

Be Aware of the State of a System*

Werkzeugmaschinen überwachen ihren Systemzustand,
Schaufelradbagger wissen, was sie abbauen.
Radaufhängungen kennen ihre Beanspruchung,
und ein Prüfstand „hört mit“.

An allen PZH-Instituten erweitern
Wissenschaftler die Grundlagen des
klassischen Monitorings oder
schaffen neue Anwendungen.

Einige Beispiele.



Fotos: Sliwonik (7), Matthiak (1)

* Monitoring-Definition der englischen Wikipedia.

Durchblick im Tagebau

In Inden, in der Nähe von Eschweiler bei Aachen, gräbt sich ein mit Sensorik ausgestatteter Schaufelradbagger durch den Tagebau. Tobias Mathiak und sein Vorgänger Martin Kesting vom Institut für Transport- und Automatisierungstechnik haben für ein Industrie-Forschungsprojekt im Auftrag der RWE eine der gigantischen Schaufeln prototypisch mit Geoelektrik, Georadar und Auswertungssoftware ausgestattet.

Das Equipment befindet sich in einem Aufschweißgehäuse – einer Art Rucksack dieser Sensorschaufel. Sobald die Georadar-Antenne im Verlauf der Schaufelraddrehung nahezu senkrecht nach unten zeigt, dringt ihre ausgesendete elektromagnetische Welle optimal in das Material ein. Aus dem wieder empfangenen, teilreflektierten Signal lässt sich auf die Bodenzusammensetzung schließen – insbesondere auf die Trennschichten zwischen den Materialien, wie etwa Sand oder Kies zu Ton.

Die Elektroden der Geoelektrik schneiden während des Abbaus mit der Schaufel ins Material und messen dabei die Leitfähigkeit, die induzierte Polarisation und Kontaktschwankungen zwischen Elektroden und dem anstehenden Material. Die aufbereiteten Messwerte werden mit einer Datenbank abgeglichen, und zusammen mit GPS-Informationen liefert die Auswertung dem Bediener des Schaufelradbaggers innerhalb einer Schaufelradumdrehung eine detaillierte Übersicht über die Materialien, die gerade abgebaut werden.

Was ist neu?

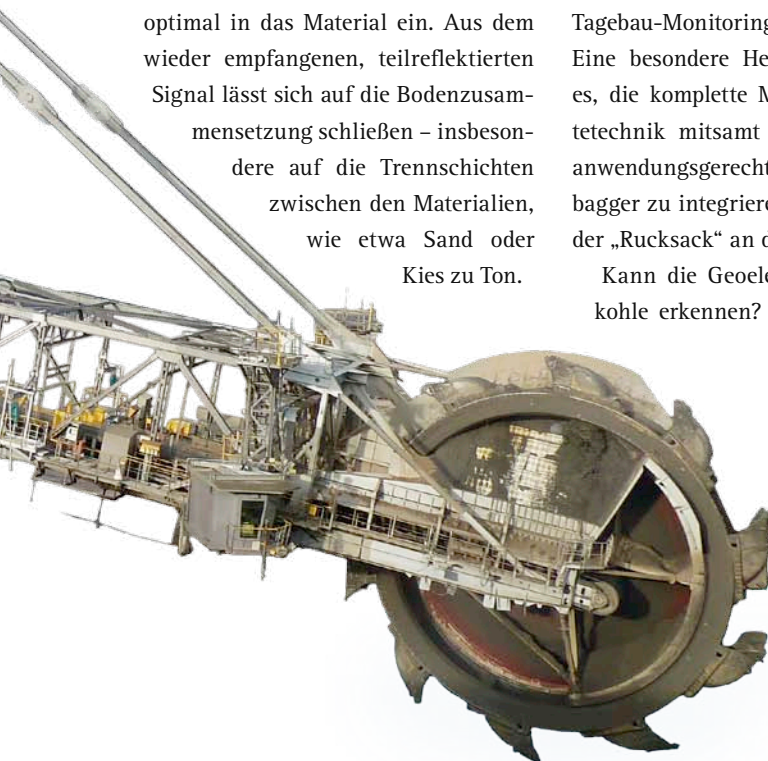
Neu ist das Vorhaben, Schaufelradbaggern mit diesen Techniken eine Art Tagebau-Monitoring zu ermöglichen. Eine besondere Herausforderung war es, die komplette Mess- und Auswertetechnik mitsamt Energieversorgung anwendungsgerecht am Schaufelradbagger zu integrieren. Dazu dient jetzt der „Rucksack“ an der Sensorschaufel.

Kann die Geoelektrik auch Braunkohle erkennen? Direkt im Tagebau

in Inden konnte diese Frage nicht geklärt werden, da es dort am Einsatzort des Baggers auf der obersten Sohle keine Braunkohle gibt. Begleitende statische Messungen deuten allerdings auf eine gute Unterscheidbarkeit von Braunkohle im Vergleich zu anderen Materialien hin.

Wer braucht das?

Tagebau-Betreiber möchten bestimmte Materialien möglichst sortenrein abbauen. Das neue Monitoring-Verfahren verschafft dem Bediener des Schaufelradbaggers nahezu in Echtzeit einen Überblick über die Materialzusammensetzung an der Abbau-Position. Mit diesen Informationen kann mit dem Schaufelradbagger entsprechend nahe an Trennschichten entlang abgebaut werden. „Vorstellbar“, sagt Mathiak mit Blick in die Zukunft, „wäre es auch, das System für eine Automatisierung zu nutzen“. Auch im Bergbau und in der Bohrtechnik ließe es sich mit großem Potenzial einsetzen.



Tobias Mathiak vom ITA hat eine der Schaufeln prototypisch mit Geoelektrik, Georadar und Auswertungssoftware ausgestattet.



Ein Ohr für Materialfehler

Wenn der Getriebeprüfstand läuft, ist es so laut, dass Vera Böhm den Testraum lieber verlässt. Und wenn an der Presse in der Halle ein Zahnrad präzisionsgeschmiedet wird, wenn also das Umformwerkzeug mit enormen Kräften auf den Rohling gepresst wird, um das Material in die leere Form mit den Zähnen zu drücken, dann muss man schon sehr laut reden, um sich zu verständigen. Und trotzdem hören die Sensoren, die Vera Böhm im Getriebeprüfstand verwendet, ob sich ein „Grübchen“ im Material bildet oder, in der Presse, wie sich der Werkstoff verformt, wie sich sein Materialgefüge verändert, wie sich die Form füllt.

Genau genommen registrieren die Sensoren winzige Beschleunigungen des Materials, auf dem sie befestigt sind. Eine Beschleunigung, die von Schallemissionen verursacht wird – von Schwingungen, die ihrerseits auf ruckartige Veränderungen im Material zurückzuführen sind. Der Sensor macht aus dieser Beschleunigungsmessung ein elektrisches Signal. Und dann beginnt die eigentliche Arbeit: das Signal so zu transformieren und darzustellen, dass es aussagekräftig wird.

Was ist neu?

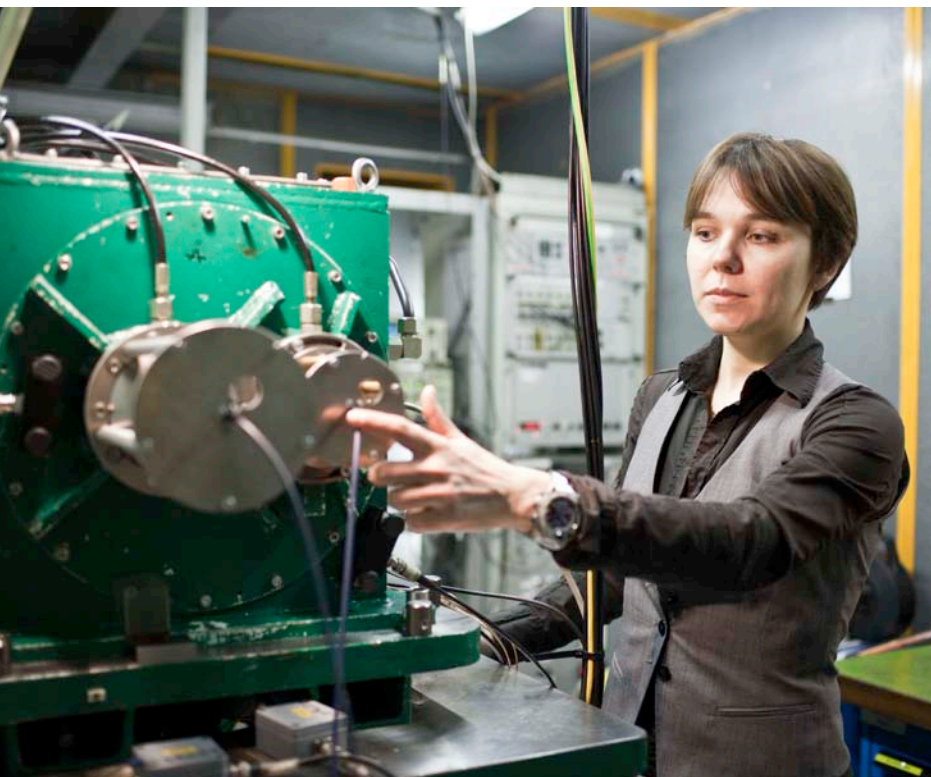
Bisher kann man auf diese Weise in einem Bereich bis zu 50 KHz mes-

sen – den Körperschall. Interessante Schallemissionen im viel größeren Ultraschallbereich von 20 kHz bis 2 MHz waren bislang nur sehr eingeschränkt nutzbar, die Datenmenge war schlicht zu groß. Vera Böhm hat – bei der Umformpresse – einen Wegsensor mit den anderen Sensoren gekoppelt. Dieser Wegsensor sorgt nun dafür, dass ein Signal nur dann erfasst wird, wenn es auch interessant ist, also wenn beispielsweise der Umformvorgang stattfindet. Beim Getriebeprüfstand hat sie das Signal mit zusätzlichen mathematischen Operationen so transformiert, dass beginnende Schäden früher und eindeutiger zu erkennen sind.

Wer braucht das?

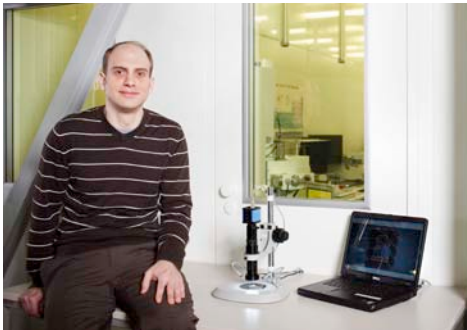
Man kann – im Schmiedebeispiel – den Schmiedeprozess überwachen, beurteilen und optimieren und sogar die Qualität jedes einzelnen geschmiedeten Bauteils „hören“. Ob die Prozesstemperatur stimmt, ob jeder Zahn vollständig ausgeformt ist, ob sich ein Grat bildet, ob das Gefüge „gut“ ist. Denkbar ist, in einer automatisierten Produktion Alarm auszulösen, wenn die Schallemissionsanalyse entsprechende Abweichungen zeigt.

Und natürlich eignet sich die Methode ideal für Betriebsfestigkeitsprüfungen: Sie funktioniert zerstörungsfrei und passiv, man braucht also keine Signale hineinzuschicken, sondern wertet lediglich vorhandene Signale aus.



Beim Getriebeprüfstand hat Vera Böhm das Signal mit zusätzlichen mathematischen Operationen so transformiert, dass Schäden früher und eindeutiger zu erkennen sind.

Ein Sensor zum Stempeln



*Tim Griesbach
braucht ein Mikroskop,
um die neuen Sensoren
zu zeigen.*

Wenn Maschinen, Anlagen oder Komponenten sich selbst überwachen sollen, müssen sie ihren Zustand kennen. Also müssen sie „fühlen“ können. Zum Beispiel, ob sie unter Spannung stehen, wie warm es ist, oder ob sie sich in einem Magnetfeld befinden. Idealerweise sollten die erforderlichen Ersatz-Sinnesorgane so klein sein, dass sie nicht stören, und so robust, dass sie alles aushalten. Tim Griesbach hat sie, diese Sinnesorgane: Tausende winziger Sensoren, in Alltagsprache könnte man sie „punktgroß“ nennen. Jeweils 3200 davon befinden sich auf einer kleinen Scheibe aus Silizium, dem Wafer.

Auf einem Monitor, der eine Mikroskop-Aufnahme eines einzelnen Mikrosensors zeigt, erkennt man vier kleine Kontaktflächen, eine kreisrunde Spule und eine Mäanderstruktur. Dieses Mikrosystem dient zur Wirbelstrommessung – kann im Prinzip aber auch Dehnung, Temperatur oder Magnetfeld messen. Tim Griesbach erklärt, wieso: „Was mit den Sensoren ausgelesen wird, ist immer eine Widerstandsänderung. Soll beispielsweise das Magnetfeld gemessen werden, verwenden wir als Funktionsschicht eine spezielle Nickel-Eisen-Legierung, die abhängig vom

Magnetfeld ihren Widerstand ändert. Wollen wir dagegen Dehnungen messen, nutzen wir entsprechende Chromlegierungen, deren elektrischer Widerstand zunimmt, wenn sie gedehnt werden.“

Was ist neu?

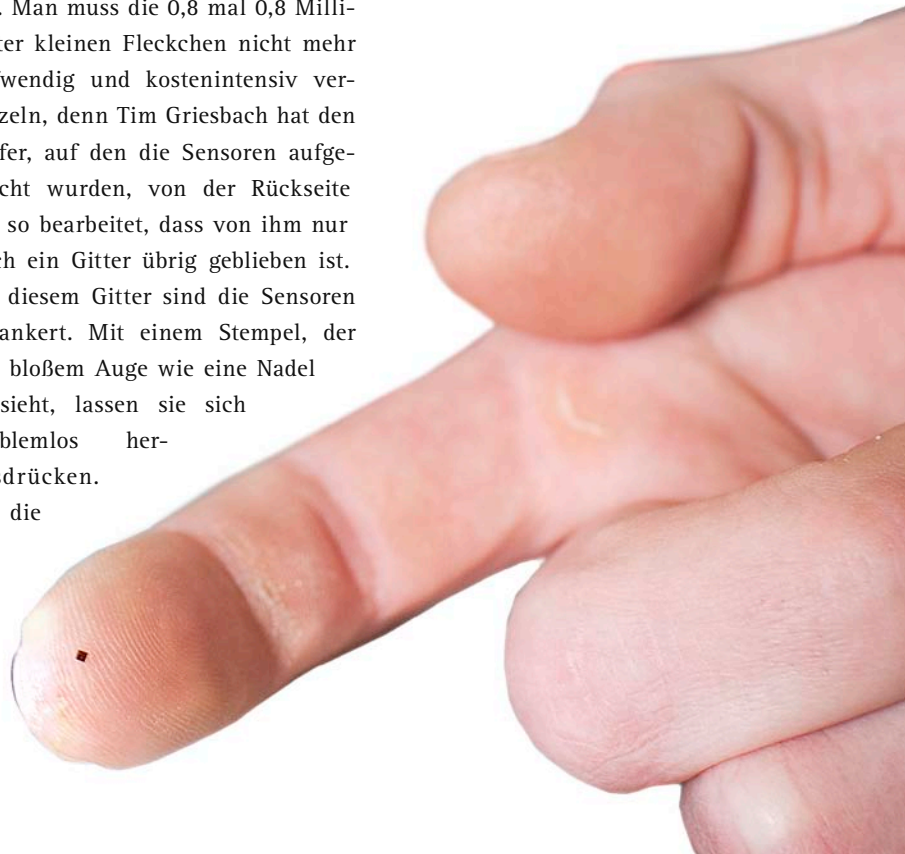
Die Sensoren werden einfach ausgestempelt. Diese völlig neue Art, Sensoren zur Verfügung zu stellen, hat das Institut für Mikroproduktionstechnik bereits zum Patent angemeldet. Man muss die 0,8 mal 0,8 Millimeter kleinen Fleckchen nicht mehr aufwendig und kostenintensiv vereinzeln, denn Tim Griesbach hat den Wafer, auf den die Sensoren aufgebracht wurden, von der Rückseite her so bearbeitet, dass von ihm nur noch ein Gitter übrig geblieben ist. An diesem Gitter sind die Sensoren verankert. Mit einem Stempel, der mit bloßem Auge wie eine Nadel aussieht, lassen sie sich problemlos herausdrücken.

Da die

Sensoren den gleichen Aufbau haben und nur die verwendeten Materialien sich unterscheiden, wird die Herstellung noch günstiger: Man braucht dafür nur noch einen Maskensatz.

Wer braucht das?

Wenn PZH-Kollegen aus dem Sonderforschungsbereich „Gentelligente Bauteile“, zu dem auch dieses Projekt gehört, einen Dehnmesssensor für ihre Demonstrator-Werkzeugmaschine brauchen, dann geben sie ihre Bestellung direkt bei Tim Griesbach ab. Und da die Sensoren auch den „Temperaturtest für Automobile“ bestanden haben, kann sich künftig beispielsweise auch die Automobilindustrie über deutlich günstigere Sensoren freuen.

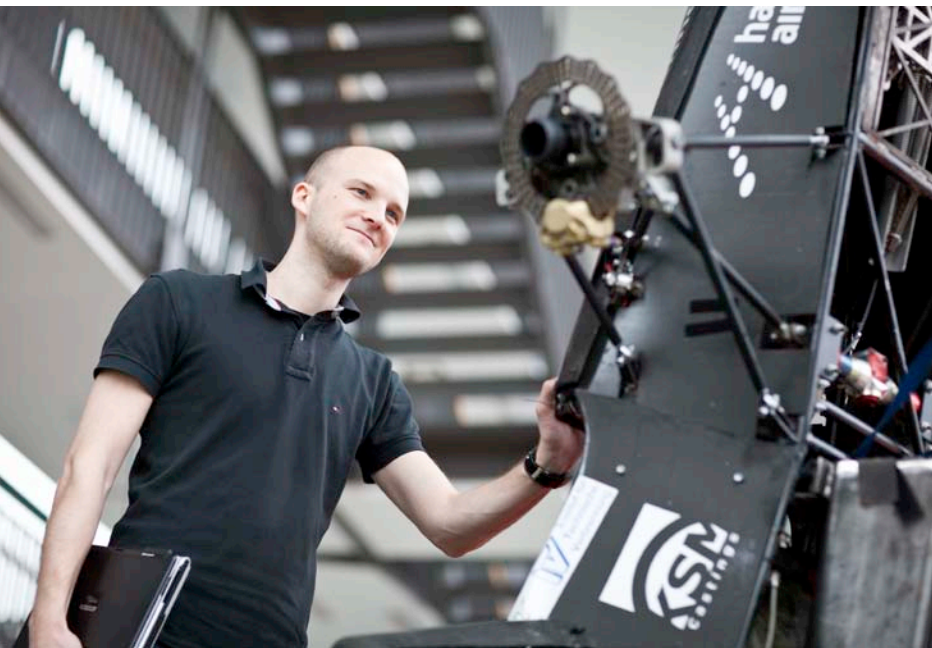


Dem Bauteilzustand auf der Spur

Angenommen, der Formula Student Rennwagen der Leibniz Universität hat einige ausgesprochen holprige Runden gedreht. Das Team sorgt sich um den Zustand der Radaufhängung. Weil die Radaufhängung von PZH-Wissenschaftlern des Sonderforschungsbereichs „Gentelligente Bauteile“ aber „gentelligent“ ausgelegt

Das ist nicht einfach – denn was heißt schon „beansprucht“? Wahrscheinlich hieße die pragmatische Entscheidung in diesem Beispiel: Muss der Rennwagen bei der nächsten Fahrt wieder am Limit fahren, so wird vorsichtshalber gewechselt. Stehen nur harmlose Testfahrten an, wird nicht gewechselt. Aber viel-

gleich mit den aktuellen Messdaten unkompliziert möglich ist. Damit ließen sich dann Aussagen treffen wie: Wenn die künftige Belastung im Normalbereich liegt, hält das Bauteil noch ein halbes Jahr. Oder: Wenn das Bauteil noch ein Jahr halten soll, muss der Fahrer deutlich defensiver fahren.



Borris van Thiel will aus Beanspruchungsdaten die Entscheidung ableiten, ob ein Bauteil ausgewechselt werden sollte oder nicht.

wurde, lässt sich ihre Beanspruchung über einen Wirbelstromsensor einfach auslesen. Das Team weiß also, wie beansprucht die Aufhängung ist. Und jetzt? „Mein Ziel ist es“, sagt Borris van Thiel, dessen Arbeit auch zu diesem Sonderforschungsbereich gehört, „aus Beanspruchungsdaten eine Entscheidung abzuleiten, ob ein Bauteil ausgewechselt werden muss oder noch weiter eingesetzt werden kann“.

leicht würde die Aufhängung ja auch noch das nächste Rennen und den nächsten Testlauf überstehen. Van Thiel kann zwar nicht in die Zukunft dieser einen Aufhängung gucken, aber er kann mit seiner Datenbank das „Leben und Sterben“ vergleichbarer Aufhängungen mit vergleichbarer Beanspruchung überprüfen, da die Datenbank darauf ausgelegt ist, die Beanspruchungshistorie zu speichern. Und zwar so, dass ein Ab-

Was ist neu?

Monitoring ist üblich, wenn man es mit Verschleiß zu tun hat. Bei van Thiel geht es aber um Ermüdung: Aus Beanspruchung folgt Ermüdung, aus Ermüdung folgen Risse oder Bruch. Im eigentlichen Sinn lässt sich Ermüdung nicht überwachen, deshalb nimmt er den Umweg über die Beanspruchung. Und Beanspruchung lässt sich erst seit kurzer Zeit praktikabel überwachen – die Methoden sind im Rahmen des Sonderforschungsbereichs „Gentelligente Bauteile“ entwickelt worden. Denn diese Bauteile ändern unter Belastung ihre magnetischen Eigenschaften und lassen sich deshalb entsprechend überwachen.

Wer braucht das?

Alle, die mit Bauteilen aus einer Serienproduktion arbeiten, deren Beanspruchung praktikabel messbar ist, könnten Erfahrungswissen über die Lebensdauer dieser Bauteile in eine strukturierte Datenbank übernehmen und damit in Zukunft wirtschaftlichere Entscheidungen in der Instandhaltung treffen. Je wertvoller ein Bauteil, desto lohnender natürlich die bauteilstatusgetriebene Instandhaltung.

Eine Maschine mit viel Gefühl

Der Prototyp einer Industrie-4.0-Werkzeugmaschine: Sie fühlt, lernt und steuert sich selbst, hat damit also alles, was sie für die vierte industrielle Revolution braucht. Kai Litwinski hat über diese Eigenschaften „seiner“ Maschine promoviert, er erklärt die Idee: „Bei unserer fühlenden Maschine denken wir an den Werker, der ein Bauteil in Händen hält und es bearbeitet. Mit einer Hand hält er das Teil, mit der anderen das Werkzeug; über beide Hände kontrolliert er den Bearbeitungsprozess. In unserer Maschine gibt es parallel zu den Händen die Spannvorrichtung und den Spindelschlitten, die das Bauteil und das Werkzeug halten und den Prozess fühlen können.“

Ein Beispiel: „Die Maschine fräst an einem Motorblock. Es treten Schwingungen auf, die Oberflächenqualität leidet. Die Maschine spürt das und gibt früh genug Bescheid.“ Im nächsten Schritt wird sie sich selbstständig entsprechend nachjustieren.

Das Fühlen übernehmen winzige Sensoren, beispielsweise die Dehnungssensoren von Tim Griesbach (Seite 31), die Litwinski in die Maschine integriert. Allerdings ist das nicht ganz so einfach, wie es auf den ersten Blick aussehen mag, denn Werkzeugmaschinen werden üblicherweise auf Steifigkeit optimiert, und die auftretenden Dehnungen sind winzig. Deshalb braucht man für die fühlende Maschine neue Konstruktionsansätze. Maschine und Sensoren gehören jeweils zum Sonderforschungsbereich „Gentelligente Bauteile“, dessen Ziele in wei-

ten Teilen der „Industrie- 4.0“-Vision entsprechen.

Was ist neu?

Bislang müsste man sich eine komplette Kraftmessplattform in die Maschine schrauben, um ähnliche Ergebnisse zu bekommen. Aber: „Das ist technisch gesehen irrelevant, weil aufwendig, teuer, hinderlich.“ Oder man nutzt sensorische Werkzeughalter mit Dehnungsmessstreifen, hat dann aber auch eine Extra-Komponente in der Maschine. „Die will eigentlich niemand dort haben, weil sie den Bewegungsraum und die Auswahl der nutzbaren Werkzeuge einschränkt und bei manchen

Verfahren selbst in Schwingung geraten würde.“ Die Sensoren, die Litwinski in seinem Projekt auf den Strukturen der Maschine verteilt, stören nicht und machen die Maschine ohne Platzbedarf und ohne Nutzungseinschränkungen sensibel.

Wer braucht das?

Wer die Zukunft der Industrie 4.0 vor Augen hat mit ihren cyber-physischen, dezentralen Systemen, der braucht auch cyber-physische Werkzeugmaschinen wie diese, die fühlen, sich selbst überwachen, die Situation selbstständig bewerten und entsprechend reagieren.



Kai Litwinski hat über die Eigenschaften „seiner“ Maschine promoviert.

Prozessüberwachung ab dem ersten Span

Biniam Yohannes braucht keine Sensoren. Er misst die Veränderung der Antriebsströme, um Fräsprozesse an CNC gesteuerten Werkzeugmaschinen zu überwachen. „Wenn beim Fräsen die Positionen und Geschwindigkeiten der Achsen von den Sollwerten abweichen – weil beispielsweise eine Schneidkante des Werkzeugs ausbricht – ändern sich die Ströme in den Achsantrieben, um die vorgegebenen Sollwerte wieder zu erreichen.“ Diese Stromänderungen korrelieren also mit den Bearbeitungskräften. Also auch mit Kräften, die bei Werkzeug- und Prozessfehlern auftreten. „Die Antriebe zeigen sensorisches Verhalten“, fasst Yohannes zusammen. Das nutzt er, um zu überprüfen, was während des Bearbeitungsprozesses an der Schneide passiert.

Solche steuerungsasierten Prozessüberwachungen werden typischerweise in der Serienfertigung eingesetzt, wenn es sich lohnt, dem System zu Beginn beizubringen, welche Antriebsströme noch „gut“ sind, und wo die Grenze verläuft, ab der ein Strom auf eine Prozessabweichung hindeutet. Yohannes entwickelt aber ein Verfahren, das auch

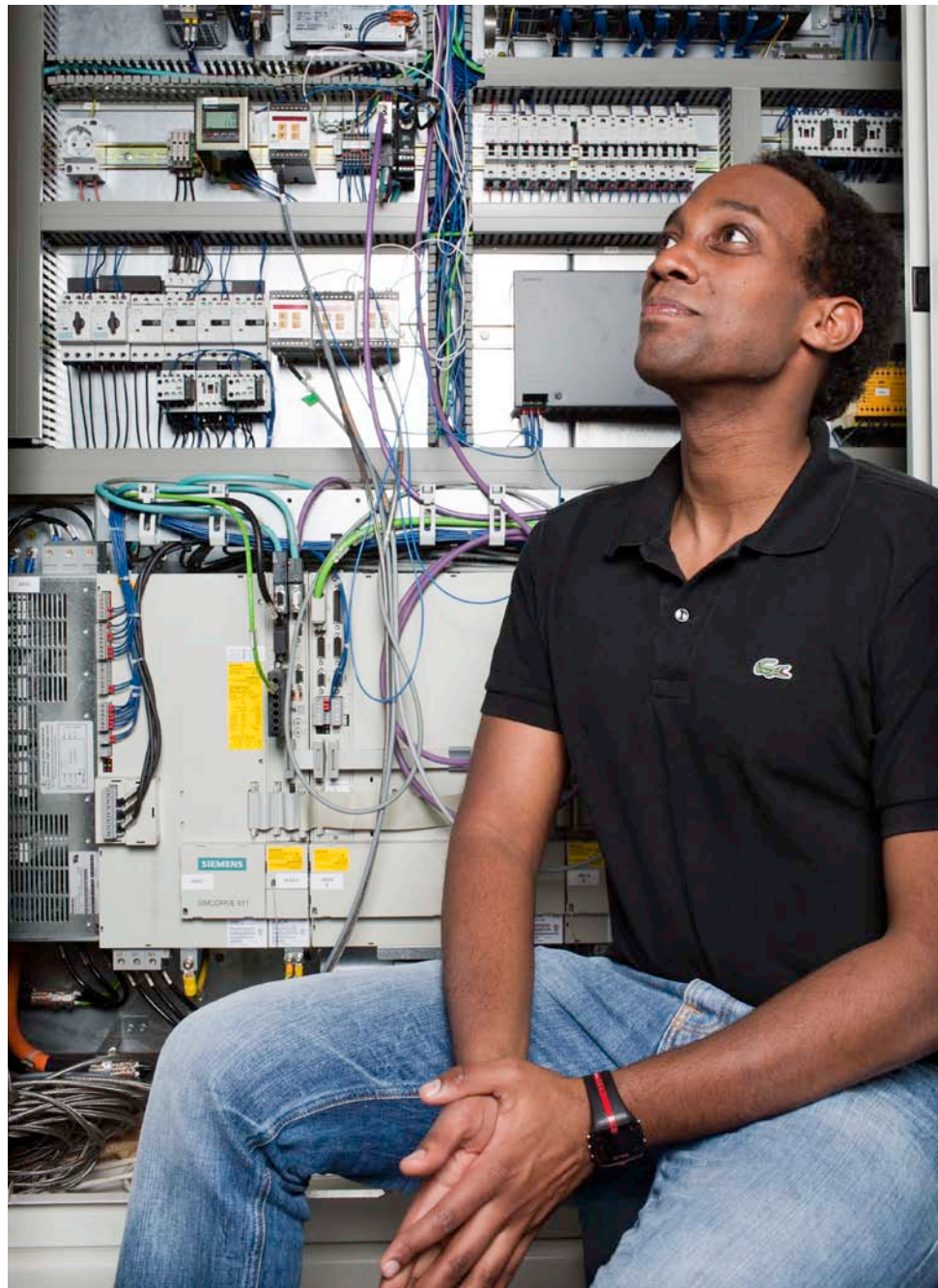
der Luftfahrtindustrie und dem Werkzeug- oder Formenbau nutzen soll. Dort werden in der Regel Kleinserien oder Einzelteile gefertigt – der „Worst Case“.

Was ist neu?

Wie bringt man der Prozessüberwachung bei, wann ein Antriebsstrom

auf einen Prozessfehler hindeutet, wenn man ihr keine Testläufe zum Lernen bieten kann? Yohannes zerlegt sozusagen die Antriebsströme in verschiedene Anteile und wertet sie in Echtzeit aus.

Dazu nutzt er unter anderem selbst entwickelte Prozessmodelle und statistische Verfahren. „Das



Biniam Yohannes wertet die Veränderung der Antriebsströme aus, um Fräsprozesse an CNC gesteuerten Werkzeugmaschinen zu überwachen.

Starke Führung, sensibel überwacht

Signal hat ein Grundrauschen. Das muss ich zulassen, um Fehlalarme zu vermeiden. Alles darüber hinaus wird bewertet. Die große Frage, die ich versuche zu beantworten ist: Wie definiere ich die Überwachungsgrenzen für einen unbekanntem Prozess?“ Schließlich soll das System so sensibel sein, dass es einen Fehler erkennt und die Maschine stoppt, bevor ein wertvolles Werkzeug bricht. Andererseits muss es so robust sein, dass es keine Fehlalarme produziert. Aktuell befindet sich das System im Anlauf für Tests unter industriellen Bedingungen.

Die Entwicklung geht weiter: Andere Wissenschaftler des Instituts für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen arbeiten daran, die Signalgüte der Ströme zu verbessern – damit könnte auch die Reaktionszeit, also die Zeit, bis das System den Prozess gestoppt hat, weiter verkürzt werden.

Wer braucht das?

Seine neue Überwachungsstrategie entwickelt Yohannes in einem bilateralen Industrie-Forschungsprojekt für ARTIS, ein führendes, international agierendes Unternehmen im Bereich der Werkzeug-, Prozess- & Maschinenzustandsüberwachung.

Grundsätzlich kann man sagen: Prozessüberwachung ist die neue Qualitätssicherung. „Früher hat man ein Bauteil gefräst und hinterher geguckt, ob es gut ist. Heute überwacht man den Prozess, und wenn der Prozess okay ist, ist auch das Bauteil okay.“

Jedes Mal, wenn der Stößel der Presse zum Umformen herunterfährt, wirkt eine Kraft, die dem Gewicht von etwa zehn Kleinwagen entspricht. Es liegt auf der Hand, dass auch die Presse selbst dabei beansprucht wird – vor allem, wenn sie pausenlos in der Produktion eingesetzt ist. Sergej Teichrib hat das Ziel, die Beanspruchung der Profilschienenführung zu überwachen, an der der Stößel auf- und niederfährt.

Die vorgespannten Wälzlager darin sorgen dafür, dass die Führung kein Spiel hat und sich der Stößel nicht in der Horizontalen verschieben kann. Der Nachteil der Führung: Sie reagiert empfindlich auf Stöße. Solche Belas-

tungen kann man bei einer Presse natürlich kaum vermeiden. Aber Teichrib möchte sie zumindest kennen, um den Zustand und die verbleibende Lebensdauer der Führung überwachen zu können. Deshalb klebt er dünn-schichtige Kraftsensoren zwischen die Führung und den Stößel, die die horizontalen Kräfte bei jedem Hub aufnehmen, umwandeln und zur Auswertung direkt ins Laptop schicken.

Was ist neu?

Man kann einen solchen superdünnen Kraftsensor nicht einfach kau-

fen. Das LNQE der Leibniz Universität, das Laboratorium für Nano- und Quantenengineering, stellt ihn mit einer Bedampfungsanlage für Teichrib her. „Der Sensor ist 60 Mikrometer dünn, also 0,06 Millimeter. Das müsste gerade noch passen: Die Führungsgenauigkeit der Schiene ist mit etwa 50 Mikrometer angegeben.“

Vielleicht, so die Zukunftsvision, lasse sich das, was der Sensor heute leistet, auch mit einer piezoresistiven Schicht erreichen, die direkt auf die Führung aufgedampft wird.

Wer braucht das?

Kennt man die horizontalen Kräfte, die im Betrieb wir-

ken, kann man die Lebensdauerformeln der Führungen damit füttern und so vorhersehen, wie lange sie noch halten werden. Ebenso spannend ist der Beitrag, den Teichrubs Ergebnisse für die Mehrkörpersimulation der Presse beisteuern: Wenn man zuvor ein Modell der Presse validieren konnte, kann man später echte Umformprozesse in einer Simulation abbilden und vorhersagen, welche Belastungen auftreten. Und die Führungen lassen sich bereits in der Entwicklungsphase optimal auslegen.



Sergej Teichrib hat die Beanspruchung der Profilschienenführung im Blick.