



Wir feiern Jubiläum!



Nach zwanzig Jahren kann man schon mal einen Blick zurück wagen, und das wollen wir hier auch gerne tun - aber wir wären nicht das PZH, wenn wir nicht gleichzeitig auch schauen würden, wie es weiter geht. Darum laden wir Sie an dieser Stelle herzlich ein, auf den Sonderforschungsbereich „Gentelligente Bauteile“ zurückzublicken, der bis in die Gegenwart und darüber hinaus wirkt. Oder auf zwanzig Jahre Automatisierung, die wir aus verschiedensten Blickwinkeln, auch hinsichtlich zukünftiger Entwicklungen betrachten wollen. Denn wie es schon zum Zehnjährigen hieß: Auf in die Zukunft!



Die Anfänge des PZH

Bereits Ende der 80er Jahre planten sechs Institute der Produktionstechnik unter Federführung von Professor Hans-Peter Wiendahl vom Institut für Fabrikanlagen und Logistik (IFA) und Professor Hans Kurt Tönshoff vom Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen (IFW) die Zusammenführung der produktionstechnischen Institute unter einem Dach. Die weiteren Beteiligten waren das Institut für Umformtechnik (IFUM), das Institut für Mikroproduktionstechnik (IMPT), Institut für Transport- und Automatisierungstechnik (ITA) und das Institut für Werkstoffkunde (IW).

Von der Planung über das Konzept bis zum ersten Spatenstich im September 2002 mussten die Initiatoren dabei einige Hürden überwinden. Mit Unterstützung des damaligen Präsidenten Professor Ludwig Schätzl und des Kanzlers Jan Gehlsen konnte das niedersächsische Ministerium für Wissenschaft und Kultur vom Projekt und der Finanzierung des Vorhabens überzeugt werden.

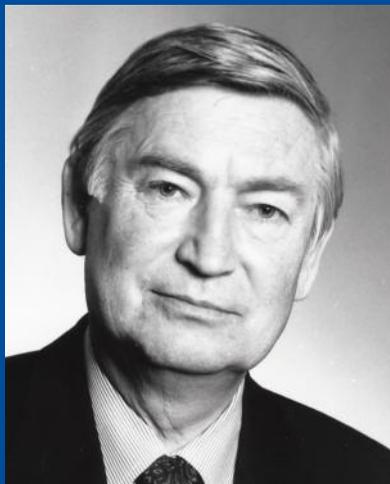
Das Planungsteam PZH führte den Bau in Eigenregie durch und dies mit erheblichem Erfolg: Die Bauzeit für das Gesamtprojekt wurde eingehalten und die Kosten um 1,5 Prozent unterschritten!



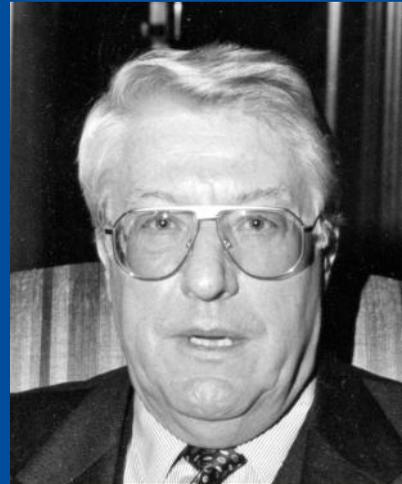
Professor Hans-Peter Wiendahl (†),
Institutsleiter am IFA bis 2003. Foto: IFA



Professor Hans Kurt Tönshoff Institutsleiter am IFW bis 2001. Foto: privat



Professor Eckard Doege (†), Institutsleiter am IFUM bis 2003. Foto: IFUM



Professor Heinz Haferkamp (†), Institutsleiter am IW bis 2001. Foto: IW



Am 13. September 2002 erfolgt der erste Spatenstich: Prof. Friedrich-Wilhelm Bach, IW; Prof. Günter Merker, Dekan der Fakultät für Maschinenbau; Bürgermeister Wolfgang Galler; Dr. Henning Ahlers, Geschäftsführer der PZH GmbH; Regionspräsident Dr. Michael Arndt; Wissenschaftsminister Thomas Oppermann; Architekt Prof. Gunter Henn, Universitätspräsident Prof. Ludwig Schätzl und Prof. Heinz Haferkamp (v. l.). Foto: Daniel Junker, Pressestelle LUH

Die Institute und das Leitungsteam



Das PZH heute (Blick von Osten): der Forschungsbau „SCALE“ steht bereits als Erweiterung des PZH und wird 2025 offiziell eingeweiht, der Campus Maschinenbau wurde 2019 eröffnet, dahinter ist der Bau eines Technologieparks als Ort für Gründungsaktivitäten, Start-ups und die Kooperation von Unternehmen und Forschungseinrichtungen bereits beschlossen. Foto: Eckhard Stasch, Fakultät für Maschinenbau



„Gentelligente Bauteile“: Initialzündung für das PZH und Wegbereiter der Industrie 4.0

Ein Interview mit dem Sprecher des Sonderforschungsbereichs „Gentelligente Bauteile“,
Professor Berend Denkena, über die Rolle des Projekts für das PZH
und die produktionstechnische Industrie

Herr Professor Denkena, woher kam der Anstoß, einen gemeinsamen SFB zu konzipieren und zu beantragen?

Als ich Anfang 2002 meine Aufgabe am IFW übernahm, stand der Bau des PZH bevor und der Einzug dort war für 2004 vorgesehen. Wir – das heißt die Leiter der damals sechs produktionstechnischen Institute – fanden es wünschenswert, dass ein gemeinsamer Sonderforschungsbereich unseren Start hier unter dem neuen Dach begleitet. Er sollte eine Initialzündung sein, mit der wir auch nach außen ein Zeichen setzen wollten, dass wir hier stärker zusammenwachsen. Als mir die Leitung des Projekts angetragen wurde, habe sie gern übernommen.

Wie sind Sie und Ihre Kollegen auf das Thema gekommen?

Wir haben uns an vielen Sonntagsvormittagen getroffen, intensiv diskutiert, uns die Ideen um die Ohren gehauen, bis wir den Kerngedanken hatten: Die Informationen, die zu einem Bauteil gehören – zum Material, zur Fertigungsweise, zur Belastbarkeit, zur Verschleißentwicklung und so weiter –, diese Informationen müssten in das Bauteil selbst eingeschrieben werden, und zwar von der Entstehung des Teils an über alle Lebensphasen bis zum Re-

cycling. Solche Informationen, so unsere Vorstellung, müssten sich für unterschiedlichste Zwecke nutzen lassen und sie müssten vererbbar sein, also die Basis für die Entwicklung neuer Bauteilgenerationen liefern. Das war der

es ja um Bauteilgenerationen geht, übertragen lässt. Das betraf zum einen die technische Vererbung von Informationen zu Eigenschaften, die dem Bauteil von vornherein inhärent sind. Es ging aber auch darum – und das ist die



Bereits 2005, ein Jahr, nachdem die produktionstechnischen Institute das neu errichtete PZH bezogen hatten, konnten sie einen großen gemeinsamen Erfolg feiern: die Bewilligung des Sonderforschungsbereichs „Gentelligente Bauteile im Lebenszyklus – Nutzung vererbbarer, bauteilinhärenter Informationen in der Produktionstechnik“. Die Federführung für den SFB, der bis 2017 lief, lag beim Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen (IFW). Die interdisziplinäre Leitidee des Projekts: Bauteile mit den zuge-

hörigen Informationen so zu verknüpfen, dass diese Daten von den Teilen selbst gespeichert, kommuniziert, ausgewertet und „vererbt“ werden. Damit wurden entscheidende Schritte hin zu autonomen Produktionsabläufen und sich selbst regulierenden technischen Systemen gemacht. Globale Trends der produktionstechnischen Digitalisierung, Vernetzung und Automatisierung – Stichwort „Industrie 4.0“ – knüpfen an Ergebnisse an, die in den zwölf Jahren dieses Sonderforschungsbereichs erzielt wurden.

Analogie zur Epigenetik –, dass das Teil Informationen über die Veränderungen, denen es über seinen Lebenszyklus hinweg ausgesetzt ist, aufnehmen, speichern und weitergeben soll, also beispielsweise über die Kräfte, denen es ausgesetzt ist. Diese Ansätze haben wir in dem Begriff „Gentelligente Bauteile“ zusammengefasst.

Wenn man die Genetik zum Vorbild nimmt, dann geht es ja auch um die Kombination

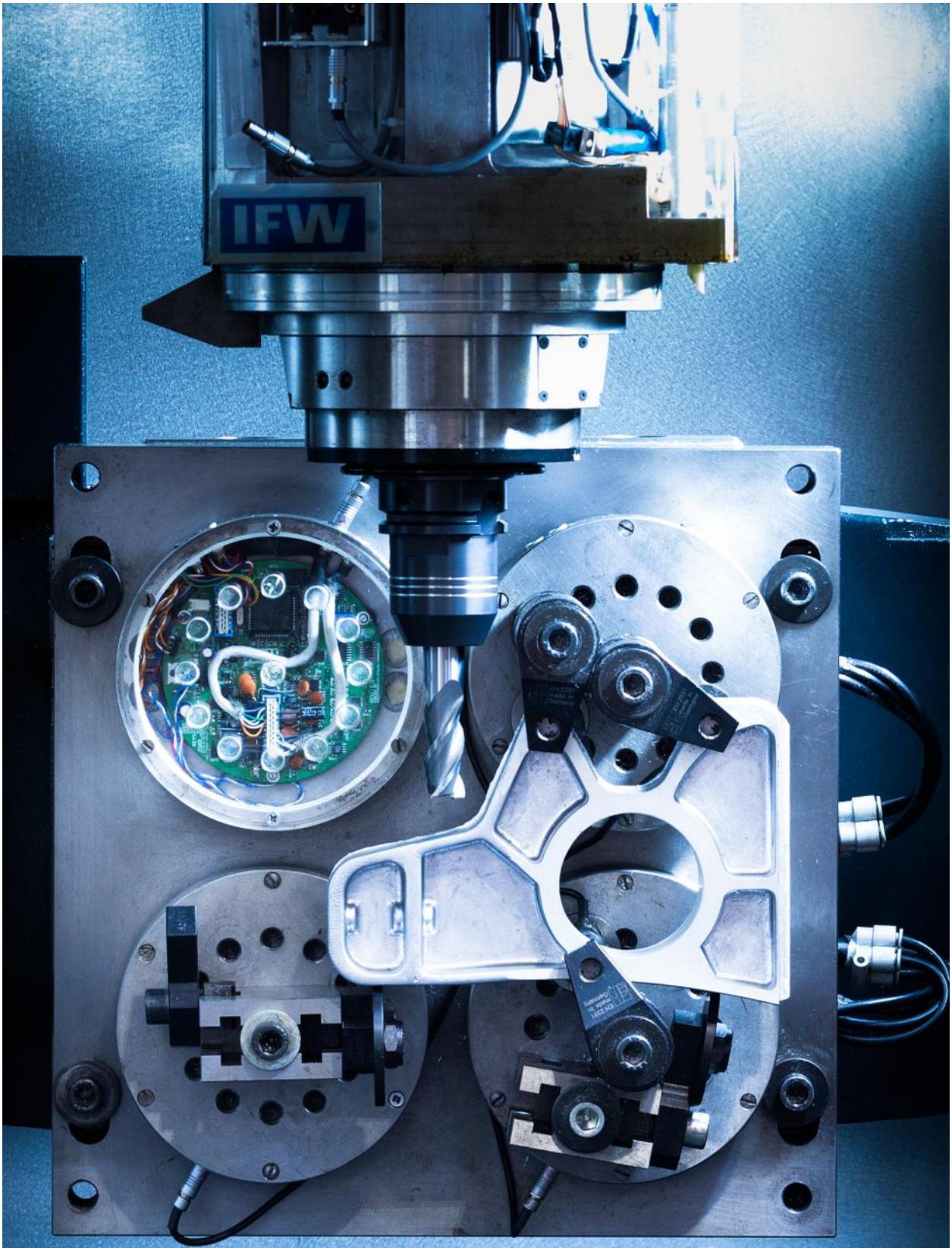
gedankliche Durchbruch und die Begeisterung über diese gemeinsame Vision hat uns alle beflügelt.

Welche Rolle spielte der Gedanke der Vererbung, auf die ja auch der Begriff ‚gentelligent‘ abzielt?

Wir haben uns eingehend mit Genetik und Epigenetik beschäftigt, also mit der Frage, wie genau die Vererbung bei Lebewesen funktioniert. Wie wird das, was im Erbgut von vornherein angelegt ist, aber auch das, was durch die Umwelt geformt ist, an die folgende Generation weitergegeben? Und der nächste Schritt war, zu überlegen, wie sich diese Prinzipien auf unseren Bereich, in dem

von einfachen Bausteinen in ganz unterschiedlichen Kombinationen, die dann die DNS bilden. Haben Sie sich auch davon inspirieren lassen?

Ja, wir haben uns auch angeschaut, wie wir unsere Daten, also diese technische „DNS“ strukturieren können. Wir haben dann unterschiedliche Wege gefunden, in die Bauteiloberflächen Informationen einzubringen, zum Beispiel indem wir in Aluminium oder Magnesium magnetische Partikel eingelagert haben, die man dann ähnlich wie ein Tonband beschreiben kann. Ein anderes Thema waren Sensortechnologien, um Alterungsprozesse zu registrieren, von denen sich dann auf die Beanspruchung



Die „fühlende Maschine“, die mittels Sensortechnologien ihre Belastungen selbst messen kann, um auf mögliche Abweichungen durch Korrektur ihres ursprünglich programmierten Weges zu reagieren – ein Resultat des Sonderforschungsbereichs 653. Foto: Nico Niemeyer

von Bauteilen im zeitlichen Verlauf schließen lässt.

Wo liegen die praktischen Anwendungsmöglichkeiten dieses Konzepts?

Wenn man mal den Aspekt der Vererbung von Informationen herausgreift, dann kann man dieses Prinzip zum Beispiel nutzen, um besser angepasste Bauteilgenerationen zu entwickeln.

Viele Komponenten werden ja mit sehr hohen Sicherheitsfaktoren ausgelegt, weil man nicht genau weiß, welche Belastungen sie wirklich aushalten müssen.

Wenn Fahrzeuge permanent auf Buckelpisten fahren, sind ihre Komponenten ja ganz anderen Be-

lastungen ausgesetzt, als wenn sie meistens auf glatten Fahrbahnen unterwegs sind. Wenn man die entsprechenden Informationen nun am Ende der Lebensdauer aus den Bauteilen herauslesen und in die Bauteilentwicklung einspeisen kann, lässt sich eine neue Generation von Bauteilen viel genauer auf die wirklichen Anforderungen hin auslegen.

Sie sind zwar alle Maschinenbauer, aber doch mit sehr unterschiedlichen fachlichen Ausrichtungen. Wie lief die Zusammenarbeit im SFB konkret ab?

Als die Grundidee stand, hat jeder aus seinem Fachgebiet heraus passende Ide-

en beigesteuert. Das Thema des magnetisch beschreibbaren Magnesiums zum Beispiel kam aus der Werkstoffkunde und in der Mikrotechnologie hat man überlegt, wie man für solche magnetischen Oberflächen auch Schreib-/Lese-

zu visionär, um nicht zu sagen „abgefahren“.

Aber der Sinn von Grundlagenforschung besteht ja gerade darin, bislang unbeschränkte Wege einzuschlagen und

neue Horizonte zu eröffnen. Und ich denke, die Entwicklungen der letzten Jahre zeigen, dass uns das gelungen ist. Viele Ergebnisse des SFB haben unter dem Schlagwort „Industrie 4.0“ breite Anwendung in den fertigungstechnischen Unternehmen gefunden – dazu haben auch die Transferbereiche beigetragen, die dem SFB angegliedert waren.

Sie waren als Sprecher der „Frontmann“ des SFB. Wenn Sie zurückblicken: Was

haben diese zwölf Jahre für Sie persönlich bedeutet?

Ich habe es als sehr bereichernd erlebt, Teil eines solchen Projekts zu sein, in dem Dinge in Gang gesetzt wurden, die faszinierende Möglichkeiten eröffnen und die mithelfen, unsere Zukunft positiv zu gestalten. Und wenn ich auf den Nachwuchsmangel blicke, unter dem wir zur Zeit leiden, dann sehe ich, wie dringend nötig es ist, dass wir den jungen Leuten vermitteln, wie viel Spaß die Produktionstechnik machen kann und welches Potential in ihr steckt, die Welt von morgen in eine gute Richtung zu entwickeln.

„Ich habe es als sehr bereichernd erlebt, Teil eines solchen Projekts zu sein, in dem Dinge in Gang gesetzt wurden, die faszinierende Möglichkeiten eröffnen.“

Professor Berend Denkena

köpfe bauen kann. Wir am IFW haben Sensortechnologien entwickelt, um Werkzeugmaschinen die Fähigkeit des „Fühlens“ zu verleihen. Damit ist gemeint, dass eine Maschine ihre Belastungen selbst messen kann, um auf mögliche Abweichungen durch Korrektur ihres ursprünglich programmierten Weges zu reagieren. Auf diese Weise haben alle siebzehn Teilprojekte ihre spezifischen Facetten zum übergeordneten Thema beigesteuert.

Wie hat die Industrie auf Ihre Forschungen reagiert?

Manchen Industrievertretern erschien, was wir machten, zunächst ein bisschen

Edelsteine für Spitzentechnik

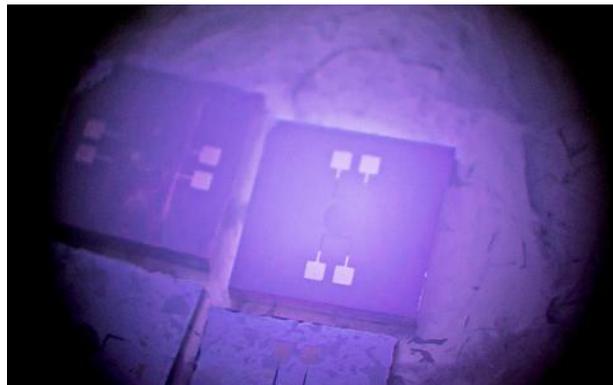
Diamanten sind nicht nur schön und hart. Sie sind auch das Material für hochinnovative Technologien von der Sensorik bis zu Supercomputern.

Am Institut für Mikroproduktionstechnik (IMPT) wird erforscht, welches Potential in ihnen steckt.

„Diamonds are a girl's best friend“, sang einst Marylin Monroe. Doch der Edelstein ist auch in Wissenschaft und Technik ein höchst willkommener Freund. Dass er mehr als funkeln und schmücken kann, nämlich auch schneiden, schleifen und bohren, ist zwar schon lange bekannt. Doch inzwischen zeigt sich: Der Diamant ist auch ein hervorragendes Material für Spitzentechnologien vom Quantencomputing über die optische Signalverarbeitung bis zur Biomedizintechnik.

„Unser Ziel ist es, für den Diamanten als technisches Material eine breitere Einsatzmöglichkeit zu schaffen“, sagt Folke Dencker, Oberingenieur am Institut für Mikroproduktionstechnik (IMPT). Und er nennt auch die Gründe: „Der Diamant besitzt neben der Härte und Transparenz noch andere einzigartige Materialeigenschaften, in erster Linie Funktionalisierbarkeit mit Defekten, chemische Stabilität, thermische Leitfähigkeit und Biokompatibilität. Das alles macht ihn zu einem zukunftssträchtigen Funktionsmaterial etwa für das Quantencomputing, für die optische Signalübertragung oder für hochsensitive Sensoren.“

Folke Dencker ist Projektkoordinator in der Interdisziplinären Allianz HARD (Hannover Alliance for Research on Diamond), an der neben der Leibniz Universität Hannover die Medizinische Hochschule Hannover und die Technische Universität Braunschweig beteiligt sind. In dem Forschungsprojekt arbeiten Technik- und Naturwissenschaftler eng zusammen. Dies zeigt sich auch durch eine Beteiligung des Exzellenzcluster PhoenixD bei der Realisierung der Infrastrukturmaßnahme. Ihr gemeinsames Ziel: eine Brücke von der chemischen und physi-



kalischen Grundlagenforschung in die industrielle Anwendung zu schlagen.

Um das zu erreichen, wurde am IMPT eine Produktionslinie eingerichtet, mit der sich Diamantschichten bis zum höchsten Reinheitsgrad im Mikro- und Nanomaßstab herstellen lassen. Die kleinen Abmessungen sind eine Voraussetzung dafür, Diamanten in Biosensoren, transparenten Elektroden, optischen Wellenleitern, Spektrometern, biomedizinischen Implantaten oder als Qubits im Quantencomputing einzusetzen. Die Winzigkeit hat aber noch einen weiteren nützlichen Effekt: Sie bewirkt, dass der eigentlich harte und spröde Diamant elastisch wird. So lassen sich beispielsweise sehr dünne Sensornadeln oder Folien für biomedizinische Implantate produzieren.

Die Anlagen innerhalb der Prozesskette im IMPT erlauben – je nach beabsichtigter Funktion – unterschiedliche Arten der Beschichtung, der Laserbearbeitung und der Strukturierung mittels Plasmaätzung. Eine weitere wichtige Art der Bearbeitung ist die Dotierung, also die gezielte Erzeugung von Fehlstellen im Kristallgitter der Diamanten. Dafür werden Fremdatome, etwa Stickstoff oder Silizium, eingebracht, die sich mit einer benachbarten Leerstelle im Gitter verbinden. Diese Fehlstellen funktionalisieren den Diamanten lokal mit vergleichsweise stabilen Festkörperspinzentren. Dadurch wird es zu einem idealen Material für quantenoptische Anwendungen. Eine von ihnen ist das Quantencomputing.

Ähnlich wie klassische Bauelemente aus dem Halbleitermaterial Silizium zu einem elektronischen integrierten Schaltkreis verschaltet werden, lassen sich entsprechend dotierte Fehlstellen



Foto linke Seite oben: Dr. Evan Thomas begutachtet im Reinraum des IMPT das Wachstum der Diamanten. Links unten: Das Substrat mit der wachsenden Diamantschicht. Oben: mikroskopische Untersuchung der gezüchteten Diamantstruktur. Fotos: Helge Bauer

im Diamanten zu sogenannten Spin-Registern verschalten. Sie werden durch Bestrahlung gezielt angeregt, so dass die Spins der ihnen benachbarten Kohlenstoffatome als Quantenbits (Qubits) dienen können. Im Gegensatz zu den Bits konventioneller Computer, die nur zwei mögliche Zustände (Eins und Null) annehmen können, befindet sich das Qubit eines Quantencomputers für eine bestimmte Zeitspanne in einem Überlagerungszustand, der Eins, Null und mehrere Kombinationen gleichzeitig umfasst. Auf diese Weise kann ein Quantencomputer viele Rechenoperationen parallel ausführen, die ein klassischer Computer nacheinander abarbeiten muss. Dadurch sind Berechnungen möglich – von der Material- und Medikamentenentwicklung bis zu Simulationen in den Umwelt- und Biowissenschaften – an deren Komplexität konventionelle Rechner scheitern.

Die Entwicklung von Quantencomputern auf Diamantbasis steht noch am Anfang. Heutige Quantencomputer arbeiten meist noch mit Siliziumtransistoren. Allerdings müssen diese auf rund 200 Grad minus heruntergekühlt werden. Nur so lassen sich thermische Schwingungen verhindern, die die sensiblen Überlagerungszustände der Qubits stören würden. Bei Diamanten sind solche Kältegrade nicht nötig, denn sie verfügen über eine große thermische „Ruhe“: Regt man die eingelagerten Fremdatome in ihrem Kristallgitter durch Bestrahlung an, reagieren sie darauf mit einer Änderung ihres Quantenzustands und kurz darauf mit Abgabe eines Photons. Anders als beim Silizium und den meisten anderen Materialien löst die Bestrahlung aber kaum Schwingungen in der Nachbarschaft des angeregten Atoms aus. Der Dia-

mant verhält sich damit so wie ein ultrakalter Supraleiter, aber bei Raumtemperatur. Diamantbasierte Quantencomputer der Zukunft werden deshalb bedeutend leichter und mobiler sein als die heute gebräuchlichen supraleitenden Rechner. Sie lassen sich dadurch beispielsweise auch in Flugzeugen oder Satelliten einsetzen.

Neben dem Quantencomputing umfasst das HARD-Projekt noch eine Reihe anderer Forschungsfelder, in denen der Diamant seine Vorteile ausspielt: Das Spektrum reicht von hochsensitiven Quantensensoren und Rastersondenmikroskopspitzen über leistungsstarke optische Wellenleiter bis hin zu biomedizinischen Implantaten, die als Hirnschrittmacher oder zur Verbesserung der Hörfähigkeit dienen. Auch in der Zerspangentechnik, einem klassischen Bereich der industriellen Anwendung von Diamanten, zeigt sich, dass es noch ungenutztes Potential gibt: Hier wird daran gearbeitet, die diamantene Schneidkante gezielt mit Mikro- und Nanostrukturen zu versehen, um so Bauteile mit bestimmten Eigenschaften produzieren zu können. Ein Beispiel ist die Bearbeitung von Turbinenschaufeln, deren Oberflächen so strukturiert sind, dass Flüssigkeiten oder Luft fast ohne Reibungsverluste abgleiten.

„Aus produktionstechnischer Sicht besteht die Herausforderung darin, Diamant als Material vom Laborexperiment in ein vorindustrielles Stadium zu überführen“, sagt Folke Dencker. „Dafür wollen wir Diamanten so produzieren, strukturieren und integrieren, wie es je nach Funktion nötig ist. Indem wir diese Technologiehürde hier im universitären Umfeld überwinden, öffnen wir den Weg für die industrielle Anwendung.“

Vom Massenmarkt zur Stückzahl eins? Die vielen Facetten der Automatisierung

Automatisierung gehört zu den Megatrends, die die Entwicklung von Industrie und Technik seit langem begleiten. Und sie ist ein Leitthema, das viele Forschungsarbeiten im PZH seit seinem Bestehen bestimmt. Wissenschaftler aus drei PZH-Instituten sprechen im Interview über die Rolle der Automatisierung in der Produktion und der Forschung.

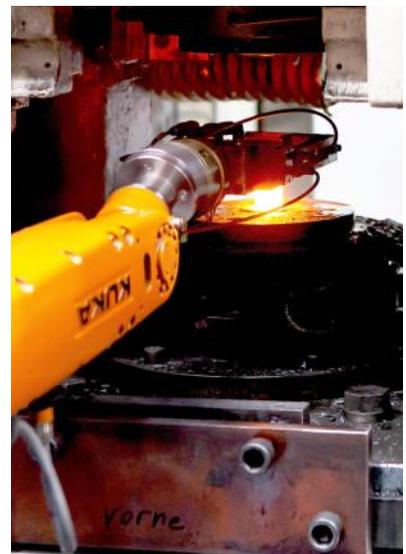
Dr.-Ing. Kai Brunotte, Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen (IFUM)

Herr Dr. Brunotte, was sind in Ihren Augen die dominierenden Trends der Automatisierung?

In der Umformtechnik haben wir es zum einen mit der Massivumformung, zum anderen mit der Blechumformung zu tun: In der Massivumformung geht es um sehr heiße, sehr schwere Teile, die in irgendeiner Form bewegt werden müs-

sen. In der Blechumformung, also zum Beispiel im Automobilbau, laufen schnelle Prozesse ab, wo man extrem viele Teile in möglichst kurzer Zeit handhaben muss. In beiden Bereichen wird es immer schwieriger, Personal zu finden. Es gibt deshalb einen ganz starken Trend hin zur Automatisierung durch den Einsatz von Robotern. Für die Massivumformung galt das bis vor kurzem allerdings nur be-

grenzt, weil hier vor allem kleine und mittelständische Betriebe tätig sind. Denen fehlte oft das Geld und die Expertise für eine solche Automatisierung. Hinzu kam, dass sich die hohen Investitionen angesichts der relativ kleinen Stückzahlen in diesem Bereich oft nicht gelohnt hätten und die Flexibilität der Roboter dafür auch nicht ausreichend war. Aber dank der Entwicklungen in den letzten



Jahren haben sich auch für solche Unternehmen die Voraussetzungen geändert.

Um welche Entwicklungen geht es dabei?

Die klassischen Roboter, die wir noch vor zwanzig Jahren hatten, mussten aus Sicherheitsgründen mit aufwendigen Barrieren umgeben werden, um verletzungssträchtige Kollisionen mit den menschlichen Mitarbeitern zu vermeiden. Aber heute verfügen wir über kollaborative Roboter, die den Menschen unterstützen und gemeinsam mit ihm arbeiten können. Die gesamte Automatisierung ist deutlich flexibler geworden. Das bedeutet, der Roboter, gekoppelt mit Kamerasystemen, muss nicht mehr starr ein Teil greifen, das immer an derselben Stelle liegt, sondern er ist inzwischen auch in der Lage zu erkennen, wie das Teil liegt und wie er es greifen und weiterreichen kann. Wir haben also inzwischen einen Teil der menschlichen Flexibilität auf den Roboter übertragen. Und zudem können wir das Ganze nun auch noch mit den hervorragenden Möglichkeiten kombinieren, die die KI bietet. Dadurch lassen sich Prozesse beschleunigen und die Roboter werden befähigt, Fehler zu erkennen und autonom darauf zu reagieren. Gerade im Hochlohnland Deutschland ist diese aktuelle

Stufe der Automatisierungstechnik ein Gamechanger, der der Industrie hilft, international konkurrenzfähig zu bleiben. Das ist für uns natürlich ein wichtiges Forschungsfeld.

Wie reagiert man denn in den Betrieben auf diese Entwicklungen?

Die neue Generation der Mitarbeiter hat da immer weniger Berührungsängste. Das Anlernen der Roboter ist in den letz-

„Die neue Generation der Mitarbeiter hat immer weniger Berührungsängste.“

ten Jahren auch sehr viel einfacher geworden. Früher musste man für die gewünschten Robotergriffe die passenden Befehle eingeben, was nicht ganz einfach war, weil der Roboter deutlich

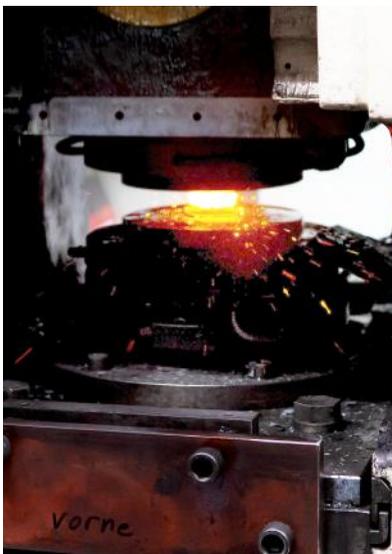
mehr Achsen als der Mensch hat. Heutzutage findet die Programmierung intuitiv statt: Man nimmt den Roboter an die Hand, führt ihn und zeigt ihm so, welche Bewegungen er machen soll. Das erleichtert Unternehmen, sich für die Automatisierung zu entscheiden.

Wie sicher ist die Zusammenarbeit mit einem Roboter auf engem Raum für den Menschen?

Grundsätzlich sind kollaborative Roboter sicher. Sie halten automatisch an, wenn sie mit einem menschlichen Mitarbeiter in direkten Kontakt kommen. Interessanterweise werden da noch unterschiedliche Maßstäbe angelegt. Während mancher noch Angst hat, neben einem Roboter zu arbeiten, gibt es keine Bedenken, direkt vor einer Presse zu arbeiten, obwohl eine Hand, die dort hineingerät, aufgrund der sehr viel höheren Kräfte sofort zerquetscht werden würde.

Gibt es in der Massivumformung bestimmte Bereiche, für die sich der Robotereinsatz besonders anbietet?

Alle Bereiche bieten sich an, ohne Ausnahme. Hier wird mit Teilen gearbeitet, die sind 1200 Grad heiß und 50 Kilo schwer. Und viele der Tätigkeiten sind sehr monoton und das über acht Stun-



Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter in der Praxis (v. l. n. r.): Die Anlage wird vorbereitet, der Roboter positioniert das vorgeheizte Werkstück in der Presse, die Presse bearbeitet das Werkstück, Rohling und Pressling nebeneinander. Fotos: Helge Bauer

den. Das sind Arbeiten, die einfach prädestiniert sind, um von Robotern übernommen zu werden.

Welche Aspekte der Automatisierung stehen in Ihrer Forschung im Fokus?

Es geht um Flexibilisierung und Digitalisierung, also darum, die anfallenden Daten für die Steuerung der gesamten Prozesskette mit Pressen, Robotern und allem, was sonst noch dazugehört, zu nutzen. Das umfasst auch, dass Fehler automatisch erkannt und korrigiert werden. Das System muss also das leisten, was Menschen in vielen Jahren erlernt haben und intuitiv einsetzen. Ein anderer wichtiger Punkt ist die Flexibilisierung: Sie soll es möglich machen, dass auf ein und derselben Anlage in möglichst kurzer Zeit unterschiedlichste Teile produziert werden können. Das entspricht dem globalen Trend zu einer Produktion, die individuellere Kundenwünsche als früher

bedienen muss, was immer geringere Stückzahlen zur Folge hat. Wir arbeiten an der Konzeption von Anlagen, mit denen das wirtschaftlich möglich ist.

Ein Schlagwort, wenn es um Flexibilisierung geht, ist ja „Losgröße eins“.

Die werden wir in meinem Bereich auch in der Zukunft nicht erleben. Aber kleinere Stückzahlen, die man flexibel anbieten kann und die eine drastische Verringerung der Lagerhaltung erlauben, das ist ein Ziel, das in der Umformtechnik eine große Rolle spielt.

Nutzen Sie für die Automatisierung der Produktionsprozesse maschinelles Lernen?

Nein, bislang setzen wir regelbasierte Systeme ein, also der Roboter macht das, was wir ihm vorher beigebracht haben, ohne dass er sich bereits selber regelt.

Aber darauf arbeiten wir hin. Die ersten Projekte, in denen wir das versuchen werden, laufen jetzt an.

Was sind aus Sicht der umformtechnischen Forschung die großen Herausforderungen, wenn es um Automatisierung geht?

Sicherzustellen, dass wir am Ende den Regelkreis einer solchen Produktionsanlage überhaupt noch überblicken. Denn wir müssen ja sicherstellen, dass das System sich nicht selbst so einstellt, dass es havariert. Das heißt, wir müssen ihm einen Rahmen vorgeben, den es nicht überschreiten darf und wir müssen ihm zum Beispiel auch beibringen, auf bestimmte Signale auch mal nicht sofort zu reagieren, sondern abzuwarten, welche Effekte sich ergeben, bevor es weitergeht. Solche Regelkreise aufzubauen, wird unsere nächste große Herausforderung sein. ◀

Sebastian Blankemeyer, Institut für Montage-technik und Industrierobotik (match)

Herr Blankemeyer, was sind in Ihren Augen die dominierenden Trends der Automatisierung?

Die Automatisierung ist bzw. war klassischerweise auf einen Massenmarkt hin ausgelegt: Wir haben ein bestimmtes Produkt, das in seinen Grundzügen immer gleich ist. Nehmen wir beispielsweise ein Auto. Dessen Karosserie wird von Robotern zusammengeschweißt, also automatisch gefertigt. In der Montage ist der Automatisierungsgrad bislang viel geringer, weil dort die Produktvarianz größer ist. Der Trend in vielen Branchen geht nun dahin, Fertigungsverfahren zu entwickeln, die zwar automatisiert sind, aber zugleich eine große Produktvarianz erlauben. Es geht also darum, individuelle Kundenwünsche zu bedienen, ohne auf die Vorteile der Automatisierung verzichten zu müssen. Das bedeutet aber, dass die

komplette Automatisierung flexibler werden muss.

Welche Aspekte der Automatisierung stehen für das match im Vordergrund?

Als das match vor zehn Jahren seine Arbeit aufnahm, begann gerade das Thema der Mensch-Roboter-Kollaboration Fahrt aufzunehmen, ein Thema, das uns nach wie vor sehr beschäftigt. Im Mittelpunkt stehen die kollaborationsfähigen Roboter, die auch als Leichtbauroboter oder Cobots bezeichnet werden, und mit Sensoren bestückt sind, also sensitive Fähigkeiten haben. Das heißt, sie können mit Menschen zusammenarbeiten, wenn das vom Produktionsprozess her möglich und erwünscht ist. Dabei gibt es zwischen der echten Kollaboration auf der einen Seite des Spektrums, bei der Mensch und Robo-

ter tatsächlich Hand in Hand arbeiten, und dem traditionellen Robotereinsatz in einem vom Menschen abgeschotteten Raum auf der anderen Seite verschiedene Zwischenstufen.

Wo kommen solche Cobots zum Einsatz?

Das Spektrum reicht von der Großbäckerei bis zur Automobilproduktion und vom mittelständischen Betrieb bis zum Großunternehmen. Typische Tätigkeiten, die von Leichtbaurobotern übernommen werden, sind beispielsweise das Verpacken und Kommissionieren sowie die Maschinenbestückung und das Auftragen von Klebstoffen.

Was bedeutet der Robotereinsatz für die Arbeitsplätze in der heutigen Produktion?

Es geht nicht darum, dass Roboter Arbeitsplätze wegnehmen, sondern dass sie die in der Produktion immer stärker werdende Lücke durch fehlende Arbeitskräfte schließen können. Automatisierung ist für viele Unternehmen eine oder die Chance, um in einem globalisierten Markt überlebensfähig zu bleiben.

Woher weiß der Cobot überhaupt, was er tun soll?

Das muss ihm erst einmal gezeigt werden. Es gibt mittlerweile viele intuitive Verfahren, an deren Weiterentwicklung auch wir arbeiten, die es ermöglichen, ihm das ohne große Programmierkenntnisse zu vermitteln. Beispielsweise wird beim „kinesthetic teaching“ (kinästhetischen Programmieren) der Roboterarm von seinem menschlichen „Demonstrator“ an verschiedene Positionen geführt und der Roboter „lernt“ so, welche Bahnen er zu durchlaufen hat.

Sie haben zu Beginn das Ziel erwähnt, die Automatisierung mit einer zunehmenden Individualisierung der Produktion zu verbinden. Was be-

deutet das für die Robotik?

Der Trend in den letzten zehn Jahren hin zu kleinen Stückzahlen und kürzeren Produktlebenszeiten macht bei Robotern flexible Greifsysteme mit entsprechender Sensorik notwendig, die sich für unterschiedliche Produkte eignen. Letztlich ist

„Es geht darum, individuelle Kundenwünsche zu bedienen, ohne auf die Vorteile der Automatisierung verzichten zu müssen.“

häufig das ehrgeizige Ziel die Losgröße eins, also das automatisiert produzierte, aber trotzdem komplett individuelle Produkte. Beispielsweise arbeitet das match zusammen mit dem ISFH (Institut für

Solarenergieforschung Hameln) und weiteren Industriepartnern in einem Forschungsprojekt daran, Photovoltaikanlagen in Fassaden zu integrieren. Das wird auf längere Sicht nötig, weil die Dachflächen nicht ausreichen werden, um den Bedarf zu decken. Es geht nun darum, unterschiedlich geformte Module zu produzieren, die architektonisch in die jeweilige Umgebung passen. Das herkömmliche hochautomatisierte System, das genau einen Solarpanel-Typ produziert, eignet sich dafür natürlich nicht. Wir setzen für unsere Entwicklung einen Prozesswilling ein. Dabei handelt es sich um eine digitale Darstellung der erforderlichen Arbeitsabläufe und der beteiligten Produktionsmittel. Der Zwilling soll die schnelle Anpassung der Fertigungsprozesse für Module unterschiedlicher Form, Größe und Materialeigenschaften unterstützen. Die Herausforderung besteht unter anderem darin, einen Roboter zu bauen, der unter diesen variierenden Bedingungen immer die geforderte Genauigkeit gewährleistet. Die liegt im Bereich von 100 Mikrometern – das ist etwa die Dicke eines menschlichen Haars. Wenn ein solches System funktioniert, dann



Links: „Soft Material Robotic Systems“ – die Verwendung weicher Materialien verringert die Verletzungsgefahr. Rechts: Transport großer Bauteile durch kooperierende, mobile Roboter. Fotos: match

können Sie damit ein spezifisches Modul auch dann kostengünstig produzieren, wenn der Kunde nur eines davon benötigt. Das wäre vielleicht auch eine Chance für die Solarindustrie, in Deutschland wieder Fuß zu fassen.

Welche Entwicklungen verfolgen Sie außerdem im Bereich der Robotik?

Die „intelligente Robotik“ erfährt eine zunehmende Relevanz. Dies bedeutet, dass sich die Robotersysteme mit Hilfe ihrer bzw. zusätzlicher Sensorik in einer unstrukturierten Umgebung zurechtfinden oder auf wechselnde Situationen reagieren können, was dem Menschen heutzutage deutlich besser gelingt. Häufig werden hierfür die Robotersysteme mit Verfahren der künstlichen Intelligenz verknüpft. Dies ist beispielsweise bei der Demontage von hoher Relevanz, da Produkte aus der Nutzungsphase nicht immer den gleichen Zustand aufweisen und somit flexibel auf die Randbedingungen reagiert werden muss. In anderen Projekten arbeiten wir auch daran, mehrere mobile Roboter kooperieren zu lassen. Eine solche Teamarbeit kann zum Beispiel sinnvoll sein für den Transport und die Montage größerer Bauteile. Dafür greifen die Roboter das Objekt an mehreren

Punkten und verteilen so die Last auf mehrere Einheiten. Da sie mobil sind, können sie sich so zum Bauteil positionieren, dass sie die bestmögliche Anordnung zum Transportieren, Handhaben und Montieren einnehmen. Dabei können sie sich flexibel auf die wechselnden Formen und Abmessungen der Bauteile einstellen. Ein solcher Roboterverbund lässt sich variabel auf unterschiedlichste Aufgaben ausrichten. Auch hier spielt die Sensorik eine wichtige Rolle, um zu gewährleisten, dass die Roboter sich aufeinander abstimmen und koordiniert agieren. Ein weiterer Forschungsbereich im match sind die Soft Material Robotic Systems. Da geht es darum, Roboter aus weichen Materialien, zum Beispiel Silikon, zu bauen. Das ist unter anderem auch für die Interaktion mit Menschen interessant, weil die Verletzungsgefahr viel geringer ist als bei der Kollision mit einem Roboterarm aus Metall.

Gibt es bestimmte Einsatzgebiete, für die solche Roboter besonders interessant sind?

Ja, zum Beispiel die Medizintechnik: Bei operativen Eingriffen reduzieren weiche Roboter die Gefahr, umliegendes Gewebe zu verletzen. Aber sie eignen sich auch,

wenn es um die Handhabung zerbrechlicher oder druckempfindlicher Gegenstände geht. Ein weiterer Bereich sind Erkundungen in unebenem Gelände oder engen Umgebungen, wo man sich durchschlängeln und an unterschiedliche Konturen anpassen muss. Allerdings bringt die große Flexibilität auch beträchtliche Herausforderungen mit sich, weil die Bewegungsfreiheit und Verformbarkeit dieser Roboter, anders als bei ihren harten Gegenständen, enorm groß ist. Deshalb sind sie in der Regel weniger präzise und ihre Aktionen sind schwieriger zu steuern. Wenn ich beispielsweise ein Antriebselement aus Silikon habe und ich gebe dort Druckluft hinein, dann verhält es sich nicht linear, sondern es verformt sich in komplexer Weise. Hinzu kommt, dass das Material nach einiger Zeit Ermüdungserscheinungen aufweist. Im Moment erarbeiten wir ein KI-Modell, das es uns erlaubt, den Roboter trotz seiner nichtlinearen Eigenschaften auf unterschiedliche Ziele hin zu trainieren. Vor dem Hintergrund der Robotikforschungen wird übrigens immer wieder deutlich, was für ein unglaublich ausgefeiltes Sensor- und Greifer-System die menschliche Hand mit dem sie steuernden Gehirn ist. ◀

Birger Reitz und Sebastian Leineweber, Institut für Transport- und Automatisierungstechnik (ITA)

Was sind in Ihren Augen die dominierenden Trends der Automatisierung?

Birger Reitz: Es gibt aus unserer Sicht zwei Haupttrends: Zum einen hat in den vergangenen 20 Jahren die Vernetzung unter den Systemen zugenommen: Es ist jetzt möglich, Sensoren, Kameras, Aktoren so miteinander zu verknüpfen, dass sie fast in Echtzeit miteinander kommunizieren können. Und das zweite große Thema ist der 3D-Druck, auch additive Fertigung genannt.

Beginnen wir mit der Vernetzung. Worum geht es da konkret?

Birger Reitz: Wir hatten hier am ITA ein Forschungsprojekt, in dem es darum ging, einen Gabelstapler mit verschiedenen Kameras und Sensoren so auszustatten, dass Informationen aus unterschiedlichen Blickwinkeln auf eine AR-Brille in Form eines Visiers, das der Fahrer trägt, projiziert werden. Das heißt, der Fahrer hat ein Blickfeld, in dem er durch den Hubmast, der ihm die Sicht versperrt, quasi „hindurchschaut“. Das

beschert ihm ein freies Sichtfeld, auch wenn er eine volle Palette geladen hat, und hilft so, Kollisionen zu verhindern. So etwas ging früher nicht, weil die Kameras einfach zu lange gebraucht haben, um miteinander zu kommunizieren und dann das Bild auf einen Bildschirm zu projizieren.

Welche technischen Voraussetzungen mussten dafür erfüllt sein?

Birger Reitz: Die Speicherleistung und die Geschwindigkeit der Kameras haben

sich stark erhöht und ihre Fähigkeit, Gegenstände zu detektieren, hat sich verbessert. Hinzu kommen die Fortschritte, die in den letzten Jahren in der Künstlichen Intelligenz erzielt wurden. Auf der Basis von maschinellem Lernen können die Kameras die wesentlichen Informationen herausfiltern, miteinander kommunizieren und die Daten so zusammensetzen, dass beim Nutzer keine Bild-für-Bild-Folge ankommt, sondern ein flüssiges Video. Nehmen wir nochmal das Beispiel des Gabelstaplers: Da erkennen Kameras, die aus verschiedenen Winkeln aufnehmen, den ge-

meinsamen Hintergrund, so dass sie diese Bilder passend zueinander überlappen, und der Hubmast auf dem Bild der AR-Brille nicht mehr zu sehen ist.

Der Gabelstapler, den Sie genannt haben, wird ja noch von einem Menschen gefahren. Ist das aber ein erster Schritt hin zu einer kompletten Automatisierung solcher Abläufe, also zur menschenleeren Lagerhalle?

Birger Reitz: Es kommt auf das Unternehmen an. Kleine Unternehmen werden

wahrscheinlich auch in zehn Jahren noch keine vollautomatisierte Lagerhaltung haben, weil die Produktvielfalt einfach zu groß und eine durchgängige Automatisierung viel zu teuer ist. Aber wenn man sich ein Unternehmen wie Amazon ansieht, wo es ja schon teilautomatisierte Prozesse gibt, da ist der weitere Schritt zur menschenleeren Lagerhalle durchaus denkbar.

Wenn wir einmal von der Logistik zur Produktionstechnik blicken, welche Möglichkeiten bietet die Vernetzung da?



Modifizierter Gabelstapler, der durch den Einsatz von Kamera- und Sensortechnik sowie einer AR-Brille einen Beitrag für eine effizientere und sicherere Lagerlogistik leistet. Links: Birger Reitz, rechts: Sebastian Leineweber. Foto: ITA

Sebastian Leineweber: Sehr viele, zumal in der industriellen Produktion Vernetzungen auch anlagenübergreifend möglich sind. Das untersuchen wir zum Beispiel in einem ITA-Projekt zur Digitalisierung der Kautschukextrusion. Da werden die Informationen der Wareneingangskontrolle, der Mischanlage, des Walzwerks und des Extruders verknüpft. Und diesen Informationsfluss kann man auch zurückverfolgen. Wenn das Extrudat Fehler aufweist, kann man feststellen, ob die vielleicht schon beim Mischen oder beim Walzen entstanden sind und dann steuerungstechnisch eingreifen. Eine solche Verknüpfung und die darauf basierende ganzheitliche Untersuchung des Produktionsprozesses ist auch dann möglich, wenn die Anlagen an ganz verschiedenen Standorten stehen.

Das zweite große Thema, das Sie nannten, ist der 3D-Druck.

Sebastian Leineweber: Da können wir gleich beim Kautschuk bleiben. Wir haben hier ein Forschungsprojekt, in dem es darum geht, kautschukbasierte Elastomere, also Materialien, aus denen etwa Reifen und Dichtungen bestehen, additiv zu fertigen. Bisher wurden solche Bauteile entweder extrudiert oder im Spritzguss gefertigt. Wir haben nun einen 3D-Drucker, der ursprünglich thermoplastisches Material wie zum Beispiel Polylactid (PLA) drucken konnte, so umgerüstet, dass er jetzt auch Kautschuk drucken kann. Das Interesse in der Industrie ist sehr groß, denn im Gegensatz zum Spritzguss braucht der 3D-Drucker keine Metallform, die ausgespritzt wird, sondern nur die entsprechenden Daten, um die gewünschten Bauteile zu drucken. Hinzu kommt, dass Kautschukbauteile, also zum Beispiel Dichtungen oder Membranen, im Lauf der Zeit verspröden. Wenn eine bestimmte Lagerhaltungsdauer überschritten ist, müssen diese Bauteile entsorgt werden. Das ist weder ökonomisch noch ökologisch wünschenswert. Im 3D-Druck können wir nun gezielt

nach Bedarf kleine Stückzahlen ohne großen Aufwand fertigen. Deshalb hat die additive Fertigung, insbesondere wenn es um Ersatzteile geht, auch über den Bereich Kautschuk hinaus einen enormen Vorteil. Der Bedarf für die meisten Ersatzteile nimmt ja kontinuierlich ab, weil die betreffenden Maschinen nach und nach ausrangiert werden.

Sie sprechen von kleinen Stückzahlen, die der 3D-Druck ermöglicht.

Wo ist denn da die untere Grenze?

„Irgendwann wird es wahrscheinlich eine relativ autonome Fabrik geben, und den Weg dorthin werden wir mit der Automatisierungstechnik begleiten.“

Sebastian Leineweber: Die Idealvorstellung ist die Losgröße eins, also die Möglichkeit, auch ein sehr individuelles Bauteil, das vielleicht gerade ersetzt werden muss, schnell und kostengünstig drucken zu können. Dadurch ließen sich auch Maschinen und Fahrzeuge länger in Betrieb halten, die man zurzeit noch stilllegen muss, weil der Ersatz einzelner Bauteile nicht mehr möglich oder zu teuer ist.

Birger Reitz: Wobei sich das 3D-Druckverfahren für unterschiedliche Industriematerialien, zum Beispiel auch Metalle, vorteilhaft verwenden lässt. Dabei werden schrittweise Pulverschichten aufgetragen, gesintert und gehärtet, so dass das Bauteil schichtweise wächst. Dafür wird zwar sehr viel Pulver benötigt, aber mittlerweile erforscht man, wie sich überschüssiges Pulver herausklopfen und

wiederverwerten lässt. Ein Riesenvorteil des 3D-Drucks besteht darin, dass man nur das Material benutzt, das man für das Bauteil tatsächlich braucht. Man hat keinen großen Materialabtrag, wie bei der konventionellen Herstellung eines Bauteils, wo man sehr viel Material abdrehen oder abräsen muss.

Spielt das Thema Vernetzung auch beim 3D-Druck eine Rolle?

Sebastian Leineweber: Grundsätzlich ist die Vernetzung von 3D-Druckern zur kombinierten Fertigung mit unterschiedlichen Materialien eine interessante Möglichkeit, aber es handelt sich dabei um sehr komplexe Prozesse, denn Glas, Metall oder Kunststoff haben natürlich ganz unterschiedliche Fertigungsbedingungen. Also da stehen wir erst am Anfang. Was aber zum Beispiel bereits erforscht wird, ist die additive Fertigung von Kautschukbauteilen in Kombination mit elektrischen Leiterbahnen. Eine so strukturierte Dichtung beispielsweise kann ein Signal senden, wenn sie defekt ist.

Vor dem Hintergrund der Entwicklungen, die Sie gerade skizziert haben: Wie, denken Sie, wird die Fabrik der Zukunft aussehen?

Birger Reitz: Der Mensch wird immer weniger im Zentrum der Fabrik stehen. Das ist ein langfristiger Trend, der momentan durch den Fachkräftemangel zusätzlich vorangetrieben wird. Irgendwann wird es wahrscheinlich eine relativ autonome Fabrik geben, und den Weg dorthin werden wir mit der Automatisierungstechnik begleiten. Es gibt viele Fertigungsprozesse, viele verschiedene Materialklassen, für die man teilweise neue Lösungen finden muss, teilweise aber auch bereits bestehende Lösungen von einem Industriebereich auf andere Bereiche übertragen kann. Aber bis wir eine wirklich autonome Fabrik haben – eine Industrie fünf null oder wie auch immer man die dann nennen möchte – ist noch sehr viel zu tun. ◀

Nachhaltige Ingenieurwissenschaft: Die ersten Bachelorprüfungen stehen bevor

Der immer noch neue Bachelorstudiengang ‚Nachhaltige Ingenieurwissenschaft‘ wird sechs Semester alt und die erste Kohorte der Studienanfänger steuert auf den Abschluss zu. Die inhaltliche Kombination aus Technik und Ökologie hat sich bewährt. Im Wintersemester startet ein daran anknüpfender Masterstudiengang.

Wie lassen sich Produktionstechniken effizient und ressourcenschonend gestalten? Welche Innovationen braucht es, damit die technisch-industrielle Transformation gelingt, Klima- und Nachhaltigkeitsziele erreicht, das Artensterben gestoppt wird? Das sind Fragen, die im Mittelpunkt des Bachelor-Studiengangs ‚Nachhaltige Ingenieurwissenschaft‘ stehen, den die Fakultät für Maschinenbau der Leibniz Universität Hannover anbietet. Einen wichtigen Bestandteil des Lehrplans bilden produktionstechnische Vorlesun-

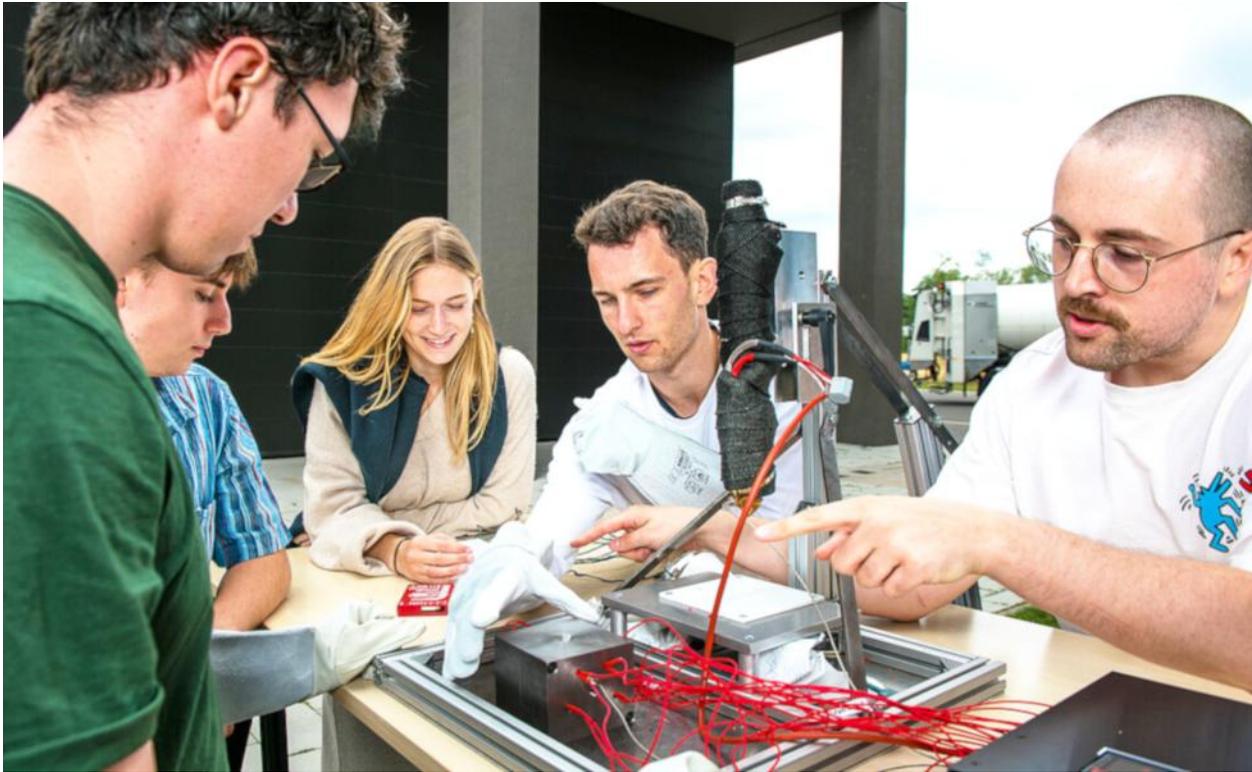
gen und Übungen aus allen Disziplinen des PZH. Einen besonderen Beitrag zum Nachhaltigkeitsprofil des Studiengangs bietet dabei das Institut für Kunststoff- und Kreislauftechnik (IKK) mit mehreren Lehrveranstaltungen zu Kunststofftypen, zu Verarbeitungs- und

Recyclingtechnologien sowie zur Nachhaltigkeitsbewertung.

Gestartet wurde der Studiengang im Wintersemester 2021/22. Jetzt, im Sommersemester 2024, befindet sich die erste Kohorte der Studienanfänger im 6.

Semester und steuert auf den Abschluss zu. „Das Konzept des Studiengangs, junge Menschen anzusprechen, die ihre Begeisterung für die Technik mit ökologischem Engagement verbinden wollen, hat sich bewährt“, so Studiengangs-koordinatorin Anna-Katharina

Am Studiengang „Nachhaltige Ingenieurwissenschaft“ der LUH sind außer der federführenden Fakultät für Maschinenbau sieben weitere Fakultäten beteiligt. Neben ingenieurwissenschaftlichen Kernfächern wie Mathematik, Technische Mechanik, Konstruktionslehre, Werkstoffkunde oder Energie- und Verfahrenstechnik stehen Themen der Nachhaltigkeitswissenschaft, des Umweltrechts und der Technikphilosophie auf dem Lehrplan. Einen großen Stellenwert haben praxisnahe Projekte und Arbeitsgruppen, die ingenieurwissenschaftliche Lösungen zu aktuellen Forschungs- oder Praxisproblemen erarbeiten. Dabei geht es auch um Teamfähigkeit, Projektmanagement und Eigenverantwortung – Kompetenzen, auf deren Schulung auch sonst im Studium Wert gelegt wird.



Die Studieninhalte im Master Nachhaltige Ingenieurwissenschaft setzen sich aus einem Pflichtbereich in Kombination mit Wahlpflicht- und Wahlbereichen zusammen. Foto: Max Kesberger/LUH

Mosimann. Dafür sprechen nicht nur die positiven Rückmeldungen vieler Studierender zu den Inhalten des Studiums, sondern auch die Studienanfängerzahlen, die sich auf ein stabiles Niveau eingependelt haben: Im Wintersemester beginnen jeweils 70–100 Personen das Studium, im Sommersemester liegt die Zahl, wie in anderen Studiengängen auch, etwas niedriger, nämlich bei 50–60. Der Anteil der Frauen beträgt je nach Semester 35–45 Prozent, was in den Ingenieurwissenschaften vergleichsweise hoch ist. Das am häufigsten genannte Motiv für die Studienwahl ist der Wunsch, zur Bewältigung des Klimawandels beizutragen.

Die Erfahrungen der ersten Semester und die Rückmeldungen der Studienteilnehmer wurden genutzt, um Verbesserungen und Anpassungen an die Studienbedürfnisse vorzunehmen. Erweitert wurde beispielsweise die Auswahl der Wahlpflichtmodule. Zu ihnen gehört nun auch die Vorlesung ‚Nach-

haltige Wertschöpfungsketten in der Umformtechnik‘ des IFUM. In ihr steht die effiziente Verwendung sowie Nachnutzung bereitgestellter Energien und Ressourcen im Vordergrund. Die Verlängerung der Dauer einiger Klausuren und die zusätzliche Aufnahme von Gruppenübungen in manchen Bereichen sollen ebenfalls dazu beitragen, die Studienbedingungen zu optimieren.

Zum Wintersemester 2024/25 wird der Masterstudiengang ‚Nachhaltige Ingenieurwissenschaft‘ starten, der ein konsekutives Angebot zum Bachelorstudiengang darstellt: Wer den Bachelor erworben hat, kann also in ein nahtlos anknüpfendes Masterstudium einsteigen. Der Master ist aber auch für Bachelorabsolventen aus anderen fachverwandten Studiengängen offen.

Der Studiengang enthält zwei deutsch- und zwei englischsprachige Pflichtmodule: ‚Qualitäts- und Umweltmanagement‘, ‚Data and AI-Driven Methods in

Engineering‘, ‚Einführung in das Klimaschutzrecht‘ und ‚Sustainability Assessment in Practice‘. Der Wahlpflicht- und Wahlbereich des Masterstudiums teilt sich thematisch in drei große Vertiefungsrichtungen und einen Querschnittsbereich auf: In der Vertiefungsrichtung ‚Nachhaltige Produktion‘ geht es um materialwissenschaftliche, fertigungsbezogene und produktionsbezogene Ansätze, bei der ‚Nachhaltigen Systementwicklung‘ stehen Aspekte der Produktion, der Konzeption und Entwicklung, der Produktgestaltung sowie der Generierung und des Nutzbarmachens neuer Werkstoffe und nachhaltigkeitswirksamer Systeme im Mittelpunkt. In der Vertiefungsrichtung ‚Nachhaltige Energiesysteme‘ ist die Gestaltung der Energiewende das übergeordnete Thema. Eine durchgängig wichtige Rolle im gesamten Studiengang spielen daten- und KI-getriebene Ansätze, Kreislaufprozesse, Nachhaltigkeitsbewertungen und die Reflexion ethischer Fragen.