

# Der Einsatz der virtuellen Realität in der Produktionsplanung

Kunz, A.<sup>1</sup>; Wegener, K.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ETH Zürich, Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung

## **Abstract**

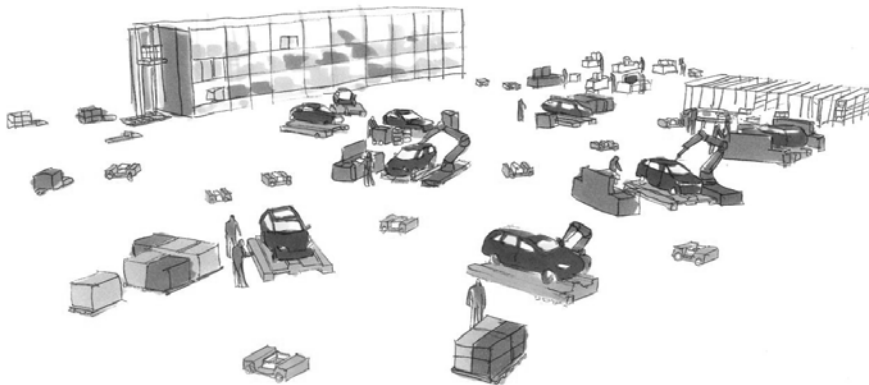
Die zunehmende Individualisierung von Produkten erfordert eine immer flexiblere Produktion. Somit spiegelt sich ein hoher Variantenreichtum der Produkte in einer steigenden Komplexität der Produktion. Um unter dem vorhandenen Zeitdruck eine Produktion auslegen zu können, muss vermehrt auf VAR<sup>2</sup>-Technologien zugegriffen werden, welche mehr Iterationszyklen für die Produktionsplanung in gleicher oder kürzerer Zeit zulassen. Am Beispiel einer sogenannten „dezentralisierten Produktion“ soll daher ein Ausblick gegeben werden, wie VAR<sup>2</sup>-Technologien künftig eine solche digitale Absicherung und Planung unterstützen können.

## **1 Einleitung**

Variantenreiche Produkte und schwankende Nachfragen können vielfach mit bestehenden Produktionsformen nicht mehr wirtschaftlich hergestellt werden [3]. Das hieraus resultierende Optimierungspotential für die wirtschaftliche Fertigung hochindividualisierter Produkte wurde somit auch in dem „Zukunftsprojekt Industrie 4.0“ des BMBF aufgeführt [5]. Dieses basiert unter anderem auf einer schon vorher geforderten Flexibilisierung der Produktion [8].

Ein Ansatz zur Lösung dieser Probleme ist die sogenannte dezentralisierte Fertigung. Hiermit wird versucht, die schwankenden Marktanforderungen und die Tendenz zu hochindividualisierten Produkten mit der Anforderung nach einer ausbalancierten und deterministischen Produktion zu verknüpfen [4]. Die Grundidee der dezentralisierten Fertigung besteht darin, sehr flexible Produkt- und Materialtransporteinheiten einzusetzen, welche dann einen individuellen und flexiblen Materialfluss erlauben. Löst man die starre Fertigungsstruktur auf, so muss nun auch der Arbeiter darüber informiert werden, welches Teil als nächstes zu verbauen ist. Diese schon aus dem „Supermarkt“-Prinzip bekannte Anforderung wird außerdem dadurch komplexer, falls variantenreiche Produkte gefertigt werden, denen man einerseits weder den momentanen Verbauzustand ansehen kann, noch daraus den

nächsten notwendigen Bearbeitungsschritt ableiten kann. Eine noch höhere Komplexität entsteht, wenn auch die Zuordnung des Produktes zum nächsten Montageschritt in Zeitpunkt und Ort frei wählbar ist.



**Bild 1:** Vision einer dezentralisierten Fertigung [19]

Wie man aus Bild 1 entnehmen kann, wird der Arbeiter sich in einer solchen Umgebung frei bewegen können und zudem künftig auch diese Arbeitsschritte in Zusammenarbeit mit Robotern durchführen (MRK = Mensch-Roboter Kollaboration). Da der Produktionsfluss sich in einer solchen Umgebung dynamisch ändert, ist eine solche hochflexible Fertigung nicht mehr mit üblichen Hilfsmitteln planbar, sondern erfordert das Erleben einer Anlage schon vor deren Realisierung. Hiermit sollen unter anderem die folgenden Fragen beantwortet werden:

- Wie kann eine dezentralisierte Produktion unter Einbezug des Menschen im Sinne einer MTM (Method Time Measured) evaluiert werden, oder hierzu die Anlage aufbauen zu müssen?
- Wie kann eine MRK vorab evaluiert werden, ohne hierzu einen MRK-Arbeitsplatz aufbauen zu müssen?

In den folgenden Kapiteln sollen mögliche VAR2-Anwendungen zur Beantwortung dieser beiden Fragen aufgezeigt werden.

## **1.1 Absicherung der Produktion durch eine virtuelle MTM**

Die MTM blickt auf eine lange Geschichte zurück [10] und ist in der Industrie etabliert. Die manuellen Tätigkeiten eines Arbeiters werden in elementare Elemente zerlegt, denen wiederum statistisch erfasste Zeiten zugrunde liegen. Hieraus können dann die Kosten für manuelle Tätigkeiten ermittelt werden. Somit kann die

MTM verwendet werden, um Arbeitsprozesse zu analysieren, zu beschreiben und abzubilden [1], [2].

Da die MTM auf der Beobachtung der Arbeitstätigkeiten beruht, muss für deren Durchführung ein realer Arbeitsplatz vorhanden sein. Dies führt somit zu Problemen, wenn Produktionslinien komplett neu eingerichtet werden müssen oder Arbeitsplätze neu gestaltet werden. In solchen Fällen wird häufig ein sogenanntes „Cardboard Engineering“ [16] eingesetzt, welches Arbeitsplätze und Distanzen geometrisch nachempfunden (siehe Bild 2).



**Bild 2:** Typisches Cardboard Engineering [12]

Durch den Einsatz solcher Cardboard-Aufbauten ist nun zwar auch ein realistisches Laufen möglich, jedoch sind hiermit keine hochflexiblen Produktionseinrichtungen wie in Bild 1 darstellbar.

Wenn für die MTM-Erfassung des echten Laufens in Anlagen gemäß Bild 1 die virtuelle Welt eingesetzt werden soll, so bedeutet dies zunächst einmal, dass der zur Verfügung stehende Trackingbereich so groß sein muss wie die zu evaluierende Anlage. Dies ist in der Regel aus technischer Sicht nicht praktikabel, weshalb in einem ersten Ansatz zur Begehung großer virtueller Welten Laufinterfaces (Laufbänder) eingesetzt wurden. Das Laufen auf diesen Interfaces ist allerdings unnatürlich, weshalb diese für ein Laufen zur MTM-Bewertung ungeeignet sind. Stattdessen existiert heute ein sogenanntes „Redirected Walking“ [18]. Da der Anwender ein Headmounted Display (HMD) trägt, bemerkt er nicht, dass diese Technik ihn unmerklich auf einer kreisförmigen Bahn führt, obwohl er glaubt, geradeaus zu laufen. Durch geeignete Auswahl der Redirektionstechniken [17] lassen sich auch größere virtuelle Anlagen in begrenzten physischen Räumen begehen, so dass Redirected Walking geeignet ist, das Laufen unter MTM-Gesichtspunkten zu erfassen [9].

Um die Möglichkeiten der MTM-gerechten Erfassung echten Laufens in einer virtuellen Umgebung zu verifizieren, wurde eine VR-Umgebung gemäß Bild 3 realisiert. Der Aufbau verwendet ein Oculus DK2 HMD, welches zusammen mit einem Inter-

sense IS-1200 Trackingsystem an einen Laptop angeschlossen ist. Der Laptop ist in einem Rucksack untergebracht und erlaubt somit freies Laufen in einem Trackingbereich von 12 x 6 m. Zum Erfassen der relativen Handposition wurde ein einfacher Inertialsensor verwendet [11].



**Bild 3:** Technischer Aufbau

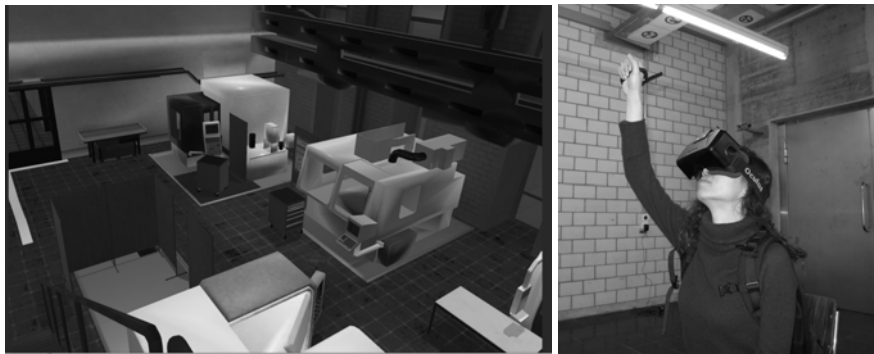
Um nun eine MTM im virtuellen Raum durchzuführen, sind keine aufwändigen Umbauten mehr nötig, ebenso entfällt auch eine nachträgliche Videoanalyse. Stattdessen wird eine virtuelle Szene dargestellt, in welcher die typischen Bewegungen für eine Arbeitssituation durchgeführt werden können, einschließlich eines realistischen Laufens in dieser Umgebung. Die Bewegungen des Anwenders werden nicht nur als Position im Raum ausgemessen, sondern auch gleich von einer nachgeschalteten Software analysiert (siehe Bild 4).



**Bild 4:** Prinzipdarstellung der virtuellen MTM

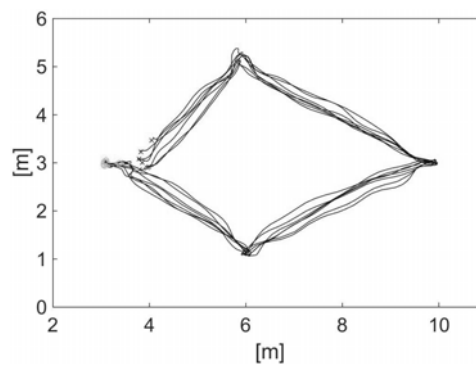
Da die Erfassung der Bewegungsabläufe und die Auswertung in Echtzeit stattfinden, können der Aufbau der Arbeitsplätze oder die Konstellation einer Produktionslinie mehrfach variiert werden, ohne dass hierfür zeitraubende Umbauten anfallen.

Zur Interpretation der Tätigkeiten des Anwenders werden Algorithmen des „Machine Learnings“ eingesetzt [13]. In einem ersten Machbarkeitsnachweis wurden zwei Klassifikationen eingesetzt. In einer Klasse kann die Körperhaltung des Anwenders unterschieden werden, also ob er sitzt, steht oder läuft. Die Genauigkeit dieser Klassifizierung wird durch ein zusätzliches „Reasoning“ erhöht, welche die Zuordnung in einer Klasse mit der Geometrie korreliert. So ist z.B. die Klassifizierung „sitzen“ nur möglich, wenn die Szene an der entsprechenden Stelle auch eine Sitzgelegenheit hat. Somit können nicht nur die benötigten Zeiten erfasst werden, sondern ebenso auch die korrekte Reihenfolge der einzelnen Aktionen, wie dies in [7] vorgeschlagen wird. Bild 5 gibt einen Eindruck der virtuellen Arbeitsumgebung.



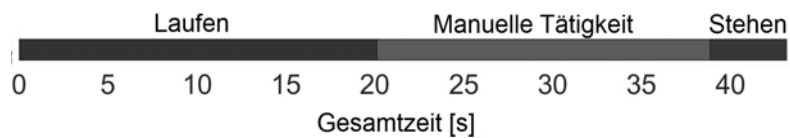
**Bild 5:** Virtuelle Arbeitsumgebung und typische Anwenderinteraktion

In dieser virtuellen Umgebung mussten an vier Positionen unterschiedliche manuelle Tätigkeiten durchgeführt werden, beispielsweise eine Schraubbewegung oder das Ziehen oder Schieben eines virtuellen Objektes. Zwischen den einzelnen Stationen musste dann jeweils eine Strecke von ca. 3 m zurückgelegt werden. Bild 6 zeigt den jeweils gemessenen Weg der unterschiedlichen Anwender.



**Bild 6:** Lauftrajektorien der einzelnen Anwender

Da neben der Position auch jeweils die Zeiten gemessen wurden, lässt sich auch beispielsweise die kumulierte Auflistung für die jeweiligen Tätigkeiten darstellen (siehe Bild 7),



**Bild 7:** Aufteilung der Gesamtzeit für einen Bearbeitungszyklus in die Gruppen „Laufen“, „Manuelle Tätigkeit“ und „Stehen“

Während die Bereiche „Laufen“ und „Manuelle Tätigkeit“ dem Arbeitsprozess zugeordnet werden können, so verbleibt auch eine Restzeit von 5 s (6% der Gesamtzeit), in welcher der Anwender keine manuelle Tätigkeit durchführt. Diese Zeit wird benötigt für das Erkennen von Objekten sowie für die Orientierung im Raum.

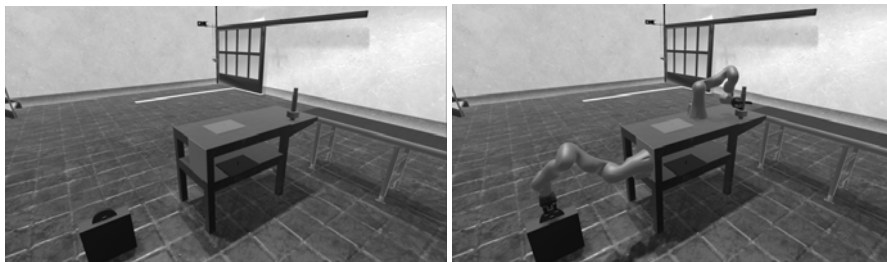
Das hier aufgeführte einfache Anwendungsbeispiel zeigt exemplarisch auf, dass die virtuelle Realität für eine MTM-Analyse von Produktionsanlagen eingesetzt werden kann und gegenüber der konventionellen Art der MTM-Durchführung erhebliche zeitliche Vorteile aufweist.

## **1.2 Absicherung der Mensch-Roboter Kollaboration**

In der dezentralisierten Fertigung gewinnt die Mensch-Roboter Kollaboration an Bedeutung und wird von Tan et al. [20] als „zukunftsweisend“ bezeichnet. Das Ziel ist, die Kraft und Ausdauer des Roboters mit der Anpassungsfähigkeit und Geschicklichkeit des Menschen zu kombinieren. Hierbei stellt sich aber die Frage, wie (i) der Bewegungsablauf des Menschen und des Roboters für eine optimale Arbeitsplatzgestaltung auszusehen hat, und (ii) wie sich das Verhalten des Menschen in Anwesenheit des Roboters ändert. Insbesondere die zweite Fragestellung eignet sich für eine Untersuchung in der virtuellen Welt.

Erste Ansätze zur Akzeptanzuntersuchung in der Mensch-Roboter Kollaboration wurden von Coupeté et al. [6] aufgezeigt. Allerdings wurde die virtuelle Realität hier lediglich zur Darstellung eingesetzt und die Akzeptanz durch Fragebögen ermittelt. Diese Methode baut auf einer früheren Studie auf, in der durch physiologische Messungen und Fragebögen eine Arbeitsplatzakzeptanz ermittelt wurde [21]. Für das Training des Arbeiters an einem MRK-Arbeitsplatz wurde eine virtuelle Umgebung von Matsas & Vosniakos [14] vorgestellt. Eine weitere physiologische Erfassung des menschlichen Verhaltens wurde von Moniri et al. [15] durchgeführt. Insbesondere wurde hier die Blickrichtung des Anwenders in einem realen MRK-Aufbau mit der in einem virtuellen Aufbau verglichen. Hand- oder Kopfpositionen wurden hingegen nicht vermessen. Die Untersuchungen zeigten aber, dass die virtuelle Welt durchaus in der Lage ist, einen realen MRK-Arbeitsplatz bei vergleichbaren Messergebnissen zu ersetzen.

Um die Frage zu klären, inwieweit die Anwesenheit des Roboters das menschliche Arbeitsverhalten beeinflusst, wurde eine virtuelle MRK-Anwendung erstellt, in der eine Person neben der rein manuellen Interaktion auch in der Lage ist, sich in einem kleinen Arbeitsbereich frei zu bewegen. In dieser virtuellen Umgebung wurde ein vierstufiger Montageprozess einmal komplett manuell und einmal in Arbeitsteilung mit dem Roboter durchgeführt (siehe Bild 8).



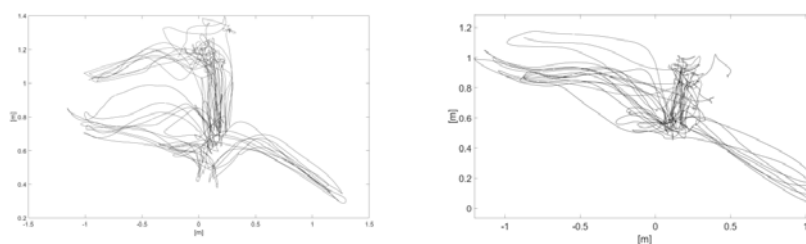
**Bild 8:** Arbeitsplatz für manuelle (links) und roboterunterstützte (rechts) Montage

Zur Erfassung der Kopf- und Handpositionen wurde ein HTC Vive System eingesetzt. Innerhalb eines Erfassungsbereichs von 4 x 4 m bietet es dem Anwender eine freie Bewegungsmöglichkeit. Die virtuelle Welt wurde auf diesen Aktionsraum zugeschnitten, so dass die Immersion nicht durch die Visualisierung des begrenzten Arbeitsraums (Wandwarner) gestört wurde. In dieser virtuellen Umgebung mussten die folgenden Arbeitsschritte durchgeführt werden:

1. Platzieren einer Grundplatte auf dem Montageplatz,
2. Aufstecken einer Welle mit vormontiertem Zahnrad auf die Grundplatte,
3. Aufstecken einer Riemenscheibe auf die Welle,
4. Ablegen der gefertigten Baugruppe auf einem Förderband.

Alle Teile für die Montage sind im Arbeitsbereich gelagert und müssen entweder vom Anwender oder vom Roboter gegriffen werden. In dem ersten Szenario wurden alle vier Arbeitsschritte vom Anwender durchgeführt, während im zweiten Szenario die Arbeitsschritte 2 und 3 vom Roboter durchgeführt wurden.

Für die beiden Montagesituationen mit und ohne Roboter ist exemplarisch für einen Anwender die Kopftrajektorie dargestellt (Bild 9).



**Bild 9:** Kopftrajektorien von zwei unterschiedlichen Anwendern

Der im Szenario definierte Arbeitsablauf erfordert es in beiden Fällen, dass der Anwender an den Arbeitsplatz herantritt, um die Grundplatte zu positionieren. Im Falle der manuellen Montage (Arbeitsschritte 2 und 3) bleibt der Anwender am Arbeitsplatz stehen und bewegt sich nur aufgrund des geforderten Arbeitsablaufs,

also zum Greifen der Welle und der Riemenscheibe. Eine weitere Bewegung entsteht durch das Ablegen der komplettierten Baugruppe auf dem Förderband.

Durch die Anwesenheit des Roboters wird das Verhalten des Anwenders aber grundlegend geändert, obwohl die Arbeitsschritte 1 und 4 und die damit verbundenen Bewegungen für den Anwender identisch geblieben sind, während die Schritte 2 und 3 vom Roboter übernommen werden. Während der Roboter diese Arbeitsschritte durchführt, tritt der Anwender unbewusst einen Schritt zurück, obwohl dies für den Arbeitsablauf nicht erforderlich wäre. Es ist vielmehr das unbewusste Ausweichen vor der automatisierten Roboterbewegung, obwohl diese gar nicht in dem Arbeitsbereich vor dem Montageplatz hineinführt. Zum Greifen der komplettierten Baugruppe tritt der Anwender wieder einen Schritt nach vorne und legt sie anschließend auf dem Förderband ab.

Aus diesen Beobachtungen lassen sich Tendenzen erkennen, die darauf hinweisen, dass bei einem MRK-Arbeitsplatz doch nicht die volle Effizienz des menschlichen Anwenders zur Verfügung steht. Der Mensch arbeitet somit nicht völlig unbeeinflusst von der Präsenz des Roboters, so dass hierdurch auch ein erstes Anzeichen für eine psychische Belastung gemäß DIN EN ISO 10075-1:2000 gegeben ist.

## **2 Zusammenfassung und Ausblick**

Im Rahmen dieses Beitrags wurde aufgezeigt, wie VAR<sup>2</sup>-Techniken dazu genutzt werden können, bestehende Produktionen zu optimieren oder neue Produktionsformen wie die dezentralisierte Fertigung überhaupt erst planbar zu machen.

VAR<sup>2</sup>-Techniken werden in diesem Zusammenhang nicht nur für eine schnelle Visualisierung unterschiedlicher Fabriklayouts verwendet, sondern gerade die Möglichkeit des echten Laufens in diesen virtuellen Welten erlauben neue Ansätze wie eine virtuell abgebildete MTM oder digitale Voruntersuchungen zu MRK-Arbeitsplätzen.

Das Erleben großer virtueller Welten, wie sie für die MTM und MRK notwendig sind, erfordert einen Raum für reales Laufen, in dem die Position des Anwenders erfasst werden kann. Dies erfordert bislang ein dediziertes und in der Regel fest installiertes System, was die Anwendung dieser neuen Technologie kostspielig macht. Weiterführende Arbeiten werden sich daher mit der Entwicklung und Anwendung neuer Positionsmesssysteme beschäftigen, wie beispielsweise das aus der Robotik bekannte „Simultaneous Localization and Mapping“ (SLAM). Zusammen mit der Integration in Planungssysteme können dann auch große virtuelle Welten in relativ kleinen Räumen begangen werden.



## Literaturangaben

- [1] Bakranz, R.; Landau, K.: *Handbuch Industrial Engineering: Produktivitätsmanagement mit MTM - Konzept*. 2012, Vol. 1, 2. Ausgabe
- [2] Bakranz, R.; Landau, K.: *Handbuch Industrial Engineering: Produktivitätsmanagement mit MTM - Anwendung*. 2012, Vol. 2, 2. Ausgabe
- [3] Bauernhansl, T.; Hompel, M.; Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik: Anwendungen, Technologien und Migration*. Springer Verlag, Berlin, 2014
- [4] Becker, H.: *High Noon in the Automotive Industry*. Springer Verlag, Berlin, 2006
- [5] Bundesministerium für Bildung und Forschung: *Zukunftsprojekt Industrie 4.0*. URL: [www.bmbf.de/de/zukunftsprojekt-industrie-4-0-848.html](http://www.bmbf.de/de/zukunftsprojekt-industrie-4-0-848.html) [30.5.2017]
- [6] Coupeté, F.; Weistroffer, V.; Hugues, O.: *New Challenges for Human-Robot Collaboration in an Industrial Context: Acceptability and Natural Collaboration*. In: *Proceedings of the 5th IEEE Workshop Towards a Framework for Joint Action (IEEE RO-MAN)*, 2016
- [7] Jayaram, S.; Jayaram, U.; Wang, Y.; Tirumali, H.; Lyons, K.; Hart, P.: *VADE: A Virtual Assembly Design Environment*. In: *IEEE Computer Graphics and Applications* 19(5), 1999, S. 44-50
- [8] Krüger, J.; Lien, T. K.; Verl, A.: *Cooperation of Humans and machines in Assembly Lines*. In: *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 2009, Vol. 58, S. 628-646
- [9] Kunz, A.; Zank, M.; Fjeld, M.; Nescher, T.: *Redirected Walking in Virtual Environments for Factory Planning and Evaluation*. In: *Proceedings of the 6th CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems*, 2016, S. 257-262
- [10] Laring, J.; Forsman, M.; Kadefors, R.; Örtengren, R.: *MTM-based Ergonomic Workload Analysis*. In: *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2009, Vol. 30, No. 3, S. 135-148
- [11] Leuenberger, K.; Gassert, R.: *Low-power Sensor Module for Long-term Activity Monitoring*. In: *IEEE Annual International Conference of Engineering in Medicine and Biology Society*, 2011, S. 2237-2241
- [12] Maclean-Fogg: *Lean Product Launch Underway*. URL: [www.macleanfogg.com/lean-product-launch-underway-at-mfcs-saegertown](http://www.macleanfogg.com/lean-product-launch-underway-at-mfcs-saegertown), [11.6.2017]
- [13] Mannini, A.; Sabatini, A. M.: *Machine Learning Methods for Classifying Human Physical Activity from On-body Accelerometers*. In: *Sensors* 10(2), 2010, S. 1154-1175

- [14] Matsas, E.; Vosniakos, G.-C.: *Design of a Virtual Reality Training System for Human-Robot Collaboration in Manufacturing Tasks*. In: *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 2015, S. 1-15
- [15] Moniri, M.; Valcarel, F.; Merkel, D.; Sonntag, D.: *Human Gaze and Focus-of-Attention in Dual Reality Human-Robot Collaboration*. In: *Proceedings of the 12th International Conference on Intelligent Environments*, 2016, S. 238-241
- [16] *MTM Mediathek: Cardboard Engineering*. URL: [www.youtube.com/watch?v=xfcwMLTV3Y](http://www.youtube.com/watch?v=xfcwMLTV3Y), [30.5.2017]
- [17] Nescher, T.; Huang, Y. Y.; Kunz, A.: *Planning Redirection Techniques for Optimal Free Walking Experience Using Model Predictive Control*. In: *IEEE Symposium on 3D User Interfaces*. 2014, S. 111-118
- [18] Razzaque, S.; Kohn, Z.; Whitton, M.: *Redirected Walking*. In: *Proceedings of Eurographics*, 2001, S. 289-294
- [19] *SMART FACE: Smart Micro Factory für Elektrofahrzeuge mit schlanker Produktionsplanung*, URL: <http://www.plattform-i40.de/I40/Redaktion/DE/Anwendungsbeispiele/243-smart-face-smart-micro-factory-fuer-elektrofahrzeuge-mit-schlanker-produktionsplanung/beitrag-smart-face-smart-micro-factory-fuer-elektrofahrzeuge-mit-schlanker-produktionsplanung.html> [30.5.2017]
- [20] Tan, J.; Duan, F.; Zhan, Y.; Watanabe, K.; Kato, R.; Arai, T.: *Human-Robot Collaboration in Cellular Manufacturing, Design and Development*. In: *Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2009, S. 29-34
- [21] Weistroffer, V.; Paljic, A.; Callebert, L.; Fuchs, P.: *A Methodology to Assess the Acceptability of Human-Robot Collaboration Using Virtual Reality*. In: *Proceedings of the 19th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology (VRST)*, 2013, S. 39-48