

IndustrieRoboter in Holzbauweise – InRoHo

Patrick Kluge
Max Geistert
Sven Eichhorn

Technische Universität Chemnitz
Fakultät Maschinenbau
Institut für Fördertechnik und Kunststoffe
Professur Förder- und Materialflusstechnik

Im laufenden Forschungsprojekt InRoHo – Industrieroboter in Holzbauweise wird die Eignung von ausgewählten Holzwerkstoffen in Form von WVC (Wood Veneer Composite) für tragende Strukturen von Industrierobotern untersucht. Ziel ist die Entwicklung modularer Armsegmente, die sich flexibel fertigen, anpassen und austauschen lassen und damit insbesondere Vorteile hinsichtlich Herstellungsaufwand, Reparatur- und Recyclingfähigkeit bieten. Hierzu werden rechnerische und simulative Vorbetrachtungen durchgeführt, geeignete Verbindungstechniken experimentell untersucht und unterschiedliche Roboterbauweisen schrittweise von einem horizontalen SCARA-System über einen vertikalen SCARA bis hin zu einem dreidimensionalen 3-Achs-Aufbau entwickelt. Ein Demonstrator des horizontalen SCARA-Systems wurde bereits realisiert. Für dessen Bewertung wurde ein kamerabasiertes Messkonzept zur Untersuchung der Positionier- und Wiederholgenauigkeit unter variierenden Geschwindigkeiten, Beschleunigungen und Transportmassen entwickelt. Die experimentelle Validierung des Demonstrators ist derzeit noch nicht abgeschlossen, sodass der Beitrag den aktuellen Entwicklungsstand des Forschungsprojekts zusammenfasst.

[Schlüsselwörter: Holz, Maschinenbau, Robotik, Verbindungstechnik, Konzeptionierung]

1 PROBLEMSTELLUNG UND ZIELSETZUNG

Industrieroboter werden für vielfältige Handhabungs- und Bearbeitungsaufgaben eingesetzt und entsprechend der jeweiligen Anwendung in unterschiedlichen Traglast- und Reichweitenklassen angeboten. Die tragenden Strukturen von Knickarmrobotern bestehen dabei überwiegend aus metallischen Werkstoffen, wobei insbesondere Aluminiumgussbauteile zum Einsatz kommen. Diese etablierte Bauweise ermöglicht leistungsfähige und gewichtsoptimierte Strukturen, ist jedoch mit einem vergleichsweise hohen Entwicklungs- und Fertigungsaufwand verbunden. Insbesondere bei kleinen Stückzahlen oder anwendungsspezifischen Anpassungen der Robotergeometrie ist die Herstellung individueller Armsegmente daher nur eingeschränkt wirtschaftlich.

Im Forschungsprojekt InRoHo – Industrieroboter in Holzbauweise wird untersucht, inwieweit sich die konventionelle Metallbauweise durch eine modulare Konstruktion

aus Holzwerkstoffen substituieren lässt. Durch den Einsatz plattenförmiger Holzwerkstoffe in Verbindung mit etablierten CNC-Fertigungsverfahren sollen Armsegmente schnell und flexibel gefertigt sowie an unterschiedliche Anforderungen hinsichtlich Geometrie und Reichweite angepasst werden können. Die modulare Konstruktion soll darüber hinaus den Austausch einzelner Armsegmente vereinfachen und damit Vorteile hinsichtlich Reparatur- und Recyclingfähigkeit bieten. Ergänzend ergeben sich durch die Substitution metallischer Werkstoffe Potenziale zur Reduzierung der Umweltwirkungen.

Ziel des Projektes ist die Entwicklung, Fertigung und experimentelle Untersuchung eines funktionsfähigen Knickarmroboters in Holzbauweise. Hierzu werden die mechanischen und dynamischen Randbedingungen der Roboterstruktur rechnerisch untersucht, geeignete Verbindungskonzepte für die Holzarmsegmente erprobt und darauf aufbauend unterschiedliche Roboterbauweisen entwickelt. Abschließend soll anhand eines Demonstrators bewertet werden, inwieweit die entwickelte Holzbauweise die mechanischen und positioniertechnischen Anforderungen an einen Industrieroboter erfüllen kann.

2 ANALYTISCHE VORBETRACHTUNGEN

Als Grundlage für die konstruktive Entwicklung der Roboterstrukturen in Holzbauweise wurden zunächst die bei handelsüblichen Knickarmrobotern auftretenden Belastungssituationen betrachtet. Hierzu wurden unterschiedliche Armstellungen und Bewegungszustände identifiziert und hinsichtlich ihrer Beanspruchung analysiert. Neben ungünstigen statischen Konfigurationen, beispielsweise bei vollständig oder weitgehend ausgestreckten Armsegmenten, wurden auch typische Bewegungs- und Handhabungszyklen berücksichtigt. Auf diese Weise konnten sowohl statische Belastungsanteile aus Eigengewicht und Nutzlast als auch dynamische Einflüsse infolge von Beschleunigungs- und Bremsvorgängen in die Betrachtung einbezogen werden.

Für die ausgewählten Lastfälle wurden die Roboterkinematik und die relevanten Randbedingungen in einer Simulationsumgebung abgebildet. Daraus konnten die an den einzelnen Achsen, Gelenken und Armsegmenten auftretenden Reaktionskräfte und Reaktionsmomente bestimmt

werden. Die Betrachtung verschiedener Armstellungen ist hierbei von besonderer Bedeutung, da sich sowohl die wirksamen Hebelarme als auch die Richtung und Höhe der auftretenden Belastungen während eines Bewegungsablaufs verändern. Die ermittelten Kräfte und Momente dienen anschließend als Eingangsgrößen für die mechanische Bewertung der tragenden Roboterstrukturen.

Aus den resultierenden Schnittgrößen wurden die maßgebenden Beanspruchungen der Armsegmente abgeleitet und spannungsbasierte Nachweise für die vorgesehenen Holzwerkstoffe durchgeführt. Abhängig von der jeweiligen Belastungssituation wurden Beanspruchungen aus Biegung, Zug und Druck, Schub und Torsion sowie deren kombinierte Wirkung berücksichtigt. Neben den durch Eigengewicht und Nutzlast hervorgerufenen Belastungen wurden dabei insbesondere die aus der Bewegung der Roboterachsen resultierenden Beschleunigungskräfte einbezogen. Die Nachweise ermöglichen eine erste Bewertung, ob die vorgesehenen Holzwerkstoffe und Querschnittsgeometrien die auftretenden Beanspruchungen mit ausreichender Tragfähigkeit aufnehmen können.

Parallel zu den lastfallbezogenen Untersuchungen wurden Berechnungskonzepte entwickelt, mit denen sich aus den technischen Daten der eingesetzten Motoren und Getriebe Anforderungen an die Geometrie der Holzschwingen ableiten lassen. Ausgehend von den verfügbaren Antriebs- und Getriebedaten sowie den geometrischen und kinematischen Randbedingungen werden zunächst die für die Armsegmente relevanten Kräfte und Momente bestimmt. Darauf aufbauend können erforderliche Querschnittskenngrößen und daraus geeignete Abmessungen der tragenden Holzstrukturen abgeleitet werden. Neben der reinen Tragfähigkeit ist hierbei auch eine ausreichend steife Ausführung der Schwingen von Bedeutung, da elastische Verformungen der Armsegmente das spätere Positionierverhalten des Roboters beeinflussen können.

Die rechnerischen und simulativen Vorbetrachtungen bilden damit die Grundlage für die weitere Entwicklung der Roboterbauweisen. Die verfolgte Vorgehensweise reicht von der Identifikation relevanter Lastfälle über die Bestimmung der auftretenden Kräfte und Momente bis zur Bewertung der Beanspruchungen und zur Ableitung geeigneter Querschnitte für die Holzschwingen. Die daraus gewonnenen Randbedingungen fließen anschließend gemeinsam mit den Untersuchungen zur Verbindungstechnik in die konstruktive Ausgestaltung der Demonstratoren ein.

3 VERBINDUNGSTECHNIK

Neben der rechnerischen Dimensionierung stellt die konstruktive Anbindung der Holzschwingen an die metallischen Antriebs- und Getriebekomponenten einen wesentlichen Aspekt der Roboterentwicklung dar. Zur

Untersuchung des Einflusses von Werkstoff und Verbindungsausführung wurden daher bauteilnahe Versuche entsprechend Abbildung 1 an unterschiedlich ausgeführten Schwingen durchgeführt. Als Referenz diente eine konventionelle Aluminiumschwinge. Diese wurde mit Schwingen aus WVC (Wood Veneer Composite) in Form von Birkensperrholz und Kunstharzpressholz verglichen.

Die Schwingen wurden einseitig an einer steifen Versuchsaufnahme befestigt und am freien Ende durch einen Prüfstempel belastet. Während der Laststeigerung wurden Kraft und Verformung kontinuierlich aufgezeichnet. Für die Holzschwingen wurden zwei Verbindungsausführungen betrachtet. Bei der als Standard bezeichneten Variante erfolgt die Anbindung ohne zusätzlichen Adapter. Als zweite Variante wurde ein Stahladapter eingesetzt, der die Belastung über eine Stahlscheibe und drei angeschweißte Stege in die Schwinge einleitet. Dadurch soll die Krafteinleitung im Bereich der Verbindung gezielt verbessert und die lokale Nachgiebigkeit reduziert werden.

Zur quantitativen Bewertung wurden aus den annähernd linearen Bereichen der Kraft-Verformungs-Kurven die Anstiege als Maß für die strukturelle Steifigkeit des jeweiligen Schwinge-Verbindungs-Systems bestimmt, wie Abbildung 2 zeigt. Die Aluminiumschwinge erreicht dabei mit rund 6657 N/mm die höchste Steifigkeit und wird als Referenz mit 100 % angesetzt. Für Birkensperrholz ergeben sich etwa 1610 N/mm in der Standardausführung und 1733 N/mm mit Stahladapter. Dies entspricht rund 24 % beziehungsweise 26 % der Referenzsteifigkeit. Der Stahladapter erhöht die gemessene Steifigkeit der Birkensperrholzschwinge damit um etwa 8 % gegenüber der Standardausführung.

Deutlich höhere Werte werden für die untersuchten Schwingen aus Kunstharzpressholz erreicht. Hier beträgt der lineare Anstieg etwa 4859 N/mm für die Standardausführung und 5092 N/mm für die Variante mit Stahladapter. Bezogen auf die Aluminiumschwinge entsprechen diese Werte rund 73 % beziehungsweise 76 % der Referenzsteifigkeit. Auch bei diesem Werkstoff führt der Adapter zu einer leichten Erhöhung der strukturellen Steifigkeit. Die Versuche zeigen damit sowohl einen deutlichen Einfluss des eingesetzten Holzwerkstoffs als auch einen Einfluss der konstruktiven Gestaltung der Verbindung.

Ergänzend zur Kraft-Verformungs-Messung wurden an drei ausgewählten Schraubverbindungen die Schraubenvorspannkräfte während der Versuche kontinuierlich erfasst. Dadurch konnte untersucht werden, wie sich die Vorspannung in Abhängigkeit von der aufgetragenen Belastung und der Belastungsdauer verändert. Diese Untersuchungen sind insbesondere für die Bewertung der dauerhaften Funktion der Holz-Metall-Verbindungen von Bedeutung.



Abbildung 1. Versuchsaufbau zur Bestimmung des Kraft-Verformungs-Verhaltens unterschiedlicher Schwingen- und Verbindungsvarianten.

Die Ergebnisse der Bauteilversuche dienen anschließend als konstruktive Grundlage für die Gestaltung der Armsegmente und ihrer Schnittstellen. Insbesondere die Unterschiede in der strukturellen Steifigkeit sowie die Erkenntnisse zur Krafteinleitung und zum Verhalten der Schraubverbindungen fließen in die weitere Entwicklung der im folgenden Kapitel beschriebenen Roboterbauweisen ein.

4 KONZEPT UND BAUWEISEN

Aufbauend auf den rechnerischen Vorbetrachtungen und den Untersuchungen zur Verbindungstechnik wurde die Roboterstruktur schrittweise entwickelt. Ziel war es, die Anforderungen an die Holzstruktur und ihre Verbindungen nicht unmittelbar an einer komplexen räumlichen Kinematik zu untersuchen, sondern die mechanische und kinematische Komplexität sukzessive zu erhöhen. Hierzu wurden drei aufeinander aufbauende Bauweisen betrachtet: ein horizontaler SCARA-Roboter, ein vertikal angeordneter SCARA-Roboter und schließlich ein dreidimensional beweglicher Aufbau mit drei Drehachsen. Die einzelnen Entwicklungsstufen dienen damit sowohl als eigenständige Versuchsträger als auch zur schrittweisen Annäherung an die angestrebte Bauweise eines Knickarmroboters.

Die erste Entwicklungsstufe bildet ein horizontal angeordneter SCARA-Roboter. Die beiden wesentlichen Armsegmente bewegen sich dabei in einer horizontalen Ebene. Dadurch wirken die Gewichtskräfte der Schwingen und der darauf angeordneten Komponenten nur in vergleichsweise geringem Umfang als zusätzliche Momente um die Bewegungsachsen. Die Bauweise eignet sich daher insbesondere zur grundlegenden Untersuchung des Zusammenspiels von Holzschwingen, Verbindungstechnik, Getrieben, Motoren und Steuerung. Gleichzeitig können die grundlegende Funktion der Kinematik sowie das Bewegungs- und Positionierverhalten untersucht werden, ohne dass die Konstruktion bereits durch hohe gravitationsbedingte Belastungen überlagert wird. Auf Grundlage dieser Bauweise wurde der aktuelle Demonstrator aufgebaut, der für die weiterführenden experimentellen Untersuchungen eingesetzt wird.

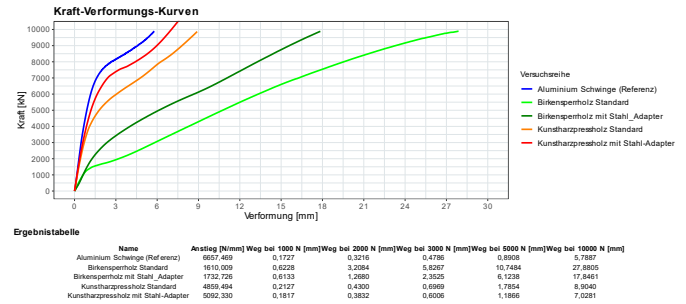


Abbildung 2. Kraft-Verformungs-Kurven und ermittelte lineare Anstiege der untersuchten Schwingen aus Aluminium, Birkenperrholz und Kunstharzpressholz mit unterschiedlichen Verbindungsansführungen.

In der zweiten Entwicklungsstufe wird das SCARA-Prinzip in eine vertikale Bewegungsebene überführt. Die grundlegende Anordnung der Armsegmente bleibt erhalten, die Belastungssituation verändert sich jedoch deutlich. Durch die vertikale Orientierung erzeugen die Eigengewichte der Holzschwingen sowie der Motor- und Getriebekomponenten zusätzliche Momente in den Gelenken. Damit werden neben den dynamischen

Beanspruchungen aus den Bewegungsabläufen insbesondere die erforderlichen Haltemomente der Getriebe relevant. Gleichzeitig steigen die Anforderungen an die Steifigkeit der Armsegmente und der Verbindungspunkte, da elastische Verformungen unmittelbar die Lage des nachfolgenden Armsegments beeinflussen. Diese Bauweise stellt somit einen wichtigen Zwischenschritt zwischen dem vergleichsweise einfachen horizontalen SCARA-System und einer räumlich beweglichen Roboterstruktur dar.

Die dritte Entwicklungsstufe erweitert das Konzept zu einem dreidimensional beweglichen Aufbau mit drei rotatorischen Achsen. Durch die räumliche Anordnung der Gelenke entstehen gegenüber den beiden SCARA-Konfigurationen komplexere und überlagerte Belastungszustände. Abhängig von der jeweiligen Roboterstellung verändern sich sowohl die wirksamen Hebelarme als auch Richtung und Höhe der durch Eigengewicht, Nutzlast und Bewegung hervorgerufenen Beanspruchungen. Die Holzschwingen werden dadurch zunehmend gleichzeitig durch unterschiedliche Belastungsarten beansprucht. Dieser Aufbau bildet die konstruktive Entwicklungsrichtung hin zu einem klassischen Knickarmroboter ab und ermöglicht es, die zuvor an vereinfachten Kinematiken gewonnenen Erkenntnisse auf eine räumliche Roboterstruktur zu übertragen.

Allen drei Entwicklungsstufen liegt der Ansatz zugrunde, die tragenden Armsegmente möglichst konsequent aus plattenförmigen Holzwerkstoffen aufzubauen und mit den metallischen Komponenten des Antriebsstrangs zu kombinieren. Die Holzbauteile können CNC-basiert gefertigt und konstruktiv vergleichsweise einfach angepasst werden. Dadurch lassen sich unterschiedliche Armgeometrien

und Entwicklungsvarianten mit geringem Aufwand umsetzen. Gleichzeitig unterstützt die modulare Bauweise den Austausch einzelner Armsegmente, sodass Änderungen und Reparaturen nicht zwangsläufig den Austausch der gesamten Roboterstruktur erfordern.

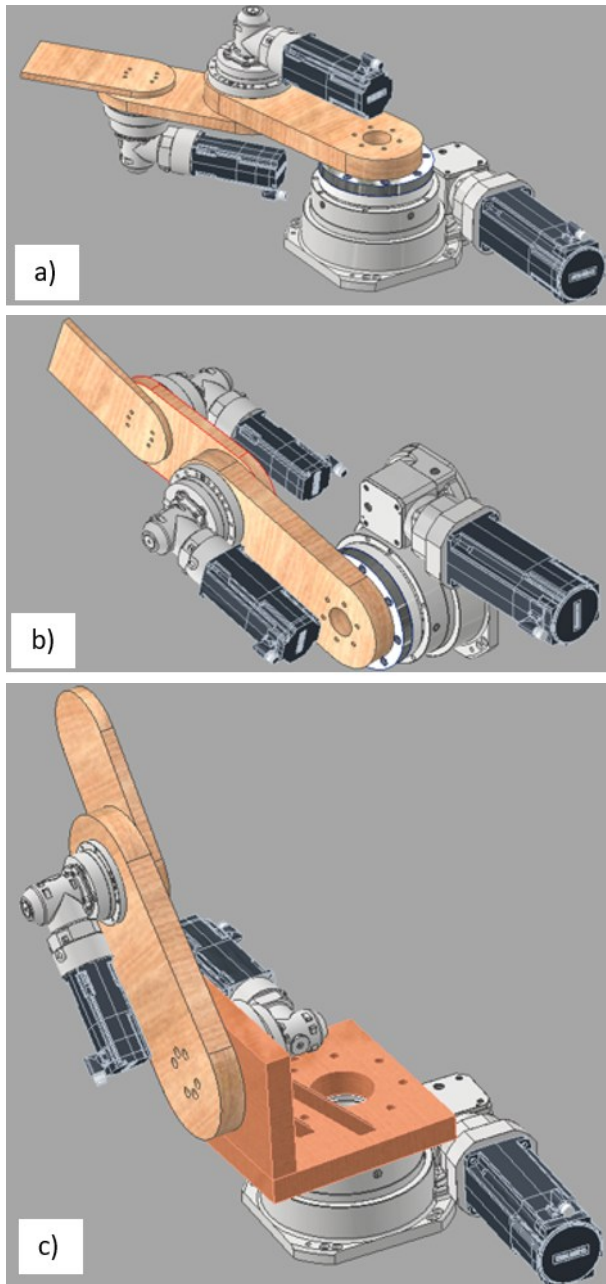


Abbildung 3. Konstruktive Entwicklungsstufen der Roboterstruktur in Holzbauweise: (a) horizontaler SCARA-Roboter, (b) vertikaler SCARA-Roboter und (c) dreidimensionaler Aufbau mit drei Drehachsen als Entwicklungsstufe zum Knickarmroboter.

Der dreistufige Entwicklungsprozess ermöglicht somit eine systematische Steigerung der Anforderungen an Kinematik und Struktur. Ausgehend von der horizontalen Bewegung werden zunächst zusätzliche gravitationsbedingte Beanspruchungen berücksichtigt und anschließend

auf eine räumlich bewegliche Struktur übertragen. Die gewonnenen Erkenntnisse bilden gleichzeitig die Grundlage für die experimentelle Validierung des Demonstrators, die im folgenden Kapitel beschrieben wird.



Abbildung 4. Realer Demonstratoraufbau des horizontalen SCARA-Systems, eingebaut in einer Roboterzelle in Holzbauweise

5 EXPERIMENTELLE VALIDIERUNG

Zur Bewertung der Bewegungsgenauigkeit des entwickelten Demonstrators wurde ein kamerabasiertes Messkonzept erarbeitet. Hierzu wird am Roboterarm eine Kamera eingesetzt, die definierte Erkennungsmuster innerhalb des Arbeitsraums erfasst. Aus deren Lage im Kamerabild kann die Position des Roboterarms bestimmt und mit der jeweils angefahrenen Sollposition verglichen werden.

Mit dem Messsystem sollen insbesondere die Positioniergenauigkeit und die Wiederholgenauigkeit des Demonstrators untersucht werden. Hierfür werden definierte Zielpositionen mehrfach angefahren und die resultierenden Positionsabweichungen ausgewertet. Um zusätzlich den Einfluss des Bewegungszustands und der Belastung zu erfassen, werden die Versuche für unterschiedliche Beschleunigungen, Geschwindigkeiten und Transportmassen durchgeführt.

Das Messkonzept ermöglicht damit eine systematische Bewertung des Positionierverhaltens der Holzbauweise unter unterschiedlichen Betriebsbedingungen. Die Ergebnisse sollen zeigen, inwieweit die entwickelte Roboterstruktur die für den vorgesehenen Einsatz erforderliche Bewegungs- und Wiederholgenauigkeit erreicht und welche Einflussgrößen dabei besonders relevant sind.

6 FAZIT UND AUSBLICK

Im laufenden Forschungsprojekt InRoHo wird die Eignung von Holzwerkstoffen für tragende Strukturen von Industrierobotern schrittweise untersucht. Die bisherigen Arbeiten zeigen, dass sich die Entwicklung sinnvoll aus rechnerischen und simulativen Vorbetrachtungen, experimentellen Untersuchungen zur Verbindungstechnik sowie

der konstruktiven Umsetzung verschiedener Roboterbauweisen aufbauen lässt. Insbesondere die Untersuchungen an den Schwingen verdeutlichen den Einfluss von Werkstoffwahl und Verbindungsausführung auf die strukturelle Steifigkeit und liefern damit wichtige Grundlagen für die Gestaltung der Armsegmente.

Mit dem horizontalen SCARA-System wurde ein erster funktionsfähiger Demonstrator realisiert. Die weitere Entwicklung erfolgt über einen vertikalen SCARA-Aufbau hin zu einer räumlich beweglichen 3-Achs-Struktur als Annäherung an einen Knickarmroboter. Dadurch werden die mechanischen und kinematischen Anforderungen an die Holzstruktur schrittweise erhöht und die gewonnenen Erkenntnisse auf komplexere Bauweisen übertragen.

Ein wesentlicher noch laufender Arbeitsschritt ist die experimentelle Validierung des Demonstrators. Mit dem entwickelten kamerabasierten Messkonzept sollen insbesondere Positionier- und Wiederholgenauigkeit unter unterschiedlichen Geschwindigkeiten, Beschleunigungen und Transportmassen untersucht werden. Auf Grundlage dieser Ergebnisse sollen die Roboterstruktur und ihre Verbindungen weiter optimiert und die Übertragbarkeit der Holzbauweise auf räumlich bewegliche Knickarmroboter bewertet werden.

Dr.-Ing. Patrick Kluge, seit 2013 Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur Förder- und Materialflusstechnik der Technischen Universität Chemnitz. Er studierte von 2007 - 2013 Maschinenbau an der TU Chemnitz und befasst sich seither mit der Entwicklung modularer Holzbauweisen für Maschinenbauanwendungen und dem Schaffen notwendiger Voraussetzungen für deren Einsatz.

Adresse: Professur Förder- und Materialflusstechnik, Technische Universität Chemnitz, Reichenhainer Str. 70, 09126 Chemnitz, Deutschland, Phone: +49 371 531-34373, E-Mail: patrick.kluge@mb.tu-chemnitz.de