

# Kollaborierende Roboter

## Konzept und Realisierung eines biofidelen Messgeräts zur Begrenzung der Kollisionsbelastung auf Personen bei Arbeitsplätzen mit kollaborierenden Robotern

Hans Jürgen Ottersbach und Michael Huelke, Sankt Augustin

Im Bereich der Industrieroboter werden seit einigen Jahren Arbeitsplätze eingerichtet, bei denen Personen sehr eng mit Robotern zusammenarbeiten. Bei solchen Arbeitsabläufen können mit einem gewissen Restrisiko Kollisionen zwischen Mensch und Roboter stattfinden. Im Rahmen der erforderlichen Risikobeurteilung muss die dabei auftretende Belastung für kritische Kollisionsvorgänge mit einem biofidelen, also mechanisch menschenähnlichen Messgerät gemessen werden. Im Institut für Arbeitsschutz der DGUV (IFA) wurde ein solches Kraft-Druck-Messgerät für die betrieblichen Praxis entwickelt. Es erfasst und bewertet die vom Roboter einwirkende äußere Gesamtkraft und das lokale Druckmaximum in der Kollisionsfläche. Das Messgerät besitzt einen zweistufigen Kompressionsaufbau, der die Verformbarkeit an relevanten kollidierenden Körperstellen simuliert. Das Trägheits- und Bewegungsverhalten des menschlichen Körpers kann bei einem fixierten Messgerät nicht direkt mechanisch abgebildet werden. Dieses Verhalten wird daher im Messgerät flexibel softwaretechnisch realisiert. Das Kraft-Druck-Messgerät KDMG-KOLROBOT hilft den Betrieben, einen Arbeitsplatz mit dem kollaborierenden Roboter derart zu gestalten und zu parametrieren, dass die mechanische Körperbelastung auf den normativ zulässigen Bereich reduziert wird.

Im Bereich der Industrieroboter werden seit einigen Jahren Arbeitsplätze eingerichtet, bei denen Personen sehr eng mit Robotern zusammenarbeiten. Durch die Kombination von menschlichen Fähigkeiten und Fertigkeiten mit den genauen und präzisen Ausführungsfunktionen des Roboters lassen sich so sehr effektive

Fertigungsqualitäten bei Entlastung der beteiligten Personen erzielen (Bild 1). In den dabei angewendeten Sicherheitskonzepten muss der Arbeitsschutz für die beteiligten Personen durch normgerechte gestalterische Maßnahmen des Arbeitsplatzes und insbesondere des Robotersystems sichergestellt werden. Dabei sind

Kollisionen zwischen Mensch und Maschine maximal zu verhindern. Hierzu steht eine Vielzahl von risikomindernden Maßnahmen zur Verfügung.

Bei solchen Arbeitsabläufen können jedoch mit einem gewissen Restrisiko Kollisionen zwischen Mensch und Roboter eintreten, wobei der „vorhersehbare



**Bild 1** Beispiele für Kollaborationstätigkeiten von Mensch und Roboter. links: bei der Armaturenmontage, rechts: als Hebe- und Positionierungshilfe beim Schweißen

Hauptbereiche des Körpermodells		Einzelbereiche des Körpermodells	Grenzwerte		
			KQK in N	STK in N	DFP in N/cm <sup>2</sup>
1. Kopf mit Hals	1.1	Schädel/Stirn	130	175	30
	1.2	Gesicht	65	90	20
	1.3	Hals (Seiten/Nacken)	145	190	50
	1.4	Hals (vorne/Kehlkopf)	35	35	10
2. Rumpf	2.1	Rücken/Schultern	210	250	70
	2.2	Brust	140	210	45
	2.3	Bauch	110	160	35
	2.4	Becken	180	250	75
	2.5	Gesäß	210	250	80
3. Obere Extremitäten	3.1	Oberarm/Ellenbogengelenk	150	190	50
	3.2	Unterarm/Handgelenk	160	220	50
	3.3	Hand/Finger	135	180	60
4. Untere Extremitäten	4.1	Oberschenkel/Knie	220	250	80
	4.2	Unterschenkel	140	170	45
	4.3	Füße/Zehen/Gelenk	125	160	45

Grenzwerte für Kräfte und Drücke nach Körperbereichen des Körpermodells.

KQK: Klemm-/Quetschkraft – STK: Stoßkraft – DFP: Druck/Flächenpressung

Missbrauch“ in der Risikobeurteilung ausreichend Beachtung finden muss. Innerhalb der aktuell laufenden Überarbeitung der Normen für Industrieroboter wurden hierzu vom Institut für Arbeitsschutz der DGUV (IFA) neue sicherheitstechnische Anforderungen insbesondere für die biomechanisch/medizinische Beanspruchbarkeit des Menschen bei Kollisionen erarbeitet, siehe „Empfehlungen zur Gestaltung von Arbeitsplätzen mit kollaborierenden Robotern (EGU), 02/2011“, im Folgenden kurz „Empfehlungen“ genannt. Hierin werden u. a. Grenzwerte für belastende Kräfte und Drücke angegeben, die bei diesen Kollisionen nicht überschritten werden dürfen und bei deren Einhaltung es daher nicht zu unakzeptablen Körperbeanspruchungen kommen kann (Tabelle).

Wenn bei einer Arbeitsplatzapplikation mit einem kollaborierenden Roboter im Rahmen der erforderlichen Risikobeurteilung festgestellt wird, dass es zu Kollisionen kommen kann, muss die dabei auftretende Belastung für kritische Kollisionsvorgänge der kollaborierenden Tätigkeiten gemessen und mit den zulässigen Grenzwerten überprüft werden. Hierzu ist ein biofideles Messgerät zu verwenden, mit dem das biomechanische Verhalten für betroffene Körperbereiche einer Person in der betrachteten Arbeitstätigkeit simuliert und dabei die vom Roboter einwirkenden Kräfte und Drücke gemessen werden können.

## Messgeräteentwicklung

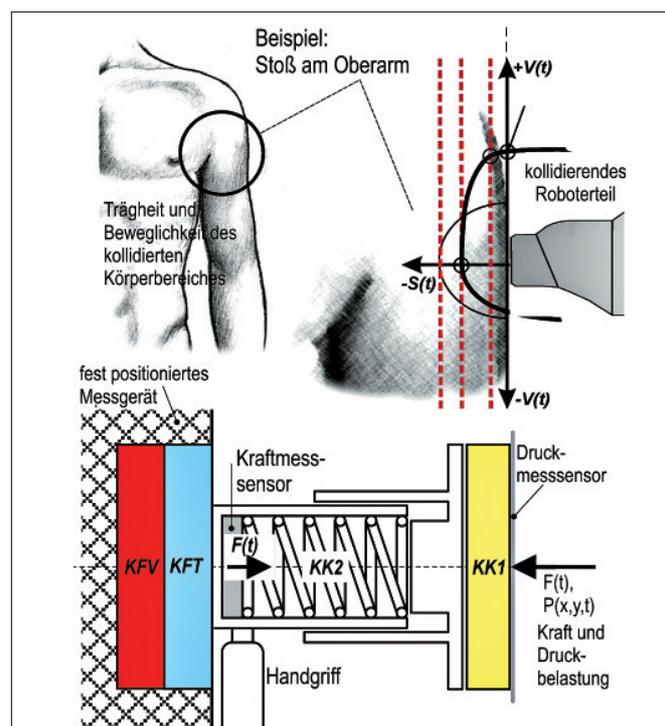
Für die o. g. Simulation biomechanischen Körperverhaltens und die Messung der mechanischen Belastung wurde

im IFA das Kraft-Druck-Messgerät „KDMG-KOLROBOT“ entwickelt, das im Rahmen von Risikobeurteilungen in der betrieblichen Praxis eingesetzt werden kann. In Bild 2 werden das biofidele Messkonzept und in Bild 3 die wichtigsten Aspekte der technischen Realisierung dargestellt.

Das Messgerät berücksichtigt die wesentlichen biomechanischen Körper-eigenschaften: Verformbarkeit, Trägheitsverhalten und Bewegungsverhalten kollidierter Körperbereiche und realisiert die messtechnische Erfassung und Bewertung der bei einer Kollisionsbelas-

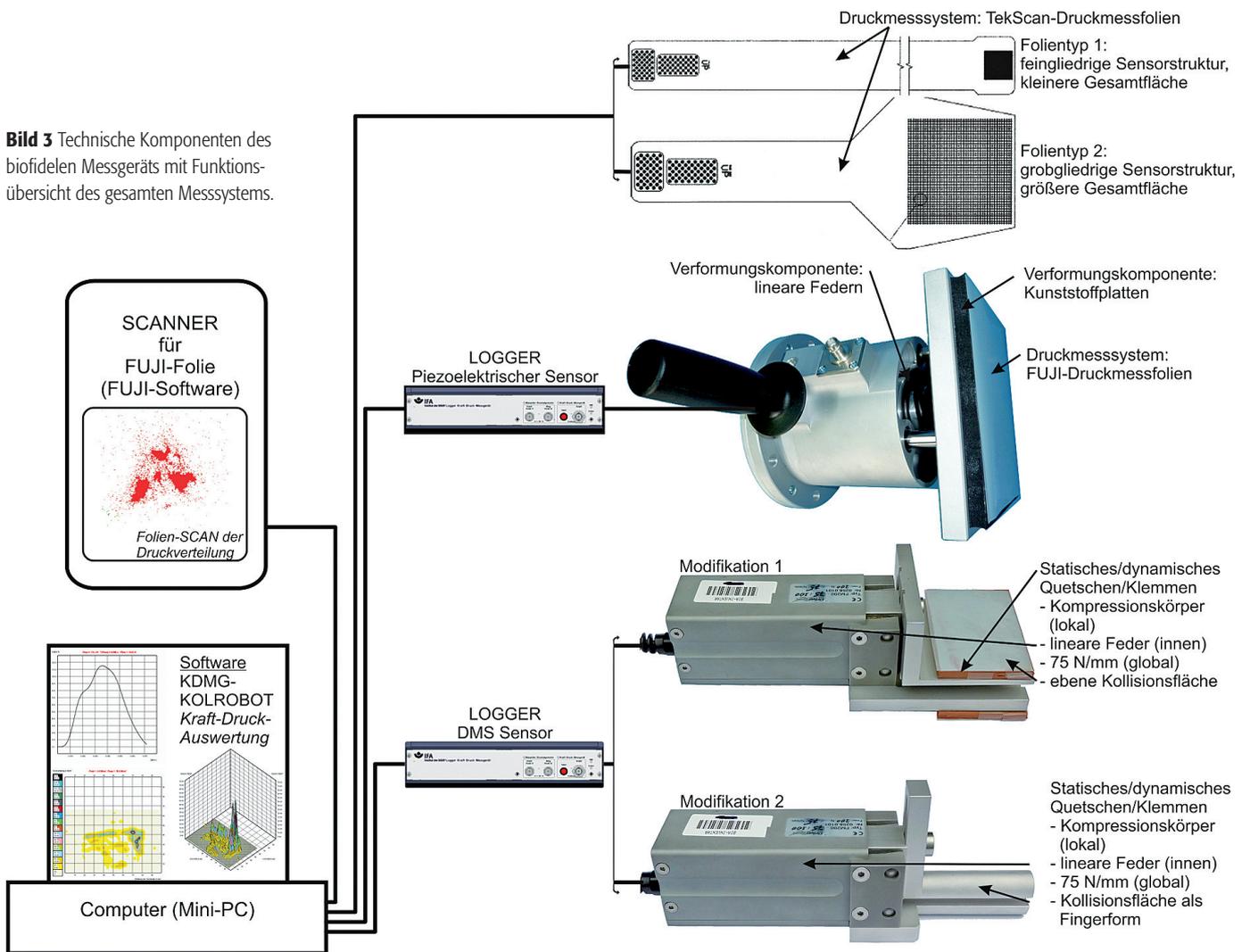
tung auftretenden äußeren Gesamtkraft und lokaler Druckmaxima in der Kollisionsfläche.

Zwei Messgerätetypen zur Körpersimulation und Aufzeichnung von Klemm-/Quetsch- oder Stoßimpulsen für die flexible Anwendung in unterschiedlichsten Kollisionsumgebungen stehen zur Verfügung (Bild 3). Die Abmessungen dieser Messgerätetypen sind relativ gering, daher sind die Geräte jeweils leicht handhabbar. Sie erlauben eine vielseitige Montage und ermöglichen daher eine umfangreiche praxisgerechte Anwendung. Dies ist im Hinblick auf



**Bild 2** Konzept des biofiden Messgeräts mit den wesentlichen biomechanischen und messtechnischen Eigenschaften. (KK1 und KK2: Kompressionselement; KFT und KfV: softwaretechnische Anpassung der Messsignale für das Trägheits- und Bewegungsverhalten des kollidierten Körperbereichs)

**Bild 3** Technische Komponenten des biofidelen Messgeräts mit Funktionsübersicht des gesamten Messsystems.



das Ziel einer zukünftigen normgerechten weltweiten Standardisierung solcher biofidelen Messgeräte sehr vorteilhaft.

### Physikalisch-/biomechanische Eigenschaften des Messgeräts

Kraft-Weg-Messsignale der Verformungen vieler Körperstellen zeigen ein großes Spektrum an Verformungscharakteristiken. Verformungskennlinien mit deutlich ausgeprägten linearen Tendenzen lassen sich genauso beobachten wie Kennlinien mit weichem Anstieg zu Beginn und dann schnell wechselndem härterem Kraftanstieg. In die Verformbarkeit einer Körperstelle fließt ebenfalls je nach Körperpunkt und -haltung auch die Körpersteifigkeit des weiter außen liegenden Körperumfelds oder die Anbindungssteifigkeit einer Extremität an den Rumpf mit ein. Die biofidele Nachbildung der Verformbarkeit in einem Messgerät muss ausgehend von dieser komplexen Vielfalt an Verformungskennlinien auf einfache und klar zu parametrisierende mechanische Verformungselemente zurückgeführt werden. Für das Messgerät wurden daher diese Verformungskennlinien

aus Messungen mit Probanden ausgewertet und auf zwei Steigungskoeffizienten reduziert.

Dieses Verfahren wurde für viele verfügbare Kennlinien, strukturiert nach den in den Empfehlungen beschriebenen 15 Körpereinzelnbereichen angewendet. Aus diesen Daten wurde dann für jeden Körpereinzelnbereich ein typisches Verformungskennwertepaar von Steigungskoeffizienten – KK1/KK2 (Bild 2) – spezifiziert. Im Messgerät wird die gesamte Verformbarkeit dann mittels zweier hintereinander liegender Kompressionselemente mit diesen Parametern technisch realisiert. Damit soll die biofidele Verformbarkeit relevanter Körperbereiche hinreichend und reproduzierbar spezifiziert sein. Ein komplexeres Modell der Verformbarkeit oder auch eine höhere Auflösung an Körperbereichen als Grundlage für die technische Realisierung in einem biofidelen Messgerät ist für die Anwendung in der betrieblichen Praxis nicht sinnvoll.

Wenn ein kollidierter Körperteil nicht eingequetscht wird, kommt es in der Regel bei der Kollision zu Trägheitseffekten an der Kollisionsstelle. Der Körperbe-

reich, z. B. der Kopf oder die Hand-Arm-Extremität, wird beim Stoß durch den kollidierenden Körper beschleunigt. Dieses Körperverhalten hat eine mehr oder weniger hohe Dämpfungswirkung auf die einwirkenden Kräfte und Drücke, die bei der Messung berücksichtigt werden müssen. Gegenüber dem fest fixierten Messgerät, mit dem eine Messung genau und reproduzierbar durchgeführt werden kann, wäre der tatsächliche Impuls durch eine Trägheitsbewegung des betroffenen Körperbereichs geringer ausgefallen. Die fix gemessenen Signale müssen auf Trägheit hin angepasst werden. In Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF in Magdeburg wurden Korrekturfunktionen für das Trägheitsverhalten bestimmter Körperpunkte (Körpereinzelnbereiche) und typischer Körperhaltungen mittels Pendelversuchen an Probanden systematisch ermittelt. Die Dämpfungswirkung der Körperträgheit wird daher mit einer Korrekturfunktion – KFT (Bild 2) – bei der softwaretechnischen Auswertung des gemessenen Kollisionsimpulses berücksichtigt. Durch Fest-

legung des betroffenen Körperpunkts und der Körperhaltung beim Stoß wird in der Auswertesoftware automatisch ein Korrekturwert zur Berücksichtigung des realen Trägheitsverhaltens bestimmt und die Messsignale damit angepasst (Bild 4).

Eine weitere Korrekturfunktion berücksichtigt den Einfluss einer evtl. vorhandenen Kollisionsgeschwindigkeit des Körperteils bei der Kollision. Gegenüber dem fest fixierten Messgerät wäre der tatsächliche Kollisionsimpuls bei einer Bewegungskomponente des kollidierten Körperteils stärker ausgefallen (Bild 4). Durch die Angabe einer Kollisionsgeschwindigkeit des Körperpunkts zum Zeitpunkt des Aufpralls wird in der Auswertesoftware automatisch ein Korrekturwert zur Berücksichtigung des realen Bewegungsverhaltens bestimmt und die Messsignale damit wieder angepasst.

### Messtechnische Eigenschaften des Messgeräts

Die Gesamtkraft und die Druckverteilung werden mit den Messgerätetypen einaxial gemessen. Der Kraftmessbereich beträgt 0 bis 300 N. Das Kraftsignal wird über einen Logger mit einer Abtastfrequenz von 25 kHz aufgezeichnet. Die maximale Messzeit kann dabei bis zu 40 s betragen. Das Kraftsignal wird mit einem Butterworth-Tiefpassfilter CFC1000 nach SAE J211 (Spezifikationen aus der Kfz-Messtechnik) gefiltert. Bei der Kraftauswertung wird das Kraftsignal mit Algorithmen nach Stoßwirkungen und Klemm-/Quetschwirkungen untersucht. Zur Ermittlung von Klemm-/Quetschwirkungen wird ein gleitender Mittelwert mit einem Zeitfenster von 0,5 s verwendet, der über das gesamte Messsignal geführt wird. Sie sind gegeben, wenn die Streuung der Kraftwerte in einem solchen Intervall  $\leq 5$  N beträgt. Als kritischste Klemm-/Quetschwirkung wird aus diesen Intervallen dasjenige mit dem größten Kraftmittelwert ermittelt. Die Klemm-/Quetschwirkung wird dann als akzeptabel bewertet, wenn dieser Mittelwert kleiner oder gleich dem entsprechenden Grenzwert für Klemmen/Quetschen (KQK) nach den Empfehlungen ist.

Signalanteile, die außerhalb von Intervallen mit Klemm-/Quetschwirkungen liegen, werden dann auf Stoßwirkungen (Peaks) untersucht. Ein so berechneter maximaler Peak wird als eine akzeptable Belastung bewertet, wenn der Spitzenwert wiederum kleiner oder gleich dem entsprechenden Stoßgrenzwert (STK) nach den Empfehlungen ist.

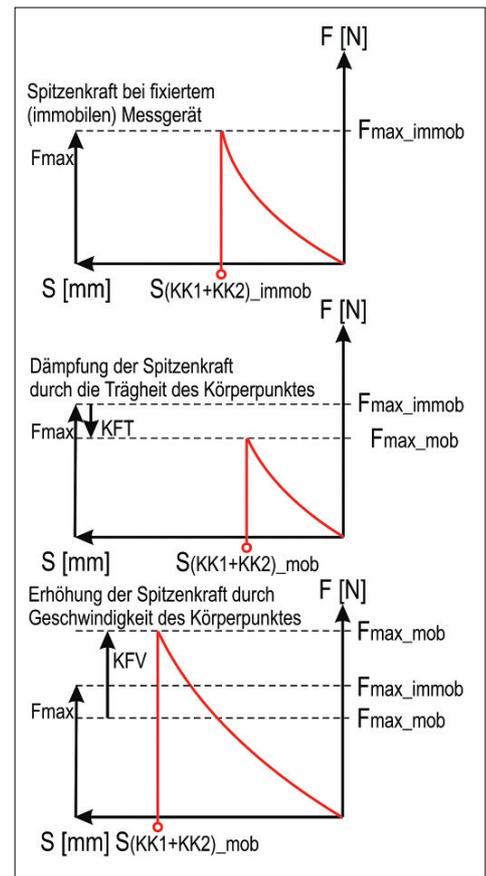
Die Druckmessung wird mit dünnen Druckmessfolien mit geometrischer und zeitlicher Druckauflösung durchgeführt. Die erforderliche geometrische Auflösung der Druckverteilungsmessung hängt von der kollidierenden Objektform und deren Steifigkeit ab und muss situativ gewählt werden. Eine Auflösung unterhalb von  $1 \text{ mm}^2$  erscheint nach den bisherigen Erfahrungen nicht sinnvoll und ist daher in diesem Messgerät als Grenzauflösung festgelegt. Durch die Verwendung verschiedener Folientypen kann der druckkritische Bereich in der Kollisionsfläche und damit die erforderliche geometrische Auflösung der Druckelemente sukzessive ermittelt werden. Bei zeitdiskreten Messungen wird das Druckeinzelnsensor-Zeit-Signal ebenfalls mit dem Butterworth-Tiefpassfilter CFC1000 nach SAE J211 gefiltert. Analog der Kraftauswertung werden die Druckverteilungsmessungen algorithmisch auf Stoß- sowie Klemm-/Quetschwirkungen hin untersucht und bewertet.

Die Stoß- oder Klemm-/Quetschseiten der Messgerätemodule sind standardmäßig eben ausgeführt. Die ebene Grundfläche beträgt  $160 \times 160$  mm, optional ist eine weitere montierbare Fläche von  $160 \times 250$  mm verfügbar. Es können jedoch auch andere Flächenformen adaptiert werden.

### Technische Realisierung

Ein Überblick des im IFA aktuell realisierten Messsystems ist in Bild 3 dargestellt. Es ist modular aufgebaut und besitzt zwei verschiedene biofidele Messgerätetypen: Messgerätetyp 1 mit einem piezoelektrischem Sensor und großer axial liegender Stoßfläche und Messgerätetyp 2 mit einem DMS-Sensor und externer Gabelkonstruktion für geringe Spaltbreiten. Mit den Konstruktionseigenschaften dieser beiden Gerätetypen können in der betrieblichen Praxis viele Kollisionsfälle simuliert werden.

Die Messgeräte des Typs 1 besitzen einen zweistufigen Kompressionsaufbau aus Kunststoffdämpfungselementen und Federn, mit denen die Verformbarkeit an den relevanten Körperpunkten simuliert wird. Je nach betroffenem Körpereinzeltbereich werden solche Elemente und Federn mit ihren linearen Koeffizienten eingesetzt, wie sie für den Körpereinzeltbereich in den Anforderungen spezifiziert sind. Die Kraft wird mit einem piezoelektrischen Kraftsensor hinter den Kompressionselementen gegen eine fixe Position gemessen. Zur Aufnahme der

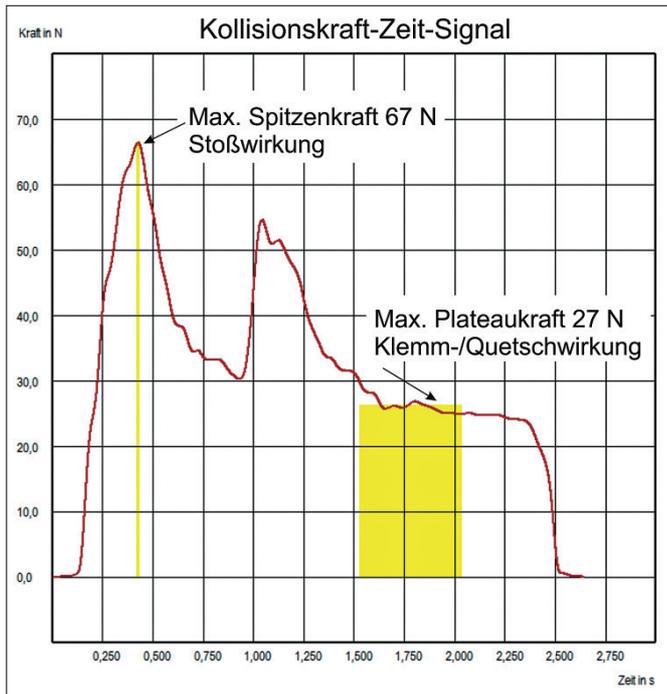


**Bild 4** Der Einfluss von Körperträgheit und Bewegungsverhalten (mobil) auf das Kraftmesssignal bei feststehendem (immobilen) Messgerät.

Daten steht ein Datenlogger zur Verfügung. Nach dem Versuch werden die Kraftdaten in den PC übertragen. Das gesamte Mess- und Auswertesystem wird komplett mit einer hierfür entwickelten Mess- und Auswertesoftware über einen Mini-PC betrieben.

In Bild 3 ist der Messgerätetyp 2 in zwei Varianten mit unterschiedlichen Kollisionsflächen (eben und fingerförmig) abgebildet. Bei Typ 2 wird die Kompression in der seitlichen Gabelkonstruktion herbeigeführt, die formtechnisch nach Anwendungsbedarf vielseitig zusammen gesteckt werden kann.

Zurzeit sind zwei verschiedene Druckmesssensoren einsetzbar: Fujifilm-Druckmessfolien und TEKSCAN-Druckmessfolien. Die Fujifilm-Druckmessfolie ist ein Spitzendruckmesssystem mit einer geometrischen Druckauflösung von 200 dpi. Nach Einsatz der Fujifilm-Druckmessfolie wird die belastete Folie – sie zeigt eine druckabhängige Rot-Dichte in der Kollisionsfläche – mit einer Auflösung von 200 dpi gescannt und die Einzelpixel in Druckwerte umgerechnet. Es können verschiedene Folientypen mit unterschiedlichen Messbereichen eingesetzt werden. Ein entsprechender Scan-



**Bild 5** Kraft-Zeit-Signal eines kritischen Kollisionsimpulses an einer spezifischen Körperstelle.

ner und eine dazugehörige Software von der Fa. Fujifilm sind im System enthalten.

Das TEKSCAN-Druckmessfoliensystem ist ein zeitdiskretes Druckmesssystem, wobei verschiedene Folien mit unterschiedlichen geometrischen Auflösungen und Messflächen bis in den Bereich unter 1 mm<sup>2</sup> eingesetzt werden können.

### Messbeispiele

In den Bildern 5 bis 7 sind Beispiele für Kraft- und Druckmessungen dargestellt. Bild 5 zeigt einen Kraft-Zeit-Verlauf von ungefähr 2,5 s Dauer. Der Signalverlauf zeigt zwei aufeinanderfolgende Kraftspitzen und im hinteren Bereich eine Plateaucharakteristik. Das Messsignal wurde nach dem oben beschriebenen Verfahren ausgewertet. Danach wurden die beiden Signalspitzen als Stoßkräfte identifiziert, wobei der maximale Spitzenwert der beiden mit dem zulässigen Grenzwert überprüft wurde. Bei dieser Kollision handelte es sich um die Simulation einer Belastung im Brustbereich, für die ein Stoßkraftgrenzwert von 210 N gilt. Die maximale erste Spitzenbelastung des Kraftsignals von 67 N kann daher als akzeptable Belastung bewertet werden. Im hinteren Signalbereich wurden mehrere Intervalle von 0,5 s Länge gefunden, in denen die Kraftstreuung  $\leq 5$  N beträgt. Das Intervall mit dem höchsten Mittelwert von 27 N liegt zwischen etwa 1,5 und 2,0 s. Die davon ausgehende Klemm-/Quetschgefährdung wird mit dem zuläs-

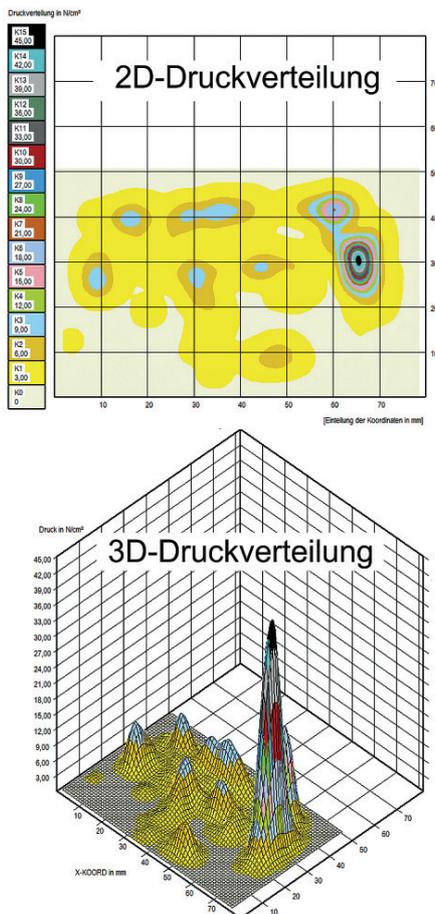
sigen Grenzwert von 140 N für den Brustbereich bewertet. Auch hier kann die Kraftbelastung von 27 N als akzeptabel eingestuft werden.

In Bild 6 ist eine Druckverteilung in zweidimensionaler und dreidimensionaler Ansicht dargestellt. Sie wurde mit einer Fujifilm-Folie als Spitzendruckmessgerät gemessen und ist zeitlich dem höchsten Kraftmaxima des vorher genannten Kraftsignals zuzuordnen. Der Messbereich von 45 N/cm<sup>2</sup> wurde dabei farblich in 15 Einzelkategorien mit einer Breite von jeweils 3 N zur besseren Einsicht eingeteilt. In der dreidimensionalen Darstellung ist sehr deutlich zu sehen, dass das Druckmaximum von einer örtlichen Druckspitze gebildet wird. Der Maximalwert betrug 41 N/cm<sup>2</sup>. Für den Brustbereich beträgt der zulässige Druckgrenzwert 45 N/cm<sup>2</sup>, sodass diese Druckbelastung als akzeptabel bewertet werden kann.

Als weiteres Messbeispiel ist in Bild 7 der Kraftverlauf und die Druckverteilung für eine Klemm-/Quetschbelastung der simulierten Hand zwischen zwei Greiferfingern eines Robotertools dargestellt. In der Druckverteilung ist deutlich der Rückgang der Belastung im Laufe der Entfernung von der Einspannstelle sowie der Konstruktionsart der Greiferfinger zu sehen. Auch hier wurden die Auswertegrößen für Stoß- und Klemm-/Quetschwirkung sowie das Druckmaxima ermittelt und bewertet.

### Ausblick

Das Mess- und Auswertegerät KDMG-KOLROBOT berücksichtigt durch seine Konstruktion mit dem zugrunde liegenden Mess- und Auswerteprinzip hinreichend genau die mechanisch/biomechanischen Eigenschaften und das Bewegungsverhalten differenzierter Körperbereiche in strukturierten Tätigkeitshaltungen. Es stellt durch die Realisierung der nach den Empfehlungen zur Gestal-



**Bild 6** Messsignal der Druckverteilung (Spitzenwerte mit FUJI-Druckmessfolie) eines kritischen Kollisionsimpulses an einer spezifischen Körperstelle.

### Weiterführende Informationen

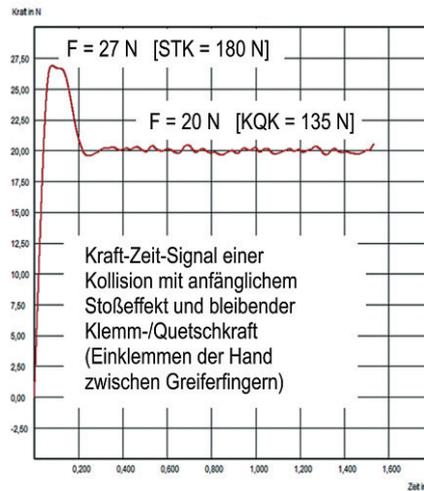
Empfehlungen zur Gestaltung von Arbeitsplätzen mit kollaborierenden Robotern (EGU), 02/2011 (EGU: Empfehlungen Gefährdungsermittlung der Unfallversicherungsträger) Fachinformationsseite des IFA: [www.dguv.de/ifa](http://www.dguv.de/ifa), Webcode d130086 oder [www.dguv.de/ifa/de/fac/kollaborierende\\_roboter/index.jsp](http://www.dguv.de/ifa/de/fac/kollaborierende_roboter/index.jsp)

tung von Arbeitsplätzen mit kollaborierenden Robotern gegebenen Vorgaben für kritische Kollisionsvorgänge eine gute Grundlage für ein normgerechtes reproduzierbares Standardmessverfahren dar. Das Messgerät kann damit für die Prüfung der von der Normensetzung her erforderlichen sicherheitstechnischen Anforderungen auf dem aktuellen technischen Stand eingesetzt werden. Laufende Prüfungen und Zertifizierungen von kollaborierenden Robotern bestätigen dies. Aufgrund des modularen Auf-

## Autoren



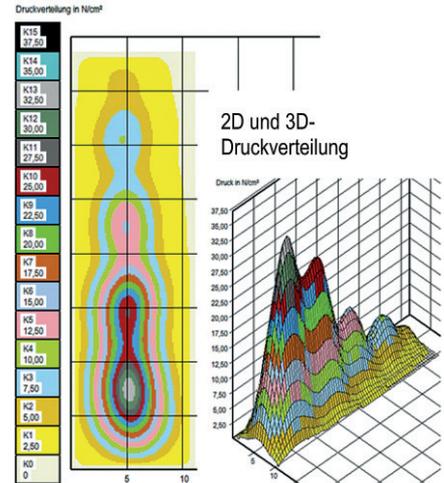
Dipl.-Ing. **Hans Jürgen Ottersbach**,  
Dr. **Michael Huelke**, Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA), Sankt Augustin.



**Bild 7** Kraft-Zeit-Signal.

baus ist es entwicklungs offen und es können weitere Messgerätetypen integriert werden. Dies gilt auch für die messtechnischen Eigenschaften und Komponenten.

Durch den Einsatz des Messgeräts kann bei entsprechenden konstruktiven Gestaltungsmaßnahmen des Arbeitsplatzes oder Parametrisierungen des Robotersystems die Körperbelastung bei evtl. eintretenden Kollisionsprozessen unter die angegebenen Grenzbelastungen der



Empfehlungen reduziert werden. In diesem so angelegten Messgerätedesign auf der Basis des in den Empfehlungen zugrunde liegenden Beanspruchungsmodells können die in den nächsten Jahren zu erwartenden weiteren Forschungsergebnisse und normativen Anforderungen integriert werden. Mittelfristig soll der KDMG-KOLROBOT in Lizenz von externen Messgeräteanbietern gefertigt und vertrieben werden.