

**Schlussbericht im Rahmen des Impuls- und Vernetzungsfonds
- Virtuelle Institute -**

| Vorhabenskennzeichnung | |
|--|--|
| Impulsfonds-Projektnummer: | VH-VI-104 |
| Projekttitlel: | Plasma Physics Research Using FEL-Radiation |
| Federführende/r Wissenschaftler/in | Dr. Thomas Tschentscher, DESY |
| Federführendes Helmholtz-Zentrum: | Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY |
| Weitere beteiligte Helmholtz-Zentren: | |
| Beteiligte Universitäten und andere Partner: | AG Prof. Dr. Ronald Redmer, Institut für Physik, Universität Rostock AG Prof. Dr. Eckhart Förster, Institut für Optik und Quanten-Elektronik, Friederich-Schiller-Universität Jena |
| Berichtszeitraum (Förderungszeitraum) | 1. 9. 2004 – 29.2.2008 |

1. Zusammenfassung

Das Ziel des Virtuellen Instituts waren Untersuchungen zur Erzeugung warmer, dichter Plasmen mittels kurzweiliger, ultrakurzer Lichtpulse im Bereich weicher Röntgenstrahlung sowie die Entwicklung neuartiger Diagnostikmethoden zur Messung von Zustandsparametern dieser Plasmen. Dabei stand insbesondere die Nutzung intensiver, kurzweiliger und ultrakurzer Strahlungspulse, wie sie von den erst seit kurzem zur Verfügung stehenden Freien-Elektronen-Lasern (FEL) erzeugt werden, im Mittelpunkt der Untersuchungen. Am VUV FEL FLASH bei DESY, Hamburg, konnten für diese Experimente bei einer Wellenlänge von 13,5 nm (91,8 eV) eine Pulsdauer von 15 fs, Pulsenergien von $\sim 30 \mu\text{J}$ sowie Strahlgrößen von $\sim 30 \mu\text{m}$ (entsprechend einer Intensität von einigen 10^{14} W/cm^2) erreicht werden – bisher einmalige Bedingungen für die vorgeschlagenen Experimente zu warmen, dichten Plasmen.

Die im Rahmen des Projekts erzielten Erkenntnisse bei der Auslegung und Beschreibung der Experimente führten zu Fortschritten sowohl im Bereich der theoretischen Beschreibung dieser komplexen, stark korrelierten Systeme als auch zu einer Verbesserung und Komplettierung des instrumentellen Aufbaus. Durch die theoretischen Arbeiten zu den untersuchten Systemen konnten die Randbedingungen für eine erfolgreiche Durchführung der Experimente festgelegt werden. Es konnte gezeigt werden, dass sich für die Anwendung inelastischer Streumethoden zur Diagnostik warmer, dichter Plasmen im weichen Röntgenbereich insbesondere die Streuung an kollektiven Anregungen, den sogenannten Plasmonen, eignet. In theoretischen Rechnungen konnte weiterhin die Bestimmung wesentlicher Plasmaparameter aus den inelastischen Streudaten unter realistischen Bedingungen gezeigt werden. Die Erweiterung der theoretischen Beschreibung stark korrelierter Plasmen auf die Berücksichtigung von Stößen im Plasma, insbesondere bei der Berechnung des für die inelastische Streuung ausschlaggebenden dynamischen Strukturfaktors, wurde erfolgreich implementiert.

Für die inelastischen Streuexperimente an FLASH bei Wellenlängen von 10 – 30 nm sind homogene Targets mit einer Teilchendichte im Bereich $10^{22} - 10^{23} \text{ cm}^{-3}$ erforderlich. Als Target wurde daher ein kryogener Wasserstoff-Jet benutzt, wobei Wasserstoff zudem den Vorteil der nahezu vollständigen Ionisation der Atome bietet. Erste Experimente zur Streuung von FEL-Strahlung wurden im Frühjahr 2007 an FLASH erfolgreich durchgeführt. Bei einer Wellenlänge von 13,5 nm wurde die elastische Streuung der FEL-Strahlung an einem Jet aus festem Wasserstoff untersucht und eine nichtlineare Abhängigkeit der Streuintensität von der einfallenden FEL-Intensität beobachtet. Weiterhin wurde für verschiedene Festkörper-Targets die Erzeugung von Plasmen untersucht. Mittels des fokussierten FEL-Strahls war es möglich warme, dichte Al-Plasmen mit Temperaturen von einigen 10 eV und Elektronendichten im Bereich $\sim 10^{23} \text{ cm}^{-3}$ zu erzeugen. Die gemessenen Bremsstrahlungs- und Linienemissions-Spektren ermöglichten erstmals die Bestimmung des Ionisierungszustands, der Elektronendichte sowie der Elektronentemperatur eines warmen, dichten Plasmas.

Das erste Experiment zur inelastischen Streuung von FEL-Strahlung an warmen, dichten Plasmen, die mit einem optischen Kurzpulslaser mit einigen mJ Pulsenergie erzeugt werden, konnte wegen der Nichtverfügbarkeit des optischen Lasersystems sowie des sehr engen Messzeitplans für FLASH nicht während der Laufzeit des Projekts stattfinden und ist jetzt für den Juni 2008 an FLASH geplant. Die Arbeiten des Virtuellen Instituts sind dabei ausschlaggebend für dieses Experiment, an dem sich alle Arbeitsgruppen auch nach Abschluss des Projekts weiter beteiligen werden. Langfristig werden die im Rahmen dieses Projekts erzielten theoretischen und experimentellen Ergebnisse die Grundlage für Experimente bei noch kürzeren Wellenlängen, bis hinein in den harten Röntgenbereich, sein.

2. Arbeits- und Ergebnisbericht

a) Ausgangslage:

Die Erzeugung und Untersuchung von Plasmen mit relativ geringen Temperaturen von einigen eV (einige ~ 10000 K) und Dichten nahe der von Festkörpern stellt experimentell eine Herausforderung dar. Derartige Plasmazustände finden sich im Inneren großer Planeten und werden auch durchlaufen bei der Erzeugung heißer, hochenergetischer und dichter Plasmen, wie sie für die Trägheitsfusion erfolgt. Die experimentelle Untersuchung dieser sogenannten warmen, dichten Plasmen ist notwendig, um die unzureichenden theoretische Modelle für diesen Übergangsbereich zwischen Festkörpern, in denen die Elektronen und Ionen stark korreliert sind, deren Temperatur aber gering ist, und idealen (heißen) Plasmen, in denen die Elektronen aber kaum Korrelationen zeigen, zu verbessern und zu erweitern. Eine bessere Beschreibung dieser stark korrelierten Plasmen ist sowohl für ein besseres Verständnis astrophysikalischer Prozesse als auch für die Energieforschung von großem Interesse.

Intensive und extrem kurze Strahlungspulse im Vakuum-Ultraviolett (VUV), Röntgen-Ultraviolett (XUV) und Röntgenbereich bieten aufgrund ihrer speziellen Wechselwirkung neuartige und verbesserte Möglichkeiten sowohl bei der Erzeugung als auch der Untersuchung stark korrelierter Plasmen. FEL-Strahlung mit Pulsdauern von einigen 10 fs und Pulsenergien von einigen 10 μ J, wie sie seit 2004 erstmals am VUV FEL FLASH bei DESY, Hamburg, zur Verfügung steht, bietet daher einen neuen experimentellen Zugang für diesen Forschungsbereich. Eine vielversprechende Methode zur Untersuchung der Plasmen nutzt die inelastische Streuung an den Plasmaelektronen. Diese Methode stellt für Plasmen mit geringerer Dichte unter Nutzung sichtbaren Lichts eine Standardmethode dar (Thomson-Streuung) und erste Experimente mit Röntgenstrahlung haben bereits vielversprechende Ergebnisse geliefert [Glenzer, Redmer 2008]. Daher wurde die Nutzung von FEL-Strahlung zur Bestimmung von Plasmatemperatur, Dichte oder Ionisierungsgrad als neue Diagnostikmethode für warme, dichte Plasmen vorgeschlagen. Die Antragsteller hatten im Rahmen einer internationalen Zusammenarbeit bereits Strahlzeit für derartige Experimente an FLASH beantragt. Die Auslegung und Optimierung eines Experiments zur Messung der Plasmazustandsparameter mittels inelastischer Streuung von FEL-Strahlung sollte in Abstimmung mit Überlegungen zur theoretischen Modellierung der Plasmen erfolgen. Experimentell waren insbesondere die Anforderungen an die Erzeugung der Plasmen sowie die spektroskopische Analyse der Streustrahlung im VUV-Bereich herausfordernd. Neben den experimentellen Arbeiten war es zudem notwendig, das theoretische Verständnis auf die speziellen Bedingungen warmer, dichter Plasmen zu erweitern. Insbesondere die vollständigere Beschreibung des dynamischen Struktur factors unter Berücksichtigung von Stößen war durch die bisherigen Modelle nicht möglich. Weiterhin mussten die Modellrechnungen zur Definition der Experimente auch die experimentell verfügbaren Parameter berücksichtigen, um anwendbare Vorhersagen machen zu können.

Die Zielsetzung des Virtuellen Instituts war es daher, die Bedingungen für inelastische Streuexperimente mit FELs zu erarbeiten, ein Instrument für diese Experimente mit VUV-Strahlung aufzubauen, erste Experimente durchzuführen, die Theorie für inelastische Streuung in stark korrelierten, dichten Plasmen zu entwickeln und die experimentellen Ergebnisse mit den Ergebnissen der theoretischen Rechnungen zu vergleichen.

b) Fortschritt der durchgeführten Arbeiten:

Der Schwerpunkt des ersten Projektjahres (Sep '04 – Aug '05) war die Vorbereitung erster Experimente an FLASH zur Untersuchung der Wechselwirkung der FEL Strahlung mit Materie sowie der Erzeugung von Plasmen. Die Arbeiten der Partner U Jena und DESY betrafen insbesondere die Vorbereitung der Instrumentierung, während der Schwerpunkt des Partners U Rostock in der Entwicklung der Theorie für die inelastische Streuung von Photonen im VUV- und Röntgenbereich in dichten Plasmen lag. In Abstimmung mit der internationalen Kollaboration, die die Plasma-Physik Experimente an FLASH gemeinsam beantragt hatte, wurde die experimentelle Apparatur für die Mess-

Kampagnen Ende 2005 bis Anfang 2006 festgelegt. DESY hat in diesem Rahmen die Vakuumkomponenten vorbereitet und getestet sowie die Koordination vor Ort übernommen. U Jena war beteiligt an den Vorbereitungen der VUV-Spektrometrie zur Untersuchung der von den erzeugten Plasmen emittierten Strahlung. Die theoretischen Arbeiten an der U Rostock konzentrierten sich auf den dynamische Strukturfaktor $S(q,\omega)$, die entscheidende Größe bei der Beschreibung der Wechselwirkung von energiereichen Photonen im VUV-Bereich mit warmer, dichter Materie, die mit der dielektrischen Funktion $\epsilon(q,\omega)$ über das Fluktuations-Dissipations-Theorem zusammenhängt. Die Untersuchung von dichten Plasmen im angegebenen Parameterbereich erforderte eine konsistente Behandlung von Korrelations- und Quanteneffekten im Targetmaterial, so daß über die Standardnäherung eines stoßfreien Plasmas, die Random Phase Approximation (RPA), hinaus gegangen werden musste. Dazu wurde in mehreren Arbeiten die Born-Mermin-Approximation (BMA) entwickelt, in der Elektron-Elektron-Stöße in Bornscher Näherung in der von Mermin vorgeschlagenen Verallgemeinerung der RPA-dielektrischen Funktion über eine dynamische Stoßfrequenz $v(\omega)$ berücksichtigt werden. Weitergehende Näherungen (z.B. volle dynamische Abschirmung über einen Lenard-Balescu-Stoßterm oder Berücksichtigung starker Stöße im Rahmen einer dynamischen T-Matrix) wurden untersucht, aber auf Grund ihres geringen Einflusses und des enormen numerischen Aufwands nicht weiter verfolgt.

Das zweite Projektjahr (Sep '05 – Aug '06) begann mit einer Reihe von Experimenten an FLASH mit Wellenlängen von ~ 30 nm. Untersucht wurde die Wechselwirkung der FEL Strahlung mit verschiedenen Festkörper-Materialien, die Ablation dieser Materialien sowie die Erzeugung von Plasmen in festen und gasförmigen Targets. Die Ergebnisse dieser ersten Experimente sowie die Analyse theoretischer Rechnungen führten zu der Schlussfolgerung, dass Targets mit einer Elektronendichte von $10^{21} - 10^{23} \text{ cm}^{-3}$ am besten für die im Rahmen dieses Projekts vorgeschlagenen Untersuchungen zur Bestimmung von Plasmazustandsparametern mittels FEL Strahlung im VUV Bereich geeignet sind. Dieser Dichtebereich ist weder von hochkomprimierten Gasjets noch mit Festkörpern zu erreichen. Es wurden daher in Jena und Rostock zwei alternative Targetmaterialien untersucht. In Jena wurde untersucht, inwiefern sich die Materialemission bei Erzeugung von Plasmen auf PMMA mittels optischer Laser eignet [Cao et al., 2007]. Es zeigte sich, daß der hohe Dichtegradient im Experiment an FLASH wegen der notwendigen Strahlgröße zu einer Unterbestimmung der Dichte führen würde. Diese Idee wurde daher nicht weiter verfolgt. In Rostock wurde die Anwendung kryogener Wasserstoff-Jets als Targetmaterial untersucht. Bei diesem Verfahren wird ein tiefkalter Strahl flüssigen Wasserstoffs mit einer Dichte von einigen 10^{22} cm^{-3} erzeugt [Przystawik et al. 2008]. Vorexperimente mit optischen Lasern in Rostock zeigten die Anregung des Wasserstoffs zu Plasmen mit einigen eV Temperatur. Wasserstoff bietet für die vorgeschlagenen Untersuchungen an FLASH zudem den Vorteil, daß nach der Plasma-Anregung keine stark gebundenen Rumpfelektronen verbleiben und somit im Streuexperiment das Signal-zu-Untergrund Verhältnis maximiert wird. Möglich wurden die Vorversuche in Rostock durch die Einbeziehung und Expertise der AG Meiwes-Broer, die diese Techniken für die Erzeugung von Cluster-Strahlen nutzt. Neben dieser zusätzlichen experimentellen Aktivität an der U Rostock, die nicht im ursprünglichen Projektplan vorgesehen war und für die geringfügige Investitionsmittel vom Partner DESY zum Partner U Rostock transferiert wurden, konnte Dr. T. Laarmann vom Max-Born-Institut in Berlin als weiterer Kollaborationspartner des Virtuellen Instituts gewonnen werden. Dr. Laarmann besitzt eine weitreichende Erfahrung auf dem Gebiet kryogener Teilchenstrahlen und ihm stand eine kompakte, kryogenisch gekühlte Quelle für gepulste Wasserstoff-Jets zur Verfügung, wie sie für die Experimente an FLASH notwendig war.

Die BMA und das entwickelte Programmpaket bildeten die theoretische Basis für den in Rostock entwickelten Streucode, der die Auswahl der Targetmaterialien (leichte Elemente wie Wasserstoff oder Helium) und der experimentellen Parameter wie etwa Wellenlänge und Energie der FLASH-Pulse, der notwendigen Leistung des optischen Pump lasers (einige mJ) und des optimalen Streuwinkels (90°) ermöglichte. Daraufhin konnten

die Komponenten des Streuexperiments am FLASH festgelegt werden. Neben dem Flüssigstrahl-Wasserstoff-Target (Dr. Laarmann, MBI; AG Meiwes-Broer, U Rostock) wurden die Anforderungen an das VUV-Spektrometer (AG Förster, FSU Jena) sowie die von DESY bereitgestellte Experimentierkammer (S. Toleikis, S. Düsterer, DESY) festgelegt. Allerdings wurde auch klar, daß die Erzeugung des Wasserstoffplasmas einen Ultrakurzpuls-Laser (~30-100 fs) mit einer Pulsenergie erfordert (~10-30 mJ), wie er an FLASH noch nicht zur Verfügung stand.

Der Beginn des dritten und letzten Projektjahres (Sep '06- Feb '08) war bestimmt durch die Vorbereitungen auf das erste Experiment. Die Anforderungen an die VUV-Spektroskopie konnten durch den entwickelten Streucode (AG Redmer, U Rostock) konkretisiert werden. Um die dichten Plasmen experimentell zu untersuchen, benötigte man ein VUV-Spektrometer mit maximaler Effizienz ($>10^{-6}$) bei gleichzeitigem Auflösungsvermögen von $\lambda/\Delta\lambda \sim 100$ oder besser. Durch die Festlegung der am besten geeigneten VUV-Wellenlänge (13,5 nm) war es möglich, geeignete Filtermaterialien zu ermitteln um optisches Hintergrundlicht vom eigentlichen Mess-Signal trennen zu können. Es wurden Aluminiumfolien mit einer Dicke von ~100 nm ausgewählt. Ein Transmissionsgitterspektrograph mit torischem Fokussierspiegel wurde mit einem freistehenden Goldgitter mit 2000 Strichen pro Millimeter ausgerüstet. Um eine maximale Effizienz zu erreichen, wurde durch DESY eine hochempfindliche VUV-CCD angeschafft. Adapterteile für die Kamera, für die Montage des Spektrometers in senkrechter Richtung an die Vakuumkammer in Hamburg und eine genauere Justierhilfe wurden in den mechanischen Werkstätten in Jena konstruiert und gefertigt. Das System aus modifiziertem Spektrometer, Filter und neuer CCD-Kamera wurde in Jena an einer VUV-Quelle erfolgreich getestet.

Das erste Experiment an FLASH bei einer Wellenlänge von 13,5 nm hatte zum Ziel die inelastische Streuung der FEL Strahlung an einem Wasserstoff-Plasma mit einer Elektronendichte von 10^{22} cm^{-3} zu untersuchen. DESY hatte in der Zwischenzeit einen optischen Laser angeschafft, der die notwendige Pulsenergie für die Erzeugung der geforderten Plasmen bereitstellt. Jedoch wurde kurz vor dem Experiment klar, dass der Laser für dieses Experiment noch nicht zur Verfügung stehen würde. Die Untersuchungen fokussierten sich daher auf zwei Aspekte: Erstens die Untersuchung der Wechselwirkung des FEL-Strahls mit dem kalten Target bei der ein Teil des intensiven Strahlungspulses zur Ionisierung oder Plasmaerzeugung führt, während der zweite Teil des Pulses dieses testet. Diese ‚Selbststreuung‘ kann bei einem Experiment an einem vorgeformten Plasma zu einer Beeinträchtigung der Messdaten führen und muss daher verstanden sein. Außerdem sollte die Emission charakteristischer Strahlung von Plasmen untersucht werden, deren Erzeugung mittels fokussierter FEL-Strahlung in Festkörpermateriale zu erwarten war. Beide Messungen basierten im Wesentlichen auf Daten, die mit dem VUV-Spektrometer aufgenommen wurden. Die Auswertung der experimentellen Daten zeigte die Notwendigkeit Simulationen durchzuführen um die komplizierten plasmaphysikalischen Prozesse bei der Erzeugung und Evolution von dichter, warmer Materie zu verstehen. Verschiedene Modellannahmen, wie z.B. das Zusammenspiel von gebunden-frei- und frei-frei-Übergängen, die Eindringtiefe der VUV-Strahlung, Homogenität und Stabilität des Plasmas, mußten verifiziert werden. Neben der Zusammenarbeit mit externen Partnern (A. Krenz, MPQ Garching; G. Gregori, RAL) konnten diese hydrodynamischen Simulationen im letzten Jahr des Virtuellen Institutes mit dem HELIOS-Code auch selbst (R. Fäustlin, DESY) durchgeführt werden.

Aufgrund der begrenzten Messzeit an FLASH und dem engen Messzeitplan wird ein Experiment zur Bestimmung der Plasmazustandparameter mittels inelastischer Streuung an vorgeformten Wasserstoffplasmen erst im Juni 2008, also kurz nach Projektabschluss durchgeführt werden.

c) Darstellung der erzielten Ergebnisse

Die Möglichkeiten zur Durchführung der geplanten Streuexperimente am FLASH wurden in einer Reihe von theoretischen Arbeiten zur Wechselwirkung intensiver Strahlungsfelder mit warmer, dichter Materie untersucht [Höll et al. 2004; Redmer et al. 2005; Thiele et al. 2006]. Dabei standen zunächst die Entwicklung der BMA und das Durchführen von

Modellrechnungen für den Wellenlängenbereich von optischen Lasern über VUV-Strahlung (FLASH) bis hin zum Röntgenbereich (XFEL) im Vordergrund. Kern der BMA ist die Berechnung der elektronischen und ionischen Beiträge zum dynamischen Strukturfaktor, wobei im Rahmen eines Ansatzes von Chihara zwischen freien bzw. quasi-freien und stark gebundenen (lokalisierten) Elektronen unterschieden wird. Die Plasma-parameter Dichte und Temperatur und die Zusammensetzung (Ionisationsgrad) können für nichtkollektive Streuung aus einer Anpassung des Streusignals (best fit) gewonnen werden. Die ionischen Beiträge zum totalen Strukturfaktor wurden im Rahmen einer auf Mehrkomponentenplasmen und auch Nichtgleichgewichtszustände verallgemeinerten HNC-Methode berechnet [Schwarz et al. 2006]. Für kollektive Streuung ergibt sich aus der universellen Beziehung zwischen Plasmonenerzeugung und -vernichtung (detailed balance) die Möglichkeit, die Temperatur unabhängig von der theoretischen Methode zu bestimmen und die Dichte aus der Gleichung für die Plasmonresonanz abzuleiten. Diese Ableitung wurde erstmals im Rahmen der BMA berechnet [Thiele et al. 2008]. Es konnte gezeigt werden, dass einfache analytische Ergebnisse zur Plasmonenresonanz wie etwa die Gross-Bohm-Beziehung nur von begrenzter Gültigkeit und für eine genaue Dichtebestimmung ungeeignet sind.

Diese Arbeiten haben wie oben dargestellt wesentlich zur Festlegung der an FLASH geplanten Messkampagne und zum Aufbau der Streukammer beigetragen. Die BMA wurde bei Auswertung der ersten Streuexperimente im Röntgenbereich, die am Omega-Laser in Rochester/USA durchgeführt wurden, erfolgreich sowohl für nicht-kollektive als auch für kollektive Streuung verwendet [Glenzer et al., PRL 98, 065002 (2007); Lee et al., in preparation (2008)]. Außerdem wurde das Problem der Einkopplung von intensiven Strahlungsfeldern in Plasmen mit Methoden der Vielteilchentheorie beschrieben und gerade im hier interessierenden Übergangsbereich von kondensierter Materie (Festkörper) zu heißen Plasmen verbessert [Semkat et al. 2006]. Die erhaltenen Ergebnisse zur dynamischen Stoßfrequenz sind insbesondere für hydrodynamische Simulationen wichtig. Gleichzeitig wurde das Verhältnis des zu erwartenden Signals der inelastischen Streuung zum Hintergrund der Bremsstrahlung untersucht [Fortmann et al. 2006]. Es konnte gezeigt werden, dass im interessierenden Parameterbereich eine ausreichende Auflösung möglich ist und damit eine neue diagnostische Methode für warme dichte Materie etabliert werden kann. Eine aktuelle Zusammenfassung des momentanen Standes zur Röntgen-Thomson-Streuung ist in einem Übersichtsartikel zu finden [Glenzer und Redmer, 2008].

Zur Vorbereitung und Analyse von Streuexperimenten mit kurzweiliger Strahlung wurde ein Streucode entwickelt, der es erlaubt auf der Grundlage theoretischer Rechnungen und unter Einbeziehung der durch die Messapparatur definierten Parameter die spektrale Intensitätsverteilung zu bestimmen. Für die Vorbereitung und Planung von Experimenten liegt die Bedeutung dieses Streucodes in der Abschätzung spektraler Verschiebungen sowie in den zu erwartenden Intensitäten. Beide Informationen sind für die experimentelle Beobachtbarkeit von wesentlicher Bedeutung. Für die Analyse bietet das Programm die Möglichkeit theoretische Ergebnisse mit experimentellen Daten zu vergleichen, die ja immer mit einer instrumentellen Auflösungsfunktion behaftet sind. Das Programm berücksichtigt sowohl kollektive als auch nicht-kollektive Streuung und steht der wissenschaftlichen Nutzergemeinde zur Vorbereitung von Streuexperimenten zur Verfügung und wird gegenwärtig zur Veröffentlichung vorbereitet.

Unter Berücksichtigung der ersten Experimente sowie der theoretischen Rechnungen wurden die kinematischen und instrumentellen Randbedingungen für die ersten Streuexperimente an dichten, warmen Plasmen an FLASH festgelegt. Bei der inelastischen Streuung unterscheidet man in einen kollektiven ($\alpha > 1$) und einen nicht-kollektiven Bereich ($\alpha < 1$). Für den dimensionslosen Parameter α gilt dabei:

$$\alpha = \frac{1}{k\lambda_{sc}} \approx \frac{\lambda_o}{4\pi\lambda_{sc} \sin \theta}$$

λ_{sc} ist die Abschirmlänge, λ_o ist die Wellenlänge der FEL Strahlung, θ ist der Streuwinkel unter dem das Spektrometer steht. Da bei VUV-Streuxperimenten im nicht-kollektiven Bereich der Impulstransfer und daraus folgend auch die spektrale Verschiebung relativ gering sind, ist die Trennung des inelastischen Streusignals vom elastischen Signal (Rayleigh-Peak) extrem anspruchsvoll. Bei Streuung im kollektiven Bereich ist das Signal der Plasmonen dominant, dessen spektrale Verschiebung sich mit einer moderaten Auflösung ($\lambda/\Delta\lambda \sim 100$) vom Rayleigh-Peak trennen lässt. Die Festlegung auf den kollektiven Bereich der Streuung führte zu einer Festlegung der Kinematik. Es wurde ein Streuwinkel $\theta=90^\circ$ ermittelt. Insbesondere erfordert die Optimierung des Flusses gestreuter Strahlung das Spektrometer senkrecht zur horizontal liegenden Polarisationssebene anzuordnen.

Wie oben beschrieben war die Optimierung des Targetmaterials sowie der Targetgeometrie notwendig um die Eigenschaften des zu untersuchenden Plasmas einzustellen. Das ausgewählte Wasserstoff Target basiert auf einer tiefkalten (~ 15 K) Düse mit einem Durchmesser von ~ 20 μm an der gasförmiger Wasserstoff bei einem Druck von einigen bar kondensiert. Je nach Parameterwahl lassen sich Tröpfchenspray, Flüssigkeitsstrahl oder Filamente festen Wasserstoffs erzeugen. Regt man die Düse zusätzlich hochfrequent an, so kann im Parameterbereich für den Flüssigkeitsstrahl ein Strahl einzelner Tröpfchen flüssigen Wasserstoffs mit einem Durchmesser von 20-30 μm erzeugt werden. Dies ist der Operationsmodus, der für die Streuxperimente ausgewählt wurde. Die Anregung der flüssigen und tiefkalten Wasserstofftröpfchen erfolgt mit einem optischen Laser mit Pulsenergien von einigen mJ bei einer Wellenlänge von 800 nm. Vorexperimente in Rostock sowie Simulationsrechnungen zeigen, daß in den Tröpfchen Plasmen mit einer Dichte von $\sim 10^{21}$ - 10^{22} cm^{-3} , Temperaturen von einigen eV sowie einem hohen Ionisierungsgrad erzeugt werden. Diese warmen, dichten Plasmen eignen sich daher ideal für die Streuxperimente an FLASH.

Die Experimente an FLASH fanden im März 2007 statt. Es wurde eine Wellenlänge von 13,5 nm benutzt und FEL-Pulsenergien im Bereich 10 – 50 μJ standen zur Verfügung. Bei einem Durchmesser (FWHM) des fokussierten Strahls von 30 μm und einer Pulsdauer von ~ 15 fs ergeben sich FEL-Intensitäten von einigen 10^{14} W/cm^2 . Alle Untersuchungen fanden unter Ultrahochvakuumbedingungen statt. Für den Betrieb der Wasserstoffquelle war eine extrem hohe Pumpleistung von etwa 4000 l/s notwendig. Die spektroskopischen Daten wurden mit dem vertikal montierten VUV Transmissionsgitterspektrometer aufgenommen. Dies Spektrometer erreichte einen Raumwinkel von $\Delta\Omega \cong 4,0 \times 10^{-4}$ sr. Der große Raumwinkel wurde mittels eines Nickel-beschichteten toroidal geformten Spiegels in einem Abstand von 357 mm vom Target und einer Punkt-zu-Punkt-Abbildung erreicht. Das Target wird dabei mit einer Vergrößerung von Eins auf eine back-illuminated CCD Kamera abgebildet. Zwischen Spiegel und Kamera befindet sich das Gold-Transmissions-Gitter mit 2000 Linien/mm und einer Stegbreite von 250 nm, dessen erstes Beugungsmaximum wir für die spektrale Zerlegung ausnutzen. Diese Anordnung erlaubt die gleichzeitige Aufnahme von Spektren im Wellenlängenbereich von 6 – 19 nm. Es zeigte sich während der Experimente, daß die Streuung an dem unterstützenden Gitter mit einer Periode von 17 μm zu Nebenmaxima in den Spektren führte. Diese Artefakte erschweren die Auswertung der spektroskopischen Daten. Da der optische Laser noch nicht für Experimente bereitstand, wurden die folgenden Fragestellungen untersucht:

Die Untersuchung einer Intensitätsabhängigkeit der spektral aufgelösten Streustrahlung ermöglicht Rückschlüsse über eine Wechselwirkung des FEL Strahls mit dem kalten Wasserstofftröpfchen. Es wurde dazu insbesondere die elastische Rayleigh-Streuung betrachtet. Der Wechselwirkungsquerschnitt für elastische Streuung ist unabhängig von der Intensität der einfallenden Strahlung, Gleichzeitig ist die Energie der Photonen mit 91,8 eV weit von atomaren Resonanzen im Wasserstoff entfernt. Die elastisch gestreute Intensität sollte somit in guter Näherung linear von der einfallenden Photonenzahl abhängen. Jedoch ist die elastische Streuung nur ein kleiner Anteil der Wechselwirkung. Der Großteil der Strahlung wird durch Photoionisierung absorbiert. Die dabei freiwerdenden Photoelektronen geben ihre Überschussenergie in inelastischen Elektron-Elektron-

Stößen ab, was zu einer moderaten und gleichmäßigen Anregung des Targets führt. Die zu erwartende Zeitkonstante für das Erreichen eines Gleichgewichts der Elektronentemperatur ist so kurz, dass dieses Gleichgewicht noch während des FEL Pulses erreicht wird. Ein Teil der elastisch gestreuten Strahlung testet daher einen angeregten, plasmaartigen Zustand des Wasserstofftargets. Der Wechselwirkungsquerschnitt für elastische Streuung an diesem Plasma variiert im Vergleich zum Grundzustand, insbesondere durch die höhere Wahrscheinlichkeit für Inverse-Bremsstrahlung-Prozesse bedingt durch die höhere Dichte freier Elektronen. Diese Änderung des Wechselwirkungsquerschnitts führt für sehr hohe Intensitäten zu einem nicht-linearen Verhältnis zwischen Intensität (in W/cm^2) einfallender FEL Strahlung und elastisch gestreuten Photonen.

Im Experiment wurden FEL Pulse variabler Intensität (2-45 μJ) und einem Strahldurchmesser von $\sim 30 \mu\text{m}$ an Wasserstoff-Filamenten von $\sim 30 \mu\text{m}$ Durchmesser und einer Elektronendichte von $\sim 2,3 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ gestreut. Dies entspricht Intensitäten der einfallenden Strahlung von etwa $10^{13} - 10^{14} \text{ W}/\text{cm}^2$. Zur Normierung der Spektroskopiedaten wurde das mittels eines Elektronen-Flugzeitspektrometers gemessene Lichtsignal eingesetzt. Die Größe des Lichtsignals ist proportional zur Intensität der einfallenden Strahlung sowie gleichzeitig zum Überlapp von FEL Pulsen und Wasserstofftarget. Letztere Normierung war notwendig um Fluktuationen in der Position des Wasserstoff-Filaments zu berücksichtigen, bedingt durch eine Instabilität der Quelle während des Experiments.

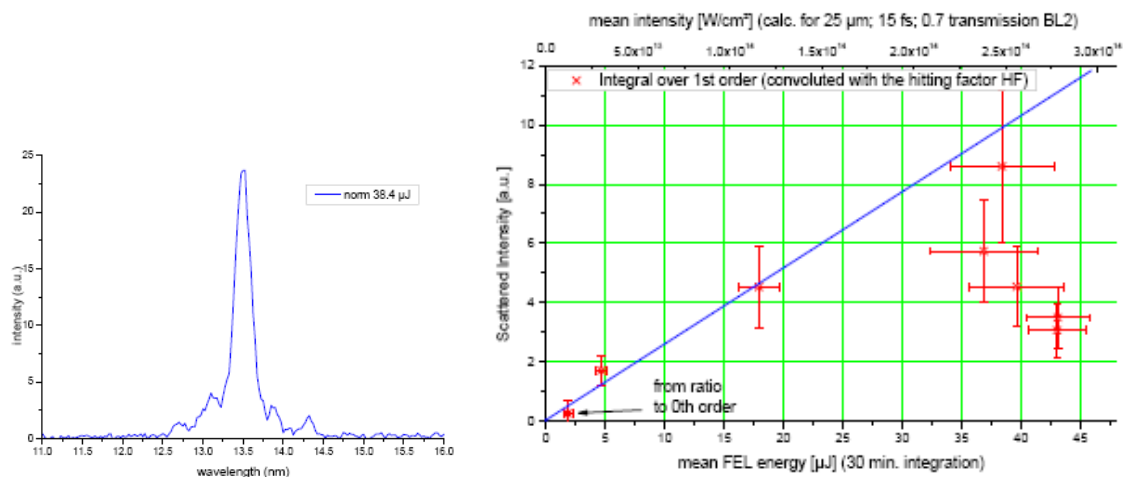


Abb. 1: Spektrale Verteilung der Rayleigh-Streuung an festem Wasserstoff integriert über 30 Minuten. Die Nebenmaxima, die aus der Beugung an dem unterstützenden Gitter folgen, lassen sich gut erkennen. Daneben die Darstellung der gestreuten Intensität als Funktion der einfallenden Intensität zeigt die Abweichung von der linearen Abhängigkeit oberhalb $\sim 2 \times 10^{14} \text{ W}/\text{cm}^2$.

Abbildung 1 zeigt die spektrale Verteilung der elastisch gestreuten Strahlung. Das Rayleigh-Maximum mit einer Halbwertsbreite von $\sim 0,3 \text{ nm}$ zeigt neben der Bandbreite der einfallenden Strahlung ($\sim 0,13 \text{ nm}$) weitere Anteile bedingt durch Strahlgröße und nicht vollständige Justierung. Weiterhin ist die experimentell bestimmte Abhängigkeit der gestreuten Intensität von der mittleren einfallenden Pulsenergie in μJ , bzw. Intensität in W/cm^2 aufgetragen und man erkennt die Abweichung von einem linearen Zusammenhang für Intensitäten oberhalb $\sim 2 \times 10^{14} \text{ W}/\text{cm}^2$. Die Interpretation dieser experimentellen Daten mittels theoretischer Modellrechnungen deutet an, dass zusätzliche Absorptionskanäle im Plasmazustand verantwortlich für diese Nichtlinearität sein könnten. Die Arbeit an diesen Modellrechnungen dauert an und endgültige Ergebnisse werden erst nach Abschluß des Virtuellen Instituts vorliegen.

Die Untersuchung der Emissionsspektren von Plasmen, die mittels des FEL-Strahls in Festkörperproben angeregt werden können, bietet die Möglichkeit Aussagen über die Zustandsparameter dieser Plasmen zu machen. Bei diesen Untersuchungen wurden FEL-Pulse einer mittleren Energie von 33 μJ pro Puls genutzt. Die FEL-Strahlung traf unter einem Einfallswinkel von 45° auf ein festes Aluminiumtarget. Anders als bei optischen Lasern, bei denen ein heißes, inhomogenes Plasma entsteht, wird mit VUV-Strahlung ein Plasma ohne starke Dichte- und Temperaturgradienten erzeugt. Die

Eindringtiefe der VUV-Strahlen beträgt 40 nm. Angeregte p-Elektronen thermalisieren mit den übrigen Leitungsbandelektronen in sehr kurzer Zeit (<100 fs). Das derartig geformte Plasma emittiert zwei Arten von Strahlung, welche mit dem VUV-Spektrometer zeitintegriert nachgewiesen wurden: Zum einen erzeugen die angeregten Elektronen beim Abbremsen im elektrischen Feld der Ionenrümpfe ein Bremsstrahlungskontinuum, zum anderen werden schnelle Elektronen von Ionen eingefangen und emittieren die überschüssige kinetische Energie in Form von charakteristischen Ionenlinien. Abbildung 2 zeigt die spektrale Verteilung integriert über $\sim 13,5$ min. In dem Spektrum erkennt man neben dem stark verbreiterten Rayleigh-Maximum deutlich Al IV und angedeutet Al V Linien. Außerdem lässt sich ein Untergrund ausmachen, den wir als Bremsstrahlung interpretieren. Dass diese Strahlung aus dem Inneren des Plasmas entweicht kann man an der Kante bei 17.0 nm erkennen, die der L-Schalen Absorptionskante von Aluminium entspricht. Die Anpassung des theoretisch errechneten Bremsstrahlungsspektrums an die Daten ermöglicht die Bestimmung der Elektronentemperatur. Unabhängig kann die Temperatur

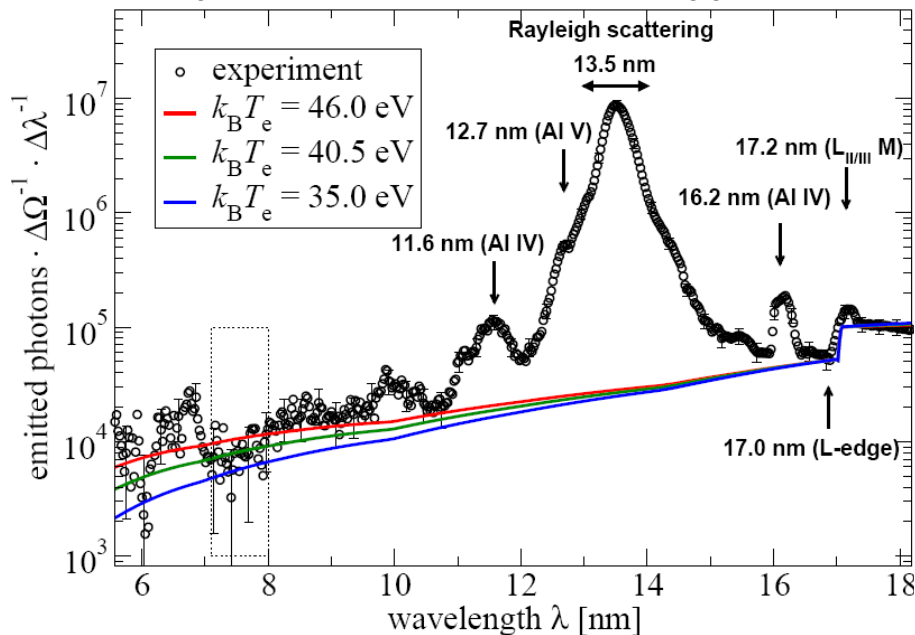


Abb. 2: Spektrale Verteilung emittierter XUV Photonen pro Raumwinkelelement $\Delta\Omega=4.0\times 10^{-4}$ sr und Wellenlängenintervall $\Delta\lambda=0.025$ nm. Die Spektren wurden auf Spektrometer- und Detektorempfindlichkeit korrigiert. Die Linien geben Rechnungen des Bremsstrahlungsspektrums für verschiedene Elektronentemperaturen wieder. Die Anpassung der Bremsstrahlungsspektren erfolgte innerhalb der angedeuteten Box.

aus dem Intensitätsverhältnis der Al IV Linien ermittelt werden. Die Kombination beider Methoden ermöglicht die Bestimmung der Elektronentemperatur zu 38 ± 6 eV. Diese Ergebnisse wurden durch hydrodynamische Simulationen mit dem Code HELIOS qualitativ untermauert. Mit diesen Messungen konnte erstmals experimentell gezeigt werden, dass FEL-Strahlung im kurzwelligen Wellenlängenbereich eine neue Möglichkeit eröffnet, Festkörper homogen und volumetrisch anzuregen. Damit bietet sich ein neues Experimentierfeld für die Erforschung warmer, dichter Materie.

Als Zusammenfassung kann man schließen, daß die im Rahmen dieses Projekts erfolgten theoretischen und experimentellen Untersuchungen weltweit an vorderster Stelle stehen. Die Möglichkeit, erste Untersuchungen mit FEL Strahlung durchzuführen, hat international große Beachtung hervorgerufen, auch bedingt durch Pläne ähnliche Experimente an anderen Quellen durchzuführen, wie dem LCLS in Stanford oder laser-angeregten Quellen. Die theoretischen Modellrechnungen werden weltweit bereits zur Modellierung aktueller Experimente an FEL- und Laser-Quellen eingesetzt.

d) Ausblick auf zukünftige Arbeiten, Nachhaltigkeit

Im Rahmen dieses Virtuellen Instituts war es möglich, erste Experimente zur Untersuchung von Zustandsparametern warmer, dichter Plasmen mittels inelastischer Streu-

ung von kurzweilliger FEL-Strahlung erfolgreich durchzuführen. Diese ersten Aktivitäten haben auch gezeigt, dass noch Potential für die Weiterentwicklung der experimentellen Apparaturen, bei der Simulation der erzeugten Plasmazustände sowie bei der theoretischen Beschreibung dieser noch weitgehend unerforschten Plasmazustände vorhanden ist, dass durch weiterführende Arbeiten der Partner erschlossen werden soll.

Weitere instrumentelle Entwicklungen werden dazu beitragen, dass die verwendeten kryogenen Jets, insbesondere bei Benutzung von Wasserstoff als Gas, eine vereinfachte und reproduzierbare Nutzung für die Nutzergemeinde ermöglichen. Unter anderem wird die Verwendung von Kryostaten mit geschlossenen Helium-Kühlkreisläufen (weiterführende Arbeiten in der AG Meiwes-Broer, U Rostock), aber auch die Optimierung der gepulsten Einlassdüse (weiterführende Arbeiten ebenfalls in der AG Meiwes-Broer, U Rostock, gemeinsam mit der AG Laarman, DESY) zu einem vereinfachten Einsatz beitragen. Die Verbesserung des VUV-Spektrometers hinsichtlich Auflösung und Effizienz ist besonders notwendig. Das verwendete Spektrometer hatte eine Effizienz, mit der der Nachweis des experimentell schwachen Streusignals beeinträchtigt war. Eine Verbesserung der Effizienz kann durch den Ersatz des bisher eingesetzten Transmissionsgitters durch ein Reflexionsgitter erreicht werden. Diese Änderungen werden gleichzeitig dazu führen, Artefakte in den experimentellen Spektren bedingt durch das unterstützende Gitter (vgl. Abb. 3) zu reduzieren. Weiter sollte die spektroskopische Auflösung verbessert werden, um eine genauere Analyse der Linienprofile zu ermöglichen. Hinzu kam der Umstand, dass die Justiermöglichkeiten des verwendeten Transmissionsgitter-Spektrometers unter den experimentellen Bedingungen bei FLASH unzureichend waren. Die im Rahmen dieses Virtuellen Instituts gemachten Beobachtungen haben bereits zum Entwurf und Bau eines neuen Reflexionsgitter-Spektrometers geführt (weiterführende Arbeiten bei DESY, AG Tschentscher, gemeinsam mit der FSU Jena, AG Förster), das bei den nächsten Experimenten in Juni 2008 zum Einsatz kommen wird. Im Vergleich zum vorhandenen Spektrometer wird das Auflösungsvermögen verdoppelt und die Effizienz etwa verzehnfacht. Weiterhin sind die Justagemöglichkeiten enorm vereinfacht worden, was ein präziseres und schnelleres Arbeiten ermöglichen wird. Eine erweiterte Diagnostik der FEL und Laserstrahlung sowie des kryogenen Jets und der erzeugten Plasmen wird zu einer vollständigeren Beschreibung der Experimente führen.

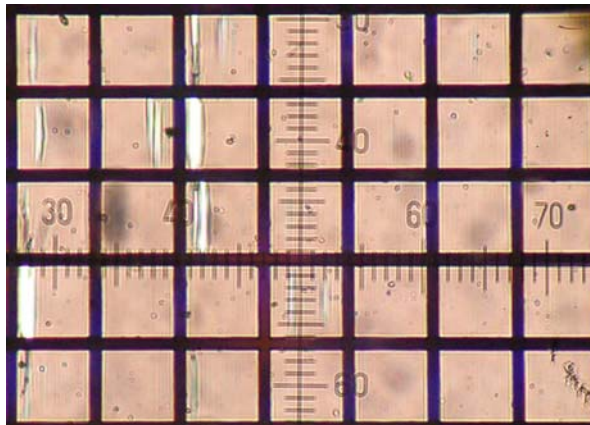


Abb. 3: Mikroskopische Aufnahme des unterstützenden Gitters und des freistehenden Beugungsgitters des VUV Spektrometers. Die Periode des unterstützenden Gitters ist $17\mu\text{m}$. Deutlich erkennbar sind Schäden am Beugungsgitter mit nur 250 nm Stegbreite. Das Gitter hat 2000 Linien pro Millimeter. Das unterstützende Gitter führt zu den Artefakten in den Spektren.

Ein wichtiger Beitrag zu einem besseren Verständnis der räumlich und zeitlich korrelierten, komplizierten plasmaphysikalischen Prozesse der Licht-Materie-Wechselwirkung (gebunden-frei-Übergänge: Ionisation und Rekombination, frei-frei-Übergänge: Bremsstrahlung, Inelastische Streuung) ergibt sich aus *state-of-the-art* hydrodynamischen Simulationen. Obwohl zum Ende der Laufzeit des Virtuellen Instituts mit dem HELIOS-Programm bereits sehr nützliche Rechnungen durchgeführt werden konnten, muss dieses Instrument insbesondere zur Interpretation der künftigen experimentellen Ergebnisse noch stärker eingesetzt werden. Dazu sollten entsprechende Kapazitäten und

Erfahrungen an den Partnereinrichtungen ausgebaut und externe Expertise stärker genutzt werden.

Die theoretische Beschreibung der Thomson-Streuung basiert momentan auf dem Chihara-Ansatz, der zwischen den Beiträgen gebundener und freier Elektronen zum dynamischen Strukturfaktor unterscheidet. Dieses chemische Modell sollte in Zukunft durch ein strikt physikalisches Bild ersetzt werden, das zur Beschreibung von stark korrelierten Plasmen besser geeignet ist. Dazu sollen perspektivisch Quantenmolekulardynamik-Simulationen durchgeführt werden, die mit Dichtefunktionaltheorie für endliche Temperaturen das Elektronensystem quantenmechanisch beschreiben und klassische Molekulardynamik-Simulationen für das Ionensystem anschließen. Für den statischen Strukturfaktor ist dieses Szenario bereits erfolgreich durchgeführt worden, aber für den dynamischen Strukturfaktor bereiten die endliche Simulationsbox und kleine Teilchenzahlen momentan noch größere Schwierigkeiten bei einer Umsetzung dieses Konzepts. Außerdem sind Nichtgleichgewichtseffekte und die zu ihrer Beschreibung notwendigen Verallgemeinerungen der bisherigen Gleichgewichtsansätze eine große Herausforderung für die Plasmatheorie, die grundlegend untersucht werden müssen, so z. B. die Gültigkeit des Fluktuations-Dissipations-Theorems und das Relaxationsverhalten von Zweitemperaturplasmen.

Um die in den vorigen Absätzen beschriebenen Arbeiten ausführen zu können, die aufgebaute Expertise in den beteiligten Arbeitsgruppen zu erhalten und weitere Partner für zukünftige Entwicklungen in die Arbeiten mit einzubeziehen, wurde Ende 2006 ein Verbundprojekt mit dem Titel *Wechselwirkung intensiver XUV-Impulse mit kondensierter Materie – Innovative Instrumentierung für Experimente bei FLASH* beantragt. Neben den Instituten in Rostock, Jena und Hamburg wurden auf experimenteller Seite die Universität Duisburg-Essen (AG Sokolowski-Tinten) und die TU Darmstadt (AG Roth) integriert. Auf dem Gebiet der Plasmatheorie sind die Universität Kaiserslautern (AGs Rethfeld und Urbassek) und die GH Kassel (AG Garcia) eingebunden. Dieses Verbundprojekt wird seit 07/2007 im Rahmen des BMBF *Forschungsschwerpunkt 301: FLASH* gefördert.

e) Verwertungspotenzial:

Inelastische Streuexperimente mit kurzweiliger Strahlung (XUV oder Röntgen) an intensiven Quellen bieten neuartige Möglichkeiten für die experimentelle Bestimmung von Parametern in dichten Plasmen, deren Messung bisher nicht anders gewährleistet werden kann. Die im Rahmen dieses Virtuellen Instituts erfolgten theoretischen und experimentellen Arbeiten zeigen das große Potential dieser Methode und stellen für die weitere Anwendung durch eine wachsende wissenschaftliche Gemeinde eine bedeutende Grundlage und Voraussetzung dar. Diese Arbeiten haben auch dazu geführt, dass Inelastische Streuexperimente in Zukunft bei der Diagnostik dichter Plasmen eine breitere Anwendung finden werden. Die Interpretation der experimentellen Messwerte wird dabei erst durch eine adäquate theoretische Beschreibung dieser komplexen Systeme ermöglicht. Die im Rahmen dieses Virtuellen Instituts erzielten Ergebnisse haben entscheidend dazu beigetragen, dieses theoretische Verständnis aufzubauen und Modelle zu entwickeln, die in Zukunft für die Interpretation von Experimenten an dichten Plasmen eingesetzt werden können. Der Einsatz kryogener Wasserstoffjets als ein sich ständig erneuerndes Probensystem mit Dichten nahe der Festkörperdichte bietet dabei weitreichende Möglichkeiten für verschiedenste Experimente mit intensiven Strahlungsquellen, wie zum Beispiel Hochleistungslasern im optischen oder im Röntgenbereich. Das große Interesse an unseren Experimenten auf internationalen Konferenzen deutet an, dass diese Probenart in Zukunft weitere Verbreitung finden wird. Im Rahmen dieses Virtuellen Instituts wurden keine Patente beantragt oder Lizenzen vergeben. Industriekooperationen sind nicht erfolgt.

3. Qualifikation des wissenschaftlichen Nachwuchses:

Im wesentlichen erfolgte die Qualifikation des wissenschaftlichen Nachwuchses über drei Maßnahmen: Eine Vorlesungsserie an den beteiligten Universitäten Rostock und Jena, an der alle Antragsteller beteiligt waren, vermittelte die Themen des Virtuellen Institutes an Studenten der höheren Semester sowie Doktoranden. Diese Spezialvorlesungen erzielten eine sehr hohe Resonanz und vermittelten weit gefächerte Grundlagen der theoretischen Beschreibung und Behandlung stark korrelierter Plasmen, der Erzeugung und Anwendung höchst-brillanter Röntgenstrahlung durch Synchrotrons und Freie-Elektronen-Laser, sowie der Röntgen-Streuung und Plasmaspektroskopie. Zusätzliche Kenntnisse konnten in Vorlesungen von Gästen des Virtuellen Instituts vermittelt werden. So hat zum Beispiel mit Dr. Siegfried H. Glenzer (Lawrence Livermore National Laboratory) ein Humboldt-Preisträger des Jahres 2006 die studentische Ausbildung mit einer eigenständigen, fakultativen Vorlesung über „Trägheitsfusion“ im Sommersemester 2006 an der Universität Rostock bereichert und eine Serie von Seminar- und Kolloquiumsvorträgen in Hamburg, Jena und anderen Orten durchgeführt. Weiterhin ermöglichten die regelmäßigen und institutsoffenen Arbeitstreffen des Virtuellen Instituts eine breit angelegte Diskussion der Projekte und Teilergebnisse mit Fachkollegen. Die zweite Maßnahme ist die direkte Ausbildung von Diplomanden und Doktoranden zu Themen und laufenden Arbeiten des Virtuellen Instituts. Dazu wurden bzw. werden in Rostock je zwei Diplom- und Promotionsvorhaben, in Jena und in Hamburg jeweils ein Promotionsvorhaben durchgeführt. Die dritte Maßnahme war die Veranstaltung von internationalen Workshops, von regelmäßig abgehaltenen Arbeitstreffen sowie die Teilnahme an internationalen Tagungen und Workshops mit Präsentationen der Arbeiten des Virtuellen Instituts.

Vorlesungen an den Universitäten Rostock und Jena, Ferienschulen sowie Seminare des Virtuellen Instituts bei DESY:

- 4.-15. Okt 2004: WE-Heraeus-Ferienkurs *Korrelierte Materie im Strahlungsfeld: Von der fs-Spektroskopie zum Freie-Elektronen-Laser*, Universität Rostock
- WS 2005/06: Redmer/Förster/Tschentscher, *Plasmaphysik mit Freie-Elektronen-Lasern*, Universität Rostock
- SS 2006: Glenzer/Höll/Redmer/Günter, *Einführung in die Trägheitsfusion*, Universität Rostock
- WS 2006/07: Redmer/Förster/Tschentscher, *Plasmaphysik mit Freie-Elektronen-Lasern*, Universität Jena
- 6. Okt 2006: A. Höll, *Thomson Scattering in Warm Dense Matter*, HASYLAB Institutsseminar, DESY
- 23. Mär 2007: S.H. Glenzer, *X-ray Scattering for Plasma Physics Applications*, HASYLAB Institutsseminar, DESY

Internationale Workshops und Arbeitstreffen des Virtuellen Instituts:

- 3. Nov 2004: *Kick-off-Treffen des Virtuellen Instituts*, Universität Jena
- 1. Feb 2005: *Arbeitstreffen des Virtuellen Instituts*, Hirscheegg, anlässlich der Teilnahme am *International Workshop High Energy Density in Matter*
- 9.-10. Jun 2005: *Arbeitstreffen des Virtuellen Instituts*, Universität Rostock
- 23. Feb 2006: *Arbeitstreffen des Virtuellen Instituts*, DESY
- 9. Jun 2006: *Arbeitstreffen des Virtuellen Instituts*, Universität Jena
- 31. Jan 2007: *Arbeitstreffen des Virtuellen Instituts*, Hirscheegg, anlässlich der Teilnahme an dem *International Workshop High Energy Density in Matter*
- 4. Mai 2007: *Arbeitstreffen des Virtuellen Instituts*, Universität Rostock
- 13.-14. Dez 2007: *International Workshop Plasma Physics Research using FEL Radiation*, DESY

Internationale Workshops und Konferenzen auf denen die Arbeiten des Virtuellen Instituts präsentiert wurden:

31. Jan - 4. Feb 2005: *International Workshop High Energy Density in Matter*, Hirschegg
20.-25. Jun 2005: *International Conference on Strongly Coupled Coulomb Systems*,
Moskau
6.-8. Okt 2005: *International Conference on Warm Dense Matter*, Vancouver
30. Jan - 3. Feb 2006: *International Workshop High Energy Density in Matter*, Hirschegg
4.-8. Sep 2006: *International Workshop on Non-Ideal Plasmas*, Darmstadt
11.-16. Sep 2006: *International Workshop on Radiative Properties of Hot Dense
Matter*, Albufeira
29. Jan - 2. Feb 2007: *International Workshop High Energy Density in Matter*, Hirschegg
4.-8. Jun 2007: *International Conference on Warm Dense Matter*, Porquerolles
16.-18. Jul 2007: *390. WE-Heraeus-Seminar on Strongly Correlated Plasmas*, Bad
Honnef
28. Jan - 1. Feb 2008: *International Workshop High Energy Density in Matter*, Hirschegg

4. Publikationen (nur Artikel in unmittelbarem Zusammenhang mit Virtuellem Institut)

Referierte Artikel

- A. Höll, R. Redmer, G. Röpke, H. Reinholz, Eur. Phys. J. D **29**, 159-162 (2004).
- R. Redmer, H. Reinholz, G. Röpke, A. Höll, IEEE Trans. Plasma Sci. **33**, 77-84 (2005).
- T. Tschentscher, S. Toleikis, Eur. Phys. J. D **36**, 193-197 (2005).
- G. Gregori, S.H. Glenzer, H.-K. Chung, D.H. Froula, R.W. Lee, N.B. Meezan, J.D. Moody, C. Niemann, O.L. Landen, B. Holst, R. Redmer, S.P. Regan, H. Sawada, JQSRT **99**, 225 (2006).
- D. Semkat, R. Redmer, and T. Bornath, Phys. Rev. E **73**, 066406 (2006).
- R. Thiele, R. Redmer, H. Reinholz, and G. Röpke, J. Phys. A **39**, 4365-4368 (2006).
- C. Fortmann, R. Redmer, H. Reinholz, G. Röpke, W. Rozmus, and A. Wierling, High Energy Density Physics **2**, 57 (2006).
- V. Schwarz, Th. Bornath, W.-D. Kraeft, S.H. Glenzer, A. Höll, and R. Redmer, Contrib. Plasma Phys. **47**, 324-330 (2006).
- A. Höll, Th. Bornath, L. Cao, T. Döppner, S. Düsterer, E. Förster, C. Fortmann, S.H. Glenzer, G. Gregori, T. Laarmann, K.-H. Meiwes-Broer, A. Przystawik, P. Radcliffe, R. Redmer, H. Reinholz, G. Röpke, R. Thiele, J. Tiggesbäumker, S. Toleikis, N.X. Truong, T. Tschentscher, I. Uschmann, U. Zastra, High Energy Density Physics **3**, 120-130 (2007).
- S.H. Glenzer, O.L. Landen, P. Neumayer, R.W. Lee, K. Widmann, S.W. Pollaine, R.J. Wallace, G. Gregori, A. Höll, T. Bornath, R. Thiele, V. Schwarz, W.-D. Kraeft, R. Redmer, Phys. Rev. Lett. **98**, 065002 (2007).
- L.F. Cao, I. Uschmann, F. Zamponi, T. Kämpfer, A. Fuhrmann, E. Förster, A. Höll, R. Redmer, S. Toleikis, T. Tschentscher, S.H. Glenzer, Laser Part. Beams **25**, 239-244 (2007).
- R. Thiele, T. Bornath, C. Fortmann, A. Höll, R. Redmer, H. Reinholz, G. Röpke, A. Wierling, S.H. Glenzer, G. Gregori, zur Veröffentlichung eingereicht.
- S.H. Glenzer, R. Redmer, zur Veröffentlichung eingereicht.
- U. Zastra, C. Fortmann, R.R. Fäustlin, L.F. Cao, T. Döppner, S. Düsterer, S.H. Glenzer, G. Gregori, T. Laarmann, H.J. Lee, A. Przystawik, P. Radcliffe, H. Reinholz, G. Röpke, J. Tiggesbäumker, R. Thiele, I. Uschmann, S. Toleikis, A. Wierling, T. Tschentscher, E. Förster, R. Redmer, zur Veröffentlichung eingereicht

Unreferierte Artikel, Konferenzbeiträge, Jahresberichte

- A. Höll, R. Redmer, G. Röpke, H. Reinholz, Report GSI-2004-3, 36 (2004).
- C. Fortmann, H. Reinholz, G. Röpke, A. Wierling, Report GSI-2005-3, TT-08 (2005).

- R. Thiele, R. Redmer, H. Reinholz, G. Röpke, Report GSI-2005-3, TT-17 (2005).
- A. Höll et al., Report GSI-2006-2, TT-08 (2006).
- C. Fortmann et al., Report GSI-2006-2, TT-13 (2006).
- L.F. Cao et al., HASYLAB Annual Report 2006, DESY, Hamburg (2007).
- U. Zastrau et al., IOQ Jena Annual Report 2007, Jena (2008).
- S. Toleikis et al., HASYLAB Annual Report 2007, DESY, Hamburg (2008).
- L. Cao et al., HASYLAB Annual Report 2007, DESY, Hamburg (2008).
- A. Przystawik et al., HASYLAB Annual Report 2007, DESY, Hamburg (2008).

Studien- und Diplomarbeiten, Dissertationen, Habilitationen

- Dissertation R. Thiele, *Thomsonstreuung in warmer und dichter Materie* (Dissertation, Universität Rostock, 2007).

5. Öffentlichkeitsarbeit:

Pressemitteilungen:

Sep 2004, Genehmigung des VI, Universität Rostock

Sep 2004, Genehmigung des VI, Universität Rostock

Jan 2005, Genehmigung des VI, DESY

Webseite:

<http://www.mpg.uni-rostock.de/vhvi104> wurde während der Laufzeit des Virtuellen Instituts als Medium der Informationsverbreitung und zur Darstellung des Projekts betrieben. Die Webseite wurde zeitnah zum Abschluss des Virtuellen Instituts deaktiviert.