



Überwachung der raumzeitlichen Bewegung eines Fertigungsroboters mit Hilfe eines Lasertrackers

M. Juretzko, M. Hennes,
M. Schneider, J. Fleischer



ALLGEMEINE VERMESSUNGS-NACHRICHTEN

Dieser Beitrag wurde nach Begutachtung als
PEER REVIEWED PAPER
angenommen.

Tag der Einreichung: 20. Dezember 2007

Bei einem innovativen Fertigungsverfahren zur Herstellung von Strangpressprofilen (z.B. für den Fahrzeugbau) werden Industrieroboter eingesetzt, die eine raumzeitlich exakt definierte Bewegung durchzuführen haben. Zur Überprüfung dieser Bewegung war es notwendig, einen Lasertracker mit dem Steuersystem des Roboters zu synchronisieren. Es konnten sehr charakteristische und für den Produktionsprozess entscheidende Abweichungen von der vorgegebenen Bahn des Roboters sowie eine außerordentlich hohe kinematische Wiederholgenauigkeit festgestellt werden.

1 Einleitung

Bei der Entwicklung neuer Fertigungsverfahren spielen Industrieroboter heutzutage eine immer wichtigere Rolle. Durch die Weiterentwicklungen auch im Bereich der Steuerungen der letzten Jahre können auch komplizierte Bewegungsabläufe auf relativ einfache Art und Weise programmiert und diese sehr genau umgesetzt werden. Dabei ist es erforderlich, durch eine unabhängige Messmethode nachzuweisen, wie präzise die durch die Steuerung vorgegebenen Sollbahnen von der Kinematik umgesetzt und die vorgegebenen räumlichen Positionen vom Roboter angefahren werden. Das vorgestellte Projekt beschreibt die vermessungstechnische Überprüfung eines innovativen, robotergestützten Verfahrens zur Herstellung räumlich gekrümmter Strangpressprofile. Die besondere

Herausforderung für die Vermessung ist dabei die Synchronisierung des eingesetzten Lasertrackers mit dem Industrieroboter im Mikrosekundenbereich.

2 Raumzeitliche Bewegung des Fertigungsroboters

2.1 Fliegende Abtrennvorrichtung

Das wbk Institut für Produktionstechnik der Universität Karlsruhe erforscht im Sonderforschungsbereich Transregio 10 (SFB/TR 10) zusammen mit weiteren universitären Forschungseinrichtungen der Universitäten Dortmund und München Prozessketten und Methoden für die automatisierte und produktflexible Herstellung leichter Tragwerksstrukturen. Anwendungsbeispiele für die Verwendung leichter Tragwerksstrukturen sind z.B. in der Verkehrstechnik zu finden. Hier können räumlich gekrümmte Profile zu Space-Frame Strukturen gefügt und für den Fahrzeugbau verwendet werden.

Ausgangspunkt der Prozesskette ist das Fertigungsverfahren „Runden beim Strangpressen“. Dieses Verfahren ist eine am Institut für Umformtechnik und Leichtbau der Universität Dortmund entwickelte Verfahrensvariante zum konventionellen Strangpressen. Hierbei wird der aus der Presse austretende Aluminiumstrang mit einem vor der Strangpresse befindlichen Führungswerkzeug seitlich so abgelenkt, dass ein gekrümmtes Profil entsteht (Abb. 1). Durch die über die gepresste Länge veränderliche Zustellung des Führungswerkzeuges ist die Fertigung nahezu beliebig geformter Konturverläufe möglich [1].

Die beim Runden hergestellten Strangpressprofile müssen während des Herstellprozesses gegen Schwer- und Beschleunigungskräfte abgestützt werden, um zusätzliche Verformungen zu vermeiden und eine gute Konturgenauigkeit zu gewährleisten. Am wbk Institut für Produktionstechnik wurde hierzu in der ersten Phase des SFB/TR 10 im Teilprojekt A4 eine fliegende Abtrennvorrichtung entwickelt und prototypisch umgesetzt, mit der ein rückwirkungsfreies Führen und Trennen des Aluminiumstrangs sowie eine halbautomatisierte Übergabe der abgetrennten Strangpressprofile ermöglicht wird (Abb. 1). Beim Konzept der fliegenden Abtrennvorrichtung werden zwei Industrieroboter verwendet, die mit speziell entwickelten Werkzeugen ausgestattet wurden. Das Werkzeug

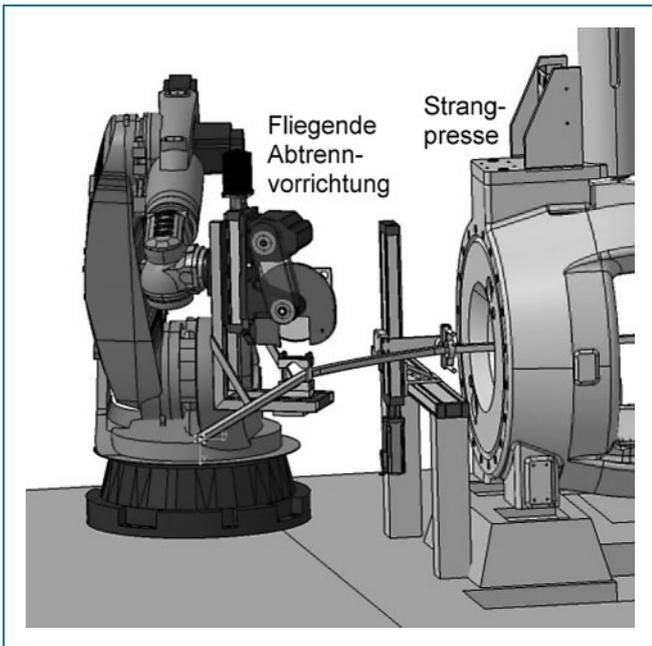


Abb. 1: Fertigungssystem

zum Führen und Trennen des Strangpressprofils besteht aus einer an einer Linearachse verfahrbar angebrachten Kreissägeneinheit, einer Spannachse zur Aufnahme der auftretenden Kräfte beim Trennen, sowie einer zusätzlichen Einheit aus hochdynamischen Zusatzachsen zum Führen des Profils. Das Übergabewerkzeug des zweiten Roboters besteht ebenfalls aus einer Einheit aus hochdynamischen Zusatzachsen zum Führen des Profils, sowie einer Spannachse zum sicheren Greifen des abgetrennten Profilstücks [2]. Da beim Herstellungsprozess mehrere Werkzeuge gleichzeitig in Kontakt mit dem Aluminiumprofil sind, müssen die Bewegungen der einzelnen Komponenten zeitlich synchronisiert werden. Um dies zu ermöglichen, wurde eine übergeordnete NC-Steuerung entwickelt, welche alle bewegten Achsen des Gesamtsystems über eine Art elektronisches Getriebe miteinander koppelt, und durch die Vorgabe von offline erstellten Sollwertbahnen eine synchrone Bewegung sicherstellt [3]. In der aktuellen Entwicklungsphase des Teilprojekts A4 liegt der Fokus der vermessungstechnischen Arbeiten auf der Überprüfung und Optimierung der Bahnen der Führungswerkzeuge. Auswirkungen des Temperaturverlaufs im Strangpressprofil auf die Bahn der Führungswerkzeuge bleiben in dieser Phase vorerst ebenso unberücksichtigt wie die Wirkung des sehr komplexen Temperaturfeldes der Umgebung auf das Messverhalten des Lasertrackers. Primär soll in der aktuellen Phase ein Vergleich von geplanter zu tatsächlich gefahrener Bahn der fliegenden Abtrennvorrichtung vorgenommen werden, um in einem weiteren Schritt die Genauigkeit der hergestellten Strangpressprofile durch eine Inline-Kalibrierung zu erhöhen.

Da der hergestellte Strang die Strangpresse mit einer bestimmten Geschwindigkeit verlässt, ist es nicht nur erforderlich, dass die tatsächliche Bahn der fliegenden Abtrennvorrichtung geometrisch mit der geplanten Bahn übereinstimmt. Es ist zudem noch notwendig, dass der In-

dustrieroboter das Führungswerkzeug auch zur richtigen Zeit am richtigen Ort positioniert und kontinuierlich die exakt raumzeitliche Zuordnung gewährleistet. Um eine Überprüfung dieser Bahnen zu ermöglichen, ist eine Synchronisation von Fertigungsroboter und Lasertracker erforderlich.

2.2 Roboter

Für die fliegende Abtrennvorrichtung wird ein Industrieroboter vom Typ KR 210-2 der Firma KUKA aus Augsburg verwendet. Dieser 6-achsige Vertikal-Knickarmroboter hat eine Reichweite bis zu 3 m und ist in der Lage, Traglasten bis zu 210 kg zu handhaben. Typische Anwendungsgebiete für diese Art von Industrierobotern sind Schweißprozesse sowie das Montieren und Bearbeiten von Werkstücken. Der Hersteller gibt die Wiederholgenauigkeit des zusätzlich kalibrierten Roboters mit $\pm 0,12$ mm an. Die im Weiteren beschriebenen Untersuchungen beziehen sich immer auf die Position des an der Roboterhand adaptierten Werkzeugs, das mit einer Aufnahmeeinrichtung für einen Retroreflektor (Cateye) ausgerüstet wurde und im Folgenden als „Tool Center Point“ (TCP) bezeichnet wird.

3 Synchronisierte Messung

3.1 Messverfahren

Für die detaillierte Vermessung der Bahn des TCP wurde ein Lasertracker LTD500 von Leica eingesetzt. Lasertracker (Abb. 2) sind hochgenaue polare Messsysteme zur Bestimmung von Raumkoordinaten mit einem Messradius von bis zu 35 m. Die Koordinatenmessgenauigkeit des LTD500 wird vom Hersteller mit ± 10 ppm (2σ) für statische und ± 40 ppm (2σ) für bewegte Ziele angege-

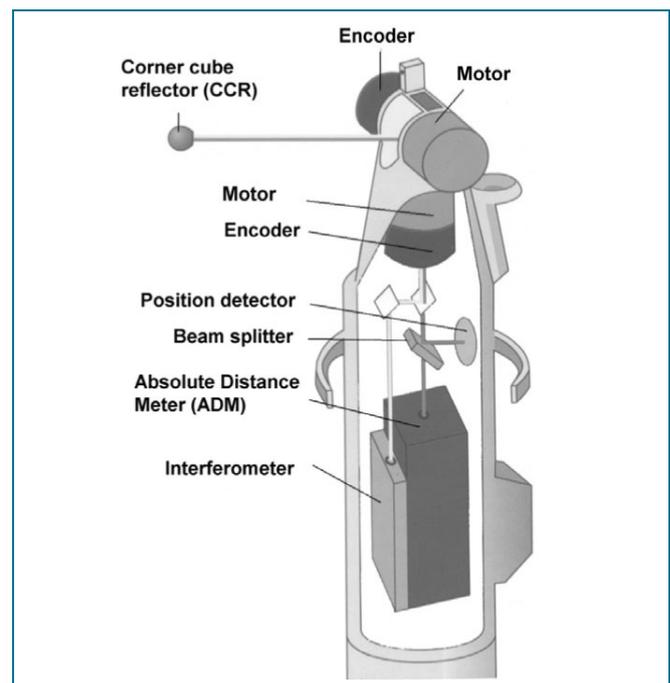


Abb. 2: Lasertracker LTD500 (Bild: Leica)

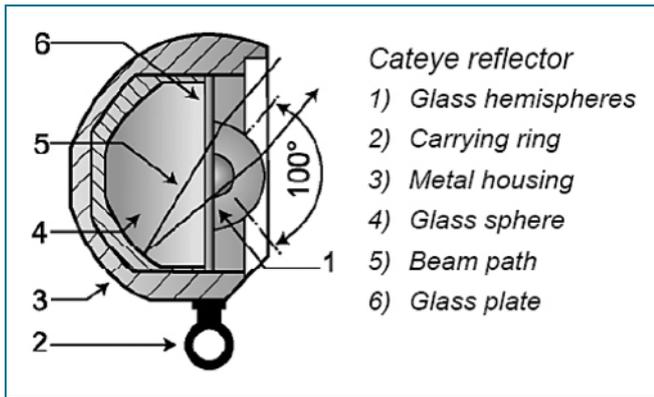


Abb. 3: Cateye-Reflektor (Bild: Leica)

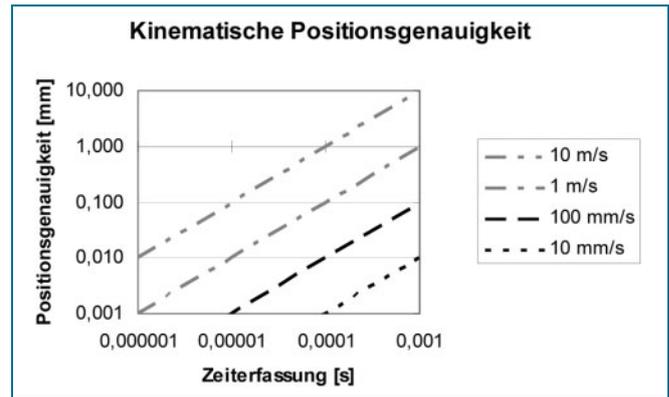


Abb. 5: Genauigkeit der Zeiterfassung



Abb. 4: Lasertracker Xi V2 (Bild: Faro)

ben und letzteres durch Untersuchungen [4] bestätigt. Als Retroreflektor wurde ein Cateye-Reflektor eingesetzt, der Einfallswinkel des Messstrahls von $\pm 60^\circ$ erlaubt. Somit ist gewährleistet, dass der Lasertracker auch bei größeren Verschwenkungen des Führungswerkzeuges seinem Ziel noch folgen kann (Abb. 3). Ergänzende Messungen sind mit einem Lasertracker Xi V2 von Faro (Abb. 4) durchgeführt worden. Faro gibt die Winkelmessgenauigkeit des Systems mit $18 \mu\text{m} + 3 \mu\text{m/m}$ und die Streckenmessgenauigkeit mit $10 \mu\text{m} + 0,4 \mu\text{m}$ für die Messung mit ADM und $2 \mu\text{m} + 0,4 \mu\text{m}$ für die Messung mit dem Interferometer an (jeweils halber maximal erlaubter Fehler bzw. halber MPE).

3.2 Synchronisiertes kinematisches Messen

Soll das Genauigkeitspotenzial, das der Lasertracker für die Erfassung einer räumlichen Position bietet auch für die raumzeitliche Positionsbestimmung genutzt werden, so muss auch die Zeiterfassung mit entsprechender Genauigkeit durchgeführt werden. Abbildung 5 verdeutlicht, dass bei einer Robotergeschwindigkeit von z. B. 100 mm/s die Genauigkeit der Zeiterfassung von 100 μs einen Beitrag von 1/100 mm zur Positionsungenauigkeit liefert, vgl. auch [5].

Die Messwerte des Lasertrackers müssen in eine zeitliche Beziehung zu den Aktionen des Roboters gesetzt werden. Die Synchronisation muss dabei gewährleisten, dass die

zugeordneten Zeitpunkte von Roboteraktion und Messung auf den jeweiligen Zeitskalen der beiden Systeme so nahe beieinander liegen, dass die durch den Zeitunterschied und die Geschwindigkeit des Messobjekts verursachte „Bewegungsunschärfe“ innerhalb einer tolerierbaren Größe bleibt.

Abweichungen zwischen den beiden Zeitpunkten werden durch unterschiedliche Startzeitpunkte der Zeiterfassung, unterschiedliche Driften der Uhren untereinander sowie Unregelmäßigkeiten in der Taktlänge verursacht.

Die Ideallösung für die Synchronisierung von Roboter und Lasertracker stellt die Triggerung (trigger: engl. Gewehr-Abzug, Auslöser) mit Hilfe eines übergeordneten Taktgebers dar. Dabei löst ein Triggersignal (z. B. die abfallende Flanke eines Rechtecksignals) bei allen Prozessmitgliedern (gleichzeitig!) jeweils eine Aktion aus. Nun bestimmen die Flankensteilheit und die Reaktionszeit der einzelnen Prozessaktionen die Qualität der Synchronisation, nicht mehr die Drift des triggergenerierenden Oszillators. Diese Vorgehensweise setzt voraus, dass die Prozesskomponenten externe Triggersignale verarbeiten können und die richtige Aktion ausgelöst wird. Die Taktrate des Triggersignals muss so lang gewählt werden, dass innerhalb eines Taktes alle Teilnehmer ihre Aktion so weit beenden können, dass der Start der nächsten beim folgenden Triggersignal möglich ist.

Eine Synchronisation von Roboter und Lasertracker auf der Basis des Betriebssystems Windows ist wegen der nicht vorhandenen Echtzeitfähigkeit von Windows zum Scheitern verurteilt. Aufgrund des Multitaskings von Windows kann nicht sichergestellt werden, dass die Reaktion auf ein Ereignis (Auslösen der Messung als Reaktion auf ein Trigger-Signal des Roboters) innerhalb des erforderlichen Zeitfenster bzw. mit einem hinlänglich konstanten zeitlichen Versatz erfolgt. Selbst eine DOS-Betriebssystemuhr versagt für diese Synchronisationsforderung völlig, weil ihre Auflösung (60 ms) deutlich zu gering ist. Die Synchronisation mit dem Leica Tracker LTD500 erfordert daher den speziellen „LT Controller plus“, der eine externe Triggerung erlaubt. Der Tracker führt dabei unabhängig von den Trigger-Ereignissen Winkel- und Streckenmessungen mit einer internen Taktrate von 3 kHz durch (Abb. 6) [6], wobei die maximale „Messrate“, mit der die Messwerte aufgelistet werden können, 1 kHz beträgt. Die Abfrage der Werte nimmt dabei

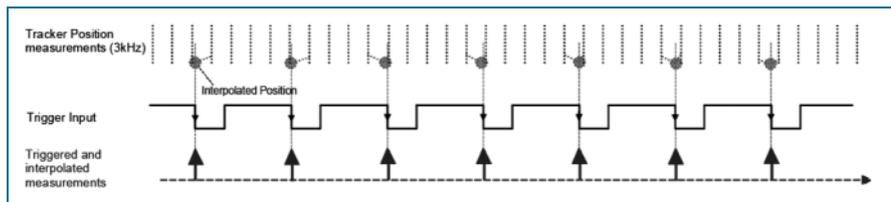


Abb. 6: Interpolation des Trigger-Signals (Bild: Leica)

1–2 μs in Anspruch [7]. Trigger-Ereignisse werden im Zeitsystem des Trackers erfasst, die Messwerte werden für den Trigger-Zeitpunkt interpoliert und mit einem Zeitstempel mit der Auflösung von einer μs versehen. Der Controller stellt diese Werte schließlich blockweise alle 1/3 Sekunde der Anwendersoftware zur Verfügung. Das minimale zeitliche Darstellungsintervall von 1 μs führt aufgrund des Quantisierungseffekts zu einer Unsicherheit der Zeiterfassung von 0,3 μs , was bei einer Geschwindigkeit von 60 mm/s einen Beitrag an der Positionsunsicherheit von 17 nm bedeutet. Der Vergleich der Uhr des Tracker-Controllers mit einem frequenzstabilisierten Funktionsgenerator zeigte eine gleichmäßige Drift der Tacker-Uhr von + 12 $\mu\text{s/s}$, die im Rahmen der Angaben des Herstellers [6] liegt. Innerhalb der internen Taktrate des Trackers von 3 kHz bewirkt dies einen Fehler im Zeitstempel von lediglich 4 ns (12 $\mu\text{s/s}$ * 0,3 ms). Unterschiede in der Länge der einzelnen registrierten Takte traten (innerhalb der Auflösung der Tracker-Uhr von 1 μs) nicht auf. Bei der Analyse der von der Robotersteuerung ausgesendeten Triggersignale (mit der Taktrate von 250 Hz) konnte eine Drift der Roboter-Uhr gegenüber der Tracker-Uhr von - 55,7 ($\pm 0,1$) $\mu\text{s/s}$ festgestellt werden. Die maximale Abweichung eines Triggerzeitpunktes gegenüber dem Soll-Zeitpunkt betrug 78 μs . Die in Abb. 7 dargestellte Verteilung der 84 760 überprüften Triggerabweichungen ist nicht symmetrisch: Größere Abweichungen vom Soll-Zeitpunkt sind nie auf zu früh, sondern immer nur auf zu spät ankommende Signale zurückzuführen. Aufgrund der zuvor nachgewiesenen hohen Genauigkeit bei der Erfassung von Triggersignalen sind die festgestellten Taktschwankungen vollständig der Robotersteuerung bzw. der Signalübertragung bis zum Tracker-Controller anzulasten.

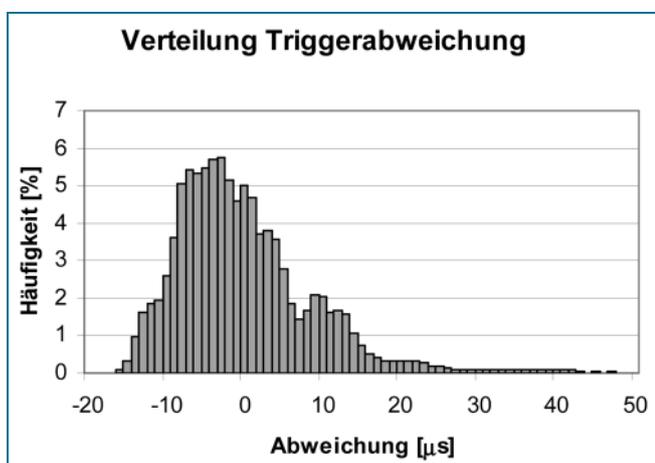


Abb. 7: Triggerabweichung

Die maximale Abweichung eines Triggerzeitpunktes liegt somit bei unter 2 % des Taktabstandes von 0,004 s. Im Zeitraum dieser Abweichung legt ein mit 60 mm/s bewegtes Objekt maximal 5 μm zurück. Die durchgeführten Voruntersuchungen geben dem Anwender einen Eindruck von der Leistungsfähigkeit des eingesetzten Equipments. Sie zeigen auch die Grenzen der Synchronisierung, wenn diese z. B. nur durch ein gemeinsames Startsignal für beide Systeme erfolgt wäre. So würde die festgestellte Drift zwischen den beiden Uhren von 56 $\mu\text{s/s}$ bei einer Bewegungsdauer von 34 s mit einer Geschwindigkeit von 60 mm/s zu einem Positionsfehler von 0,11 mm am Ende der Bewegung führen. Erst die Berücksichtigung des Driftverhaltens führt bei längerfristigen Bewegungen zu befriedigenden Ergebnissen.

Wird dagegen eine Synchronisierung realisiert, bei der jeder Takt der Robotersteuerung eine Messung des Lasertrackers auslöst, verliert die Uhrendrift und die Gleichmäßigkeit des Taktgebers ihre Bedeutung: Wie schon bei Untersuchungen eines zeitreferenzierten Dreharms am Geodätischen Institut [4] gezeigt, erfolgt die Zuordnung von Soll- und Ist-Koordinate dann nur noch über den identischen Takt.

4 Überwachung

4.1 Ziel und Experiment

Das Ziel der durchgeführten Überwachung lag in erster Linie darin, zu überprüfen, wie genau eine in einzelne Takte aufgeteilte Bewegung von der Robotersteuerung umgesetzt wird. Aus der Herstellerangabe von $\pm 0,12$ mm für die Wiederholgenauigkeit einer einzelnen Position wurde ein Anspruch an die Genauigkeit der Vermessung von besser als 0,1 mm (1 σ) abgeleitet. Bei der Generierung einer vermeintlich einfachen Bewegung wie einer geraden Linie sind bei dem untersuchten Robotertyp alle Gelenke beteiligt. Daher ist zu erwarten, dass sich etwaige Unzulänglichkeiten in den Gelenken bzw. der Steuerung des Roboters in nicht linearer Form auf die Bewegung auswirken. Die zu prüfende Geschwindigkeit des TCP bei der Bewegung betrug 60 mm/s, die zu prüfende Länge der Bahn betrug 2000 mm. Der Bahnverlauf wurde der Robotersteuerung in Form einer Liste mit 2825 Sollwerten für jede Raumposition zur Verfügung gestellt, die im 12 ms-Takt abzuarbeiten (und somit intern für einen 4 ms-Takt zu interpolieren) waren. Die Koordinaten bezogen sich auf das Roboterkoordinatensystem, wobei die X- und Z-Koordinate aller Punkte den Wert Null hatte. Der Lasertracker befand sich 2,5 m entfernt vom Anfangspunkt in Verlängerung der geradlinigen Bahn. Der Takt zur Erfassung der Messwerte wurde von der Robotersteuerung generiert, die Taktrate betrug 250 Hz. Zur

Bestimmung der Reproduzierbarkeit wurden 10 identisch gesteuerte Messfahrten durchgeführt.

4.2 Vorversuche zur Abschätzung der Wiederholgenauigkeit

Zur Beurteilung der Wiederholgenauigkeit der Trackermessungen wurden mehrere Messreihen auf die Anfangsposition des Roboters durchgeführt. Die Taktrate betrug genau wie bei den kinematischen Messungen 250 Hz, die Aufzeichnungsdauer ca. 30 s. Als Standardabweichung eines einzelnen Messwertes konnten für die X-Koordinate (seitlich zum Messstrahl) 0,008 mm, für die Z-Koordinate 0,005 mm ermittelt werden. Dies deckt sich mit umfangreicheren Untersuchungen zur Wiederholgenauigkeit der Winkelmessung [8], bei denen im kontinuierlichen Messmodus Genauigkeiten (1σ) für die Horizontalwinkelmessung von $0,00020^\circ$ (entspricht 3,5 ppm) und $0,00012^\circ$ (2 ppm) für die Vertikalwinkelmessung festgestellt worden sind. Die Standardabweichung für einen Messwert in Richtung des Messstrahls betrug 0,0006 mm. Es ist eine bekannte Tatsache, dass Lasertracker aufgrund des interferometrischen Messprinzips in Richtung des Messstrahls wesentlich genauere Werte liefern als seitlich dazu, weil hier die Encoderunsicherheit und die Regelabweichung für die Strahlausrichtung zum Unsicherheitsbudget beitragen.

Untersuchungen eines zeitreferenzierten Dreharms [4] mit Hilfe des verwendeten Lasertrackers zeigten Abweichungen $> 50\ \mu\text{m}$ bei der Verfolgung eines mit 0,5 m/s quer zur Messrichtung bewegten Ziels aus vergleichbarer Entfernung. Die Einflüsse des Dreharms und des Trackers auf das Ergebnis wurden nicht näher aufgeschlüsselt. Da bei der Untersuchung der Roboterbewegung nur mit minimalen Bewegungen quer zur Messrichtung zu rechnen ist, kann die Genauigkeit von $50\ \mu\text{m}$ als worst-case-Abschätzung angesehen werden, die immer noch innerhalb der Genauigkeitsforderung von 0,1 mm liegt.

4.3 Ergebnisse

Seitenkomponente

Die seitliche Abweichung von der vorgegebenen „geraden“ Bahn betrug maximal 0,2 mm. Diese maximale Abweichung zeigte sich an einer sehr markanten Stelle in der

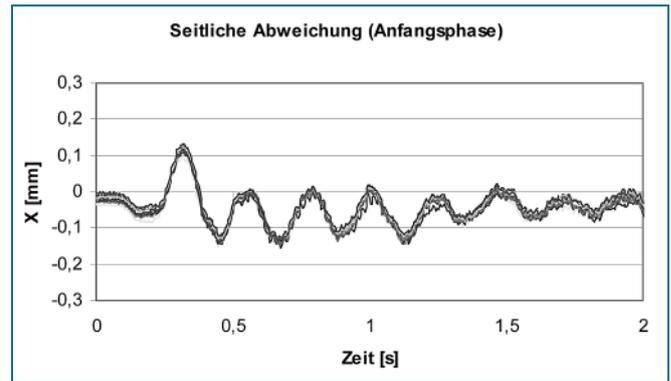


Abb. 9: Anfang seitliche Bewegung

Mitte der Bahnbewegung (Abb. 8). Zu Beginn der Bewegung ist ein Einschwingverhalten mit einer Schwingungsdauer von 0,22 s (54 Takte) und einer Amplitude von 0,1 mm zu beobachten (Abb. 9). Im weiteren Verlauf sind immer wieder Bereiche mit Schwingungen einer Dauer von 0,10 s (25 Takte) und Amplituden bis zu 0,04 mm festzustellen. Die auftretenden Schwingungen zu Beginn der Messfahrt werden zum Teil durch die beschleunigte Startbewegung ausgelöst, durch die das System einem Ruck ausgesetzt wird. Die dadurch entstehende Kraft, die auf die Roboterstruktur wirkt, verursacht elastische Verformungen in der Roboterstruktur, die sich in der anfänglichen Schwingung widerspiegeln. Die Schwingungen im weiteren, konstanten Verlauf der Bewegung ergeben sich teilweise durch die verwendeten Getriebe sowie die geringe Steifigkeit des Gesamtsystems. Bemerkenswert ist die sehr hohe Wiederholgenauigkeit der Bahnen: So betrug die maximale Standardabweichung einer einzelnen Abweichung an einer bestimmten Position nur 0,03 mm. Darin enthalten ist die in den Vorversuchen ermittelte (horizontale) Messwiederholgenauigkeit des Trackers auf ein statisches Ziel von $8\ \mu\text{m}$. Zur leichteren Vergleichbarkeit der verschiedenen Ergebnisse wurde für die Darstellung der Gesamtbahn ein Bereich von 1 mm gewählt, für Details ein Bereich von 0,6 mm.

Höhenkomponente

Die Höhenkomponente der Bewegung weist etwas größere Abweichungen gegenüber der Soll-Bahn auf als die Seitenkomponente. Die maximalen Abweichungen

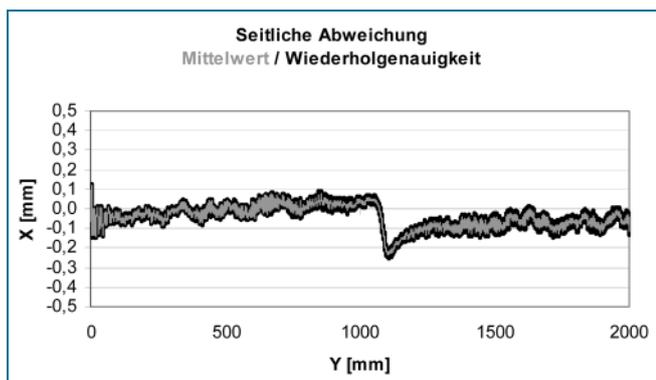


Abb. 8: Gesamtdarstellung seitliche Bewegung

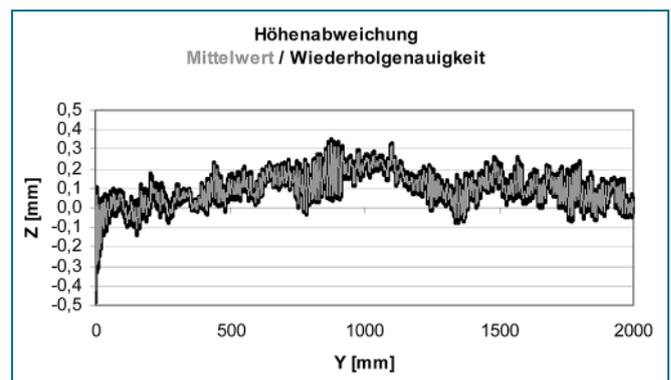


Abb. 10: Gesamtdarstellung vertikale Bewegung

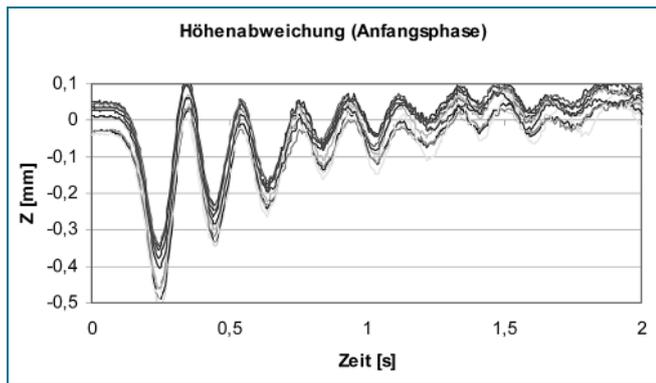


Abb. 11: Anfang vertikale Bewegung

betragen hier 0,3 mm. Ausgeprägter ist auch das Einschwingverhalten: Vertikal erfolgt zunächst eine Auslenkung nach unten von 0,4 mm, die dann in eine gedämpfte Schwingung übergeht. Die Schwingungsdauer in der Anfangsphase beträgt 0,18 s (46 Takte). Auch hier lassen sich die Schwingungen im Anfangsbereich der Bewegung teilweise auf die geringe Steifigkeit der Roboterstruktur zurückführen.

Im weiteren Verlauf sind dann unregelmäßig Bereiche mit derselben Frequenz bei Amplituden bis zu 0,15 mm zu beobachten. Weiterhin ist zu erkennen, dass für die verschiedenen Messfahrten unterschiedliche Ausgangshöhen vorlagen. Insgesamt zeigt sich, dass die Wiederholgenauigkeit einer einzelnen Position mit 0,04 mm geringer ist als die der seitlichen Abweichung. Auch hier ist die in den Vorversuchen ermittelte (vertikale) Messwiederholgenauigkeit des Trackers auf ein statisches Ziel von 5 μm bereits enthalten.

Bewegungsrichtung

Zur Beurteilung des Verhaltens des Roboters in Bewegungsrichtung werden die Abweichungen der Y-Koordinate zur Sollposition analysiert (Abb. 12). Die Sollposition ergibt sich aus der Koordinatenliste, die der NC-Steuerung übergeben worden ist. Deutlich zu erkennen ist, dass die Bewegung aufgrund von Totzeiten und Schleppfehlern erst mit einer gewissen Verzögerung einsetzt. Die Soll-Geschwindigkeit wird beim Anfahren des Roboters aus dem Stillstand nach etwa 0,7 Sekunden erreicht (Abb. 13). Somit „hinkt“ der Roboterarm seiner

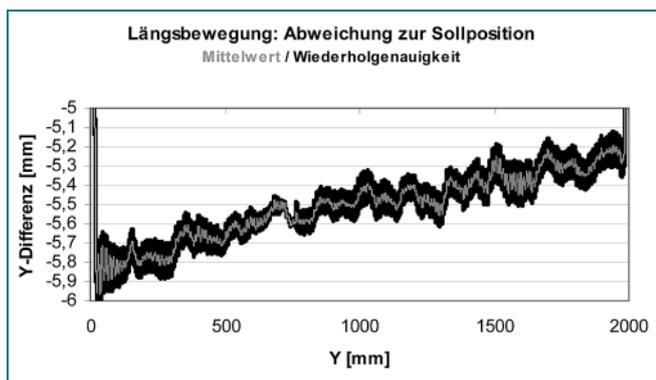


Abb. 12: Gesamtdarstellung Hauptbewegungsrichtung

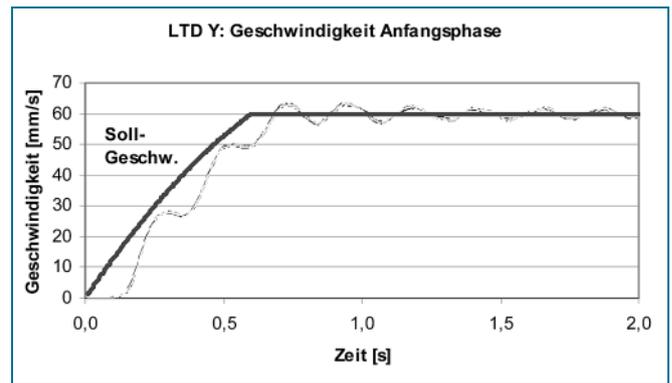


Abb. 13: Geschwindigkeit (Anfang)

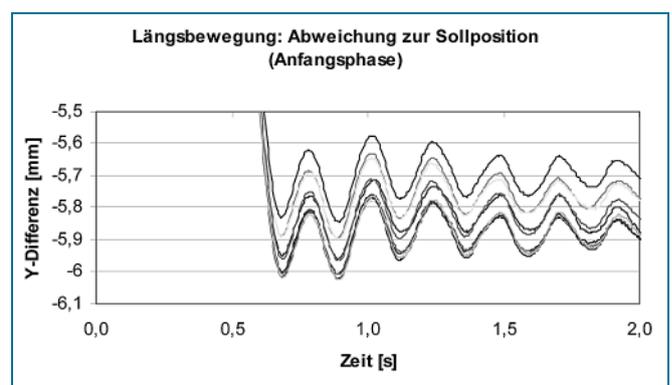


Abb. 14: Start der Hauptbewegung

Sollposition von Anfang an um fast 6 mm hinterher. Der lineare Trend bei der Abweichung von 290 ppm deutet auf einen Maßstabsunterschied von Roboter- und Tracker-Koordinatensystem hin.

In der Anfangsphase der Bewegung (Abb. 14) treten Schwingungen mit einer Dauer von 0,22 s (54 Takte) auf. Die Amplitude beträgt dabei bis zu 0,1 mm. Auch im weiteren Verlauf sind Bereiche mit vergleichbarer Frequenz zu beobachten, wobei die Amplituden dann maximal 0,04 mm erreichen. Die Wiederholgenauigkeit einer einzelnen Position ist mit 0,06 mm deutlich größer als bei der Seiten- und Höhenabweichung, was wie folgt zu erklären ist: Die Grafik der Abweichung der Y-Positionen vom Durchschnitt (Abb. 15) lässt erkennen, dass die Bewegungen zwei unterschiedliche Startpositionen haben und dass mit dem Bewegungsfortschritt eine weitere Dif-

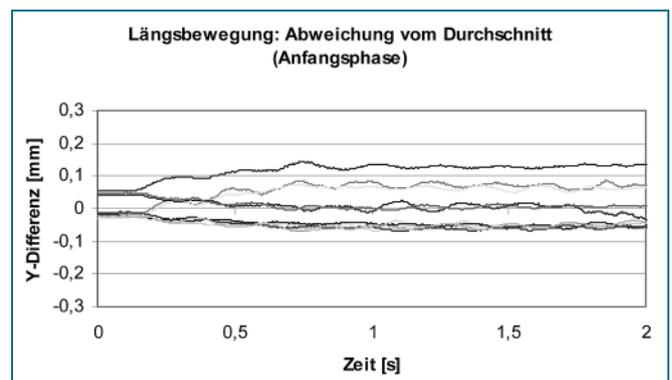


Abb. 15: Bewegungsniveaus

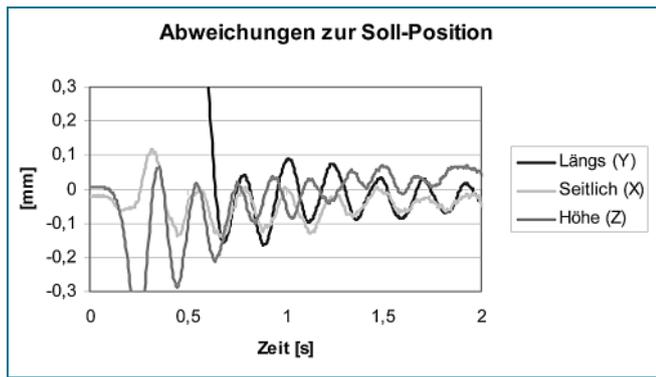


Abb. 16: Zusammenfassung der Anfangsphase

ferenzierung der Bahnen erfolgt: Es werden unterschiedliche Bewegungsniveaus erreicht, die sich um jeweils 0,06 mm unterscheiden. Dies entspricht dem Weg, den der TCP in 1/1000 Sekunde zurücklegt. Da diese Offsets kontinuierlich auf ihren Endbetrag anwachsen, kann ein grober Interpolationsfehler beim Lasertracker ausgeschlossen werden.

Fasst man die Bewegungen in allen 3 Richtungen zusammen (Abb. 16), so sind für den Roboterhersteller und -betreiber folgende Aussagen von Interesse: Die deutlichsten Abweichungen von der Sollgeometrie der „geraden“ Bahn sind in der Beschleunigungsphase am Anfang der Bewegung zu beobachten. In den ersten 0,1 Sekunden (25 Takte) steht der Roboter noch still. Danach beginnen schwingende Bewegungen in allen Richtungen. Die Beschleunigung in der Hauptbewegungsrichtung erfolgt in 3 Stufen. Seitlich und vertikal zur Hauptbewegungsrichtung sowie in der Abweichung in Hauptbewegungsrichtung (zur besseren Vergleichbarkeit in der Grafik um das „Verzögerungsoffset“ von 5,8 mm reduziert) sind gedämpfte Schwingungen zu erkennen. Zwischen der Frequenz der seitlichen Bewegung und der Frequenz der Abweichung in Hauptbewegungsrichtung besteht in der Anfangsphase ein Zusammenhang.

Geänderte Steuerparameter

In einer weiteren Untersuchung wurde das Bewegungsverhalten des Roboters mit geänderten Steuerparametern mit einem Lasertracker Xi V2 der Firma Faro beobachtet. Die Steuerung des Roboters erfolgte dabei nicht mit Hilfe der übergeordneten NC-Steuerung sondern durch die roboterinterne Steuerung. Der Roboter führte dabei beginnend von einem Startpunkt eine Relativbewegung von 2000 mm in Y-Richtung aus. Die Geschwindigkeit wurde mit 100 mm/s festgelegt. Ausgewertet wurden 11 Bahnen. Aufgrund der nicht durchgeführten Synchronisation zwischen Roboter und Lasertracker konnten keine Aussagen zum Bewegungsverhalten in Y-Richtung gemacht werden. Der Vergleich der unterschiedlich parametrisierten Bewegungen ist in Abbildung 17 und Abbildung 18 dargestellt. In der Grobform ähneln sich die Bewegungen. Im Detail, insbesondere am Anfang der Bewegung, sind deutliche Unterschiede zu erkennen.

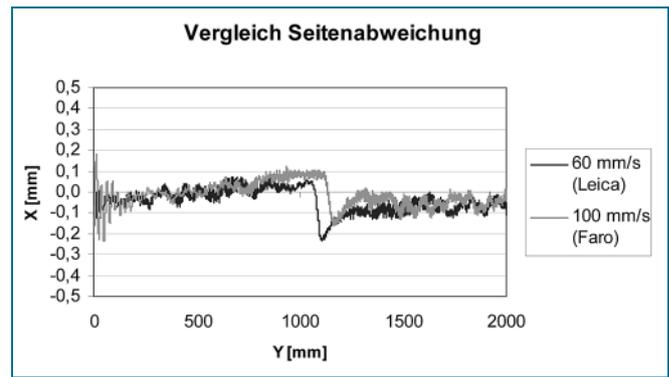


Abb. 17: Seitenabweichung bei geänderten Bewegungsparametern

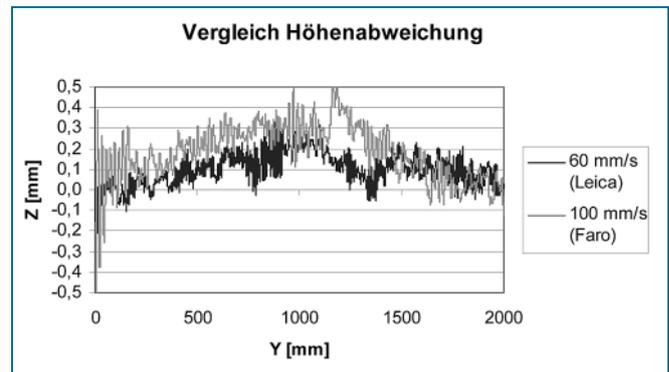


Abb. 18: Höhenabweichung bei geänderten Bewegungsparametern

5 Fazit und Ausblick

Die vorgestellten Untersuchungen haben gezeigt, dass Lasertracker geeignete Instrumente sind, um Abweichungen der tatsächlichen Bewegung eines Industrieroboters von seiner Soll-Bewegung festzustellen. Sobald Abweichungen in Raumrichtungen festgestellt werden müssen, die mit der Bewegungsrichtung zusammenfallen, sind zeitreferenzierte Messsysteme unabdingbar. In der hier erforderlichen Genauigkeitsklasse gelingt dies nur mit dem „LT Controller plus“ und entsprechender Ansteuerung. Die maximalen seitlichen und vertikalen Abweichungen von der Sollposition lagen unter 0,5 mm. Die Abweichung in Bewegungsrichtung betrug aufgrund von Totzeiten und Schleppfehlern fast 6 mm. Insbesondere in der Anfangsphase (erste Sekunde) der Bewegung konnte ein reproduzierbares Einschwingverhalten festgestellt werden. Unterschiedliche Parametersätze zur Robotersteuerung bewirken unterschiedliche Abweichungen von der Sollbewegung. Die Wiederholgenauigkeit des untersuchten Industrieroboters ist (zumindest innerhalb des Untersuchungszeitraums von ca. einer Stunde) mit einer Standardabweichung einer Einzelmessung von maximal 0,06 mm außerordentlich hoch.

Bei künftigen Untersuchungen sollte das Augenmerk auf den Auswirkungen geänderter Parametersätze für identische Bewegungen und der Beobachtung der Langzeitstabilität liegen. Dies wird, neben der Kalibrierung von kinematischen Messmitteln, zukünftig ein Arbeitsschwer-

punkt des Geodätischen Instituts, das über die notwendige Hard- und Software verfügt.

Dank

Ein besonderer Dank gilt Herrn Barth und Herrn Runge vom Geodätischen Institut, die die technischen Voraussetzungen dafür geschaffen haben, dass das Ausgangssignal der Robotersteuerung vom Tracker-Controller verarbeitet werden konnte. Ein weiterer Dank geht an die Firma Leica für die leihweise Überlassung des „LT Controllers plus“ und an die Firma Faro zur Durchführung einer Vergleichsmessung mit dem Lasertracker Xi V2.

Diese Veröffentlichung basiert auf Forschungsarbeiten des Sonderforschungsbereichs SFB/TR 10, der von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert wird.

Literatur

- [1] BECKER, D.; KLEINER, M.; SCHIKORRA, M. (2007): „Mehrachsiges Runden beim Strangpressen“, In: Fortschr. Ber. VDI Reihe 2 Nr. 661, VDI-Verlag Düsseldorf, 2007, ISBN 9783183661022
- [2] FLEISCHER, J.; MUNZINGER, C.; SCHNEIDER, M.; STENGEL, G. (2007): „Fliegendes Abtrennen“, In: Fortschr. Ber. VDI Reihe 2 Nr. 661, VDI-Verlag Düsseldorf, (2007), ISBN 9783183661022
- [3] FLEISCHER, J.; MUNZINGER, C.; STENGEL, G. (2006): „Flying Cutting of Spatially Curved Extrusion Profiles“, In: Advanced Materials Research: Flexible Manufacture of Lightweight Frame Structures, Band 10 (2006), S. 35–42
- [4] DEPENTHAL, C., BARTH, M. (2007): „Zur Leistungsfähigkeit eines zeitreferenzierten Dreharms als Prüfmittel für 4D-Messsysteme in Hochgeschwindigkeitsanwendungen“, AVN, Heft 7/2007 S. 244–249
- [5] HENNES, M. (1999): „Grundlegende Aspekte zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit von Robottachymetern“, AVN 12/1999, S. 374–385
- [6] LEICA MANUAL (2005): emScon TPI, V2.3 Programmers Manual, Update October 27, 2005, Leica Geosystems AG Unterentfelden
- [7] LOSER, R. (2004): „Kinematische Messmethoden im industriellen Nahbereich“, Kinematische Messmethoden „Vermessung in Bewegung“, Beiträge zum 58. DVW-Seminar am 17. und 18. Februar 2004 in Stuttgart, S. 233–243
- [8] JURETZKO, M. (2007): „Untersuchungen zur Wiederholgenauigkeit eines geregelten Winkelmesssystems am Beispiel eines Lasertrackers LTD 500“, Beitrag zum 15. Internationalen Ingenieurvermessungskurs, Graz, 17.–20.4.2007, in: Brunner, F. K. (Hrsg.), Ingenieurvermessung 07, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, S. 181–186

Abstract

The project introduced here describes the geometric examination of an innovative robot-based production process for spatially curved extruded profiles. The aim was to prove that the trajectories fulfil a given spatiotemporal tolerance level with respect to repeatability and absolute accuracy using an independent, i.e. geodetic, measurement method. In order to examine this motion regarding spatiotemporal tolerance, it is necessary to synchronize a laser tracker with the control system of the robot with an order of magnitude of micro seconds. This resolution has been achieved by triggered measurements with a Leica LTD500. With respect to coarse trajectory monitoring, additionally a non-synchronized simple method using equally spaced measurements with a Faro Lasertracker Xi V2 was applied, although it delivers definitely less resolution. Very specific and for the production process decisive aberrations of the robot trajectory have been detected as well as an extraordinary high kinematic repeatability of the robot.

Anschriften der Verfasser:

Dr.-Ing. MANFRED JURETZKO, Geodätisches Institut, Universität Karlsruhe (TH), Englerstraße 7, D-76131 Karlsruhe, juretzko@gik.uni-karlsruhe.de

Prof. Dr.-Ing. MARIA HENNES, Geodätisches Institut, Universität Karlsruhe (TH), Englerstraße 7, D-76131 Karlsruhe, Hennes@gik.uni-karlsruhe.de

Dipl.-Ing. MARKUS SCHNEIDER, **wbk** Institut für Produktionstechnik, Universität Karlsruhe (TH), Kaiserstraße 12, D-76131 Karlsruhe, schneider@wbk.uka.de

Prof. Dr.-Ing. JÜRGEN FLEISCHER, **wbk** Institut für Produktionstechnik, Universität Karlsruhe (TH), Kaiserstraße 12, D-76131 Karlsruhe, Fleischer@wbk.uka.de