

Reihe 2

Fertigungstechnik

Nr. 697

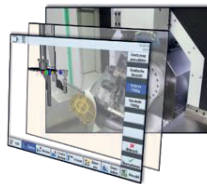
M.Sc. Philipp Sommer (Hrsg.),  
Stuttgart

## iWindow - Intelligentes Maschinenfenster



Abschlussbericht  
Verbundforschungsprojekt  
**iWindow – Intelligentes Maschinenfenster**

Ein im Rahmen des Förderprogramms *IKT 2020 – Forschung für Innovationen* unter der Bekanntmachung *Virtuelle Techniken für die Fabrik der Zukunft - Ein Beitrag zum Zukunftsprojekt Industrie 4.0* des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) durchgeführtes Verbundforschungsprojekt.



Am Verbundforschungsprojekt *iWindow* beteiligten sich folgende Firmen und Institutionen:

- DMG MORI AKTIENGESELLSCHAFT, Bielefeld
- Bosch Rexroth AG, Lohr am Main
- Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW), Universität Stuttgart
- ModuleWorks GmbH, Aachen
- TRUMPF GmbH + Co. KG, Ditzingen
- Höchstleistungsrechenzentrum Stuttgart (HLRS), Universität Stuttgart
- ISG Industrielle Steuerungstechnik GmbH, Stuttgart

Projektleitung: M.Sc. Philipp Sommer, ISW, Universität Stuttgart

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter den Förderkennzeichen 01IM14003A - G gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen  
und Fertigungseinrichtungen der Universität Stuttgart

2018



# Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 2

Fertigungstechnik

M.Sc. Philipp Sommer (Hrsg.),  
Stuttgart

Nr. 697

iWindow - Intelligentes  
Maschinenfenster

VDI verlag

Sommer, Philipp

## **iWindow – Intelligentes Maschinenfenster**

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 2 Nr. 697. Düsseldorf: VDI Verlag 2018.

148 Seiten, 123 Bilder, 0 Tabellen.

ISBN 978-3-18-369702-1, ISSN 0178-9406,

€ 57,00/VDI-Mitgliederpreis € 51,30.

**Für die Dokumentation:** Augmented Reality – Virtual Reality – Visualisierung – Maschinenfenster – Mehrwertdienste – Assistenzsysteme – Simulation – Mensch-Maschine-Schnittstelle – Kamerakalibrierung – Digitaler Zwilling

Das Verbundforschungsprojekt iWindow: Intelligentes Maschinenfenster beschäftigte sich mit der visuellen Unterstützung von Maschinenbedienern an Werkzeugmaschinen. Diese konnten bisher nur auf wenige bis keine Systeme, die sie bei ihren täglichen Aufgaben direkt an der Werkzeugmaschine unterstützen, zurückgreifen. Das Forschungsprojekt verbindet reale und virtuelle Welt in der Werkzeugmaschine durch Technologien wie Virtual und Augmented Reality, digitaler Zwilling, Simulation und Mehrwertdienste. Durch Nutzung jeweils für die aktuelle Arbeitssituation passender Dienste, werden Mitarbeiter befähigt, sich an die steigende Individualisierung der Produkte und die flexiblere Produktion anzupassen. Kunden und Geschäftspartner werden durch die Möglichkeit eigene mehrwertgenerierende Dienste zu entwickeln und anderen Anwendern zur Verfügung zu stellen in den Wertschöpfungsprozess eingebunden. Diese Publikation beleuchtet die im Rahmen des Forschungsprojekts erarbeiteten Ergebnisse hinsichtlich für ein intelligentes Maschinenfenster benötigter Technologien und Entwicklungen.

### **Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter [www.dnb.de](http://www.dnb.de) abrufbar.

### **Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek**

(German National Library)

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie (German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at [www.dnb.de](http://www.dnb.de).

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2018

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Fotokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, im Internet und das der Übersetzung, vorbehalten.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 0178-9406

ISBN 978-3-18-369702-1

---

## Vorwort

Das Zukunftsprojekt *Industrie 4.0* der Bundesregierung hat die Schaffung neuer und Optimierung bestehender Formen intelligenter Produktions- und Automatisierungstechnik zum Ziel. Die Zukunft der Produktion wird durch eine starke Individualisierung der Produkte sowie eine hoch Flexibilisierung geprägt sein. Dazu wachsen die reale und die virtuelle Welt in der Fabrik von Morgen zusammen.<sup>1</sup> Wichtige Strukturelemente zukünftiger technischen Systemen sind innovative Benutzerschnittstellen, der digitale Schatten als virtuelles Echtzeitabbild der Realität sowie mehrwertgenerierende Softwaredienste. Auch eine App-Orientierung nach dem Prinzip von Smartphones und das Einbinden von Partnern und Kunden in den Wertschöpfungsprozess müssen adressiert werden.<sup>2</sup>

Das Verbundforschungsprojekt *iWindow: Intelligentes Maschinenfenster* beschäftigte sich mit der visuellen Unterstützung von Maschinenbedienern an Werkzeugmaschinen. Diese konnten bisher nur auf wenige bis keine Systeme, die sie bei ihren täglichen Aufgaben direkt an der Werkzeugmaschine unterstützen, zurückgreifen. Das Vorhaben wurde im Förderprogramm *IKT 2020 – Forschung für Innovationen* unter der Bekanntmachung *Virtuelle Techniken für die Fabrik der Zukunft - Ein Beitrag zum Zukunftsprojekt Industrie 4.0* des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) durchgeführt. Das Forschungsprojekt verbindet die reale und die virtuelle Welt in der Werkzeugmaschine durch Technologien wie Virtual und Augmented Reality, digitaler Zwilling, Simulation und Mehrwertdienste. Durch Nutzung jeweils für die aktuelle Arbeitssituation passender Dienste, werden Mitarbeiter befähigt sich an die steigende Individualisierung der Produkte und die flexiblere Produktion anzupassen. Kunden und Geschäftspartner werden durch die Möglichkeit eigene mehrwertgenerierende Dienste zu entwickeln und anderen Anwendern zur Verfügung zu stellen in den Wertschöpfungsprozess eingebunden. Diese Publikation beleuchtet die im Rahmen des Forschungsprojekts erarbeiteten Ergebnisse hinsichtlich für ein intelligentes Maschinenfenster benötigter Technologien und Entwicklungen.

Philipp Sommer

---

<sup>1</sup> Forschungsunion Wirtschaft und Wissenschaft (Hrsg.); acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V. (Hrsg.): *Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0 : Deutschlands Zukunft als Produktionsstandort sichern*. Zwischenbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0. Berlin, 2012

<sup>2</sup> Bauernhansl, Thomas ; Krüger, Jörg ; Reinhart, Gunther ; Schuh, Günther: *WGP-Standpunkt Industrie 4.0*. Berlin, 2016



# Inhaltsverzeichnis

1	Motivation und Konzept .....	1
1.1	Motivation und Zielstellung.....	1
1.2	Konzept.....	6
2	Ergebnisse aus Demonstratorensicht .....	9
2.1	Einleitung .....	9
2.2	Kameraauswahl und -kalibrierung.....	10
2.3	Absortierassistent .....	12
2.4	Kamerabasierte Überlagerung an einem Roboter .....	14
2.5	Kamerabasierte Überlagerung an Werkzeugmaschinen.....	14
2.6	Perspektivische Überlagerung am transparenten LCD .....	16
2.7	Perspektivische Überlagerung am transparenten OLED Display .....	18
2.8	Finaler Demonstrator Werkzeugmaschine.....	20
2.8.1	Echtzeitvisualisierung im Bedienpanel.....	20
2.8.2	Perspektivische VR-Echtzeitvisualisierung an herkömmlichen Displays.....	20
2.8.3	Augmented Reality mittels transparenter Displays .....	22
3	Unterstützung beim Absortiervorgang in der Blechfertigung .....	25
3.1	Ausgangssituation und Zielsetzung .....	25
3.2	Absortierassistentz mittels kamerabasierter Entnahmedetektion .....	27
3.3	Erfassung des Absortierbereichs mit Kameras .....	28
3.4	Ermittlung der ebenen Bildszene auf Basis der Kamerabilder .....	29
3.5	Erfassung der Tafelgeometrie auf Basis des NC-Programms .....	31
3.6	Nachweis der Funktionsfähigkeit des Assistenzsystems .....	32
4	Dynamisch erweiterbares Framework für Mehrwertdienste.....	34
4.1	Motivation und Anforderungen .....	34
4.1.1	Anforderungen an die Gestaltung eines erweiterbaren Plug-In-Systems .....	37
4.1.2	Anforderungen an Sicherheit und Zugriffsrechte von Diensten .....	37
4.1.3	Anforderungen an Entwicklung und Vertrieb von Diensten.....	37
4.2	Mehrwertdienste .....	38
4.2.1	Basisdienste.....	38

---

4.2.2	Mehrwertdienste .....	39
4.2.3	Metadaten .....	40
4.2.4	Gestaltung unabhängiger Dienste.....	40
4.3	Kommunikation zwischen Diensten .....	42
4.4	Literaturverzeichnis .....	46
5	Datenmodell und Steuerungsanbindung über OPC UA.....	47
5.1	Einleitung.....	47
5.2	Ausgangslage und Problemstellung .....	47
5.3	Datenmodell .....	49
5.3.1	Grundlagen OPC UA Adressraum .....	49
5.3.2	Informationsmodelle für CNC-Steuerungen .....	50
5.3.3	OPC UA VDW Companion Specification .....	52
5.4	Steuerungsanbindung über OPC UA.....	54
5.4.1	OPC UA VDW Companion Specification – Evaluierung mit Prototypen .....	54
5.4.2	Echtzeitdaten über OPC UA .....	55
5.5	Ergebnisse und Ausblick .....	58
5.6	Literaturverzeichnis .....	59
6	Visualisierung des Maschineninnenraums mit VR & AR.....	61
6.1	Darstellungsarten .....	61
6.2	Virtuelles Modell des Maschineninnenraums.....	63
6.3	Synchronisierung mit aktuellen Maschinendaten.....	65
6.4	Kamerabasierte AR .....	67
6.4.1	Beschreibung der Kameraperspektive .....	67
6.4.2	Überlagerung des Kamerabilds mit virtuellen Inhalten .....	69
6.4.3	Verdeckungsrechnung.....	70
6.5	Berücksichtigung der Betrachterperspektive .....	71
6.5.1	Nachbildung des realen Displays durch ein virtuelles Display .....	72
6.5.2	Erfassung der Position des Betrachters mittels Head- bzw. Eye-Tracking.....	73
6.5.3	Berechnung der zur Darstellung benötigten perspektivischen Parameter .....	74
6.6	Literaturverzeichnis .....	76
7	Kalibrierung von Kameras in Werkzeugmaschinen .....	78

7.1	Einleitung und Zielsetzung.....	78
7.2	Grundlagen der Kamerakalibrierung.....	78
7.3	Anforderungen .....	86
7.3.1	Arbeitsräume der Werkzeugmaschinen .....	88
7.3.2	Bildaufnahme .....	89
7.3.3	Kalibrierungsprozess .....	90
7.4	Evaluierung der Methoden zur Kamerakalibrierung.....	90
7.4.1	Kalibrierverfahren in OpenCV .....	90
7.4.2	MATLAB Camera Calibration Toolkit.....	92
7.4.3	Kalibrierung von ToF-Kameras .....	93
7.4.4	Versuch der Kalibrierung auf Palette in Laserschneidmaschine (extrinsisch) ...	94
7.4.5	Versuch der Kalibrierung in der SW Maschine (extrinsisch).....	96
7.5	Kalibrierung eines 1-Kamerasystems .....	97
7.6	Kalibrierung eines Multi-Kamerasystems.....	98
7.6.1	Vorgehen .....	100
7.6.2	Finden der LED Projektionen.....	101
7.6.3	Der MultiCamCalib Algorithmus .....	103
7.7	Literaturverzeichnis .....	104
8	Echtzeit-Maschinensimulation und der Nutzen von Mehrwertdiensten .....	106
8.1	Ziele.....	106
8.2	Echtzeit-Machinensimulation.....	107
8.3	Überlagerungsberechnung .....	110
8.4	Kollisionsvermeidung.....	111
8.5	Mehrwertdienste.....	112
8.5.1	Bahnvisualisierung inklusive Überdeckungsberechnung.....	112
8.5.2	Werkstück- und Werkzeugkonturvisualisierung .....	112
8.5.3	Perspektivische Visualisierung .....	113
8.6	Ausblick.....	113
8.7	Literaturverzeichnis .....	114
9	Steuerungsgekoppelte Vorab-Überprüfung des Bearbeitungsprozesses .....	115
9.1	Steuerungsanbindung mittels OPC UA.....	116

---

9.2	Visualisierung.....	117
9.2.1	3D-Stereo.....	117
9.2.2	Perspektivische Darstellung als Fenster.....	117
9.2.3	Oberflächeneigenschaften.....	119
9.3	Modellierung und Simulation von Werkstücken, Werkzeugen und Magazinen ....	121
9.4	Technische Integration & Anwendung von Mehrwertinformationen .....	124
9.4.1	Abtragsimulation.....	124
9.4.2	Spurbildung .....	124
9.4.3	Kollisionserkennung.....	126
9.4.4	Schnelle Kommunikation.....	127
9.5	Literaturverzeichnis.....	128
10	3D-Rekonstruktion .....	129
10.1	Einleitung und Zielsetzung.....	129
10.2	Evaluierung der Methoden zur 3D-Rekonstruktion .....	130
10.2.1	Stereo-Kameras.....	130
10.2.2	ToF-Kameras.....	131
10.2.3	Structured Light Scanner.....	133
10.3	Framework für Computer Vision.....	135
10.4	3D-Rekonstruktion in der Werkzeugmaschine.....	138
10.5	Literaturverzeichnis.....	139