

Autonome Flugrobotik für die wandlungsfähige Fabrik – Steuerung, Infrastruktur und Simulation

von Bergen, T.; Huptych, M.; Röck, S.

wt Werkstattstechnik online, Springer-VDI-Verlag, 2018

<https://doi.org/10.37544/1436-4980-2018-11-12-94>

Industrie 4.0, Digitale Fabrik, Simulation

Autonome Flugrobotik für die wandlungsfähige Fabrik – Steuerung, Infrastruktur und Simulation*

Ein Beitrag zur wandlungsfähigen Fabrik in der Zukunft

T. von Bergen, M. Huptych, S. Röck

Die wandlungsfähige Fabrik ebnet den Weg für die flexible Produktion der Zukunft. In dem Beitrag wird die Steuerung und die Infrastruktur für den Einsatz von Flugrobotern als Handhabungsgerät in der Produktion sowie die Ergebnisse bis zur virtuellen Inbetriebnahme vorgestellt.

Autonomous flight robotics for a flexible factory – control, infrastructure and simulation. A contribution to flexible factories in the future

The flexible factory paves the way for the flexible production of the future. In this article, the control system and the infrastructure for the use of flight robots as handling devices in production as well as the results up to virtual setup procedure are presented.

1 Einleitung

Die wandlungsfähige Fabrik der Zukunft verändert die Organisation von Produktionsprozessen in ihrer Flexibilität und Anpassungsfähigkeit grundlegend. Beliebige Abfolgen verschiedener Produktionsschritte gestatten eine weitgehende Individualisierung von Produkten bei gleichzeitig geringer Losgröße [1]. Zum Überwinden starrer Produktionsabfolgen wird der Teilefluss zwischen den Bearbeitungsstationen durch Handhabungsgeräte mit hohem Freiheitsgrad dynamisch gestaltet. Ein bereits etabliertes System im Bereich der Intralogistik sind fahrerlose Transportsysteme (FTS) [2]. Der Einsatz dieser „bodengebundenen“ Fahrzeuge verlangt eine großzügige Wegführung innerhalb der Produktionsstätten und zudem eine ausreichende Planung der Wegkapazität, um Engpässe und Rück-

staus auf den Transportwegen zu vermeiden. Neben der Notwendigkeit einer entsprechenden Bodenbeschaffenheit ist der Betrieb der FTS zumeist auf einzelne Gebäude begrenzt.

Aufgrund der erkennbaren Nachteile der FTS wird vorgeschlagen, die Verwendung des meist ungenutzten Luftraums innerhalb der Produktionsstätten zu nutzen. Im Bereich der Logistik wird bereits der Einsatz von unbemannten Flugfahrzeugen „Unmanned Aerial Vehicles“ (UAV) untersucht [3]. Beispielsweise wird der Einsatz von Multikoptern zum autonomen Zustellen von Paketen bis zur Haustüre diskutiert. Die Integration flexibler Fluggeräte in die Intralogistik für den Transport von kleineren Werkstücken hingegen ist bis dato noch nicht gelungen [4]. Die räumliche Flexibilität der Flugroboter und die Skalierbarkeit über deren Anzahl erlaubt beliebige und schnell umsetzbare Kombinationsmöglichkeiten der Bearbeitungsstationen im Produktionsprozess. Gleichzeitig entsteht eine komplexe Herausforderung hinsichtlich der Kollisionsvermeidung zwischen den beteiligten Objekten in einer sich stetig verändernden Produktionsumgebung aus Bearbeitungsstationen, Flugrobotern und Menschen in der Produktion. Eine Offline-Bahnplanung der Flugbewegungen im Voraus ist hier nicht zielführend, da die Flugbahn online, das heißt in jedem Systemtakt an den aktualisierten Umgebungszustand angepasst werden muss.

Dieser erste Beitrag zum Einsatz von autonomen Flugrobotern im industriellen Umfeld behandelt einen Lösungsansatz für die Steuerung von Flugrobotern in veränderlichen Umgebungen. Darüber hinaus wird ein cloudbasierter Lösungsansatz präsentiert, der eine Vernetzung mehrerer Flugroboter-Steuerungen ermöglicht und so die Basis für eine skalierbare und flexible Produktionssteuerung herstellt.

2 Stand der Forschung und Technik

Bahnplanungsalgorithmen werden im industriellen Kontext überwiegend im Bereich der FTS aufgefunden. In der wandlungsfähigen Fabrik kommen, aufgrund der benötigten Flexibilität, solche Systeme zum Einsatz, deren Bahnen auf einfache Weise an neue Anforderungen angepasst werden können (vgl. Dörr und Garcia Lopez in [5]). Entsprechende Schlussfolgerungen sind auch auf den Einsatz von Flugrobotern zu übertragen.

Bei der freien Navigation ist es erforderlich, dass Hindernisse, wie statische Objekte, weitere autonome Systeme und Menschen, erkannt werden und sicher ausgewichen werden kann. Bader, Richtsfeld, Holl et al. setzen in [6] dabei auf vorgegebene Routen, die bei einer Blockade vom FTS abgeändert werden können, um den Hindernissen auszuweichen oder diese zu vermeiden. Mit der Zielkoordinate wird offline von einem übergeordneten Kontrollsystem eine Route berechnet und an das FTS übergeben. Unvorhersehbare Objekte, wie der Mensch, werden durch weitere Sensorik erkannt und führen zu einem temporären Verlassen der vorausgeplanten Bahn. Dies ist allerdings

Timm von Bergen, M. Sc., Dipl.-Ing. Marcel Huptych
Prof. Dr.-Ing. Sascha Röck
Virtual Automation Lab (VAL) – Hochschule Esslingen
Kanalstr. 33, D-73728 Esslingen
Tel. +49 (0)711 / 397-3395
E-Mail: timm.von-bergen@hs-esslingen.de
Internet: www.virtual-automation-lab.de

Dank

Die Autoren der Veröffentlichung bedanken sich beim Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg für die Förderung des kooperativen Promotionskollegs „Promise 4.0“ und beim Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau Baden-Württemberg für die Förderung der Transferplattform BW Industrie 4.0.

* Bei den mit einem Stern gekennzeichneten Beiträgen handelt es sich um Fachaufsätze, die von Experten auf diesem Gebiet wissenschaftlich begutachtet und freigegeben wurden (peer-reviewed).

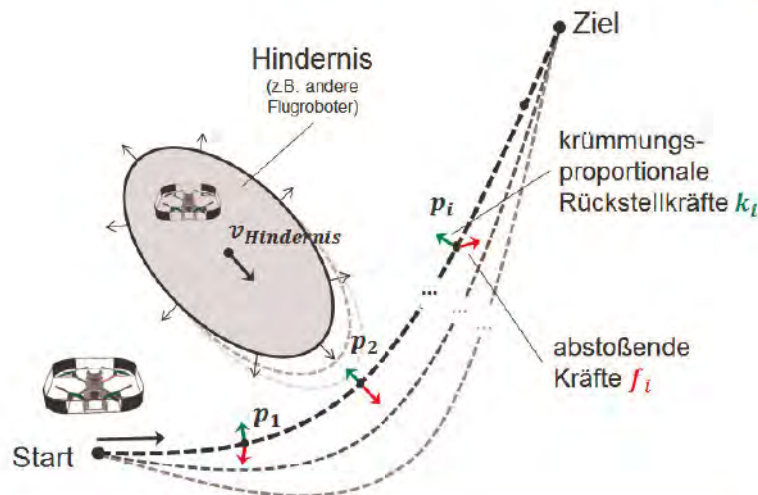


Bild 1. Wirkprinzip der Kurvenflussmethode: Die abzufliegende Bahn unterliegt einer kontinuierlichen Verschiebung durch virtuelle Kräfte. Im Kräftegleichgewicht bildet die Bahn ein Pareto-Optimum zwischen minimaler Bahnlänge und ausreichendem Abstand zum Hindernis

nur in vorher festgelegten Bereichen erlaubt. Die für die wandlungsfähige Fabrik erforderliche echtzeitfähige Adaption an sich verändernde Bedingungen ist hier nicht vorgesehen. Jun und D'Andrea planen in [7] Routen für UAV anhand von Wahrscheinlichkeitskarten, die eine Aussage über das Kollisionspotential enthalten. Unvorhersehbare Hindernisse werden in dem vorgestellten Ansatz durch zusätzliche Sensorik detektiert und es wird anhand der Potentialfeldmethode ausgewichen. Bei der Planung von Routen für mehrere UAV verändert jede Route das Kollisionspotential auf der Karte, so dass folgende Routen von den vorausgehenden beeinflusst werden. Aufgrund der Abhängigkeit der Berechnungen ist eine verteilte und eigenständige Berechnung auf den Flugrobotern nicht möglich.

Für den industriellen Einsatz der Flugrobotik ist festzustellen, dass die vorgestellten Lösungen keinen skalierbaren Ansatz präsentieren, der den kollisionsfreien Betrieb einer beliebigen Anzahl dynamischer und flexibler Flugroboter gewährleistet. Die zentrale Planung der Bahnen verhindert hier die Verteilung der Rechenlast, lässt keine dynamische Veränderung der Flugbahnen zu und führt außerdem zu einer Verringerung der Autonomie der Flugroboter. Eine Veränderung der Produktionslinie führt zudem zu einer aufwendigen Rekonfiguration der Algorithmen.

3 Konzept einer cloudbasierten Flugroboter-Steuerung

Im Folgenden wird ein Lösungsansatz für den kollisionsfreien industriellen Einsatz von Flugrobotern im Kontext einer wandlungsfähigen Fabrik vorgestellt. Für die Gewährleistung eines präzisen Abbildes der veränderlichen Produktionsumgebung wird eine echtzeitnahe Positionsbestimmung für dynamische Objekte (Flugroboter und Menschen) vorausgesetzt.

3.1 Kollisionsfreie Onlinebahnplanung für Flugroboter

Für die Onlinebahnplanung wurde mit der „Kurvenflussmethode“ ein von den Autoren bereits in der Industrierobotik

erfolgreich angewandter Algorithmus (siehe [8] und [9]) für den Einsatz mit Flugrobotern adaptiert. Der Algorithmus erfüllt dabei die Anforderung eine kollisionsfreie Bahn zwischen gegebenem Start- und Zielpunkt unter Einfluss virtueller Kräfte kontinuierlich an den sich ändernden Umgebungszustand anzupassen. Dieses Prinzip ist in **Bild 1** dargestellt.

Dabei wirken auf die als Differentialgleichung modellierte Bahn p sowohl von statischen Hindernissen (beispielsweise Hallenwände) und dynamischen Hindernissen (zum Beispiel weitere Flugroboter oder Menschen) ausgehende Abstoßungskräfte f als auch krümmungsproportionale Rückstellkräfte k . Diese zwingen die Bahn wieder in einen Zustand minimaler Krümmung und damit einhergehend minimaler Länge. Die Positions- und Längenänderung der ortsdiskretisierten Bahn gemäß der sogenannten Kurvenflussgleichung $T \cdot \dot{p}_i = k_i + K \cdot f_i$ (vgl. [8] und [9]) strebt stets in ein Pareto-Optimum zwischen minimaler Bahnlänge und ausreichendem Abstand zu den Hindernissen. Mit den Parametern T und K lassen sich dabei Dynamik und Gleichgewichtslage der Bahn beeinflussen. Entsprechend der gewählten Bahndiskretisierung liefert die Lösung in jedem Steuerungstakt eine entsprechende Anzahl kollisionsfreier Bahnpunkte p_i , auf deren Basis die Flugbahn mithilfe eines vorgegebenen Geschwindigkeitsprofils feininterpoliert wird.

Für den Einsatz im beschriebenen Szenario wurde dieser Algorithmus als eigene Interpolationsart in Form eines mehrfach instanzierbaren Funktionsbausteins in eine industrielle Steuerung implementiert. Dies ermöglicht das kollisionsfreie Abfliegen beliebig rekonfigurierbarer Start- und Zielpunkte ohne bei deren Programmierung statische und dynamische Hindernisse in der Produktionsumgebung berücksichtigen zu müssen.

Da für jeden Flugroboter die jeweils anderen Flugroboter Hindernisse darstellen, müssen die aktuellen Positionsdaten aller Flugroboter zu jedem Zeitpunkt in der Flugroboter-Steuerung bekannt sein. Um dies zu realisieren wurde ein übergeordneter cloudbasierter Dienst implementiert, der im Folgenden näher erläutert wird.

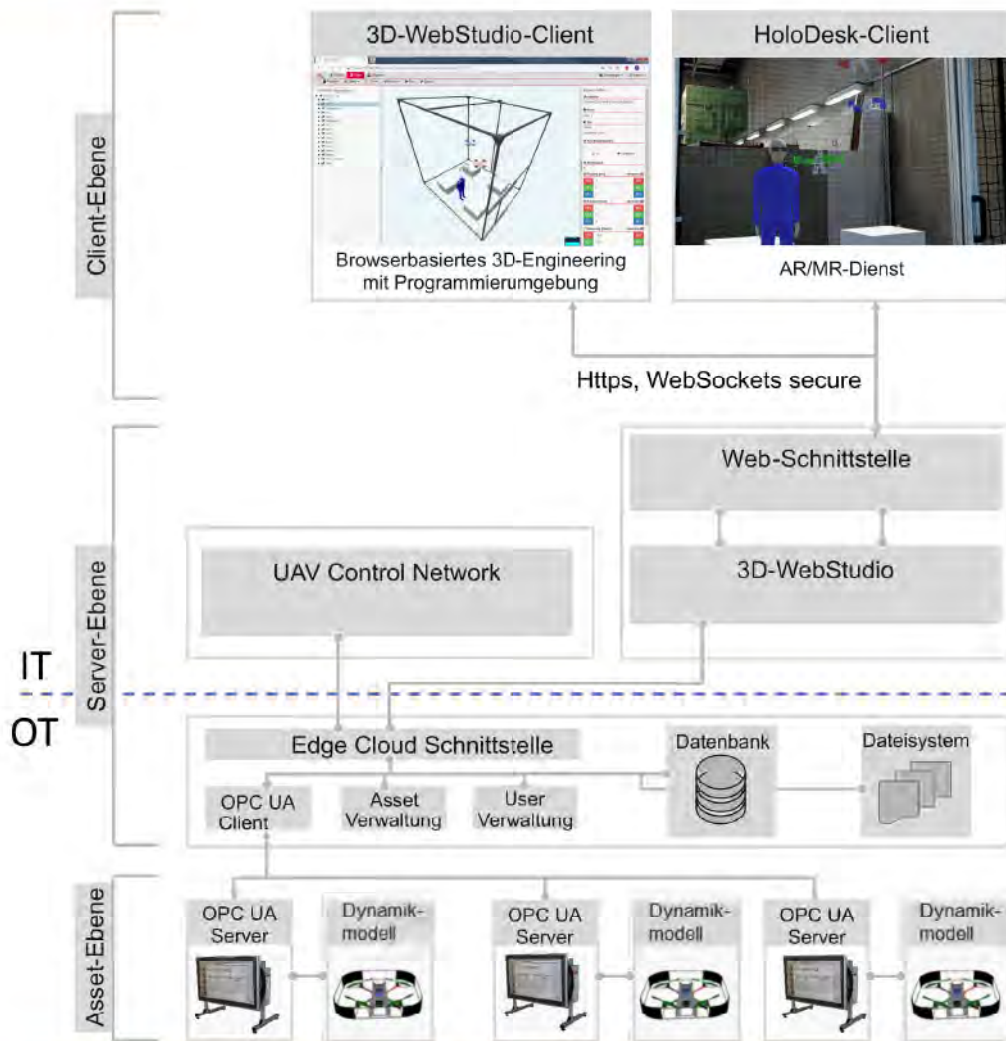


Bild 2. Die Edge-Cloud bildet die Schnittstelle zwischen Information Technology (IT) und Operational Technology (OT) für Mehrwertdienste wie dem Unmanned Aerial Vehicles (UAV) Control Network zur zentralen Bereitstellung der Flugroboterdaten oder dem VAL 3D-WebStudio/VAL HoloDesk zur Visualisierung der Flugroboterszene

3.2 Edge-Cloud basierte dezentrale Infrastruktur

Die Verwendung industrieller Steuerungen für die Flugroboter erlaubt durch industrielle Kommunikationsstandards eine Integration in vorhandene Infrastrukturen. In [10] wurde die Edge-Cloud als private Cloud am Rande einer Fabrik vorgestellt. Sie verbindet die Maschinenebene – die Operational Technology (OT) – mit den Anwenderendgeräten in der Information Technology (IT) (vgl. **Bild 2**). Gegenüber einer Lösung in einer Public Cloud, zum Beispiel von Amazon, Google oder Microsoft wird die Datenhoheit hier bewahrt und trotzdem innerhalb des Unternehmens zur Verfügung gestellt. Die lokale Edge-Cloud Infrastruktur ermöglicht eine latenzarme und damit echtzeitnahe Kommunikation („weiche Echtzeit“). Die Kommunikation findet über OPC UA statt. Zukünftige Erweiterungen mit dem Time-Sensitive-Networking (TSN) eröffnen hier die Möglichkeit einer „harten“ Echtzeitkommunikation. Assets, wie zum Beispiel Flugroboter oder FTS können in die Edge-Cloud Plattform angebunden werden und stehen so Mehrwertdiensten zur Verfügung.

Für die vorausgehend erläuterte Online-Bahnplanung wurde die cloudbasierte Flugroboter-Steuerung UAV Control Network

(UCN) entwickelt, die eine verteilte Steuerung mehrerer Flugroboter auf Basis der Kurvenflussmethode ermöglicht. Der Dienst erkennt vorhandene Flugroboter und berücksichtigt diese in der Produktionsumgebung, sobald diese aktiv und einsatzbereit sind (**Bild 2**).

Der UCN Dienst stellt den Flugrobotern die notwendigen Informationen (insbesondere Positionsdaten) der anderen Teilnehmer in der Produktionsumgebung zur Verfügung. Es wird dabei die Geräteverwaltung der Edge-Cloud Plattform ausgenutzt, um die Skalierbarkeit der Produktion auf beliebig viele Flugroboter zu gewährleisten. Die benötigte Rechenleistung auf der Edge-Cloud Plattform beschränkt sich auf die Verwaltung und Verteilung der Flugroboterdaten. Die Online-Bahnplanung anhand der Kurvenflussmethode findet ausschließlich lokal auf der jeweiligen Flugroboter-Steuerung statt, sodass die benötigte Rechenleistung verteilt ist und mit der Anzahl der Flugroboter skaliert.

Die geringe Komplexität ergibt sich aus der verfolgten cloud-typischen Mikroservice Architektur, die die Reduzierung der Komplexität durch die Aufteilung verschiedener Teilaufgaben auf unabhängige Prozesse oder Dienste vorsieht.

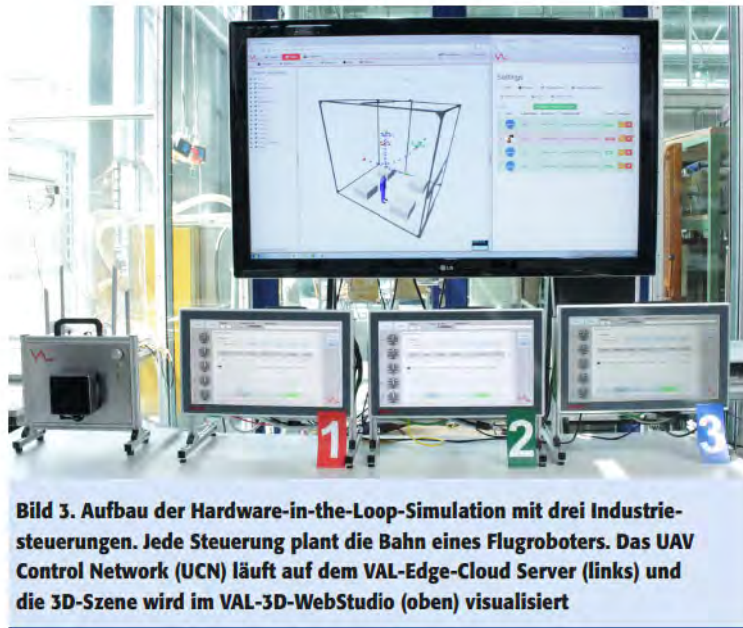


Bild 3. Aufbau der Hardware-in-the-Loop-Simulation mit drei Industriesteuerungen. Jede Steuerung plant die Bahn eines Flugroboters. Das UAV Control Network (UCN) läuft auf dem VAL-Edge-Cloud Server (links) und die 3D-Szene wird im VAL-3D-WebStudio (oben) visualisiert

Demzufolge beschränkt sich der UCN nur auf einen Teilbereich der Gesamtanwendung.

4 Realisierung und virtuelle Inbetriebnahme einer Beispielanwendung

Der vorgestellte Lösungsansatz wurde anhand einer Beispielanwendung mit drei Flugrobotern mithilfe einer Hardware-in-the-Loop Simulation validiert und getestet.

Für die Steuerung der Flugroboter kamen drei Industriesteuerungen der Firma Beckhoff zum Einsatz (**Bild 3**). Auf jeder Steuerung wurde der Online-Bahnplanungsalgorithmus auf Basis der Kurvenflussmethode implementiert. Der Produktionsprozess und die Flugroboterdynamik wurden mithilfe des Echtzeitsimulationswerkzeug ISG-Virtuos an den realen Steuerun-

gen simuliert. Dabei wurde jede Steuerung mit einem Dynamikmodell eines Flugroboters gekoppelt.

Für das Szenario wurden drei Flugroboter verwendet, die autonom im Raum zwischen mehreren Bearbeitungsstationen hin- und herfliegen. Die Flugroboter-Szene wurde als digitales Abbild auf der Edge-Cloud verfügbar gemacht und den Steuerungen über den UCN Dienst echtzeitnah zur Verfügung gestellt. Die Visualisierung der Szene wurde in einem Visualisierungsdienst, dem VAL-3D-Webstudio, realisiert [11]. Dieses ebenfalls am VAL entwickelte Werkzeug ermöglicht die 3D-Visualisierung der Flugroboterszene über den Webbrowser und auf Augmented-Reality Geräten, wie beispielsweise der Microsoft Hololens (vgl. Bild 2). Dies ermöglicht die realistische Visualisierung einer virtuellen Inbetriebnahme unter Berücksichtigung

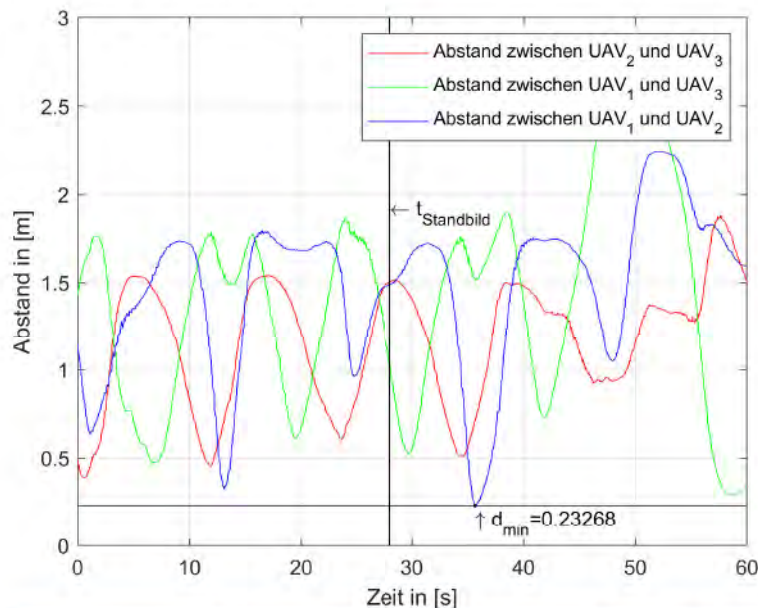


Bild 4. Aufzeichnung der Abstände zwischen den Flugrobotern während der Simulation. Ein Mindestabstand von $d_{\min} \approx 0,23m$ wurde zu keinem Zeitpunkt unterschritten

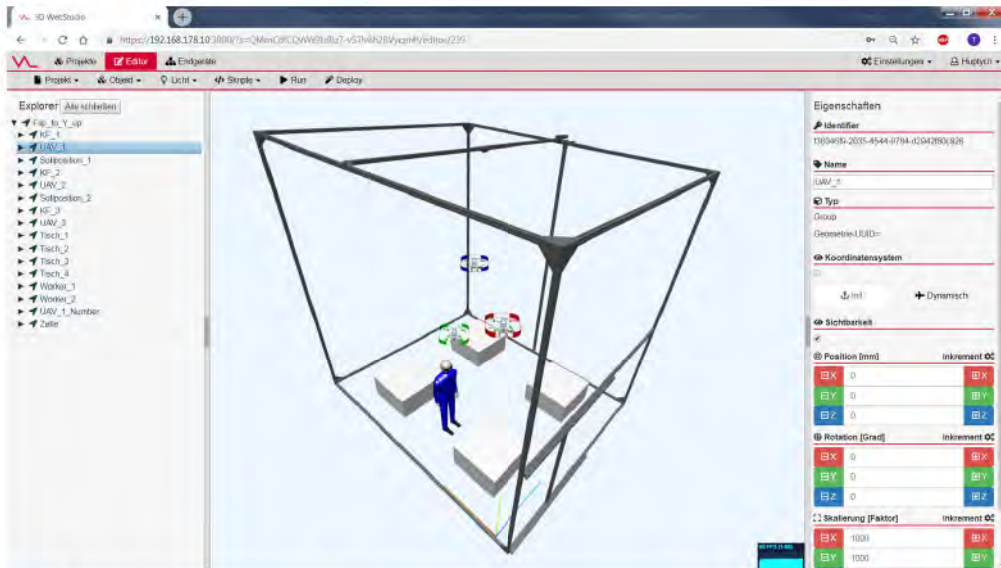


Bild 5. Momentaufnahme aus der Simulation zum Zeitpunkt $t_{\text{Standbild}} = 28\text{s}$ (vgl. Bild 4) dargestellt im VAL-3D-WebStudio

sichtigung virtueller und auch realer Hindernisse, sofern diese im digitalen Abbild der wandlungsfähigen Fabrik realisiert sind.

Für das Evaluationszenario wurden Start- sowie Zielpunkte für die drei Flugroboter programmiert, deren direkte Verbindungslinien sich in einem Punkt schneiden und damit ein sehr großes Kollisionspotenzial bieten. Diese werden von den Flugrobotern mehrfach abgeflogen. Außerdem wurden die Zellenwände sowie eine Person im Flugraum als zusätzliche Hindernisse modelliert. Zur Evaluation wurden über einen Zeitraum von 60 Sekunden die Abstände zwischen den drei Flugrobotern aufgezeichnet und in **Bild 4** dargestellt. Dabei wurde ein Mindestabstand von $d_{\text{min}} \approx 0,23\text{m}$ zu keinem Zeitpunkt unterschritten.

Bild 5 und **Bild 6** zeigen ein Standbild der Szene im „VAL 3D“-WebStudio sowie das daraus abgeleitete Hologramm der Szene in der realen Flugroboterzelle.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Im Beitrag wurde ein Konzept zur cloudbasierten Flugrobotersteuerung im Kontext der wandlungsfähigen Fabrik vor-

gestellt. Es konnte gezeigt werden, dass unter Anwendung der Kurvenflussmethode zur Online-Bahnplanung von Flugrobotern und dem UAV Control Network Dienst, einem übergeordneten Edge-Cloud-basierten Mehrwertdienst, ein kollisionsfreier Betrieb in der Simulation möglich ist. Die Flugroboter agieren hierbei autonom und planen ihre Routen online, sodass auch dynamische Hindernisse berücksichtigt werden. Das Verwenden des digitalen Abbildes der Umgebung auf der Edge-Cloud ermöglicht eine automatisierte Anpassung an Veränderungen. Der Edge-Cloud-basierte Ansatz verteilt die Rechenlast auf die Flugrobotersteuerungen und ermöglicht damit eine gute Skalierbarkeit der Flugroboteranzahl und damit des Transportvolumens. Abstandsmessungen im vorgestellten Testzenario ergaben, dass zu jedem Zeitpunkt ein ausreichender Abstand zwischen den Flugrobotern eingehalten wurde.

Dieser erste Beitrag behandelt einen Teilaspekt einer flexiblen Produktion mittels UAVs. Derzeit wird an einer Realisierung mit realen Flugrobotern gearbeitet. Hierfür ist es in einem nächsten Schritt notwendig, Methoden für die präzise Indoor-Positionsbestimmung von Flugrobotern zu erarbeiten.



Bild 6. Identische Szene aus Bild 5 als Hologramm in der realen Flugzelle durch die Hololens

Literatur

- [1] Dorst, W. (Hrsg.): Umsetzungsstrategie Industrie 4.0 – Ergebnisbericht der Plattform Industrie 4.0. Bitkom Research GmbH, 2015
- [2] Wurmman, P. R.; D'Andrea, R.; Mountz, M.: Coordinating Hundreds of Cooperative, Autonomous Vehicles in Warehouses. *AI Magazine* 29 (2008), S. 9–20ff
- [3] Jung, S.; Kim, H.: Analysis of Amazon Prime Air UAV Delivery Service. *Journal of the Knowledge Information Technology and Systems* 4 (2013) 3, S. 15–20
- [4] Landrock, H.; Baumgärtel, A.: Die Industriedrohne – der fliegende Roboter. Wiesbaden: Springer 2018
- [5] Dörr, S.; Garcia-Lopez, F.: Vernetzte intelligente Navigation für fahrerlose Transportsysteme. *Open automation* 3 (2015), S. 10–13
- [6] Jun, M.; D'Andrea, R.: Path Planning for Unmanned Aerial Vehicles in Uncertain and Adversarial Environments. In: Butenko S.; Murphey R.; Pardalos P. M. (eds): *Cooperative Control: Models, Applications and Algorithms*. Cooperative Systems, Vol. 1. Boston: Springer-Verlag 2003
- [7] Bader, M.; Richtsfeld, A.; Holl, W. et al.: Balancing Centralised Control with Vehicle Autonomy in AGV Systems for Industrial Acceptance. 11th Int. Conf. on Autonomic and Autonomous Systems, 2015
- [8] Huptych, M.; Röck, S.: Online path planning in dynamic environments using the curve shortening flow method. *Production engineering* 9 (2015) 5/6, 2015
- [9] Huptych, M.; Groh, K.; Röck, S.: Online path planning for industrial robots in varying environments using the curve shortening flow method. *Proceedings of the 4th international conference on intelligent robotics and applications*, Aachen 2011. Berlin: Springer, pp 73–82. Doi: 10.1007/978-3-642-25486-4-8
- [10] Friedrich, T.; Huptych, M.; Schnierle, M. et al.: Augmented Reality und Flugrobotik – neue Technologien für die Smart Factory. Tagungsband 15. Fachkonferenz AALE Köln, 2018
- [11] Schnierle, M.; Röck, S.: Plattform für die Mixed-Reality-in-the-Loop-Simulation – Ein Beitrag zur Mixed-Reality-in-the-Loop-Simulation als Erweiterung der X-in-the-Loop-Methodenreihe. *wt Werkstattstechnik online* 108 (2018) 9, S. 623–630. Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag 2018