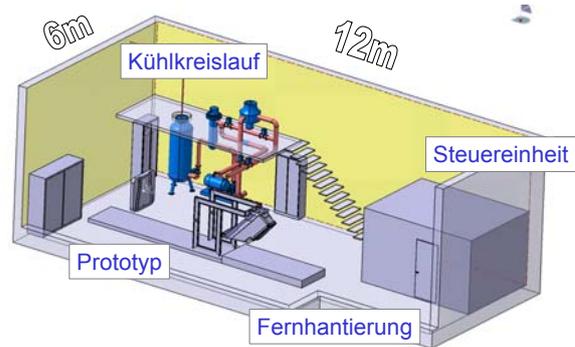
- Das quasi optische (q.o.) HF - Auskopplungssystem:
Als ein Zwischenschritt zur Verbesserung der Qualität des Mikrowellenausgangsstrahls wurde ein modifizierter Launcher (mit einer $\Delta m=3$ azimuthalen Störung) entworfen und gefertigt. Entsprechend den Rechnungen wird im HF-Ausgangsstrahl ein Gauß'scher Anteil von ~87% erwartet. In Messungen bei niedrigen Leistungen ("kalt") wurde eine gute Übereinstimmung bis zur Ebene des 2. Spiegels beobachtet. Die gemessene Verteilung in der Ebene des Ausgangsfensters ist jedoch nicht in Übereinstimmung mit den Erwartungen. Die Wirkung des 3. phasen-korrigierenden Spiegels stimmt nicht mit den Rechnungen überein. Die Ursache dafür wird untersucht. Ein neues Programm zur Optimierung von Launchern wird mit dem Ziel entwickelt, ein q.o. HF-Auskopplungssystem zu entwerfen, welches einen HF-Strahl mit einem Gauß'schen Anteil von mindestens 95% erzeugt und bei dem die internen HF-Verluste unter 5% der Ausgangsleistung liegen.

EC-Heizung und Stromtrieb – Launcher Handling Test Facility für ITER

Die "Launcher Handling Test Facility" (LHT) ist eine Großversuchseinrichtung, mit der strukturelle Komponenten von "Port Plug"-Systemen unter ITER spezifischen Betriebsbedingungen untersucht werden können (siehe Abbildung unten). Hierzu wurden in Zusammenarbeit mit dem IMF I vier Hauptbestandteile aufgebaut:

- Kühlwasserkreislauf mit Betriebsoptionen entsprechend des ITER "Blanket Water Loop" bei regulären Kühlbedingungen (bis 150°C und 3 MPa) und Ausheizbedingungen (bis 240°C und 4.4 MPa)
- Rahmenwerk zur Aufnahme von Prototypen struktureller Komponenten
- Manipulatoren zur Durchführung von (fernbedienter) Handhabungsvorgänge
- Steuerungsanlagen zur rechnergestützten Versuchsführung und Datenaufnahme.

In dieser Versuchsumgebung können strukturelle Komponenten der oberen ITER ECH Antenneneinheit („ECH Upper Launcher“) bis hin zu den kompletten Abmessungen des Port Plugs untersucht werden. Mit der aktuellen Installationsphase und der laufenden Inbetriebnahme wird die erste Stufe des Untersuchungsprogramms eingeleitet, in der verschiedene Fertigungskonzepte eines prototypischen Ecksegmentes für ein Blanket Shield Module (BSM) auf ihr thermohydraulisches Betriebsverhalten geprüft werden. Diese Tests sollen die experimentelle Validierung der bei der Designauslegung verwendeten thermohydraulischen Parameter liefern und damit die Auswahlkriterien bei der Entscheidung über ein Referenz-Fertigungskonzept vervollständigen.



Schematischer Überblick über die Hauptbestandteile der Launcher Handling Test facility (oben) und Photographie der ersten Stufe des Prototypen-Aufbaus (Positionierung des Halterrahmens vor dem Kühlkreislauf).

Für die Fertigung eines BSM Gehäuses mit einer Doppelwandstruktur werden aktuell Eckmodule über zwei konkurrierende industrielle Fertigungsrouen realisiert, die zum Einen auf dem „Heiß-isostatischen Pressen“ (HIPpen) von pulvergefüllten Kapseln und zum Anderen auf das Hochtemperatur-Löten von vorgeformten und vorbearbeiteten Edelstahlplatten basieren. Zusammen mit der thermo-hydraulischen Designverifikation werden grundlegende Handhabungsstudien vorbereitet, mit denen geeignete Schnittstellen zum ITER Standard Remote Handling (RH) System und die Machbarkeit von spezifischen RH Anforderungen des ECH Upper Launchers nachgewiesen werden. In einer längerfristigen Perspektive werden die Handhabungsuntersuchungen so ausgerichtet, dass sie die Grundlagen für eine zukünftige „Assembly and Testing Facility (ATF)“ schaffen, mit denen die einzelnen Hauptkomponenten des ECH Upper Launchers nach ihrer Fertigung in der Industrie zum Gesamtsystem zusammengefügt und im Hinblick auf ihre Bereitstellung und Endnahme bei ITER umfassend getestet werden.

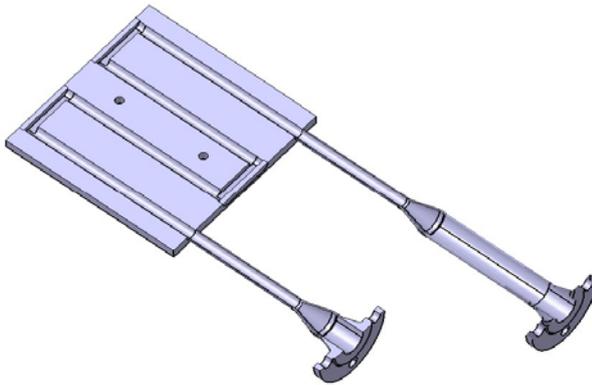
In der ersten Phase des Aufbaus wurde der „ITER Blanket Water“ spezifische Kühlkreislauf eingerichtet. Dieser wurde als kompakte Einheit konzipiert und bei der Fa. AKB (Greifswald) gefertigt. Der Wasserkreislauf besteht in der Hauptsache aus einem Vorratsbehälter, in dem das Wasser mit einem statischen Druck von bis 4.4 MPa beaufschlagt werden kann, Heiz- und Kühlapparaturen zur Einstellung der Kühlmitteltemperatur und einer Förderpumpe, die für Hochdruck-/Hochtemperaturbetrieb geeignet ist. In den Abnahmetest wurde nachgewiesen, dass der spezifizierter Einsatzbereich für die thermohydraulischen Versuche zur Verfügung steht.

In der zweiten Phase wurde die rechnergestützte Steuerung der einzelnen Betriebsoptionen des Wasserkreislaufes realisiert, sicherheitsrelevante Signale in die Prozesssteuerung eingebunden und das Datenerfassungssystem für die primären Messgrößen (Kühlmittelflüsse, Kühlmitteldrücke, Komponenten-

und Kühlmitteltemperaturen) installiert. Mit dieser Versuchssteuerung lassen sich spezifische Versuchsführungen gestalten, insbesondere auch der ITER typische Kühlbetrieb bei 120-150 °C und 1.5 – 3.0 MPa und das Ausheizen bei 240 °C and 4.4 MPa. Während der ersten Inbetriebnahme unter realen Bedingungen konnten Drücke bis 4 MPa bei einer Temperatur von 240°C und einem Durchfluss von 4 l/s gefahren werden. Temperaturrampen bis zu 4°C/min wurden erfolgreich getestet.

In der dritten Phase wurde der Aufbau des Rahmenwerks zur Aufnahme von Prototypen struktureller Komponenten fertig gestellt. Hierzu wurde der Flansch, der für den ITER ECH Upper Launcher den vorderen Abschluss der tragenden Hauptstruktur hin zum „Blanket Shield Module“ bildet, in Originalgeometrie gefertigt.

Die Versuchsführung am LHT befindet sich derzeit in der vierten Phase, in der die Aufnahme der primären Messgrößen anhand eines vereinfachten Untersuchungskörpers getestet wird und die Kalibrierung und Plausibilität der erfassten Messdaten untersucht wird (siehe Abbildung). Nach Abschluss der Untersuchungen zum Kühlwassermittelfluss und -druck nahe Raumtemperatur steht aktuell die Messgrößenaufnahme bei Kühlmitteltemperaturen im ITER Normalbetrieb an (d.h. 120 – 150°C).



Schnittbild des vereinfachten Probekörpers zur Darstellung des thermohydraulischen Verhaltens mäanderförmiger Kühlleitungen (oben), Platzierung der Temperaturaufnehmer auf dem Probekörper für die Kalibrierungsphase.

EC-Heizung und Stromtrieb – Frequenzdurchstimmbare Gyrotrons

Heizung und Stromtrieb von magnetisch eingeschlossenen Plasmen bei der Elektron-Zyklotron-Resonanzfrequenz mit Gyrotrons wird gegenwärtig bei einer festen Frequenz, die durch

die Quelle bestimmt ist, betrieben. Von Seiten der Anwendung in Kernfusionsplasmen hätte jedoch eine einstellbare veränderliche Frequenz große Vorteile:

- der Ort der Absorption im Plasma kann durch Wahl der Frequenz alleine verändert werden,
- mechanisch verstellbare Einstrahloptiken in der Nähe des Plasmas wären nicht mehr erforderlich,
- das Plasmaexperiment könnte bei verschiedenen Betriebsparametern mit ECH & CD gefahren werden.

Insbesondere auf das Auftreten von MHD Instabilitäten, deren genaue Lagen im Plasma a priori nicht bekannt sind, könnte mit einer frequenzdurchstimmbaren Quelle schnell und flexibel reagiert werden.

Die Unterdrückung von MHD-Instabilitäten in einem Plasma (so genannte 'Neoclassical Tearing Modes') mit ECCD wurde in verschiedenen Anlagen erfolgreich gezeigt (ASDEX-Upgrade, DIII-D und JT-60U).

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

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

Klassische Gyrotrons, ob konventionell mit Hohlraumresonator oder mit einem Koaxialresonator, sind in der Regel monofrequent: die Ausgangsfrequenz ist bestimmt durch die Wahl der Arbeitsmode und die Optimierung der Gyrotronkomponenten für diese spezielle Mode. Eine gezielte Frequenzänderung über einen größeren Frequenzbereich (mehrere %) ist verbunden mit dem Wechsel zu einer anderen Resonatormode. Daraus ergeben sich spezifische Fragestellungen für die Bauweise eines Gyrotrons:

- die Elektronenstrahloptik muss so ausgelegt werden, dass für alle in Frage kommenden Moden die Strahlparameter im Resonator hinreichend gut sind
- die Form des Resonators muss einen hohen Wirkungsgrad für die erzeugte HF-Leistung bei den verschiedenen Moden ermöglichen
- die Umwandlung der Resonatormoden im Launcher und quasi-optischen Wellentypwandler in eine Gauß'sche Grundmode
- reflexionsfreie Auskopplung des Strahls am Ausgangsfenster.

Im zurückliegenden Berichtszeitraum wurden innerhalb dieses Projekts Arbeiten zu folgenden Themen durchgeführt: Quasi-optischer Wellentypwandler, CVD-Diamant-Brewster Fenster und Sonstiges.

Quasi-optischer Wellentypwandler

Der quasi-optische Wellentypwandler überführt die Resonatormode sehr hoher Ordnung in eine Gauß'sche Grundmode, die die Leistung durch das Ausgangsfenster transportiert. Er besteht

aus einer Hohlleiterantenne mit Wandstörungen, dem so genannten Launcher, und drei Reflektoren, die den Ausgangsstrahl weiter umformen. Für das Multifrequenzgyrotron wurde der Wellentypwandler optimiert, damit er neun Moden zwischen $TE_{17,6}$ (105 GHz) und $TE_{23,8}$ (143,3 GHz) jeweils in einen Gauß'schen Strahl wandelt, der für alle Moden möglichst identische Parameter hat. Die Optimierung, um einen solchen Ausgangsstrahl zu erzeugen, kann in zwei Einzeloptimierungen unterteilt werden. Zuerst kann die Störung an der inneren Wand des Launchers optimiert werden, damit er ein möglichst gaußförmiges Feld abstrahlt und gleichzeitig nur ein Minimum an Streustrahlung für alle neun Moden produziert. Als zweites werden die Reflektoren so ausgelegt, damit möglichst die gesamte Leistung durch die Apertur des Fensters propagieren kann. Dies wird durch eine Optimierung der Größe und Position der Taille des Gauß'schen Strahls für alle Moden erreicht.

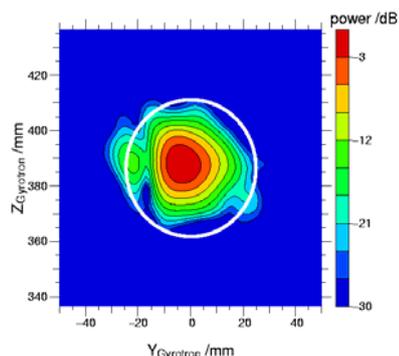
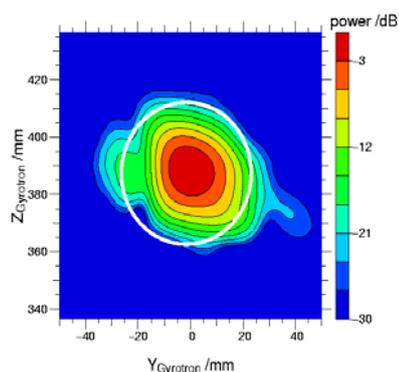
Im vergangenen Jahr wurde die zweite und dritte Generation des quasi-optischen Wellentypwandlers für das Multifrequenzgyrotron entworfen. Die Ergebnisse sind nachfolgend dargelegt.

Die Optimierung des Launchers, der sowohl in der zweiten als auch in der dritten Generation des Wellentypwandlers eingesetzt wird, ergab einen Anteil des Gauß'schen Grundmodes von über 90 % im abgestrahlten Feld für alle neun Moden. Der Ausgangsstrahl ist gut fokussiert und die Streustrahlung ist gering. Der Anteil des Gauß'schen Grundmodes für alle Moden, wie er in der ersten Tabelle dargestellt ist, bezieht sich auf eine Ebene nach der Reflexion am quasi-elliptischen Reflektor, da der Strahl hier paraxial ist.

Da sich der Spreizwinkel der neun Moden unterscheidet, strahlt jede Mode ein leicht unterschiedliches Feld ab und auch die Richtung des Strahls variiert. Dies hat in der Übertragungsleitung den Effekt, dass das Zentrum des Strahls je nach Mode an einer anderen Stelle des Spiegels auftrifft. Wenn ein fokussierender Spiegel nicht im Zentrum getroffen wird, ist der Reflexionswinkel ein anderer und damit wird der Strahl in eine leicht unterschiedliche Richtung gelenkt. Ein kleinerer Krümmungsradius des Spiegels hat hierauf einen größeren Einfluss. Also wird dieser Effekt einen zusätzlichen Versatz auf den Ausgangsstrahl in der Fensterebene bewirken. Er kann verringert werden, wenn die Reflektoren weniger stark fokussieren. Mit dem Brewsterfenster, das im nächsten Abschnitt im Detail beschrieben wird, steht nur eine kleine Fensterapertur mit 50 mm Durchmesser zur Verfügung. Durch eine Optimierung der Krümmungsradien der toroidalen Spiegel konnte eine Transmission durch das Fenster von mehr als 95 %, für die meisten Moden sogar mehr als 97 %, erreicht werden. Die Zahlen der einzelnen Moden sind in folgender Tabelle aufgelistet.

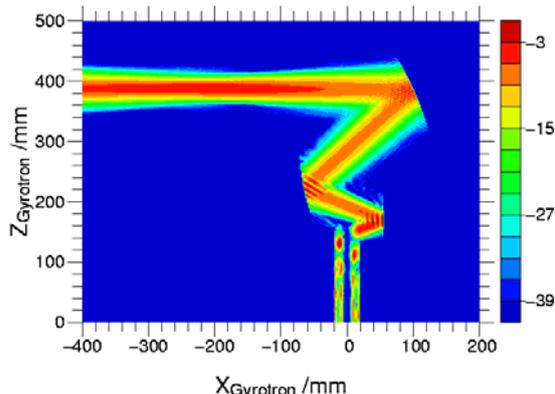
Mode	Frequenz [GHz]	Komplexer Gauß'scher Anteil [%]	Transmission [%]
$TE_{17,6}$	104,9	95,2	96,9
$TE_{18,6}$	108,2	92,9	96,2
$TE_{19,6}$	111,5	90,4	95,4
$TE_{19,7}$	120,8	94,8	97,5
$TE_{20,7}$	124,1	93,4	97,3
$TE_{21,7}$	127,4	91,7	97,1
$TE_{21,8}$	136,7	93,0	97,8
$TE_{22,8}$	140,0	93,3	97,9
$TE_{23,8}$	143,3	91,5	97,4

Gauß'scher Anteil und Transmission durch das Ausgangsfenster für den Modenwandler der zweiten Generation.



Feldverteilung der Moden $TE_{17,6}$ (oben) und $TE_{22,8}$ (unten) auf dem Fenster (Modenwandler der zweiten Generation).

Die Feldbilder an der Position des Fensters für die Moden $TE_{17,6}$ und $TE_{22,8}$ der zweiten Generation des Wellentypwandlers sind in der Abbildung dargestellt. Der weiße Kreis stellt die Fensterapertur dar. Für alle Moden ist der Strahl gut fokussiert. Die auf dem Bild sichtbare Nebenkeule hat ihren Ursprung aus dem abgestrahlten Feld des Launchers. In der Querschnittsdarstellung des quasi-optischen Wellentypwandlers, die in der nächsten Abbildung dargestellt ist, werden die fokussierenden Eigenschaften für die $TE_{17,6}$ -Mode besonders deutlich.



Querschnitt eines Modenwandlers der zweiten Generation am Beispiel der $TE_{17,6}$ Mode.

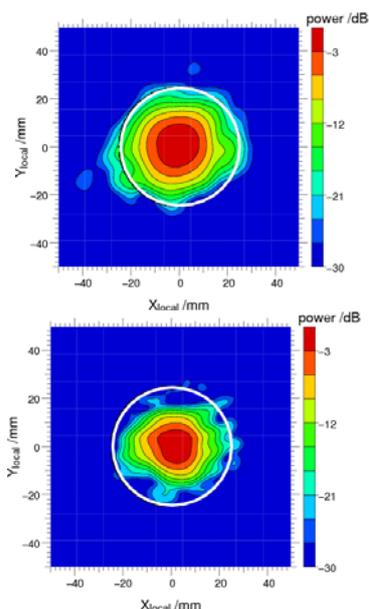
Eine weitere Optimierung des quasi-optischen Wellentypwandlers wurde mit Einsatz von phasen-korrigierenden Reflektoren, deren Oberfläche sich nicht mehr durch eine mathematische Funktion geschlossen darstellen lassen, erreicht. Die Reflektoren der dritte Generation basieren auf den toroidalen Konturen der Reflektoren aus der zweiten Generation. Zusätzlich wurde die Oberfläche durch eine numerische Mehrfrequenzoptimierung an das Strahlprofil angepasst, um einen höheren Anteil der Gauß'schen Grundmode im Ausgangsstrahl zu erzielen. Die Zahlen für die neun Moden sind in der zweiten Tabelle aufgelistet. Mit einem Anteil der Gauß'schen Grundmode von mehr als 93 % konnte eine Verbesserung um durchschnittlich 2 % erreicht werden. Ebenso

konnte die Transmission durch das Ausgangsfenster durch diese Optimierung, gesteigert werden (Tab.). Die Verbesserung kann ebenso aus den Feldbildern der dritten Generation, die in der nächsten Abbildung abgebildet sind, abgelesen werden. Bei einem Vergleich der Feldbilder mit denen der zweiten Generation ist eine Reduktion der Seitenmaxima deutlich sichtbar.

Mode	Frequenz [GHz]	Komplexer Gauß'scher Anteil [%]	Transmission [%]
TE _{17,6}	104,9	97,7	97,3
TE _{18,6}	108,2	97,1	97,5
TE _{19,6}	111,5	95,0	97,1
TE _{19,7}	120,8	96,7	97,7
TE _{20,7}	124,1	96,0	97,3
TE _{21,7}	127,4	94,5	96,9
TE _{21,8}	136,7	93,3	97,9
TE _{22,8}	140,0	95,1	98,0
TE _{23,8}	143,3	94,2	97,7

Gauß'scher Anteil und Transmission durch das Ausgangsfenster für einen Modenwandler der dritten Generation.

Für die Zukunft ist vorgesehen, diese theoretischen Ergebnisse durch Messungen des quasi-optischen Wellentypwandlers mit einem vektoriellen Netzwerkanalysator im D-Band mit hohem Dynamikbereich zu verifizieren.



Feldverteilung am Fenster der Moden TE_{17,6} (oben) und TE_{22,8} (unten) auf dem Fenster (Modenwandler der dritten Generation).

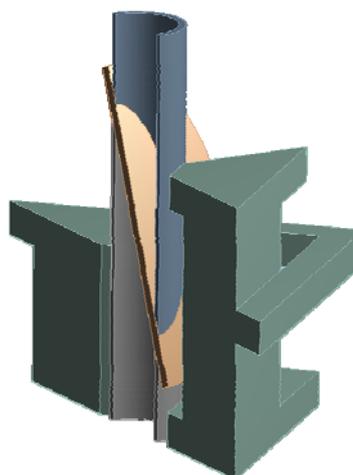
CVD-Diamant-Brewster-Fenster

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

Form eines Brewster-Fensters mit der effektiven Öffnung von 50 mm verwendet.

Wegen der elliptischen Umfangsform sind die während der Lötung auftretenden Spannungen von denen bei runden Scheiben deutlich verschieden. Rechnungen zeigen, dass die Spannungen um den Faktor 1.3 erhöht sind. Um zu untersuchen, ob eine Diamantscheibe den auftretenden Spannungen Stand hält, wurden Lötversuche bei *Thales Electron Devices* (TED) mit einer Quarzscheibe und einer einfachen Keramikscheibe (Al₂O₃) durchgeführt. Die thermomechanischen Eigenschaften der Keramikscheibe sind denen des Diamants deutlich ähnlicher als die der Quarzscheibe. Es wurde eine verbesserte Lötvorrichtung untersucht und im Hinblick auf eine möglichst spannungsarme Lötung optimiert. Während die Quarzscheibe nach der Lötung beim Abkühlen zerbrach, ergab die Lötung mit der Keramikscheibe ein stabiles Fenster, das jedoch an einer Stelle ein kleines Vakuumleck aufwies. TED ist zuversichtlich, dass durch verbesserte Lötbedingungen eine vakuumdichte Lötung gefertigt werden kann.

Um sicherzustellen dass die Lötung der Diamantscheiben erfolgreich verläuft, wurde die Wandstärke der Kupferrohre in Abstimmung mit TED auf 0.6 mm reduziert und FEM Rechnungen durchgeführt (Abbildung). Die Rechnungen zeigen, dass die auftretenden Kräfte nach der Lötung nur ca. 40 % der üblicherweise angenommenen zulässigen Maximalkräfte betragen.



Modell für FEM-Rechnungen zu Spannungen und Deformationen einer Lötung mit Diamant Scheibe.

Schrittweise durchstimmbarer Magnet

Ein schnell durchstimmbares Magnetsystem wurde bei *Cryomagnetics Inc.* in den USA bestellt. Der Entwurf des Herstellers wurde nachgeprüft und einvernehmlich diskutiert, der Magnet befindet sich zur Zeit im Bau.

Dieses System erlaubt die schnelle Veränderung des Magnetfeldes im Bereich 4,15 – 5,67 T, die dann eine schnelle Frequenzänderung des Gyrotrons im Bereich 105 GHz – 143 GHz in Schritten von ungefähr 3 GHz innerhalb 0,5 s alle 10 s ermöglicht. Das maximal erreichbare Feld beträgt 7,2 T, der Magnet kann deshalb auch für das 170 GHz Gyrotron verwendet werden (ITER).

Elektronenkanone

Bei der russischen Firma *GYCOM* wurde eine Ersatzkanone für das Gyrotron bestellt. Diese Kanone wurde in 2007 geliefert und gemeinsam mit dem Gyrotron in Betrieb genommen und erfolgreich getestet.

Sonderprojekt Mikrowellenheizung (PMW) für Wendelstein 7-X

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

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

Seriengyrotrons für ECRH an W7-X

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

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

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

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

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

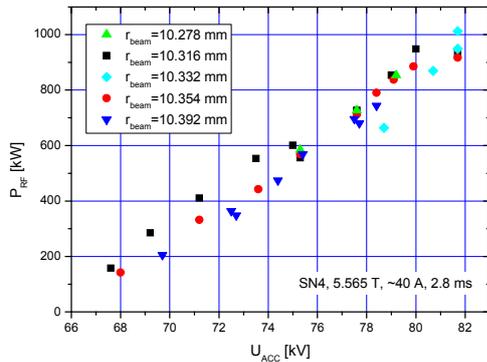


Die Serienröhre SN4 im Teststand des FZK.

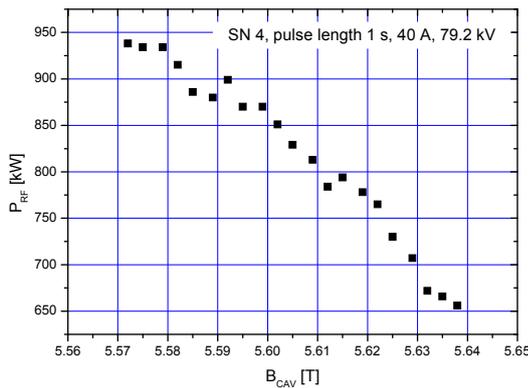
Nach den erfolgreichen Tests an der ersten Serienröhre mit Pulslängen von bis zu drei Minuten im Forschungszentrum Karlsruhe wurde diese Röhre an das IPP Greifswald ausgeliefert und dort in Pulslängen bis zu 30 Minuten betrieben. Die gerichtete Ausgangsleistung wurde kalorimetrisch in einer Entfernung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

In 2007 wurde das vierte Seriengyrotron SN4 am FZK in Betrieb genommen und bei kurzen und langen Pulsen getestet (Abb.). Das Gyrotron wurde im Kurzpulsbetrieb optimiert und die Abhängigkeit der Ausgangsleistung und der stabilen Schwingbereiche der Wunschmode ($TE_{28,8}$) von verschiedenen Einstellparametern wurde untersucht. Die gesamte HF Ausgangsleistung wurde mit einem Kurzpuls-kalorimeter, welches direkt nach dem Ausgangsfenster befestigt ist, gemessen. Bei den Experimenten, die in der nächsten Abbildung gezeigt sind, wurde der Elektronenstrahlradius im Resonator von 10.278 mm nach 10.392 mm verändert. Bei kurzen Pulsen (2.8 ms) sieht man eine stabile Ausgangsleistung von 1 MW bei den Entwurfsparametern.

Bei mittleren Pulslängen (~1 s) und langen Pulsen (mehrere Sekunden bis zu 30 Minuten) wurde eine dauerstrichfähige zylinderförmige Last mit intensiver Wasserkühlung benutzt. Eine optische Übertragungsleitung mit zwei Anpassspiegeln, zwei Polarisatoren und einem fokussierenden Spiegel transportiert die Leistung vom Austrittsfenster zum Eingang der Last. Die gesamte ausserhalb des Gyrotrons auftretende Strahlung wird während der Pulse kalorimetrisch erfasst und erlaubt deshalb eine genaue Bestimmung der verschiedenen Verlustkanäle.



HF Leistung gemessen mit dem Kurzpuls kalorimeter bei verschiedenen Strahlradien im Resonator.



Ausgangsleistung in Abhängigkeit vom Hauptmagnetfeld.

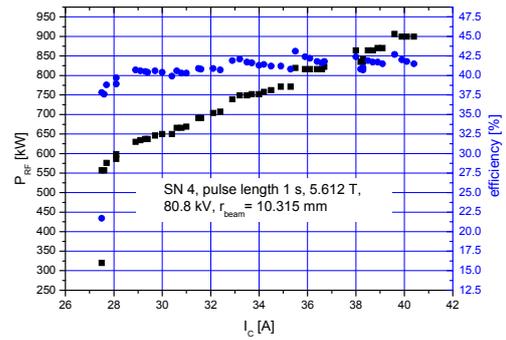
Ungefähr 3 % der gesamten ausserhalb des Gyrotrons gemessenen Leistung geht als Streustrahlung verloren.

Bei Pulsen ab ca. 1 s wird das Gyrotron mit einem sogenannten „depressed“ Kollektor betrieben, der den Wirkungsgrad erhöht und die thermische Belastung des Kollektors absenkt. Da einige physikalische Vorgänge charakteristische Zeitkonstanten von mehreren hundert ms oder sogar mehreren Sekunden haben können (z.B. Abkühlung des Emitters durch Elektronenemission, thermische Aufweitung des Resonators, Raumladungsneutralisation im Elektronenstrahl), müssen die Betriebsparameter dem Langpulsbetrieb angepasst werden. Im Allgemeinen ist damit auch ein Verlust der Leistungsfähigkeit des Gyrotrons verbunden.

Die Abhängigkeit der Ausgangsleistung vom Magnetfeld im Resonator ist in der Abbildung für 1 s lange Pulse gezeigt. Um stabilen Betrieb bei diesen Pulslängen zu erhalten, wurde das Magnetfeld im Resonator erhöht, verglichen mit den Pulsen im Millisekunden-Bereich. Für $B_{CAV} < 5.57$ T traten störende Schwingungen der konkurrierenden Moden auf. Der Wirkungsgrad des Gyrotrons betrug mehr als 40 % bei Strömen zwischen 28 A und 40 A mit einem Maximalwert von 42.5 % (siehe nächste Abbildung). Dies zeigt die gute Qualität der Elektronenkanone und des Elektronenstrahls. Der sichere Dauerbetrieb des Gyrotrons war für Ströme zwischen 27 und 44 A und einer Depression Voltage bis zu 28 kV gewährleistet.

Dauerstrichpulse wurden bis zu 30 Minuten durchgeführt, jedoch auf Grund der Einschränkungen bzgl. der Leistungsversorgung bei reduziertem Strom (< 30 A). Die damit erreichte Ausgangsleistung betrug ca. 500 kW.

Mit der maximalen Ausgangsleistung (910 kW) waren repetierliche Gyrotronpulse mit einer Länge von 180 s möglich.

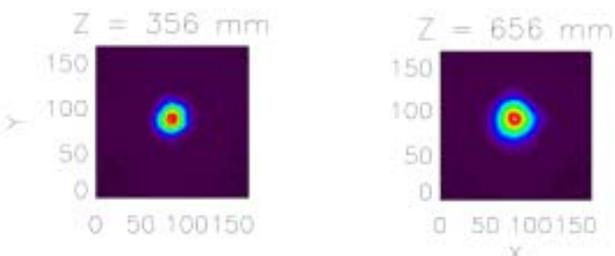


Ausgangsleistung und Wirkungsgrad aufgetragen über dem Strahlstrom.

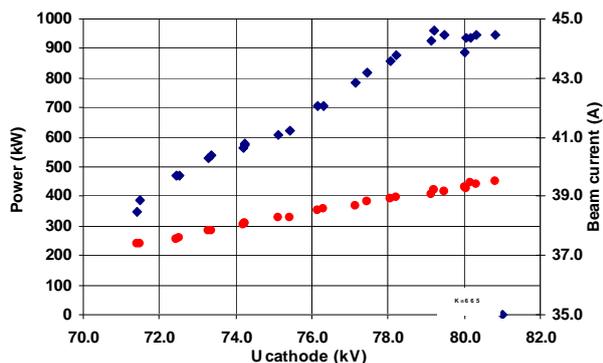
Um zusätzliche Verluste bei der Übertragung zu vermeiden, ist eine sehr gute Anpassung des Ausgangsstrahls an die Gauß'sche Grundmode der Übertragungsleitung sehr wichtig. Der Ausgangsstrahl jedes einzelnen Gyrotrons wird mittels eines Infrarot Messsystems, welches die Temperaturverteilung eines kurzen (~ ms) Pulses beobachtet, sorgfältig vermessen. Dann werden mehrere solcher Aufnahmen analysiert um die Strahlparameter zu berechnen und die Oberfläche zweier externer Korrekturspiegel zu optimieren. Bei der Röhre SN4 lagen die Strahlparameter innerhalb der üblichen Grenzen und der Gaußanteil beträgt 97 %. Die folgende Abbildung zeigt die Temperaturverteilung des Ausgangsstrahls.

Auf der Grundlage dieser Ergebnisse wurde das Gyrotron abgenommen (Factory Acceptance Test) und nach IPP Greifswald verschickt, um dort die Tests bei voller Leistung und Pulslänge durchzuführen. Die Röhre wurde mit Pulslängen bis zu 8 Minuten und einer Ausgangsleistung von 820 kW getestet. Aufgrund eines Ausfalls der Kühlung während der Tests mussten diese jedoch abgebrochen werden. Das Gyrotron wurde zur Reparatur zurück zum Hersteller transportiert. Eine erste Begutachtung zeigte, dass bei diesem Unfall Teile des internen quasi-optischen Systems aufgrund thermischer Überlastung beschädigt wurden.

Die Seriengyrotrons #2 und #3 (SN2 und SN3), welche die ersten Abnahmetests am FZK und IPP nicht bestanden haben, wurden beim Hersteller wieder geöffnet und sorgfältig untersucht. Alle Teile waren in ausgezeichnetem Zustand, im Bereich des Strahl tunnels waren jedoch Beschädigungen sichtbar. Dieser Bereich ist mit abwechselnd übereinander gestapelten Kupfer- und Keramikringen ausgestattet. Die Hauptaufgabe dieser Konstruktion ist es, das Anschwingen von parasitären Schwingungen, die die Qualität des Elektronenstrahls unmittelbar vor dem Resonator zerstören und zu einer hohen thermischen Belastung des umgebenden Materials führen könnten, zu unterdrücken bzw. zu verhindern. Es hat sich gezeigt, dass Lötverbindungen geschmolzen waren und die Keramikringe Risse hatten. Dies deutet auf eine starke Hitzeentwicklung mit unzureichender Kühlung hin. Nach Meinung der Experten des Herstellers ist die Ursache dafür in mangelhaften Lötungen zu finden. Die Strahl tunnel beider Röhren wurden neu gefertigt und mit verbesserter Qualitätskontrolle wieder gelötet.



Thermographische Aufnahmen des Ausgangsstrahls der Röhre SN4 im Abstand 356 mm und 656 mm vom Ausgangsfenster.

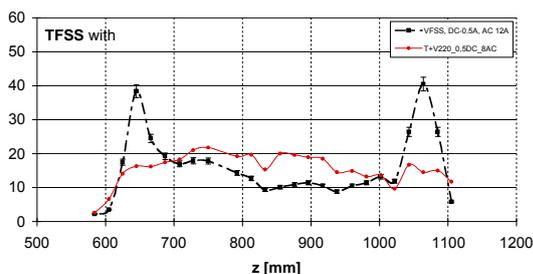


Ausgangsleistung in Abhängigkeit von der Beschleunigungsspannung und entsprechender Strahlstrom für SN2 im Kurzpulsbetrieb.

Die reparierte Serienröhre SN2a wurde im Dezember 2007 für Abnahmetests ans FZK geliefert. Bei optimierten Parametern lieferte das Gyrotron 1210 kW bei 50 A und ca. 950 kW bei den Entwurfsparametern (siehe Abbildung). Der Gauß'sche Anteil des Ausgangsstrahls beträgt 95 %. Mit diesem Gyrotron wurde keine Begrenzung der Pulslänge festgestellt, Pulse bis zu 30 Minuten mit 550 kW und 180 s mit 850 kW waren möglich. Die Pulslänge bei bestimmten Parametern war jedoch begrenzt durch das Auftreten parasitärer Schwingungen bei 122 GHz. Dies führte zu einem starken Anstieg des Leckstroms und des Vakuumdrucks in der Röhre. Gegenwärtig wird untersucht, ob diese unerwünschte Schwingungen durch eine Zyklotron-Resonanz Wechselwirkung im Strahlentunnel angeregt werden können.

Die Konditionierung dieser Röhre musste jedoch aufgrund eines Wasserlecks in der Absorberlast gestoppt werden, die Tests werden am IPP in Greifswald fortgesetzt.

Der Kollektor ist eine Komponente, die aufgrund der hohen thermomechanischen Belastung sehr sorgfältig entwickelt werden muss. Alle Gyrotrons sind standardmässig mit einer Solenoidspule, die den Auftreffort der Elektronen auf der Kollektorinnenfläche periodisch entlang der Längsachse verschiebt (< 10 Hz), ausgestattet (VFSS). Dadurch kann die spezifische Wärmeübertragung auf einen technisch handhabbaren Wert von weniger als 500 W/cm^2 begrenzt werden. Zusätzlich wurde ein transversales Ablenssystem mit 6 Spulen gebaut und getestet. Diese Spulen werden mit dem normalen Drehstromnetz gespeist und erzeugen ein rotierendes dipolartiges Magnetfeld senkrecht zur Längsachse des Gyrotrons (TFSS). Aufgrund der höheren Ablenkfrequenz (50 Hz) sollte die Maximaltemperatur auf der inneren Kollektoroberfläche deutlich kleiner sein. Beim gemeinsamen Betrieb der beiden Ablenssysteme konnte eine Reduzierung der Maximaltemperatur um den Faktor 2 erreicht werden (Abbildung).



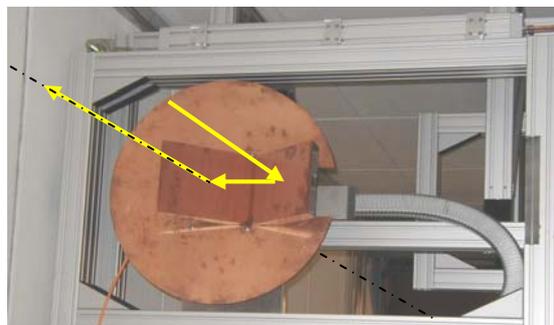
Temperaturerhöhung des Kollektors bei VFSS (schwarze Kurve) und kombinierter Betrieb (rote Kurve).

Übertragungsleitungen für ECRH an W7-X

Das Übertragungssystem besteht aus Einstrahl- und Vielstrahl-Spiegelleitungen (MBWG). Für jedes Gyrotron wird eine Anpassoptik mit fünf Spiegeln benutzt. Zwei dieser Spiegel (M1, M2) formen den Ausgangsstrahl des Gyrotrons zu einem Gauß'schen Strahl mit den richtigen Parametern, mit zwei gerillten Spiegeln wird die für optimale Absorption im Plasma benötigte Polarisation eingestellt. Ein fünfter Spiegel richtet den Strahl auf eine Spiegelgruppe (BCO), die fünf Strahlen zu einem Bündel zusammenfasst und in den MBWG einkoppelt. Die Vielstrahlspiegel sind so ausgelegt, dass sie bis zu sieben Strahlen (fünf bei 140 GHz, einen bei 70 GHz und einen Ersatzkanal) vom Gyrotronbereich (Eingangsebene) zur Stellarator-Halle (Ausgangsebene) übertragen können. In der Ausgangsebene der MBWG trennt eine Spiegelanordnung (BDO) die Strahlen und verteilt sie auf die einzeln verstellbaren Antennen im Vakuum-Gefäß von W7-X. Um die gesamte Leistung zum W7-X zu übertragen, sind zwei symmetrisch angeordnete MBWGs installiert.

In 2007 konzentrierten sich die Arbeiten auf die Fertigung der Spiegeltypen M13 und M14, die die Strahlen nach der Auftrennung im BDO in die Vakuumfenster vor den Antennen einstrahlen. Diese Spiegel werden in zwei Türmen installiert, die einschließlich der Spiegelhalterungen, Absorber und Steuerstrukturen weitgehend aufgebaut wurden.

Im Endzustand des ECRH-Systems werden diese Türme auch die in den Strahlengang einfahrbaren Retro-Reflektoren aufnehmen, die – zur Messung des Übertragungsverhaltens im Dauerbetrieb – den vorwärts laufenden Strahl von einem Gyrotron über die Leitung zurück in die Absorberlast reflektieren. Aktuell sind diese Reflektoren auf halbem Weg in den MBWGs installiert (siehe Abbildung). Damit konnten erste Messungen der Vorwärts-Rückwärts-Übertragungseffizienz durchgeführt werden; sie ergaben einen Wert von ca. 97 % (für 10 Reflexionen an den 2×3 MBWG-Spiegeln und den vier zusätzlichen Spiegeln zur Kalorimeterlast), in sehr guter Übereinstimmung mit theoretischen Werten.

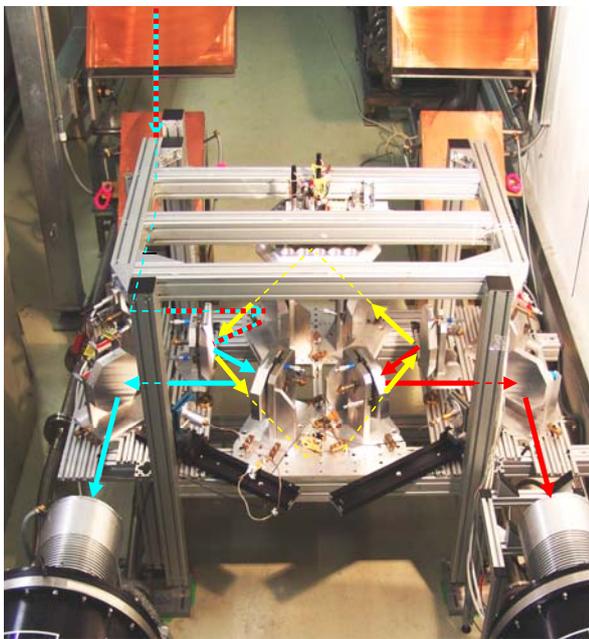


Retro-Reflektor, montiert im Strahlkanal. Der in Vorwärtsrichtung einfallende Strahl, der reflektierte Strahl und die Symmetrieachse des Vielstrahl-Wellenleiters sind eingezeichnet.

Im Zuge der Installation von Gyrotrons wurden die Oberflächen der entsprechenden Anpassspiegel M1, M2 auf der Basis von thermographisch ermittelten Strahlstrahlen berechnet und gefertigt. Ebenso wurde ein neuer Empfänger für den an M1 über ein Phasengitter ausgekoppelten Teststrahl entwickelt, der am nächsten Gyrotron eingesetzt werden soll. Um Kompatibilität mit hohen Leistungen zu erreichen, wurden dazu glattwandige Multimode-Hörner entwickelt, die ein dem Gauß'schen Strahl entsprechendes Antennendiagramm besitzen.

Wie im vergangenen Jahr konnte das ECRH - System auch für den Hochleistungstest von neuen Komponenten eingesetzt werden. Unter anderem wurde ein Hochleistungs-Diplexer untersucht, der als Leistungsaddierer für zwei Gyrotrons

entwickelt wird und auch als schneller Schalter (FADIS) eingesetzt werden kann. Die Umschaltung zwischen zwei Ausgangskanälen erfolgt (ohne bewegliche Teile) durch geringfügige Frequenzumtastung des Gyrotrons, die durch entsprechende Modulation der Beschleunigungsspannung (siehe nächsten Abschnitt) hervorgerufen wird. Für den Test



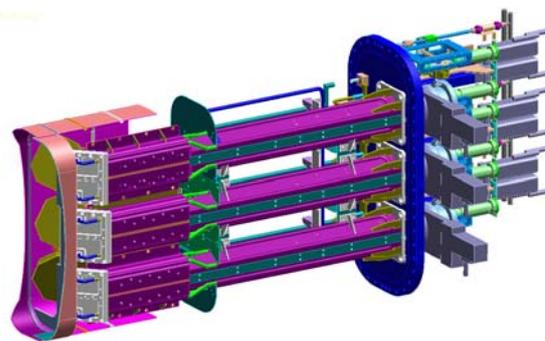
Das FADIS Experiment im Strahlentunnel des ECRH Systems an W7-X. Der Eingangsstrahl des Maquette-Gyrotrons wird von hinten (gestrichelte Linie von links oben) in den Resonator eingekoppelt. Die beiden Ausgangsstrahlen im Vordergrund werden in die beiden Absorberlasten (links und rechts) fokussiert.

wurde ein quasi-optischer Prototyp-FADIS, der in Zusammenarbeit mit dem IAP Nizhny Novgorod entwickelt worden war, im Strahlkanal installiert (Abbildung) und mit dem Maquette-Gyrotron verbunden. Es wurden Schaltexperimente mit Schaltzeiten zwischen 1 kHz und 20 kHz durchgeführt. Bei einer Schaltfrequenz von 5 kHz und einer Frequenzumtastung von ca. 25 MHz (entsprechend einem Spannungsmodulationshub von 4 kV) wurden Schaltkontraste über 90 % erreicht. Die Experimente bestätigen das Schaltprinzip und die Möglichkeit, schnelle Hochleistungs-Millimeterwellenschalter für Dauerbetrieb zu entwickeln. Ein für ITER wichtiges Experiment zur Addition der Leistung von zwei Gyrotrons ist in Vorbereitung.

In-vessel-Komponenten für ECRH an W7-X

Die ECRH ist die einzige Heizmethode an W7-X, die bereits zu Experimentbeginn ihre volle Leistungsfähigkeit haben wird. Sie ist weiter auch die einzige Heizmethode, die einen Dauerstrichbetrieb bei W7-X ermöglichen wird. Die am meisten belastete ECRH-Komponente ist die Antenne. Ihre Konstruktion ist abgeschlossen. Die meisten der Antennenkomponenten sind bereits gefertigt und der Zusammenbau hat begonnen.

Der Arbeitsbereich der ECRH kann erheblich erweitert werden, wenn ausser der standardmässig geplanten zweiten harmonischen X-Mode Einstrahlung (X2) auch die zweite harmonische O-Mode Einstrahlung (O2) und die dritte harmonische X-Mode Einstrahlung (X3) verwendet werden können. O2-Mode Einstrahlung ermöglicht das Erreichen hoher Dichten, die für einen effizienten Betrieb des W7-X Divertors notwendig sind. X3-Mode Betrieb ermöglicht Experimente bei einem um 33% erniedrigten Magnetfeld. Allerdings werden die beiden Moden bei einem einzigen Plasmadurchgang nur zu 40-80 % absorbiert. Die transmittierte Leistung würde zu einer



CAD Zeichnung des W7-X Front Steering launchers.

thermischen Überlastung des Hitzeschilds auf der Plasma-gefäßinnenseite führen. Deshalb werden an den Auftreffpunkten der ECRH-Strahlen speziell gekühlte Reflektoren aus TZM (Titan, Zirkon, Molybdän) eingesetzt, die die Wandbelastung reduzieren und die Strahlen nochmals gerichtet durch das Plasma schicken. Diese hochbelasteten Teile wurden in einer verbesserten Form bei der erwarteten ECRH-Belastung getestet. Im Vergleich zu den ersten Tests in 2006 wurde hier die Kacheloberfläche poliert und damit die absorbierte Mikrowellenleistung auf den aus Niederleistungsmessungen bestimmten Wert von 0.3% reduziert. Die Kenntnis der Strahlposition, der Polarisation und der absorbierten Leistung ist unabdingbar für einen zuverlässigen ECRH Betrieb. Deshalb werden in die Hitzeschutzkacheln kleine Hohlleiterkoppellöcher eingebaut. Das Mikrowellensignal wird dann mittels 4 mm Rundhohlleitern an der Plasmagefäßwand entlang über etwa 2 m zum B-Typ Stützen geführt. Die genaue Position und die Trassierung der 120 Hohlleiter wurden in enger Zusammenarbeit mit der Gruppe KIP (Komponenten im Plasmagefäß) festgelegt.

Kühlsystem für ECRH an W7-X

Der Aufbau und die Inbetriebnahme aller 10 Kühlmodule für die Gyrotrons wurde abgeschlossen, die Anschlussarbeiten an das jeweilig in Test gehende Gyrotron werden Zug um Zug ausgeführt. Ebenso ist der Aufbau und die Inbetriebnahme sämtlicher Kühlmodule für die Übertragungsleitung und die Hochleistungs-Absorberlasten abgeschlossen. Im Berichtsjahr wurde das letzte noch ausstehende Kühlmodul für die Einkoppelantennen installiert und in Betrieb genommen.

Energieversorgung für ECRH an W7-X

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

Im Jahr 2007 wurde die Fertigung der Hochspannungs-Modulatoren sowie der Heizungsregler und Gyrotron-Schutzeinrichtungen abgeschlossen. Alle Systeme wurden ans IPP/Greifswald geliefert und dort installiert. Eine weitere Kontrolleinrichtung wurde entwickelt, die eine genaue Fehlerlokalisierung im Falle einer Störung ermöglicht.

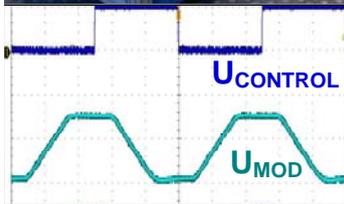
Während des Betriebs mit verschiedenen Gyrotrons konnten die Spezifikationen der Hochspannungseinheiten bestätigt werden. Insbesondere wurde die geforderte Anstiegsrate von 600 V/ μ s nachgewiesen. Die nächste Abbildung zeigt einen kompletten Hochspannungsmodulator und ein typisches Ausgangssignal bei einer Modulationsfrequenz von 10 kHz und einem Modulationshub von 15 kV.

Der Prototyp-Modulator wird zurzeit auf denselben Stand wie die Serienmodulatoren gebracht.

MSR-Technik für ECRH an W7-X

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

Das Steuer- und Kontrollsystem sowie eine erste Version der Visualisierung wurden installiert und getestet. An einer laufenden Verbesserung und Anpassung auf Parallelbetrieb von Gyrotrons unter den Betriebsbedingungen am IPP Greifswald wird gearbeitet. Die jeweils durchgeführten Verbesserungen wurden Schritt für Schritt in die Gesamt-Anlagensteuerung integriert und bei den bereits mit Gyrotrons bestückten Boxen erfolgreich in Betrieb genommen.



Hochspannungs-Modulator (oben) und die gemessene Ausgangsspannung (unten) bei einem Modulationshub von 15 kV bei einer Frequenz von 10 kHz. Die Messung bestätigt die spezifizierte Anstiegsrate von 600 V/μs.

Erste Experimente zur Einbindung des ECRH Regel- und Kontrollsystems in das Hauptkontrollsystem von W7-X verliefen erfolgreich, die Arbeiten werden weiterentwickelt mit dem Ziel, ein weitgehend automatisiertes Datenerfassungs-System einzubinden. Für die mit zunehmender Anzahl der Gyrotrons wachsenden Aufgaben im Bereich thermographische Messungen, Spiegeljustierung und Überwachung des Strahlkanals wurden eine Infrarotkamera mit hoher räumlicher Auflösung sowie 6 einfache Thermokameras beschafft.

Für die Justierung der Spiegel M14 (letzter Spiegel vor dem Torusfenster) wurde der Prototyp eines automatischen Nachführsystems erfolgreich getestet. Es beruht auf der Auskopplung eines Teststrahls von der Oberfläche M14, der mit einem Strahlrichtungsmodulator konisch gescannt wird, sowie einer phasen-

synchronen Detektion zur Ermittlung von Richtung und Größe der Strahlverschiebung.

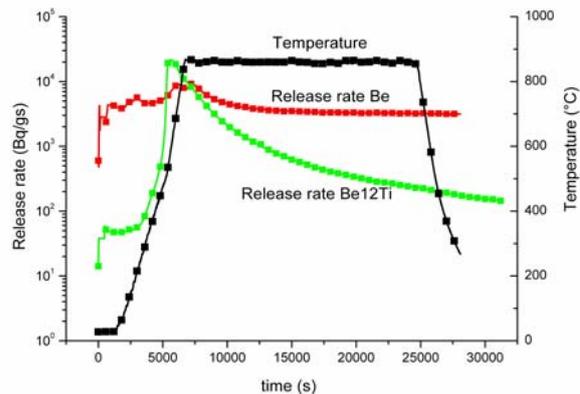
Experimentelle Bestimmung der Tritiumfreisetzung und Entwicklung der Mikrowellensinter-technik für die Herstellung von BeTi Kugeln.

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

Langfristiges Ziel des Institutsbeitrages ist die experimentelle Bestimmung der Tritiumfreisetzung und die Korrelation dieser mit der Mikrostruktur und der Phasenzusammensetzung mit dem Ziel eines optimierten Herstellungsprozesses. Ein wichtiger damit unmittelbar zusammenhängender Arbeitsschwerpunkt stellt die Entwicklung der Mikrowellensinter-technik für die Herstellung von BeTi Kugeln für ein Fusionsblanket im Labormaßstab (einige kg pro Woche) zur Erzielung einer optimierten Tritiumfreisetzung dar.

Die wichtigsten Ergebnisse im Berichtszeitraum werden kurz zusammenfassend dargestellt.

Die Tritiumfreisetzungsmessungen an BeTi Proben wurden im Fusionsmateriallabor des IMF II durchgeführt. Untersucht wurde heißisostatisch verdichtetes Be₁₂Ti. Dazu wurden Proben mit einem Gewicht von ca. 0,1g mit H₃ bei 850°C für 6 h beladen. Die beladenen Proben werden in die Tritiumfreisetzungsanlage eingebaut und mit einem definierten Temperaturverlauf ausgeheizt. Das dabei freigesetzte Tritium wird in einer Ionisationskammer gemessen. Die Abbildung zeigt den Temperaturverlauf und im Vergleich die Freisetzungsraten einer Be₁₂Ti und einer Be Probe.



Tritiumfreisetzung von Be₁₂Ti und Be.

Bereits während der Aufheizvorgangs ab ca. 300 °C beginnt die Freisetzung bei beiden Materialien. Die maximale Freisetzung wird bei Be₁₂Ti in einem Temperaturbereich zwischen 595 und 670 °C bei reinem Be erst bei 850°C erreicht. Der rasche Abfall der Freisetzung bei der Haltetemperatur von 850°C von Be₁₂Ti im Vergleich zum reinen Be ist ein weiteres deutliches Indiz für die beschleunigte Tritiumfreisetzung bei niedrigeren Temperaturen.

Pulvermetallurgisch hergestellte Proben waren bis zum Ende des Berichtszeitraumes noch nicht für diese Tritiumfreisetzungsmessungen einsetzbar.

Im Rahmen der eingeschränkten finanziellen Möglichkeiten wurde ein Mikrowellenapparat konzipiert und aufgebaut, mit dem Ziel, pulvermetallurgisch hergestellten Be-Proben mit Hilfe der Mikrowellentechnik zu sintern (nächste Abb.). Hierbei handelt es sich um einen Mikrowellenresonator der auf einem Standard-Rechteckwellenleiter basiert und bei einer Frequenz von 2,45 GHz in der TE₁₀₃-Mode betrieben wird. Dieser Resonator lässt sich mithilfe eines Kurzschlusschiebers und eines Tuners manuell so in Resonanz bringen, dass sich die eingebrachten Proben maximal erwärmen lassen. Aufgrund der Toxizität des Berylliums wurden zur Inbetriebnahme und zur Prozessoptimierung bisher ausschließlich Versuche mit Titanpulverproben durchgeführt. So konnten diese ersten Versuche auch außerhalb der Handschuhbox gefahren werden. Um eine Steuerung des Prozesses zu ermöglichen, wurde eine Temperaturmessung sowohl mit einem Pyrometer als auch mit einem Mantelthermoelement realisiert. Die ersten Versuche waren erfolgreich und sollen im nächsten Jahr in ersten Sinterexperimenten von BeTi Kugeln münden.



Versuchsstand zur Mikrowellensinterung von BeTi Kugeln.

Beteiligte Mitarbeiter:

DI A. Arnold, K. Baumann, Dr. B. Bazylev, **Dr. G. Dammertz**, DI J. Flamm (Universität Karlsruhe), **Dr. G. Gantenbein**, "GORAIEB Versuchstechnik", Dr. R. Heidinger (IMF I), Dr. S. Illy, Dr. J. Jin, Dr. S. Kern, Dr. R. Kochergov, **Dr. I. Landman**, R. Lang, DI W. Leonhardt, **Dr. G. Link**, DI A. Meier (IMF I), D. Mellein, Dr. P. Pestchanyi (Gastwissenschaftler), **Dr. B. Piosczyk**, Dr. O. Prinz, Dr. T. Rzesnicki, U. Saller, Dr. T. Scherer (IMF I), Dr. R. Schneider, DI M. Schmid, DI P. Späh (IMF I), W. Spiess, Dr. D. Strauss (IMF I), J. Szczesny, Prof. M. Thumm, Dr. A. Weisenburger, DI J. Weggen, H. Zhang (Gastwissenschaftler), C. Zöllner

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

IPF Stuttgart:

Dr. P. Brand, Dr. C. Lechte, M. Grünert, **Dr. W. Kasparek**, M. Krämer, Dr. H. Kumric, R. Munk, F. Müller, Dr. P. 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, T. Schulz, P. Uhren

IPP Garching:

DI M. Weißgerber

Programm NANOMIKRO

Konstitution, Synthese und Processing

Nanomineralogie

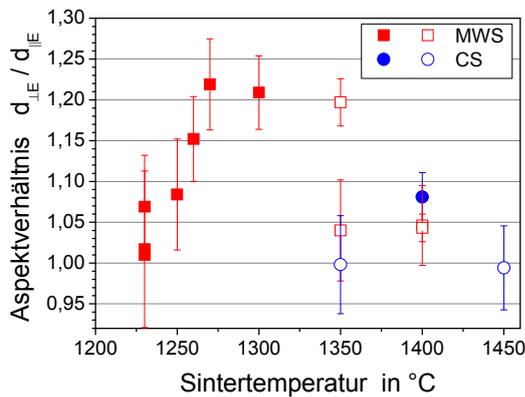
Die in Zusammenarbeit mit der Abteilung Nanomineralogie des ITC-WGT aufgebaute Mikrowellenanlage, welche mit dem vorhandenen FTIR Spektrometer gekoppelt wurde, konnte für weitere Tastversuche mit unterschiedlichen Schichtsilikaten genutzt werden. Ziel dieser Untersuchungen ist, festzustellen ob bzw. inwieweit unter dem Einfluss der Mikrowellenstrahlung sich die einzelnen IR-Spektren verändern lassen. Dazu werden jeweilige Spektren mit bzw. ohne den Einfluss der Mikrowellenstrahlung unter sonst möglichst identischen Randbedingungen miteinander verglichen. Mögliche Unsicherheiten durch den anfänglichen Handbetrieb der Messung wurden durch die Entwicklung einer geeigneten Triggerung des Systems minimiert. Diese Triggerung erlaubt die Prozesssteuerung über eine Pulsweitenregelung der Mikrowellenleistung. Das FTIR Spektrometer sammelt dabei Interferogramme sowohl während des Pulses als auch in der Pulspause. Eine anschließende Mittelung über alle Interferogramme liefert dann die IR-Spektren mit bzw. ohne Einfluss des Mikrowellenfeldes.

Diese Art der Steuerung erlaubt nun, das zu untersuchende Material mithilfe der Mikrowelle entlang einer vorgegebenen Temperatur-Zeit-Kurve zu erwärmen und bei gewünschten Temperaturen IR Spektren zu akquirieren. Durch die Pulsweitenregelung mit einer Pulsrate im Bereich von wenigen Hertz ist es möglich, potentielle Fehler durch Temperaturunterschiede beim Vergleich der Spektren mit und ohne Einfluss der Mikrowelle zu minimieren.

Die bisherigen Messungen wurden ausschließlich in Transmission durchgeführt. D.h. das zu untersuchende Probenmaterial wurde in ausreichend niedriger Konzentration mit KBr gemischt und zu ca. 1 mm dicken, IR-transparenten Proben verpresst. Aufgrund von Rekrystallisationsprozessen im KBr mit der damit einhergehenden, erheblichen Minderung der Transmissionsfähigkeit ist diese Art der Messung auf niedrige Temperaturen unterhalb 100 °C begrenzt. Um den für die Untersuchungen angestrebten Temperaturbereich nach oben zu erweitern, wurde nun ein Konzept entwickelt, welches FTIR-Messungen sowohl in Emission als auch mit Raman-Spektroskopie ermöglichen wird. Diese Erweiterung befindet sich aktuell im Aufbau.

Mikrowelleneffekt beim Sintern

Theoretische Überlegungen, von V. Semenov und K. Rybakov, IAP in Nizhny Novgorod, Russland, führen zu der Erwartung, dass sich Poren während des Sinterns im linear polarisierten Mikrowellenfeld (MWS), abhängig von der Feldrichtung asymmetrisch schließen. Ein experimenteller Nachweis solch eines Verhaltens könnte somit einen direkten Zugang zur Verifikation der theoretischen Ansätze liefern. Hierzu wurden die Untersuchungen zum Einfluss linear polarisierter Mikrowellenfelder auf die Mikrostrukturentwicklung mit einer neuen Probencharge aus nanoskaliger, Y₂O₃ stabilisierter ZrO₂-Keramik weitergeführt. Die damit gewonnenen Ergebnisse bestätigen im Wesentlichen die bisherigen Ergebnisse. Allerdings scheint der gefundene Effekt bei Temperaturen oberhalb von 1300 °C wieder abzunehmen (Abb.), was durch eine mit der Temperatur zunehmende Dominanz der thermischen Kräfte gegenüber der Feldwirkung erklärt werden könnte. Um die Sicherheit und damit die Aussagekraft der bisher gewonnenen Ergebnisse zu erhöhen, sind weitere Versuche geplant.



Bisher gefundene mittlere Aspektverhältnisse der Poren in nanoskaliger ZrO₂ Keramik nach konventionellem Sintern (CS) und Mikrowellensintern (MWS) in linear polarisiertem Feld.

Funktionskeramiken und keramische Mikrostrukturen

Die Zusammenarbeit mit dem IMF III hinsichtlich des Millimeterwellensinterns von Dickschichten aus elektrisch steuerbaren, keramischen Dielektrika wurde weitergeführt. Durch eine geschickte Versuchsführung und Auswertung konnte experimentell die selektive Mikrowellenheizung in der BST (Barium-Strontium-Titanat) Schicht nachgewiesen werden. Eine systematische, statistische Versuchsplanung soll im nächsten Jahr Aufschluss geben über den Einfluss der einzelnen Prozessparameter auf die erzielten dielektrischen Eigenschaften der BST Schichten.

Die projektierte Anlage zu mikrowellenunterstützten Gasphaseninfiltration (CVI) für die Herstellung von keramischen Mikrostrukturen wurde aufgebaut und in Betrieb genommen (Abb.). Im nächsten Jahr sind erste CVI Prozesse mit Aerogelen geplant.

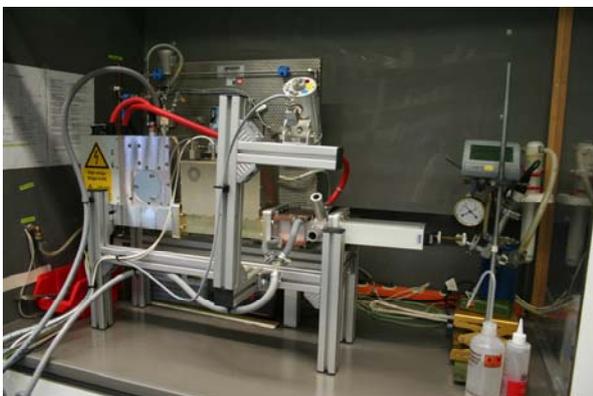


Foto der mikrowellenunterstützten CVI Anlage.

In Zusammenarbeit mit dem IMF III wurden Sinterversuche mit durch Spritzgussverfahren hergestellten Proben aus feinskaligem SiC durchgeführt. Um die dafür notwendigen Sintertemperaturen von bis zu 2300 °C zu erreichen, war zunächst ein geeigneter Aufbau mit ausreichend thermischer Isolation bzw. Temperaturstabilität zu entwickeln. Damit konnten Sinterdichten von über 90% der theoretischen Dichten erzielt werden.

Beteiligte Mitarbeiter

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

Programm NUKLEAR: Nukleare Sicherheitsforschung

Reduzierung der Radiotoxizität

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

Langlebige hochradioaktive Spaltprodukte aus bestehenden Leistungsreaktoren sollen mit schnellen Neutronen, die entweder durch ein Spallationstarget in einer beschleunigergetriebenen unterkritischen Anlage oder in einem schnellen kritischen Reaktor erzeugt werden, in kurzlebige Radionuklide umgewandelt werden. Ziel ist es, die Endlagerdauer hochradioaktiven Abfalls (Plutonium, minore Aktiniden) von einigen 10⁶ Jahren auf ca. 1000 Jahre zu reduzieren. Als Spallationstarget und als Kühlmittel solcher Anlagen sind unter anderen flüssiges Blei und Blei-Wismuth vorgesehen.

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

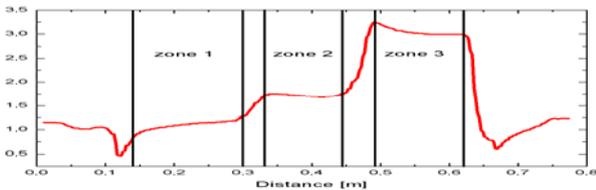
Alle Arbeiten sind eingebunden in europäische und internationale Projekte und Kooperationen, wie z.B. DEMETRA, ELSY, VELLA, MEXT (JAEA, Japan).

Die wichtigsten Ergebnisse im Berichtszeitraum werden kurz zusammengefasst dargestellt:

Für DEMETRA einem Teilprojekt in EUROTRANS wird die Optimierung des GESA Verfahrens insbesondere die Weiterentwicklung hin zu einer vor-industriellen Anlage untersucht. Im Rahmen von ELSY (Blei gekühlter schneller Reaktor zur Transmutation) wird die Entwicklung eines effektiven Korrosionsschutzes für Hüllrohre mittels GESA untersucht und es werden mögliche Materialien für Flüssigmetallpumpen hinsichtlich Korrosion und Erosion getestet. VELLA hat zum Ziel, die Zusammenarbeit in Europa auf dem Gebiet der Flüssigmetall gekühlten Systeme durch den Austausch von Personal und das zur Verfügung stellen von Versuchseinrichtungen zu verbessern. Beide Projekte begannen dieses Jahr im Oktober und haben eine Laufzeit von 3 Jahre.

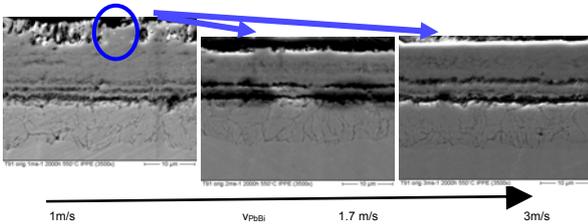
Das Ziel des MEXT Projektes ist die Optimierung von ODS Stählen für Ihren Einsatz in Flüssigmetallen durch gezielte Variation ihrer Zusammensetzung. Die Beiträge des Instituts sind die Auslagerung der Proben in COSTA und deren Nachuntersuchungen.

Im vergangen Jahresbericht wurde der Teststand für Auslagerungsexperimente in Flüssigmetall bei unterschiedlichen Fließgeschwindigkeiten vorgestellt und die ersten Experimente beschrieben. Das Geschwindigkeitsprofil in den Testsektionen wurde in diesem Jahr mit dem Code FLUIDYN 5.0 nachgerechnet (Abb.). Die angestrebten Fließgeschwindigkeiten von 1, 2 und 3m/s wurden in der Simulation zu 1, 1,75 und 3m/s nachgerechnet.



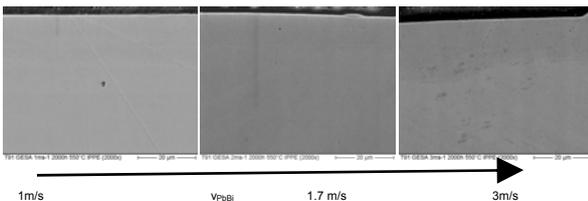
Mit FLUIDYN berechnete Fließgeschwindigkeiten im Versuchsstand.

Die Proben wurden am IHM metallographisch nachuntersucht um einen Einfluss der Fließgeschwindigkeit auf das Oxidationsverhalten zu erkennen (Abb.). Bei einer Fließgeschwindigkeit von 1m/s ist an der Probenoberfläche deutlich die äußere Magnetitschicht zu erkennen (Abb. inks). Bei der mittleren Fließgeschwindigkeit von 1,7 m/s sind nur noch wenige Reste der Magnetitschicht zu sehen (Abb. mitte). Die Proben die einer Fließgeschwindigkeit von 3m/s ausgesetzt waren hatten keine Magnetitschicht mehr (Abb. rechts). Bei allen drei Proben waren Spinelschichtdicke und deren Zusammensetzung identisch. Auch die innere Oxidationszone unterscheidet sich nicht bei den unterschiedlichen Fließgeschwindigkeiten.



REM-Aufnahmen von Querschliffen von T91 Proben, die bei verschiedenen Fließgeschwindigkeiten für 2000h ausgelagert wurden.

Dies bedeutet, dass der Oxidationsprozess bei allen 3 Geschwindigkeiten identisch war und die Magnetitschicht nach ihrer Bildung durch das PbBi bei Geschwindigkeiten $\geq 1,7\text{m/s}$ abadiert wird. GESA behandelte Proben zeigten keinen Einfluss der Flüssigmetallgeschwindigkeit auf das Oxidationsverhalten und den Oxidschichtaufbau. Alle Proben sahen nahezu identisch aus (s. nächste Abb.).



REM-Aufnahmen von Querschliffen von mit GESA modifizierten T91 Proben, die bei verschiedenen Fließgeschwindigkeiten für 2000h ausgelagert wurden.

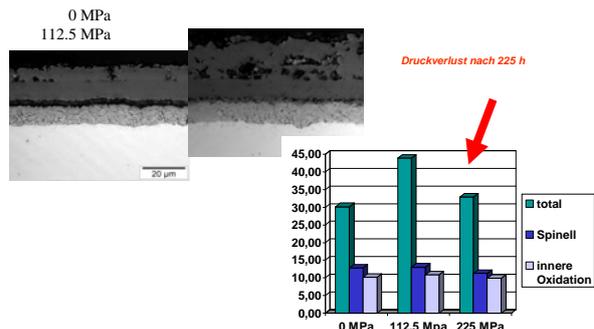
Für einen zweiten kombinierten Test, Hüllrohre unter Innendruck, wurde am IPPE, Obninsk ein Versuchstand konzipiert und die ersten 2000 h Tests durchgeführt. Zwei unterschiedliche Drücke wurden verwendet, die eine tangentialen Wandspannung von 112,5 und 225 MPa ergaben. Die Ergebnisse sind in der Tabelle zusammengefasst.

Oberflächenbeschaffenheit der Probe	Spannung [MPa]	Dauer [h]	Dehnung e [%]	Mittlere Kriechgeschwindigkeit v [%]
Original	112.5	2006	0.7	$3.52 \cdot 10^{-4}$
Modifizierte Stahloberfläche (GESA)	112.5	2006	0.74	$3.71 \cdot 10^{-4}$
Original	225.0	295	0.26*	$8.75 \cdot 10^{-4}$
Modifizierte Stahloberfläche (GESA)	225.0	1878	1.82**	$9.58 \cdot 10^{-4}$

Wichtigste Daten des Versuches Hüllrohre unter Innendruck.

Bei der höheren Spannung von 225 MPa fiel der Druck der in Situ gemessen wurde bei beiden Proben vorzeitig ab, wobei bei der originalen wahrscheinlich ein technischer Defekt dafür ursächlich war. Die GESA behandelte riss nach 1878 Stunden an einer Stelle auf. Kriechversuche an T91 (Spire Projekt) zeigen, dass bei einer Spannung von 225 MPa eine Lebensdauer von ca. 880 h zu erwarten wäre. Interessant ist, dass bei beiden Drücken die mittlere Kriechgeschwindigkeit der Originalprobe sich nur unwesentlich von der mit GESA behandelten unterschied. Bei einer tangentialen Wandspannung von 112,5 MPa ist zudem auch die Gesamtdehnung nahezu gleich.

Messungen der Oxidschichtdicken mit Hilfe von Querschliffen sind in der nächsten Abbildung zu sehen. Deutlich ist die Zunahme der Oxidschichtdicke bei der 112,5 MPa Probe gegenüber der Drucklosen zu erkennen. Da die Originalprobe bei 225MPa bereits nach 296 Stunden keine Druckbelastung mehr hatte, kann nicht abschließend geklärt werden, ob eine solche tangentialen Wandspannung einen weiteren Anstieg des Oxidschichtwachstums bewirken würde. Die beiden GESA behandelten Proben zeigten keinerlei Unterschied. Auf beiden Proben wuchs eine dünne ($< 1 \mu\text{m}$) Aluminiumoxidschicht die weitere Oxidation verhinderte.



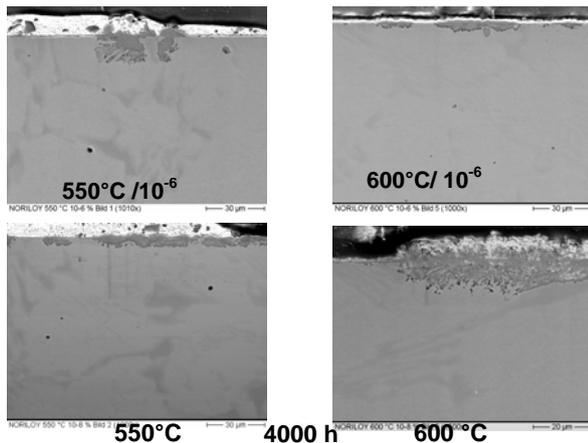
REM-Aufnahmen von Querschliffen von T91 Hüllrohren, die bei verschiedenen Innendrücken für 2000h getestet wurden.

Im Auftrag von JAEA, Japan, wurden mehrere ODS Stähle in COSTA bei 550 und 650 °C ausgelagert. Beide Materialien, die 3000 h in Kontakt mit dem Flüssigmetall waren, zeigen nur geringes Oxidschichtwachstum. Die Probe mit einem geringem Cr- Gehalt zeigt bei den höheren Temperaturen an einigen wenigen Stellen Lösungsangriff. Ob dies an der Zusammensetzung oder an herstellungsbedingten Materialfehlern liegt, kann derzeit noch nicht abschließend geklärt werden.

Im Rahmen einer von der KSB Stiftung geförderten Promotionsarbeit und in Zusammenarbeit mit dem oben bereits er-

wählten ELSY Projekt wurden aussichtsreiche Pumpenmaterialien auf ihre Tauglichkeit in Flüssigmetallen untersucht. Ein Reaktordesign sieht vor die Pumpe im heißen Teil des Reaktors einzusetzen, was völlig neue Anforderungen an das Material stellt. Es muss korrosions- und erosionsbeständig sein bei Temperaturen bis 600 °C und Relativgeschwindigkeiten von bis 20 m/s. Erste Auslagerungsexperimente bei relevanten Temperaturen (bis 600°C) in stagnierendem Blei zeigten das Potential einiger Kandidaten.

Aus diesen getesteten Werkstoffen wurde SiSiC, ein martensitischer Stahlguss, ein Chromstahlguß und die Legierung Noriloy ausgewählt. Noriloy insbesondere zeigte bei allen vier Auslagerungsbedingungen keine signifikante Oxidation und keinen Lösungsangriff wie in der nächsten Abbildung dargestellt.



REM-Aufnahmen von Querschnitten von Noriloy Proben, die bei verschiedenen Bedingungen ausgelagert wurden.

In diesem Zusammenhang wurde auch eine neuartige Werkstoffgruppe (MAX-Phasen) Maxthal getestet. Dieses Material zeigt bei allen Bedingungen (selbst bei 750 °C) keinerlei Korrosionsangriff nach 2000h. Die Proben wurden von einer TiO₂ Schicht mit SiO₂ Einlagerungen gegen fortschreitende Oxidation und Korrosion geschützt.

Der Erosionsteststand, der die Untersuchung bei realistischen Bleigeschwindigkeiten erlauben soll, wurde vollständig aufgebaut und in Betrieb genommen (Abb.).



Aufgebauter und in Betrieb genommener Erosionsteststand.

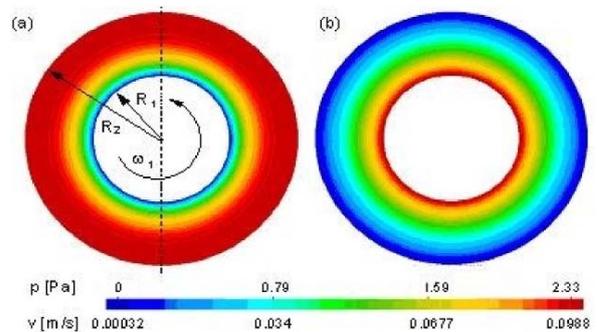
Derzeit werden bei 550 °C die ersten 4 Materialien für 2000h untersucht. Das Experiment findet unter voller Sauerstoffkontrolle bei Relativgeschwindigkeiten von bis zu 20m/s statt. Zur Simulation der Strömungsverhältnisse und zur Vorhersage der realen Relativgeschwindigkeiten von Blei und Probe je nach Lage wird seit diesem Jahr das Multiphysics Tool

FLUIDYN eingesetzt. Die Strömung zwischen zwei konzentrischen rotierenden Zylindern wird als „Taylor–Couette–Strömung“ bezeichnet und für die laminare Strömung lässt sich eine analytische Lösung angeben. Der Übergang von der laminaren zur zeitabhängigen Strömung kann mit Hilfe kritischer Re-, Taylor- oder auch Görtler- Zahlen beschrieben werden, wobei die Re-Zahl wie folgt definiert ist:

$Re = [\rho^*(R_1^* \omega_1)^*(R_2-R_1)]/\mu = [(R_1^* \omega_1)^*(R_2-R_1)]/\eta$; (R_2-R_1) ist hier die Ring-Spaltbreite. Eine lineare Stabilitätsanalyse liefert $Re_{krit}=95$, wobei oberhalb dieser Re-Zahl eine zeitlich abhängige Strömung auftritt. Zur Validierung des Rechenverfahrens wurden daher zunächst lediglich $Re < 95$ betrachtet. Die max. Drehfrequenz ω war somit auf $\omega_1=1s^{-1}$ begrenzt.

Numerische Behandlung und Vereinfachungen

Die numerische Simulation erfolgte mit Hilfe von fluidyn multiphysics 5.1®. Die 2-dimensionale Strömung ist als stationär angenommen; das Medium sei inkompressibel. Durch die Rotation des Innenzylinders (des Mantels) wird die Blei Strömung angetrieben, so dass eine Radialverteilung der Geschwindigkeit (v) und des Drucks (p) generiert wird (Abb.).



Mit NSNT-Löser berechnete radiale Verteilung des Drucks (a) und der Geschwindigkeitskomponente u (b) bei $\omega_1=1s$.

Der Ablauf zur Erzielung der numerischen Lösung geschah wie folgt:

- CAD-Gruppierung und Gitter-Generierung mittels unstrukturierter Gitter
- Wahl des Lösungsverfahrens und Eingabe der Randbedingungen
- Eingabe der thermophysikalischen Eigenschaften des Systems Fluid/Wand.
- Zuordnung/ Zuweisung der Materialeigenschaften an die Netzelemente (-gruppen)
- Initialisierung nach Festlegung der Kontrollparameter
- Aktivierung des Löser
- Postprocessing.

Im ersten Schritt wurde mit Hilfe einer DNS (Direct Numerical Simulation) die laminare Grundlösung für den 2D-Fall berechnet. Hierzu wurde die Gitterweite in Nähe der Wände mittels transfiniter Interpolationen höher diskretisiert, um alle Randeffekte adäquat zu erfassen. Die Diskretisierung erfolgte mit einem Schema zweiter (Upwind) bzw. dritter (TVD) Ordnung; für die p-Korrektur wurde das Simplec-Verfahren gewählt.

Die nichtlinearen Verläufe der mittleren (Navier-Stokesschen) Rechenfehler der berechneten Fluidgeschwindigkeiten und des Druckes sind ebenfalls analysiert worden als Funktion des Radius im Ringspalt. Bei einer hinreichenden Diskretisierung wird hier eine nahezu vollständige Kongruenz der Ergebnisse beobachtet.

Eine Simulation der Pb-Fließgeschwindigkeiten im Versuchsbehälter benötigt zu ihrer Verifizierung mindestens eine gemessene lokale Geschwindigkeit des Flüssigmetalls.

Dafür ist zu Beginn des nächsten Jahres geplant, eine Pitot-Sonde zur Messung dieser lokalen Strömungsgeschwindigkeit einzusetzen. Einen geeigneten Drucksensor der bei Temperaturen bis 530°C betrieben werden kann wurde im Angebot der Fa. Kulite gefunden.

Beteiligte Mitarbeiter:

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

Programm UMWELT: Nachhaltigkeit und Technik

Verfahren der Hochleistungsimpulstechnik zur Regenerierung von Abwässern und zum Kohlenstoffmanagement

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

Zur Klärung der biophysikalischen Vorgänge in der Zellmembran während der Elektroporation wurde im Rahmen der Exzellenzinitiative der Universität Karlsruhe eine Shared Research Group etabliert, die mit der Einsetzung des Leiters im Dezember 2007 ihre Arbeit aufgenommen hat. Ziel dieser Gruppe ist es, die Mechanismen der feldinduzierten Permeabilitätsänderungen an Zellmembranen grundlegend zu untersuchen und weitere Feld-Zelle Wechselwirkungen, insbesondere bei einer Kurzpulsexposition im Nanosekundenbereich, zu identifizieren

Keimabtötung mittels hoher elektrischer Felder

In den vergangenen Jahren wurden vermehrt Antibiotika resistente und human pathogene Keime in Klinikabwässern nachgewiesen. Zu deren Eliminierung fallen herkömmlich angewandte Methoden wie Chlorung oder Ozonierung wegen der Bildung toxischer Verbindungen mit der organischen Beifracht aus. Die Entkeimung mittels UV-Licht ist in trüben Abwässern nicht einsetzbar. Vor diesem Hintergrund wurde zum 1.8.2005 ein BMBF-gefördertes Verbundprojekt unter Beteiligung des Forschungszentrums (IHM, ITC-WGT), der Universitätsklinik Mainz und eines mittelständischen Anlagenbauers initiiert. Ziel dieses Projektes ist es, die Elektroimpulsbehandlung von Abwasser zur nachhaltigen Keimabtötung einzusetzen.

Ergebnisse im Rahmen des Verbundprojektes zur Entkeimung von Problemabwässern. Die Optimierungsversuche des letzten Jahres haben bestätigt, dass eine ausreichende Keimreduktionen von 3-4 log Stufen mittels Elektroimpulsbehandlung erst mit Energieeinträgen im Bereich 80-120 J/ml möglich sind. Die Variation der experimentellen Parameter, wie Feldstärke,

Impulsdauer, Impulsform, Keimtyp und Medium führte zu dem Ergebnis, dass bei der Anwendung von Rechteckimpulsen mit Impulsdauern im Bereich von 0.5-10 µs und Feldstärken im Bereich von 40-120 kV/cm die Keimreduktion nur von der eingetragenen elektrischen Energie abhängt.

Bei Entkeimungsversuchen an der Pilotanlage, die im Durchflussverfahren arbeitet, ist aufgrund der hohen Repetitionsrate $f_R = 10$ Hz der Feldimpulse und des geringen Wärmeabflusses über die Elektroden eine Erwärmung des behandelten Abwassers nicht zu vermeiden. Ein elektrischer Energieeintrag von 120 J/ml führt beispielsweise zu einer Erwärmung von etwa $\Delta T = 28^\circ\text{C}$ während des Mediendurchlaufs durch den Reaktor. Im Gegensatz zu den Laborversuchen bei geringer Pulsfrequenz und bei annähernd konstanter Medientemperatur von $T = 25^\circ\text{C}$ konnte hier eine deutliche Steigerung der Keimabtötungsrate festgestellt werden. Es ist zwar bekannt, dass eine erhöhte Medientemperatur die Wirkung der Elektroporation verbessert, jedoch nicht die Stärke dieser Synergie.

Durch entsprechend lange Pulspausenzeiten und externe Temperierung konnte die Medientemperatur während der Elektroimpulsbehandlung in Laborversuchen konstant gehalten werden und so der Einfluss von thermisch bzw. elektrisch eingebrachter Energie getrennt betrachtet werden. Für diese Untersuchungen wurde der Laborstamm *Enterococcus faecium* (BRE; Stamm 211, Mainz) ausgewählt, der als Gram-positives, pathogenes Bakterium im Abwasser vorkommt. Bei Umgebungstemperatur ist die Keimabtötung durch Elektroimpulsbehandlung mit 1,6 Log-Stufen vergleichsweise gering.

Abwassertemperatur	Abtötungsrate in Log-Stufen bei einer elektrischer Behandlungsenergie von	
	120 kJ/Liter	240 kJ/Liter
25°C	1,6	2,1
40°C	3,0	
50°C	4,1	
60°C	>8,0	

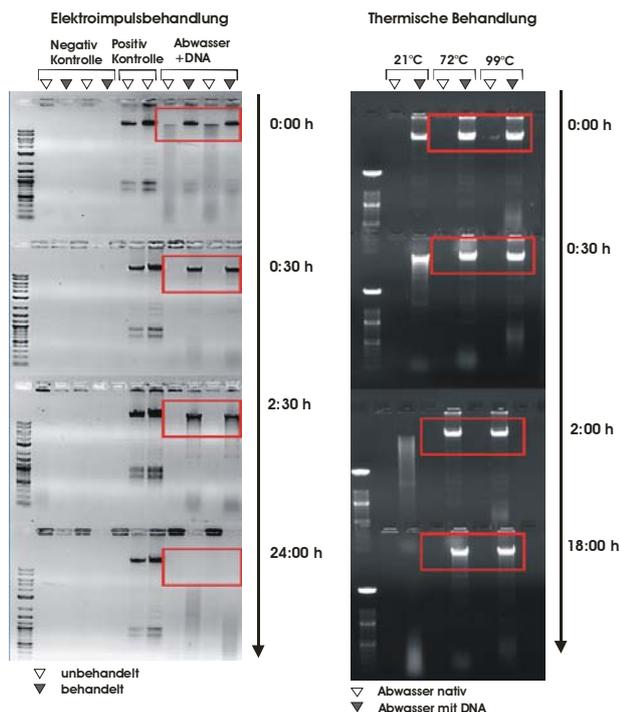
Steigerung der Inaktivierung durch Vorwärmung des Abwassers bei konstant gehaltenem Energieeintrag durch Elektroimpulsbehandlung und konstant gehaltener Abwassertemperatur.

Wird die Abwassertemperatur während der Elektroimpulsbehandlung bei 25°C konstant gehalten, bewirkt eine Verdoppelung der elektrisch aufgewandten Behandlungsenergie lediglich eine Erhöhung der Abtötungseffizienz um 0,5 Log-Stufen. Wird dagegen ein vergleichbarer Energiebetrag rein thermisch eingebracht; 120 J/ml entsprechen einer Erwärmung des Wassers um $\Delta T = 28^\circ\text{C}$; führt die Elektroimpulsbehandlung bei 50°C und 120 kJ/l auf eine Abtötungsrate von 4,1 Log-Stufen. Hier beträgt die Steigerung der Abtötungsrate 2,5 Log-Stufen. Die thermische Erwärmung alleine hat in diesem Fall keine Keim abtötende Wirkung. Eine Vorwärmung auf $T = 60^\circ\text{C}$ führt auf Abtötungsraten von mehr als 8 Log-Stufen. Damit eröffnen sich für die Elektroimpulsbehandlung weitere Optimierungs- und Energieeinsparungsmöglichkeiten. Versuche zur Klärung der Wirkungskinetik dieses kombinatorischen Ansatzes sind Gegenstand zukünftiger Arbeiten.

Vorteile der Elektroimpulsbehandlung gegenüber der thermischen Entkeimung. Der für eine ausreichende Entkeimung erforderliche hohe Energieeintrag von mehr als 120 J/ml führt zu der Frage, ob nicht die rein thermische Behandlung belasteter Klinikabwässer vorteilhafter wäre. Nach einer thermischen Behandlung von Abwasser besteht die Gefahr, dass die freigesetzte DNA aus Antibiotika resistenten Bakterien nicht abgebaut wird und die Resistenz an andere Bakterien übertragen wird.

Dazu wurde in Zusammenarbeit mit dem ITC-WGT untersucht, in wie weit freigesetzte DNA von den im Abwasser stets vorhandenen Nukleasen verdaut wird, Nukleasen sind eine Enzymgruppe, die Nukleinsäuren abbaut.

Die Analyse mittels Gelelektrophorese zeigt, dass die Nuklease-Aktivität im Abwasser nach der Elektroimpulsbehandlung erhalten bleibt (Bild links) während bei rein thermisch behandelten Proben (Bild rechts) diese schon ab 72°C verloren geht. Die Nuklease-Aktivität ist erkennbar daran, dass die Bandenmuster in Laufe der Zeit immer stärker verwischen, da die DNA nach und nach in kleine Fragmente zerlegt wird. Damit konnte gezeigt werden, dass die Gefahr der Übertragung von Resistenzen bei der Elektroimpulsbehandlung und einer Erwärmung auf maximal 60°C geringer ist, als bei der rein thermischen Behandlung (mind. 72°C Endtemperatur für einige Minuten).



Vergleich der Nukleaseaktivität nach der Elektroimpulsbehandlung bei 60°C (rechts) und nach rein thermischer Behandlung bei Temperaturen oberhalb von 72°C (links).

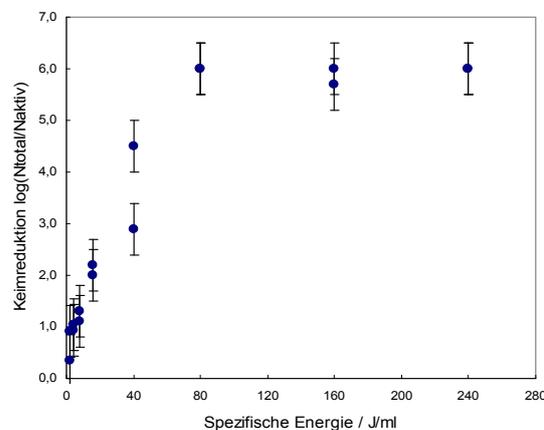
Untersuchungen zur Veränderung der Erbinformation durch Elektroimpulsbehandlung. Chemische Nebenprodukte die während der Elektroimpulsbehandlung durch elektrolytische Reaktionen entstehen können, haben eine potentielle gentoxische Wirkung, die zu Mutationen bei Bakterien führen können. Zur Bestimmung der Gentoxizität von behandelten Klinikabwasser, Leitungswasser und Pufferlösung wurde der *umu*-Test nach deutschen DIN-Norm 38415-T3 mit und ohne S9 Fraktion unter Einsatz des Bakterienstamms *Samonella typhimurium* TA1535/pSK1002 verwendet. Der Nachweis der Gentoxizität wird anhand der β -Galactosidase-Aktivität ermittelt, die im *S.thyphimurium* Stamm an die Synthese von Reparatur-Genen gekoppelt ist. Der G_{EU} -Wert stellt einen Verdünnungsfaktor dar, bei dem keine signifikante Induktion der β -Galaktosidase mehr detektiert werden kann. Ein G_{EU} -Wert größer als 2 ist ein Indikator für vorhandene Gentoxizität. Die Tabelle zeigt die G_{EU} -Werte für verschiedene Medien vor und nach der Elektroimpulsbehandlung in Abhängigkeit von der spezifischen Energie. Leitungswasser und Pufferlösungen zeigen weder vor noch nach der Elektroimpulsbehandlung eine Gentoxizität. Bei den getesteten Klinikabwässern war bereits vor der Impulsbehandlung ein gentoxisches Potential nachweisbar, was jedoch durch die Impulsbehandlung nicht verändert wurde.

Medium / Leitfähigkeit	Spezifische Behandlungsenergie	<i>umu</i> -Test (Induktionsraten)	
		G_{EU} Wert (ohne S9)	G_{EU} Wert (mit S9)
Klinikabwasser (Uni Mainz)	unbehandelt	6	6
	137 J/ml	6	6
	1.2 mS/cm	6	6
	251J/ml	6	6
Leitungswasser	unbehandelt	<1.5	<1.5
	128 J/ml	<1.5	<1.5
	0.4 mS/cm	256 J/ml	<1.5
PBS 10 mM	unbehandelt	<1.5	<1.5
	120 J/ml	<1.5	<1.5
	2.0 mS/cm	240 J/ml	<1.5
	480 J/ml	<1.5	<1.5

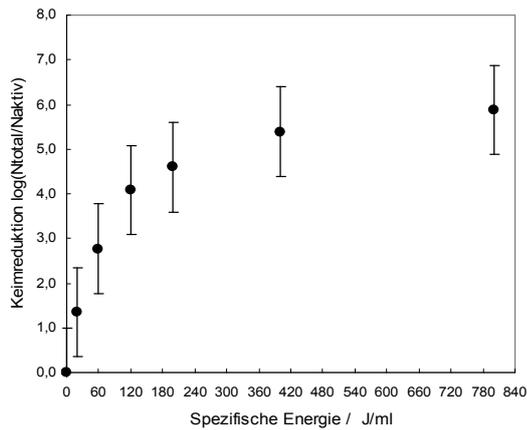
Nachweis von Gentoxizität mittels *umu*-Test mit und ohne S9 Fraktion von Klinikabwasser, Leitungswasser und Phosphatpuffer (10 mM PBS-HCl, pH 7.0) nach Elektroimpulsbehandlung. Die Elektroimpulsbehandlung erfolgte durch Rechteckimpulse mit einer Impulsdauer von 0,6 μ s und einer Feldstärke von 100 kV/cm. Die eingetragene elektrische Energie wurde durch die Anzahl der Impulse variiert.

Keimabtötung mittels Unterwasserkoronaentladungen

Der Einsatz von Unterwasser-Koronaentladungen ist eine Möglichkeit zur Steigerung der Effizienz der Keimabtötung durch Elektroimpulsbehandlung. Neben der hohen elektrischen Feldstärke entstehen bei der Unterwasser-Koronaentladung zusätzlich Druckimpulse, intensive UV-Strahlung und Oxidantien wie OH-Radikale, H_2O_2 , O_3 . Im Rahmen einer Doktorarbeit wurde gezeigt, dass die kombinatorische Wirkung dieser Effekte zu einer effizienteren Abtötung von *Pseudomona putida* führt. Die Grafiken zeigen im Vergleich die Reduktion von *P. putida* mittels Unterwasser-Koronaentladung (1. Abb. Folgeseite) und Elektroimpulsbehandlung (2. Abb. Folgeseite) in Abhängigkeit von der spezifischen Energie. Eine zur reinen Feldbehandlung bei 120 J/ml vergleichbare Keimreduktion erreicht man mit Unterwasser-Koronaentladung schon ab einem Energieeintrag von 50 J/ml.



Reduktion von *P. putida* mittels Unterwasser-Koronaentladung (40 kV Ladespannung, 3 Hz).



Reduktion von *P. putida* mittels Elektroimpulsbehandlung mit Rechteckimpulsen (0,2 μ s, 100 kV/cm, 1Hz).

Gegenwärtig wird an der Steigerung der Anodenlebensdauer gearbeitet. Bislang eingesetzte Anoden besitzen zur Erzeugung der erforderlichen hohen Streamereinsatzfeldstärke auf der Anodenoberfläche eine keramische Beschichtung, die nach etwa 0,5 Mio. Impulsen versagt. Für einen wirtschaftlichen Einsatz von Unterwasser-Koronaentladungen muss die Lebensdauer um mindestens eine Größenordnung höher liegen.

Zellaufschluss

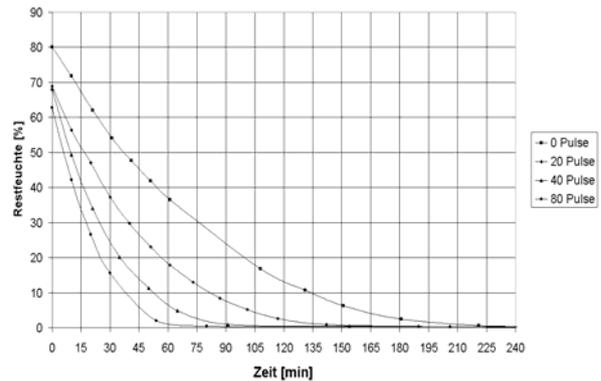
Elektroporationsunterstützte Trocknung von Grünpflanzen

Im Rahmen des Kooperationsprojekts BIOLOG wird elektroporationsunterstützte Trocknung von Grünpflanzen untersucht. Wie bereits im letztjährigen Jahresbericht beschrieben verbessert sich die Abpressbarkeit von Wasser aus einem Zellgewebe nach der Elektroporation signifikant gegenüber der Abpressung von unbehandeltem Gewebe. Der Zellsaft tritt durch die irreversibel gebildeten Poren in der Zellmembran leichter aus. Zur Kontaktierung der Elektroporationselektroden und zum Auffüllen der luftgefüllten Zwischenräume im Elektroporationsgut dient in einer Vorpressung gewonnener Saft aus dem Elektroporationsgut.

Dieses Jahr wurden die Verfahrensschritte Vorpressung, Elektroporation, Nachpressung und Trocknung im Labormaßstab für junge und erntereife Maispflanzen, Gras, Roggen und Luzerne untersucht. Zum Einsatz kamen zwei Versuchsgefäße mit 0,2 kg und 2,5 kg Nutzinhalt. Während das kleinere Gefäß mit feststehenden Elektroden und einem isolierenden Pressstempel aufgebaut wurde, besitzt das größere Gefäß einen metallischen Pressstempel, der gleichzeitig als Elektrode dient. Dies vereinfacht den Aufbau.

Bei den Versuchen konnte der bereits im letzten Jahresbericht gezeigte energetische Vorteil für die untersuchten Pflanzen mit Ausnahme von erntereifem Mais bestätigt werden. Zwar enthielt auch der erntereife Mais trotz eines Trocken-Substanz-Gehalts von ca. 30 % noch genug Saft zum Auffüllen der Materialzwischenräume, jedoch zeigten sich nur geringe Unterschiede in der Abpressbarkeit von rohem und elektroporiertem Material.

Die nächste Abbildung zeigt beispielhaft den Trocknungsverlauf von jungem Mais bei 105 °C im Umluftofen und Vorbehandlung mit unterschiedlichen Pulszahlen. Obwohl alle Kurven mit etwa der gleichen Restfeuchte nach der Abpressung starten, ist eine Abhängigkeit der Trocknungsgeschwindigkeit von der Pulsanzahl beobachtbar. Dies deutet auf ein verbessertes Diffusionsverhalten des elektroporierten Materials hin.



Trocknungskurven von jungen Maispflanzen bei Warmluft-trocknung (105°C): Restfeuchteverläufe bei unterschiedlicher Pulsanzahl.

Elektroporation von Weinmaische

Die Anlage KEA-WEIN zur Elektroporation von Weinmaische wurde dieses Jahr einer Generalüberholung unterzogen. Neben einer Optimierung des Stickstoffkreises und einer Vergrößerung der Kühlleistung für die Schaltergas-Rückkühlung durch den Einbau eines zusätzlichen Wärmetauschers zur externen Kühlwassereinspeisung erhielt die Anlage einen neuen Zellaufschlussreaktor mit plattenförmiger Elektrodengeometrie. Ferner wurde der Rahmen der Anlage mechanisch verstärkt.

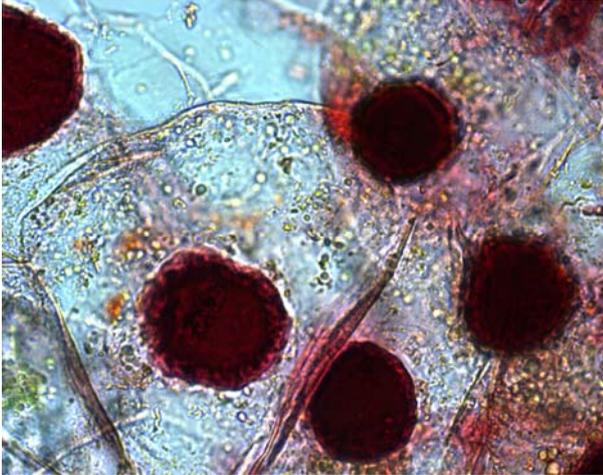
In der diesjährigen Weinkampagne konnte mit der umgebauten Anlage erfolgreich insgesamt mehr als 1 m³ an Riesling-, Schwarzriesling- und Lembergermaische behandelt werden. Dabei kamen zwei neu erworbene Maischepumpen zum Einsatz, die die Maische ohne Verstopfung durch die Anlage förderten. Durch die Serienschaltung der beiden Pumpen konnte der Zellaufschlussreaktor unter Druck betrieben werden, wodurch elektrische Durchschläge stark eingeschränkt wurden. Die Anlage wurde problemlos bei einer Repetitionsrate von 19 Hz mit einem Durchsatz von ca. 500 kg/h betrieben.

Der Wein wird bei den drei Winzern, die die Maischen freundlicherweise zur Verfügung stellten, ausgebaut. Wie auch in den vergangenen Jahren werden die Versuche vom Weinbauinstitut Freiburg begleitet. Neben den chemischen Analysen der Moste und Weine führt das Weinbauinstitut Versuchsausbauten von Proben der behandelten Maischen durch.

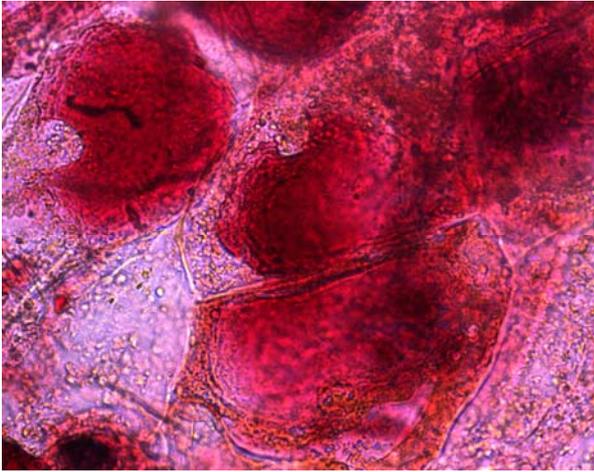


Maischeelektroporationsanlage KEA-WEIN mit angeschlossenen Maischepumpen nach dem Umbau.

Darüber hinaus wurden die letztes Jahr begonnenen Laborversuche zum Aufschluss und zur Farbextraktion aus Rotweinträuben fortgesetzt. Der Vergleich von Mikroskopaufnahmen frischer und elektroporierter Beerenhäute zeigte deutlich den Farbaustritt.



Mikroskopaufnahmen von Zellen aus unbehandelter Beerenhaut.



Mikroskopaufnahmen von Zellen aus behandelter Beerenhaut.

Elektroporation von Zuckerrüben

Das Kooperationsprojekt BEO wurde mit dem Verfassen des Abschlussberichts dieses Jahr beendet. Die Entwicklung einer industriellen Anlage zur Elektroporation von Zuckerrüben wird jedoch zusammen mit SÜDZUCKER fortgeführt.

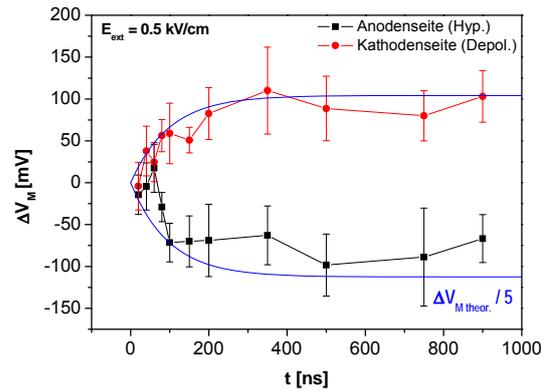
Messung der Membranaufladung von Zellen in Suspension

In der Literatur existieren verschiedene Theorien zur Erklärung der Leitfähigkeitsänderung der Lipid-Doppelschicht einer Zelle unter Einfluss eines externen elektrischen Feldes. Die Gängigste unter ihnen beschreibt die beobachtete Permeabilisierung der Membran durch die Bildung vieler kleiner Poren mit Radien von wenigen Nanometern, welche mit der Dauer des angelegten Pulses dynamisch wachsen. Ab einem Membranpotential von etwa 1 V kommt es modellabhängig zur Porenbildung bzw. dem Auftreten von irreversiblen Poren und schließlich zur Perforation der Membran. Ab dieser Spannung verlieren dann alle Theorien ihre Gültigkeit, da noch keine hinreichende Beschreibung der Porenbildungsdynamik existiert. Für geringere Feldstärken lässt sich die Zeitabhängigkeit des Transmembranpotentials ΔV_M beschreiben durch:

$$\Delta V_M = 1.5 \cdot \frac{D}{2} \cdot E_{ext} \cdot \cos \theta \cdot \left(1 - \exp\left(\frac{-t}{\tau}\right) \right) \quad (1)$$

wobei D den Durchmesser der Zelle, E_{ext} die externe Feldstärke, θ den Winkel relativ zum elektrischen Feld und τ die Ladezeitkonstante der äußeren Membran bezeichnet.

Um das generelle Aufladeverhalten von Zellmembranen und die theoretischen Voraussagen zur Zeitabhängigkeit näher zu untersuchen, wurden fluoreszenzmikroskopische Messungen des Transmembranpotentials von HEK293-Zellen durchgeführt. Hierbei interessierte zunächst das zeitliche Verhalten der Membranspannung bei einer festen äußeren Feldstärke. Die externe Feldstärke betrug bei diesen Messungen 0,5 kV/cm und wurde so gewählt, dass sich im stationären Fall eine theoretische Transmembranpotentialspannung von 500 mV für eine Zelle mit einem Durchmesser von 15 μm einstellen sollte und das kritische Membranpotential von 1 V somit nicht überschritten wird.

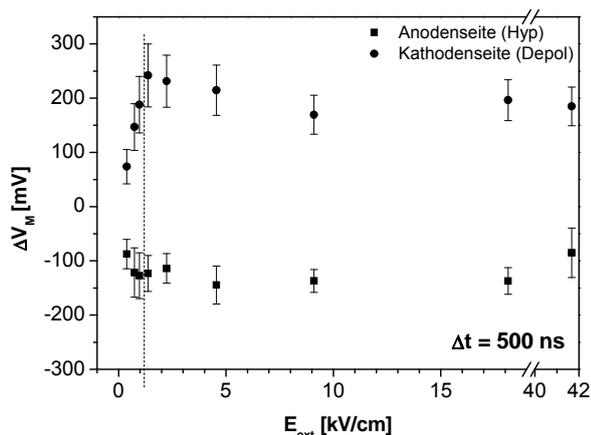


Zeitlicher Verlauf der Membranspannung von HEK293-Zellen auf der anodenseitigen und kathodenseitigen Zellhemisphäre relativ zum Ruhepotential der Zelle. Die blaue Kurve zeigt den mit einem Faktor 5 skalierten theoretischen Verlauf nach (Gl. 1).

In der Abbildung ist der zeitliche Verlauf des Membranpotentials von HEK293-Zellen in Antwort auf einen Rechteckimpuls mit einer Amplitude von 0,5 kV/cm und einer Dauer von 1 μs dargestellt. Es zeigt sich ein für beide Zellhemisphären gleichförmiges Aufladeverhalten auf einen stationären Endwert $|\Delta V_M|$ von etwa 100 mV relativ zum Ruhepotential der Zelle, im Gegensatz zum theoretisch vorausgesagten Wert von 500 mV. Der prinzipielle Verlauf des Anstiegs lässt sich hingegen mit einer entsprechend skalierten theoretischen Funktion (Gl. 1) gut beschreiben (blaue Kurve). Die Ursache dieser Diskrepanz bedarf noch weiterer Untersuchungen des Antwortverhaltens des bei diesen Messungen verwendeten Fluoreszenzfarbstoffs ANNINE-6.

Um Aussagen über den Wert des kritischen Membranpotentials treffen zu können, bei dem es zur Bildung von Poren und somit zu einer Begrenzung der weiteren Aufladung der Membran kommt, wurde die Feldstärkeabhängigkeit des Transmembranpotentials von HEK293-Zellen 200 ns und 500 ns nach Anlegen des äußeren Feldimpulses gemessen. Wie die folgende Abbildung zeigt, erfolgt ab einer externen Feldstärke von etwa 1 kV/cm keine weitere Aufladung der Membran mehr. Die unterschiedlichen Absolutwerte des Membranpotentials auf der Anoden- und Kathodenseite der Zelle rühren daher, dass die Potentiale relativ zum Ruhepotential der Zelle gemessen werden, welches für HEK293-Zellen etwa -80 mV beträgt. Aus diesem Grund wird auf der Anodenseite der Zelle schon bei geringeren Feldstärken ein kritischer Spannungswert erreicht, als auf der Kathodenseite, und die Aufladung somit begrenzt. Ruhepotentialbereinigt ergibt sich für das kritische Membranpotential zu beiden Zeitpunkten der Messung ein Wert von ca. +/- 200 mV. Dies führt zu der Annahme, dass Porenbildungsprozesse schon bei weitaus geringeren Feldstärken einsetzen, als in der Literatur angegeben. Um messbedingte Systematiken jedoch auszuschließen bedarf es einer Kalibrierung des ver-

wendeten Fluoreszenzfarbstoffes, was Gegenstand zukünftiger Arbeiten ist.

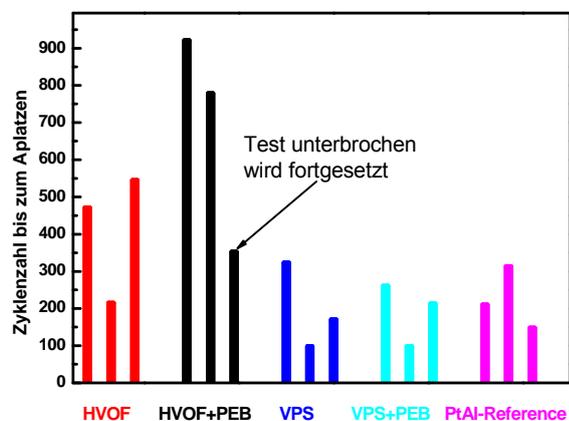


Feldstärkeabhängigkeit des Transmembranpotentials von HEK293-Zellen 200 ns (oben) und 500 ns (unten) nach Anlegen des externen Spannungspulses. Ab einer externen Feldstärke von ca. 1 kV/cm (gestrichelte Linie) findet keine weitere Aufladung der Membran mehr statt.

Verbesserung der Eigenschaften von Werkstoffoberflächen mit GESA inklusive Arbeiten zu ASTERIXE

Zu Beginn des Jahre wurden für das ASTERIXE Projekt, das offiziell Ende 2006 beendet wurde, alle notwendigen Abschlussberichte verfasst und von der europäischen Kommission in Brüssel akzeptiert.

Im letzten Jahr wurden die Untersuchung zur Haftfestigkeit von TBC - Schichten (Thermal Barrier Coatings), die mit EBPVD (Electron Beam Vapour Deposition) abgeschieden werden, auf Turbinenschaufeln vorgestellt. Der deutliche Gewinn an Lebensdauer von GESA umgeschmolzenen HVOF (High Velocity Oxy-Fuel) gespritzten Schichten MCrAlY Schichten, die als Basis für die TBC Schichten dienen, war in einem singulären Experiment gezeigt worden. Zur Bestätigung des Effektes wurden zwei weitere Proben behandelt und an der Universität Cranfield getestet. Der positiv Einflusses der GESA Behandlung von HVOF gespritzten Schichten auf die Lebensdauer der TBC Schicht ist bei allen drei getesteten Proben deutlich zu sehen (Abb.). Das dritte Experiment wurde ohne sichtbare Zerstörung der Schicht unterbrochen, da die Thermozyklapparatur defekt war.

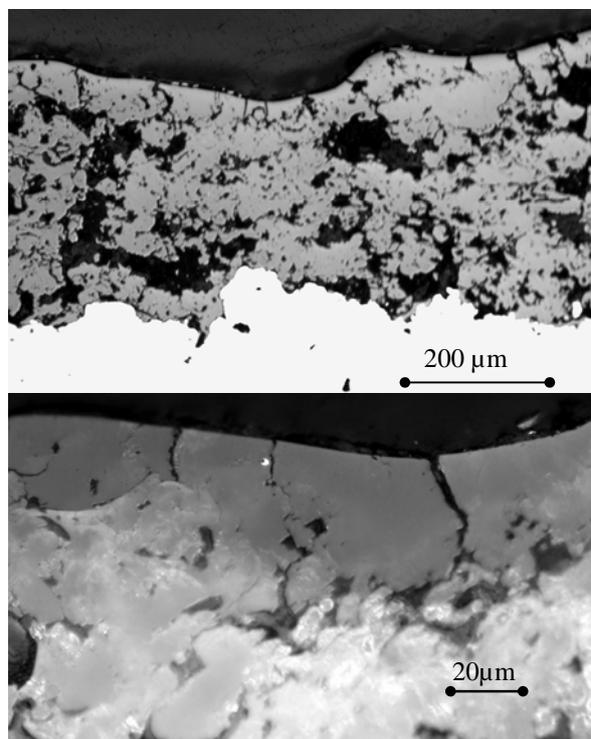


Zyklenzahl bis zum Ablätzen von 20 % der Wärmedämmschicht bei unterschiedlich abgeschiedenen Schichten.

Diese erzielten Verbesserungen um bis zu einem Faktor 3 wurden in zwei gemeinsamen Beiträgen zusammen mit der Universität Cranfield vorgestellt und veröffentlicht.

Eine weitere Technologie diese Wärmedämmschichten aufzubringen ist das Plasmaspritzen. Solche Schichten unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Mikrostruktur und damit in ihrer Spannungstoleranz signifikant von EBPVD TBC Schichten. EBPVD Schichten haben eine Säulenstruktur und sind deshalb eher geeignet thermisch induzierte Spannung zu tolerieren im Gegensatz zu Plasma gespritzten Schichten, die eher globular aufwachsen.

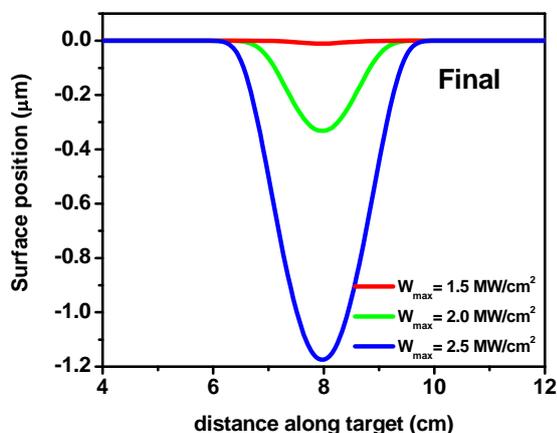
Ziel des Institutsbeitrages war durch das gezielte Einbringen von vertikal zur Oberfläche verlaufenden Rissen in Plasma gespritzten TBC Schichten deren Spannungstoleranz zu erhöhen. Die Proben wurden von der Fa. Turbocoating zur Verfügung gestellt und im IHM mit der GESA I umgeschmolzen. In der nächsten Abbildung sind lichtmikroskopische Aufnahmen der Querschliffe bei zwei unterschiedlichen Vergrößerungen zu sehen. Auffallend in beiden Vergrößerungen ist die sehr poröse Struktur der TBC - Schicht. Zudem wird deutlich, dass nach dem Umschmelzen vertikal zur Oberfläche orientierte Risse entstanden sind. Bei der größeren Vergrößerung (Abb. unten) ist die Umschmelzzone von ca. 20µm Tiefe zu erkennen. Diese Umschmelzzone weist im Gegensatz zum Rest der TBC Schicht keine Porosität mehr auf. Die vertikalen Risse sind klar zu sehen, scheinen jedoch nicht über die Umschmelzzone hinauszugehen. Inwieweit solch eine Umschmelzung einen positiven Effekt auf die thermomechanischen Eigenschaften hat, muss noch untersucht werden. Ebenso ist zukünftig geplant, mit höherer Elektronenenergie (GESA II) tiefer gehende Risse zu erzeugen oder Risse die mit einem ersten Puls entstehen mit weiteren Pulsen wachsen zu lassen.



Lichtmikroskopische Aufnahmen von Querschliffen von plasmagespritzten Wärmedämmschichten, die mit der GESA umgeschmolzen wurden. Deutlich sind die Risse und die umgewandelte Oberflächenzone zu erkennen.

Durch die Unterstützung der IHM-Gruppe Landmann konnten erste Simulationen des GESA Pulses und der

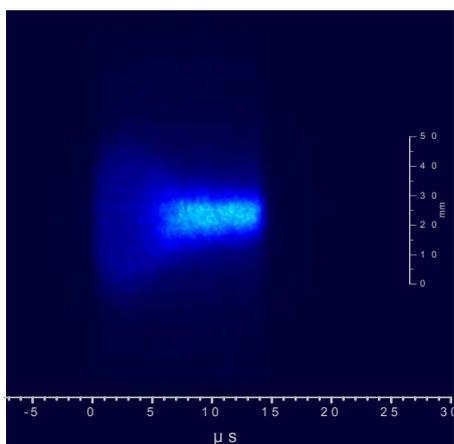
Materialveränderungen durch diesen nachgerechnet werden. Dazu wurde der Code MEMOS-1.5D eingesetzt, der insbesondere die Schmelz- und Erstarrungsvorgänge durch einen Elektronenstrahlpuls berücksichtigt. Abhängig von der Elektronenstrahlenergie kann die Kratertiefe, die nach so einem Puls auf der Oberfläche aufgrund von dynamischen Störprozessen zurückbleibt, gerechnet werden. In der nächsten Abbildung ist dieser Einfluss deutlich zu sehen.



Kratertiefe nach dem Erstarren in Abhängigkeit von der eingebrachten Energie.

Die Kratertiefe nimmt mit zunehmender Energie deutlich von wenigen sub-µm bei 1,5 MW/cm² auf über 1 µm bei 2,5 MW/cm² zu.

Aufgrund neuer optischer und elektrischer Messungen an dem Elektronenbeschleuniger GESA II wurde das früher entwickelte Präzessionsmodell für den Elektronenstrahl weiter ausgebaut. Der Elektronenstrahl an der GESA II weist wesentliche Unterschiede besonders hinsichtlich der Strahlstabilität (Präzession) gegenüber der des Elektronenstrahls im GESA I-Beschleuniger auf. Wegen der höheren Elektronenenergien an der GESA II ist der Einfluss der Ionen auf den Elektronenstrahl deutlicher. Dies bewirkt zum einen eine in Vergleich zur GESA I bessere Strahlneutralisation zum anderen eine zusätzliche Fokussierung (Abb.).

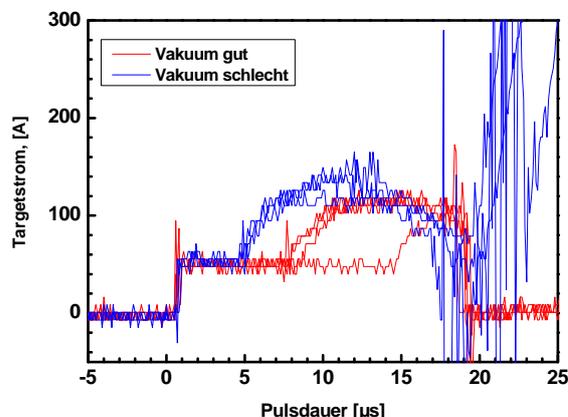


Zeitlicher Verlauf des Strahlprofils an der GESA II-Anlage.

Die Fokussierung des Elektronenstrahls wird durch einen Anstieg des Targetstroms begleitet (Abb.).

Dies deutet darauf hin, dass der Ionenfluss bis zur Kathodenkammer reicht und dort die negative Raumladung

beeinflusst. Zudem sorgt die positive Ionenladung für eine wesentliche Änderungen der elektrischen Feldverteilung im Strahl, so dass eine radiale Spaltung des Elektronenstrahls nicht mehr möglich wird. Laut unseren Vorstellungen ist diese Strahlspaltung die Hauptvoraussetzung für die Strahlpräzession. Als mögliche Ionenquelle kommen sowohl das Targetplasma als auch das durch Restgasionisation entstehende Plasma in Betracht (nächste Abbildung).



Targetstromverlauf in Abhängigkeit von Vakuumbedingungen.

Die geschätzte Dichte des Targetplasma liegt unter 10^{12}cm^{-3} . Das Ionenemissionsvermögen eines solchen Plasmas reicht nicht aus, um einen für die Strahlneutralisation genügend hohen Ionenstrom zu liefern. Aber die Targetionen sorgen dank hoher Ionisationsquerschnitte mit Restgasmolekülen für die Entstehung von niederenergetischen Sekundärelektronen. Deren Energie liegt in Bereich von 50eV und ihr Larmorradius bei $\sim 200 \mu\text{m}$, was deutlich größer ist als die freie Weglänge im Restgas bei den üblichen Vakuumbedingungen. Somit können die Sekundärelektronen sehr effektiv zur Ionisation des Restgases beitragen. Dies ist zusätzlich dadurch begünstigt, dass die Sekundärelektronen wegen des magnetischen Feldes nur durch mehrere Stöße mit Restgasmolekülen den Strahlbereich verlassen können.

Management von Baustoffen und Bauwerken

Die Arbeiten an den elektrodynamischen Fragmentieranlagen FRANKA-0, FRANKA-5 und FRANKA-XYZ erfolgten in enger Kooperation mit dem Lizenznehmer dieser Technologie, der Schweizer Firma selfFrag AG, einer Tochter der AMMANN AG.

Während im Jahr 2007 grundlegende Arbeiten zum Aufschluss von Baustoffen wie Beton und Asphalt sowie zur Zement-Technologie in den Hintergrund traten, lag der Fokus der Arbeiten nunmehr bei der derzeit anlaufenden Markteinführung solcher Anlagen. Während die Mehrzahl früherer Arbeiten eher exploratorischen Charakter hatte, rückt nunmehr zwangsläufig die für den potentiellen Käufer solcher Anlagen essentielle Frage nach der Wirtschaftlichkeit in den Vordergrund. Faktoren die die Wirtschaftlichkeit solcher Anlagen maßgeblich beeinflussen, sind u.a. die Lebensdauer bzw. der Verschleiß der Anlagenkomponenten und somit die Länge der Serviceintervalle, der erreichbare Massendurchsatz in einem vorgegebenen Zeitintervall, aber auch die Fähigkeit für einen weit gefächerten Käuferkreis durch materialabhängige Parameteroptimierung der Anlagen signifikant günstigere Zerkleinerungsergebnisse erzielen zu können, als mit konventionellen Brechmethoden.

Zum Thema „Lebensdauer/Verschleiß von Anlagenkomponenten“ wurden die schon in 2006 begonnenen Abbrandexperimente an FRANKA-0 HV-Arbeits Elektroden fortgesetzt. Detaillierte Messungen des Gewichtsverlusts pro Puls an legierten und unlegierten, z.T. auch gehärteten Stahlsorten mit und ohne

Materialbelastung im Reaktionsraum erlaubten erstmals genaue Aussagen zu den verschiedenen Abbrand-/Verschleißmechanismen sowie zur Korrelation mit den elektrischen Anlagenparametern. Bemerkenswert ist in diesem Zusammenhang die Tatsache, dass der Elektrodenverschleiß infolge der abrasiven Wirkung des fragmentierten Materials den durch die elektrische Entladung verursachten Elektrodenabbrand ($20\text{-}50\mu\text{g}/\text{Puls}$ bei Lastintegralen um $1000\text{A}^2\text{s}$) um bis zu einem Faktor 3 übersteigen kann. Die Resultate wurden auf chemisch-analytischem Wege mit Hilfe von ICP-OES-Messungen durch BTI/V-LU bestätigt. Ein bisher ungeklärtes Phänomen ist das Auffiedern der HV-Arbeits Elektroden mit nachfolgendem makroskopischem Materialverlust bei sehr hohen Lastintegralen und insbesondere bei der Fragmentierung von Gläsern.

In Fortsetzung der in 2006 an FRANKA-0 durchgeführten, breit gefächerten Versuchsreihen zum Abbrand der Marx-Elektroden aus unterschiedlichen Materialien und bei unterschiedlichen elektrischen Belastungen wurden nunmehr nur noch die favorisierten Materialien weiter untersucht. Diese als Langzeitversuche angelegten Untersuchungen (bisher bereits über 6×10^7 Pulse gegenüber einigen 10^4 Pulsen in FRANKA-0!) werden an einem von selFrag entwickelten und im IHM betriebenen Messstand, bestehend aus einem Energiespeicher-Kondensator, einer gasgespülten Funkenstrecke und einem Lastwiderstand, durchgeführt. Hierbei wurden neben der Topologie der Elektroden auch die elektrischen Entladungsparameter variiert und der jeweilige Einfluss auf den Abbrand quantifiziert. Nach Leckschäden am Energiespeicher-Kondensator dieser Anlage wurde mit Hilfe von Infrarotaufnahmen dessen zeitabhängiges Oberflächen-Temperaturprofil festgehalten. Diese zeigten Hotspots an den inneren Verbindungen der Kondensatorwickel. Die Herstellerfirma fertigte daraufhin Kondensatoren in verbesserter Bauform, bei denen die lokale Überhitzung nicht mehr auftrat. Somit wurde neben den eigentlichen Zielinformationen über den Elektrodenabbrand ein für den industriellen Dauereinsatz der FRANKA-Technologie wesentliches Nebenergebnis erzielt.

Die ursprünglich geplanten Modellrechnungen zum besseren Verständnis der für den Abbrand der Marx-Elektroden verantwortlichen physikalischen Vorgänge stehen zurzeit noch aus.

Ebenfalls von selFrag für Tests zur Verfügung gestellt wurden mehrere Prototypen von HV-Arbeits Elektroden mit dazugehörigen HV-Isolatoren, die mit Hilfe unterschiedlicher konstruktiver Lösungen ein Nachführen der Arbeitselektrode zur Abbrand-/Verschleißkompensation erlauben sollen. Versuchsreihen an diesen Baukomponenten der modifizierten FRANKA-5-Anlage sind derzeit noch im Gange.

Untersuchung spezieller Materialien: Aus der Papierindustrie kam die Anfrage, ob die FRANKA-Technologie geeignet ist, aus Holzchips und unterschiedlichen Papiertypen die Zellulosefasern freizulegen. Für die Quarz- und Quarzglasindustrie wurden Versuchsreihen durchgeführt, mit Hilfe derer der maximal erzielbaren Materialdurchsatz pro Puls in ein vorgegebenes Zielkornspektrum bei minimalem Unterkornanteil und die durch Elektrodenabbrand verursachte Materialkontamination quantifizieren werden konnten. Ähnliche Zielsetzungen hatten Versuche an hochreinen Si-Stäben und -Granulaten. Auf wachsendes Interesse bei der einschlägigen Industrie stößt die Möglichkeit, mit Hilfe der elektrodynamischen Fragmentierung Edelsteine aus dem Begleitgestein heraus zu lösen. Parameterstudien an FRANKA-0 habe gezeigt, dass dies bei Wahl geeigneter elektrischer Parameter zu deutlich besseren Resultaten führt als konventionelle kompressive Liberierung. Detaillierte Resultate dürfen aus Gründen der industriellen Einbindung der Arbeiten nicht dargelegt werden.

Industrielle Mikrowellentechnik

Die industrielle Großanlage HEPHAISTOS-CA2 (bestehend aus 2 begehbaren Modulen) wurde im ersten Quartal 2007 auf der weltweit bedeutendsten Fachmesse für Verbundwerkstoffe, der JEC in Paris vor Ort präsentiert. Eine weitere neue Anlage HEPHAISTOS-CA3 (bestehend aus 3 begehbaren Modulen) wurde im Laufe des Sommers mit Netzteilen und übertragungseffizienten Wellenleitern aus eigenem Design und Fertigung erfolgreich in Betrieb genommen. Diese neue Anlage besitzt eine Mikrowellenleistung von ca. 25kW bei der Frequenz $2,45\text{ GHz}$ und ein Volumen von etwa 7000 Litern und ist damit die weltgrößte Mikrowellenprozessanlage. Die Anlage besitzt zudem die Fähigkeit erstmals Durchflussverfahren für zukünftige Anwendungen realisieren und testen zu können.

Mit der Fa. BayerMaterialScience wurden umfangreiche Screening-Tests zur Anwendung und Wirkungsweise von Mikrowellen im Polyurethanbereich durchgeführt. Es konnten einige direkt kommerziell einsatzfähige Anwendungsbereiche, die Bayerkunden als die Grundstoffe verarbeitenden Betriebe betreffen, identifiziert werden. Zur wirtschaftlichen Umsetzung dieser Potentiale sind verschiedene Aktivitäten für 2008 unter Einbeziehung der Bayerkunden, der Fa. Bayer sowie der Fa. Vötsch-Industrietechnik geplant. Wie weitere gemeinsame Untersuchungen mit Bayer zeigten, ist eine Mikrowellenwirkung für die Polyurethansynthese reaktionsspezifisch katalytisch hochwirksam in Form einer Senkung von Aktivierungsenergien und einer Beschleunigung der herrschenden Reaktionsgeschwindigkeiten. Derzeit wird ein automatisierbarer Mischkopf der Fa. Bayer im Technikumsstadium mit einer Mikrowellen-Reaktionszoneneinheit gekoppelt. Die Versuche zeigten für die Polyurethan-Schaumsynthese eine starke immanente Beschleunigung. Für 2008 werden ausgewählte Aktivitäten in erweiterter Vertragsbasis mit BayerMaterialScience auf der Forschungs-, sowie der wirtschaftlichen Anwendungsseite umgesetzt werden.

Ende Juli 2007 wurde vom Gruppenleiter die Habilitationsschrift „Energy Efficient System and Materials Processing Technologies for Avionic, Mobility and Environmental Applications“ fertiggestellt und an der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Universität Karlsruhe vorgelegt. Das Habilitationsverfahren wurde im November 2007 eröffnet. In der Schrift werden die wissenschaftlichen Grundlagen der HEPHAISTOS-Technologie und CFK-Prozessierung, die In-Flight Enteisierung von avionischen Kompositstrukturen, sowie die Feld-Materie Ankopplung in Theorieentwicklung, sowie Experiment dargestellt. Ein quantenmechanischer Zugang der Feld-Materie Ankopplung konnte in dieser Arbeit in allgemeiner Form abgeleitet werden.

Mit dem IMF-III konnten in erster Anwendung dieser quantenmechanischen Gesetzmäßigkeiten zur elektrischen Mikrowellenleitfähigkeit Vorhersagen für erhöhte Mikrowellenan Kopplung durch Nano-Materialien gemacht werden. Erste experimentelle Versuche zeigten sehr deutliche Steigerungen der Temperaturantwort und eine Bestätigung der Modellvorstellungen.

Mit der Fa. Boeing wurden Planungen für die Durchführung von Versuchen im NASA-Eiskanal in Seattle für ein In-Flight Enteisierungssystem auf Kompositbasis (**MIDAS-Technologie, Microwave De-/Antiicing System**) durchgeführt und eine vertragliche Basis geschaffen.

Die experimentellen Verfahren zur Messung dielektrischer Parameter wurden verfeinert. Es konnten verschiedene chemische Additive nachgewiesen werden, die eine mikrowellenaktive reaktionsspezifische Wirkung für die Aushärtung von kommerziellen Harzsystemen aufweisen. Verschiedene Messung von hochleitenden kohlefaserverstärkten CFK-Materialien konnten

erfolgreich durchgeführt werden und bestätigten die bisher gemessenen außerordentlich hohen Werte von Dielektrizitätszahlen und elektrischen Leitfähigkeiten. Die bestehenden Messverfahren sollen zur experimentellen Bestimmung von Temperaturabhängigkeiten weiterentwickelt werden.

Die Arbeiten an einem Mikrowellen-Injektor für die Firmen EADS und GKN Aerospace zur schnellen und präzisen Erwärmung von Harz in einem Durchflussverfahren konnten konsequent und erfolgreich weiterentwickelt werden. Derzeit wird eine autarke, selbstregelnde Steuerung realisiert, die bei einfacher Bedienung eine selbständige und computergesteuerte Injektion ermöglicht. Der Mikrowelleninjektor wird in den weiteren Entwicklungsschritten in den HEPHAISTOS-CA3 vollautomatisch integriert.

Das HEPHAISTOS-Versuchszentrum wurde im November vor ca. 100 Gästen aus Forschung, Wissenschaft und Industrie feierlich eingeweiht. An den Anlagen HEPHAISTOS-CA1, -CA2- und -CA3 werden in Zukunft Prozessentwicklungen mit der Industrie für verschiedenste Anwendungen und Verfahren auf Dienstleistungsbasis erschlossen werden können.

Beteiligte Mitarbeiter:

Dr. J. Akhtar, DP W. An, Dr. K. Baumung, DP T. Berghöfer, H. Brüsemeister, DI L. Buth, Dr. C. Eing, **Dr. L. Feher**, Frau DB Flickinger, **Dr. W. Frey**, DP H. Giese, MSc. S. Gupta, Dr. C. Gusbeth, **Dr. P. Hoppé**, DI F. Lang, S. Layer, K. Leber, E. Menesklou, **Dr. G. Müller**, Dr. H. Muscher, V. Nuss, K. Paulus, **Dr. M. Sack**, KD. Schorb, T. Seitz, DI J. Singer, Dr. S. Stanculovic, R. Stängle, DI R. Sträßner, **Dr. A. Weisenburger**, A. Wolf, R. Wüstner, H. Zimmermann



HEPHAISTOS-Versuchszentrum mit den Anlagen CA3, CA2 und CA1 (von links nach rechts)

Publikationsliste

FUSION: Programm Kernfusion

Publikationen in begutachteten Zeitschriften:

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

ITER transient consequences for material damage: modelling versus experiments.

Physica Scripta, T128(2007) S. 229-33

DOI:10.1088/0031-8949/2007/T128/044

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

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

Journal of Nuclear Materials, 363-365(2007) S.1011-15

DOI:10.1016/j.jnucmat.2007.01.157

Bin, W.; Bruschi, A.; Cirant, S.; Erckmann, V.; Gandini, F.; Granucci, G.; Hollmann, F.; Laqua, H.P.; Meller, V.; Muzzini, V.; Nardone, A.; Noke, F.; Piosczyk, B.; Purps, F.; Rzesnicki, T.; Schmid, M.; Sozzi, C.; Spies, W.; Spinicchia, N.; Stoner, M. Advances in high power calorimetric matched loads for short pulses and CW gyrotrons.

Fusion Engineering and Design, 82(2007) S.775-84

DOI:10.1016/j.fusengdes.2007.05.055

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

Fusion Engineering and Design, 82(2007) S.619-26

DOI:10.1016/j.fusengdes.2007.05.025

Borie, E.

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

International Journal of Infrared and Millimeter Waves (2007)

DOI:10.1007/s10762-007-9293-x

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

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

Fusion Engineering and Design, 82(2007) S.677-85

DOI:10.1016/j.fusengdes.2007.03.023

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

Numerical simulation of instationary magnetoplasmadynamic thrusters.

CEMRACS 2005: Computational Aeroacoustics and Computational Fluid Dynamics in Turbulent Flows, Marseille, F; July 18-August 26, 2005

ESAIM: Proceedings, 16(2007) S.224-41

DOI:10.1051/proc:2007004

Danilov, I.; Heindinger, R.; Meier, A.; Piosczyk, B.; Schmid, M.; Späh, P.; Bongers, W.; Graswinckel, M.; Lamers, B.; Verhoeven, A.G.A.

High-power short-pulse, mechanical, and thermohydraulic tests of the window prototype for remote steering launcher.

Fusion Science and Technology, 52(2007) S.250-55

Erckmann, V.; Brand, P.; Braune, H.; Dammertz, G.; Gantenbein, G.; Kasperek, W.; Laqua, H.P.; Maassberg, H.; Marushchenko, N.B.; Michel, G.; Thumm, M.; Turkun, Y.; Weissgerber, M.; Weller, A.; W7-X ECRH Teams at IPP, IPF and FZK Electron cyclotron heating for W7-X: physics and technology. Fusion Science and Technology, 52(2007) S.291-312

Garkusha, I.E.; Bandura, A.N.; Byrka, O.V.; Chebotarev, V.V.; Landman, I.S.; Kulik, N.V.; Makhraj, V.A.; Petrov, Yu.V.; Solyakov, D.G.; Tereshin, V.I.

Tungsten melt layer erosion due to J x B force under conditions relevant to ITER ELMs.

Journal of Nuclear Materials, 363/65(2007) S.1021-25

DOI:10.1016/j.jnucmat.2007.01.168

Heindinger, R.; Danilov, I.; Meier, A.; Piosczyk, B.; Späh, P.; Thumm, M.; Bongers, W.; Graswinckel, M.; Henderson, M.; Leuterer, F.; Verhoeven, A.G.A.; Wagner, D.

Development of high-power window prototypes for ECH&CD launchers.

Fusion Engineering and Design, 82(2007) S.693-99

DOI:10.1016/j.fusengdes.2007.04.043

Henderson, M.A.; Alberti, S.; Benin, P.; Bonicelli, T.; Chavan, R.; Campbell, D.; Cirant, S.; Dammertz, G.; Dormicchi, O.; Dumbrajs, O.; Fasel, D.; Goodman, T.P.; Heindinger, R.; Hogge, J.P.; Kasperek, W.; Lievin, C.; Piosczyk, B.; Poli, E.; Ramponi, G.; Saibene, G.; Sauter, O.; Serikov, A.; Taddia, G.; Thumm, M.; Tran, M.Q.; Verhoeven, A.G.A.; Zohm, H. EU developments of the ITER ECRH system.

Fusion Engineering and Design, 82(2007) S.454-62

DOI:10.1016/j.fusengdes.2007.01.029

Kasperek, W.; Petelin, M.; Erckmann, V.; Shchegolkov, D.; Bruschi, A.; Cirant, S.; Litvak, A.; Thumm, M.; Plaum, B.; Grünert, M.; Malthaner, M.; W7-X ECRH Teams at IPP, IPF and FZK

Fast switching and power combination of high-power electron cyclotron wave beams: principles, numerical results, and experiments.

Fusion Science and Technology, 52(2007) S.281-90

Landman, I.S.; Janeschitz, G.

Numerical simulations of plasma wall interactions for ITER.

Journal of Nuclear Materials, 363-365(2007), S.1061-65

DOI:10.1016/j.jnucmat.2007.01.140

Loarte, A.; Saibene, G.; Sartori, R.; Riccardo, V.; Andrew, P.; Paley, J.; Fundamenski, W.; Eich, T.; Herrmann, A.; Pautasso, G.; Kirk, A.; Counsell, G.; Federici, G.; Stromayer, G.; Whyte, D.; Leonhard, A.; Pitts, R.A.; Landman, I.; Bazylev, B.; Pestchanyi, S.

Transient heat loads in current fusion experiments, extrapolation to ITER and consequences for its operation.

Physica Scripta, T128(2007) S.222-28

DOI:10.1088/0031-8949/2007/T128/043

Louksha, O.I.; Piosczyk, B.; Sominski, G.G.; Thumm, M.; Samsonov, D.B.

High-power gyrotrons for fusion and technology search of the ways for efficiency enhancement.

Izvestiya Akademii Nauk, Energetika, (2006) Nr.5, S.131-46 (in russ. Sprache)

Louksha, O.I.; Pautov, V.L.; Piosczyk, B.; Podushnikova, K.A.; Sominski, G.G.; Samsonov, D.B.; Thumm, M.

Issledovanie katodov dlja moshhnykh gorotronov millimetrovogo diapazona dlin voln.

(Study of cathodes for high-power mm-wave gyrotrons).

Naucno Technicheskie Vedomosti, (2007) Nr.1 S.291-94 (in russ. Sprache)

- Louksha, O.I.; Piosczyk, B.; Sominski, G.G.; Thumm, M.; Samsonov, D.B.
Suppression of parasitic space-charge oscillations in a gyrotron.
Radiophysics and Quantum Electronics, 49(2006) S.793-98
DOI:10.1007/s11141-0006-0114-1
- Makhlay, V.A.; Bandura, A.N.; Byrka, O.V.; Garkusha, I.E.; Chebotarev, V.V.; Tereshin, V.I.; Landman, I.
Effect of preheating on the damage to tungsten targets after repetitive ITER ELM-like heat loads.
Physica Scripta, T128(2007) S.239-41
DOI:10.1088/0031-8949/2007/T128/046
- Maraschek, M.; Gantenbein, G.; Yu, Q.; Zohm, H.; Günter, S.; Leuterer, F.; Manini, A.
Enhancement of the stabilization efficiency of a neoclassical magnetic island by modulated electron cyclotron current drive in the ASDEX upgrade tokamak.
Physical Review Letters, 98(2007) S.025005
DOI:10.1103/PhysRevLett.98.025005
- Pestchanyi, S.; S.; Landman, I.
ELM induced carbon contamination of ITER core.
Journal of Nuclear Materials, 363-365(2007) S.1081-86
DOI:10.1016/j.jnucmat.2007.01.234
- Pestchanyi, S.; Linke, J.
Simulation of cracks in tungsten under ITER specific transient heat loads.
Fusion Engineering and Design, 82(2007), 1657-1663
DOI:10.1016/j.fusengdes.2007.01.028
- Prinz, H.O.; Arnold, A.; Dammertz, G.; Thumm, M.
Analysis of a TE_{22,6} 118-GHz quasi-optical mode converter.
IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 55(2007) S.1697-1703
DOI:10.1109/TMTT.2007.902779
- Prinz, H.O.
Frequency measurement system for gyrotron diagnostics.
IEEE Potentials, 26(2007) Nr.4, S.25-30
DOI:10.1109/MP.2007.4280329
- Sabchevski, S.; Zhelyazkov, I.; Thumm, M.; Illy, S.; Piosczyk, B.; Tran, T.M.; Hogge, J.Ph.; Pagonakis, J.Gr.
Recent evolution of the simulation tools for computer aided design of electron-optical systems for powerful gyrotrons.
Computer Modeling in Engineering and Science, 20(2007) S.203-20
- Schmid, M.; Illy, S.; Dammertz, G.; Erckmann, V.; Thumm, M.
Transverse field collector sweep system for high power CW gyrotrons.
Fusion Engineering and Design, 82(2007) S.744-50
DOI:10.1016/j.fusengdes.2007.06.008
- Sergienko, G.; Bazylev, B.; Huber, A.; Kreter, A.; Litnovsky, A.; Rubel, M.; Philipps, V.; Pospieszczyk, A.; Mertens, Ph.; Samm, U.; Schweer, B.; Schmitz, O.; Tokar, M.; TEXTOR Team
Erosion of a tungsten limiter under high heat flux in TEXTOR.
Journal of Nuclear Materials, 363-365(2007) S.96-100
DOI:10.1016/j.jnucmat.2007.01.050
Plasma-Surface Interactions-17, Proceedings of the 17th International Conference on Plasma-Surface Interactions in Controlled Fusion Devices, Hefei, China, May 22-26, 2006
- Sergienko, G.; Bazylev, B.; Hirai, T.; Huber, A.; Kreter, A.; Mertens, Ph.; Nedospaasov, A.; Philipps, V.; Pospieszczyk, A.; Rubel, M.; Samm, U.; Schweer, B.; Sundelin, P.; Tokar, M.; Wessel, E.; TEXTOR Team
Experience with bulk tungsten test-limiters under high heat loads: melting and melt layer propagation.
Physica Scripta, T128(2007) S.81-86
DOI:10.1008/0031-8949/2007/T128/016
- Tereshin, V.I.; Bandura, A.N.; Byrka, O.V.; Chebotarev, V.V.; Garkusha, I.E.; Landman, I.; Makhlay, V.A.; Neklyudov, I.M.; Solyakov, D.G.; Tsarenko, A.V.
Application of powerful quasi-steady-state plasma accelerators for simulation of ITER transient heat loads on divertor surfaces.
Plasma Physics and Controlled Fusion, 49(2007) S.A231-239
DOI:10.1088/0741-3335/49/5A/S19
- Thumm, M.; Alberti, S.; Arnold, A.; Brand, P.; Braune, H.; Dammertz, G.; Erckmann, V.; Gantenbein, G.; Giguet, E.; Heidinger, R.; Hogge, J.P.; Illy, S.; Kasperek, W.; Laqua, H.P.; Legrand, F.; Leonhardt, W.; Lievin, C.; Michel, G.; Neffe, G.; Piosczyk, B.; Schmid, M.; Schwörer, K.; Tran, M.Q.
EU megawatt-class 140 GHz CW gyrotron.
IEEE Transactions on Plasma Science, 35(2007) S.143-53
DOI:10.1109/TPS.2007.892144
- Wagner, D.; Leuterer, F.; Manini, A.; Monaco, F.; München, M.; Ryter, F.; Schütz, H.; Stober, J.; Zohm, H.; Franke, T.; Danilov, I.; Heidinger, R.; Thumm, M.; Gantenbein, G.; Kasperek, W.; Lechte, C.; Litvak, A.; Denisov, G.; Tai, E.; Popov, L.; Nichiporenko, V.; Myasnikov, V.; Solyanova, E.; Malygin, S.; Meo, F.; Woskov, P.
The new multifrequency electron cyclotron resonance heating system for ASDEX upgrade.
Fusion Science and Technology, 52(2007) S.313-20
- Zhitlukhin, A.; Klimov, N.; Landman, I.; Linke, J.; Loarte, A.; Merola, M.; Podkovyrov, V.; Federici, G.; Bazylev, B.; Pestchanyi, S.; Safronov, V.; Hirai, T.; Maynashev, V.; Levashov, V.; Muzichenko, A.
Effects of ELMs on ITER divertor armour materials.
Journal of Nuclear Materials, 362-65(2007) S.301-07
DOI:10.1016/j.jnucmat.2007.01.027
Plasma-Surface Interactions 17, Proceedings of the 17th Int. Conference on Plasma-Surface Interactions in Controlled Fusion Devices, Hefei, China, May 22-26, 2006
- Zohm, H.; Gantenbein, G.; Leuterer, F.; Manini, A.; Maraschek, M.; Yu, Q.; ASDEX Upgrade Team
Control of MHD instabilities by ECCD: ASDEX upgrade results and implications for ITER.
Nuclear Fusion, 47(2007) S.228-32
DOI:10.1088/0029-5515/47/3/010

Sonstige Publikationen die in gedruckter Form vorliegen:

- Arnold, A.; Prinz, O.; Wagner, D.; Thumm, M.
Operation of a quasioptical multi-mode generator for 105-150 GHz.
Griffin, M.J. [Hrsg.]
Joint 32nd Internat. Conf. on Infrared and Millimetre Waves, and 15th Internat. Conf. on TeraHertz Electronics, Cardiff, GB, September 2-7, 2007; Conf. Digest Vol. I, S.434-35
Piscataway, N.J.: IEEE, 2007; Auch auf DC-ROM
- Avramidis, K.A.; Pagonakis, I.G.; Piosczyk, B.; Vomvouridis, J.L.
Possible excitation of radial satellites in high-power gyrotrons.
Joint 32nd Internat. Conf. on Infrared and Millimetre Waves, and 15th Internat. Conf. on TeraHertz Electronics, Cardiff, GB, September 2-7, 2007; Conf. Digest Vol. I, S.700-01
Piscataway, N.J.: IEEE, 2007; Auch auf DC-ROM

- Borie, E.
Effect of resonator parameters on frequency and quality factor of gyrotron resonators.
19th Joint Russian-German STC Workshop on ECRH and Gyrotrons, Karlsruhe/Stuttgart/Garching, July 18-24, 2007
Folien auf CD-ROM
- Braune, H.; Brand, P.; Dammertz, G.; Erckmann, V.; Gantenbein, G.; Kasperek, W.; Laqua, H.P.; Lechte, C.; Leonhardt, W.; Mellein, D.; Michel, G.; Noke, F.; Purps, F.; Schlüter, K.H.; Schmid, M.; Thumm, M.; W7-X ECRH Teams at IPP, IPF and FZK
Extended operation of the 1 MW, CW gyrotrons for W7-X.
Griffin, M.J. [Hrsg.]
Joint 32nd Internat.Conf. on Infrared and Millimetre Waves, and 15th Internat.Conf. on TeraHertz Electronics, Cardiff, GB, September 2-7, 2007
Conf.Digest Vol.I, S.104-05
Piscataway, N.J.: IEEE, 2007; Auch auf DC-ROM
- Braune, H.; Brand, P.; Erckmann, V.; Laqua, H.P.; Jonitz, L.; Leonhardt, W.; Mellein, D.; Michel, G.; Noke, F.; Purps, F.; Schlüter, K.H.; Winkler, M.; W7-X ECRH teams at IPP, IPF and FZK
Operation experiences with the HV-system for the ECRH installation at W7-X.
19th Joint Russian-German STC Workshop on ECRH and Gyrotrons, Karlsruhe/Stuttgart/Garching, July 18-24, 2007
Folien auf CD-ROM
- Braune, H.; Erckmann, V.; Illy, S.; Laqua, H.P.; Leonhardt, W.; Michel, G.; Noke, F.; Purps, F.; Schmid, M.; W7-X ECRH Teams at IPP, IPF and FZK
Advanced collector sweeping – experiment results and simple power supply solutions.
19th Joint Russian-German STC Workshop on ECRH and Gyrotrons, Karlsruhe/Stuttgart/Garching, July 18-24, 2007
Folien auf CD-ROM
- Dammertz, G.; Louksha, O.I.; Sominski, G.G.; Thumm, M.K.
On the possibility to use the treatment of gyrotron cathodes by the potassium ion flow for their emission homogeneity increase.
Griffin, M.J. [Hrsg.]
Joint 32nd Internat.Conf. on Infrared and Millimetre Waves, and 15th Internat.Conf. on TeraHertz Electronics, Cardiff, GB, September 2-7, 2007
Conf.Digest Vol.I, S.690-91
Piscataway, N.J.: IEEE, 2007; Auch auf DC-ROM
- Darbos, C.; Arnold, A.; Prinz, H.O.; Thumm, M.; Bouquey, F.; Hogge, J.P.; Lambert, R.; Lievin, C.; Magne, R.; Traisnel, E.
Upgrade of the TH1506B 118 GHz gyrotron using modelling tools.
Ryan, P.M. [Hrsg.]
Radio Frequency Power in Plasmas: Proc. of the 17th Topical Conf., Clearwater, Fla., May 7-9, 2007
Melville, N.Y.: AIP, 2007 S.425-28
(AIP Conference Proceedings; 933)
- Dumbrajs, O.; Avramides, K.A.; Piosczyk, B.
Mode competition in the 170 GHz coaxial gyrotron cavity for ITER.
Griffin, M.J. [Hrsg.]
Joint 32nd Internat.Conf. on Infrared and Millimetre Waves, and 15th Internat.Conf. on TeraHertz Electronics, Cardiff, GB, September 2-7, 2007
Conf.Digest Vol.I S. 48-49, Piscataway, N.J.: IEEE, 2007
Auch auf CD-ROM
- Erckmann, V.; Schmid, M.; Laqua, H.P.; Dammertz, G.; Illy, S.; Braune, H.; Hollmann, F.; Kasperek, W.; Michel, G.; Noke, F.; Purps, F.; ECRH Groups at IPP Greifswald, FZK Karlsruhe and IPF Stuttgart
Advanced gyrotron collector sweeping with smooth power distribution.
4th IAEA Technical Meeting on ECRH Physics and Technology for ITER, Wien, A, June 6-8, 2007; Proc. on CD-ROM
- Erckmann, V.; W7-X ECRH-Teams at IPP, IPF and FZK
The W7-X ECRH plant: recent achievements
Ryan, P.M. [Hrsg.]
Radio Frequency Power in Plasmas: Proc. of the 17th Topical Conf., Clearwater, Fla., May 7-9, 2007
Melville, N.Y.: AIP, 2007 S.421-24
(AIP Conference Proceedings; 933)
- Gantenbein, G.; Braune, H.; Dammertz, G.; Erckmann, V.; Illy, S.; Kasperek, W.; Laqua, H.P.; Lechte, C.; Legrand, F.; Lievin, C.; Leonhardt, W.; Michel, G.; Noke, F.; Piosczyk, B.; Purps, F.; Schmid, M.; Thumm, M.
1 MW, 140 GHz, CW gyrotron for W7-X. Status report on series gyrotrons.
19th Joint Russian-German STC Workshop on ECRH and Gyrotrons, Karlsruhe/Stuttgart/Garching, July 18-24, 2007
Folien auf CD-ROM
- Gantenbein, G.; Dammertz, G.; Erckmann, V.; Illy, S.; Kasperek, W.; Lechte, C.; Legrand, F.; Lietaer, G.; Lievin, C.; Piosczyk, B.; Schmid, M.; Thumm, M.
Experimental results on high-power gyrotrons for the stellarator W7-X.
Griffin, M.J. [Hrsg.]
Joint 32nd Internat.Conf. on Infrared and Millimetre Waves, and 15th Internat.Conf. on TeraHertz Electronics, Cardiff, GB, September 2-7, 2007
Conf.Digest Vol.I S. 102-03, Piscataway, N.J.: IEEE, 2007
Auch auf CD-ROM
- Gantenbein, G.; Arnold, A.; Dammertz, G.; Flamm, J.; Heidinger, R.; Illy, S.; Jin, J.; Leonhardt, W.; Neffe, G.; Piosczyk, B.; Prinz, O.; Rzesnicki, Th.; Schmid, M.; Thumm, M.; Yang, X.
Gyrotron development for electron-cyclotron-resonance heating systems in fusion devices at FZK.
Jahrestagung Kerntechnik 2007, Karlsruhe, 22.-24. Mai 2007
Berlin: INFORUM GmbH, 2007 S.624-28
CD-ROM
- Gantenbein, G.; Braune, H.; Dammertz, G.; Alberti, S.; Erckmann, V.; Hogge, J.P.; Illy, S.; Kasperek, W.; Laqua, H.P.; Legrand, F.; Leonhardt, W.; Lievin, C.; Michel, G.; Neffe, G.; Noke, F.; Piosczyk, B.; Purps, F.; Schmid, M.; Thumm, M.; Tran, M.Q.
High-power experiments with 140 GHz series gyrotrons for W7-X.
8th IEEE Internat.Vacuum Electronics Conf. (IVEC 2007), Kitakyushu, J, May 15-17, 2007, Proc.S.41-42
Piscataway, N.J.: IEEE Operations Center, 2007
- Heidinger, R.; Danilov, I.; Meier, A.; Arnold, A.; Flamm, J.; Thumm, M.; Leuterer, F.; Stober, J.; Wagner, D.
Low power mm-wave transmission characteristics of a frequency tuneable double disk CVD-diamond window.
Griffin, M.J. [Hrsg.]
Joint 32nd Internat.Conf. on Infrared and Millimetre Waves, and 15th Internat.Conf. on TeraHertz Electronics, Cardiff, GB, September 2-7, 2007
Conf.Digest Vol.II S. 877-79, Piscataway, N.J.: IEEE, 2007
Auch auf CD-ROM

Hogge, J.P.; Albajar, F.; Alberti, S.; Benin, P.; Bonicelli, T.; Cirant, S.; Fasel, D.; Goodman, T.; Illy, S.; Jawa, S.; Lievin, C.; Pagonakis, I.; Perez, A.; Piosczyk, B.; Porte, L.; Rzesnicki, T.; Thumm, M.; Tran, M.Q.

The European 2 MW, 170 GHz coaxial cavity gyrotron for ITER. Griffin, M.J. [Hrsg.]

Joint 32nd Internat.Conf. on Infrared and Millimetre Waves, and 15th Internat.Conf. on TeraHertz Electronics, Cardiff, GB, September 2-7, 2007

Conf.Digest Vol.I S. 38-40, Piscataway, N.J.: IEEE, 2007
Auch auf CD-ROM

Illy, S.; Piosczyk, B.

Particle-in-cell simulations of secondary emission effects in high power CW gyrotron collectors.

19th Joint Russian-German STC Workshop on ECRH and Gyrotrons, Karlsruhe/Stuttgart/Garching, July 18-24, 2007
Folien auf CD-ROM

Illy, S.; Piosczyk, B.

Simulation of high power CW gyrotron collectors including the effect of secondary emission.

Griffin, M.J. [Hrsg.]

Joint 32nd Internat.Conf. on Infrared and Millimetre Waves, and 15th Internat.Conf. on TeraHertz Electronics, Cardiff, GB, September 2-7, 2007

Conf.Digest Vol.I S. 50-51, Piscataway, N.J.: IEEE, 2007
Auch auf CD-ROM

Jin, J.; Thumm, M.; Piosczyk, B.; Flamm, J.; Rzesnicki, T. Improvement of quasi-optical mode converter for 170 GHz coaxial cavity gyrotron at FZK.

19th Joint Russian-German STC Workshop on ECRH and Gyrotrons, Karlsruhe/Stuttgart/Garching, July 18-24, 2007
Folien auf CD-ROM

Jin, J.; Thumm, M.; Piosczyk, B.; Flamm, J.; Rzesnicki, T. Improvement of quasi-optical mode converter for 170 GHz coaxial cavity gyrotron at FZK.

Griffin, M.J. [Hrsg.]

Joint 32nd Internat.Conf. on Infrared and Millimetre Waves, and 15th Internat.Conf. on TeraHertz Electronics, Cardiff, GB, September 2-7, 2007

Conf.Digest Vol.I S. 440-41, Piscataway, N.J.: IEEE, 2007
Auch auf CD-ROM

Jin, J.

Quasi-optical mode converter for a coaxial cavity gyrotron. Wissenschaftliche Berichte, FZKA-7264

Kartikeyan, M.V.; Borie, E.; Thumm, M.

Design studies on a 110 GHz, 1.0-1.5 MW, CW gyrotron.

Griffin, M.J. [Hrsg.]

Joint 32nd Internat.Conf. on Infrared and Millimetre Waves, and 15th Internat.Conf. on TeraHertz Electronics, Cardiff, GB, September 2-7, 2007

Conf.Digest Vol.I S. 154-55, Piscataway, N.J.: IEEE, 2007
Auch auf CD-ROM

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

FADIS, a fast switch and combiner for high-power millimetre waves.

4th IAEA Technical Meeting on ECRH Physics and Technology for ITER, Wien, A, June 6-8, 2007
Proc. on CD-ROM

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

FaDiS, a fast switch and combiner for high-power millimetre wave beams.

Griffin, M.J. [Hrsg.]

Joint 32nd Internat.Conf. on Infrared and Millimetre Waves, and 15th Internat.Conf. on TeraHertz Electronics, Cardiff, GB, September 2-7, 2007

Conf.Digest Vol.I S. 389-90, Piscataway, N.J.: IEEE, 2007
Auch auf CD-ROM

Kasperek, W.; Petelin, M.; Erckmann, V.; Shchelgolkov, D.; Bruschi, A.; Plaum, B.; ECRH Teams at IPP, IPF and FZK

Integration of fast switches/combiners into high-power millimetre wave systems.

19th Joint Russian-German STC Workshop on ECRH and Gyrotrons, Karlsruhe/Stuttgart/Garching, July 18-24, 2007
Folien auf CD-ROM

Kasperek, W.; Brand, P.; Braune, H.; Dammertz, G.; Erckmann, V.; Gantenbein, G.; Hollmann, F.; Jonitz, L.; Kumric, H.; Laqua, H.P.; Lechte, C.; Leonhardt, W.; Michel, G.; Noke, F.; Plaum, B., Purps, F.; Schmid, M.; Schulz, T.; Thumm, M.; Uhren, P.; Weißgerber, M.; W7-X ECRH Teams at IPP, FZK and IPF
The electron cyclotron heating system for the stellarator W7-X: status and recent achievements.

Griffin, M.J. [Hrsg.]

Joint 32nd Internat.Conf. on Infrared and Millimetre Waves, and 15th Internat.Conf. on TeraHertz Electronics, Cardiff, GB, September 2-7, 2007

Conf.Digest Vol.II S. 939-40, Piscataway, N.J.: IEEE, 2007
Auch auf CD-ROM

Kobayashi, N.; Bigelow, T.; Bonicelli, T.; Cirant, S.; Denisov, G.; Heidinger, R.; Henderson, M.; Hogge, J.P.; Piosczyk, B.; Ramponi, G.; Rao, S.L.; Rasmussen, d.; Saibene, G.; Sakamoto, K.; Takahashi, K.; Temkin, R.J.; Thumm, M.; Tran, M.Q.; Verhoeven, A.G.A.; Zohm, H.

Design of electron cyclotron heating and current drive system of ITER.

Ryan, P.M. [Hrsg.]

Radio Frequency Power in Plasmas: Proc. of the 17th Topical Conf., Clearwater, Fla.; May 7-9, 2007

Melville, N.Y.: AIP, 2007 S.413-16
(AIP Conference Proceedings; 933)

Kumar, A.; Kartikeyan, M.V.; Borie, E.; Thumm, M.

Studies on a 120 GHz, 1.0 MW, longpulse gyrotron for plasma start-up in ITER.

Griffin, M.J. [Hrsg.]

Joint 32nd Internat.Conf. on Infrared and Millimetre Waves, and 15th Internat.Conf. on TeraHertz Electronics, Cardiff, GB, September 2-7, 2007

Conf.Digest Vol.I S. 46-47, Piscataway, N.J.: IEEE, 2007
Auch auf CD-ROM

Louksha, O.I.; Piosczyk, B.; Samsonov, D.B.; Sominski, G.G.; Thumm, M.K.

Experimental study of gyrotron efficiency enhancement by improvement of electron beam quality.

Griffin, M.J. [Hrsg.]

Joint 32nd Internat.Conf. on Infrared and Millimetre Waves, and 15th Internat.Conf. on TeraHertz Electronics, Cardiff, GB, September 2-7, 2007

Conf.Digest Vol.II S. 880-81, Piscataway, N.J.: IEEE, 2007
Auch auf CD-ROM

- Manini, A.; Gantenbein, G.; Hicks, N.; Leuterer, F.; Maraschek, M.; Neu, R.; Stober, J.; Suttrop, W.; Wagner, D.; Zohm, H.; ASDEX Upgrade Team
Plasma stability enhancement using EC-RH/CD in ASDEX upgrade.
4th IAEA Technical Meeting on ECRH Physics and Technology for ITER, Wien, A, June 6-8, 2007
Proc. on CD-ROM, Wien: IAEA
- Maraschek, M.; Gantenbein, G.; Yu, Q.; Zohm, H.; Günter, S.; Leuterer, F.; Manini, A.
Optimisation of the control of neoclassical tearing modes with ECCD in ASDEX upgrade and ITER.
33rd European Physical Society Conf. on Plasma Physics, Roma, I, June 19-23, 2006
Contributed Papers on CD-ROM P-2.147
European Physical Society, 2006
(eurphysics conference abstracts; 30I)
- Michel, G.; Braune, H.; Erckmann, V.; Laqua, H.; Noke, F.; Purps, F.; Dammertz, G.; Thumm, M.; Lechte, C.; Dumbrajs, O.
Dual frequency operation of the W7-X gyrotron.
19th Joint Russian-German STC Workshop on ECRH and Gyrotrons, Karlsruhe/Stuttgart/Garching, July 18-24, 2007
Folien auf CD-ROM
- Piosczyk, B.; Albajar, F.; Alberti, S.; Benin, P.; Bin, W.; Bonicelli, T.; Cirant, S.; Dammertz, G.; Dumbrajs, O.; Fasel, D.; Flamm, J.; Gantenbein, G.; Giguët, E.; Goodman, T.; Hogge, J.P.; Illy, S.; Jin, J.; Lievin, C.; Prinz, O.; Rzesnicki, T.; Schmid, M.; Thumm, M.; Tran, M.Q.
170 GHz, 2 MW coaxial cavity gyrotron – status.
19th Joint Russian-German STC Workshop on ECRH and Gyrotrons, Karlsruhe/Stuttgart/Garching, July 18-24, 2007
Folien auf CD-ROM
- Piosczyk, B.; Rzesnicki, T.; Dammertz, G.; Dumbrajs, O.; Flamm, J.; Gantenbein, G.; Illy, S.; Jin, J.; Prinz, O.; Thumm, M.
Investigations on an experimental 170 GHz coaxial cavity gyrotron
Griffin, M.J. [Hrsg.]
Joint 32nd Internat. Conf. on Infrared and Millimetre Waves, and 15th Internat. Conf. on TeraHertz Electronics, Cardiff, GB, September 2-7, 2007
Conf. Digest Vol. I S. 96-97, Piscataway, N.J.: IEEE, 2007
Auch auf CD-ROM
- Piosczyk, B.; Albajar, F.; Alberti, S.; Benin, P.; Bin, W.; Bonicelli, T.; Cirant, S.; Dammertz, G.; Dumbrajs, O.; Fasel, D.; Flamm, J.; Gantenbein, G.; Giguët, E.; Goodman, T.; Hogge, J.P.; Illy, S.; Jin, J.; Lievin, C.; Prinz, O.; Rzesnicki, T.; Schmid, M.; Thumm, M.; Tran, M.Q.
Status of the 2 MW, 170 GHz coaxial cavity gyrotron for ITER.
4th IAEA Technical Meeting on ECRH Physics and technology for ITER, Wien, A, June 6-8, 2007
Proc. on CD-ROM
- Prinz, H.O.
Dreidimensionale Feldberechnung für elektrisch große Geometrien und ihre Anwendung für multifrequente Hochleistungsgyrotrons.
Wissenschaftliche Berichte, FZKA-7351
Dissertation, Universität Karlsruhe
- Prinz, H.O.; Gantenbein, G.; Thumm, M.
Matching the output beam of a multifrequency gyrotron to a Brewster window with small aperture.
8th IEEE Internat. Vacuum Electronics Conf. (IVEC 2007), Kitakyushu, J, May 15-17, 2007
Proc.S.49-50, Piscataway, N.J.: IEEE Operations Center, 2007
- Prinz, H.O.; Thumm, M.
Simulations of quasi-optical output systems for high power gyrotrons based on the electric field integral equation.
2007 IEEE MTT-S Internat. Microwave Symp. Digest, Honolulu, Hawaii, June 3-8, 2007
CD ROM S.1149-51, New York, N.Y.: IEEE, 2007
- Prinz, O.; Arnold, A.; Gantenbein, G.; Piosczyk, B.; Thumm, M.
Current status of the quasi-optical mode converter for the 105-143 GHz multi-frequency gyrotron.
19th Joint Russian-German STC Workshop on ECRH and Gyrotrons, Karlsruhe/Stuttgart/Garching, July 18-24, 2007
Folien auf CD-ROM
- Prinz, O.; Arnold, A.; Dammertz, G.; Flamm, J.; Gantenbein, G.; Jin, J.; Piosczyk, B.; Rzesnicki, T.; Thumm, M.
Quasi-optical mode converter for a multifrequency D-band gyrotron.
Griffin, M.J. [Hrsg.]
Joint 32nd Internat. Conf. on Infrared and Millimetre Waves, and 15th Internat. Conf. on TeraHertz Electronics, Cardiff, GB, September 2-7, 2007
Conf. Digest Vol. II S. 888-89, Piscataway, N.J.: IEEE, 2007
Auch auf CD-ROM
- Rzesnicki, T.; Piosczyk, B.; Dammertz, G.; Gantenbein, G.; Thumm, M.; Michel, G.
170 GHz, 2 MW coaxial cavity gyrotron – investigation of the parasitic oscillations and efficiency of the RF-output system.
8th IEEE Internat. Vacuum Electronics Conf. (IVEC 2007), Kitakyushu, J, May 15-17, 2007
Proc.S.45-46, Piscataway, N.J.: IEEE Operations Center, 2007
- Rzesnicki, T.
Analyse eines neuartigen 1.5 MW, 170 GHz Prototyp-Gyrotrons mit koaxialem Resonator.
Wissenschaftliche Berichte, FZKA-7299
Dissertation, Universität Karlsruhe 2007
- Rzesnicki, T.; Piosczyk, B.; Flamm, J.; Gantenbein, G.; Jin, J.; Thumm, M.; Michel, G.
The quasi-optical RF output system for the 170 GHz, 2 MW coaxial cavity gyrotron.
19th Joint Russian-German STC Workshop on ECRH and Gyrotrons, Karlsruhe/Stuttgart/Garching, July 18-24, 2007
Folien auf CD-ROM
- Schmid, M.; Illy, S.; Dammertz, G.; Thumm, M.; Erckmann, V.
50 Hertz transverse field collector sweep system for the W7-X gyrotron.
19th Joint Russian-German STC Workshop on ECRH and Gyrotrons, Karlsruhe/Stuttgart/Garching, July 18-24, 2007
Folien auf CD-ROM
- Shchegolkov, d.; Bruschi, A.; Erckmann, V.; Kasperek, W.; Petelin, M.; Plaum, B.; ECRH Groups at IPP Greifswald, FZK Karlsruhe and IPF Stuttgart
Wave beam combining and scanning method for plasma stabilization.
19th Joint Russian-German STC Workshop on ECRH and Gyrotrons, Karlsruhe/Stuttgart/Garching, July 18-24, 2007
Folien auf CD-ROM
- Strauß, D.; Heidinger, R.; Gantenbein, G.; Hailfinger, G.; Kleefeldt, K.; Serikov, A.; Späh, P.
Structural and electromagnetic study of the upper port plug for the ECRH in ITER.
4th IAEA Technical Meeting on ECRH Physics and Technology for ITER, Wien, A, June 6-8, 2007; Proc. on CD-ROM; Wien: IAEA

Thumm, M.; Dammertz, G.; Gantenbein, G.; Illy, S.; Leonhardt, W.; Neffe, G.; Piosczyk, B.; Schmid, M.; Braune, H.; Erckmann, V.; Laqua, H.P.; Michel, G.; Weissgerber, M.; Brand, P.; Kasperek, W.; Lechte, C.
10 MW, 140 GHz, CW millimeter wave heating system for nuclear fusion plasma heating.
41st IMPI Annual Microwave Symp., Vancouver, CDN, August 1-3, 2007; Proc. S. 2
Mechanicsville, VA.: The Int.Microwave Power Institute, 2007

Thumm, M.
State-of-the-art of high power gyro-devices and free electron masers. Update 2006.
Wissenschaftliche Berichte, FZKA-7289

Wagner, D.; Leuterer, F.; Manini, A.; Monaco, F.; München, M.; Schütz, H.; Stober, J.; Zohm, H.; Franke, T.; Thumm, M.; Heidinger, R.; Meier, A.; Gantenbein, G.; Flamm, J.; Kasperek, W.; Lechte, C.; Litvak, A.; Denisov, G.; Tai, E.M.; Popov, L.; Nichiporenko, V.; Myasnikov, V.; Solyanova, E.; Malygin, S.
Commissioning of the second two-frequency gyrotron in the new multi-frequency ECRH system for ASDEX upgrade.
Griffin, M.J. [Hrsg.]
Joint 32nd Internat.Conf. on Infrared and Millimetre Waves, and 15th Internat.Conf. on TeraHertz Electronics, Cardiff, GB, September 2-7, 2007
Conf.Digest Vol.II S. 807-08, Piscataway, N.J.: IEEE, 2007
Auch auf CD-ROM

Wagner, D.; Grünwald, G.; Leuterer, F.; Manini, A.; Monaco, F.; München, M.; Schütz, H.; Stober, J.; Zohm, H.; Franke, T.; Thumm, M.; Heidinger, R.; Gantenbein, G.; Meier, A.; Kasperek, W.; Lechte, C.; Litvak, A.; Denisov, G.; Tai, E.M.; Popov, L.; Nichiporenko, V.; Myasnikov, V.; Solyanova, E.; Malygin, S.A.
Present status of the new multi-frequency ECRH system for ASDEX upgrade.
4th IAEA Techn. Meeting on ECRH Physics and Technology for ITER, Wien, A, June 6-8, 2007; Proc. on CD-ROM; Wien: IAEA

Wagner, D.; Grünwald, G.; Leuterer, F.; Manini, A.; Monaco, F.; München, M.; Schütz, H.; Stober, J.; Zohm, H.; Franke, T.; Thumm, M.; Heidinger, R.; Gantenbein, G.; Meier, A.; Kasperek, W.; Lechte, C.; Litvak, A.; Denisov, G.; Tai, E.M.; Popov, L.; Nichiporenko, V.; Myasnikov, V.; Solyanova, E.; Malygin, S.A.
Progress with the new multi-frequency ECRH system for ASDEX upgrade.
19th Joint Russian-German STC Workshop on ECRH and Gyrotrons, Karlsruhe/Stuttgart/Garching, July 18-24, 2007
Folien auf CD-ROM

Wagner, D.; Leuterer, F.; Manini, A.; Monaco, F.; München, M.; Schütz, H.; Stober, J.; Zohm, H.; Franke, T.; Thumm, M.; Heidinger, R.; Danilov, I.; Gantenbein, G.; Flamm, J.; Kasperek, W.; Litvak, A.G.; Popov, L.G.; Nichiporenko, V.O.; Myasnikov, V.E.; Denisov, G.G.; Tai, E.M.; Solyanova, E.A.; Malygin, S.A.
Status of the new multi-frequency ECRH system for ASDEX upgrade.
4th IAEA Technical Meeting on ECRH Physics and technology for ITER, Wien, A, June 6-8, 2007
Proc. auf CD-ROM

Vorträge, die nicht in gedruckter Form vorliegen:

Bazylev, B.; Janeschitz, G.; Landman, I.; Pestchanyi, S.; Loarte, A.; Federici, G.; Merola, M.; Linke, J.; Hirai, T.; Zhitlukhin, A.; Podkovyrov, V.; Klimov, N.
Damage to tungsten macro-brush targets under ELM-like heat loads. Experiments vs. numerical simulations.
10th European Congress and Exhibition on Advanced Materials and Processes (Euromat 2007), Nürnberg, September 10-13, 2007

Bazylev, B.; Janeschitz, G.; Landman, I.; Pestchanyi, S.; Loarte, A.; Federici, G.; Merola, M.; Linke, J.; Hirai, T.; Zhitlukhin, A.; Podkovyrov, V.; Klimov, N.
Damage to tungsten macro-brush targets under multiple ELM-like heat loads. Experiments vs. numerical simulations and extrapolation to ITER.
8th Internat. Symp. on Fusion Nuclear Technology (ISFNT-8), Heidelberg, September 30 – October 5, 2007

Bazylev, B.; Janeschitz, G.; Landman, I.; Pestchanyi, S.; Loarte, A.
Erosion simulation of first wall beryllium armour under ITER transient heat loads.
13th Internat. Conf. on Fusion Reactor Materials (ICFRM-13), Nice, F, December 10-14, 2007

Bazylev, B.; Janeschitz, G.; Landman, I.; Pestchanyi, S.; Loarte, A.
Melt layer damage simulation of first wall beryllium armour under heat load caused by ITER transient events.
34th European Physical Society Conf. on Plasma Physics, Warszawa, PL, July 2-6, 2007

Braune, H.; Brand, P.; Erckmann, V.; Laqua, H.P.; Jonitz, L.; Leonhardt, W.; Mellein, D.; Michel, G.; Noke, F.; Purps, F.; Schlüter, K.H.; Winkler, M.; W7-X ECRH teams at IPP, IPF and FZK
Operation experiences with the HV-system for the ECRH installation at W7-X.
19th Joint Russian-German STC Workshop on ECRH and Gyrotrons, Karlsruhe/Stuttgart/Garching, July 18-24, 2007
Folien auf CD-ROM

Cirant, S.; Bin, W.; Bruschi, A.; Erckmann, W.; Gandini, F.; Piosczyk, B.
Beam power measurement and imaging in matched quasi-optical loads.
Workshop on RF Heating Technology of Fusion Plasmas, Heidelberg, September 10-12, 2007
Book of Abstracts

Dammertz, G.
Status and results of the 140 GHz, 1MW, CW W7-X gyrotron and the 170 GHz, 2 MW shortpulse coaxial ITER pre-prototype gyrotron.
6th School on Fusion Physics and Technology, Volos, GR, March 26-31, 2007

D'Andrea, D.; Schneider, R.; Munz, C.D.
Long range particle collisions for the PIC/DSMC simulation code PicLas.
30th Internat. Electric Propulsion conf., Firenze, I, September 17-20, 2007

Gantenbein, G.; Dammertz, G.; Erckmann, V.; Illy, S.; Kasperek, W.; Lechte, C.; Lievin, C.; Piosczyk, B.; Schmid, M.; Thumm, M.
Status report on series gyrotrons for the 10 MW, 140 GHz, CW ECRH system of the stellarator W7-X.
Workshop on RF Heating Technology of Fusion Plasmas, Heidelberg, September 10-12, 2007
Book of Abstracts

Garkusha, I.E.; Bandura, A.N.; Byrka, O.V.; Chebotarev, V.V.; Landman, I.S.; Kulik, N.V.; Makhilaj, V.A.; Petrov, Yu.V.; Solyakov, d.G.; Tereshin, V.I.
Tungsten melt layer erosion due to $J \times B$ force under conditions relevant to ITER ELMs.
17th Internat.Conf.on Plasma Surface Interactions in Controlled Fusion Devices, Hefei, China, May 22-26, 2006

- Henderson, M.A.; Saibene, G.; Albajar, F.; Alberti, S.; Bonicelli, T.; Chavan, R.; de Baar, M.; Farina, D.; Fasel, D.; Heidinger, R.; Pagonakis, I.; Piosczyk, B.; Ramponi, G.; Sauter, O.; Thumm, M.; Zucca, C.
Critical issues associated with the ITER ECH system.
Workshop on RF Heating Technology of Fusion Plasmas, Heidelberg, September 10-12, 2007
Book of Abstracts
- Kumar, A.; Kartikeyan, M.V.; Borie, E.M.; Thumm, M.K.
Design studies on a 1.0-1.3 MW, long pulse, start-up gyrotron for ITER.
22nd Nat.Symp. on Plasma Science and Technology (PLASMA-2007), Ahmedabad, IND, December 6-10, 2007
- Landman, I.S.; Janeschitz, G.
Contamination of ITER core by impurities of Tungsten and Carbon.
8th Internat. Symp. on Fusion Nuclear Technology (ISFNT-8), Heidelberg, September 30 – October 5, 2007
- Landman, I.S.; Janeschitz, G.
Modelling of radiation impact on ITER beryllium wall.
13th Internat. Conf. on Fusion Reactor Materials (ICFRM-13), Nice, F, December 10-14, 2007
- Landman, I.S.; Janeschitz, G.
Plasma convection in ITER integrated modelling with the code TOKES.
34th European Physical Society Conf.on Plasma Physics, Warszawa, PL, July 2-6, 2007
- Loarte, A.; Saibene, G.; Sartori, R.; Riccardo, V.; Andrew, P.; Paley, J.; Fundamenski, W.; Eich, T.; Herrmann, A.; Pautasso, G.; Kirk, A.; Counsell, G.; Federici, G.; Strohmayer, G.; Whyte, D.; Leonard, A.; Pitts, R.A.; Landman, I.; Bazylev, B.; Pestchanyi, S.
Transient heat loads in current fusion experiments, extrapolation to ITER and consequences for its operation.
11th Internat.Workshop on Plasma-Facing Materials and Components for Fusion Applications, Greifswald, October 10-12, 2006
- Makhlay, V.A.; Bandura, A.N.; Byrka, O.V.; Garkusha, I.E.; Chebotarev, V.V.; Tereshin, V.I.; Landman, I.
Effect of preheating on the damage to tungsten targets after repetitive ITER ELM-like heat loads.
11th Internat.Workshop on Plasma –Facing Materials and Components for Fusion Applications, Greifswald, October 10-12, 2006
- Pestchanyi, S.
Simulation of dust production in ITER transient events.
8th Internat.Symp.on Fusion Nuclear Technology (ISFNT-8), Heidelberg, September 30 – October 5, 2007
- Pestchanyi, S.
Simulation of ITER first wall radiation heat load during the disruption.
34th European Physical Society Conf.on Plasma Physics, Warszawa, PL, July 2-6, 2007
- Piosczyk, B.; Dammertz, G.; Arnold, A.; Gantenbein, G.; Illy, S.; Jin, J.; Prinz, O.; Flamm, J.; Rzesnicki, T.; Thumm, A.; Alberti, S.; Goodman, T.; Hogge, J.P.; Tran, M.Q.; Erckmann, V.; Laqua, H.; Michel, G.; Dumbrajs, O.; Benin, P.; Giguet, E.; Lievin, C.
Development of high power gyrotrons for fusion applications at FZK Karlsruhe.
Pulsed Power and Plasma Science Conf., Albuquerque, NM, June 17-22, 2007
Book of Abstracts S. 550
- Piosczyk, B.
Development of multimewatt gyrotrons at Forschungszentrum Karlsruhe (FZK).
Vortr.: Central Electronics Engineering Research Institute (CEERI), Pilani, IND, 20. März 2007
- Piosczyk, B.
Gyrotrons and its components.
Vortr.: Central Electronics Engineering Research Institute (CEERI), Pilani, IND, 23. März 2007
- Piosczyk, B.; Rzesnicki, T.; Albajar, F.; Alberti, S.; Benin, P.; Bin, W.; Bonicelli, T.; Cirant, S.; Dammertz, G.; Dumbrajs, O.; Fasel, D.; Flamm, J.; Gantenbein, G.; Giguet, E.; Goodman, T.; Hogge, J.P.; Illy, S.; Jin, J.; Lievin, C.; Prinz, O.; Schmid, M.; Thumm, M.; Tran, M.Q.
Status of the 2 MW, 170 GHz coaxial cavity gyrotron for ITER.
Workshop on RF Heating Technology of Fusion Plasmas, Heidelberg, September 10-12, 2007
Book of Abstracts
- Piosczyk, B.; Flamm, J.; Gantenbein, G.; Jin, J.; Thumm, M.
The quasi-optical RF output system for the 2 MW, 170 GHz, coaxial cavity gyrotron.
19th Joint Russian-German STC Workshop on ECRH and Gyrotrons, Karlsruhe/Stuttgart/Garching, July 18-24, 2007
- Prinz, H.O.; Arnold, A.; Dammertz, G.; Thumm, M.
Redesign and 3D-simulation of the quasi-optical mode converter for a TE_{22,6} 118 GHz gyrotron.
Pulsed Power and Plasma Science Conf., Albuquerque, NM, June 17-22, 2007
Book of Abstracts S.551
- Prinz, O.
3D simulations on quasi-optical gyrotron mode converters.
6th School on Fusion Physics and Technology, Volos, GR, March 26-31, 2007
- Quandt, M.; Munz, C.D.; Schneider, R.
A high order relativistic particle push method for PIC simulations.
30th Internat. Electric Propulsion Conference, Firenze, I, September 17-20, 2007
- Thumm, M.; Dammertz, G.; Gantenbein, G.; Illy, S.; Leonhardt, W.; Neffe, G.; Piosczyk, B.; Schmid, M.; Braune, H.; Erckmann, V.; Laqua, H.P.; Michel, G.; Weissgerber, M.; Brand, P.; Kasperek, W.; Lechte, C.
10 MW, 140 GHz, CW gyrotron and optical transmission system for millimeter wave heating of plasmas in the stellarator W7-X.
1st Shenzhen Int.Conf. on Advanced Science and Technology – THz Radiation Science and Technology, Shenzhen, China, November 18-23, 2007; Book of Abstracts S.18
- Thumm, M.; Dammertz, G.; Gantenbein, G.; Illy, S.; Leonhardt, W.; Neffe, G.; Piosczyk, B.; Schmid, M.; Braune, H.; Erckmann, V.; Laqua, H.P.; Michel, G.; Weissgerber, M.; Brand, P.; Kasperek, W.; Lechte, C.
Progress on the 10 MW GHz ECH system for the stellarator W7-X.
Pulsed Power and Plasma Science Conf., Albuquerque, NM, June 17-22, 2007; Book of Abstracts S.236
- Thumm, M.
Quasi-optical gyrotron mode converters.
6th Greek School on Fusion Physics and Technology, Volos, GR, March 26-31, 2007

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

First experience with the new multi-frequency ECRH system at ASDEX upgrade.

Workshop on RF Heating Technology of Fusion Plasmas, Heidelberg, September 10-12, 2007. Book of Abstracts.

Wagner, D.; Leuterer, F.; Stober, J.; Manini, A.; Monaco, F.; Münich, M.; Schütz, H.; Zohm, H.; Franke, T.; Thumm, M.; Heiding, R.; Danilov, I.; Gantenbein, G.; Flamm, J.; Litvak, A.G.; Popov, L.G.; Nichiporenko, V.O.; Myasnikov, V.E.; Denisov, G.G.; Tai, E.M.; Solyanova, E.A.; Malygin, S.A. Present status of the new multifrequency ECRH system for ASDEX upgrade.

Pulsed Power and Plasma Science Conf., Albuquerque, NM, June 17-22, 2007; Book of Abstracts S.554

Wagner, D.; Leuterer, F.; Stober, J.; Manini, A.; Monaco, F.; Münich, M.; Schütz, H.; Zohm, H.; Franke, T.; Thumm, M.; Heiding, R.; Danilov, I.; Gantenbein, G.; Flamm, J.; Litvak, A.G.; Popov, L.G.; Nichiporenko, V.O.; Myasnikov, V.E.; Denisov, G.G.; Tai, E.M.; Solyanova, E.A.; Malygin, S.A. Present status of the new multi-frequency ECRH system for ASDEX upgrade.

Pulsed Power and Plasma Science Conf., Albuquerque, NM, June 17-22, 2007; Book of Abstracts S.554

Patente:

Pestchanyi, S.

Verbesserte plattenförmiger Carbonfaser-Verbundwerkstoff.
DE-OS 10 2005 019 730 (2.11.2006)

NANOMIKRO: Programm Nano- und Mikrosysteme

Publikationen in begutachteten Zeitschriften:

Arnedo, I.; Gill, J.; Ortiz, N.; Lopetegi, T.; Laso, M.A.G.; Sorolla, M.; Thumm, M.; Schmitt, D.; Guglielmi, M.
Ku-band high-power lowpass filter with spurious rejection.
Electronics Letters, 42(2006) S.1460-61
DOI:10.1049/el:20062900

Augieri, A.; Celentano, G.; Gambardella, U.; Halbritter, J.; Petrisor, T.
Analysis of angular dependence of pinning mechanisms on Ca-substituted $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ epitaxial thin films.
Superconductor Science and Technology, 20(2007) S.381-85
DOI:10.1088/0953-2048/20/4/013

Augieri, A.; Celentano, G.; Ciontea, L.; Galluzzi, v.; Gambardella, U.; Halbritter, J.; Petrisor, T.; Rufoloni, A.; Vannozzi, A.
Angular properties of pure and Ca-substituted $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ superconducting thin films grown on SrTiO_3 and CeO_2 buffered Al_2O_3 substrates.
Physica C, 460-462 (2007) S.829-30
DOI:10.1016/j.phys.2007.04.086

Halbritter, J.
High frequency transport properties of YBCO: Extrinsic versus intrinsic d-wave properties.
Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, 19(2006) S.547-60
DOI:10.1007/s10948-006-0128-0

Kartikeyan, M.V.; Borie, E.; Thumm, M.
A 250 GHz, 50 W, CW second harmonic gyrotron.
International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 28(2007) S.611-19
DOI:10.1007/s10762-007-9242-8

Konoplev, I.V.; Cross, A.W.; Phelps, A.D.R.; He, W.; Ronald, K.; Whyte, C.G.; Robertson, C.W.; MacInnes, P.; Ginzburg, N.S.; Peskov, N.Y.; Sergeev, A.S.; Zaslavsky, V.Y., Thumm, M.
Experimental and theoretical studies of a coaxial free-electron maser based on two-dimensional distributed feedback.
Physical Review E, 76(2007) S.056406/1-12
DOI:10.1103/PhysRevE.76.056406

Peskov, N.Yu.; Ginzburg, N.S.; Denisov, G.G.; Zaslavskii, V.Yu.; Kuzikov, S.V.; Sergeev, A.S.; Arzhannikov, A.V.; Kalinin, P.V.; Sinitskii, S.L.; Thumm, M.
Experimental observation of high-Q modes at the center of a resonance band of two-dimensional Bragg structures.
Technical Physics Letters, 33(2007) S.117-21
DOI:10.1134/S1063785007020083

Rybakov, K.I.; Semenov, V.E.; Link, G.; Thumm, M.
Preferred orientation of pores in ceramics under heating by a linearly polarized microwave field.
Journal of Applied Physics, 101(2007) S.84915/1-5
DOI:10.1063/1.2723187

Sonstige Publikationen die in gedruckter Form vorliegen:

Arnedo, I.; Gill, J.; Ortiz, N.; Lopetegi, T.; Laso, M.A.G.; Thumm, M.; Sorolla, M.; Schmitt, D.; Guglielmi, M.
Spurious removal in satellite output multiplexer power filters.
37th European Microwave Conf., München, October 9-12, 2007
Proc. on CD-ROM S. 67-70
Louvain-la-Neuve: European Microwave Association, 2007

- Augieri, A.; Celentano, G.; Cioneta, L.; Galluzzi, V.; Gambardella, U.; Halbritter, J.; Petrisor, T.; Rufoloni, A.; Vannozzi, A.
Angular properties of pure and Ca-substituted $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ superconducting thin films grown on SrTiO_3 and CeO_2 buffered Al_2O_3 substrates.
8th Internat.Conf. on Materials and Mechanisms of Superconductivity and High Temperature Superconductors – M2S-HTSC VIII, Dresden, July 9-14, 2006
- Ginzburg, N.S.; Peskov, N.Yu., Sergeev, A.S.; Zaslavsky, V.Yu.; Arzhannikov, A.V.; Kalinin, P.V.; Sinitzky, S.L.; Phelps, A.D.R.; Konoplev, I.V.; Cross, A.W.; Thumm, M.
Two dimensional Bragg structures (Modeling and experimental testing of selective properties).
Griffin, M.J. [Hrsg.]
Joint 32nd Internat.Conf. on Infrared and Millimetre Waves, and 15th Internat.Conf. on TeraHertz Electronics, Cardiff, GB, September 2-7, 2007; Conf.Digest Vol.II, S.833-34
Piscataway, N.J.: IEEE, 2007; Auch auf DC-ROM
- Link, G.; Miksch, S.; Thumm, M.; Faubel, W.; Heissler, S.
Investigations on non-thermal effects during microwave processing at FZK.
19th Joint Russian-German STC Workshop on ECRH and Gyrotrons, Karlsruhe/Stuttgart/Garching, July 18-24, 2007
Folien auf CD-ROM
- Link, G.; Miksch, S.; Thumm, M.
Nicht-thermische Effekte beim Mikrowellensintern von ZrO₂-Keramik.
Symp. 'Thermische Verfahrenstechnik in der Keramik', Erlangen, 27.-28. November 2007
Fortschrittsberichte der Deutschen Keramischen Gesellschaft: Verfahrenstechnik, 21(2007) Nr. 1, S.132-39
(CFI Beihefte)
- Link, G.; Faubel, W.; Heissler, St.; Weidler, P.G.; Thumm, M.
Non-thermal microwave effects during microwave processing of clay minerals.
Silaghi, A.M. [Hrsg.]
11th Internat.Conf.on Microwave and High Frequency Heating, Oradea, R, September 3-6, 2007; Proc.Book S.219-22
Oradea: Editura Universității din Oradea, 2007
- Phelps, A.D.R.; Konoplev, I.V.; Cross, A.W.; MacInnes, P.; He, W.; Ronald, K.; Whyte, C.G.; Robertson, C.W.; Thumm, M.
Free-electron maser based on two-dimensional distributed feedback.
Griffin, M.J. [Hrsg.]
Joint 32nd Internat.Conf. on Infrared and Millimetre Waves, and 15th Internat.Conf. on TeraHertz Electronics, Cardiff, GB, September 2-7, 2007
Conf.Digest Vol.II, S.830-324
Piscataway, N.J.: IEEE, 2007; Auch auf DC-ROM
- Rybakov, K.I.; Semenov, V.E.; Link, G.; Thumm, M.
Deformation of pores in ionic crystalline materials under heating by a linearly polarized microwave field.
Silaghi, A.M. [Hrsg.]
11th Internat.Conf.on Microwave and High Frequency Heating, Oradea, R, September 3-6, 2007
Proc.Book S.215-18
Oradea: Editura Universității din Oradea, 2007
- Takayama, S.; Link, G.; Thumm, M.; Matsubara, A.; Sato, M.; Sano, S.
Reduction behavior of magnetite for microwave frequency.
Silaghi, A.M. [Hrsg.]
11th Internat.Conf.on Microwave and High Frequency Heating, Oradea, R, September 3-6, 2007
Proc.Book S.327-30
Oradea: Editura Universității din Oradea, 2007
- Takayama, S.; Link, G.; Thumm, M.; Matsubara, A.; Sato, M.; Sano, S.
Reduction of magnetite in air by use of microwave heating.
8th IEEE Internat. Vacuum Electronics Conf. (IVEC 2007), Kitakyushu, J, May 15-17, 2007
Proc. S. 437-38
Piscataway, N.J.: IEEE Operations Center, 2007
- Takayama, S.; Link, G.; Thumm, M.; Matsubara, A.; Sato, M.; Sano, S.; Makino, Y.
Reduction of magnetite in air by use of microwave heating.
Journal of the Japanese Society of Powder and Powder Metallurgy, 54(2007) S.590-94
- Vorträge, die nicht in gedruckter Form vorliegen:**
- Chauhan, N.; Kamakshi, S.; Kumar, A.; Mittal, A.; Wagner, D.; Kartikeyan, M.V.; Thumm, M.K.
Design and optimization of non-linear tapers for high power gyrotrons.
22nd Nat.Symp. on Plasma Science and Technology (PLASMA-2007), Ahmedabad, IND, December 6-10, 2007
- Kumar, A.; Kamakshi, S.; Chauhan, N.; Illy, S.; Borie, E.; Piosczyk, B.; Kartikeyan, M.V.; Thumm, M.K.
Design studies of a 42 GHz, 200 kW, CW gyrotron operating in the TE_{0,3} mode with axial output collection.
22nd Nat.Symp.on Plasma Science and Technology (PLASMA-2007), Ahmedabad, IND, December 6-10, 2007
- Link, G.; Thumm, M.
Kommerzielle Gyrotrons und deren Anwendung beim Sintern.
IPF-Workshop, Freudenstadt, 25.-26. September 2007
- Link, G.; Miksch, S.; Thumm, M.
Microwave sintering techniques – more than just a different way of heating?
31st Internat. Cocoa Beach Conf. and Exhibition on Advanced Ceramics and Composites, Daytona Beach, Fla., January 21-26, 2007; Book of Abstracts S.52
- Link, G.; Miksch, S.; Takayama, S.; Thumm, M.
Sintering in polarized microwave fields. A novel method to proof non-thermal microwave effects.
10th Internat.Conf. and Exhibition of the European Ceramic Society, Berlin, June 17-21, 2007
- Takayama, S.; Link, G.; Sano, S.; Sato, M.; Thumm, M.
Reduction behavior of magnetite for microwave frequency.
Joint Conf. on 17th Internat. Toki Conf. on Physics of Flows and Turbulence in Plasmas and 16th Internat. Stellarator/Heliotron Workshop 2007, Toki, J, October 15-19, 2007
Book of Abstracts S.97
- Thumm, M.
State-of-the-art of gyro-devices and free electron masers.
6th Greek School on Fusion Physics and Technology, Volos, GR, March 26-31, 2007

NUKLEAR: Programm Nukleare Sicherheitsforschung

Buchbeitrag

Müller, G.; Schumacher, G.; Heinzel, A.; Muscher, H.; Weisenburger, A.
Pb and LBE corrosion protection at elevated temperatures.
Handbook on Lead-Bismuth Eutectic Alloy and Lead Properties, Materials Compatibility, Thermal-hydraulics and Technologies 2007 Edition
Issy-les-Moulineaux: OECD Nuclear Energy Agency, 2007, S.379-97; inkl. CD-ROM

Publikationen in begutachteten Zeitschriften:

Broeders, C.H.M.; Kessler, G.
Fuel cycle options for the production and utilization of denatured plutonium.
Nuclear Science and Engineering, 156(2007) S.1-23

Kessler, G.
Plutonium denaturing by ²³⁸Pu.
Nuclear Science and Engineering, 155(2007) S.53-73

Sonstige Publikationen die in gedruckter Form vorliegen:

Fazio, C.; Müller, G.; Struwe, D.; Weisenburger, A.
Cladding materials performance and the safety of HLM cooled systems.
Annual Meeting of the American Nuclear Society, Boston, Mass., June 24-28, 2007
Transactions of the American Nuclear Society, 96(2007) S.714-15; Auch auf CD-ROM

Heinzel, A.
Transmutation, eine Möglichkeit zur Vernichtung hochradioaktiven Abfalls aus Kernkraftwerken.
Marie Gräfin von Linden-Preis 2005
Freiburg: Verband Baden-Württembergischer Wissenschaftlerinnen
Positionen, 28(2007) S.33-42

Kieser, M.; Muscher, H.; Heinzel, A.; Müller, G.; Weisenburger, A.
Investigation of corrosion and erosion behaviour of steels as structure materials for pumps in lead-cooled systems.
8th Internat. Topical Meeting on Nuclear Applications and Utilization of Accelerators (AccAPP'07), Pocatello, Idaho, July 30 – August 2, 2007
Proc. S.292-98; Auch auf CD-ROM
LaGrange Park, Ill., ANS, 2007

Knebel, J.U.; Fazio, C.; Konys, J.; Müller, G.; Stieglitz, R.
Overview on corrosion and thermal-hydraulic issues of liquid metal coolants.
8th Internat. Topical Meeting on Nuclear Applications and Utilization of Accelerators (AccAPP'07), Pocatello, Idaho, July 30 – August 2, 2007
Proc. S.18-28; Auch auf CD-ROM
LaGrange Park, Ill., ANS, 2007

Muscher, H.; Kieser, M.; Weisenburger, A.; Müller, G.
Towards the CFD-investigation of models to predict the corrosion-erosion of steels sheets immersed in flowing liquid lead.
4th NAFEMS CFD Seminar: Developments in CFD: Reliable Use of CAD-based Software Including Dedicated Codes, Wiesbaden, March 26-27, 2007
Grafing: NAFEMS, 2007 (9) S.1-11

Schulenberg, T.; Stieglitz, R.; Müller, G.; Konys, J.
Liquid metal technology development in the Karlsruhe liquid metal laboratory (KALLA).
Jahrestagung Kerntechnik 2007, Karlsruhe, 22.-24. Mai 2007
Berlin: INFORUM GmbH, 2007 S.110-13. CD-ROM

Vorträge, die nicht in gedruckter Form vorliegen:

Fazio, C.; Almazouzi, A.; Dai, Y.; Doubkova, A.; Gessi, A.; Gorse, D.; Henry, J.; Magielsen, L.; Müller, G.; Soler Crespo, L.
Experimental program on materials qualification for heavy liquid metal cooled transmutation systems.
10th European Congress and Exhibition on Advanced Materials and Processes (EUROMAT 2007), Nürnberg, September 10-13, 2007

Heinzel, A.
Schwerpunkte der nuklearen Sicherheitsforschung am Forschungszentrum Karlsruhe
Kolloquium 'Perspektiven in der Kerntechnik', Speyer, 11.-14. März 2007

Kessler, G.; Broeders, C.H.M.; Hoebel, W.; Goel, B.; Seifritz, W.
A strategy for a scientific solution of the plutonium (fuel cycle) nuclear proliferation problem.
10th Internat. Conf. 'Nuclear Power Safety and Nuclear Education' Obninsk, Russia, October 1-5, 2007

Kessler, G.
Nuclear reactor safety (LWRs) in the 21st century.
10th Internat. Conf. 'Nuclear Power Safety and Nuclear Education' Obninsk, Russia, October 1-5, 2007

Knebel, J.U.; Stieglitz, R.; Müller, G.; Konys, J.; Class, A.; KALLA-Team
Heavy liquid metal technology development at the Karlsruhe Liquid Metal Laboratory (KALLA)
European Nuclear Conf., Satellite Seminar Gen IV LFR/ADS and Synergetic R&D in Europe, Bruxelles, B., September 16-20, 2007

Konys, J.; Müller, G.; Stieglitz, R.; KALLA Team
High current target development in the Karlsruhe liquid metal laboratory (KALLA)
Design Review Meeting, Internat. Fusion Materials Irradiation Facility (IFMIF/EVEDA), Tokyo, J, February 27, 2007

Müller, G.
Status and last achievements in steel corrosion resistance studies.
Internat. Workshop on Liquid Metals in Power Industry of the 21st Century, Obninsk, Russia, October 9-12, 2007

Takaya, 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.
13th Internat. Conf. on Fusion Reactor Materials (ICFRM-13), Nice, F, December 10-14, 2007

Weisenburger, A.; Heinzel, A.; Müller, G.; Muscher, H.; Rousanov, A.
T91 cladding tubes with and without modified FeCrAlY coatings exposed in LBE at different flow, stress and temperature conditions.
4th Workshop on Materials for HLM Cooled Reactors, Roma, I, May 21-23, 2007

Weisenburger, A.; Heinzel, A.; Müller, G.; Rousanov, A.
The influence of temperature, stress and flow velocity on the corrosion and oxidation resistance of T91 cladding tubes with and without modified FeCrAlY coatings. First results.
Workshop on Structural Materials for Innovative Nuclear Systems, Karlsruhe, June 4-6, 2007

Patente:

Engelko, V.; Heinzel, A.; Müller, G.; Schumacher, G.;
Weisenburger, A.; Zimmermann, F.
Verfahren zum Aufbringen einer hochtemperaturgeeigneten FeCrAl-Schutzschicht, Hüllrohr mit einer derartig aufgebrachtene Schutzschicht und Verwendung eines solchen Hüllrohrs.
DE-OS 10 2005 030 231 (11.1.2007)
DE-PS 10 2005 030 231 (31.5.2007)

UMWELT: Programm Nachhaltigkeit und Technik

Publikationen in begutachteten Zeitschriften:

Akhtar, M.J.; Feher, L.E.; Thumm, M.
A closed-form solution for reconstruction of permittivity of dielectric slabs placed at the center of a rectangular waveguide.
IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 4(2007) 122-26
DOI:10.1109/LGRS.2006.887054

An, W.; Baumung, K.; Bluhm, H.J.
Underwater streamer propagation analyzed from detailed measurements of pressure release.
Journal of Applied Physics, 101(2007) S.053302/1-10
DOI:10.1063/1.2437675

Feher, L.; Drechsler, K.; Filsinger, J.; Wiesehöfer, R.
Microwave processing of advanced composites with high electromagnetic power heating.
SAMPE Journal, 43(2007) S.77-82

Gupta, S.B.; Bluhm, H.
Pulsed underwater corona discharges as a source of strong oxidants: OH and H₂O₂.
Water Science and Technology, 55(2007) Nr. 12, S.7-12
DOI:10.2166/wst.2007.381

Latz, A.; Becker, D.; Hekman, M.; Müller, T.; Beyhl, D.; Marten, I.; Eing, C.; Fischer, A.; Dunkel, M.; Bertl, A.; Rapp, U.R.; Hedrich, R.
TPK1, a Ca²⁺-regulated Arabidopsis vacuole two-pore K⁺ channel is activated by 14-3-3 proteins.
The Plant Journal, 52(2007) S.449-59
DOI:10.1111/J.1365-313X.2007.03255.x

Weisenburger, A.; Rizzi, G.; Scrivani, A.; Müller, G.; Nicholls, M.R.
Pulsed electron beam treatment of MCrAlY bondcoats for EB-PVD TBS systems part 1 of 2: Coating production.
Surface and Coatings Technology, 202(2007) S.704-08
DOI:10.1016/j.surfcoat.2007.07.022

Wellmann, R.G.; Scrivani, A.; Rizzi, G.; Weisenburger, A.; Tenailleau, F.H.; Nicholis, M.R.
Pulsed electron beam treatment of MCrAlY bondcoats for EB-PVD TBS systems part 2 of 2: Cyclic oxidation of the coatings.
Surface and Coatings Technology, 202(2007) S.709-13
DOI:10.1016/j.surfcoat.2007.06.037

Sonstige Publikationen die in gedruckter Form vorliegen

Akhtar, M.J.; Feher, L.; Thumm, M.
Electromagnetic measurement of temperature-dependent dielectric properties of aerospace grade epoxy resins and catalysts at 2.45 GHz.
41st IMPI Annual Microwave Symp., Vancouver, CDN, August 1-3, 2007; Proc. S.68-73
Mechanicsville, Va.: The Int.Microwave Power Institute, 2007

Akhtar, M.J.; Nelson, S.O.; Tran, N.V.
Measurements of dielectric properties.
Short Course during 41st Internat. Microwave Symp., Vancouver, CDN, August 1-3, 2007
Mechanicsville, Va.: The Int.Microwave Power Institute, 2007

Akhtar, M.J.; Feher, L.; Thumm, M.
Nondestructive measurement of temperature-dependent dielectric parameters of epoxy resins at 2.45 GHz.
Silaghi, A.M. [Hrsg.]
11th Internat. Conf. on Microwave and High Frequency Heating, Oradea, R, September 3-6, 2007; Proc. Book S.351
Oradea: Editura Universității din Oradea, 2007

- Akhtar, M.J.; Feher, L.E.; Thumm, M.
Simple analytical approach for measurement of the complex permittivity of resins and viscous liquids.
37th European Microwave Conf., München, October 9-12, 2007
Proc. on CD-ROM S.206-09
Louvain-la-Neuve: European Microwave Association, 2007
- Feher, L.; Stanculovic, S.; Akhtar, J.; Nuss, V.; Seitz, T.; Zöller, C.; Layer, S.; Dittrich, J.
HEPHAISTOS – Energieeffizienz und Innovation durch Mikrowellentechnik für die industrielle Produktion von polymeren Verbundwerkstoffen
Nachrichten – Forschungszentrum Karlsruhe, 39 (2007) 159-62
- Feher, L.; Thumm, M.; Drechsler, K.; Wiesehöfer, R.
Technology developments and high-frequency materials investigations for microwave cured aerospace composites.
Silaghi, A.M. [Hrsg.]
11th Internat. Conf. on Microwave and High Frequency Heating, Oradea, R, September 3-6, 2007; Proc. Book S.188
Oradea: Editura Universității din Oradea, 2007
- Gupta, S.B.
Investigation of a physical disinfection process based on pulsed underwater corona discharges.
Wissenschaftliche Berichte, FZKA-7336
Dissertation, Universität Karlsruhe 2007
- Kohnen, W.; Schön-Hözl, K.; Schwartz, T.; Frey, W.; Böhme, C.; Hoffmann, D.; Swoboda, W.; Obst, U.; Jansen, B.
Vorkommen von Vancomycin-resistenten Enterokokken (VRE) in der aquatischen Umwelt während eines epidemischen Ausbruchs in einer Klinik und neue Ansätze zur Verhinderung des Eintrages in die Umwelt.
1. Jahrestagung der Gesellschaft für Hygiene, Umweltmedizin und Präventivmedizin (GHUP) und 10. Jahrestagung des Landesinstituts für den Öffentlichen Gesundheitsdienst NRW, Bielefeld, 22.-24. November 2007
Umweltmedizin in Forschung und Praxis, 12(2007)Nr. 5, S.257 (Abstract)
- Müller, G.; Frey, W.; Sack, M.; Schultheiss, C.; Mayer, H.G.; Sigler, J.; Kern, M.; Günther, U.
Karlsruher Elektroproportionsanlage KEA. Die Erfolgsgeschichte eines Technologietransfers in die Industrie.
Nachrichten – Forschungszentrum Karlsruhe, 39 (2007) S.153-58
- Stanculovic, S.; Feher, L.; Thumm, M.
Development of a microwave injector for resin infiltration.
Silaghi, A.M. [Hrsg.]
11th Internat. Conf. on Microwave and High Frequency Heating, Oradea, R, September 3-6, 2007; Proc. Book S.248
Oradea: Editura Universității din Oradea, 2007
- Stanculovic, S.; Feher, L.; Thumm, M.
Novel microwave resin injector for composite production.
41st IMPI Annual Microwave Symp., Vancouver, CDN, August 1-3, 2007; Proc. 74-78
Mechanicsville, VA.; The Internat. Microwave Power Institute, 2007
- Thumm, M.
Jahresbericht 2006 Institut für Hochleistungsimpuls- und Mikrowellentechnik.
Wissenschaftliche Berichte, FZKA-7335
- Vorträge, die nicht in gedruckter Form vorliegen:**
- Feher, L.; Thumm, M.; Wiesehöfer, R.
Microwave technology developments and high-frequency materials investigations for aerospace applications.
41st IMPI Annual Microwave Symp., Vancouver, CDN, August 1-3, 2007
- Feher, L.
Warum die Quantenphysik bei der Mikrowelle und der HEPHAISTOS-Technologie zu beachten ist.
Industrielle Mikrowellen- und Materialprozesstechnik, Symposium anl. der Einweihung des HEPHAISTOS-Versuchszentrums und der Mikrowellenanlage HEPHAISTOS-CA3 am Institut für Hochleistungsimpuls- und Mikrowellentechnik (IHM), Forschungszentrum Karlsruhe, 28. November 2007
- Frey, W.; Gusbeth, Ch.; Wüstner, R.; Sträßner, R. Schwartz, T.; Marten, S.; Obst, U.; Kohnen, W.
Abtötung von Mikroorganismen mittels Hochspannungsimpulsen.
Seminar, Deutsches Institut für Lebensmitteltechnik, Quakenbrück, 1.-2. Oktober 2007
- Frey, W.; Berghöfer, T.; Kolb, J.
Nanosekunden-zeitaufgelöste Messung der Membranaufladung biologischer Zellen in gepulsten elektrischen Feldern.
Frühjahrstagung des Arbeitskreises Atome, Moleküle, Quantenoptik und Plasmen (AMOP) der DPG, Düsseldorf, 19.-23. März 2007
Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, R.6, B.42(2007) SYBE 1.2
- Gupta, S.
Current status of water treatment by ozone in India.
Meeting of the Internat. Ozone Association, Paris, F, November 3, 2006
- Gupta, S.B.
High voltage discharges in water: a chemical free environmental friendly water disinfection process.
Vortr. Universität Karlsruhe, 9. Mai 2007
- Gupta, S.B.
Pulsed underwater corona discharges for water disinfection applications.
Vortr.: VDE-Hochschulgruppe, Karlsruhe, 19. April 2007
- Gusbeth, C.; Frey, W.; Volkmann, H.; Gupta, S.; Bluhm, H.J.
Keimabtötung mit hohen gepulsten elektrischen Feldern.
Frühjahrstagung des Arbeitskreises Atome, Moleküle, Quantenoptik und Plasmen (AMOP) der DPG, Düsseldorf, 19.-23. März 2007
Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, R.6, B.42(2007) SYBE 1.2
- Gusbeth, C.; Frey, W.; Sack, M.; Baumung, K.; An, W.; Sträßner, R.; Bluhm, H.
Research activities at IHM/FZK: Interaction of pulsed electric fields and discharges with biological cells.
Workshop on Bioelectrics, Kumamoto, J, February 7, 2007
- Kolb, J.F.; White, J.A.; Frey, W.; Scarlett, S.; Shevin, R.; Pakhomov, A.; Beebe, S.J.; Buescher, E.S. Blackmore, P.F.; Josh, R.P.; Nuccitelli, R.; Schoenbach, K.H.
Immediate, non-physiological responses of mammalian cells to nanosecond pulsed electric fields.
Frühjahrstagung des Arbeitskreises Atome, Moleküle, Quantenoptik und Plasmen (AMOP) der DPG, Düsseldorf, 19.-23. März 2007
Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, R.6, B.42(2007) SYBE 1.1
- Kolb, J.F.; White, J.A.; Pliquett, U.; Nuccitelli, R.; Schoenbach, K.H.; Beebe, S.J.; Joshi, R.P.; Frey, W.
Plasma membrane charging of Jurkat cells by nanosecond pulsed electric fields.
Pulsed power and Plasma Science Conf., Albuquerque, NM, June 17-22, 1007; Book of Abstracts S.347

- Piosczyk, B.
Applications of microwaves and pulse power techniques as studied at FZK.
Internat. Conf. on Recent Advancements and Applications of Computer in Electrical Engineering, Bikaner, IND, March 24, 2007
Vortr.: Central Electronics Engineering Research Institute (CEERI), Pilani, IND, 29. März 2007
- Sack, M.; Stängle, R.
A bipolar Marx generator for a mobile electroporation device. Pulsed Power and Plasma Science Conf., Albuquerque, NM, June 17-22, 2007
Book of Abstracts S.538
- Sack, M.; Eing, C.; Buth, L.; Berghöfer, T.; Frey, W.; Bluhm, H.J.
Electroporation as an optimizing step in the drying of green biomass.
Pulsed Power and Plasma Science Conf., Albuquerque, NM, June 17-21, 2007
- Sack, M.
Logistik und Vorbehandlung von Biomasse: elektroporationsunterstützte Trocknung grüner Biomasse.
Statuskolloquium 'Sustainable BioEconomy im Spannungsfeld von Umwelt und Energie', Karlsruhe, 13.-14. Dezember 2007
- Sack, M.; Stängle, R.; Müller, G.
Technische Elektroporation von Pflanzenzellen bei großen Massenströmen.
Frühjahrstagung des Arbeitskreises Atome, Moleküle, Quantenoptik und Plasmen (AMOP) der DPG, Düsseldorf, 19.-23. März 2007
Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, R.6, B.42(2007) SYBE 2.1
- Thumm, M.
Wir machen Wellen – und zwar Mikrowellen.
Industrielle Mikrowellen- und Materialprozessertechnik, Symposium anl. der Einweihung des HEPHAISTOS-Versuchszentrums und der Mikrowellenanlage HEPHAISTOS-CA3 am Institut für Hochleistungsimpuls- und Mikrowellentechnik (IHM), Forschungszentrum Karlsruhe, 28. November 2007
- Weisenburger, A.; Rizzi, G.; Scrivani, A.; Müller, G.; Nicholls, M.R.
Pulsed electron beam treatment of MCrAlY bondcoats for EB-PVD TBS systems part 1 of 2: Coating production.
Internat. Conf. on Metallurgical Coatings and Thin Films (ICMCTF 2007), San Diego, Calif., April 23-27, 2007
- Wellmann, R.G.; Scrivani, A.; Rizzi, G.; Weisenburger, A.; Tenailleau, F.H.; Nicholls, M.R.
Pulsed electron beam treatment of MCrAlY bondcoats for EB-PVD TBS systems part 2 of 2: Cyclic oxidation of the coatings.
Internat. Conf. on Metallurgical Coatings and Thin Films (ICMCTF 2007), San Diego, Calif., April 23-27, 2007
- Patente:**
- Bluhm, H.J.; Fütterer, M.; Hoppé, P.; Singer, J.
A head-end process for the reprocessing of reactor core material.
EP-OS 1 849 164 (31.10.2007)
- Bluhm, H.J.; Sack, M.
Messzelle und damit durchgeführte Verfahren zur Bestimmung des durch Elektroporation bewirkenden Aufschlussgrades biologischer Zellen.
DE-OS 10 2005 029 414 (28.12.2006)
- Feher, L.; Nuss, V.; Seitz, T.; Flach, A.
Mikrowellenresonator, eine aus einem solchen Mikrowellenresonator modular aufgebaute Prozessstraße, ein Verfahren zum Betreiben nach diesem Verfahren thermisch prozessierte Gegenstände/Werkstücke mittels Mikrowelle.
DE-PS 10 329 411 (31.1.2005)
DE-OS 10 329 411 (10.2.2005)
WO-OS 2005/004542 (13.1.2005)
US-PS 7 122 772 (17.10.2006)
CN-OS 1 639 865 (29.3.2006)
EP-PS 1 639 865 (14.2.2007)
RU-OS 2006 102 860 (10.7.2006)
- Giese, H.; Hoppé, P.
Aufbau einer elektrodynamischen Fraktionieranlage.
Electrodynamical fractionation plant.
DE-PS 10 346 055 (6.8.2004)
EP-OS 1 667 798 (14.6.2006)
CN-OS 1 863 601 (15.11.2006)
- Giese, H.; Edinger, W.; Hoppé, P.; Singer, J.; Stemmermann, P.; Schweike, U.
Prozessreaktor und Betriebsverfahren für die elektrodynamische Fragmentierung. Process reactor and method for the electrodynamic fragmentation.
DE-OS 10 346 650 (19.5.2005)
EP-OS 1 673 172 (28.6.2006)
US-PS 7 246 761 (24.7.2007)
CN-OS 1 863 602 (15.11.2006)
- Sack, M.
Trigger-/Zündeinrichtung an einem aus n Stufenkondensatoren bestehenden Marx-Generator.
Trigger arrangement for a Marx generator.
DE-OS 10 320 425 (16.12.2004)
CN-OS 1 784 830 (7.6.2006)
EP-OS 1 620 946 (1.2.2006)
US-PS 7 170 198 (30.1.2007)
- Sack, M.
Verfahren für den kontinuierlichen, getriggerten Betrieb eines Marx-Generators insbesondere von mehreren Marx-Generatoren zur Druckregelung und Abbranddetektion in den Funkenstrecken.
DE-OS 10 2005 025 998 (21.12.2006)
- Schultheiß, C.; Sack, M.
Einrichtung zum Elektroporieren von biologisch pflanzlichem Prozessgut.
DE-OS 10 2004 025 046 (15.12.2005)
EP-OS 1 751 860 (14.2.2007)
- Schultheiß, C.; Kern, M.
Elektroporationsreaktor zur kontinuierlichen Prozessierung von stückigen Produkten.
DE-PS 10 144 479 (3.4.2003)
EP-OS 1 424 910 (9.6.2004)
EP-PS 1 424 910 (25.4.2007)
HU-OS 0 401 095 (28.9.2004)
PL-OS 467 363 (21.2.2005)
- Väth, W.; Frey, W.
Verfahren zur rechnergestützten Prozessführung einer Fragmentieranlage. Method for the computer-based process control of a fragmentation apparatus.
DE-PS 10 302 867 (17.11.2003)
EP-OS 1 585 597 (19.10.2005)
EP-PS 1 585 597 (10.5.2006)
CN-OS 1 741 855 (1.3.2006)
US-PS 7 140 564 (28.11.2006)