

Abteilung

SF4 Struktur und Dynamik

Zentrales Thema der Grundlagenforschung der Abteilung sind **atomare Bewegungen** in fester Materie und die damit verknüpften Strukturänderungen, insbesondere strukturelle Phasenübergänge. Bewegungen (Dynamik) und Strukturveränderungen werden einerseits durch Ionenimpakt ausgelöst, entwickeln sich andererseits als Funktion thermodynamischer Parameter. Gerade die **Strukturveränderungen durch Ionenimpakt** sind Gegenstand verstärkter Forschung im Rahmen eines bewilligten **HGF-Strategiefondsprojekts 'Ionen Spuren / Ion Tracks in Solids'**, das zu einem wesentlichen Teil die Forschungsaktivitäten der Abteilung für die nächsten drei Jahre bestimmen wird.

Wesentliche Aufgabe der Abteilung ist der Betrieb des **Ionenstrahl Labors ISL**. Dazu gehören Entwicklungsarbeiten und die Betreuung der internen und externen Nutzer. Neben Grundlagenforschung auf dem Gebiet der Erzeugung, Veränderung und Analyse lokaler Strukturen durch Ionenimpakt werden – in dieser Breite wohl einmalig auf der Welt – hochenergetische Ionen in der Medizin und für industrielle Zwecke angewandt. Diese Forschungen sowie die erfolgreichen industriellen und medizinischen Anwendungen wurden erst durch die Gründung des ISL ermöglicht, da damit erstmals ein großer Beschleuniger fast ausschließlich für umfangreichere Materialuntersuchungen und Materialveränderungen zur Verfügung steht.

Forschungs- und Entwicklungsprojekte sind

- Atomare Dynamik: Ionenimpakt
- Atomare Dynamik: Diffusion und Phasenumwandlung
- Atomistik der Bildung und Umwandlung lokaler Strukturen

Projekte der Anwendung von Ionenstrahltechniken

- Ionenstrahlanalytik
- Augentumorthherapie
- Technologie mit Ionenstrahlen.

Es gehören dazu die Beschleunigerentwicklung und der Nutzerbetrieb sowie als BESSY Aktivität der Aufbau eines leistungsfähigen Röntgendiffraktometers und eines Strahlrohrs für Hochenergie-Kleinwinkel-Streuung.

Atomare Dynamik, lokale Strukturen

Atomare Dynamik: Ionenimpakt

Die folgenden Forschungsthemen im Rahmen dieses Projekts sind Teil eines HGF-Strategiefondsprojekts 'Ion Tracks in Solids':

- Untersuchung der Relaxation der elektronischen Anregung nach Durchgang schneller Schwerionen durch Festkörper und der daraus resultierenden Materialveränderungen mit Hilfe von Auger- und Konvoi-Elektronenspektroskopie.
- Untersuchung von Materialveränderungen nach Ionenimpakt mit Röntgendiffraktion und Mikroskopie.
- Untersuchung der Wechselwirkung hochgeladener Ionen mit Oberflächen mittels Spektroskopie der von den Ionen emittierten Elektronen und Analyse gestreuter und gesputterter Ionen.

Eine semi-empirische Beschreibung des Ladungszustandes schwerer Ionen beim Durchgang durch Festkörper und Gase wurde entwickelt. Für schnelle Ionen haben wir die „unitary convolution approximation“ (UCA) weiterentwickelt, die explizite Projektilabschirmfunktionen sowie die Stoßparameterabhängigkeit der Energiedeposition berücksichtigt.

Aus der Analyse der Linienform von emittierten Auger-Elektronen wurden Elektronentemperaturen für drei Kohlenstofftypen bestimmt. Zusätzlich zum graphitartigen amorphen Kohlenstoff wurden dafür Messungen an diamantartigem amorphen

Kohlenstoff und an kristallinem Graphit durchgeführt (vgl. Abb.1).

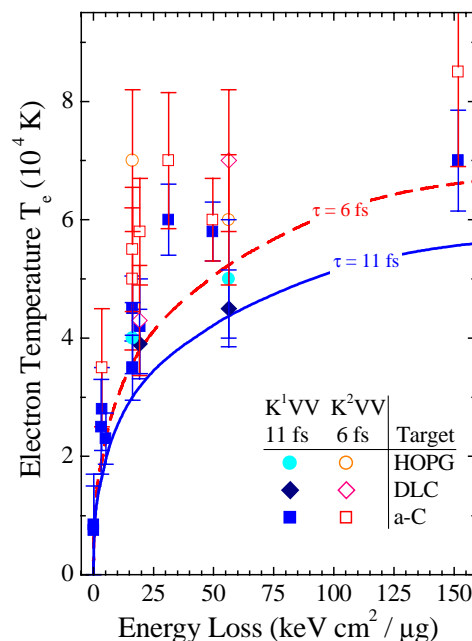


Abb. 1: Elektronentemperatur nach dem Durchgang schneller Schwerionen durch Graphit (HOPG), diamantartigem (DLC) und graphitartigem (a-C) amorphem Kohlenstoff für 2 Target-Auger-Übergänge mit Lebensdauern von 6 und 11×10^{-15} s. Die theoretischen Kurven wurden im

Rahmen eines „thermal spike“-Modells für a-C und Ionen bei 5 MeV/u berechnet.

Ungeklärt ist zur Zeit noch, warum die Elektronentemperaturen in den verschiedenen Materialien nahezu identisch sind, obwohl die entsprechenden Wärmeleitfähigkeitskoeffizienten bei Zimmertemperatur um Größenordnungen differieren. Erste Auger-Messungen zur Elektronentemperatur von amorphem und kristallinem Si zeigen ebenfalls Effekte der Elektronentemperatur.

Es wurden Elektronen spektroskopiert, die bei der Wechselwirkung von Ar¹⁷⁺-Projektilen mit Oberflächen bei extrem niedrigen Energien von 17 eV emittiert werden. Die Experimente, die von Modellrechnungen begleitet wurden, haben einen wesentlichen Beitrag zum Verständnis der Bildung und des Zerfalls hohler Atome in den ersten Atomlagen der Oberflächen geleistet. Es zeigte sich, dass die Ionen durch ihre hohe Ladung große Energiedepositionen verursachen, die zu starken nichtlinearen Effekte im Festkörper führen.

Detaillierte Untersuchungen sehr niederenergetischer Elektronen lieferten Aufschluss über Quanteneffekte beim Elektronentransport liefern. Dabei konnte erstmalig die Anregung von kollektiven Elektronenbewegungen (Plasmonen) beobachtet werden. Resonanzeffekte lassen erwarten, dass die Plasmonenanregung innerhalb weniger Atomlagen erfolgt, die gezielte Studien oberflächennaher Schichten ermöglicht.

Es wurde damit begonnen, Nanokapillaren im Durchmesser von 100 nm durch Ätzen von Ionen Spuren zu erzeugen und durch Streuung niederenergetischer Ionen auszumessen.

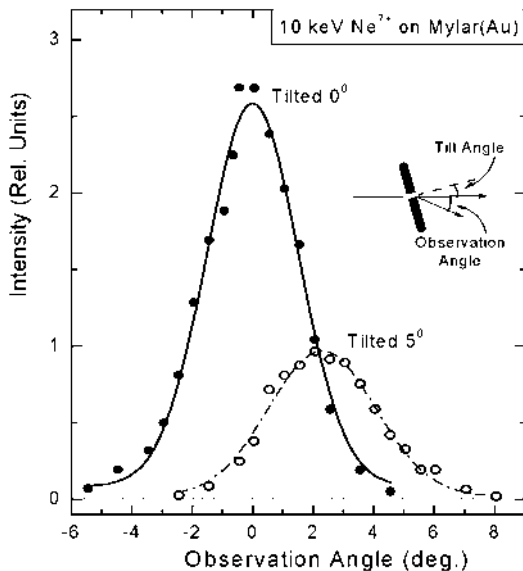


Abb.2: Winkelverteilung von 10-keV Ne⁷⁺ Ionen, die beim Durchgang durch Nanokapillaren in Mylar gestreut wurden. Durch Anstellen der Folie um 5 Grad konnten Führungseffekte der Ionen in den Kapillaren nachgewiesen werden.

G. Schiwietz, N. Stolterfoht, D. Fink, S. Klumünzer, V. Hoffmann, D. Niemann, M. Rösler

Atomare Dynamik: Diffusion und Phasenumwandlung

- Untersuchung des Atomismus der Diffusion mit Ioneninduzierten nuklearen Sonden, mit Röntgenstreuung und mit Neutronen, das bedeutet für Festkörpergitter die Bestimmung des atomaren Diffusionswegs nach Länge und Richtung.
- Zeitliche Verfolgung von Phasenübergängen von Keimen mit atomaren Dimensionen (Kernsonden-Methoden) über mikroskopische Ausscheidungen (Röntgen-Kleinwinkelstreuung) bis zu neuen Volumenphasen sowohl im klassischen Temperverfahren wie in Realzeit nach Ioneneintrag und durch Diffusion.

Die mechanischen Konsequenzen einer aufgeschmolzenen Kernspur in massiven bzw. kompaktifizierbaren Gläsern wurden studiert und mit dem Modell der thermo-elastischen Inklusion verglichen. Die gute Übereinstimmung (vgl. Tab. 1) der gemessenen mechanischen Spannungen mit theoretischen Vorhersagen liefert eine gute Basis zum Verständnis des Verhaltens von kristallinen Nichtgleichgewichtsphasen nach Ionenimpakt, da erstmals die Temperatur T* innerhalb der Kernspur bestimmt wurde, bei der atomare Relaxationvorgänge einfrieren.

	T _i (K)	σ _⊥ (GPa) (exp.)	σ _⊥ (GPa) (theor.)	T* (K)
Pd ₈₀ Si ₂₀	140	- 0.42	- 0.44	980
Fe ₈₀ B ₂₀	145	- 1.20	- 1.30	1200
Fe ₈₁ B _{13.5} Si _{3.5} C ₂	85	- 1.60	- 2.00	1020

Tab. 1

Zum Hochtemperatur-Phasenübergang in Ti hat an der ESRF eine erste Messung stattgefunden. Die Ergebnisse sind noch nicht vollständig ausgewertet. Es hat sich gezeigt, dass an die Präzision der Messung von Temperatur und Vakuum äusserste Anforderungen zu stellen sind. Das Zeitfenster der Messungen betrug ca. 1 min, kann aber noch deutlich zu kürzeren Zeiten verschoben werden.

In den intermetallischen bcc-Verbindungen NiGa und CoGa wurde ein Diffusionsprozess gefunden, der zwei Zeitskalen enthält. Eine lange Zeitskala wird dem Aufenthalt im regulären Untergitter, eine kurze Zeitskala dem Aufenthalt auf Antistrukturplätzen zugeordnet. Die genauere Untersuchung legt nahe, dass beim elementaren Diffusionsschritt mehrere Defekte gleichzeitig beteiligt sind und somit die atomare Bewegung nicht auf die zwangsläufig stark korrelierte Bewegung einer einzelnen Leerstelle angewiesen ist.

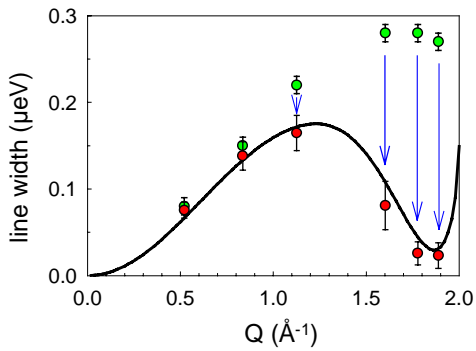


Abb. 1: Linienbreite der quasielastischen Neutronenstreuung an $\text{Co}_{64}\text{Ga}_{36}$ bei 1400 K. Das Maximum der Linienbreite bei $Q=1.86 \text{ \AA}^{-1}$, die aus einem Fit mit einer einzigen Lorentzlinie (grün) erhalten wurde, kann nicht mit einem passenden Modell erklärt werden. Wenn hingegen eine breite Linie, die ihre Ursache in Sprüngen auf Antistrukturplätze hat, subtrahiert wird, zeigt die verbleibende schmale Linie (rot) eine Q -Abhängigkeit, die sich gut mit dem NN-Sprungmodell (Linie) vereinbaren läßt.

S. Klaumünzer, R. Sielemann, D.Fink, G.Vogl, N. Darowski, I. Zizak

Atomistik der Bildung und Umwandlung lokaler Strukturen

- Untersuchungen ultradünner magnetischer Schichtsysteme in atomarem Maßstab mittels

radioaktiver Sondenatome. Erzeugung und hochreine Separierung der radioaktiven Sonden mit einem Massenseparator, z.Z. ISOLDE/CERN.

- Untersuchung lokaler Strukturen und dynamischer Vorgänge auf atomarer Skala in Halbleitern. Charakterisierung von Störstellen, insbesondere intrinsischer Defekte und isolierter Fremdatome in Verbindungshalbleitern aufbauend auf Untersuchungen an den Elementhalbleitern.

Die vorgesehene Verknüpfung der komplementären Methodengruppen, Kernsonden-Spektroskopie mit implantierten nuklearen Sonden an ISL und Röntgen-Absorptionsspektroskopie an BESSY II und Hasylab, verspricht einen qualitativen Fortschritt für die Aufklärung lokaler Strukturen im Festkörper.

Das Programm zur Messung magnetischer Hyperfeinfelder an Adatomen von 4sp-Elementen (Se) und 5sp-Elementen (Cd) auf den ferromagnetischen Metalloberflächen der 3d-Elemente Fe, Co, Ni wurde im wesentlichen abgeschlossen. Die theoretische Vorhersage, daß magnetische Hyperfeinfelder infolge stärkerer s-Elektronenpolarisation auf der Oberfläche wesentlich größere Felder annehmen können als im Volumen, wurde erstmals experimentell bestätigt: Auf der Ni(111) Oberfläche maßen wir für das Adatom 16 T, im Volumen sind es 7 T.

Insgesamt erhielten wir eine Darstellung des magnetischen Hyperfeinfelds (als Maß für die s-Elektronenpolarisation in einem speziellen magnetischen System) vom Volumenwert in einem Ferromagneten (Ni) über mehrere Stufen bis zum Adatomwert, Abb.1.

Magnetische Hyperfeinfelder

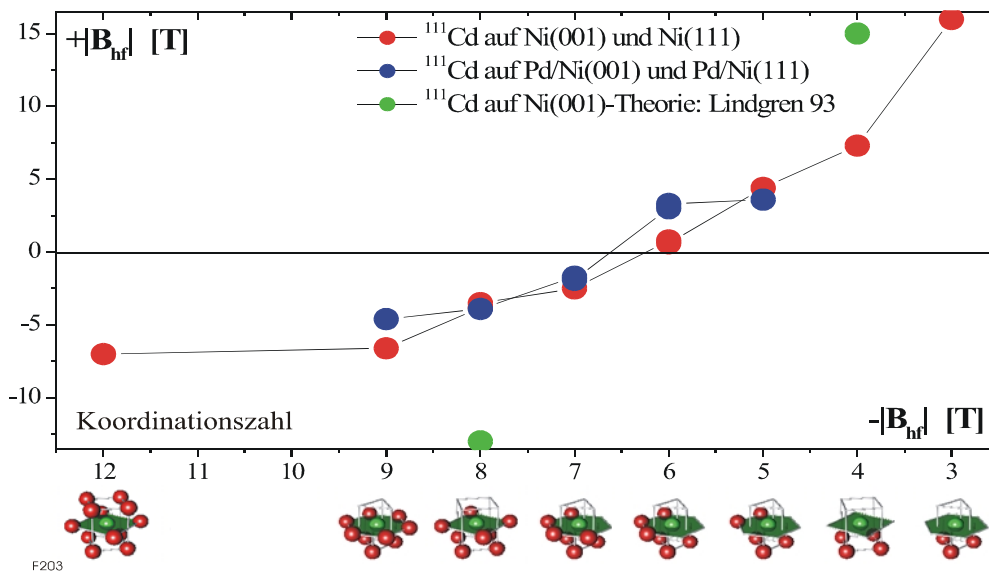


Abb. 1: Verlauf des magnetischen Hyperfeinfeldes von ^{111}Cd in und auf Ni.

Die β -NMR Untersuchungen zum Verhalten des Akzeptors Bor in Silizium-Germanium-Mischkristallen wurden abgeschlossen. Die gefundenen Resonanzen sind auf die Quadrupolwechselwirkung in gestörten Symmetrien zurückzuführen. Zur Identifikation der zugeordneten Defektkomplexe wurden Berechnungen mit der Methode der linear angepassten ebenen Wellen (FLPAW) basierend auf der Dichtefunktionaltheorie (DFT) durchgeführt. Der Vergleich erlaubt eine direkte Zuordnung der NMR-Resonanzen zu Defektkomplexen. Beispielsweise ist für die Konfiguration, bei der Bor in der Nachbarschaft eines Germanium-Atoms eingebaut wird, der gemessene Feldgradient vereinbar mit der berechneten Ladungsdichteverteilung und den, verglichen mit dem reinen Silizium verringerten Gitterabständen in den Bor-Bindungen sowie einer vergrößerten Si-Ge-Bindung.

Bei den Arbeiten zur atomaren Diffusion von Eisenatomen an der ISOLDE konnten nach Implantation der dort neuerdings zur Verfügung stehenden ^{57}Mn -Aktivität erstmals die isolierten Plätze für substitutionelle und interstitielle Eisenatome über den Mößbauereffekt gemessen werden. Die Messungen im Bereich von 550K zeigen bereits die Diffusion der Atome als Sprungprozess (über die Linienverbreiterung des Mößbauereffekts).

Die Arbeiten am II-VI Halbleiter CdTe sind noch im experimentellen Stadium, aber eine Reihe sehr interessanter Ergebnisse liegen bereits vor. Es wird nach Neutronrückstoß ein extern verzerrtes Sn-Leerstellenpaar beobachtet. Das Sn Atom auf dem Te-Gitterplatz zeigt einen ausgeprägten Jahn-Teller Effekt, der sowohl im statischen Fall tiefer Temperatur als starke Gitterverzerrung als auch im Hochtemperaturfall als dynamischer Prozess während des Sprungprozesses beobachtet werden kann.

Zum Einstieg in die Absorptionsspektroskopie haben wir zusammen mit Kollegen der Abteilung Magnetismus (SF2) am HASYLAB begonnen, mit EXAFS Bindungslängen im Mischsystem $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ in Abhängigkeit von der Zn-Konzentration zu bestimmen. Erstes Ergebnis mit der Absorption am Zn: die Bindungslänge von Zn zum nächstbenachbarten Te ändert sich deutlich weniger als nach dem VCA (virtual-crystal-approximation) Modell (siehe Abb.2). (bislang nur über L-Kanten Absorption am Te deutlich ungenauer bekannt). Dagegen deuten die bisherigen Daten auf einen Ausgleich der Abstände zu den Kationen in der zweiten Schale (nnn) in Anlehnung an das VCA-Modell.

Nach dem Full-potential Linearized Augmented Plane Waves (FLAPW) Verfahren wurden systematische ab-initio Berechnungen von magnetischen Hyperfeinfeldern an 4d/5sp-Fremdatomen in Eisen unter Berücksichtigung der lokalen Gitterrelaxation in Zusammenarbeit mit S. Cottenier (Leuven) durchgeführt. Im Allgemeinen konnte eine sehr gute Übereinstimmung mit den vorhandenen Messungen erzielt werden. Die

Gitteraufweitung und Magnetisierungsänderung durch die Fremdatome konnten ebenfalls quantitativ

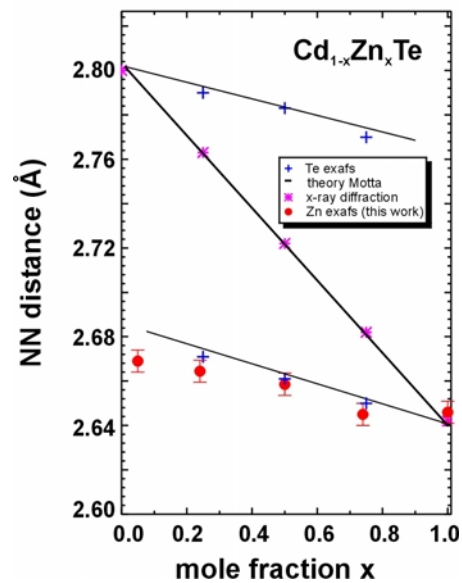


Abb. 2: Lokale Bindungslängen zwischen Cd -Te und Zn -Te gesehen vom Te aus [Motta et al.] und vom Zn (unsere Daten) aus, die sich deutlich vom VCA-Modell unterscheiden (vgl. XRD Werte).

erklärt werden.

H. Bertschat, H.-E. Mahnke, H.Haas, R. Sielemann, W.-D. Zeitz, V. Koteski

Ionenstrahlanalytik

- Durchführung von Materialanalysen mit Ionenstrahlen – RBS, ERDA, PIXE -, u. a. Ermittlung der Zusammensetzung (Element- bzw. Massen- und gegebenenfalls für Massen mit $A < 80$ auch Isotopenverteilungen) einer Probe bei gleichzeitiger Bestimmung der Tiefenverteilungen aller enthaltenen Komponenten
- Entwicklung neuer Messmethoden und Nachweisgeräte

ERDA (Electronical Recoil Detection Analysis) wird sehr erfolgreich für die Analyse von dünnen Schichten eingesetzt. Sie ist eine wertvolle Unterstützung bei der Entwicklung verschiedener Typen von Photovoltaik-Zellen. Die Nachfrage nach ERDA-Analysen ist im betrachteten Zeitraum dementsprechend stark gewachsen. Es wurden ca. 20% der an ISL verfügbaren Experiment-Strahlzeit für die ERDA eingesetzt. Der Anteil der Untersuchungen für die Photovoltaik betrug etwa 75%. Die restlichen 25% der ca. 350 Proben stammen von Forschungsgruppen mit den unterschiedlichsten Fragestellungen, wie Dotierung von Elektrolumineszenzmaterialien, Schichtzusammensetzung von Halbleiterstrukturen aus der Nachrichtentechnik, Reinheit von Metallbeschichtungen, Veränderungen an kariösen Zahnoberflächen und die Stöchiometrie von Polymeren, um nur einige zu nennen. Die Zusammenarbeit mit der Photovoltaik ist weiter vertieft worden. Erste

Ergebnisse der gemeinsamen Arbeit können, als typisches Beispiel für die Möglichkeiten von ERDA gezeigt werden.

Um bei der Herstellung von Solarzellen ZnSe-Schichten mit möglichst geringen Verunreinigungen reproduzierbar auf Solarzellenabsorbieren abzuscheiden, wird die Chemische Gasphasendeposition (CVD) benutzt. Während der Deposition muß der Absorber für ungefähr eine Stunde auf Temperaturen von 280°C bis 350°C gebracht werden. Dadurch kann es zu atomaren Diffusionen kommen. Zur genaueren Untersuchung dieser Diffusionsprozesse wurden ERDA-Studien begonnen.

In ersten ERDA-Messungen konnte durch den Vergleich von Spektren die Diffusion von Indium in die ZnSe-Pufferschicht qualitativ nachgewiesen werden. Allerdings sind die gemessenen Schichten prozessbedingt sehr rau, was quantitative Aussagen erschwert. Darüber hinaus diffundiert das Indium schon während des Aufbringens des ZnSe-Puffers, weshalb zunächst ein einfaches Modellsystem - Indium aufgedampft auf einem glatten ZnSe-Einkristall – betrachtet wurde. In Abb. 1 kann man deutlich den Unterschied zwischen den Indiumprofilen im Ausgangszustand (links) und nach einer 50-stündigen Temperaturbehandlung bei 350°C sehen. Indium diffundiert somit nicht nur entlang von Korngrenzen sondern auch in und durch die ZnSe-Kristalle.

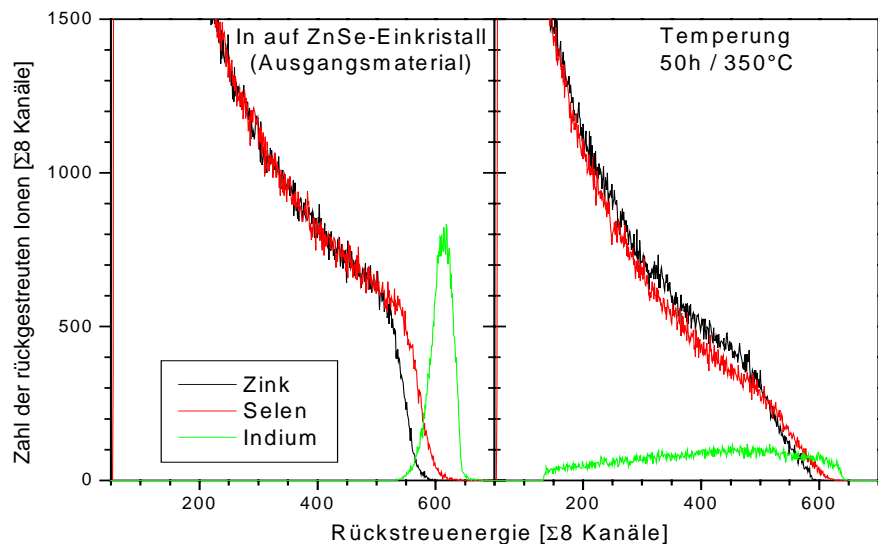


Abb. 1: Energiespektren für ein Modellsystem In auf ZnSe Einkristall: im Ausgangszustand (links) und nach 50-stündiger Temperaturbehandlung bei 350°C (rechts)

Hochenergie-PIXE (Proton Induced X-ray Emission) wird erfolgreich bei der Analyse kunsthistorischer Gegenstände mit dicken Schichten eingesetzt. Das größte Projekt im Jahr 2000 war die Analyse der italienischen Metallplaketten der Skulpturensammlung, wobei die Last der Auswertung durch das Rathgenforschungslabor getragen wurde. Es handelt sich hierbei um Metallreliefs aus dem 16./17. Jhd. Die analytische Aufgabe war die Bestimmung des Legierungstyps um eine metallurgisch korrekte Zuordnung der Objekte zu erhalten. Die Farbe der Plaketten reichte von rot über braun zu schwarz, wobei alle mit Patina belegt oder mit einem anderen Metall überzogen waren. Daher ist eine reine Oberflächenanalyse in diesem Fall nicht ausreichend. Andererseits war eine Probenentnahme aufgrund des Wertes der Gegenstände nicht möglich. 765 der Plaketten wurden in nur 14 Schichten gemessen und dabei über 1000 Spektren aufgenommen. Bereits während der Messung stellte sich heraus, dass die Farbe der Plaketten keine Hinweise auf die

Zusammensetzung gibt. Entgegen der Annahme der Kunsthistoriker stellte sich jedoch heraus, dass nur knapp 9% der Objekte aus Bronze sind, alle möglichen Legierungsarten sind vertreten, sogar ein paar eiserne und silberne Plaketten wurden entdeckt (s. Abb. 2).

Zusätzlich wurde der Aufbau im Berichtsjahr um automatische Scan- und Map Routinen sowie eine Stromintegration der sehr kleinen Ströme (typischerweise unter 1 pA) erweitert. Damit bewährte sich der Aufbau für Hochenergie PIXE unterdessen auch in anderen Experimenten (z.B. Dosimeterkalibrierung und Single Event Upset).

W. Bohne, A. Denker, W. Bohne, A. Denker, G. Röscher †, J. Röhrich, Lindner

† Herr Dr. Georg Röscher ist im Berichtsjahr verstorben.

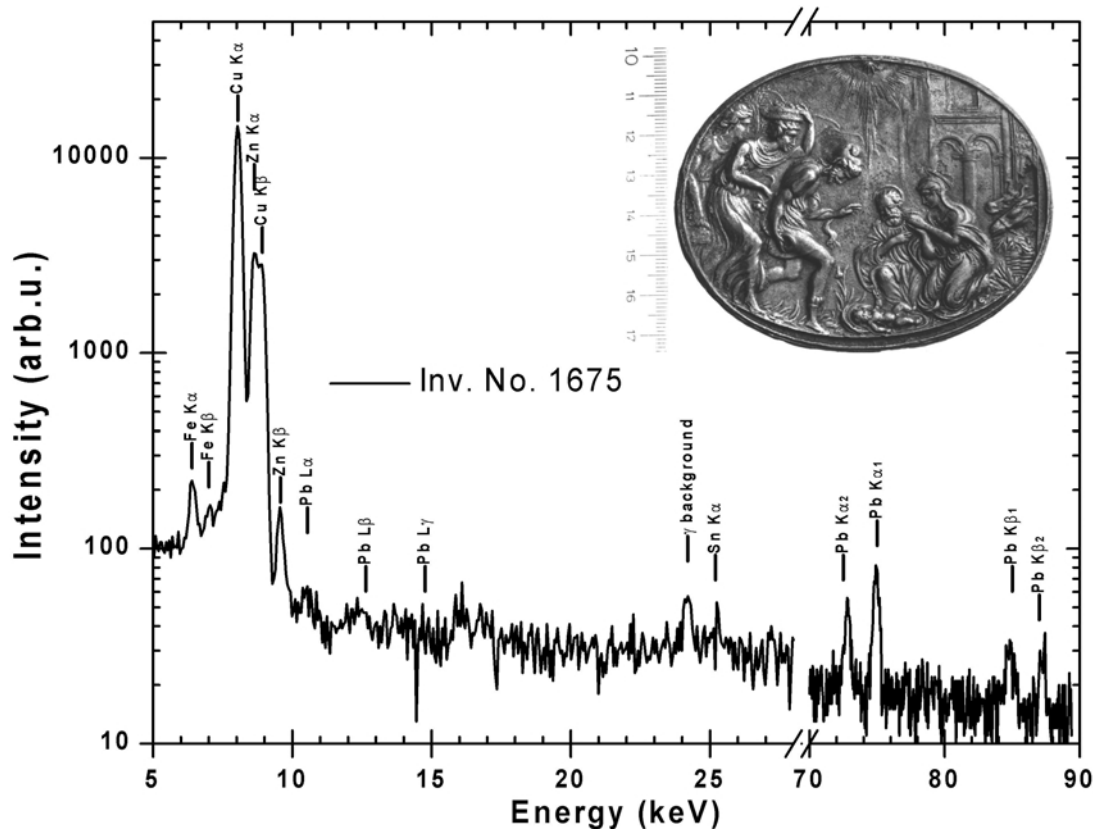


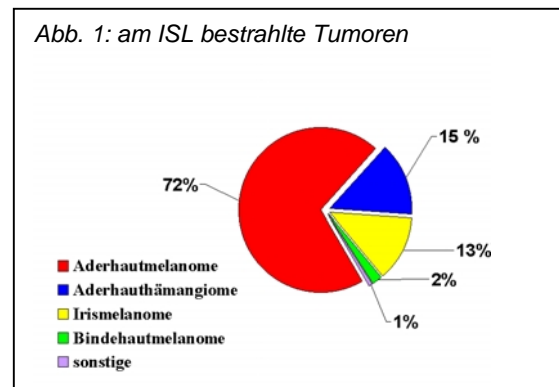
Abb. 2: Gian Giacomo Caraglio, Die Anbetung der Hirten, 1540-50. Messing, 74,4 x 90,3 mm. Berlin, Skulpturensammlung, inv. No. 1675

Augentumorthherapie

Therapie von Augentumoren in Zusammenarbeit mit dem Universitätsklinikum Benjamin Franklin sowie der Augenklinik der Universitätsklinikums Essen. Entwicklung und Test von Werkzeugen zur Erhöhung der Präzision der Protonentherapie.

Klinischer Therapiebetrieb

Im Berichtszeitraum wurden 61 Patienten mit Tumoren des Auges behandelt. Alle zur Durchführung der Bestrahlungen notwendigen Systeme arbeiteten einwandfrei. Seit Beginn der Behandlungen wurden damit insgesamt 166 Patienten am ISL bestrahlt. Abbildung 1 zeigt das Spektrum der behandelten Tumoren.

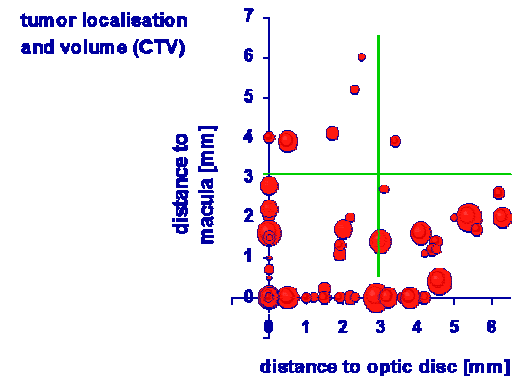


Zur Verbesserung des Therapieablaufs wurde eine Kopfhalterung zur Fixierung der Blickrichtung der Patienten während der CT-Aufnahmen entwickelt. Diese Halterung wird inzwischen routinemäßig für ATT-Patienten im UKBF eingesetzt und konnte die Qualität der zur Bestrahlungsplanung benötigten CT-Schnittbilder entscheidend verbessern.

Am ISL werden mittlerweile Patienten aus dem gesamten Bundesgebiet behandelt. Zu der leicht rückläufigen Anzahl der behandelten Fälle im Jahr 2000 ist anzumerken, daß die Behandlungskapazität am HMI nicht annähernd ausgeschöpft wurde. Der Engpaß besteht vielmehr in der Vorbereitungskapazität des UKBF bezüglich der Clipaufnäherung und diagnostischen Vorbereitung der Protonentherapie. Abbildung 2 zeigt die Lokalisation der am HMI behandelten Melanome: nahezu alle Tumoren befanden sich innerhalb einer Distanz von 3 mm zum optischen Nerv und/oder der zentralen Sehgrube. Die Bestrahlung solcher Fälle erfordert besondere Präzision. Verlässliche Langzeitresultate bezüglich der Tumorkontrolle und des visuellen Ergebnisses der Bestrahlungen liegen aufgrund der noch zu kurzen Nachbeobachtungsdauer bisher nicht vor.

Die technischen Voraussetzungen für den Beginn einer klinischen Studie zur Protonentherapie der altersbedingten Makuladegeneration (AMD) wurden geschaffen.

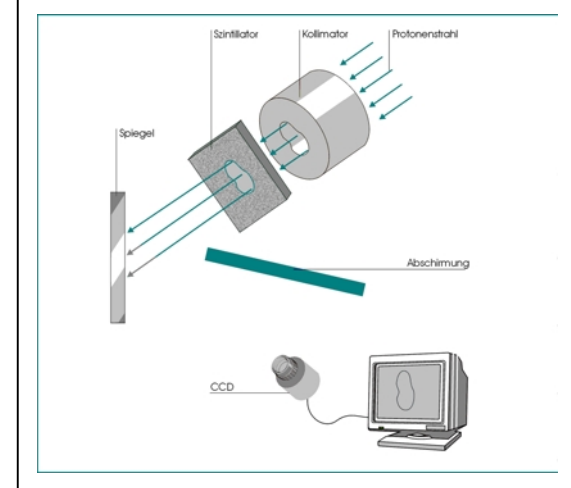
Abb. 2: Lokalisation der behandelten Aderhautmelanome



Schnelle 2D-Dosimetrie

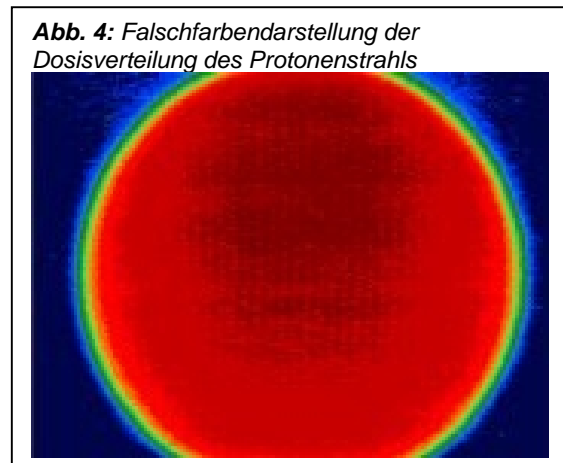
Eine elegante Methode zur schnellen Messung von Protonenfeldern ist die Aufnahme der Intensitätsverteilungen des emittierten Lichtes einer Szintillatorfolie im Protonenstrahl mit einer CCD-Kamera. Diese Methode liefert ein Bild, dessen Graustufen proportional zur Dosisverteilung des Protonenstrahls auf der Folie sind. Eine Online-Auswertung erfolgt mit Methoden der Bildverarbeitung. Das in Abbildung 3 schematisch gezeigte System wurde aufgebaut.

Abb. 3: Messaufbau für schnelle 2D-Dosimetrie



Die Übereinstimmung zwischen aus Bildern des homogenisierten Protonenstrahls extrahierten Dosisquerprofilen und mit Dioden oder Ionisationskammern gemessenen Profilen ist gut. Eine Intensitätsverteilung des Protonenstrahls, fotografiert mit einer kreisförmigen Blende ist in Abbildung 4 in Falschfarbendarstellung gezeigt.

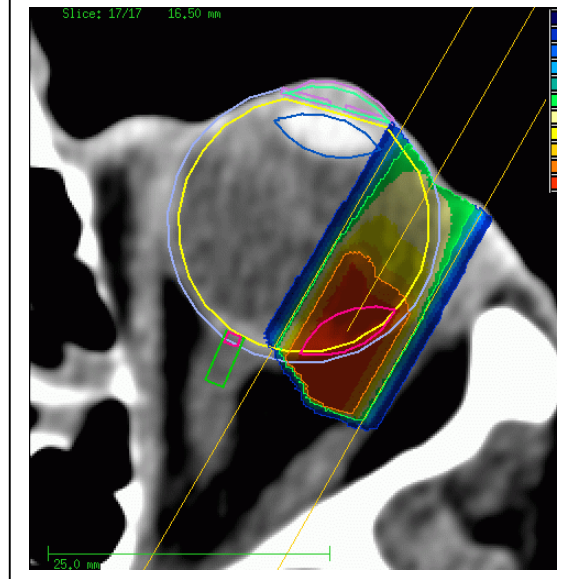
Dabei entsprechen die Farbstufen 10%-Änderungen der Grauwerte.



Therapieplanung

Das im Rahmen einer DFG-geförderten Kollaboration mit dem DKFZ Heidelberg und dem UKBF entwickelte System OCTOPUS, entwickelt zur CT-gestützten Planung von Protonenbestrahlungen des Auges, wurde am HMI installiert. Der Beitrag des ISL in diesem Projekt ist der sogenannte Protonenmodul. Dabei wird die Aufstreuung des Protonenstrahls und die daraus resultierende Dosisverteilung im Gewebe möglichst realistisch berechnet. Abbildung 5 zeigt eine mit dem neuen Planungsprogramm gerechnete Bestrahlung. Die geplante Verifikation des Programms wurde zugunsten einer Optimierung der praktischen Bestrahlungsplanung und eines systematischen Vergleichs mit dem alten Planungsprogramm EYEPLAN zunächst verschoben.

Abb. 5: gerechnetes Dosisprofil mit CT-basierter Planung der Protonenbestrahlung.



In Kollaboration mit dem Institute of Nuclear Physics in Krakau wurde die erste PC-Version des Therapieplanungsprogramms EYEPLAN entwickelt. Dieses Programm fand bei seiner erstmaligen Vorstellung auf dem 33. Meeting der Proton Therapy Co-Operative Group großes Interesse aller Protonentherapie des Auges betreibenden Institutionen.

H. Kluge, J. Heese, H. Fuchs, I. Reng, H. Morgenstern, Ch. Rethfeldt

Technologie mit Ionenstrahlen

Am ISL werden diverse größere und kleinere Technologietransferprojekte betrieben. Es handelt sich dabei außer den Arbeiten zur Analytik im wesentlichen um Bestrahlungen von Materialien und Komponenten. Dazu sind sehr unterschiedliche Ionenmassen, Ionenenergien, totale Strahlungsdosen und Dosisleistungen erforderlich. Die mit diesen Randbedingungen verbundenen Bestrahlungstechniken müssen entwickelt, getestet und standardisiert werden.

Die Entwicklungsarbeiten schließen die Betreuung der Gastgruppen mit ein.

Unter Technologie mit Ionenstrahlen sind die diversen Aktivitäten zusammengefasst, die sich dadurch auszeichnen, dass sie durch spezifische Anwendungen von Ionenstrahltechniken Neuland erschließen oder für den Fortschritt auf dem betreffenden Gebiet notwendig sind. Neben der Augentumorthherapie gehört auch die Produktion von Filterfolien zu den Großprojekten in diesen Bereich, der ein jährlich festgelegtes Kontingent

an Strahlzeit am ISL benötigt. Diese Vorhaben erfahren kontinuierliche technische Verbesserungen.

Ebenfalls zum Gebiet der Materialmodifikation mit Ionenstrahlen gehören die Bestrahlung von Dioden zur Herstellung von Pikosekundenlasern und die Herstellung von Nanostrukturen.

Hinzu kamen im Berichtszeitraum mehrere Anfragen von Forschungsinstituten und Firmen, die Strahlenhärte-tests am ISL durchführen wollten. Zum Teil konnten diese Untersuchungen an bereits bestehenden Strahlplätzen durchgeführt werden, darunter Bestrahlungen von Detektorelektronik für den Einsatz während der Rosetta Mission der ESA. Sie wurden zusammen mit dem DRL-Institut für Weltraumsensorik und Planetenerkundung in Berlin Adlershof bearbeitet.

Für verschiedene andere Anwendungen muss jedoch ein spezieller Targetplatz aufgebaut werden.

A. Denker, H. Homeyer

ISL - Beschleunigerentwicklung und -betrieb

Entwicklung an allen Komponenten der Beschleuniger, den Ionenquellen, dem Strahltransport und den Steuerungs- und Kontrollsystemen zur Erhaltung und Verbesserung der Leistungsfähigkeit der Anlage.

Betrieb und Service der Beschleuniger und der Strahltransporteinrichtungen des ISL.

Entwicklung

Beschleuniger

Nach der erfolgreichen Inbetriebnahme des RFQ Injektors im Vorjahr wurden beim Betrieb aufgetretene Probleme bearbeitet. Bei mehreren Öffnungen des Tanks konnte festgestellt werden, dass die neuen Schleifkontakte nicht mehr abbrechen.

Weiterhin wurden Maßnahmen getroffen, das immer noch nicht zufriedenstellende Endvakuum zu erreichen. Eine neue, moderne Laufzeitelektronik gestattet das Koppeln der sechs Injektionsphasen und damit ein leichteres Einstellen.

Genauere Rechnungen für die 200 kV Plattform ergaben, dass die Ionenquelle nicht die optimale Entfernung zum Analysiermagneten aufweist. Die Fokussierung der Beschleunigungsstrecke variiert in Abhängigkeit von der angelegten Spannung. Beides zusammen bewirkt, dass der Fokus des Ionenstrahls von der Einstellung abhängt. Die Verkleinerung des Abstandes Quelle-Magnet und die Einführung spannungsabhängiger Kurzschlussgeber an der Beschleunigungsstrecke ermöglicht die exakte Festlegung des Fokus in die Schlitze und damit die Reproduzierbarkeit der Einstellungen.

Die genaue Diagnose des Strahlprofils und der Vergleich mit den Rechnungen ergab, dass der Analysiermagnet nach der Ionenquelle so schlechte Fokussiereigenschaften besitzt, dass ein Ersatz nicht zu vermeiden ist.

Zu Jahresbeginn war der Neuaufbau des 2 MV Beschleunigers für RBS Messungen erfolgreich abgeschlossen.

Ionenquellen

Die Weiterentwicklung für die 14,5 GHz Quelle des RFQ ging schrittweise voran. Diverse Umbauten wurden vorgenommen, um die Stabilität und die Leitungsaufnahme zu erhöhen. Im Berichtszeitraum konnte ein sehr stabiler $2,5 \mu\text{A Xe}^{25+}$ Strahl erzielt werden.

Die Entwicklung von Metallionen wurde zurückgestellt. Diese Arbeiten erfordern eine zweite Testquelle, die zu Beginn des neuen Jahres geliefert wird.

Auf dem Ionenquellenteststand wurden umfassende Versuche mit der BECRIS durchgeführt. Parallel dazu wurde die Ansteuerung des Teststandes weiter verbessert. Spezielle Auswerteroutinen erlauben automatische Spektrenaufnahmen mit Peakidentifizierung.

Die 14 GHz Quelle für extrem langsame Ionen wurde mit einem neuen Hexapolfeld versehen und

mit stärkeren Spulen ausgestattet. Ziel dieser Maßnahmen ist die Hoffnung auf höhere Ladungszustände in der neuen Konfiguration.

Für den CN Injektor wurde eine neue Quelle erworben. Die mit einer Hochfrequenz von 10 GHz betriebene Quelle ermöglicht höhere Ladungszustände und damit höhere Energien.

Strahlentwicklung und Strahlführung

Zwei Strahlplätze wurden fertiggestellt und getestet. 20 Strahlen wurden für die Experimentatoren neu entwickelt.

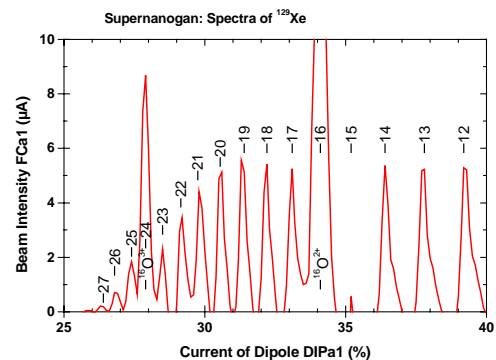


Abb. 1: Spektrum der Supernanogan
In einem ausgesprochen stabilen Betrieb konnten $2 \mu\text{A Xe}^{25+}$ erzielt werden.

Betrieb

Die Einstellprozeduren wurden insgesamt verfeinert, so dass sich die Einstellzeiten sowohl für den CN auch als den RFQ Injektor weiter verbessert haben. Unterstützt durch spezielle Schulungen gestaltet sich der Betrieb des RFQ nahezu routinemäßig.

Da damit nun nicht nur der Parallel-, sondern auch Zweistrahlbetrieb möglich ist, konnte der Zweistrahlplatz erstmals sowohl von der Hoch- als auch von der Niederenergieseite bedient werden.

Durch die Übernahme des RFQ Injektors in den Routinebetrieb wurden im Berichtsjahr über 5000 Stunden Betriebszeit erzielt. Abb. 2 zeigt die Betriebsstatistik: Der Anteil der Ausfälle ist mit 7% sehr niedrig, die Ausfälle verteilen sich recht gleichmäßig auf die verschiedenen Untersysteme der Anlage. Beim RFQ Injektor lag ein Teil der Ausfälle an Quellenproblemen. Der hohe Anteil der Strahltests reflektiert die Schulungen und Entwicklungen neuer Strahlen.

Die Zahl der Einstellungen hat sich von 146 auf 178 erhöht, die durchschnittliche Experimentzeit wurde kürzer.

Erfolgreich gestaltete sich der Betrieb der Therapieeinrichtung: Die 10 geplanten Therapiewochen wurden termingerecht durchgeführt.

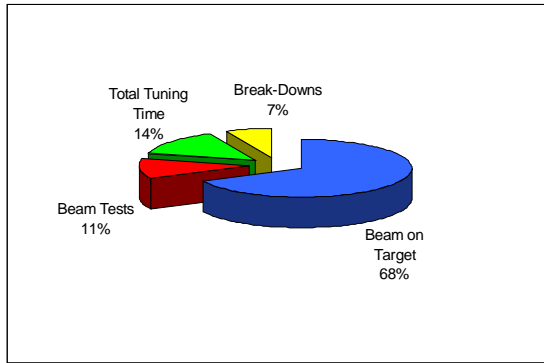


Abb.2: Strahlzeitstatistik 2000

Im Berichtsjahr konnte eine gegenüber dem Mittel der vergangenen Jahre erhöhte Betriebszeit erreicht werden. Die Ausfallzeit blieb mit 7% erfreulich niedrig. Die erhöhten Test und Einstellzeiten sind auf die Schulung zum Routinebetrieb des RF - Injektors zurückzuführen.

Die Niederenergieionenquelle ECRIS4 war im Berichtszeitraum sehr gefragt. Trotz umfangreicher Umbauten wurden 28 Wochen Betrieb durchgeführt.

H. Homeyer, P. Arndt, W. Busse, A. Denker, W. Pelzer, B. Martin†, Ch. Rethfeldt, J. Röhrich

† Herr Dr. Bernd Martin ist im Berichtsjahr verstorben.

