

## **Unterstützungssysteme für Tätigkeiten in und über Kopfhöhe in der industriellen Produktion**

Robert WEIDNER, Andreas ARGUBI-WOLLESEN, Bernward OTTEN,  
Zhejun YAO, Christine BERGER, Jens P. WULFSBERG

*Laboratorium Fertigungstechnik  
Helmut-Schmidt-Universität/Universität der Bundeswehr Hamburg  
Holstenhofweg 85, D-22043 Hamburg*

**Kurzfassung:** Trotz der Automatisierung werden vor allem individuelle, sensible oder qualitätskritische Produkte nach wie vor manuell produziert. Diese Aufgaben, z.B. Tätigkeiten in und über Kopfhöhe, sind häufig ergonomisch belastend und können längerfristig zu Erkrankungen des Bewegungsapparates führen. Dieser Beitrag stellt Konzepte auf Basis des Ansatzes Human Hybrid Robot für anziehbare Unterstützungssysteme für Tätigkeiten in und über Kopfhöhe vor. Aufbauend auf den Konzepten werden Funktionsmuster, Ergebnisse der biomechanischen Analyse vorgestellt und ergonomische Verbesserungen abgeleitet.

**Schlüsselwörter:** anziehbare Unterstützungssysteme, Biomechanische Analyse, Ergonomie, Mensch-Maschine-Interaktion, Human Hybrid Robot

### **1. Einleitung**

Das Spektrum an Tätigkeiten in der industriellen Produktion ist sehr breit. Es kann sich hierbei um die Fertigung, Montage und Handhabung von Bauteilen, Baugruppen, Produkten und Werkzeugen mit unterschiedlichen Anforderungen hinsichtlich der Genauigkeit, Abmessung und Gewicht handeln. Beispielhafte Tätigkeiten sind die Handhabung von Lasten (Schmidtler et al. 2014), die Montage in und über Kopfhöhe (Weidner et al. 2014) sowie die Fertigung und Montage in der Mikroproduktion (Kagerer et al. 2013). Obwohl die Automatisierung in diesen und anderen Bereichen vorangetrieben wird, werden auch in Zukunft zahlreiche Tätigkeiten manuell erfolgen. Dies unterstreicht, dass die Mitarbeiter ein Erfolgsfaktor in produzierenden Unternehmen bleiben. Folglich sollten manuelle Tätigkeiten adäquat unterstützt werden, z.B. um einen nachhaltigen Mitarbeiterereinsatz und eine hohe Erzeugnisqualität zu erreichen. Die Unterstützung kann prinzipiell auf verschiedenen Wegen erfolgen und sich in der Form und Struktur unterscheiden (Karafillidis & Weidner 2015, Weidner & Karafillidis 2015). Dieser Beitrag stellt anziehbare Unterstützungssysteme für Tätigkeiten in und über Kopfhöhe in der Produktion vor. Eine Übertragung auf andere Bereiche wie dem Handwerk ist ohne weiteres möglich. Neben dem Wirkprinzip ausgewählter Systeme wird auf die biomechanische Analyse, insbesondere zur objektiven Untersuchung der Bewegungsmuster und muskulären Belastung, eingegangen.

### **2. Systemlösungen aus dem Stand der Technik**

Zahlreiche technische Lösungen zur Unterstützung von (manuellen) Tätigkeiten in der Produktion wurden bis heute entwickelt. Hierzu zählen bspw. Werkzeuge wie

Schraubenzieher (Ogushi et al. 2012), Hebehilfen (Bruno & Khatib 2008), Industrieroboter (Reinhart et al. 2009), Systeme auf Basis der Mensch-Maschine Kooperation (Thomas et al. 2011), Assistenzsysteme (Lucke 2011) und Exoskelette (Zoss et al. 2006). Durch den Einsatz dieser Systeme, die unterschiedliche Formen der Unterstützung, Assistenz oder Hilfe bieten sowie Strukturen und Eigenschaften besitzen, kann eine Entlastung der Mitarbeiter oder eine Steigerung der Produktivität erzielt werden. Der Einsatz kann die Ausführung manueller Tätigkeiten unterstützen oder gar die menschliche Aktivität ersetzen. Darüber hinaus ist anzumerken, dass nicht alle Systeme, z.B. aufgrund harter Strukturelemente, ohne weiteres für eine direkte Mensch-Maschine Interaktion geeignet sind. Kerneigenschaften der genannten Ansätze sind z.B. in (Weidner et al. 2013, Weidner et al. 2016) dargestellt. Die aufgezeigten Systeme können durchaus Tätigkeiten in und über Kopfhöhe unterstützen. Zur physischen Unterstützung manueller Tätigkeiten, ohne den Mitarbeiter zu substituieren, sind vornehmlich Exoskelette geeignet, die vor allen einen Beitrag zur Kraftverstärkung liefern.

### **3. Konzepte für anziehbare Unterstützungssysteme**

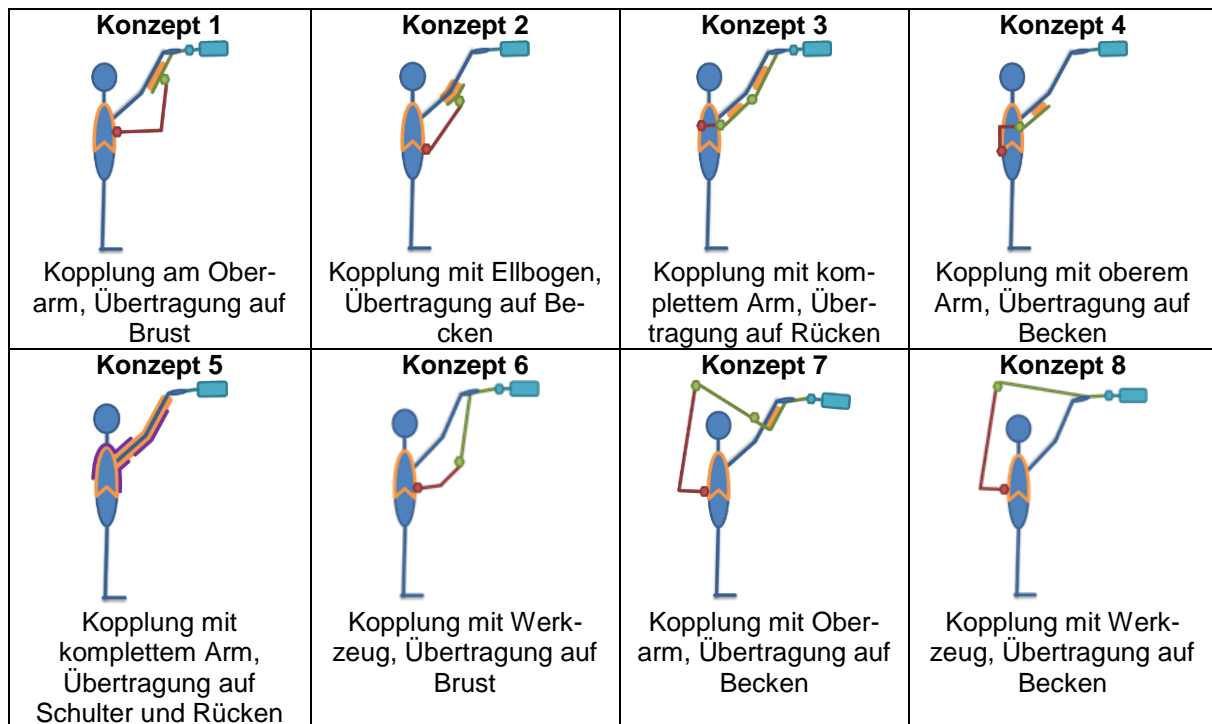
#### *3.1 Grundlegender Ansatz des Human Hybrid Robot (HHR)*

Die im Folgenden dargestellten Konzepte und Systeme zur Unterstützung der Tätigkeiten in und über Kopfhöhe bauen auf dem Ansatz „Human Hybrid Robot (HHR)“ auf. Nach diesem Ansatz erfolgt eine Kopplung biomechanischer und technischer Elemente, konkret vom Menschen mit technischen Systemen, Werkzeugen und technischen Funktionalitäten wie Mechanismen zur integrierten Qualitätssicherung (Weidner et al. 2013). Durch eine derartige Hybridisierung soll es möglich sein, die zum Teil konträren Fähigkeiten und Fertigkeiten von Mensch (z.B. Sensomotorik, Kognition) und Technik (z.B. Ausdauer, Wiederholgenauigkeit) nutzen zu können. Entsprechende Systeme sollen zum einen eine beanspruchungsoptimale (physisch, mental) Durchführung manueller Tätigkeiten ermöglichen und zum anderen jene Fertigkeiten und Fähigkeiten unterstützen, bei denen biomechanische, sensomotorische, kognitive oder andere Einschränkungen existieren. Hierdurch soll die Belastung reduziert und die Lücke zwischen den notwendigen und verfügbaren Funktionalitäten, die zur Ausführung der manuellen Tätigkeiten erforderlich sind, kompensiert werden.

#### *3.2 Physische Entlastung von Mitarbeitern*

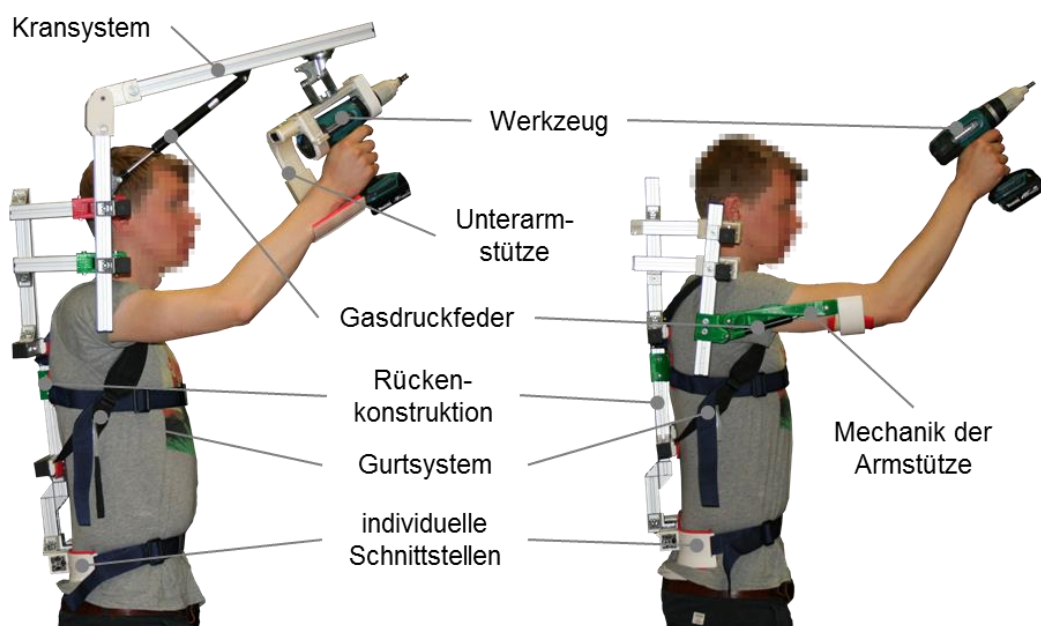
Die physische Entlastung von körperlich arbeitenden Mitarbeitern kann auf unterschiedliche Weise erfolgen. Es können zum einen Systeme zur Kraftumleitung eingesetzt werden, z.B. in der Form, dass das Halten von Werkzeugen durch technische Systeme unterstützt wird. Zum anderen können Systeme zur Kraftverstärkung Anwendung finden. Verschiedene Varianten der Gestaltung sind für beide Arten der Systeme denkbar. Ein Auszug möglicher Grundkonzepte für anziehbare Unterstützungssysteme sind in Abbildung 1 dargestellt. Unterschiede existieren vor allem

- in dem Kraftpfad, d.h. der Pfad über den die z.B. vom Werkzeug/Werkstück resultierende Kraft über das technische System um Körperteile herum geleitet wird,
- in der Form der Kopplung und Anordnung der technischen Elemente, d.h. Art und Umfang der Schnittstelle zwischen Mensch und Technik, und
- in der Struktur sowie den verwendeten Materialien.

**Legende:**

**Abbildung 1:** Konzepte für anziehbare Unterstützungssysteme für Tätigkeiten in und über Kopfhöhe

Alle Systeme lassen sich sowohl in passiver als auch in aktiver Form aufbauen und haben unterschiedliche Vor- und Nachteile. Vor allem sind die Systeme hinsichtlich des Anwendungskontextes auszuwählen. Einerseits in Abhängigkeit des Gewichts der zu handhabenden Werkzeuge, Bauteile etc.. Andererseits in Abhängigkeit zur Nutzergruppe (vor allem um die Anthropometrie des Nutzers zu berücksichtigen).



**Abbildung 2:** Funktionsmuster der Unterstützungssysteme – Kransystem (li.) und Armstütze (re.)

## 4. Funktionsmuster

Zur Erprobung einzelner Konzepte wurden Funktionsmuster aufgebaut. Der Fokus in diesem Beitrag liegt auf den Konzepten 4 und einer Kombination aus Konzept 7 und 8, für die ebenfalls eine Bewegungsstudie, die in Abschnitt 5 beschrieben wird, durchgeführt wurde. Die Unterstützungssysteme sind in Abbildung 2 dargestellt. Beide Systeme nutzen die identische Rückenkonstruktion, die im ersten Schritt aus standardisierten Profilen aufgebaut wurde. Die Nutzeranpassung erfolgt über individuell angepasste Mensch-Technik-Schnittstellen (Herstellung mittels 3D-Druck) und einem längenveränderbaren Gurtsystem. Bei dem Kran-Unterstützungssystem wird eine Vorrichtung verwendet, die eine Anbindung des Werkzeugs ermöglicht. Bei dem anderen System ist eine Mechanik zum Stützen des Oberarms mit einer an den Nutzer angepasste Schnittstelle vorgesehen. Bei beiden Systemen wird eine Gasdruckfeder zur Kompensation der Kraft (entgegen der Erdanziehungskraft) verwendet. Die Position der Gasdruckfeder beim Arm-Unterstützungssystem ist so gewählt, dass die maximale Kraft beim maximalen Hebelarm existiert (Oberarm waagrecht). Beide dargestellten Systeme besitzen zwei rotatorische Freiheitsgrade. Die Kraftumleitung erfolgt beim Kran-Unterstützungssystem vom Werkzeug hin zum Becken, wobei ebenfalls der Unterarm gestützt wird. Beim Arm-Unterstützungssystem erfolgt die Kraftumleitung vom Oberarm hin zum Becken.

## 5. Biomechanische Analyse

Beide dargestellten Systeme wurden einer biomechanischen Analyse im Anwendungsszenario „Flugzeugmontage“, dem Setzen einer Niet an einem definierten Punkt über Kopfhöhe (s. Pose in Abb. 2), mit 24 männlichen Probanden unterzogen.

### 5.1 Versuchsaufbau

Im Rahmen der Studie wurde eine Analyse der Kinematik, der Muskelaktivität sowie der Bodenreaktionskräfte durchgeführt. Das „Kransystem“ und die „Armstütze“ wurden mit der Bedingung „ohne Unterstützung“, als Baseline dienend, miteinander verglichen. Die Analyse der Kinematik erfolgte mittels 3D-Motion Capture-System (Vicon, UK, 200 Hz). Für die Messung wurden retroreflektierende Marker an definierten anatomischen Punkten der Probanden nach einem biomechanischen Ganzkörpermodell platziert. Das System erfasste die durchgeführte Bewegung der Probanden in Echtzeit (200 Hz). Die muskuläre Aktivität von acht Muskeln des Oberkörpers (bspw. M. trapezius, M. deltoideus, M. erector spinae) für alle drei Bedingungen wurde mit Hilfe der Oberflächen-Elektromyographie (Myon, Schweiz; 1000 Hz). Zur Erfassung der posturalen Kontrolle über die Bodenreaktionskräfte (Schwankungsamplituden) diente eine Kraftmessplattform (AMTI, USA; 1000 Hz).

### 5.2 Versuchsablauf

Die Probanden standen auf einer Kraftmessplattform. Die Bewegungsaufgabe bestand darin, mittels einer Bohrmaschine (ca. 1,5 kg) eine Vorrichtung in definierter Höhe anzuvisieren und einen definierten Druck (mittels einer Federvorrichtung vorgegeben) auszuüben. Alle Werkzeugbewegungen wurden innerhalb einer Bedingung ohne Pause und ausschließlich mit der rechten Hand ausgeführt. Für die Auswertung

wurden 12 konsekutive Bewegungsabfolgen pro Bedingung erfasst. Nach Ablauf der Messung ohne Unterstützungssystem (Baseline) wurde der Proband in randomisierter Reihenfolge mit einem der beiden Unterstützungssysteme ausgerüstet und durchlief das gleiche Messprozedere wie zuvor. Für alle Bedingungen gab es eine Eingewöhnungszeit von ca. 5 Minuten. Die Pause zwischen den Messungen belief sich auf ca. 10 Minuten, um Ermüdungserscheinungen größtmöglich zu eliminieren.

### *5.3 Beobachtungen und Erkenntnisse*

Eine quantitativ-statistische Auswertung der Ergebnisse steht zum jetzigen Zeitpunkt noch aus. Qualitative Analysen (Beobachtungen) der Daten zur Kinematik, der muskulären Aktivität und Bodenreaktionskräfte haben zu folgenden, ersten Erkenntnissen geführt: Die Bodenreaktionskräfte zeigen ein Schwanken in anterior-posterior Richtung für den Bewegungsvorgang des Bohrmaschine ansetzen – Druck ausüben – Bohrmaschine absetzen. Dieses Schwanken wird um eine medio-laterale Komponente in den beiden anderen Bedingungen ergänzt. Die kinematische Analyse zeigt deutliche Veränderungen des Bewegungsmusters für die Bedingungen mit Unterstützungssystem. In der Bedingung „Armstütze“ zeigt sich hauptsächlich eine forcierte Elevation der Schulter über den gesamten Bewegungsablauf. Für die Bedingung „Kransystem“ ist eine verminderte Ellenbogenstreckung kennzeichnend, als auch eine Verminderung des Bewegungsausmaßes der rechten Hand beim Zurückführen des Werkzeugs. Die Analyse der EMG-Daten zeigt eine Reduktion der Aktivitäten von Schultermuskulatur als auch Schulter-Nacken-Muskulatur bei der Überkopfarbeit v. a. beim Tragen der Armstütze im Bereich von 6-7%. Hingegen vermindert das Kransystem die Aktivität der Unterarmextensoren um ca. 12%. Die Aktivität der Rückenmuskulatur verändert sich durch das Tragen beider Systeme nicht.

## **6. Diskussion**

Umfragen mit Probanden haben gezeigt, dass eine Entlastung spürbar ist. Der Vergleich der Bewegung mit Unterstützungssystem zur Ursprungsbewegung zeigt eine deutliche Beeinflussung des Bewegungsmusters. Diese sind zum einen im zusätzlichen (teilweise einseitigen) Gewicht des Systems begründet, wodurch sich die größeren Schwankungsamplituden erklären ließen. Andererseits beschränken beide Systeme konstruktionsbedingt die Freiheitsgrade der Probanden. In wie weit dies als negativ im Sinne einer zusätzlichen Belastung oder positiv als Reduktion der Belastung innerhalb beschränkter Bewegungsradien zu bewerten ist, wird insbesondere die statistische Auswertung der EMG-Daten beantworten. Festzuhalten bleibt, dass die biomechanischen Effekte durch konstruktionsbedingte Einschränkungen im Entwicklungsprozess von Unterstützungssystemen fortlaufend zu überprüfen sind. Darüber hinaus hat sich in den Versuchen gezeigt, dass die Präzision, d.h. vor allem die Zielsicherheit, im Rahmen der Tätigkeiten über Kopfhöhe durch das Unterstützungssystem verbessert werden konnte.

## **7. Zusammenfassung und Ausblick**

Dieser Beitrag hat einen Ansatz für modulare, anziehbare technische Systeme zur Unterstützung von vornehmlich Tätigkeiten in und über Kopfhöhe in der industriellen

Produktion aufgezeigt. Die derzeit realisierten Unterstützungssysteme bestehen aus drei Hauptkomponenten, die individuell an den Nutzer angepasst werden können: Mensch-Technik-Schnittstelle, z.B. zwischen dem menschlichen Torso und technischen System oder dem menschlichen Oberarm und dem technischen System, Vorrichtung zur Realisierung rotatorischer und translatorischer menschlicher Bewegungen und Aktuatorik. Aufgezeigt wurden zwei unterschiedliche Gestaltungsmöglichkeiten für das System – Stützen des Arms des Nutzers und Halten und Führen des Werkzeugs. Durch die entsprechenden Systeme kann zum einen die muskuläre Belastung durch eine Kraftumleitung erreicht werden. Zum anderen kann die Kraftunterstützung die Ausführung von manuellen Tätigkeiten unterstützen (bzw. eventuell sogar auch erst ermöglichen). Darüber hinaus kann die physische Unterstützung zu einer gesteigerten Qualität führen. Abschließend wurde die Vorgehensweise der durchgeführten biomechanischen Analyse vorgestellt und Erkenntnisse abgeleitet.

## 8. Literatur

- Bruno S, Khatib O (2008), Springer handbook of robotics. Springer Science+Business Media, Berlin.
- Kagerer M, Huedig M, Lueth TC, Irlinger F (2013) Manual microassembly system with integrated squeeze device for homogenous and defined adhesive layers for bimorph piezoelectric actuators using in drop-on-demand techniques. In: Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2013 IEEE International Conference on Date of Conference, S. 1911 - 1917.
- Karafillidis A, Weidner R (2015), Grundlagen einer Theorie und Klassifikation technischer Unterstützung. In: R. Weidner, T. Redlich, J. P. Wulfsberg (Eds.), Technische Unterstützungssysteme, Springer-Verlag, Berlin, S. 66 - 89.
- Lucke DM (2014), Ad hoc information acquisition using context aware systems within the multi-variant manufacturing. Dissertation, Stuttgart, Fraunhofer-Verlag.
- Ogushi K, Nishino A, Maeda K, Ueda K (2012), Calibration chain for hand torque screwdrivers. In: Proceedings of SICE Annual Conference (SICE), S. 1471 - 1476.
- Reinhart G, Werner J, Lange F (2009), Robot based system for automation of flow assembly lines. In: Prod. Eng. Res. Dev. 3: 121 - 126.
- Schmidler J, Hölzel C, Knott V, Bengler K (2014) Human centered assistance applications for production. In: 5th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics. Poland, S. 380 - 391.
- Thomas C, Busch F, Kuhlenkötter B, Deuse J (2011), Ensuring Human Safety with Offline Simulation and Real-time Workspace Surveillance to Develop a Hybrid Robot Assistance System for Welding of Assemblies. In: Enabling Manufacturing Competitiveness and Economic Sustainability, Springer, S. 464 - 470.
- Weidner R, Kong N, Wulfsberg JP (2013), Human Hybrid Robot: a new concept for supporting manual assembly tasks. In: Production Engineering 7(6), S. 675 - 684.
- Weidner R, Yao Z, Wulfsberg JP, Goehlich RA, Mehler S (2014) Modular Support Systems for Air- and Spacecraft Industry. In: Band zur ersten Transdisziplinären Konferenz "Technische Unterstützungssysteme, die die Menschen wirklich wollen", S. 347 - 358.
- Weidner R, Karafillidis A (2015), Three General Determinants of Support-Systems. In: Applied Mechanics and Materials Vol. 794, S. 555 - 562, Trans Tech Publications, Schweiz.
- Weidner R, Meyer T, Argubi-Wollesen A, Wulfsberg JP (2016), Modular and wearable Support System for industrial Production. In: MHI-Fachkolloquium 2016, S. 1 - 8, im Review.
- Zoss AB, Kazerooni H, Chu A (2006), Biomechanical design of the Berkeley lower extremity exoskeleton (BLEEX). In: Transactions on Mechatronics, IEEE/ASME, vol. 11, no. 2, S. 128 - 138.

**Danksagung:** Diese Forschung (Projekt „smart ASSIST – Smart, Adjustable, Soft and Intelligent Support Technologies“) wird durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Programm „Interdisziplinärer Kompetenzaufbau im Schwerpunkt Mensch-Maschine-Interaktion vor dem Hintergrund des demographischen Wandels“. Betreut durch die VDI/VDE INNOVATION GmbH. Die alleinige Verantwortung für den Inhalt des Beitrags liegt bei den Autoren.