

Schwere Lasten auf den Mikrometer genau positionieren

Hexapod an PETRA III



PETRA III ist eine Röntgenlichtquelle am Forschungszentrum DESY in Hamburg (Abb. 1). Seit 2010 gilt sie als die brillanteste Speicherring-Röntgenstrahlungsquelle der Welt und bietet internationalen Wissenschaftlern exzellente Experimentiermöglichkeiten. Davon profitieren vor allem Forscher, die sehr kleine Proben untersuchen wollen oder stark gebündeltes, sehr kurzwelliges Röntgenlicht für ihre Analysen benötigen.

Die energiereiche Strahlung bis über 100.000 Elektronenvolt mit hoher Leuchtstärke bietet beispielsweise für das weite Feld der Materialforschung vielseitige Möglichkeiten, um Schweißnähte zu prüfen oder Ermüdungserscheinungen von Werkstücken zu untersuchen. Dazu müssen manchmal allerdings recht schwere Lasten auf den Mikrometer genau positioniert werden. „Herzstück“ der Strahlführung P07, die der Materialforschung mit hochenergetischer Röntgenstrahlung dient, ist deshalb ein Schwerlast-Hexapod, der dank seiner Genauigkeit erst In-situ-Messungen von Materialeigenschaften unter realistischen Prozessbedingungen ermöglicht.



Abb. 1 PETRA III am Forschungszentrum DESY bietet Wissenschaftlern aus aller Welt exzellente Experimentiermöglichkeiten. Davon profitieren vor allem Forscher, die sehr kleine Proben untersuchen wollen oder stark gebündeltes, kurzwelliges Röntgenlicht für ihre Analysen benötigen, z.B. in der Materialforschung (Bild: DESY/Reimo Schaaf)

Hexapoden sind parallelkinematische Positioniersysteme (Abb. 2), die es heute in vielen Ausführungen mit Stellwegen bis zu einigen Hundert Millimetern gibt. Sie können Lasten von einigen Kilogramm bis zu einigen Hundert Kilogramm oder sogar mehrere Tonnen auf den Mikrometer genau positionieren, und das in beliebiger Raumorientierung, also unabhängig von der Montage-Richtung.

Die Vorteile gegenüber seriellen, also gestapelten Systemen, sind vor allem die deutlich bessere Bahntrübe, Wiederholgenauigkeit und Ablaufebenheit, die geringere bewegte Masse und damit eine höhere und für alle Bewegungsachsen gleiche Dynamik, kein Kabelmanagement und ein deutlich kompakterer Aufbau.



Abb. 2 Prinzipaufbau: Bei parallelkinematischen Systemen wirken alle Aktoren unmittelbar auf die gleiche Plattform (Foto: PI)

Positioniert wird mit bis zu sechs Freiheitsgraden: drei linearen und drei rotatorischen Bewegungsachsen. Dabei sind abhängig von der Geometrie des Hexapoden Bewegungen von einigen Grad bis zu 60 Grad und bei der Linearbewegung von einigen Millimetern bis zu mehreren Zentimetern möglich.

Die Reproduzierbarkeit erreicht ebenso wie die kleinste Schrittweite Werte bis unter einem Mikrometer. Durch die geringe Masse der bewegten Plattform sind bei den Hexapoden die Einschwingzeiten beim Positionieren deutlich kürzer als bei konventionellen, gestapelten Mehrachssystemen. Diese Eigenschaften lassen sich in den unterschiedlichsten Anwendungen nutzen. Die Palette reicht von Maschinenbau und Robotik bis zu Medizintechnik und eben auch der Materialforschung mithilfe der PETRA-III-Röntgenstrahlung, die stärker und gebündelter ist als bei allen anderen Speicherringen der Welt. Mit 14 Strahlführungen und 30 Messstationen bietet die Anlage damit optimale Forschungsmöglichkeiten.

Kurzwellige Röntgenstrahlung für die Materialforschung

Die erzeugten Röntgenstrahlen sind bis zu 5000-mal feiner als ein menschliches Haar, womit sich extrem kleine Proben untersuchen lassen, z.B. winzige Kristalle aus Proteinen oder Nanokristalle für Speichermedien der Zukunft. Außerdem stellt PETRA III aber auch sehr „harte“, also kurzwellige Röntgenstrahlung zur Verfügung, die tief in die Materie eindringen und auch größere Materialstärken durchdringen kann.

Damit lassen sich beispielsweise Schweißnähte prüfen, Ermüdungserscheinungen an Werkstücken messen, um Aufschluss über zu erwartende Standzeiten und Lebensdauer zu erhalten, oder neue Metalllegierungen analysieren. Dabei können Effekte nachgewiesen werden bis hinunter zu Domänen- und Kristallstrukturen.

Die Möglichkeiten, die sich daraus für die Materialforschung ergeben, macht sich das Helmholtz-Zentrum Geesthacht (HZG) zunutze, zum Beispiel für In-situ-Messungen von Materialeigenschaften, die während Umformprozessen auftreten, also beim Schweißen, Pressen, Walzen oder Stanzen. Die mechanische Belastung führt zu Zug- und Dehnspannungen innerhalb des Materials. Die Untersuchung mithilfe des Röntgenstrahls zeigt dann den zeitlichen Verlauf der Effekte innerhalb des Materials auf kristalliner Ebene in mikrometergroßen Domänenbereichen (Abb. 3 und Abb. 4).

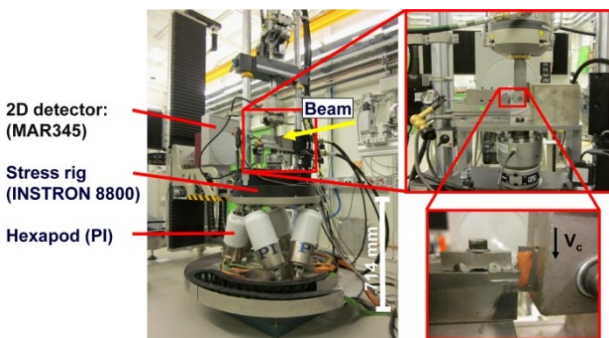


Abb. 3 Die Änderungen der Mikrostruktur in C45E Stahl bei der Spanbildung werden untersucht. Hierzu wird eine Schneidkante gegen das Werkstück mit einer 100-kN-Pressen (Instron 8800) gedrückt, die auf dem Hexapod montiert ist (Bild: PI/HZG)

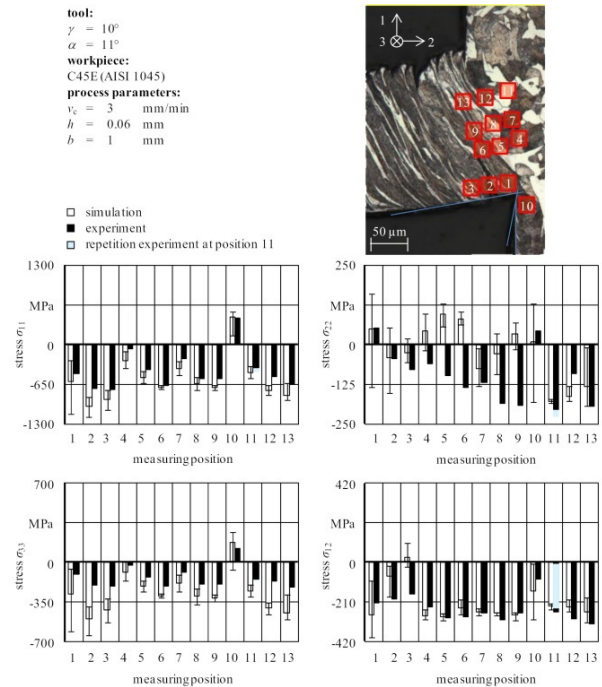


Abb. 4 Die Spannungswerte sind an entsprechender Stelle des Spans mit den verwendeten Prozessparametern im Vergleich gemessen und simuliert aufgetragen. Details der Mikrostruktur-Charakterisierung selbst, sowie der notwendigen Modellierungsverbesserungen können den Originalveröffentlichungen entnommen werden: [1] K. Brömmelhoff et al., *Space resolved microstructural characteristics in the chip formation zone of orthogonal cutted C45E steel samples characterized by diffraction experiments*, Journal of Materials Processing Technology 213 (2013) 2211-2216 und [2] E. Uhlmann et al., *An extended shear angle model derived from in situ strain measurements during orthogonal cutting*, Production Engineering: Research and Development 7 (2013) 401-408

Kräftiges Positioniersystem für die Experimentierkammer

„Herzstück“ der entsprechenden Experimentierkammer ist ein Hexapod, der von der Karlsruher Firma Physik Instrumente (PI) entwickelt wurde (Abb. 5).



Abb. 5 Das parallelkinematische Sondermodell, der M-850K, bietet mikrometeregenaue Positionierung für Lasten bis zu einer Tonne in jeder Orientierung (Foto: PI)

Dr. Norbert Schell, (Abb. 6) verantwortlicher Wissenschaftler der HEMS-Beamline, erklärt die Zusammenhänge: „Für eine immer größer werdende Reihe von In-situ-Untersuchungen realer, d. h. tatsächlich in der Industrie so ablaufender Prozesse (aber natürlich nicht nur dort) – beim Schneiden von Werkstücken, Beschichten von Oberflächen zur Härtung oder Verbesserung tribologischer Eigenschaften, Verformen, Schweißen, Wärmebehandeln, auch Kombinationen dieser Techniken – ermöglicht erst unser hochsteifer Hexapod mit seiner enormen Tragfähigkeit und mikrometeregenauen Positionierung die Durchführung und damit die wissenschaftliche Durchleuchtung der dabei auftretenden Strukturänderungen auf atomarer Ebene.

Das ist hochinteressant und auch wichtig für ein Verständnis der ablaufenden Prozesse, die letztendlich für maßgeschneiderte Materialien optimiert werden.“



Abb. 6 Dr. Norbert Schell, verantwortlicher Wissenschaftler der HEMS-Beamline: „Nur die In-situ-Untersuchungen gestatten die Entdeckung „transienter“ Phasen, d. h. von Zuständen, die im Prozess nur vorübergehend auftreten. Eine bloße Untersuchung der Ausgangs- und Endprodukte lässt der Phantasie einfach zu viel Freiheit zum wahren Verständnis“

Das parallelkinematische Sondermodell, der M-850K (Abb. 7), bietet mikrometeregenaue Positionierung für Lasten bis zu einer Tonne in jeder Orientierung. Er ist ca. 700 mm hoch und hat einen Durchmesser von 800 mm (obere Plattform, mit großer Apertur) bzw. 900 mm (unten). Die untere Plattform ist auf einem 360°-Drehtisch montiert; die Verkabelung wurde schleppkettentauglich ausgelegt.



Abb. 7 Hexapod in der Experimentierhütte EH3 der Strahlführung P07 an PETRA III: Durch seine große Tragfähigkeit kann er den vollständigen Messaufbau tragen mitsamt der Vorrichtung zum Aufbringen mechanischen oder prozesstechnischen Beanspruchung – im Bild eine Kammer zum Laserschweißen von Titanaluminiden (Bild: PI/Helmholtz-Zentrum Geestach)

Durch seine große Tragfähigkeit von bis zu einer Tonne kann der Hexapod den vollständigen Messaufbau tragen mitsamt der Vorrichtung zum Aufbringen der mechanischen Beanspruchung. Dabei positioniert der Hexapod auch große Massen über Strecken von 400 mm mit einer Genauigkeit von $\pm 1 \mu\text{m}$ und Drehbewegungen von $\pm 20^\circ$ bei einer Auflösung bis $0,5 \mu\text{rad}$.

In der Experimentierkammer lassen sich so ganze Motorblöcke, Turbinenteile, Sinteröfen und Kryokammern sowie Schweißvorrichtungen oder andere Bearbeitungsmaschinen präzise für die geplanten Untersuchungen ausrichten und während der Analyse entsprechend verfahren. Trotz der hohen Kräfte wird die erreichte Position stabil gehalten; die in den Hexapod-Beinen integrierten bürstenlosen Gleichstrommotoren sind mit Bremsen ausgestattet.

Komfortable Ansteuerung

Für die entsprechende Ansteuerung des Hexapod-Systems kommuniziert der Hexapod-Controller mit der übergeordneten Steuerung der Messeinrichtung. Die Positionen werden in kartesischen Koordinaten vorgegeben; alle Transformationen für die Einzelantriebe übernimmt der Controller. Per Softwarebefehl ist die Festlegung eines praktisch beliebigen Punktes im Raum als Rotationszentrum möglich. Dieser frei definierbare Drehpunkt bleibt unabhängig von der Bewegung erhalten, die Bewegung der Hexapod-Plattform lässt sich so präzise auf die jeweilige Aufgabenstellung abstimmen.

Ähnliches gilt auch für viele andere Anwendungsbereiche. Hexapoden gibt es schließlich in unterschiedlichen Varianten und mit verschiedenen Antriebskonzepten. Sie werden je nach Anwendungsanforderungen von hochpräzisen Antriebsspindeln und exakt ansteuerbaren DC-Motoren oder direkt von Linearmotoren, z.B. auf Basis piezokeramischer Aktoren, angetrieben. Mittlerweile haben sie sich bereits in vielerlei Branchen bewährt, angefangen vom Maschinenbau und der Werkzeugbearbeitung bis hin zu Halbleiterfertigung, Astronomie, Biotechnologie oder Life Sciences.

Über P07 / HEMS

P07 oder HEMS (für High Energy Materials Science Beamline) gehört zu den ersten operationellen Strahlführungen am Speicherring PETRA III. Seit 2010 erlaubt P07 Diffraktions- und bildgebende Experimente wie Tomographie im hochenergetischen Röntgenbereich von 30 bis 200 keV. Inhaus- und Entwicklungsaktivitäten teilen sich DESY und das Helmholtz-Zentrum Geesthacht (HZG). Letzteres hat sich dabei auf ingenieurwissenschaftliche Materialforschungsthemen spezialisiert mit zwei Experimentierplätzen (EH3 und EH4), während DESY einen Experimentierplatz betreut (EH2), der „allgemeineren“ Hochenergie-Streuxperimenten dient.

Die gesamten wissenschaftlichen Arbeiten umfassen Grundlagenforschung im Bereich der Metallurgie, Physik, Chemie, Biologie, die zunehmend verschmelzen. Bisherige Forschungen umfassten dabei die Wechselwirkung zwischen makroskopischen und mikrostrukturellen Eigenschaften polykristalliner Materialien, Korn-Korn-Wechselwirkungen, die Entwicklung neuer und „intelligenter“ Materialien oder Prozesstechniken und In-situ-Katalyse. Die experimentelle Ausstattung erlaubt es, alle Arten von Materialien mit hoher Präzision, hoher Stabilität und niedrigem Untergrund zu untersuchen, egal ob Oberflächen, vergrabene Schichten, Einkristalle, Pulver oder amorphe Festkörper und auch Flüssigkeiten.

Die angewandte Forschung zur Optimierung von Fabrikations- und Umformprozessen an P07 profitiert insbesondere vom hohen Photonenfluss in Kombination mit schnellen 2D-Detektoren, die komplexe und dynamische In-situ-Studien erlauben bei mikrostrukturellen Transformationen während beispielsweise des Schweißens, Schneidens oder thermischen Behandelns. Die Infrastruktur gestattet den Aufbau großer und schwerer Probenumgebungen sowie Prozesskammern auch externer Nutzer. Hier kommt vor allem der Schwerlast-Hexapod zum Einsatz.

Über das Helmholtz-Zentrum Geesthacht

Das Helmholtz-Zentrum Geesthacht – Zentrum für Material- und Küstenforschung GmbH – gehört zur Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren, der größten deutschen Wissenschaftsorganisation, und betreut mit die Entwicklung und dem Betrieb deutscher und internationaler Großforschungseinrichtungen. Das interdisziplinäre Forschungszentrum wurde 1956 gegründet. Bis Ende Oktober 2010 firmierte es unter GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH.

Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Helmholtz-Zentrum Geesthacht sind in den Forschungsbereichen der Helmholtz-Gemeinschaft in unterschiedlichen Programmen organisiert, eines davon ist die Werkstoffforschung. Mit Synchrotronstrahlung und Neutronen gelingt es den Wissenschaftlern, Materialien, Werkstoffe und biologische Systeme zerstörungsfrei zu durchleuchten und in hoher Qualität dreidimensional darzustellen. Dazu betreibt das Helmholtz-Zentrum Geesthacht Versuchseinrichtungen sowohl bei DESY in Hamburg am Speicherring PETRA-III, als auch am Forschungsreaktor FRM-II in Garching bei München.

Autoren



Dipl.-Phys. Birgit Schulze, Markt & Produkte bei Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG

Ellen-Christine Reiff, M.A, Redaktionsbüro Stutensee

Über PI

In den letzten vier Jahrzehnten hat sich Physik Instrumente (PI) mit Stammsitz in Karlsruhe zum führenden Hersteller von Positioniersystemen mit Genauigkeiten im Nanometerbereich entwickelt. Das privat geführte Unternehmen ist mit vier Sitzen in Deutschland und fünfzehn ausländischen Vertriebs- und Serviceniederlassungen international vertreten.

Über 850 hochqualifizierte Mitarbeiter rund um die Welt versetzen die PI Gruppe in die Lage, fast jede Anforderung aus dem Bereich innovativer Präzisionspositioniertechnik zu erfüllen. Alle Schlüsseltechnologien werden im eigenen Haus entwickelt. Dadurch kann jede Phase vom Design bis hin zur Auslieferung kontrolliert werden: die Präzisionsmechanik und Elektronik ebenso wie die Positionssensorik.

Die dafür benötigten piezokeramischen Elemente werden bei der Tochterfirma PI Ceramic in Lederhose gefertigt, einem der weltweit führenden Unternehmen auf dem Gebiet aktorischer und sensorischer Piezoprodukte.

Die PI miCos GmbH in Eschbach bei Freiburg ist spezialisiert auf flexible Positioniersysteme für Ultrahochvakuum-Anwendungen sowie parallelkinematische Positioniersysteme mit sechs Freiheitsgraden und Sonderanfertigungen.