

Reihe 2

Fertigungstechnik

Nr. 694

Prof. Dr.-Ing. Jörg Krüger
Prof. Dr. h.c. Dr.-Ing. Eckart Uhlmann
Prof. Dr.-Ing. Alexander Verl
Prof. Dr.-Ing. Peter Klemm
Prof. Dr.-Ing. Christian Brecher (Hrsg.)

Industrie 4.0 – Visionen der Steuerungstechnik / im MES-Umfeld



Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 2

Fertigungstechnik

Prof. Dr.-Ing. Jörg Krüger
Prof. Dr. h.c. Dr.-Ing. Eckart Uhlmann
Prof. Dr.-Ing. Alexander Verl
Prof. Dr.-Ing. Peter Klemm
Prof. Dr.-Ing. Christian Brecher (Hrsg.)

Nr. 694

**Industrie 4.0 – Visionen
der Steuerungstechnik/
im MES-Umfeld**

VDI verlag

Krüger, Jörg; Uhlmann, Eckart; Verl, Alexander; Klemm, Peter; Brecher, Christian
Industrie 4.0 – Visionen der Steuerungstechnik / im MES-Umfeld

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 2 Nr. 694. Düsseldorf: VDI Verlag 2016.

90 Seiten, 52 Bilder, 2 Tabellen.

ISBN 978-3-18-369402-0, ISSN 0178-9406,

€ 38,00/VDI-Mitgliederpreis € 34,20.

Für die Dokumentation: Produktionsanlagen – Zustandsüberwachung – Augmented Reality – IT-Sicherheit – Prozessregelung – Risikobeurteilung – Werkstattfertigung

Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter <http://dnb.ddb.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 <http://dnb.ddb.de>.

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2016

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 978-3-18-369402-0

Vorwort

Kein Thema bewegt und beschäftigt die Produktionstechnik zurzeit so umfassend, wie die Entwicklung von Konzepten und Lösungsvorschlägen zu Industrie 4.0. Nach einer aktuellen Studie¹ wird aufgrund der Bestrebungen rund um das Thema in den nächsten fünf Jahren mit einem Wirtschaftswachstum in Höhe von 153,5 Mrd. Euro gerechnet. Trotz des enormen Wirtschaftswachstums sehen sich Klein- und Großunternehmen hierbei mit Hemmnissen konfrontiert, welche aus fehlendem Expertenwissen und unklaren Lösungskonzepten resultieren. So geben 65% der KMU und 46% der Großunternehmen an, dass ein fehlendes Know-How das jeweilige Unternehmen von einer Umsetzung der Konzepte abhält. Zusätzlich führen 65% der KMU und 19% der Großunternehmen auf, über keine geeignete Auswahl an Technologien zu verfügen, was die Bereitschaft hemmt, etablierte Systeme durch neue Systeme zu ersetzen. Um diesen Herausforderungen langfristig entgegenzutreten, übernehmen die Universitäten eine wichtige Rolle als unabhängige Vordenker und zum allgemeinen Wissenstransfer. Die zentrale Aufgabe besteht dabei nicht nur in der Konzeption innovativer Ansätze, sondern gleichzeitig in der Validierung und wissenschaftlichen Bewertung dieser bis hin zur applikationsspezifischen, industriellen Realisierung.

Das jährliche Treffen der drei Institute für Produktionstechnik aus Berlin, Stuttgart und Aachen soll den Wissenstransfer unterstützen, indem ein Austausch zu aktuellen Themen anhand von Beiträgen der einzelnen Institute stattfindet. Das Treffen aus dem Jahr 2015 – dessen Beiträge Sie nun in der Hand halten – fand unter dem Leithema „Industrie 4.0 – Visionen der Steuerungstechnik / im MES-Umfeld“ statt. Hierbei fokussierte das Treffen die Themen:

- (Cloudbasierte) Zustandsüberwachung von Maschinenkomponenten
- Virtuelle Inbetriebnahmetests von Maschinensteuerungen
- Augmented Reality im Maschinenfenster
- IT-Sicherheitswerkzeuge für die Industrie 4.0
- Prozessregelung mittels Kollaboration
- Risikobeurteilung mit IT-Unterstützung
- Selbstorganisation in der Werkstattfertigung

Die Ausführungen der Themen finden Sie in den nachfolgenden Kapiteln. An dieser Stelle gilt ein spezieller Dank den Autoren der Beiträge, welche sich in der täglichen Arbeit an den Instituten mit den jeweiligen Themen beschäftigen.

Abschließend hoffen wir, dass der Wissenstransfer zwischen den Instituten auch Ihnen als Leser nützliche Impulse liefert und das Thema Industrie 4.0 weiter beleuchtet.

Berlin	2016	J. Krüger, E. Uhlmann
Stuttgart	2016	A. Verl, P. Klemm
Aachen	2016	C. Brecher (Hrsg.)

¹ BMWi (Hrsg.): *Industrie 4.0 – Volks- und betriebswirtschaftliche Faktoren für den Standort Deutschland, Eine Studie im Rahmen der Begleitforschung zum Technologieprogramm AUTONOMIK für Industrie 4.0*. 2015

Inhalt

1	Wissensintegrale lernfähige Systeme – ein neuartiger Ansatz zur Zustandsüberwachung von Werkzeugmaschinen	1
2	Testautomatisierung im Kontext der virtuellen Inbetriebnahme von Werkzeugmaschinen.....	16
3	Intelligentes Maschinenfenster für Werkzeugmaschinen mit Hilfe von Augmented Reality.....	28
4	Neuartige IT-Sicherheitswerkzeuge für Industrie 4.0.....	38
5	Ansatz einer Referenzarchitektur zum cloudbasierten Condition Monitoring.....	49
6	Variantenübergreifende Risikobeurteilung für die Maschinensicherheit.....	60
7	iWePro – Intelligente selbstorganisierende Werkstattproduktion	71

1 Wissensintegrale lernfähige Systeme – ein neuartiger Ansatz zur Zustandsüberwachung von Werkzeugmaschinen

C. Krella, C. Brecher

1.1 Einleitung

Nach einer Studie von Roland Berger aus dem Jahr 2014 wird im Produktionssektor im Mittel 15% der Instandhaltungszeit für Maßnahmen im Bereich der vorausschauenden Instandhaltung verwendet – als Zielgröße steht dem gegenüber ein Anteil von 33%, auf den die Hersteller im Mittel den Anteil der vorausschauenden Instandhaltung zu Lasten der reaktiven und präventiven Instandhaltung ausgebaut haben wollten [1]. Was also hindert die Hersteller an der vermehrten Anwendung von Methoden der Zustandsüberwachung zur vorausschauenden Instandhaltung von Maschinen?

Die Einführung von Methoden der Zustandsüberwachung von Produktionsmaschinen ist mit einem hohen monetären und zeitlichen Aufwand verbunden. Fertigkonfigurierte Systeme bringen in der Regel nicht die für eine komplexe Werkzeugmaschine erforderliche Individualität mit, um mit ausreichender Zuverlässigkeit die Restgebrauchsduer von Maschinenkomponenten abschätzen zu können. Dementsprechend müssen für die unterschiedlichen Einsatzbedingungen der zu überwachenden Maschinenkomponenten oftmals individuelle Lösungen entwickelt werden. Der Entwicklungsprozess kostet viel Zeit, da hierzu zunächst Komponenten unter übertragbaren Bedingungen bis an ihr Gebrauchsduerende beobachtet und mit oftmals zunächst überdimensionierter und damit kostspieliger Sensorik regelmäßig oder kontinuierlich vermessen werden müssen. Auf der anderen Seite steht für Projekte zur Entwicklung und Auslegung von Systemen zur Zustandsüberwachung meist nur ein Zeitrahmen von weniger als einem Jahr zur Verfügung. Am Ende dieses Zeitraums wird von einem solchen System erwartet, dass es einen Zusatznutzen generiert. Die Forderung nach einer möglichst kurzen Amortisierungsdauer steht damit der Forderung nach einer möglichst guten Anpassung an den Anwendungsfall auf Basis von Erfahrungsdaten diametral gegenüber.

Die steigende Anzahl an Cyber Physical Systems (CPS) im Rahmen von „Industrie 4.0“ stellt in diesem Zusammenhang eine große Chance für die Zustandsüberwachung dar. Sie führt zu einer steigenden, kostengünstigen Verfügbarkeit von Betriebsdaten. Der monetäre Aufwand hinsichtlich der Erfassung von für die Zustandsüberwachung relevanten Daten entfällt damit zum Teil und ermöglicht so auch eine Amortisierung von Zustandsüberwachungssystemen, die zunächst nur einen geringen Nutzen generieren. Die Vernetzung der CPS legt darüber hinaus die Grundlage für eine softwareseitige Anpassung gemäß eines aktuellen Stands der Technik über den Zeitpunkt der Inbetriebnahme hinaus. Gleichzeitig ermöglicht die rechentechnische Leistungsfähigkeit der CPS, dass auch aufwendige Algorithmen, wie solche die eine Selbstlernfähigkeit beschreiben, beispielsweise zur lokalen Optimierung eingesetzt werden können.

Ein mögliches Ergebnis dieser Entwicklungen, die selbstüberwachende Werkzeugmaschine, wurde auf dem Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium (AWK) 2014 als Vision vorgestellt, Abbildung 1-1. Als wesentliche Herausforderungen auf dem Weg zur Umsetzung dieser Zielvorstellung konnten vor allem die Standardisierung von Schnittstellen, die Gewährleistung der Datensicherheit, die Erweiterung und Kopplung von Baugruppen- und Komponentenmodellen sowie der Aufbau und die Erweiterung von Degradationsmodellen identifiziert werden. [2]

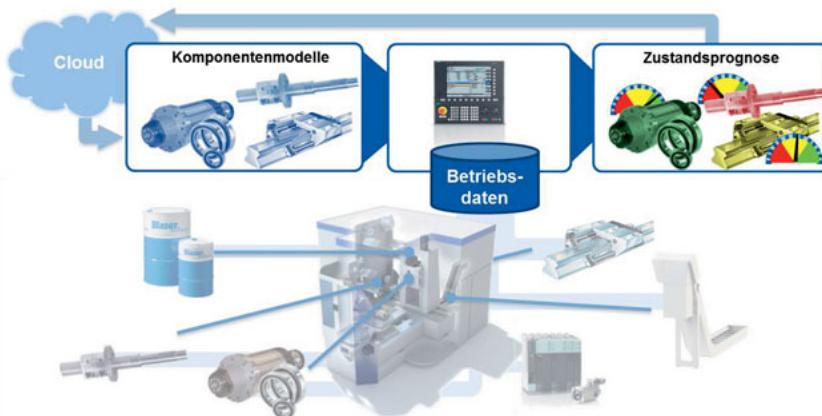


Abbildung 1-1: „Die selbstüberwachende Werkzeugmaschine“ – Vision zur Zustandsüberwachung im Rahmen von Industrie 4.0 auf dem Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium 2014. Nach: [2]

Während die Standardisierung von Schnittstellen und die Gewährleistung der Datensicherheit Themen sind, die nicht für das Werkzeugmaschinenumfeld losgelöst von anderen Anwendungsbereichen bearbeitet werden können, müssen auf maschinentechnischer Seite Lösungen entwickelt werden, welche die lokale Zustandsanalyse, -beurteilung und -prognose im Rahmen der Vision ermöglichen.



Abbildung 1-2: Lösungsansatz für ein Zustandsüberwachungssystem, welches schnell und kostengünstig in Betrieb genommen werden kann und eine lokal erforderliche, individuelle Anpassung ermöglicht. Nach: [2]

Um den heutigen Hindernissen bei der Einführung von Methoden der Zustandsüberwachung entgegenzuwirken, muss dabei das Ziel sein, eine Lösung zu entwickeln, die schnell in Betrieb genommen werden kann und zugleich die benötigte Anpassungsfähigkeit an individuelle

Maschinen- und Anwendungseigenschaften mitbringt. Auf dem AWK wurde dazu eine erste Idee vorgestellt, wie sie in Abbildung 1-2 illustriert ist: Im Kern sollte ein System sein, welches lernfähig ist und sich damit an individuelle Bedingungen anpassen kann. Gleichzeitig sollte es möglich sein, vorhandenes Wissen zu integrieren, wie es heute bereits im Rahmen der signalgestützter Zustandsüberwachung, aber auch der Lebensdauertheorie existiert, um die Anlernphase eines solchen Systems zu verkürzen oder sogar vollständig darauf verzichten zu können.

Im Folgenden wird das Konzept einer derartigen Lösung vorgestellt. Anhand zweier Anwendungsbeispiele wird dessen Umsetzbarkeit exemplarisch evaluiert.

1.2 Werkzeuge der Zustandsanalyse, -beurteilung und -prognose

Innerhalb des Themengebiets der signalbasierten Zustandsüberwachung von Werkzeugmaschinen, unter dem in der Regel alle Fragestellungen hinsichtlich der Zustandsanalyse, -beurteilung und -prognose zusammengefasst werden, liegt ein besonderer Fokus auf der Überwachung einzelner Maschinenkomponenten. Aufgrund der wirtschaftlichen Relevanz wurden wissenschaftliche Untersuchungen vor allem an Komponenten vorgenommen, deren Abnutzung oder Schädigung in Zusammenhang steht mit langen Maschinenstillständen, hohen Lagerkosten für Ersatzkomponenten oder Folgekosten bedingt durch Ausschuss. In vielen Anwendungsfällen von Werkzeugmaschinen sind dies vor allem die Lager der Hauptspindel und die Kugelgewindetriebe der Vorschubachsen, aber auch deren Linearführungen.

Modelle im Rahmen der Lebensdauertheorie werden heute vor allem bei der Auslegung von Komponenten und Maschinen verwendet. Für die Hauptkomponenten von Werkzeugmaschinen haben diese Modelle Einzug in internationale Standards gefunden, vgl. [3][4][5].

Anhand der Vorschubachskomponenten einer Werkzeugmaschine soll im Folgenden ein kurzer Überblick über gängige Schadens-Signal-Korrelationen geben werden. Am Beispiel der Restgebrauchsdauerprognose für Kugelgewindetriebe wird ein signalbasiertes Zustandsüberwachungsmodelle exemplarisch erläutert. Repräsentativ für die Lebensdauertheorie wird das standardisierte Modell zur Prognose der Lebensdauer eines Radialkugellagers kurz vorgestellt.

Zustandsüberwachungsmodelle setzen oftmals einen auf einer Messgröße basierenden Kennwert mit einer bestimmten Schadensart in Korrelation. So wird beispielsweise Verschleiß/Vorspannungsverlust an Vorschubachskomponenten teilweise korreliert mit Kennwerten basierend auf dem Motorstrom der Antriebe, der Differenz von Lage-Ist-Werten einer Achse oder der Temperatur an der betrachteten Komponente [6][7][8][9][10][11][12]. Lokale mechanische Schäden und auch Pittings werden oftmals anhand von Motorstrom- oder Beschleunigungssignalen detektiert [13][6][7][8][12]. Erste Korrelation gibt es darüber hinaus hinsichtlich der Detektion von Mangelschmierung und Kontamination von Maschinenkomponenten [6][14][15][12]. Derartige Modelle bieten entsprechend eine Aussage hinsichtlich des Vorherrschens eines bestimmten Komponentenzustands als Abgrenzung zu einem Referenzzustand, in aller Regel jedoch keine Prognose über das zukünftige Komponentenverhalten.

Ein Modell das auch die Aufgabe der Prognose des weiteren Komponentenverhaltens erfüllt ist in Abbildung 1-3 illustriert. In Anlehnung an das allgemeine Gebrauchsdauermodellkonzept nach Wang [16] wird darin ein körperschallbasierter Kennwert mit der Laufleistung eines Kugelgewindetriebs korreliert, um dessen Restgebrauchsdauer prognostizieren zu können. Das Modell, das auf Munzinger [17], Schopp [18], Broos [19] und Hennrich [20] zurückgeht, besagt, dass der Kennwert über einem großen Bereich der Laufleistung zunächst unverändert bleibt, jedoch ca. 40% von der theoretischen Komponentengebrauchsdauer vor dem Ausfall der Komponente einen linearen Anstieg mit der Laufleistung beginnt. Kurz vor dem Ausfall erfährt die Änderungsrate des Kennwerts eine weitere Steigerung. Ab dem Zeitpunkt des ers-

ten Kennwertanstiegs ist damit eine Prognose der noch mit der Komponente zu absolvierenden Laufleistung und damit ihrer Restgebrauchsduer möglich.

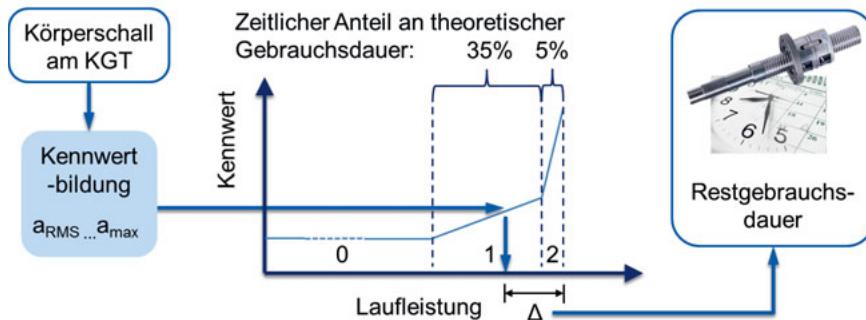


Abbildung 1-3: Signalbasiertes Zustandsüberwachungsmodell zur Prognose der Restgebrauchsduer eines Kugelgewindetriebs. Nach: [17]/[18]/[19]/[20]/[2]

Im Vergleich zu oben genannten signalbasierten Zustandsüberwachungsmodellen zeichnen sich die standardisierten Lebensdauermodelle dadurch aus, dass sie ursprünglich nicht für die Nutzung betriebsbegleitend zur Nutzung der jeweiligen Maschinenkomponente entwickelt wurden. Ein Grund hierfür könnte sein, dass einer der wesentlichen Parameter innerhalb der Modelle, die auf die Komponente wirkende Last, nicht ohne großen Aufwand im Betrieb erfasst werden kann. Der Einfluss der Last auf die Lebensdauer der Komponente wird stattdessen berücksichtigt wie Abbildung 1-4 links illustriert: Anhand eines möglichst für die gesamte Komponentenlebensdauer repräsentativen Lastspektrums wird eine, im Beispiel radiale, äquivalente Belastung P_r errechnet. Beeinflusst wird diese durch die Verteilung der richtungsabhängigen Lasten F_m , beispielsweise in Form einer axialen und radialen Last F_{ma} und L_{mr} . Für jede Richtung wiederum wird die Last F_m gebildet als Mittelwert, gewichtet mit der Lasthöhe, dem relativen Zeitanteil über den die Last wirkt sowie mit dem Verhältnis aus der zum Zeitpunkt der Last vorherrschenden Drehzahl und der mittleren Drehzahl n_m .

Unter Verwendung eines Lebensdauermodells für Radialkugellager wie in DIN ISO 281 [3] beschrieben errechnet sich die nominelle Lebensdauer L_{10} jener Lager entsprechend der in Abbildung 1-4 rechts dargestellten Berechnungsvorschrift. Lagerspezifische Eigenschaften die über die Lastverteilung hinausgehen, wie sie bereits in der Berechnung von P_r berücksichtigt worden sind, erhalten über die dynamische radiale Tragzahl C_r Eingang in die Lebensdauerberechnung. In einer erweiterten Lebensdauerberechnung können darüber hinaus äußere Betriebsbedingungen wie beispielsweise Reinheitsgrade oder Schmierzustände in Form eines Beiwertes a_{ISO} berücksichtigt werden.

Tatsächliche Lagerlebensdauern folgen einer Weibull-Verteilung. Die nominelle Lebensdauer L_{10} stellt dementsprechend eine statistische Größe dar, die beschreibt, welche Mindestlebensdauer mit einer Zuverlässigkeit von 90% erwartet werden kann. Das bedeutet, dass 90% der Komponenten unter den gegebenen Betriebsbedingungen – teilweise deutlich – länger betrieben werden können, bevor sie ihr tatsächliches Lebensdauerende erreichen. Stehen während des Betriebs einer Komponente Informationen über deren tatsächliche Belastung zur Verfügung, so besteht grundsätzlich die Möglichkeit, deren Lebensdauerprognose entsprechend im Betrieb anzupassen. Während die Prognosequalität der nominellen Lebensdauer auf diese Weise deutlich verbessert werden kann, bleibt diese eine statistische Größe – eine exakte Prognose des individuellen Lebensdauerendes ist demnach auch mit einer perfekten Parametrierung des Lebensdauermodells nicht möglich.

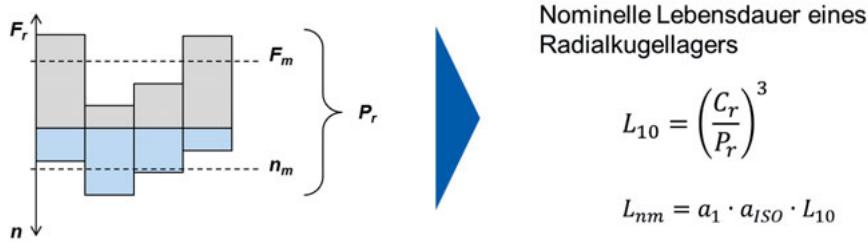


Abbildung 1-4: Berechnung der nominellen Lebensdauer eines Radialkugellagers unter Verwendung einer äquivalenten Belastung. Nach: [3]

1.3 Konzept eines wissensintegrierten lernfähigen Systems

Aus den in Kapitel 1.1 formulierten Herausforderungen lassen sich unmittelbare Anforderungen ableiten, die ein wissensintegriertes lernfähiges System erfüllen muss. Damit eine automatisierte Anpassung an anwendungsspezifische Grenzwerte und Besonderheiten möglich wird, muss für das System ein Algorithmus existieren, der eine datenbasierte Anpassung von Modellparametern ermöglicht. Die schnelle Inbetriebnahme eines solchen Systems, im Idealfall vollständig ohne eine Anlernphase, in der die zu überwachenden Komponenten zunächst ohne Nutzen bis zu ihrem Gebrauchsdauerende beobachtet werden müssen, erfordert die Integration von vorhandenem Expertenwissen, wie es beispielsweise in den in Kapitel 1.2 vorgestellten Werkzeugen zur Zustandsanalyse, -beurteilung und -prognose enthalten ist. Unter Beachtung dieser Anforderungen sind unterschiedliche Konzepte denkbar, welche die geforderte Aufgabe erfüllen könnten.

Eine Möglichkeit wäre es, ein nahezu beliebiges der vielen verfügbaren lernfähigen Systeme zu verwenden, welches in der Lage ist, Eingabegrößen in Form von Sensorsignalen oder zugehörigen Kennwerten zu Ausgabegrößen in Form von Zustandsdiagnosen oder Restgebrauchsdauperognosen in Korrelation zu setzen, Abbildung 1-5 oben links. Für viele derartige Systeme existieren etablierte Algorithmen, die ein datenbasiertes Lernen ermöglichen. Um ein solches System ohne Anlernphase für eine reale Applikation ausreichend konfigurieren zu können, könnten unter Verwendung von Maschinenkomponentenmodellen Zustände und zugehörige Messgrößen simuliert und die resultierende Datenbasis zum Training des Systems genutzt werden. Für eine solche Lösung spricht die Vielzahl der hochperformanten lernfähigen Systeme, welche in den vergangenen Jahren entwickelt worden sind, die voraussichtlich eine gute Anpassung des Systems an die zu erlernende Aufgabe ermöglichen würden. Gleichzeitig bieten viele dieser Systeme jedoch nur eingeschränkt die Möglichkeit, das erlernte Wissen gegenüber systematischen Fehlern zu überprüfen – in Anbetracht dessen, dass heutige Simulationsmodelle zwar bereits in vielerlei Hinsicht die Realität gut, aber noch nicht alle relevanten Einflussfaktoren abbilden können, ein nicht zu vernachlässigender Aspekt.

Eine zweites mögliches Konzept beinhaltet im Kern ein System, welches sowohl die Anwendbarkeit herkömmlicher Lernalgorithmen erlaubt, als auch die unmittelbare Integration von Expertenwissen in seinen unterschiedlichen Aussageformen, Abbildung 1-5 oben rechts. Falls beziehungsweise sobald eine Erfahrungsdatenbasis existiert, könnte diese unter Verwendung üblicher Lernalgorithmen, ähnlich wie im ersten Konzept, zum datenbasierten Training des Systems verwendet werden. Vorteil bei einem solchen Konzept ist, dass bei der gezielten Integration von Wissen das Risiko systematischer Fehler gering ist. Demgegenüber steht eine, im Vergleich zum ersten Konzept, mindestens eingeschränkte Auswahl an lernfähigen Systemen, welche für die Wissensintegration potentiell in Frage kommen.

Ein drittes Konzept, welches die geforderten Aufgaben erfüllen könnte, setzt sich aus einem Zustandsüberwachungsmodell gemäß dem Stand der Technik sowie einem separatem lernfähigen System zusammen, Abbildung 1-5 unten. Ersteres stellt ein relativ einfaches Modell dar, welches beispielsweise anhand einer definierten Berechnungsvorschrift aus signalbasierten Kennwerten einen Zustandsindex berechnet. Entsprechend der Komplexität des Models existieren dabei Parameter oder Grenzwerte, in Abbildung 1-5 durch α , β , γ und δ repräsentiert, für welche zunächst erfahrungsgebasierte Werte festgelegt werden müssen. Liegen konkrete datenbasierte Erfahrungen vor, so kann das lernfähige System diese Parameter oder Grenzwerte geeignet anpassen. Vorteil eines solchen Konzeptes wäre es, dass gegebenenfalls bestehende Systeme weitergenutzt werden könnten und lediglich durch ein lernfähiges System zur Parameteranpassung ergänzt werden müssten. Nachteil hierbei wäre jedoch, dass eine Anpassung des Models selbst, über die Anpassung von Parametern und Grenzwerten hinweg, nicht möglich wäre. Existieren für einen Anwendungsfall keine Modelle, so ist das Konzept unbrauchbar.

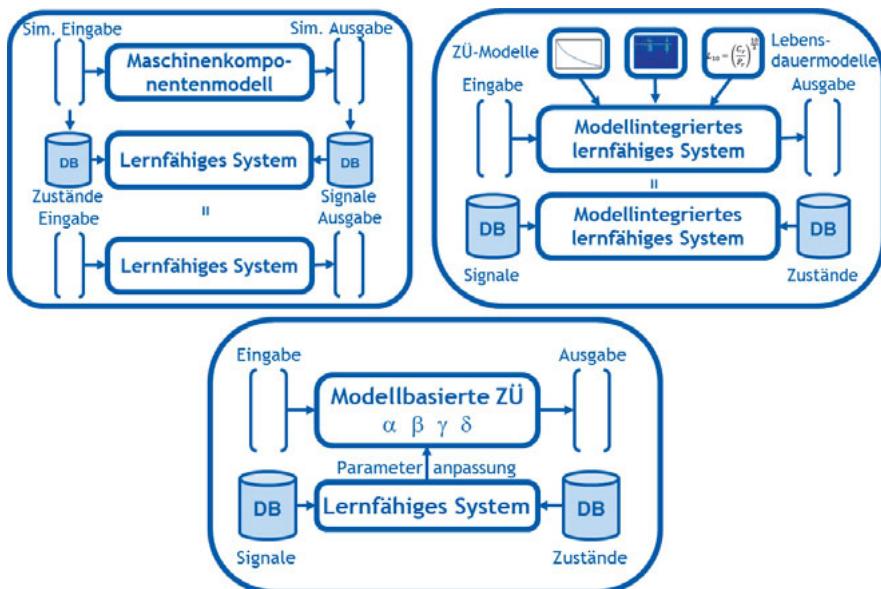


Abbildung 1-5: Konzepte eines wissensintegrativen lernfähigen Systems.

Für alle drei Konzepte sind grundsätzlich Anwendungsfälle denkbar, in denen sie gegenüber den jeweils anderen Konzepten besser geeignet erscheinen. Das erste Konzept zeichnet sich durch ein großes Maß an Anpassungsfähigkeit und beliebig große Komplexität bei geringer Transparenz aus, bei dem zudem ein relativ großes Risiko systematischer Fehler besteht. Das dritte Konzept hingegen ist am wenigsten anpassungsfähig und begrenzt umfangreich, dafür jedoch am transparentesten. In vielen Fällen allerding dürfte das zweite Konzept die beiden anderen Konzepte dominieren, da es die Vorteile der anderen Konzepte im Wesentlichen vereint, ohne nennenswerte Nachteile mit sich zu bringen. Die generelle Umsetzbarkeit dieses Konzeptes soll im Folgenden anhand von zwei Anwendungsbeispielen demonstriert werden. Wie bereits in Abbildung 1-5 oben rechts angedeutet, ergeben sich im Rahmen des zweiten Konzeptes zwei Betriebsarten ein und desselben Systems: Die Nutzungs- und die Trainings-

phase. Abbildung 1-6 erläutert die Betriebsarten für ein System, wie es zur Restgebrauchs-dauerprognose einer Maschinenkomponente eingesetzt werden könnte.

In der Nutzungsphase bilden die aktuellen Maschinendaten die Eingangsgrößen für das lern-fähige System. Basierend auf dem in das System integrierte oder auch antrainierte Wissen formuliert das System daraus eine Prognose, welchen Prozentsatz ihrer nominellen Ge- brauchsdauer die Maschinenkomponente bereits absolviert hat. Auf diese Weise lässt sich abschätzen, welche Restgebrauchs-dauer für die Komponente noch zur Verfügung steht. Ent- sprechend der Genauigkeit des durch das System gebildeten Komponentenverschleißmodells weichen das prognostiziertes und das reale Gebrauchs-dauerende im Mittel in aller Regel von- einander ab. Ist das reale Gebrauchs-dauerende erreicht, kann die Trainingsphase eingeleitet werden.

In der Trainingsphase wird die Gebrauchs-dauer der Komponente als Ganzes Betrachtet. Für den auf diese Weise vorliegenden Trainingsdatensatz werden die internen Parameter des lern- fähigen Systems gemäß dem verwendeten Lernalgorithmus so angepasst, dass die Abwei- chung zwischen realem und prognostiziertem Gebrauchs-dauerende minimiert wird. Das Er- gebnis, das trainierte System, übernimmt in der folgenden Nutzungsphase der ausgetauschten oder reparierten Komponente erneut die Aufgabe der Restgebrauchs-dauerprognose.

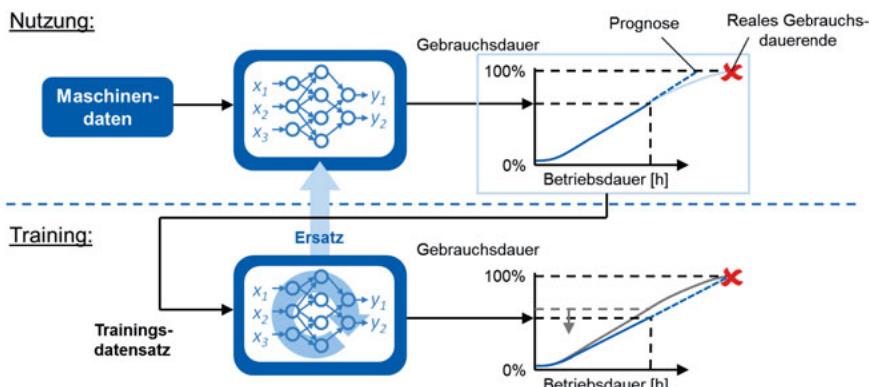


Abbildung 1-6: Betriebsarten eines modellintegrierten lernfähigen Systems.

1.4 Prototypische Umsetzung und Evaluierung

Im Folgenden wird die generelle Umsetzbarkeit des vorgeschlagenen Konzeptes anhand von zwei Anwendungsbeispielen demonstriert. In beiden Fällen wurde als Grundlage des lernföhigen Systems ein Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System (ANFIS) zusammen mit einem hybriden Lernverfahren bestehend aus dem Gradientenabstiegsverfahren und der Methode der kleinsten Fehlerquadrate in Anlehnung an Jang [21] verwendet.

Zum Nachweis der generellen Umsetzbarkeit der vorgeschlagenen Lösung muss der Prototyp die beiden zuvor vorgestellten wesentlichen Anforderungen erfüllen: Das System muss eine Lernfähigkeit mitbringen, die es in die Lager versetzt, datenbasiert trainiert zu werden und es muss möglich sein, bestehendes Wissen in das System zu integrieren, sodass eine grundsätzliche Funktionsfähigkeit auch ohne initiales Training möglich ist.

1.4.1 Schadensdiagnose an Wälzlagern

Als erstes Anwendungsbeispiel wird die Aufgabe der Detektion lokaler Laufbahnschäden an Wälzlagern betrachtet. Für Lager, welche unter konstanten Betriebsbedingungen (Einbaulage, Drehzahl, Last) betrieben werden, existiert diesbezüglich eine verbreitete Theorie, die in vielen Fällen die Erkennung und sogar Unterscheidung von lokalen Schäden an Lageraußen-, Lagerinnenringen und Wälzkörpern unter Verwendung charakteristischer Überrollfrequenzen ermöglicht.

Als Datenquelle dient das Körperschallsignal, das in der Lagerebene radial zur Drehachse durch einen Beschleunigungsaufnehmer erfasst wird. Da im Betrieb des Lagers unter weitgehend konstanten Bedingungen von einer stationären Signalform ausgegangen werden kann, wird das Ausgangssignal im Rahmen der Signalvorverarbeitung in ein Hüllkurvenspektrum überführt. Die Effektivwerte der einzelnen Frequenzbänder im Spektrum dienen danach als Eingangsgrößen für das lernfähige System. Das Anwendungsbeispiel stellt dementsprechend eine Klassierungsaufgabe dar: Das eingehende Frequenzspektrum muss den Klassen „Gutzustand“, „Außenringschaden“, „Innenringschaden“ und „Wälzkörperschaden“ zugeordnet werden, wobei abgesehen von ersterer Klasse eine Zugehörigkeit zu mehreren Klassen möglich ist.

Zur Evaluierung der Funktionsweise werden die Testdaten des Bearing Data Center der Case Western Reserve University² verwendet, die zu diesem Zweck im Internet zur Verfügung gestellt werden. Die Nutzung von allgemein verfügbaren Daten soll ermöglichen, dass andere Implementierungen der Lösung der Aufgabenstellung mit den hier vorgestellten Ergebnissen verglichen werden können. Für die Evaluierung genutzt werden die Messdaten eines Standardkugellagers mit einem Teilkreisdurchmesser von 39 mm, welches bei 1750 min^{-1} betrieben wurde [22]. Neben den Messungen im Referenzzustand werden für den Innen- und Außenringlaufbahnschaden jeweils die Messungen in vier Belastungszuständen des Motors und jeweils drei unterschiedlich großen Schadensausprägungen verwendet. Alle Datensätze der somit zwölf Kombinationen je Schadensart werden dabei unter dem Begriff „Innenringschaden“ bzw. „Außenringschaden“ zusammengeführt, alle Datensätze der vier Belastungszustände im Referenzzustand unter dem Begriff „Referenz“.

Die Vorgehensweise hinsichtlich der Erprobung der Lernfähigkeit des vorgestellten Systems ist in Abbildung 1-7 schematisch dargestellt. Je Schadensart sowie für den Referenzzustand werden die zugehörigen Datensätze zunächst in Test- und Trainingsdatensätze aufgeteilt. Das lernfähige System wird eingerichtet, indem alle zu wählenden Parameter mit Zufallszahlen aus einem üblichen Wertebereich besetzt werden. Wendet man dieses System auf die Testdatensätze an, so ordnet das System diese willkürlich den Schadensarten oder dem Referenzzustand zu. In der Trainingsphase wird dasselbe System auf die Trainingsdatensätze angewendet, jedoch gekoppelt mit der Information, welcher Schadensart sie zugehörig sind. Für eine Abweichung der Einordnung durch das System vom tatsächlichen Zustand wird ein zuvor definiertes Fehlermaß berechnet. Anschließend werden die Systemparameter durch den Lernalgorithmus so angepasst, dass der Fehler minimiert wird und damit im Idealfall eine korrekte Einordnung erfolgt. Das auf diese Weise trainierte System wird erneut auf die Testdatensätze angewendet. Der Lernerfolg des Systems lässt sich danach bemessen, wie viele Testdatensätze dem jeweils korrekten Zustand zugeordnet werden.

² <http://csegroups.case.edu/bearingdatacenter/pages/welcome-case-western-reserve-university-bearing-data-center-website>

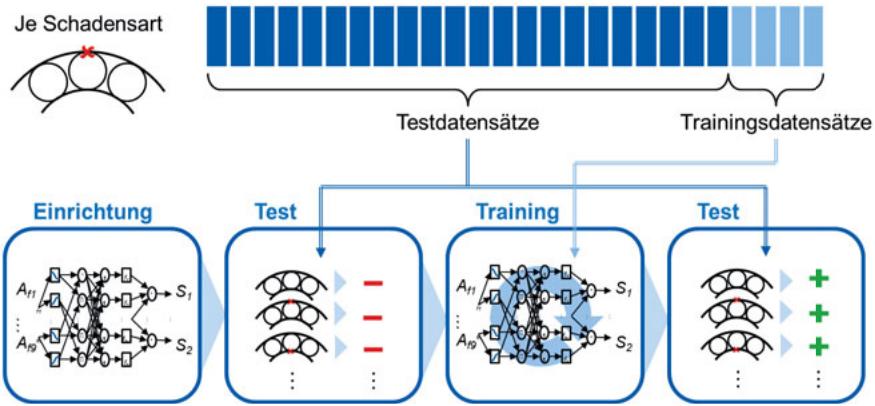


Abbildung 1-7: Vorgehensweise zur Erprobung der Lernfähigkeit eines Systems zur Schadensdiagnose an Wälzlagern.

Werden in einem ersten Schritt zunächst nur die Datensätze des Referenzzustands sowie einer Schadensart für das Training des Systems verwendet, so unterscheidet das System nach einem Training mit insgesamt zwölf Trainingsdatensätzen bei allen 185 Testdatensätzen korrekt zwischen Referenzzustand und Innenringschaden und bei allen 198 Testdatensätzen zwischen Referenzzustand und Außenringschaden, jeweils ohne fälschlich einen anderen Schaden zu detektieren. Werden alle 24 Trainingsdatensätze für das Training eines Systems verwendet, so werden noch 91% aller 383 Testdatensätze korrekt den entsprechenden Zuständen zugeordnet. Tabelle 1 fasst die Testergebnisse zusammen.

Tabelle 1: Fähigkeit des lernfähigen Systems hinsichtlich der Unterscheidung unterschiedlicher Zustände an Wälzlagern, ausgehend von einem untrainierten System ohne vorherige Wissensinjektion.

	Referenz ↔ Innenringschaden	Referenz ↔ Außenringschaden	Referenz ↔ Innenringschaden ↔ Außenringschaden
Anzahl Trainingsdaten	12	12	24
Anzahl Testdaten	185	198	383
Korrekte Unterscheidung nach dem Training	100%	100%	91%

Damit ein System zur Detektion von Laufbahnschäden an Wälzlagern auch ohne vorhandene Trainingsdatensätze genutzt werden kann, muss die Möglichkeit bestehen, das vorhandene Wissen in Form der auf charakteristischen Überrollfrequenzen basierenden Modelle so in das System zu injizieren, dass der Modellinhalt durch das System abgebildet wird. Aufgrund der Anlehnung des ANFIS an klassische Fuzzy-Systeme können Fuzzy-Regeln grundsätzlich durch das ANFIS repräsentiert werden. Zur Injektion des vorhandenen Wissens wurde daher eine Vorgehensweise entwickelt, mit der zunächst das Wissen in eine Regelbasis überführt und diese dann automatisch in das ANFIS übertragen werden kann. Im vorliegenden Fall ist

die Regelbasis dabei sehr einfach gehalten. Sie umfasst für jeden Schadensfall die Aussage, dass im Fall einer gegenüber allen anderen Amplituden erhöhte Amplitude bei einer dem Schadensort zugehörigen charakteristischen Frequenz oder einer zugehörigen Harmonischen der entsprechende Schaden vorliegt. Dominiert beispielsweise die Amplitude der Außenringüberrollfrequenz die übrigen Amplituden im Spektrum, so soll der dem Außenringsschaden zugeordnete Ausgang des Systems entsprechend einen positiven Wert ausgeben.

Das Vorgehen zur Evaluierung der Wissensintegration in das lernfähige System ist in Abbildung 1-8 illustriert. Vollkommen analog zur Vorgehensweise in Abbildung 1-7 werden zunächst die Datensätze in Test- und Trainingsdatensätze unterteilt und das System eingerichtet. Anschließend erfolgt die zuvor erwähnte Wissensinjektion. Unter der Annahme, dass das injizierte Wissen geeignet ist, um die Schadensarten anhand eines Körperschall-Amplitudenspektrums zu unterscheiden, ist zu erwarten, dass das lernfähige System die Testdatensätze korrekt ihren zugehörigen Schadensarten zuordnet, falls die Wissensinjektion funktioniert hat. Nach einem Training mit den Trainingsdatensätzen wird das System erneut auf die Testdatensätze angewendet.

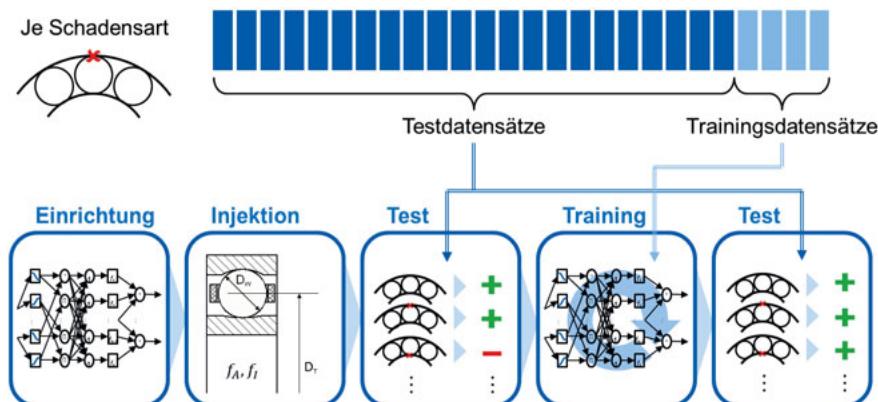


Abbildung 1-8: Vorgehensweise zur Evaluierung der Wissensinjektion in ein System zur Schadensdiagnose an Wälzlagern.

Die Ergebnisse der Anwendung von wissensinjiziertem und trainiertem System auf die Testdatensätze unterschiedlicher Schadensarten sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Demnach können nach der Wissensinjektion ein Innen- oder Außenringsschaden in 78% bzw. 85% aller Fälle vom Referenzzustand abgegrenzt werden. Konsequenterweise ist die Unterscheidung aller drei Zustände in 82% der geprüften Testdatensätze erfolgreich. Das Training mit den Trainingsdatensätzen steigert in allen Fällen die Detektionsfähigkeit weiter. Das Ergebnis bleibt jedoch teilweise geringfügig hinter dem Trainingsergebnis vom Anwendungsfall ohne vorherige Wissensinjektion zurück.

Das Anwendungsbeispiel zeigt, dass es möglich ist, Zustandsüberwachungsrelevantes Wissen so in ein lernfähiges System zu injizieren, dass dieses auch ohne vorheriges Training für die vorgesehene Aufgabe genutzt werden kann. Dabei besitzt das gewählte System zugleich auch die Fähigkeit, anhand weniger Trainingsdatensätze die Lösung der gestellten Aufgabe zu erlernen. Dass die Fähigkeit des Systems bei der Detektion der Zustände im trainierten Fall die Fähigkeit nach der Wissensinjektion übersteigt, kann darauf zurückgeführt werden, dass das entsprechend der verwendeten Theorie injizierte Wissen nicht für die korrekte Identifikation aller Schadensfälle ausreicht: Nicht in allen Schadensfällen konnte beobachtet werden, dass

bei der zugehörigen Überrollfrequenz die Amplitude signifikant gegenüber den Amplituden im übrigen Spektrum ansteigt.

Tabelle 2: *Fähigkeit des lernfähigen Systems hinsichtlich der Unterscheidung unterschiedlicher Zustände an Wälzlagern, ausgehend von einem untrainierten System mit vorheriger Wissensinjektion.*

	Referenz ↔ Innenringschaden	Referenz ↔ Außenringschaden	Referenz ↔ Innenringschaden ↔ Außenringschaden
Anzahl Trainingsdaten	12	12	24
Anzahl Testdaten	185	198	383
Korrekte Unterscheidung vor dem Training	78%	85%	82%
Korrekte Unterscheidung nach dem Training	100%	90%	89%

1.4.2 Restgebrauchsdauerprognose für Kugelgewindetriebe

Das im vorangegangenen Anwendungsbeispiel injizierte Wissen zur Detektion von Laufbahnschäden an Wälzlagern beinhaltet weitgehend binäre Aussagen: Wenn bestimmte Amplituden ansteigen, dann liegt ein bestimmter Schadensfall vor. In vielen Anwendungsfällen der Zustandsanalyse und –beurteilung kann das vorhandene Wissen in derartige Aussagen transformiert werden. Besonders im Bereich Restgebrauchsdauerprognose von Maschinenkomponenten sind derartige Aussagen indes nicht ausreichend. Die Modelle die hier zum Einsatz kommen verknüpfen vielmehr unterschiedliche Parameter in linearer und auch nicht-linearer Weise, um eine Prognose für die Restgebrauchsdauer zu errechnen. Anhand eines Modells zur Restgebrauchsdauerprognose für Kugelgewindetriebe (KGT) wird im Folgenden exemplarisch dargestellt, dass auch derartige Modelle in das vorgeschlagene lernfähige System integriert werden können.

Die Prognose der KGT-Restgebrauchsdauer soll, ähnlich wie bei Hennrich [20], unter Verwendung von Modellen erfolgen, die an die in Kapitel 1.2 exemplarisch vorgestellten anlehnen. Als Grundlage dient das KGT-Lebensdauermodell nach DIN ISO 3408-5 [4], wobei zunächst das Ende der Lebensdauer mit dem Ende der Gebrauchsdauer gleichgesetzt wird. Demnach nimmt die Restlebensdauer linear mit der Betriebsdauer des KGT ab. Nach dem in Kapitel 1.2 vorgestellten Modell zur Restgebrauchsdauerprognose für KGT gibt es darüber hinaus einen charakteristischen Beschleunigungskennwert, der einen bestimmten Zeitraum vor dem Ausfall der Komponente beginnt mit der Betriebsdauer anzusteigen. Der tatsächliche Zeitpunkt des Beginns des Anstiegs kann dabei variieren, ebenso wie davon ausgegangen werden kann, dass die tatsächliche Lebensdauer von KGT in einem bestimmten Anwendungsfall einer Weibull-Verteilung folgt.

In Abbildung 1-9 sind einige Entwicklungen von KGT-Restgebrauchsdauerprognosen exemplarisch dargestellt, wie sie aus der Kopplung der beiden oben genannten Modelle resultieren können. Jede Diagrammspalte bildet dabei ein Szenario ab. Zu Beginn der Gebrauchsdauer eines KGT bietet das beschleunigungskennwertbasierte Gebrauchsdauermodell keine Informationen über die KGT-Restgebrauchsdauer. In diesem Zeitbereich wird die Prognose einzig unter Verwendung des ISO-Lebensdauermodells gebildet. Sobald der charakteristische Be-

schleunigungskennwert beginnt anzusteigen, wird die Lebensdauerprognose zur tatsächlichen Gebrauchsdauerprognose hin korrigiert. So steigt beispielsweise in der zweiten Spalte von Abbildung 1-9 der Beschleunigungskennwert deutlich früher an, als dies nach anfänglicher Lebensdauerprognose zu erwarten gewesen wäre. Zum Zeitpunkt des Anstiegsbeginns erfolgt daher die Korrektur der Restgebrauchsdauerprognose nach unten.

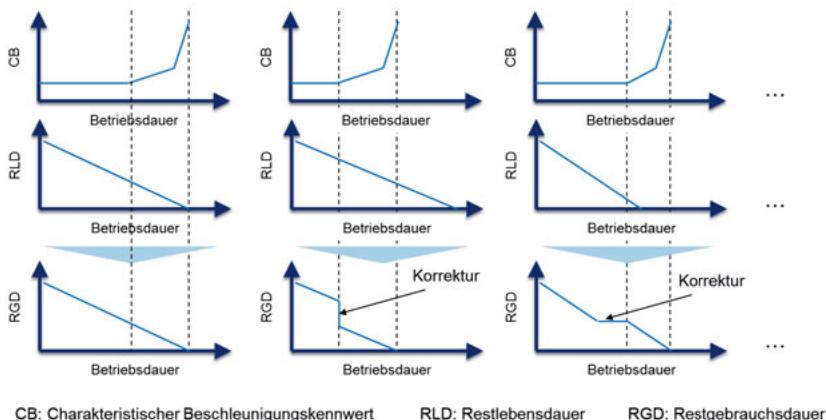


Abbildung 1-9: Szenarien der Restgebrauchsdauerprognose für Kugelgewindetriebe bei Kopplung eines Lebensdauer- und eines beschleunigungskennwertbasierten Gebrauchsdauermodells.

Die Eignung des hier vorgestellten Prototyps eines wissensintegrierten lernfähigen Systems zur Prognose der Restgebrauchsdauer von KGT ist dann gegeben, wenn das Systems mittels Wissensinjektion das oben beschriebene Prognoseverhalten abbilden kann, wie es aus der Kopplung von Lebens- und Gebrauchsdauermodell resultiert. Als externe Eingangsgrößen dienen dabei die Betriebsdauer, ermittelt in Form der Anzahl Umdrehungen der KGT-Spindel, und ein charakteristischer Beschleunigungskennwert. Einzige externe Ausgangsgröße ist die KGT-Restgebrauchsdauer, in Form der Anzahl noch zu absolviierenden Umdrehungen der KGT-Spindel. Injiziert werden die beiden Modelle in Form von Geradenabschnitten in der Folgeebene des ANFIS. Die auf diese Weise erhaltene lokale Linearität ermöglicht bei der Anwendung eines Lernverfahrens die Parameteranpassung basierend auf der Methode der kleinsten Fehlerquadrate auch ohne iterativen Prozess.

Für die ersten beiden Szenarien aus Abbildung 1-9 ist anhand von simulierten Eingangsgrößenentwicklungen über der Zeit in Abbildung 1-10 dargestellt, wie sich die Restgebrauchsdauerprognose des lernfähigen Systems (rot) im Vergleich zu der theoretischen Prognose gemäß der gekoppelten Modelle (blau) verhält. Es ist zu erkennen, dass die Prognose des lernfähigen Systems nur geringfügig von der idealen Prognose gemäß der gekoppelten Modelle abweicht. Eine ähnlich gute Übereinstimmung der Prognosen kann auch für das dritte in Abbildung 1-9 dargestellte Szenario gefunden werden.

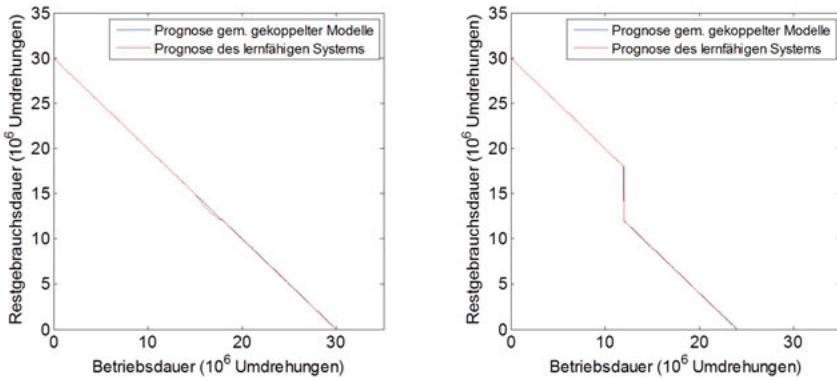


Abbildung 1-10: Abbildung des gekoppelten Modellverhaltens zur Restgebrauchsdaueprognose für Kugelgewindetriebe durch ein lernfähiges System nach Wissensinjektion.

Es kann daher festgehalten werden, dass auch die Abbildung von nicht-binären Modellen beispielsweise zur Restgebrauchsdaueprognose von Maschinenkomponenten in einem lernfähigen System ohne vorheriges Training durchaus möglich ist. Dies schließt Nichtlinearitäten mit ein, wie sie zum Beispiel durch die Kopplung unterschiedlicher Modelle entstehen können, vgl. Abbildung 1-10 rechts. Auch ein nachfolgendes Training eines solchen Systems ist weiterhin möglich. Hierzu muss allerdings zunächst die Frage beantwortet werden, welches Trainingsziel verfolgt werden soll, da aufgrund der Weibull-Verteilung tatsächlicher KGT-Gebrauchsdaueuren eine exakte Restgebrauchsdaueprognose nicht zu allen Zeitpunkten überhaupt möglich ist. Als Trainingsziele denkbar sind beispielsweise die Reduzierung des mittleren Fehlers über der gesamten Gebrauchsdaue oder die Reduzierung des Fehlers kurz vor dem Ausfall der Komponente.

1.5 Zusammenfassung und Ausblick

Die technischen Entwicklungen der vergangenen Jahre im Bereich der Datenerfassung und -verarbeitung bieten großes Potential, den Themenbereich der Zustandsüberwachung im Rahmen der „Industrie 4.0“ für einen großen Anwenderkreis zugänglich zu machen. In diesem Zusammenhang wurden zwei wesentlich Herausforderungen identifiziert, deren Bewältigung für einen breitbandigen Erfolg maßgeblich erscheint. Zum einen müssen die Methoden der Zustandsüberwachung einen schnellen Nutzen generieren können, um im Zuge üblicher Zeitrahmen von Entwicklungsprojekten Resonanz zu finden. Zum anderen müssen für eine Maximierung des individuellen Nutzens die Modelle und Grenzwerte der Zustandsüberwachung individualisiert werden. Ausgehend von diesen beiden Herausforderungen wurden für ein System zur Zustandsüberwachung zwei Anforderungen abgeleitet: Vorhandenes Wissen aus diesem Bereich muss genutzt werden können, sodass nicht für jeden Anwendungsfall eine vollständige Neuentwicklung stattfinden muss, und eine Anpassbarkeit an individuelle Gegebenheiten muss gewährleistet sein. Zu einer möglichen Lösung dieser Aufgabenstellung wurden drei Konzepte an wissensintegrierten lernfähigen Systemen hergeleitet. Anhand von zwei Anwendungsbeispielen wurde demonstriert, dass das vielversprechendste Konzept generell umgesetzt werden kann. Für den Prototyp auf Basis eines ANFIS konnte gezeigt werden, dass die Injektion von Wissen der Zustandsüberwachung in unterschiedlicher Form möglich ist,

sodass ein entsprechendes System zur Zustandsüberwachung ohne das Training mit Erfahrungsdaten mit einer generellen Funktionsfähigkeit versehen werden kann. Gleichzeitig wurde gezeigt, dass dasselbe System unter Verwendung eines automatisierten Lernverfahrens seine Leistungsfähigkeit anhand von Erfahrungsdaten weiter steigern kann und sogar in der Lage ist, Sachverhalte vollständig neu zu erlernen.

Die vorgestellte prototypische Umsetzung eines der vorgeschlagenen Konzepte demonstriert die generelle Lösbarkeit oben genannter Aufgabenstellung. Aufgrund der Vielfalt der potentiellen Umsetzungsmöglichkeiten der unterschiedlichen Konzepte wäre es naheliegend, in den nachfolgenden Schritten die Fähigkeiten weiterer Implementierungen zu evaluieren und somit einen Optimierungsprozess einzuleiten. Auf Anwendungsseite gilt es darüber hinaus herauszufinden, ob der initiale Nutzen aber auch die Anpassungsfähigkeit eines derartigen Systems den industriellen Anforderungen bereits in ausreichendem Maß entsprechen.

1.6 Danksagung

Die Autoren danken der europäischen Kommission für die Unterstützung und Förderung innerhalb des EU-Projektes EASE-R³ im Rahmen des siebten Rahmenprogramms der europäischen Union.

1.7 Literatur

- [1] Roland Berger: Predictive Maintenance. Is the timing right for predictive maintenance in the manufacturing sector? URL: http://www.rolandberger.de/media/pdf/Roland_Berger_TAB_Predictive_Maintenance_20141216.pdf [Stand: 25.02.2016].
- [2] Brecher, C.; Klocke, F.; Schmitt, R.; Schuh, G. (Hrsg.): Integrative Produktion. Industrie 4.0 - Aachener Perspektiven. Aachen: Shaker, 2014.
- [3] DIN ISO 281 (Oktober, 2010): Wälzlager - Dynamische Tragzahlen und nominelle Lebensdauer.
- [4] DIN ISO 3408-5 (April 2011): Kugelgewindetriebe - Teil 5: Statische und dynamische axiale Tragzahl und Lebensdauer.
- [5] DIN ISO 14728-1 (Oktober, 2005). Wälzlager - Linear-Wälzlager - Teil 1: Dynamische Tragzahlen und nominelle Lebensdauer.
- [6] Plapper, V.: Steuerungsintegrierte Überwachung von Vorschubantrieben an Werkzeugmaschinen. Dissertation. RWTH Aachen, 2004.
- [7] Dietmair, A.; Walther, G.; Pritschow, G.: Antriebsbasierte Maschinendiagnose - Fortschritte bei der Nutzung von Antriebssignalen zur Maschinendiagnose. In: wt Werkstatttechnik online. 95. Jg., 2005.
- [8] Maier, D.; Nebel, S.; Rüdele, H.; Walther, M.; Oglodin, V.: Sensorlose vorausschauende Wartung von Vorschubantrieben an Werkzeugmaschinen. Gezielte vorbeugende Wartung durch automatisierte Zustandsbeobachtung. In: VDI-Berichte. Schwingungsüberwachung und Diagnose von Maschinen. (Bd. 1982). Düsseldorf: VDI, 2007, S. 235–249.
- [9] Imiela, J.: Verfügbarkeitssicherung von Werkzeugmaschinenachsen mit Kugelgewindetrieb durch modellbasierte Verschleißüberwachung. Garbsen: PZH, Produktionszentrum, 2006.

- [10] Denkena, B.; Jacobsen, J.; Möhring, H. C.; Lange, D.: Überwachung von Kugelgewindetrieben. Prognose der verbleibenden Lebensdauer von Vertikalachsen. In: VDI-Berichte. Elektrisch-mechanische Antriebssysteme. (Bd. 1963). Düsseldorf: VDI, 2006, S. 427–440.
- [11] Verl, A.; Heisel, U.; Walther, M.; Maier, D.: Sensorless automated condition monitoring for the control of the predictive maintenance of machine tools. In: CIRP Annals - Manufacturing Technology. 58. Jg., 2009, Nr. 1, S. 375–378.
- [12] Klein, W. H.: Zustandsüberwachung von Rollen-Profilschienenführungen und Kugelgewindetrieben. Dissertation. RWTH Aachen, 2011.
- [13] Krüger, J.: Methoden zur Verbesserung der Fehlererkennung an Antriebsstrecken. Berlin: IPK, 1999.
- [14] Brecher, C.; Klein, W. H.; Paepenmüller, F.: Ansätze zur Schadensdiagnose an Linienföhrungssystemen. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb. 101. Jg., 2006, Nr. 7-8, S. 408–411.
- [15] Brecher, C.; Witt, S.; Klein, W.: Condition monitoring of monorail guidance systems. In: Production Engineering. 2. Jg., 2008, Nr. 3, S. 333–337.
- [16] Wang, W.: An Intelligent System for Machinery Condition Monitoring. In: IEEE Transactions on Fuzzy Systems. 16. Jg., 2008, Nr. 1, S. 110–122.
- [17] Munzinger, C.; Schopp, M. (Hrsg.). Steigerung der Verfügbarkeit durch Überlastbegrenzung und prozessparallele Last- und Verschleißüberwachung (OPTILAST) (Reihe: Verfügbarkeit von Produktionssystemen als Dienstleistung). Aachen: Apprimums, 2009.
- [18] Schopp, M.: Sensorbasierte Zustandsdiagnose und -prognose von Kugelgewindetrieben. Dissertation. Universität Karlsruhe, 2009.
- [19] Broos, A.: Simulationsgestützte Ermittlung der Komponentenbelastung für die Lebensdauerprognose an Werkzeugmaschinen. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2012.
- [20] Hennrich, H.: Aufbau eines kombinierten belastungs- und zustandsorientierten Diagnose- und Prognosesystems für Kugelgewindetriebe. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2013.
- [21] Jang, J.-S. R.: ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System. In: IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. 32. Jg., 1993, Nr. 3, S. 665–685.
- [22] Bearing Data Center: Bearing Information. URL: <http://csegroups.case.edu/bearingdatacenter/pages/bearing-information> [Stand: 25.02.2016].

2 Testautomatisierung im Kontext der virtuellen Inbetriebnahme von Werkzeugmaschinen

K. Kübler, A. Verl

2.1 Einleitung

Der Werkzeugmaschinenbau in der spanenden Fertigungstechnik war im Bereich seiner Produktentwicklung lange vom sequentiellen 9-Phasen-Modell (später auch Wasserfall-Modell) nach [1] geprägt. So war es erst möglich eine Werkzeugmaschine in Betrieb zu nehmen, wenn diese entwickelt, Teile bestellt und geliefert und die Gesamtkonstruktion aufgebaut war. Erst vor gut zehn Jahren, mit dem Aufkommen von Simulationstechnik für den Entwicklungsprozess im Maschinenbau, konnte der sequentielle Ablauf aufgebrochen werden und ein teilweise parallelisierter Entwicklungsprozess erreicht werden. Diese unter dem Begriff Virtuelle Inbetriebnahme (VIBN) laufende Teil-Parallelisierung des Entwicklungsprozesses gehört heute, zumindest bei führenden Unternehmen aus der Werkzeugmaschinenbaubranche, zum Stand der Technik [2], [3]. Dabei werden sogenannte Hardware in the Loop (HiL) Aufbauten, nach [4], benutzt um die Steuerung der Maschine vor dem realen Aufbau und der realen Abnahme bereits im Büro virtuell zu testen und in Betrieb zu nehmen.

Im Fokus dieses Beitrags steht das Testen von Programmcode für Speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) mit Hilfe von HiL-Aufbauten während der VIBN. Bei steigender Funktionalität und Komplexität von Werkzeugmaschinen, und damit auch von SPS-Programmcode, sind heutzutage mehr als zwei Drittel des Programmcodes nur zur Gewährleistung der Funktionsfähigkeit und Sicherheit notwendig [5]. Werden diese Mechanismen nicht ausreichend vor dem produktiven Einsatz der Anlage getestet kann es zu unvorhersehbaren und oft teuren Folgeschäden in der laufenden Produktion kommen. Der Mensch ist aufgrund von unüberschaubaren Korrelationen im SPS-Programmcode nicht mehr dazu in der Lage den SPS-Programmcode angemessen manuell zu testen.

2.2 Stand der Technik

Zum Stand der Technik im Entwicklungsprozess von Werkzeugmaschinenherstellern gehört die VIBN [6], [7]. Abbildung 2-1 zeigt einen für die VIBN verwendeten HiL-Aufbau. Das System besteht, wie bei HiL-Aufbauten üblich, aus der realen Steuerung, dem realen Kommunikationssystem und einem Simulationsrechner [7]. In dem speziell betrachteten Fall handelt es sich um eine Computerized Numerical Control (CNC) als Steuerung, links in der Abbildung, und um eine Simulation einer Werkzeugmaschine, rechts im Bild. Ein CNC-System wird weiter unterteilt in: einen NC-Kern zur Geometriedatenverarbeitung für die einzelnen Achsen und eine weitere Steuerung, die SPS, zur Verarbeitung von logischen Schaltfunktionen. Als dritter Teil wird die Schnittstelle zum Benutzer gesehen, das Human Machine Interface (HMI) [8]. Das CNC-System und die simulierte Maschine bilden zusammen mit dem Antriebsbus eine komplette Werkzeugmaschine ab, wie sie in Realität in der Produktion steht. Zweck eines solchen Aufbaus ist es, den Steuerungscode der NC- oder SPS-Steuerung gegen das Maschinenmodell auf dem PC-System zu testen [7].

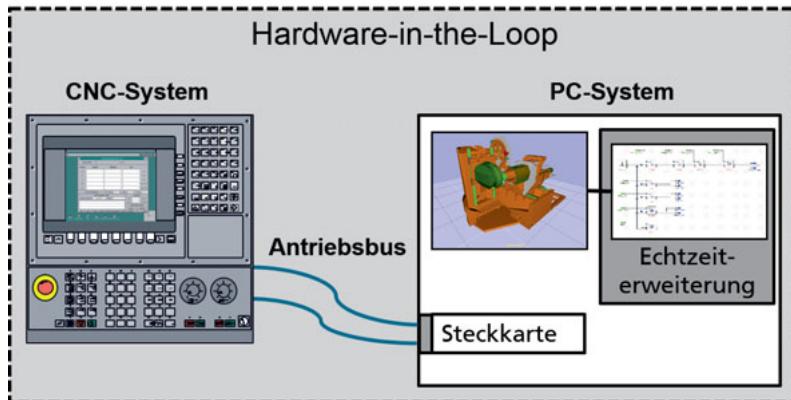


Abbildung 2-1: Hardware in the Loop Aufbau aus Steuerung, Antriebsbus und virtueller Werkzeugmaschine, angelehnt an [4]

Der PC benötigt zunächst eine Steckkarte, welche mit einem speziellen Bustreiber ausgestattet ist um eine Kommunikation in Steuerungsechtzeit zu ermöglichen. Im Betriebssystem des PCs muss ebenfalls eine Echtzeit erweiterung möglich sein, so dass die Simulation deterministisch Ergebnisse an die Steuerung liefern kann. Die großen Vorteile eines solchen Systems sind [7]:

- Eine saubere Trennung zwischen Simulation und Automatisierung (Steuerung)
- Umfangreiche Testmöglichkeiten (Integrationstest) mitsamt Peripherie der Steuerung
- Einsatz eines validierten Simulationswerkzeugs
- Ausführen von komplexen Testfällen
- Einsatz von harter Echtzeit

Zum Testen von SPS-Programmcode bei der Inbetriebnahme (IBN) von Werkzeugmaschinen sind solche Aufbauten folglich geeignet und sogar vor anderen Lösungen, wie einer Einrechner-Simulation und Simulation in der Steuerung, siehe [7], zu bevorzugen, da sie die höchste Realitätsnähe besitzen und gleichzeitig die bekannten Nachteile einer realen IBN beheben, siehe [4].

Der größte Vorteil einer VIBN mit Hilfe eines HiL-Aufbaus ist die Zeitsparnis von bis zu 80% bei der späteren Einrichtung der realen Maschine [6]. Diese Zeit kann als Puffer oder zum früheren Ausliefern der Maschine genutzt werden.

Eine im Rahmen des öffentlichen Projekts *Virtuelle Steuerungstestbench* durchgeführte Befragung von vier führenden Werkzeugmaschinenherstellern aus Deutschland zeigte allerdings Mängel an dieser Herangehensweise auf. Kapitel 2.3 zeigt die Ergebnisse der Befragung- Kapitel 2.4 leitet aus den erkannten Mängeln eine Problemstellung ab.

2.3 Befragung von Maschinenherstellern

Insgesamt wurden sechs Abteilungen aus vier Unternehmen gebeten, einen Fragebogen zum aktuellen Ist-Stand der VIBN und Tests von SPS-Programmcode auszufüllen. Dabei wurden 13 Fragen zu den Bereichen Testablauf, Testmanagement (Definition [9]) und Testauswertung

gestellt. Im Nachgang zu den Fragebögen wurden Gespräche mit den Abteilungen geführt, um die Antworten weiter zu vertiefen. Alle befragten Unternehmen haben VIBN in ihrem Entwicklungsprozess im Einsatz.

Durch die Befragungen wurden folgende Defizite sichtbar:

1. Ein Testmanagement fehlt
2. Die Testdauer ist sehr hoch, bis zu mehreren Tagen
3. Die VIBN ist eine manuelle Tätigkeit

Zu 1.: Die Befragten gaben an, dass Tests weder umfassend geplant noch umfassend dokumentiert würden. Zum einen sei das auf eine knapp bemessene Anzahl an Testen zurückzuführen, zum anderen darauf, dass viele Tests in Eigenregie durchgeführt würden und Rückmeldungen nicht einheitlich erfolgten. Weiterhin würden erstellte Testfälle nicht für eine Wiederverwendung konzipiert, sondern spezifisch auf den aktuellen Testablauf ausgelegt. Eine Einplanung von Zeitfenstern für den Test von Funktionalitäten erfolge nicht, es würde die übrige Zeit in der Entwicklungsphase für Tests genutzt, gaben über 60% der Befragten an.

Zu 2.: Tests von SPS-Programmen, welche früher erst bei der realen IBN gemacht werden konnten, werden durch die VIBN vorgezogen. Es entsteht die angesprochene Zeiterspartniss, siehe Kapitel 2.2. Die Zeitdauer der IBN selbst, ob real oder virtuell, habe sich im Gegensatz dazu aber nicht verändert, so die Hersteller. Im Gegenteil, nun stünde als zusätzlicher Arbeitsaufwand die Erstellung des virtuellen Modells an. Da die Zeit für die Erstellung, laut Werkzeugmaschinenherstellern, immer noch gering im Vergleich zur gesparten Zeit am Ende des Projekts sei, würden virtuelle Werkzeugmaschinen überhaupt modelliert und bei der VIBN eingesetzt. Die Testdauer welche für die VIBN benötigt wird, sei aber weiterhin sehr lang, im Kontext der gesamten Projektdauer. Besonders hervorgehoben wurde von den befragten Personen, dass die Testschritte, welche in einem Testfall auszuführen seien, nicht den Hauptteil an der Zeitdauer ausmachten. Zum Testablauf gehöre auch immer, das System in einen definierten Ausgangszustand zu bringen, wie die befragten Personen erklärten. Diese Tätigkeit sei zum Teil zeitaufwändiger als der eigentliche Test einer Funktionalität. Einfache Testabläufe, gemessen ohne die Testvorbereitung, seien nach zwei Minuten, komplexere Testfälle nach mehreren Tagen beendet.

Zu 3.: Fünf von sechs Abteilungen gaben an, ihre Tests manuell durchzuführen. Auch die VIBN binde Tester als Ressource während des gesamten Testablaufs. Dazu gehöre die Testerstellung, der Testablauf und die Testprotokollierung sowie -auswertung. Bei der *Testerstellung* würde sehr häufig nicht auf bestehende Testfälle zurückgegriffen, sondern neue erstellt, so die befragten Personen. Es existierten keinerlei Systeme in den Abteilungen, welche eine Wiederverwendbarkeit unterstützten, gaben vier von sechs Abteilungen an. Bei der Testprotokollierung und -auswertung würden unzureichende Aufschriebe erstellt. Die Hersteller testen nach Gefühl und notierten teilweise nur „i.O.“ (in Ordnung) oder „n.i.O.“ (nicht in Ordnung) am Ende des Testablaufs.

Stark beeinträchtigt seien Werkzeugmaschinenhersteller außerdem durch Softwareupdates seitens der Steuerungshersteller. Dies konnten alle Maschinenhersteller berichten, welche ihre Steuerung nicht selbst entwickeln. Dieser Großteil der Hersteller müsse nach Updates Dritter seinen eigenen SPS-Programmcode auch für die neue zugrundeliegende Steuerungssoftware, in sogenannten *Regressionstests* erneut testen. Insbesondere von den Maschinenbauern programmierte (Mess-)Zyklen seien davon betroffen.

2.4 Problemstellung und abgeleiteter Handlungsbedarf

Aus den in Kapitel 2.3 erläuterten Ergebnissen der Werkzeugmaschinenhersteller Befragung und den im Nachgang geführten Gesprächen lässt sich im Folgenden ein Handlungsbedarf ableiten.

Zunächst lässt sich feststellen, dass die Firmen einen Nachholbedarf in der untersuchten Domäne *Softwaretest für SPS-Programmcode* haben. Aus der Entwicklung von Anwendersoftware in höheren Programmiersprachen bekannte Konzepte wie Wiederwendbarkeit, Testprotokollierung, Testabdeckung, Testautomatisierung, beschrieben in [9], finden bei der Entwicklung von SPS-Programmcode kaum bis keine Verwendung. Hinzu kommt, dass sich in der aktuellen Struktur der VIBN viel Potenzial zum Einsparen von Zeit- und Personalkosten findet. Wie von den Befragten erfahren ist der Prozess der VIBN im Vergleich zur realen IBN nicht stark abweichend und genauso zeitintensiv. Das bedeutet, dass durch die Virtualisierung der IBN an HiL-Aufbauten lediglich Bruchstücke der Nachteile beseitigt wurden.

Weiterhin bleibt die VIBN:

- Zeitaufwändig, ein Tester muss das System manuell bedienen
- Fehleranfällig, die Tests werden manuell ausgeführt
- Unzureichend, der Tester kann nur testen, was er auch sieht
- Kostenintensiv, durch hohen Personal- und Zeitaufwand

Ausführlicher formuliert bedeutet das:

Die Kosten konnten durch VIBN reduziert werden, bleiben aber ein Faktor der verbessert werden kann.

In einem System wie den HiL-Aufbauten, welches in harter Echtzeit arbeitet kann der Mensch nicht alle Signale erfassen und auswerten. Weiterhin ist er mit der Komplexität durch etliche Korrelationen innerhalb Software überfordert.

Solange die Tests manuell ausgeführt werden, kann es zu Fehlern aufgrund menschlichen Verschuldens kommen. Dies führt im besten Fall nur zu einer Wiederholung des Tests, in anderen Fällen zu einem abgenommenen falschen Testergebnis.

Ob der Inbetriebnehmer an einer realen oder virtuellen Werkzeugmaschine testet, ist für die benötigte Zeitdauer irrelevant, sie bleibt gleich hoch.

Das nachfolgende Kapitel beschäftigt sich mit einem Lösungsansatz, welcher die oben genannten Probleme zu lösen versucht. Das Hauptaugenmerk liegt darauf, ein automatisiertes Testsystem zu schaffen, welches manuelles Testen weitgehend ersetzt.

2.5 Lösungsansatz

Um die in Kapitel 2.4 dargestellten Probleme zu lösen, wurde am ISW in Zusammenarbeit mit der *Industriellen Steuerungstechnik GmbH* (ISG) ein Konzept erarbeitet, welches erlaubt, Testsequenzen, wie sie bei der VIBN auftreten, zu automatisieren. Das Konzept trägt den Namen *Virtuelle Steuerungstestbench*, kurz *Testbench*.

Neben der reinen Automatisierung wurden weitere Anforderungen an die Testbench gestellt.

Aus dem **Testmanagement**:

- Grafische Konfiguration zur Erstellung von Testabläufen

- Ausführliche Protokollierung eines Testablaufs
- Automatisierte Auswertung der Testergebnisse
- Einfache Wiederverwendung von Testobjekten für neue Testabläufe
- Aufrufen und Einsehen von alten Testabläufen

Anforderungen aus dem Bereich **Testlauf**:

- Während eines Testablaufs muss auf HiL-Aufbauten lesend und schreibend zugegriffen werden können
- Während eines Testablaufs sollen Steuerungen von mehreren Herstellern getestet werden können
- Während eines Testablaufs müssen Bedienschritte eines manuellen Testers nachgestellt werden können (virtueller Bediener)

Weitere **allgemeine** Anforderungen:

- Voller Zugriff auf Feldbustelegramme, sowie SPS und NC-Parameter und -Variablen)
- Die Konfiguration von Testabläufen soll herstellerunabhängig geschehen
- Es dürfen keine Manipulationen am CNC-System nötig sein um Tests ausführen zu können

Das entworfene Konzept der Testbench ist in Abbildung 2-2 zu sehen. Die Testbench besteht aus zwei Hauptsystemen: Zum einen, aus einem wie in Kapitel 2.2 beschriebenen HiL-Aufbau, zum anderen aus dem *Testframework*. Das Testframework ist ein Softwareframework für den automatisierten Test an HiL-Aufbauten. In Abbildung 2-2 sind die wichtigsten Komponenten des Frameworks in der linken Bildhälfte dargestellt:

- Die grafischen Benutzeroberfläche (*GUI*) ermöglicht es Tätigkeiten aus dem Testmanagement auszuführen
- Die *Testausführung* wird durch die GUI gestartet. Vor der Testausführung werden die nötigen Test-Skripte von der Testerzeugung erstellt
- In der *Datenhaltung* werden bereits konfigurierte Testabläufe, sowie Testergebnisse und weitere relevante Framework-Dateien abgelegt
- Die *Test-Skripte* führen die einzelnen Testfälle während eines Testablaufs aus und nutzen dazu die drei eingezeichneten Schnittstellen (drei Pfeile zwischen Testframework und HiL-Aufbau)

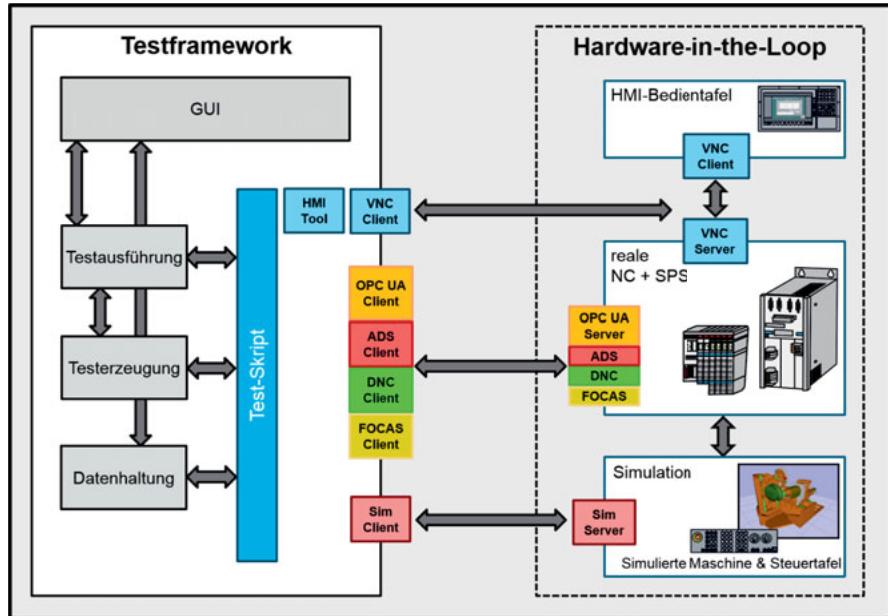


Abbildung 2-2: Schema der Virtuellen Steuerungstestbench aus Testframework und HIL-Aufbau

Im Folgenden soll detaillierter auf das Testframework und dessen Realisierung eingegangen werden. Im nächsten Unterkapitel 2.5.1 werden die drei Schnittstellen aus Abbildung 2-2 näher erläutert.

Das Testframework kann in zwei Bestandteile unterteilt werden. Zum einen in die Benutzerschnittstelle mit der grafischen Oberfläche (GUI), zum anderen in den Funktionalteil (FT), bestehend aus Skripten. Die GUI ist eine in C# programmierte unter Microsoft .NET entwickelte Oberfläche welche das Erstellen, Konfigurieren, Ausführen und Auswerten von Testabläufen ermöglicht. Mit Hilfe der GUI erstellt der Tester seine Konfigurationen, welche in *Extensible Markup Language (XML-)* Dateien gespeichert werden. Mit dem FT des Frameworks werden die XML-Dateien gelesen, interpretiert und die entsprechenden (Test-)Operationen ausgeführt. Zu den wichtigsten Komponenten im FT des Testframeworks gehören die in Abbildung 2-2 gezeigten Module: Testausführung, Testerzeugung, Datenhaltung, Test-Skripte sowie die verschiedenen Clientmodule. Die folgenden Erläuterungen können in Abbildung 2-2 und Abbildung 2-3 nachvollzogen werden:

Die **Testausführung** kann direkt von der GUI aus vom Tester ausgeführt werden. Die Ausführung orchestriert den gesamten Ablauf eines Tests. Dazu startet sie zuallererst die Testerzeugung. Danach werden die erzeugten Test-Skripte von der Testausführung in der korrekten Reihenfolge ausgeführt. Während der Ausführung der Test-Skripte sorgt das Modul Testausführung dafür, dass den generischen Aufrufen eine konkrete Syntax der einzelnen Schnittstellen zugeordnet wird, mehr dazu in Unterkapitel 2.5.1. Nach der Testausführung führt das Modul eine Testauswertung durch und erstellt entsprechende Dokumente mit den Testergebnissen.

Das Modul **Testerzeugung** wandelt die Informationen aus XML-Dateien in Test-Skripte um. Bei den erzeugten Test-Skripten handelt es sich um Skripte in der Programmiersprache *Python*.

Mit **Datenhaltung** ist kein konkretes Modul im Testframework bezeichnet, sondern vielmehr die Gesamtheit aller in XML-Dateien gespeicherten Informationen. Dabei handelt es sich zum einen um die Auswahlmöglichkeiten für den Tester beim Konfigurieren über die GUI, *vorhandene Daten* in Abbildung 2-3, zum anderen um die vom Tester beim Konfigurieren oder beim Testablauf durch das Framework neu entstandenen Dateien, *erzeugte Daten* in Abbildung 2-3.

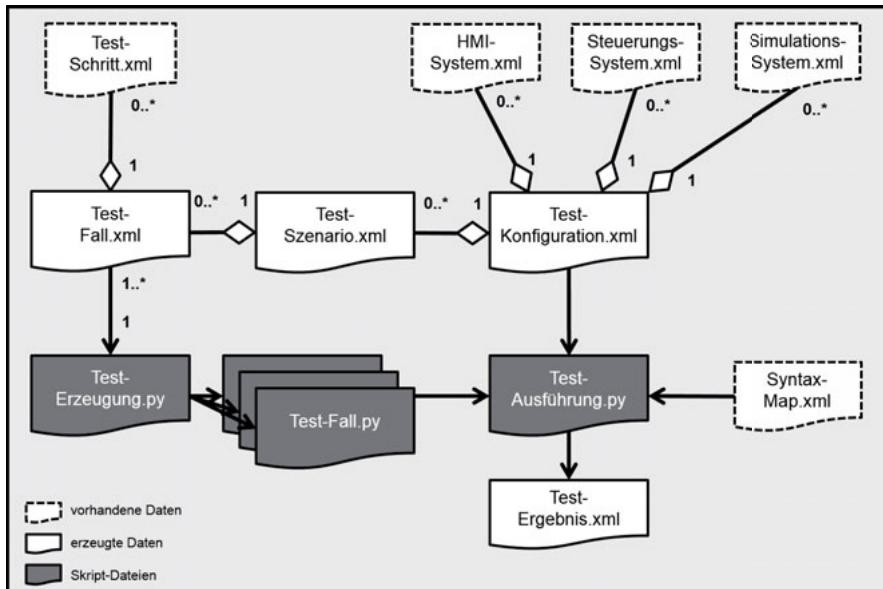


Abbildung 2-3: Komponentendiagramm des Testframeworks

Wie in der obigen Abbildung 2-3 dargestellt, erzeugt der Tester durch Konfigurieren von neuen Tests die drei Dateiarten *Test-Fall.xml*, *Test-Szenario.xml* und *Test-Konfiguration.xml*. Auf unterster Ebene besteht eine Test-Konfiguration aus Test-Schritten, welche konkrete an einem HiL-Aufbau ausführbare Aktionen beinhalten. Test-Schritte werden als atomare Bestandteile durch das Testframework mitgeliefert und können bei Bedarf, in Form von XML-Dateien, neu hinzugefügt werden. Beispielsweise kann ein Test-Schritt enthalten: *Auslesen eines Steuerungsparameters aus der NC-Parametrierung*, oder *Beeinflussen des Simulationsmodells zur gewollten Fehlererzeugung in der virtuellen Werkzeugmaschine*. Mehrere Test-Schritte werden zu einem Test-Fall verknüpft, welcher mehrere Test-Schritte logisch miteinander verknüpft und auch die Schritte beinhaltet um den HiL-Aufbau in einen definierten Ausgangszustand vor dem Ausführen der eigentlichen Test-Schritte zu bringen. Mehrere Test-Fälle werden zu Test-Szenarien gebündelt. Diese Bündelung findet z.B. funktionsweise statt, so können einzelne funktionale Einheiten einer Werkzeugmaschine bei der VIBN getestet werden. Wobei das Szenario wiederum für mehrere Werkzeugmaschinenmodelle benutzt werden kann welche diese funktionale Einheit verbaut haben. Die Test-Konfiguration enthält neben mehreren Test-Szenarien, in logischer Reihenfolge, zusätzliche Informationen zum HiL-Aufbau,

welcher im Test verwendet wird. Die Beschreibungen dazu entnimmt die GUI den Dateien *HMI-System.xml*, *Steuerungssystem.xml*, *Simulationssystem.xml* und stellt sie dem Tester beim Konfigurieren zur Verfügung. Vor einem Testdurchlauf generiert die *Test-Erzeugung.py* aus den einzelnen Beschreibungen der Test-Fälle, den *Test-Fall.xml* Dateien, ausführbare Skripte, die *Test-Fall.py* Dateien. Zur Laufzeit des Tests werden beim Ausführen der einzelnen Test-Fälle durch die *Test-Ausführung.py* generische Aufrufe der Testfälle in konkrete Syntax für das aktuelle CNC-System im HiL-Aufbau übersetzt. Als Testergebnisse werden die Resultate aus jedem Test-Schritt in eine *Test-Ergebnis.xml* abgespeichert und mit den anderen Test-Dateien abgespeichert. Dadurch kann in Zukunft auf die genaue Konfiguration aus diesem Test zurückgegriffen werden und auch die Ergebnisse nochmals eingesehen werden. Neben der XML-Datei, mit den detaillierten Einzelergebnissen, wird außerdem eine PDF-Datei erzeugt welche eine Auswertung der Ergebnisse beinhaltet und damit einen schnellen Überblick zu den Testergebnissen gibt.

2.5.1 Schnittstellen des Testframeworks

An dieser Stelle soll vertieft auf die externen Schnittstellen des Testframeworks eingegangen werden. Diese sind in Abbildung 2-2 sichtbar als drei graue Pfeile zwischen Testframework und HiL-Aufbau. Eine vierte Schnittstelle ist die Benutzerschnittstelle in Form der GUI, mit welcher der Tester bzw. spätere Benutzer die gesamte Testbench bedient. Diese Schnittstelle des Frameworks soll nicht näher betrachtet werden.

Wie zu erkennen ist, besitzt das Framework drei Schnittstellen zum HiL-Aufbau. Zwei zum CNC-System, wobei eine Schnittstelle zur Steuereinheit bestehend aus NC und SPS verläuft und die zweite zum HMI der CNC. Die dritte Schnittstelle besteht zur Simulation der Werkzeugmaschine. Die **HMI-Schnittstelle** wird beim automatisierten Testen für zwei Dinge benötigt: Erstens, zum Auslösen von Bedienhandlungen, welche vormals von einem Tester ausgeführt wurden, dies bedeutet die Umsetzung eines virtuellen Bedieners. Zweitens, um zu überprüfen, ob das HMI im Fehlerfall richtige Fehlermeldungen an den Benutzer weitergibt. Über die **Steuerungsschnittstelle** zur NC und zur SPS werden hauptsächlich Parameter und Variablen ausgelesen. Zusätzlich könnten diese Parameter und Variablen auch geschrieben werden. Das soll allerdings über das HMI geschehen, weil es sonst nicht dem späteren realen Anwendungsfall entspricht. Durch die in Kapitel 2.5 gestellte Anforderung „Die Konfiguration von Testabläufen soll herstellerunabhängig geschehen“ muss zusätzlich zur Verbindung an die Steuerung eine herstellerunabhängige Adressierung möglich sein. Abbildung 2-4 zeigt die schematische Darstellung der umgesetzten Lösung.

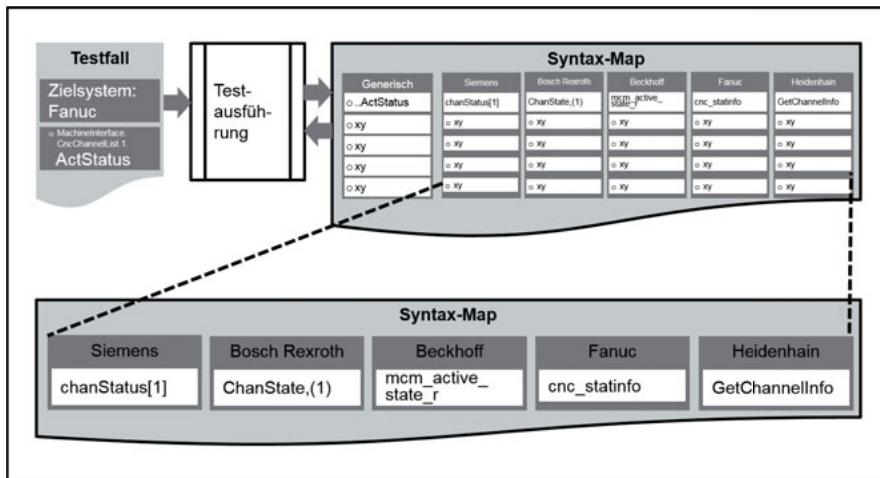


Abbildung 2-4: Schema der Syntax-Map im Testframework

Mit einer sogenannten Syntax-Map werden die Adressen der Parameter und Variablen in einer Steuerung über mehrere Hersteller hinweg, für jeweils einen bestimmten Parameter oder eine bestimmte Variable mit einem generischen Aufruf beschrieben. Beim Konfigurieren von Testfällen benutzt der Tester den generischen Aufruf und gibt in der Test-Konfiguration.xml die Zielsteuerung an. Somit bleibt der einzelne Testfall generisch und kann ohne Anpassung in einer weiteren Test-Konfiguration auf einem weiteren Zielsystem ausgeführt werden. Die Abbildung 2-4 zeigt exemplarisch den Aufruf für den Parameter „Aktueller Status NC-Kanal 1“. Dabei wird der generische Aufruf `MachineInterface.CncChannelList.I.ActStatus` benutzt. Als Zielsteuerung ist eine *FANUC* CNC im Einsatz. Durch Nachsehen in der Syntax-Map, sogenanntes „Mapping“, wird aus dem generischen Aufruf die Syntax von *FANUC* ermittelt `cnc_statinfo`. Bei der Ausführung des Testfalls wird dann die Syntax von *FANUC* anstatt des generischen Ausdrucks verwendet. Durch die Verwendung der Syntax-Map ist eine herstellerunabhängige Konfiguration und damit eine vereinfachte Wiederverwendung der Testfälle möglich. Darüber hinaus kann der Syntax-Map jederzeit ein weiterer Hersteller oder eine weitere Adressierung für Parameter und Variablen hinzugefügt werden.

Die dritte Schnittstelle ist die **Simulationsschnittstelle** zur virtuellen Werkzeugmaschine. Mit Hilfe der Simulationsschnittstelle können Werte in der virtuellen Maschine gelesen und geschrieben werden. Durch das Lesen kann der innere Zustand von Komponenten der virtuellen Werkzeugmaschine bestimmt werden und mit dem Zustand laut Steuerung verglichen werden. Abfolgen wie „Setzen an der Steuerung und anschließendes Überprüfen an der Maschine“ dienen vornehmlich der Überprüfung des Gut-Falls, wie er z.B. im Pflichtenheft definiert wurde. Ein weitaus wichtigerer Bestandteil der VIBN ist es aber den Schlecht-Fall, sprich den Fall von auftretenden Fehlern an der Maschine zu testen. Dazu besitzt die Simulationsschnittstelle die Möglichkeit Werte des virtuellen Modells der Werkzeugmaschine zu beeinflussen – etwa durch sogenanntes „Forcen“, bzw. „Zwingen“, der Werte im Modell, beschrieben in [2]. Dieses dauerhafte Überschreiben funktioniert sowohl für Ein- und Ausgangssignale als auch für interne Zustandssignale des Modells. Somit kann beliebig oft während eines Testablaufs das Simulationsmodell der Werkzeugmaschine automatisiert beeinflusst und wieder in seinen Ursprungszustand gebracht werden, ohne dass einer realen Maschine oder einem realen Tester etwas zustoßen kann.

Durch die Automatisierung des Zugriffs auf die drei Schnittstellen und die Wiederverwendung von bereits angelegten Testabläufen muss es möglich sein, die VIBN schneller und fehlerfrei durchführen zu können. Zusätzlich hat der Tester am Ende des Testablaufs einen detaillierten Einblick in die getätigten Aktionen des Testframeworks durch das Mitprotokollieren aller Aktionen und auftretenden Werte während des Tests.

2.6 Entwicklungsstand der Testbench

Abbildung 2-5 zeigt den am Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen aufgebauten Demonstrator für die Umsetzung und Validierung des Konzepts der Virtuellen Steuerungstestbench.

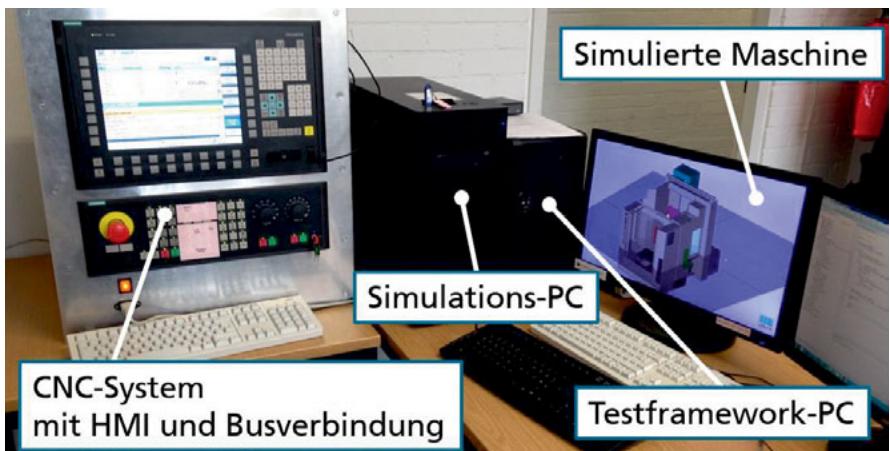


Abbildung 2-5: Aufbau des Demonstrators

Das System Steuerungstestbench besteht aus den in Abbildung 2-2 schematisch dargestellten Komponenten:

- Reales CNC-System
- Reales Antriebsbus-System
- Virtuelle Werkzeugmaschine auf einen Simulations-PC
- Testframework auf einem PC

Nachdem der Demonstrator aufgebaut und das Testframework implementiert wurde beginnt aktuell die Phase der Evaluation des Gesamtkonzepts Virtuelle Steuerungstestbench. Dazu muss im ersten Schritt das Testframework fehlerfrei sein. In einem zweiten Schritt wird eine Optimierung hinsichtlich Schnelligkeit und Zuverlässigkeit sowie Benutzerfreundlichkeit des Testframeworks durchgeführt werden. Erst, wenn die Implementierung ihren nötigen Grad an Reife am ISW erreicht hat, kann sie für erste Feldtests bei Werkzeugmaschinenherstellern eingesetzt werden.

2.7 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde der aktuelle Stand der virtuellen Inbetriebnahme von Werkzeugmaschinen aufgezeigt. Aus diesem Stand der Technik wurde mit Hilfe von Fragebögen und Interviews, mit führenden Werkzeugmaschinenherstellern aus Deutschland, eine Auflistung an Problemen der VIBN erstellt. Aus den Problemen wurden im Folgenden ein Handlungsbedarf und dazugehörige Lösungen erarbeitet. Der Fokus lag dabei auf dem Testen von Maschinenherstellern erstellten SPS-Programmcode. Die Hersteller benötigen Unterstützung um einen zeit-, personal-, und damit kostenreduzierten Test von SPS-Code umzusetzen. Neben diesen drei Faktoren ist mit der erarbeiteten Lösung eine höhere Testabdeckung bei gleichem Aufwand möglich. Weiterhin werden Praktiken aus dem Testmanagement im Lösungskonzept unterstützt. Die Lösung sieht eine Automatisierung der Testfälle an einem Hardware in the Loop Aufbau vor. Dabei werden Gut- und Schlecht-Fall Tests an der sogenannten Virtuellen Steuerungstestbench durchgeführt. Das Testframework der Testbench unterstützt den Tester dabei durch Protokollierung und Auswertung während und nach dem Testablauf, sowie beim Erstellen und Wiederverwenden von Testfällen vor dem Testablauf.

Ein Demonstrator zur Validierung der Ergebnisse wurde aufgebaut. Erste Versuch einer vereinfachten Testerstellung, -ausführung, und -protokollierung wurden am ISW erfolgreich durchgeführt. Ausstehend sind Iterationen zur Verbesserung des Testframeworks und daran anschließende, quantifizierbare Versuche bei den Werkzeugmaschinenherstellern. Eine zusätzliche Herausforderung wird es sein, die Virtuelle Steuerungstestbench, als neues „Werkzeug“ zum automatisierten Testen während der VIBN, in den Entwicklungsprozess der Hersteller zu integrieren.

Der Fokus dieser Arbeit lag auf der Abnahme von SPS-Programmcode während der VIBN von Werkzeugmaschinen. In weiteren Arbeiten bietet sich die Ausweitung auf den Test von NC-Programmcode oder gar GUI-Programmcode an. Ohne weiteres sollte es außerdem möglich sein, das Testframework auf gesamte Produktionsanlagen anzuwenden und diese in einem HiL-Aufbau automatisiert in Betrieb zu nehmen, bzw. deren Programmcode zu testen.

2.8 Anerkennung

Diese Arbeit wurde unterstützt durch das Zentrale Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM), gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.

2.9 Literaturverzeichnis

- [1] G. Pritschow und S. Röck, „Hardware in the Loop“ Simulation of Machine Tools,“ *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Bd. 53, p. 295–298, 2004
- [2] N. N., *Virtuelle Inbetriebnahme - Modellarten und Glossar*, VDI/VDE-Richtlinien 3693-1, Berlin: Beuth, 2015.
- [3] M. Kaever, „Steuerungsarchitektur und Kommunikationstechnik,“ *Vorlesung Steuerungstechnik II*, Universität Stuttgart, pp. 67-76, 25 01 2016.
- [4] H. Willrett, „Zwilling im Computer - Virtuelle Werkzeugmaschine: die Zukunft in der Arbeitsvorbereitung,“ *Industrieanzeiger*, pp. 28-31, 10 09 2007.

- [5] N. N., *Software and systems engineering—Software testing—ISO/IEC/IEEE 29119 Part 1: Concepts and definitions*, Geneva; New York: ISO; IEC; IEEE, 2013.
- [6] G. Pritschow, Einführung in die Steuerungstechnik, München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2006.
- [7] H. Benington, „Production of Large Computer Programs,“ *ICSE '87 Proceedings of the 9th international conference on Software Engineering*, pp. 299-310, 1987.
- [8] C. Daniel, „Virtuelle Komponenten verkürzen Inbetriebnahme,“ *MaschinenMarkt*, Nr. 41, p. 40–42, 2015.
- [9] H. Preiml, „Erfahrungen mit der virtuellen Inbetriebnahme in der Anlagen- Projektierung,“ *MaschinenMarkt*, 19 07 2013. [Online]. Available: <http://www.virtual-reality-magazin.de/heitec-erfahrungen-mit-der-virtuellen-inbetriebnahme-der-anlagenprojektierung>. [Zugriff am 10 5 2016].

3 Intelligentes Maschinenfenster für Werkzeugmaschinen mit Hilfe von Augmented Reality

P. Sommer, A. Verl

3.1 Motivation

Werkzeugmaschinen sind heute fast durchgängig mit einem oder sogar mehreren Sichtfenstern ausgestattet. Diese Fenster bieten dem Maschinenbediener einen Einblick ins Innere der Maschine und ermöglichen so die Beobachtung und Überwachung des Bearbeitungsprozesses. Darüber hinaus stellen die Fenster eine trennende Einrichtung zwischen Bediener und Maschineninnenraum dar und verhindern den Zugriff von außen auf Gefahrstellen. Während des Betriebs der Maschine halten sie fliegende Späne und Bruchstücke sowie Kühlenschmierstoffe zurück. Sie sind daher als Schutzeinrichtung und Sicherheitsbauteil zu behandeln und müssen sicherheitstechnischen Anforderungen, wie beispielsweise einer ausreichenden Rückhaltefähigkeit im Gefahrfall, genügen [1]. Daher sind Sichtfenster in Laserschneidemaschinen und in der spanenden Verarbeitung mit sehr hohen Kosten verbunden. Während der Bearbeitung kann trotz der vorhandenen Sichtfenster jedoch oft keine Beobachtung des Werkzeugs und des Werkstücks erfolgen, da die Sicht in den Maschineninnenraum durch Kühlenschmierstoffnebel (KSS-Nebel), Bearbeitungsstaub und Späne nicht möglich ist. In diesem Fall bieten die Sichtfenster trotz der sehr hohen Kosten nur einen geringen Nutzen.

Während der Inbetriebnahme, Bedienung und Wartung von Werkzeugmaschinen werden neben der visuellen Erfassung des Maschinenzustands durch das Sichtfenster unterstützende Systeme und Bediensysteme eingesetzt. Bei diesen Systemen handelt es sich um Human Machine Interfaces (HMIs) zur Interaktion mit der Maschine (Bedienung, Maschinenstatusanzeige, Steuerungsinbetriebnahme, Diagnose), neuerdings um Smart Devices, meist zur Überwachung und Kontrolle der Maschine (Statusanzeige, Diagnose, Fernwartung), sowie um Simulationssysteme zur virtuellen Inbetriebnahme der Maschine und zur Prozessvalidierung im Vorfeld der Produktion (Offline-Kollisionskontrolle, Prozessoptimierung). Der Einsatz der unterstützenden Systeme und Bediensysteme erfolgt meist getrennt voneinander auf unterschiedlicher Hardware und zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Dadurch wird das Potential dieser Systeme nicht ausreichend genutzt. Einerseits steht dem Maschinenbediener meist nur ein Teil dieser Systeme zur Verfügung. Andererseits könnten durch Zusammenführung der Systeme zusätzlicher Mehrwert generiert werden, der bisher nicht ausgeschöpft wird. Um beispielsweise den Bediener bei manuellen Vorgängen, die trotz eines hohen Automatisierungsgrades in der heutigen Produktion durchgeführt werden müssen, systemseitig besser zu unterstützen würde eine Verschmelzung dieser Systeme zu einem deutlichen Mehrwert führen.

Aus den genannten Gründen besteht bei Maschinenbauunternehmen und Anwendern der Bedarf, die sehr teuren Sichtfenster mit geringem Nutzen durch intelligente Maschinenfenster zu ersetzen. Diese neuartigen Maschinenfenster sollen trotz schmutzintensiver oder verdeckter Bearbeitungsprozesse eine Beobachtung des Maschineninnenraums erlauben. Um eine bessere Bedienunterstützung zu erreichen soll gleichzeitig das Sichtfenster aufgewertet werden, indem HMI-, Simulationssysteme und der Prozess enger verzahnt und Konzepte zur intuitiven Benutzerführung eingebracht werden.

3.2 Lösungsansatz

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Forschungsprojekt *iWindow: Intelligentes Maschinenfenster* sollen konventionelle Sichtfenster, wie sie aktuell an Werkzeugmaschinen vorzufinden sind, durch neue intelligente Maschinenfenster ersetzt werden. Diese Maschinenfenster sollen den Maschineninnenraum um computergenerierte kontextbezogene Informationen, erzeugt durch sogenannte Mehrwertdienste, erweitern. Dies geschieht unter Nutzung sogenannter Mixed und Augmented Reality (gemischte und erweiterte Realität). Dabei werden computergenerierte Inhalte mit dreidimensionalem Bezug in der realen Umgebung überlagert dargestellt [2]. Darüber hinaus soll das intelligente Maschinenfenster zugleich Fenster und Bedienoberfläche sein, um dem Bediener die Interaktion mit der Maschine und den zusätzlich eingebrachten Inhalten zu ermöglichen.

Die Funktionalitäten des intelligenten Maschinenfensters werden in drei Informationsebenen - Maschineninnenraum, Mehrwertdienste und Bedienung - gegliedert. Die Informationsebenen, dargestellt in Abbildung 3-1, werden über eine herstellerunabhängige Schnittstelle an die Maschinensteuerung gekoppelt. Der Maschineninnenraum ist entweder durch ein transparentes Display direkt sichtbar oder wird mittels Kamerabild oder durch realitätsnahe Visualisierung auf einem konventionellen Display dargestellt. Im Falle der letzten beiden Visualisierungsmethoden soll die Rekonstruktion bzw. die Visualisierung in Echtzeit erfolgen, damit die Darstellung während des Bearbeitungsprozesses genutzt werden kann. Eine perspektivische Darstellung soll unter Einbeziehung von Head-Tracking-Systemen erzielt werden. In [3] wird ein solches positionsabhängiges Rendering dreidimensionaler Inhalte abhängig von der Position des Betrachters erläutert. Die in den drei Informationsebenen erzeugten Daten werden in einer Visualisierungsschnittstelle zusammengeführt, überlagert und anschließend als Bilddaten ausgegeben. Die softwaretechnischen Systemkomponenten des intelligenten Maschinenfensters sind in Abbildung 3-2 dargestellt.

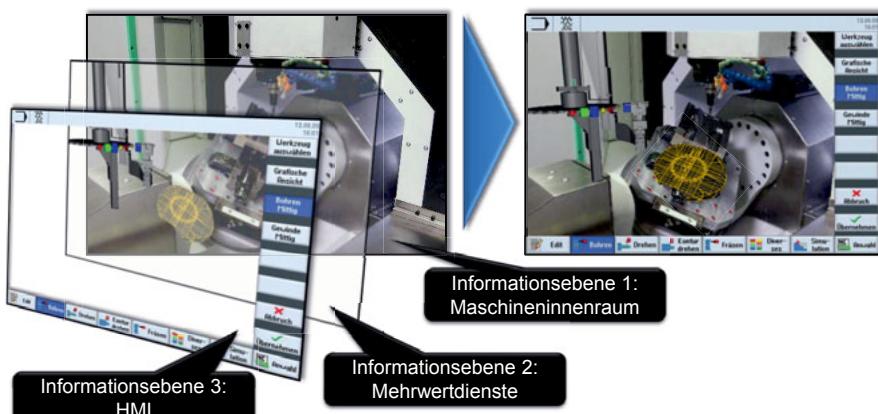


Abbildung 3-1: Informationsebenen des intelligenten Maschinenfensters

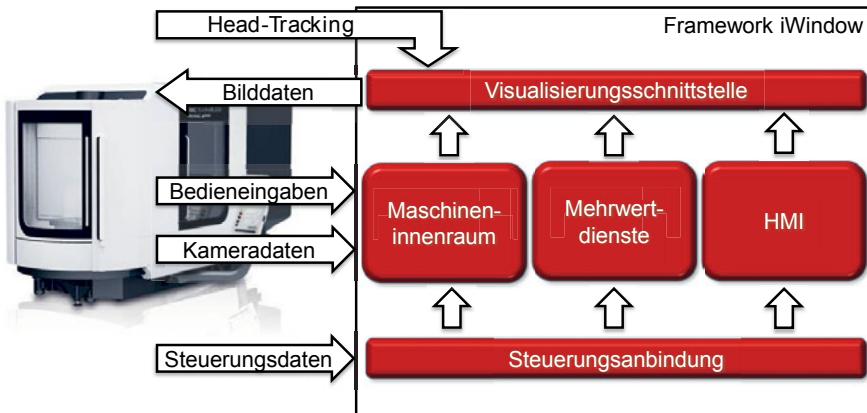


Abbildung 3-2: Softwaretechnische Systemkomponenten des intelligenten Maschinenfens-ters

3.3 Konzeption und Umsetzung

3.3.1 Steuerungsanbindung

Um das intelligente Maschinenfenster an Maschinen mit unterschiedlichen Steuerungen verwenden zu können, wird eine herstellerunabhängige einheitliche Schnittstelle verwendet. Die Basis dieser Schnittstelle bildet die im Kontext von Industrie 4.0 oft genannte OPC Unified Architecture (OPC UA). Da sich das intelligente Maschinenfenster an Werkzeugmaschinen, im Speziellen an CNC-gesteuerte Maschinen, richtet, wird aufbauend darauf die *OPC UA Companion Specification für CNC Systeme* [4] eingesetzt. Dieses Informationsmodell wurde in Zusammenarbeit zwischen der OPC UA Foundation, dem Verein Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken (VDW), Steuerungsherstellern und Forschungsinstituten entwickelt. Im Informationsmodell wird spezifiziert wie die Maschinendaten im OPC UA Namensraum abgebildet werden. Die behandelten Maschinendaten umfassen Konfigurationsdaten, Soll- und Istwerte, Prozessparameter, Warnungen, Fehlermeldungen und Dateien, wie beispielsweise NC-Programme.

3.3.2 Maschineninnenraum

Der Zweck eines herkömmlichen Maschinenfensters ist die Möglichkeit den Maschineninnenraum zu betrachten und zu überwachen. Dies ist jedoch nur dann möglich, wenn die Sicht nicht durch Späne, Kühlsmiermittel oder Verdeckung durch Maschinenkomponenten beeinträchtigt wird. Selbst die Größe des Innenraums kann, beispielsweise bei Laserschneidemaschinen mit Abmessungen bis zu 17 m und Arbeitsbereichen einzelner Achsen bis zu 6 m, zu schwierigen Sichtverhältnissen führen. Auch das intelligente Maschinenfenster soll dem Maschinebediener durch den Einsatz von Displays weiterhin die Möglichkeit geben, den Maschineninnenraum zu beobachten. Dazu kommen zwei verschiedene Displaytechnologien in Frage, transparente oder opake Displays. Werden transparente Displays verwendet, ist der Maschineninnenraum durch das Display direkt sichtbar. Bei Verwendung von opaken Displays wird die Beobachtung des Maschineninnenraums durch Kameras ermöglicht. Mehrere Kameras im Maschineninnenraum liefern Live-Videosignale aus verschiedenen Perspektiven, welche dann auf das Display gestreamt werden.

Diese beiden Möglichkeiten zur Beobachtung des Maschineninnenraums sind jedoch, ebenso wie bei herkömmlichen Maschinenfenstern, nur dann von Vorteil, wenn die Sicht nicht beeinträchtigt ist. Ist die Sicht beeinträchtigt, wird, unabhängig von der Displaytechnologie, ein Echtzeit-Computermodell des Innenraums verwendet. Dieses Modell basiert auf CAD-Geometriedaten des Innenraumes und wird zur Laufzeit mit Echtzeitdaten der Maschinenachsen animiert. Durch die Animation mit Achsdaten repräsentiert das Computermodell zu jeder Zeit eine genaue Abbildung des tatsächlichen Innenraumes. Weiterhin erlaubt das Computermodell die Betrachtung des Innenraums aus nahezu jeder beliebigen Perspektive und ein Zoomen zur genaueren Betrachtung relevanter Stellen. Dies ist ein Vorteil der Visualisierung mittels Computermodell gegenüber der direkten Betrachtung durch ein transparentes Display bzw. der Nutzung von festinstallierten Kameras. Elementar für die Akzeptanz des Computermodells durch den Maschinenbediener, als Ersatz für die tatsächliche Sicht in den realen Maschineninnenraum, ist eine realitätsnahe Darstellung. Um eine möglichst realitätsnahe Darstellung des Computermodells zu erreichen, bietet sich die Nutzung einer Gameengine an. Gameengines sind Frameworks zur Entwicklung von Computerspielen und bieten unter anderem die Möglichkeit dreidimensionale Welten zu erstellen und realitätsnah darzustellen. Ein Vergleich zwischen realem Maschineninnenraum und jeweils einer Visualisierung in den Gameengines *Unity 3D* und *Unreal Engine* ist in Abbildung 3-3 am Beispiel einer *DMU 50 ecoMill* der Firma DMG MORI dargestellt. Die Realitätsnähe wird insbesondere durch die Verwendung von detaillierten Texturen, Lichtern, Schatten und Spiegelungen erreicht. Die Nutzung dieser grafischen Effekte in einer Gameengine ist mit relativ wenig Aufwand zu realisieren. Anhand der Ergebnisse lässt sich bereits erkennen, dass der Einsatz von Gameengines sich bestens für die realitätsnahe Darstellung des Maschineninnenraums eignet.



Abbildung 3-3: Vergleich zwischen Realität und virtueller Darstellung mittels Gameengines

3.3.3 Mehrwertdienste

Um den Maschinenbediener bei seinen Tätigkeiten an der Werkzeugmaschine zu unterstützen, werden kontextbezogene Informationen in den Maschineninnenraum eingeblendet. Diese Informationen werden zur Laufzeit dynamisch von Mehrwertdiensten generiert. Jeder Mehr-

wertdienst fügt Funktionalität für einen speziellen Nutzen hinzu und agiert somit unabhängig von anderen Diensten. Um das intelligente Maschinenfenster entsprechend der Maschine und dem aktuellen Bearbeitungsvorgang anzupassen, kann es zur Laufzeit mit Mehrwertdiensten erweitert werden. Abhängig davon welche Unterstützung der Maschinenbediener benötigt, kann er die passenden Mehrwertdienste auswählen und verwenden. Um dies zu ermöglichen, werden die Mehrwertdienste in einem Plug-In-System ausgeführt. Dadurch können Mehrwertdienste ausgetauscht, nachträglich hinzugefügt, aktualisiert und entfernt werden.

Im Folgenden werden einige mögliche Mehrwertdienste vorgestellt.

3.3.3.1 Visualisierung von Werkzeugbahnen

Ein Mehrwertdienst zum Visualisieren von Werkzeugbahnen kann dem Maschinenbediener helfen, ungewolltes Verhalten der Maschine und Kollisionen zu verhindern. Abhängig von der verwendeten Darstellungsart des Maschineninnenraums wird die Werkzeugbahn entweder mittels Augmented Reality über den realen Innenraum überlagert oder, wie in Abbildung 3-4 dargestellt, im Computermodell visualisiert. Ein Wechsel von der Überlagerung im realen Innenraum zum Computermodell ermöglicht die Betrachtung der Werkzeugbahn an Stellen, welche bei Betrachtung durch ein konventionelles Maschinenfenster verdeckt wären.

Um Werkzeugbahnen bereits vor der tatsächlichen Bearbeitung visualisieren zu können, wird eine Maschinensimulation verwendet. Diese ermöglicht es die Bewegungen der Achsen zu simulieren und damit Bearbeitungsprogramme auszuführen ohne die realen Achsen zu bewegen. Dies kann sowohl in tatsächlicher Bearbeitungszeit, sowie auch mit einem Schieberegler als Zeitbasis erfolgen. Aus der Simulation können unter anderem Werkzeugbahnen, Abtrags- und Schnittinformationen, Kollisionen und zusätzliche Daten wie beispielsweise Energieverbrauchswerte gewonnen werden.

Während der Bearbeitung wird aufgezeichnet, ob sich das Werkzeug durch die Luft oder durch das Material bewegt. Dazu kann entweder auf die genannte Maschinensimulation zurückgegriffen oder die Leistungswerte von Spindel und Vorschubantrieben ausgewertet werden. Anhand der Auswertung kann der Maschinenbediener anschließend das Bearbeitungsprogramm optimieren. Wird anhand der Auswertung beispielsweise erkannt, dass im Bearbeitungsprogramm viele Bewegungen durch die Luft in Bearbeitungsgeschwindigkeit, anstelle von Eilgang, durchgeführt werden, lässt sich eine zeitliche Optimierung durchführen. Werden dagegen unnötige Abschnitte im Verfahrtsweg aufgedeckt, kann dieser optimiert werden.

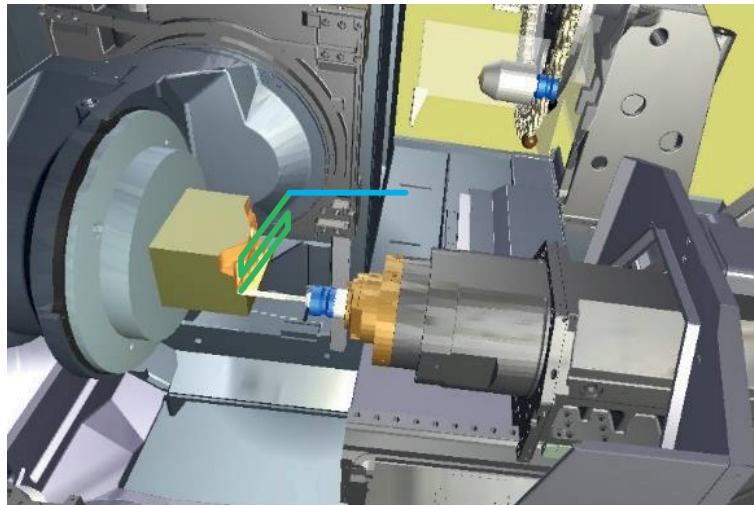


Abbildung 3-4: Darstellung von Werkzeugbahnen (Quelle: ISG Industrielle Steuerungstechnik GmbH; verändert)

3.3.3.2 Visualisierung von Werkstückkonturen auf Restmaterial

Zur manuellen Nachproduktion von Einzelteilen auf Laserschneidemaschinen wird häufig Restmaterial verwendet. Da die Positionierung der gewünschten Werkstücke abhängig vom übrigen Restmaterial ist, muss das Bearbeitungsprogramm individuell angepasst werden. Unter Verwendung von textueller Programmierung können diese Anpassungen sehr aufwendig und kompliziert sein. Einfacher und insbesondere intuitiver gestaltet sich das grafisch unterstützte Positionieren von Werkstückkonturen [5]. Dazu werden verfügbare Werkstückkonturen automatisch aus vorhandenem NC-Code extrahiert und dem Maschinenbediener zur Auswahl angeboten. Das Extrahieren der Konturen erfolgt mittels eines NC-Parsers, der in der Lage ist, die resultierenden Werkzeugbahnen in Form von Punktfolgen auszulesen. Anschließend kann der Bediener die passenden Werkstückkonturen auswählen und per Drag & Drop auf dem Restmaterial platzieren. Die Konturen werden, wie in Abbildung 3-5 abgebildet, mittels Augmented Reality perspektivisch korrekt dargestellt. Nach Abschluss der Platzierung und Ausrichtung aller Werkstückkonturen wird automatisch das resultierende NC-Programm erzeugt und ausgeführt.

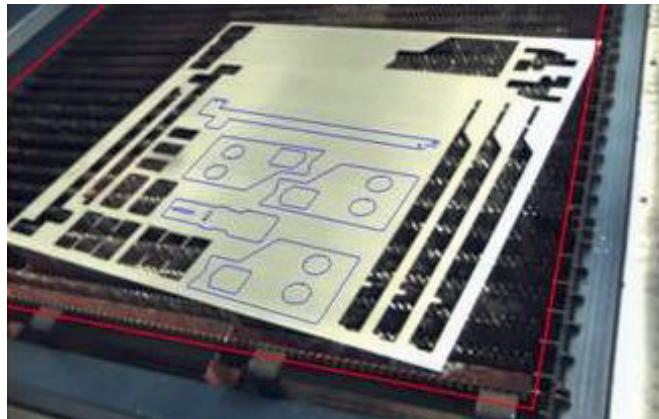


Abbildung 3-5: Visualisierung von Werkstückkonturen (Quelle: Trumpf)

3.3.3.3 Evaluierung von Prozessergebnissen

Um die Qualität von Werkstücken zu überwachen, werden in der Produktion bereits verschiedene Sensoren eingesetzt. Beispielsweise können an Laserschneidemaschinen ein Abriss der Schnittkontur oder ungewünschte Effekte in der Schlackebildung detektiert werden. In spannenden Fertigungsprozessen werden mittels Schwingungssensoren ungewollte Achsschwingungen und Vibratiorionen, welche sich negativ auf die Oberflächengüte auswirken, erkannt [6]. Ein bestehendes Problem bei erkannten Prozessabweichungen ist eine fehlende lokale Zuordnung am Werkstück, sowie eine Referenz zum verantwortlichen NC Satz. Wurde durch das Steuerungssystem einer Werkzeugmaschine mittels Sensorik eine Prozessabweichungen erkannt, möchte der Maschinenbediener die entsprechende Stelle am Werkstück meist genauer betrachten und den Fehler beurteilen. Dazu reicht es jedoch nicht aus, auf einen erkannten Fehler rein textuell hinzuweisen. Um dem Maschinenbediener eine Lokalisierung der betreffenden Stelle einfach zu ermöglichen, werden Prozessergebnisse mit Hilfe des intelligenten Maschinenfensters evaluiert und mit dreidimensionalem Bezug im Maschineninnenraum visualisiert. Beispielsweise wird in einem Laserschneideprozess die aktuelle Schnittkontur unter Nutzung von Augmented Reality auf das Blech eingeblendet und diese Linie entsprechend der aufgezeichneten Sensorsignale eingefärbt, siehe Abbildung 3-6. Auf diese Weise werden durch die Sensorik erkannte Prozessabweichungen durch eindeutige farbliche Hervorhebung dem Werker dargestellt und dieser ist in der Lage, die betreffenden Stellen genauer zu untersuchen und zu beurteilen. Darüber hinaus wird durch eine direkte Referenz zwischen der Schnittkontur und den zugehörigen Programmzeilen im NC-Code, eine Korrektur und Anpassungen des Schneidprogramms ermöglicht.

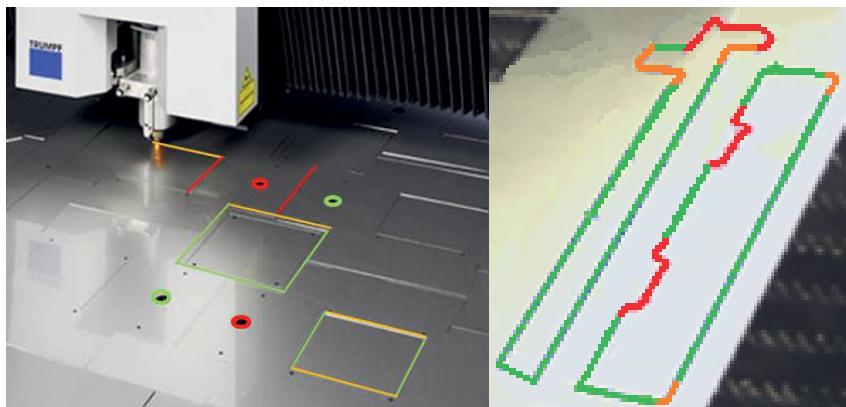


Abbildung 3-6: Visualisierung der Qualität von Laserschnitten
(Quelle: Trumpf; verändert)

3.3.4 Bedienung der Maschine

Das intelligente Maschinenfenster soll zugleich Fenster und Bedienoberfläche sein. Es ermöglicht dem Bediener die Interaktion mit der Maschine und den durch Mehrwertdienste zusätzlich eingebrachten Inhalten. HMI, Simulationssysteme und der Prozess werden enger verzahnt und durch Zusammenführung der Systeme zusätzlicher Mehrwert, der bisher nicht ausgeschöpft wird, generiert. Dadurch werden vorhandene Potentiale besser ausgeschöpft. Um eine Interaktion direkt am Maschinenfenster zu ermöglichen, soll das Fenster mit einer Touch-Bedienoberfläche ausgestattet werden. Durch Gesten, wie sie Anwendern durch die Nutzung von Smart Devices bekannt sind, erfolgt eine intuitive Bedienung. Beispielsweise kann die Ansicht des Echtzeit-Computermodells des Innenraums durch Zoomen und Drehen so angepasst werden, dass eine genauere Betrachtung des Prozesses möglich wird.

Da die Bedienung am vertikal stehenden Maschinenfenster bei längeren Eingaben nicht ergonomisch ist, sollen zusätzlich Smart Devices als sogenannte Second Screens dienen. Der Begriff Second Screen beschreibt ursprünglich die Nutzung eines zweiten Bildschirms parallel zum laufenden Fernsehprogramm. Über diesen zweiten Bildschirm, üblicherweise ein Smartphone oder Tablet, suchen Fernsehzuschauer zusätzliche Informationen oder Interagieren mit anderen Zuschauern [7]. Der Second Screen erweitert damit das Fernsehgerät, jedoch nicht im Sinne einer größeren Anzeigefläche, sondern als Ein- und Ausgabegerät für zusätzlichen Informationen und Interaktionsmöglichkeiten. Dieses Konzept wird im Rahmen des Forschungsprojekts *iWindow* auf das intelligente Maschinenfenster übertragen. Durch die Kopplung eines Tablets mit dem Maschinenfenster wird dieses als zusätzliche Anzeige und als Eingabegerät nutzbar gemacht. Beispielsweise kann der Second Screen genutzt werden, um den Innenraum, neben der vom eigenen Standort abhängigen Perspektive durch das Maschinenfenster, aus einer anderen, beliebig wählbaren Perspektive zu betrachten. Diese Perspektive könnte beispielsweise eine Detailansicht des Werkzeugeingriffs sein. Eine andere Nutzungsmöglichkeit des Second Screens ergibt sich aus dem Mehrwertdienst zur Visualisierung von Werkstückkonturen. Hier könnte das Maschinenfenster während der Kopplung mit einem Second Screen die perspektivische Sicht auf das Restblech und die platzierten Werkstückkonturen bieten. Ein Tablet visualisiert parallel dazu eine Draufsicht von oben und ermöglicht das ergonomische Platzieren der Konturen. Um Form, Position und Ausrichtung der Werkstückkonturen miteinander auszutauschen, werden Maschinenfenster und Tablet synchronisiert.

3.4 Visualisierungsschnittstelle

Wie bereits erwähnt, dient die Visualisierungsschnittstelle dazu, die in den drei Informationsebenen erzeugten Daten zusammen zu führen, zu überlagern und anschließend als Bilddaten auf einem Display auszugeben. Um die Handhabung und das Rendering von grafischen Objekten im intelligenten Maschinenfenster zentral zusammen zu führen und zu vereinfachen, werden diese Aufgaben von der ebenfalls bereits erwähnten Gameengine übernommen. Die Gameengine stellt die zentrale Komponente für alle grafischen Funktionalitäten dar. Entwicklern von Mehrwertdiensten für das intelligente Maschinenfenster wird eine entsprechende Schnittstelle zur Verfügung gestellt, über die es möglich ist, virtuelle Objekte im Maschineninnenraum zu erstellen und zu modifizieren. Das Rendering dieser Objekte, inklusive korrekter Verdeckungsberechnung, perspektivischer Darstellung und Überlagerung mit dem Maschineninnenraum, wird anschließend automatisch und zentralisiert in der Gameengine durchgeführt.

3.5 Zusammenfassung und Ausblick

Aktuell werden Werkzeugmaschinen fast durchgängig mit einem oder mehreren Sichtfenstern zur Beobachtung und Überwachung des Bearbeitungsprozesses ausgestattet. Diese Fenster stellen eine trennende Einrichtung zwischen Bediener und Maschineninnenraum dar und verhindern den Zugriff von außen auf Gefahrstellen. Um den sicherheitstechnischen Anforderungen zu genügen, sind Sichtfenster in Laserschneidemaschinen und in der spanenden Verarbeitung mit sehr hohen Kosten verbunden. Um trotz beispielsweise schmutzintensiver Bearbeitungsprozesse eine Beobachtung des Maschineninnenraums zu erlauben, sollen die sehr teuren Sichtfenster durch intelligente Maschinenfenster ersetzt werden. Gleichzeitig soll das Sichtfenster aufgewertet werden, indem HMI-, Simulationssysteme und der Prozess enger verzahnt und Konzepte zur intuitiven Benutzerführung eingebracht werden.

Das vorgestellte Konzept eines intelligenten Maschinenfensters in Werkzeugmaschinen erweitert den Maschineninnenraum um computergenerierte kontextbezogene Informationen, erzeugt durch sogenannte Mehrwertdienste. Durch Verwendung von Mixed und Augmented Reality (gemischte und erweiterte Realität) werden computergenerierte Inhalte mit dreidimensionalem Bezug in der realen Umgebung überlagert dargestellt. Darüber hinaus ist das intelligente Maschinenfenster zugleich Fenster und Bedienoberfläche, um dem Bediener die Interaktion mit der Maschine und den zusätzlich eingebrachten Inhalten zu ermöglichen.

Die Funktionalitäten des intelligenten Maschinenfensters werden in drei Informationsebenen - Maschineninnenraum, Mehrwertdienste und Bedienung – gegliedert und über eine herstellerunabhängige Schnittstelle an die Maschinensteuerung gekoppelt. Der Maschineninnenraum ist entweder durch ein transparentes Display direkt sichtbar oder wird mittels Kamerabild oder durch realitätsnahe Visualisierung auf einem konventionellen Display dargestellt. Die in den drei Informationsebenen erzeugten Daten werden in einer Visualisierungsschnittstelle zusammengeführt und überlagert. Einige mögliche Mehrwertdienste zur Unterstützung des Maschinenbedieners an Laserschneidemaschinen und in der spanenden Verarbeitung wurden vorgestellt. Um eine Interaktion direkt am Maschinenfenster zu ermöglichen, wird das Fenster mit einer Touch-Bedienoberfläche ausgestattet. Da die Bedienung am vertikal stehenden Maschinenfenster bei längeren Eingaben nicht ergonomisch ist, dienen zusätzlich Smart Devices als sogenannte Second Screens.

Die vorgestellten Komponenten des intelligenten Maschinenfensters wurden bereits in einzelnen Prototypen und Beispieldurchführungen getestet. Im weiteren Projektverlauf wer-

den die Komponenten nun zum intelligenten Maschinenfenster zusammengefügt und anhand der aufgezeigten Mehrwertdienste evaluiert.

3.6 Danksagung

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) für die Förderung und dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) für die Betreuung der in dieser Veröffentlichung beschriebenen Ergebnisse im Rahmen des Forschungsprojekts *iWindow: Intelligentes Maschinenfenster* unter dem Förderkennzeichen 01IM14003C. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

3.7 Literaturverzeichnis

- [1] DGUV Fachbereich Holz und Metall (Hrsg.): Schutzscheiben an Werkzeugmaschinen der Metallbearbeitung. 2012 (40)
- [2] Azuma, Ronald T.: A Survey of Augmented Reality. In: Presence: Teleoperators and Virtual Environments (1997)
- [3] Garstka, Jens ; Peters, Gabriele: View-dependent 3D Projection using Depth-Image-based Head Tracking. In: IEEE International Workshop on Projector-Camera Systems (2011)
- [4] Keinert, Matthias ; Lechner, Armin: OPC UA Informationsmodell für CNC-Datenschnittstellen : Standardisierte Schnittstelle für CNC-Werkzeugmaschinen. In: Automation 2015, Benefits of Change - the Future of Automation. VDI-Berichte 2258 : VDI Verlag, 2015
- [5] TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH + Co. KG (Hrsg.): TruLaser : Wirtschaftlich schneiden durch dick und dünn. 2016
- [6] Surmann, Tobias ; Enk, Dirk: Auswirkung der Prozessdynamik auf die Oberflächenqualität beim Fräsen mit zylindrischen Werkzeugen. In: Begleitband zum Fachgespräch Innovative Prozesse im Werkzeug- und Formenbau (2007), S. 225–237
- [7] Frank Puscher: Mit dem Zweiten sieht man besser : Second Screen: Apps verknüpfen Tablets und Smartphones mit dem Fernsehen. In: c't (2012), Nr. 26, S. 74–76

4 Neuartige IT-Sicherheitswerkzeuge für Industrie 4.0

C. Horn, J. Krüger

4.1 Einleitung

Informations- und Kommunikationstechnologien, sog. IT-Infrastrukturen, wie sie in heutigen Industrieanlagen, Logistik-, Transport- und Versorgungsinfrastrukturen vorhanden sind, haben bereits einen hohen Grad an Komplexität und Automatisierung erreicht. Diese IT-Infrastrukturen bilden für ihre physischen primären Infrastrukturen eine Infrastruktur zweiten Grades, deren Bedeutung im Zuge eines weiter ansteigenden Automatisierung- und Vernetzungsgrades der primären Prozesse wächst. Zunehmender ökonomischer Druck lässt die Anforderungen an die Systeme steigen. Der technische Wandel durch den Einsatz von IT verspricht Optimierungspotential, Handlungen und Prozesse effizienter zu gestalten.

Zusätzlich kombinieren derzeitig vorangetriebene Forschungs- und Entwicklungsprojekte zum Thema Industrie 4.0 (I4.0) moderne Technologien für die Vernetzung von Produktionsmitteln wie Maschinen, Robotern, Zellensteuerungen und übergeordnete Leitsysteme (MES, ERP) zu Cyber-Physischen Produktionssystemen (CPPS). Die Informationstechnologie in industriellen Prozessen wird aus diesen Gründen in der näheren Zukunft einem starken Wandel unterworfen sein. Die Absicherung vorhandener und zukünftiger kritischer Prozessinfrastrukturen und dieser neuartigen industriellen Infrastrukturen stellt eine zentrale Säule für die Versorgungssicherheit der Gesellschaft, sowie einer nachhaltigen und robusten Wertschöpfungskette dar. Dies gilt in besonderem Maße für kritische Systeme der Automatisierungs-technik. Ein Ausfall kann hierbei schwerwiegende Kaskadeneffekte nach sich ziehen. Ein zentrales volkswirtschaftliches Interesse besteht daher in der Absicherung dieser Anlagen und Systeme, was sich maßgeblich in einem hohen politischen sowie wissenschaftlichen Interesse an zuverlässigen Schutzmaßnahmen widerspiegelt.

Die weiter vorangetriebene Automatisierung und Vernetzung erhöht die Angriffsfläche auf diese primären physischen Infrastrukturen über die IT-Systeme. Technische Systeme sind bis hin zu den einzelnen Sensoren und Akteuren, die den physischen Prozess messen und aufgrund dieser Messwerte beeinflussen, flexibel und konfigurierbar gestaltet. Von der Hardwareplattform bis hin zur darauf laufenden Software, der Firmware, soll alles auf Funktionalität, Intuitivität und einfache Konnektivität ausgelegt werden. Der Wunsch nach Effizienz und Verfügbarkeit sorgt an dieser Stelle allerdings auch für neue Angriffspunkte zur Manipulation. Insbesondere bei den Steuerungssystemen kann eine Schadsoftware langfristige und schwerwiegende Effekte nach sich ziehen.

Bei einem Schadprogramm in diesen Umgebungen handelt es sich in der Regel um hochspezialisierte Software, die üblicherweise mit den herkömmlichen Methoden erst verspätet entdeckt bzw. nachgewiesen werden kann. Die üblichen Methoden des Schutzes von IT-Systemen durch Erkennen von Signaturen bekannter Schadsoftware stoßen deshalb kontinuierlich an ihre Grenzen. Es bedarf also anderer Ansätze der frühzeitigen Erkennung, Lokalisierung und Klassifikation insbesondere auch von bislang nicht bekannten Angriffen, um angemessen reagieren zu können und größere Schäden abzuwenden.

4.2 Stand der Technik und Ergebnisse bisheriger Veröffentlichungen

Der Schutz dieser stark vernetzten IT-Infrastrukturen, in der produktionsnahen Wertschöpfung und in anderen kritischen Bereichen wie urbaner Wasser- oder Stromversorgung, stellt eine zentrale Herausforderung für den Wandel zu neuen Strukturen der Automatisierungstechnik dar. Seit der Entdeckung des Computerwurms STUXNET [1] und die später folgenden sogenannten "Advanced Persistent Threats" (engl. Fortschrittliche und Hartnäckige Bedrohungen), wie beispielsweise FLAME [2] und DUQU [3], sind Sicherheitslücken in industriellen Steuerungen bekannt. Zuvor wurde stets nach dem Prinzip der Sicherheit durch Ausschluss die Illusion einer sicheren Umgebung verbreitet. Die Analyse der entdeckten Schadsoftware machte schnell klar, dass diese Lücken nicht nur existieren, sondern dass die Schadsoftware selbst einen hohen Reifegrad besitzt und somit wahrscheinlich von Spezialisten entwickelt wurde.

Die zunehmende Vernetzung unterschiedlicher IT-Infrastrukturen führt zu weiteren Schwachstellen, wie der Angriff auf ein deutsches Stahlwerk im Jahr 2014 zeigte [4]. Die Angreifer nutzten Spear-Phishing Methoden, um sich Zugang zum Büronetz der Firma zu verschaffen. Von dort machten sich die Angreifer die vernetzte IT-Infrastruktur zunutze und erlangten Zugriff zum Produktionsnetz. Die Angreifer führten den Ausfall mehrerer Steuerungskomponenten herbei, wodurch die Produktionsanlage beschädigt wurde. Ebenfalls im Jahr 2014 wurde der Remote Access Trojaner (RAT) HAVEX [5] entdeckt, der gezielt Industrieanlagen und kritische Infrastrukturen ausspioniert.

Der Trojaner wird der Dragony Gruppe zugeordnet. Dieser Gruppe wird nachgesagt, gezielt den Energiesektor in Europa und den USA auszuspionieren [6]. Durch diese neuartigen Bedrohungen werden stärkere Sicherungsmaßnahmen in den automatisierungstechnischen Systemen notwendig, insbesondere in kritischen Bereichen. Allerdings sind die Betreiber bei der Absicherung der Systeme weitgehend auf sich selbst gestellt. Umfangreiche Studien, wie von der Europäischen Behörde für Netzwerk- und Informationssicherheit [7], oder die Richtlinien des US National Institute of Standards and Technology (NIST) [8], wurden zur Unterstützung der Betreiber veröffentlicht. Allerdings zielen diese üblicherweise auf organisationale Verbesserungen oder technologischer Integration von bestehenden Technologien wie demilitariserten Zonen (DMZ), Firewalls, Updatestrategien, Nutzung von Anti-Virus-Systemen oder Sensibilisierung von Mitarbeitern oder Führungskräften.

Heutzutage stehen die Betreiber komplexer industrieller IT-Infrastrukturen völlig neuartigen Bedrohungen gegenüber. Beispiele für neuartige Attacken sind zum einen das Return-Oriented-Programming (ROP) [9], bei dem nicht einmal mehr der bösartige Code auf die Zielschnecke gebracht werden muss. Stattdessen wird die auf dem Zielsystem laufende Software in ihrer Abarbeitungsreihenfolge so verändert, dass ein gewünschtes Verhalten entsteht. Zum anderen existieren Seitenkanalattacken, bei denen Daten unbemerkt aus einem System über Kanäle extrahiert werden können, die einen zuvor unbekannten Zusammenhang ausnutzen. Des Weiteren existieren in heutigen Systemplattformen (d.h. Mainboards) versteckte Zweitplattformen mit eigenem Prozessor, die vollständigen Zugriff auf den Hauptspeicher eines Systems haben und auf denen dauerhafte Schadcode gespeichert und ausgeführt werden könnte [10]. Diese neuartigen Bedrohungen können nicht mit konventionellen Methoden aufgespürt werden.

Der Aufwand für einen Angreifer hingegen, um einen komplexen Angriff durchzuführen, wird zunehmend geringer. Heutzutage existieren bereits frei verfügbare Softwarebibliotheken wie das Metasploit-Framework [11], mit denen ohne umfangreiche System- und Programmierkenntnisse eine hohe Anzahl von Schwachstellen für verschiedene Systeme ausgenutzt werden kann. Dies ist auf der einen Seite von enormer Relevanz für Betreiber und Entwickler

zum Test ihrer Systeme (penetration testing), stellt aber auf der anderen Seite auch eine ungewollte Hilfe für bösartige Angreifer dar. Auch das Auffinden und die Informationsbeschaffung über das Ziel sind mit Werkzeugen wie der Shodan Suchmaschine [12] weitaus einfacher geworden als noch vor einigen Jahren. Das Open Source Tool PLCinject [13] ermöglicht es, manipulierten Quellcode direkt auf eine SPS zu laden. PLCinject basiert auf Snap7 [14], einer Softwarebibliothek, welche die Interaktion mit Siemens S7 Steuerungen ermöglicht. Die Kombination dieser Werkzeuge kann zu komplexen und schwer erkennbaren Angriffen führen. Im Zuge der Black Hat USA 2015 wurde gezeigt, wie man mit diesen Tools ans Internet angeschlossene Steuerungen finden, deren Programmcode herunterladen und manipulierten Quellcode wieder aufspielen kann [15].

Gemeinsam ist den Schadprogrammen, dass diese hochspezialisiert sind und erst deshalb ver-spät entdeckt bzw. nachgewiesen werden. Die üblichen Methoden des Schutzes von IT-Systemen durch ein sog. Black-Listing, also dem Erkennen von Signaturen bekannter Schadsoftware, stoßen hier an ihre Grenzen. Gleichzeitig wächst mit der Erweiterung bestehender Netzstrukturen bzw. der intensiver werdenden Nutzung netzabhängiger Technologien in unterschiedlichen Lebensbereichen die Anfälligkeit von Systemen, so dass sich Angriffsmöglichkeiten und -flächen durch eine wachsende Zahl verbundener Endgeräte stetig vergrößern und Angriffe aus großer Entfernung erfolgen können. Stichworte sind hier das Internet of Things oder die New Generation Networks, die Einführung von Smart Grids, Cloud Computing sowie die vermehrte Verwendung drahtloser Sensorknoten auf der Feldebene, die die Angriffsfläche noch zusätzlich erhöhen. Die Sicherstellung der informationstechnischen Sicherheit (Security) stellt damit eine wesentliche Voraussetzung für die Gewährleistung der funktionellen Sicherheit (Safety) dar.

Neuere Verfahren, die bereits Anomalie Detektion einsetzen, funktionieren allerdings nur begrenzt im speziellen Anwendungskontext und stark abhängig von die Trainingsdaten. Anomalie Detektion ist ein Oberbegriff für Verfahren und Methoden zur Erkennung von Abweichungen gegenüber dem Regelbetrieb. IT-Sicherheits-Werkzeuge nutzen diese Verfahren, um bspw. Unregelmäßigkeiten in Netzwerkverkehr zu erkennen, um so Angriffe zu erkennen. Einen umfassenden Überblick über die Anomaliedetektionsmethoden und Algorithmen geben [16] und [17]. In [18] wird ein Intrusion Detection System vorgestellt, das Netzwerk- und Hostbasierte Intrusion Detection Systeme zusammenführt und kausale Zusammenhänge betrachtet. In [19] wird eine Architektur zur robusten Datenverkehrs Analyse und Anomalie Detektion in Netzwerken vorgestellt. Das Spear-Framework [20] ermöglicht ein Netzwerk kritischer Infrastrukturen zu modellieren und generiert Anomalie Detektionsregeln für Snort [21]. In [22] werden Variabel-spezifische Prediktionsmodelle verwendet, um zukünftiges Verhalten vorherzusagen. In [23] wird eine generische Herangehensweise vorgestellt, um Entitäten kritischer Infrastrukturen zu modellieren und zu simulieren. Dieser Ansatz kann wiederum verwendet werden, um Wechselwirkungen zu analysieren und so die Gefährdungssituation von Betreibern kritischer Infrastrukturen zu beurteilen. [24] präsentiert eine Hardware in the Loop Architektur auch für das Training von Bedienern anhand einer Simulation einer Fabrikanlage.

Deutlich wird, dass zahlreiche Einzelansätze existieren, die jedoch nur selten den Verlauf eines Angriffs auf eine Infrastruktur in ihrer Gesamtheit berücksichtigen. Sind insbesondere die Grenzen zwischen der Supervision-, Kontroll- und Feldebene, wie sie idealtypisch in der Automatisierungspyramide in Abbildung 4-1 differenziert wird, nur schwer zu überwachen. So fokussieren auch die meisten Überwachungssysteme sich nur auf eine spezielle Ebene oder Schicht der komplexen Infrastrukturen. Wechselwirkungen und Kausalitäten innerhalb der Infrastrukturen, die den physikalischen Prozess betreffen, bleiben in der Regel unberücksichtigt, was Angreifern immer wieder Möglichkeiten der Ausnutzung von Lücken gibt.

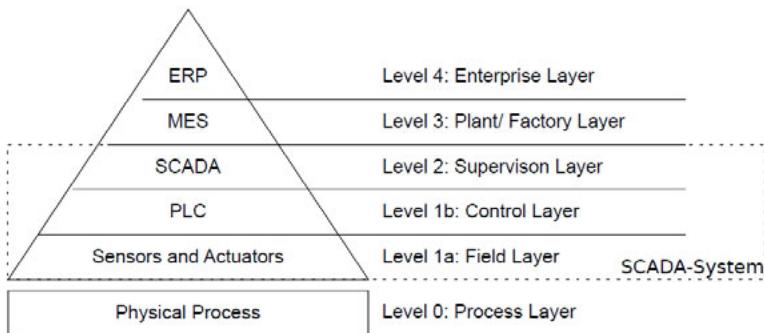


Abbildung 4-1: Automatisierungspyramide

Denn bekanntlich agieren diese nicht nur auf einer Ebene oder Schicht eines Systems, sondern auf sämtlichen von der Hardware bis zum Nutzer, der beispielsweise durch social engineering ausgenutzt werden könnte.

4.3 Wissenschaftliche Fragestellung und neue Lösungsansätze

Wie die vorangegangenen Ausführungen zeigen, existieren bis dato keine robusten Werkzeuge zur Detektion oder Abwehr fortschrittlichen Schadcodes. Im Moment arbeiten zwar einige Forscher an diesen Themen, allerdings sind die Anwendungsgebiete sehr speziell und die Lösungen starken Randbedingungen unterworfen. Um Angriffe in bestehenden Systemen und Infrastrukturen zu erkennen, werden üblicherweise Detektionsmechanismen eingesetzt, die Signatur- oder Integrationschecks regelmäßig wiederholen müssen. Problematisch dabei ist, dass auf jede neue Bedrohung nur mit starker Verzögerung reagiert werden kann, wie die in letzten Jahren nachgewiesenen Schadprogramme demonstrieren. Es muss von einer Bedrohung zunächst eine Signatur generiert werden sowie der Kompromiss zwischen Messungshäufigkeit und den daraus resultierenden Leistungseinbußen stets berücksichtigt werden, was erhebliche Einbußen für die Resilienz der Systeme bedeutet. Lösungsansätze mit zusätzlicher Hardware können zwar Leistungsverluste abfedern, dennoch basieren die meisten Vorschläge nach wie vor auf Scans bekannter Signaturen. Eine weitere erhebliche Schwäche dieser Methoden besteht darin, dass sie gerade auf Systeme nicht oder nur eingeschränkt anwendbar sind, die nur über sehr begrenzte Ressourcen wie Rechenkapazität und Batterielebensdauer verfügen. Dazu zählen insbesondere Sensorknoten, aber auch bei Speicherprogrammierbaren Steuerungen kann der zusätzliche Bedarf an Rechenleistung oder Speicherkapazität durch diese Verfahren oft nicht bereitgestellt werden.

Eine umfassende Absicherung einer gesamten Infrastruktur fehlt bislang. Die bestehenden Lösungen betrachten in der Regel nur einzelne Bestandteile, entkoppeln also beispielsweise Plattform und Kommunikationskanal. Beispielsweise können klassische Ansätze wie Host/Netzwerkverkehr-Analyse (z.B. Intrusion Detection System, IDS), OS-Fingerprinting sowie die Nutzung von Firewalls und Demilitarisierten Zonen (DMZ) in komplexen Infrastrukturen mit unterschiedlichen Systemebenen und -grenzen nur Teile einer Gesamtlösung darstellen.

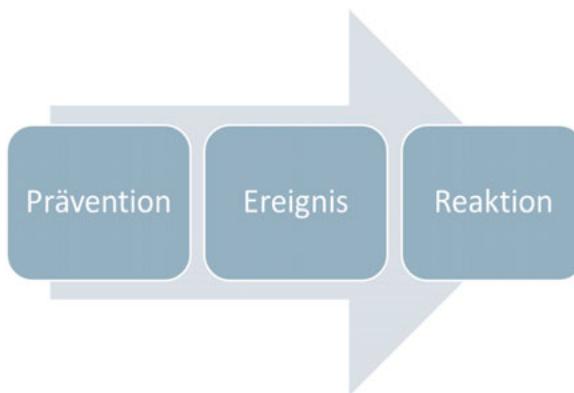


Abbildung 4-2: Phasen der Prävention und Reaktion

Zunächst sollen an dieser Stelle die vorhandenen Sicherheitsmethoden und Werkzeuge in zwei unterschiedliche Kategorien eingeteilt werden: Prävention und Reaktion. In Abbildung 4-2 ist diese Kategorisierung ersichtlich. Prävention meint hier die Option, ein System vor einem Angriff durch Maßnahmen im Vorfeld zu schützen. Alle Maßnahmen, die nach einem Angriff in Kraft treten, bezeichnet man hingegen als Reaktion, wobei es Vor- und Nachteile auf beiden Seiten gibt. Präventive Ansätze ermöglichen in der Regel nur eine Verlangsamung eines Angriffs, reaktive hingegen sehen sich dem Problem einer dynamischen Kritikalität von Komponenten durch Kaskaden ausgesetzt, die insbesondere durch den Faktor Zeit bestimmt sind. Die Differenz aus dem zeitlichen Puffer und der Reaktion markiert die eigentliche Eskalationszeit, die sukzessive zu einer Verstärkung einer Krise führt. Berücksichtigt werden müssen deshalb die Systeme in ihrem Gesamtaufbau sowie auch die Kontexte der Angriffe, um zu angemessenen Lösungen zu gelangen. Dies wurde bislang stark vernachlässigt wie sich am Forschungsstand dann auch zeigt.

4.3.1 Prävention

Die Prävention ist der Versuch der bestmöglichen Absicherung eines Systems gegen Angriffe. Präventive Maßnahmen können üblicherweise einen Angriff bestenfalls erschweren. Der Vorteil liegt auf Seiten des Angreifers, da dieser nur an bestimmten neuralgischen Punkten ansetzen muss, um eine Schwachstelle aufzuspüren. Des Weiteren kann der Angreifer leicht zwischen der technologischen, menschlichen und organisationalen Ebene einer komplexen Infrastruktur wechseln und auch verschiedene Rollen einnehmen. Der Verteidiger einer komplexen IT-Infrastruktur ist jedoch gezwungen jeweils auf den einzelnen Ebenen unterschiedliche Maßnahmen zu ergreifen und in seiner Rolle zu verharren. Im Folgenden sollen Beispiele für Maßnahmen in der Kategorie Prävention genannt werden. Grundlegend für die Prävention ist die Aufstellung eines Sicherheitskonzeptes, beispielsweise zur Authentisierung, Autorisierung oder Zugriffskontrolle. Dabei handelt es sich um eine Menge von technischen und organisatorischen Regeln, Verhaltensrichtlinien, Verantwortlichkeiten, Rollen und Maßnahmen um definierte Schutzziele zu erreichen. Ein weiteres Beispiel ist der Einsatz von technologischen Filtern, wie Paketfilter oder Contentfilter. Dabei werden nur bestimmte Teile der Kommunikation zugelassen. Sehr verbreitet ist auch der Einsatz von Kryptologie (Verschlüsselung), um den Transport oder die Speicherung von Nachrichten und Daten gegen Abhören, Manipulation und Fälschung abzusichern. Die präventiv durchgeführte Schwachstellenanalyse, wie das Penetration Testing und der Einsatz von Vulnerability Scannern, soll in Verbindung mit der Beseitigung der gefundenen Schwachstellen ebenfalls das System oder die Infrastruktur vor-

bereitend absichern. Das letzte hier genannte Beispiel im Bereich Prävention ist die Ablenkung, beispielsweise durch Honeypots oder -nets. Dadurch wird dem Angreifer ein produktives und lohnenswertes Ziel vorgegaukelt, um den Angriff dahin abzulenken, verlangsamen und analysieren zu können.

4.3.2 Ereignis



Abbildung 4-3: Phasen des Angriffs

Das Ereignis oder der Angriff selbst hat dabei üblicherweise den in Abbildung 4-3 dargestellten Ablauf. Zunächst muss der Angreifer sein Ziel identifizieren, was sowohl der Betreiber einer kritischen Infrastruktur, ein Unternehmen oder eine Behörde sein kann. Danach folgt die Beschaffung von Informationen über das Ziel, also welche Systeme sind wo im Einsatz und über welche Kommunikationsschnittstellen sind diese angebunden. Die Identifikation eines bestimmten Servers mit seiner IP-Adresse, laufendem Betriebssystem und Diensten und daraus resultierenden etwaigen Schwachstellen könnte das Ergebnis einer solchen Phase der Informationsbeschaffung darstellen. Im nächsten Schritt müssen Methoden und Werkzeuge genutzt oder selbst erstellt werden, um die identifizierte Schwachstelle auszunutzen und in das System einzudringen. In vielen Fällen kamen bisher dabei der klassische Stapelüberlauf oder ähnliche Speicherbereichskonflikte zum Einsatz, um eigenen Schadcode ausführen zu können. Wenn der Angreifer nun Zugriff auf das System hat, gilt es diesen persistent zu gestalten und sich im System zu verstecken, ohne dass etwaige Monitoring-Systeme diesen neu erstellten Zugang entdecken. über diesen Zugang wird dann im Folgenden der Angriff selbst ausgeführt und beispielsweise vertrauliche Informationen extrahiert oder das System in seiner Arbeitsweise verändert. Nach dem Angriff will der Angreifer üblicherweise noch seine Spuren beseitigen, so dass entweder der Angriff selbst unbemerkt bleibt, oder auch der Angreifer nicht identifiziert werden kann.

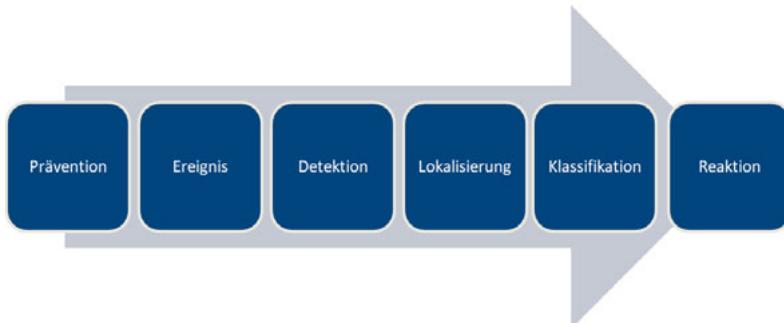


Abbildung 4-4: Erweiterung um Phasen vor der Reaktion

4.3.3 Reaktion

Nach einem Ereignis sollte eine Reaktion stattfinden. Dazu muss das Ereignis oder der Angriff zunächst einmal detektiert werden. Nach der Detektion können geeignete Maßnahmen zur Schadensbegrenzung und Verteidigung unternommen werden. Um dies bestmöglich durchzuführen zu können, schließen sich der Detektion noch die Lokalisierung und Klassifikation an. In Abbildung 4-4 ist die Erweiterung der Phasen aus Abbildung 4-2 ersichtlich. Bei der Lokalisierung wird der genaue Ort oder das betroffene System identifiziert. Die Klassifikation erkennt die Art des Angriffes. Auf das Ereignis wird aufgrund dieses Ablaufes mit einer bestimmten Verzögerung reagiert, abhängig vom genutzten Detektionsverfahren. Hierbei existieren die Unterkategorien Überwachung (Monitoring), beispielsweise durch Virenscanner oder Intrusion Detection Systeme, und Analyse durch Honeynets/-nets.

4.3.4 Neuartige Verfahren zur kausalitätsbasierten Detektion

Um eine IT Infrastruktur jedoch gegen Angriffe effektiv zu schützen, müssen Betreiber präventive Maßnahmen auf sämtlichen Systemebenen einsetzen. Ein Angriff muss (a) erkannt werden, um daraufhin eine Schadensminderung und eine forensische Analyse zu betreiben. Um dies erfolgreich durchzuführen muss der Angriff wiederum (b) lokalisiert und (c) klassifiziert werden. Andernfalls sehen sich die Akteure mit dem Problem einer mangelnden Attribuierung einer Störung konfrontiert, die das Risiko einer Eskalation aufgrund von Kaskaden erheblich erhöht. Es ist schlicht nicht zu unterscheiden, ob es sich um einen technischen oder menschlichen Fehler oder um einen Angriff handelt. Die Herausforderung besteht also darin, Lösungen im Rahmen eines Angriffsverlaufs zu erarbeiten und in einem in sich kohärenten Konzept zu integrieren. Als grundlegende Hypothese wird hierbei davon ausgegangen, dass ein Angreifer alle präventiven Maßnahmen überwinden und sich Zugriff verschaffen kann. Die erfolgreiche Detektion auch zum Integrationszeitpunkt des Systems unbekannter Ereignisse steht also grundlegend im Fokus.

Die Grundlage herkömmlicher Verfahren sind oftmals Annahmen über den Regelbetrieb und eine Lernphase, bei der der Anwender das System trainieren muss. Dabei werden üblicherweise die technologischen Merkmale der IT, also der Kommunikationsparameter und Parameter der IT-Komponenten wie Betriebssystem also des sekundären IT-Infrastruktursystems betrachtet. Der durch die IT gesteuerte Prozess des primären Produktivsystems, also der jeweiligen Infrastruktur und ihrer spezifischen Merkmale, werden hingegen nicht einbezogen. Um das Ziel zu erreichen, Störungen und Angriffe über sämtliche Ebenen der Automatisierung im Bereich von Infrastrukturen hinweg zu erkennen, müssen diese aber einbezogen werden. Dabei sollten aber nicht – wie üblich – nur bekannte Abweichungen ermittelt werden, sondern insbesondere auch die Detektion unbekannter Abweichungen ermöglicht werden.

Hierzu ist zunächst ein Blickwechsel notwendig. Voraussetzung für eine effektive Anomaliedetektion im Bereich von Infrastruktursystem besteht darin, sich nicht ausschließlich auf Merkmale der IT zu stützen, sondern vielmehr auf die Merkmale der primären Infrastrukturprozesse. Aus den realen Abläufen heraus gilt es Verfahren zur automatischen Detektion von Abweichungen zum Regelbetrieb zu entwickeln. Dabei werden die physikalischen Grundlagen und Abläufe des Prozesses als Vorwissen in das Verfahren eingebracht, um anhand dieser Prozessdaten Angriffe zu erkennen.

Eine der Ausgangshypothesen ist an dieser Stelle, dass der Datenfluss im Umfeld automatisierungstechnischer Komponenten im Gegensatz zu einem gewöhnlichen Rechner im Bereich der Office-Welt - in der zu unterschiedlichen Zeiten unterschiedliche Programme unterschiedliche Datenströme erzeugen - einen relativen konstanten Verlauf aufweist. Aus diesem Grund lassen sich Anomalien in den Sensordaten relativ leicht nachvollziehen. Diese Hypothese lässt sich nicht aber bereits mit einem trivialen Beispiel widerlegen: In einer kritischen Wasserversorgungs-Infrastruktur einer Großstadt mit räumlich verteilten Komponenten, fallen bei lok

begrenztem Starkregen Daten an, die zwar eine Anomalie anzeigen, bei der es sich aber eben gerade nicht um eine Manipulation im Sinne eines gezielten Angriffes handelt. Entsprechend müssen also Parameter unterschiedlicher Prozessmerkmale im Zusammenhang analysiert werden, um die sogenannten falsch-positiv detektierten Anomalien auszuschließen. Die Merkmale und Kausalitäten, die die Prozesse bei einem Betreiber einer Infrastruktur beschreiben, konnten zu einem aussagekräftigen Muster zusammengefasst werden, um auf Grundlage dieses "Prozessfingerabdrucks" sämtliche Abweichung detektierten zu können.

Hierzu wurde ein Verfahren zur sog. kausalitätsbasierten Anomalie Detektion entwickelt, das sich an einem einfachen Beispiel erklären lässt. Man stelle sich drei grundlegende Elemente eines Prozesses in einem Wasserwerk vor: Pumpe (Zulauf), Wassertank (Speicher) und Verbraucher (Ablauf). Dabei erschließt sich die Kausalität aus der Tatsache, dass eine Änderung des Füllstandes eines Reinwasserbehälters real nur bei Veränderung von Zulauf und/oder Ablauf erfolgen kann. Diese Daten werden über das Leitsystem von Sensoren erfasst, die digital manipuliert werden können. Die Überwachung der Kausalität in den Sensordaten untereinander kann eine Anomalie aufdecken. Dies wird in unserem neuartigen Verfahren genutzt, um Anomalien erkennen zu können.

Abbildung 4-5 zeigt Daten der Sensoren der zuvor dargestellten Elemente eines Wasserwerkprozesses. Hierbei sind die Daten desselben Tages eines Jahres dargestellt. Auf der rechten Seite wurde ab 12:00 Uhr ein Angriff auf die Infrastruktur gestartet. Die rote Linie in Abbildung 4-5 zeigt dabei das Ergebnis des neuartigen Detektionsalgorithmus an. Ein Sprung auf Werte grösser als null zeigt eine Anomalie an. Der Angriff konnte hierbei klar automatisiert erkannt werden. Dies wird jedoch selbstverständlich einem Operateur in einer bediengerechten Form präsentiert, als über diese Kurvendarstellungen, ist aber Sache des Leitsystemherstellers. Entsprechend des Ansatzes basiert die Erarbeitung eines Verfahrens zur kausalitätsbasierten Anomalie Detektion auf der Erstellung einer Technischen Landkarte und den darin identifizierte exemplarische Prozesse für die jeweilige Infrastruktur entlang der Datenverarbeitung. Dies machte den Mitschnitt relevanter Prozessdaten notwendig. Durch die Möglichkeit der Erkennung von Angriffen, die bisher nicht erkannt werden konnten, wird die Sicherheit der Betreiberorganisation erhöht. Die Betreiber werden in die Lage versetzt, auf Angriffe und sonstige Sicherheitsvorfälle in geeigneter Weise zu reagieren, da diese nun besser erkannt werden können.

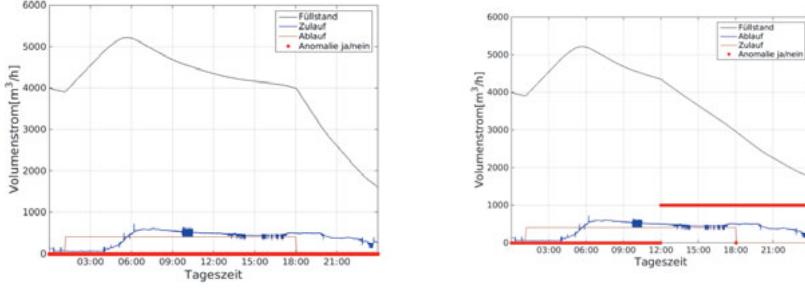


Abbildung 4-5: Daten eines Tages ohne (links) und mit (rechts) Angriff auf IT Komponenten

4.3.4.1 Methodik

Die Erarbeitung eines Verfahrens zur kausalitätsbasierten Anomalie Detektion basiert auf der Erstellung einer Technischen Landkarte, sowie darin identifizierte exemplarische Prozesse für die jeweilige Infrastruktur. Das bedeutet die Erhebung der eingesetzten Hard- und Softwaresysteme der jeweiligen IT-Infrastruktur, die Auswahl eines Teilespektes der Infrastruktur, die

Bestimmung relevanter Prozessparameter und einer Datenerhebung innerhalb der jeweiligen Infrastruktur. Abschließend erfolgte die Robustifizierung und Integration einen Demonstrator als Funktionsbeweis.

4.3.4.2 Technische Landkarten zur Systemanalyse

Damit realitätsferne oder auch unterkomplexe Szenarios vermieden werden, ist diese Erarbeitung eines grundsätzlichen Systemverständnisses unerlässlich. Systemanalysen basieren auf Daten zu den jeweiligen Systemen, deren Elementen sowie Funktions- und Informationsbeziehungen, die durch eine Reihe von Verfahren von der Erhebung von Prozessdaten über die Analyse von Dokumenten und Konfigurationen bis hin zu Interviews auf unterschiedlichen Organisationsebenen reichen.

Ein besonderes Detail der Systemanalysen stellen Technische Landkarten (TL) dar. Es handelt sich hierbei um die vollständige Beschreibung der technologischen Elemente einer komplexen Informations-, Kommunikations- und Automatisierungsinfrastruktur oder -landschaft entlang einer bestimmten Systematik wie der Automatisierungspyramide. TL bestehen im ersten Schritt aus grafischen Elementen, die im zweiten Schritt aus technischfunktionaler Sicht beschrieben und schließlich im Schritt um weitere Angaben zu den allgemeinen organisationalen Zusammenhängen einer Infrastruktur ergänzt werden.

Technologieaudits, Source-Code-Analysen, Analyse von Anlagen-Dokumentation und technologische Datenmitschnitte bilden die erste Gruppe von genutzten Verfahren und Methoden zu ihrer Erstellung. Zusätzlich sind aber Interviews und Workshops sowie Vor-Ort-Begehung von Bedeutung, um sich einen geeigneten Überblick über den mehrdimensionalen Aufbau der Systeme und ihre technisch organisationale Einbettung ins Gesamtsystem zu verschaffen.

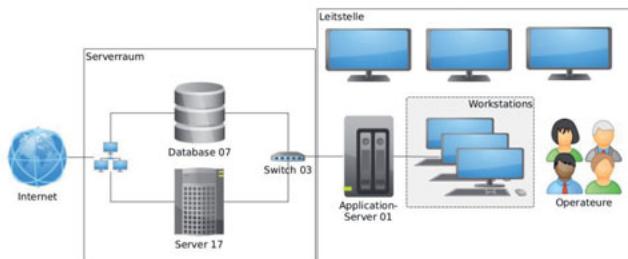


Abbildung 4-6: Beispielhafter Bestandteil einer technischen Landkarte

TL stellen insofern auch nur den jeweiligen Zustand einer komplexen Infrastruktur zu einem bestimmten Zeitpunkt und ggf. nur einen Auszug des Gesamtsystems wie bspw. das Leitsystem dar, wenngleich sich an den Beschreibungen insbesondere die Historie der Systemkonfiguration ablesen lässt, welche nicht zuletzt über Sicherheitslücken informieren kann. In Abbildung 4-6 ist deshalb beispielhaft die grafische Darstellung einer Leitstelle dargestellt und wie diese in das Gesamtgeflecht der Infrastruktur eingebettet ist. Die detaillierten technischen Beschreibungen beinhalten die Merkmale der eingesetzten Hardware und Software. Die allgemeinen Beschreibungen zeigen auf, wie die Architektur in die technische organisationale Strukturen des Gesamtsystems eingebettet sind. Dargestellt wird, wie beispielsweise die dezentrale Peripherie, also die im Versorgungsgebiet verteilten technischen Komponenten, untereinander und auch mit der jeweiligen Leitwarte in Verbindung stehen. Die technologischen Details der einzelnen Elemente, wie eingesetzte Software- und Hardwarekomponenten, Kommunikationswege und- Protokolle, können so analysiert werden. Insbesondere Dokumentationen und Konfigurationen der eingesetzten Systeme geben dabei wichtige Aufschlüsse

und Einblicke. Bei Technischen Landkarten handelt es sich um Abbilder von Systemkonfigurationen, die sich letztlich auch der Angreifer macht, um zu seinem Ziel zu gelangen. Dabei nutzt er ggf. Programme, die den technischen Raum für ihn wiederum ausspähen. Gerade die in der Landkarte nachvollziehbar werdende Historie der technischen Landschaft gibt Aufschluss nicht nur über die aktuell verbaute Technik, sondern immer auch über die Sicherheitsphilosophie, mit der ein System insgesamt angelegt wurde. Es treten Entscheidungen und Widersprüche zutage, die wiederum zu Veränderungen in den Konfigurationen geführt haben. Der Angreifer liest also – und das ist die eigentliche Botschaft der Technischen Landkarten an dieser Stelle – in der Systemarchitektur wie andere Menschen in Stadtplänen. Es handelt sich bei den skizzierten Landschaften um komplexe Zeichensysteme, die Aufschluss über die Organisation geben. Wenngleich jede Betreiberorganisation einen unterschiedlichen Detailgrad an Dokumentation vorhält, so wurde die Komplexität des jeweiligen Gesamtsystems in jeweils einer technischen Landkarte in zum Teil hoher Auflösung ermittelt. Ausgangspunkt bildeten hierbei zunächst die Netze und Teilnetze der jeweiligen Infrastrukturbetreiber, um diese über die einzelnen Komponenten der Datenverarbeitung ins Verhältnis zu den jeweiligen Repräsentationen im Prozessabbild der Leitsysteme zu setzen. Der Weg der Daten von der Fernwirktechnik bis zur Visualisierung ermöglichte, einerseits unterschiedliche Datenverarbeitungsmodi zu erkennen und auch einzelne kritische Parameter zu differenzieren, die im Hinblick auf ihre sicherheitsrelevante Ausnutzung es aber immer wieder notwendig machte, diese auf ihre technisch-organisationale Einbettung im Gesamtsystem zu reflektieren. Von besonderem Interesse erwies sich in diesem Zusammenhang aber auch, dass die gesamte Primärinfrastruktur in hierarchischen Ebenen in den Leitsystemen unterteilt ist. Die obere Ebene ermöglicht als Kommunikationsebene bzw. Bindeglied zwischen Mensch und Maschinen dem Bedienpersonal den Einblick in die Automatisierungsprozesse der einzelnen Bereiche und damit eine erleichterte und ordnungsgemäße Prozessführung bzw. effektivere Betriebsführung. Gleichzeitig spiegeln sich die Hierarchieebenen im jeweiligen Melde- und Kennzeichnungssystem wider, das aber durchaus im Kontrast mit einzelnen Praktiken der BedienerInnen stehen kann. Die Logik des Primärsystems und des Sekundärsystem sind nicht in allen Bereichen vollständig aufeinander abbildbar, insbesondere weil erstere von Schwankungen im Verbrauch abhängig sind.

4.4 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde gezeigt, dass eine kausalitsbasierte Anomalie-Detektion als Grundlage eines einfachen Klassifikators von Prozessdaten einer komplexen kritischen Infrastruktur besonders gut geeignet ist, um Manipulationen einzelner Prozesswerte erkennen zu können. Dabei kann das Verfahren auf einer höheren Ebene der Automatisierungspyramide zum Einsatz kommen und trotzdem Manipulationen in einer darunter liegenden Ebene erkennen. Dazu werden andere Prozessdaten genutzt, um über zugrunde liegende physikalische Kausalitäten eine Validierung durchführen zu können.

Die technischen Landkarten erfassen den Zustand einer komplexen Infrastruktur zu einem bestimmten Zeitpunkt. Die Erstellung und Analyse dieser technischen Landkarten kann maßgeblich zur Erkennung von Sicherheitslücken, nicht-optimalen Anordnungen und kritischen Punkten innerhalb der Infrastruktur beitragen. Darüber hinaus kann darauf aufbauend ein Sicherheitskonzept erarbeitet, sowie ein Sicherheitsmanagement implementiert werden.

Durch die Möglichkeit der Erkennung von Angriffen, die bisher nicht erkannt werden konnten, wird die Sicherheit der Betreiberorganisation erhöht. Die Betreiber werden in die Lage versetzt, auf Angriffe und sonstige Sicherheitsvorfälle in geeigneter Weise zu reagieren, da diese nun besser erkannt werden können.

Neuartige Verfahren sollten von den Betreibern genau auf den Mehrwert für Ihre Organisation geprüft und gegebenenfalls in die Infrastruktur integriert werden. Aufwände für die Anpassung der Methoden auf die eigenen Gegebenheiten können einen substantiellen Mehrwert für die Erhöhung der Sicherheit beitragen. Prozesse für die Einführung dieser Systeme, sowie Sicherheitsmanagement und Sicherheitskonzepte, sowie Sensibilisierung der Nutzer sind Voraussetzung der erfolgreichen Integration und Nutzung dieser Systeme und Verfahren. Im Idealfall kann die Betreiberorganisation bei der Entwicklung der Verfahren ihr Know-How und Expertenwissen im jeweiligen Anwendungskontext beisteuern, um das Verfahren grundlegend auf die eigenen Bedürfnisse passend zu gestalten. Die Art und Weise der Anwendung der Verfahren in der Praxis ist letztendlich entscheidend für einen möglichen Sicherheitsgewinn.

4.5 Literatur

- [1] Nicolas Falliere, Liam O Murchu, and Eric Chien. Symantec security response, February 2011. Version 1.4.
- [2] Nikos Virvilis and Dimitri Gritzalis. The big four - what we did wrong in advanced persistent threat detection? In Eighth International Conference on Availability, Reliability and Security, pages 248-254. IEEE, Sept 2013.
- [3] Lachlan MacKinnon, Liz Bacon, Diane Gan, Georgios Loukas, David Chadwick, and Dimitrios Frangiskatos. Strategic Intelligence Management, chapter 20 - Cyber Security Countermeasures to Combat Cyber Terrorism, pages 234-261. Butterworth-Heinemann, 1st edition edition, March 2013.
- [4] BSI. Die Lage der IT-Sicherheit in Deutschland, 2014.
- [5] F-Secure. Havex hunts for ics/scada-systems, 2014.
- [6] Symantec. Dragony: Cyberespionage attacks against energy suppliers (Symantec security response), 2014.
- [7] European Network and Information Security Agency. Protecting industrial control systems - recommendations for europe and member states. Technical report, European Network and Information Security Agency (ENISA), 2011.
- [8] Keith Stouter, Joe Falco, and Karen Scarfone. Guide to industrial and control and systems (ics) and security, 2011. Recommendations of the National Institute of Standards and Technology.
- [9] Erik Buchanan, Ryan Roemer, Hovav Shacham, and Stefan Savage. When good instructions go bad: Generalizing return-oriented programming to risc. In Proceedings of the 15th ACM conference on Computer and communications security, pages 27-38, 2008.
- [10] Patrick Stewin and Jean-Pierre Seifert. In god we trust all others we monitor. In: Proceedings of the 17th ACM conference on Computer and communications security, pages 639-641, 2010.
- [11] Rapid7. The metasploit framework 4.10, 2014.
- [12] John Matherly. The shodan computer search engine, 2009.
- [13] www.scadaes.org. The plcinject tool, 2015.
- [14] The snap7 suit 1.4.0, 2015.

5 Ansatz einer Referenzarchitektur zum cloudbasierten Condition Monitoring

M. Obdenbusch, C. Brecher

5.1 Einleitung

Aktuelle Produktionssysteme weisen eine erhebliche Komplexität im Spannungsfeld zwischen Verfügbarkeit, Effizienz, Kosten und Wirtschaftlichkeit auf [KUHN13]. Insbesondere die technische Verfügbarkeit bildet die Voraussetzung einer hohen Wertschöpfung, sodass besonders strenge Anforderungen an diese gestellt werden. Während eine Overall Equipment Effectiveness (OEE) von 98 % und mehr gefordert wird, bewegen sich realistische Werte zwischen 80-90%³.

Besonders hohe wirtschaftliche Risiken und Schäden resultieren aus Maschinenstillständen aufgrund hoher Stückzahlen und eng kalkulierter Gewinnschwellen für die Verpackungsbranche [BREC10a], die mit knapp 12 Milliarden Euro Umsatz (2013) zu den größten Fachzweigen des Maschinenbaus gehört [VDMA14b].

Dabei ist die Ausfallhäufigkeit keine Konstante, sondern eine durch Wartungsstrategien zu minimierende Größe [BREC10a]. Einen wertvollen Ansatz zur Reduktion der Maschinenstillstände stellen das Condition Monitoring und die damit verbundene zustandsorientierte Wartung dar. Hierbei besteht das Ziel, ungeplante wartungs- und reparaturbedingte Stillstandszeiten weitestgehend zu vermeiden. Allerdings treten verschleißbedingte Prozessstörungen wie z. B. mangelhafte Zuführung von Hilfsmitteln oder Fehlpositionierung von mechanischen Komponenten nicht erst bei Komponentenausfall, sondern schon vorher durch die Komplexität des Gesamtsystems (Maschine, Komponenten, Prozess, Produkt) auf.

Aus Sicht der Maschinenhersteller bestehen für die Anwendung des Condition Monitorings aktuell jedoch große Herausforderungen: zum einen müssen Verschleißmodelle mit zeitlicher Prognosefähigkeit aufgebaut werden. Zum anderen gilt es, diese mit Maschinen- und Prozessmodellen zu kombinieren, sodass eine dynamische – auf den aktuellen Verschleißzustand angepasste – Prozessparametrierung möglich wird.

Die Erstellung heutiger Verschleißmodelle erfolgt meist auf Basis von gezielten Belastungstest und Experimenten durch den Hersteller. Eine Abbildung der produktiven Betriebsphase beim Anwender oder gar eine zentrale Aggregation – d. h. Rückführung von Maschinendaten aus der Produktion – findet nicht statt. Dadurch ist zwar für eine Zustandsschätzung die notwendige Basis gelegt, eine Prognose der Restgebrauchs dauer ist aufgrund fehlender zeitlicher Informationen nicht möglich. Die Integration von Maschinen- und Prozessmodellen scheitert ebenfalls vielfach an der fehlenden Vernetzung von Hersteller und Anwender.

Ein großes Potential stellen zur Lösung beider Herausforderungen neue Vernetzungstechnologien – wie z. B. die „Cloud“ bzw. virtuelle Plattformkonzepte als „Enabling Technologies“ – dar. Obwohl sie im Bereich der Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) – z. B. zur Durchführung rechenintensiver, paralleler Berechnungen („Cloud Computing“) – etabliert sind, erhalten sie in die Produktionstechnik erst langsam als eine Facette von Industrie 4.0 bzw. der Cyber-physischen Produktionssysteme Einzug. Dies ist dadurch begründet, dass durch Auflösung strikter Trennungen (z. B. entlang der Wertschöpfungskette zwischen Hersteller/Zulieferer, Anwender und Endkunde) oder bestehenden Systemarchitekturen wie der Automatisierungspyramide einhergehend mit der steigenden Vernetzung von Systemen bis hin zu Subkomponenten die technologische Basis für und der Bedarf an cloudbasierten

³ Diese Werte basieren auf einer seit 2015 durchgeführten Studie in der Verpackungsbranche.

Diensten wächst. Im Rahmen des Technologietransfers sind jedoch viele Fragen bzgl. technischer Möglichkeiten – neue Systemarchitekturen, Transfer von lokalen Steuerungsabläufen, Algorithmen, Modellen oder allgemein synthetisiertem Expertenwissen in die Cloud – semantischer Beschreibung der Daten und Dienste, den Dienstinhalten selbst und nicht zuletzt zugehörigen Geschäftsmodellen („Maintenance-as-a-Service“) neu zu stellen.

Der folgende Beitrag stellt den Ansatz einer Referenzarchitektur zum cloudbasierten Condition Monitoring vor. Es werden Aspekte wie die steuerungs- und informationstechnische Darstellung von Maschinen, die Anbindung an eine neue, an RAMI4.0 [RAMI15] angelehnte IT-Architektur sowie Inhalte der Cloud selbst – in Anlehnung an [VDMA14a] – betrachtet.

5.2 Stand der Technik in Forschung und Industrie

Aktuelle Lösungen zum Condition Monitoring nutzen sowohl steuerungsinterne (Strom, Drehmoment, Geschwindigkeit ...) als auch -externe (Schwingung, Temperatur) Datenquellen zur prozessnahen Messung und Zustandsbestimmung. Dabei werden die Auswertungssysteme vielfach lokal zur Überwachung spezifischer Prozessparameter oder Komponentenzuständen eingesetzt und sind nicht an übergeordnete Systeme angebunden. Aus diesem Grund fallen insbesondere eine zentrale Datenaggregation und -auswertung schwer, sodass dem Produktivbetrieb in der Regel eine aufwendige Parametrierung vorausgeht, die nur teilweise automatisiert werden kann. Auf spezifische kommerzielle Lösungen soll an dieser Stelle nicht weiter eingegangen werden.

Viele Ansätze zur Optimierung des Condition Monitorings sind Stand der Forschung. Eine Überführung in die Praxis konnte in wenigen Fällen erfolgreich realisiert werden. Insgesamt erstrecken sich die Lösungen auf unterschiedliche Branchen. [BREC10b] stellt lokale Überwachungsmethoden für Primärkomponenten von Werkzeugmaschinen wie Spindeln, Vorschubantriebe oder Führungen vor. [BREC09] betrachtet Verpackungsmaschinen und entwickelt prädiktive Überwachungsstrategien auf Basis von Frequenzanalysen (Peak-to-Peak, RMS-FFT), welche anschließend in ein System zum maschinen- und unternehmensübergreifenden Wissensaustausch integriert werden. Obwohl die ersten Ideen einer Plattform berücksichtigt werden, finden viele Aspekte des Modelllernens lokal statt, wodurch sich ein statisches System ergibt. Für eine Berücksichtigung aktueller, in den Umsetzungsrichtlinien Industrie 4.0 genannten Leitprinzipien, wie z. B. lebenszyklus-, maschinen- und unternehmensübergreifender Vernetzung, selbstoptimierender cyber-physischer Systeme (CPS) und IT-Globalisierung [BITK15], müssen jedoch darüber hinausgehende Konzepte entwickelt und validiert werden.

In diesem Kontext beschreibt [ATMO14] die Herausforderung der Datenkonsistenz in Cloud-Plattformen und Berücksichtig beim Ansatz des Cloud Gateways Forschungssaspekte wie Protokolle, Maschinenanbindung oder IT-Sicherheit. Der Transfer des bereits etablierten Ansatzes der Service Oriented Architecture (SOA) in Cloud-basierte CPS wird bei [COLO14] erläutert. Auf Basis dieser Ansätze entstehen erste Konzepte für spezifische Cloud-integrierte Condition Monitoring Aufgaben – teilweise jedoch auch für produktionsferne Applikationen wie z. B. der Überwachung von Windenergieanlagen. [BECH12; LIAN12; EICK15]

Zusammenfassend ist jedoch festzustellen, dass keiner der genannten Ansätze eine durch Unternehmen adaptierbare Referenzarchitektur vorstellt, welcher sowohl das Condition Monitoring, auf Basis dessen eine Zustandsschätzung möglich wird und daraus abgeleitet eine intelligente, dynamische Prozessparametrierung berücksichtigt. Erst durch die Komplettierung dieser Kette werden sich signifikante Vorteile für die Produktionstechnik ergeben.

5.3 Ansatz einer cloudbasierten Plattform

Wie in Kapitel 5.2 dargestellt, besteht im Themenkomplex „Condition Monitoring“ eine große Herausforderung darin, in Ergänzung zu experimentell erzeugten Messdaten, reale Produktionsdaten zu Maschinen- und Komponentenhersteller – z. B. zur Modellverbesserung bzw. zum Aufbau von prädiktiven Verschleißmodellen oder dem „Closed-Loop-Engineering“ – zu aggregieren. Ein cloudbasiertes System bietet als zentrales, vernetztes System nicht nur die technische Basis, um Maschinendaten zu sammeln, sondern gleichzeitig lokal vorhandenes Expertenwissen zur Bewertung der übermittelten Daten zu integrieren.

Im Rahmen des Exzellenzclusters „Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer“ wurde in einem Teilprojekt eine Referenzarchitektur konzipiert. Der Begriff einer „Referenzarchitektur“ ist bisher nicht eindeutig definiert. Vielmehr sind es verschiedene Anforderungen, welche eine solche zu erfüllen hat [NAKA11; CLOU10]. Grundsätzlich stellt eine Referenzarchitektur ein domänen- bzw. applikationsspezifisches, generisches Rahmenkonstrukt dar, welches als Vorlage für Objekte, Funktionen und Informationsflüsse verstanden werden kann.

Im Folgenden sollen Auszüge aus der Referenzarchitektur für cloudbasiertes Condition Monitoring vorgestellt werden.

5.4 Umgebende Systemarchitektur

Der Ansatz einer cloudbasierten Plattform verändert grundlegend die IT-Strukturen produzierender Unternehmen bzgl. Kommunikationsarchitekturen und den IT-Systemen selbst. Abbildung 5-1 zeigt, wie grds. eine solche zukünftige Systemarchitektur aussehen kann. Die Grundlage bildet die frühere Automatisierungspyramide bzw. die Dimension *Hierarchy Levels* des Referenzarchitekturmodells Industrie 4.0 (RAMI). Hier ist insbesondere die Ergänzung um eine übergreifende Plattform (Cloud) in der neuen Ebene *Connected World* sichtbar. Dadurch ist direkt der unternehmens- bzw. standortübergreifende Charakter gewährleistet. Die Cloud selbst ist als generischer Application Server mit unterschiedlichen kontextbezogenen Anwendungen (Apps) zu verstehen. Der Server beinhaltet sowohl allgemeine Apps, z. B. zu zentralen Datenaggregation, als auch spezifische Instanzen, z. B. zur standortspezifischen Instandhaltungsplanung (s. Kapitel 5.5). Der größte Unterschied zu konventionellen Systemen besteht nun in der Aufweitung der bisher monolithischen Architektur hin zu einer Architektur, in der intelligente Systeme (CPS) auf allen Hierarchieebenen direkt mit externen Diensten oder Apps kommunizieren. So können z. B. Steuerungen oder Zellenrechner direkt aktuelle Maschinen- und Produktionsdaten zur Analyse an externe Systeme schicken und jeweilige Berechnungsergebnisse zur Selbstoptimierung verwenden.

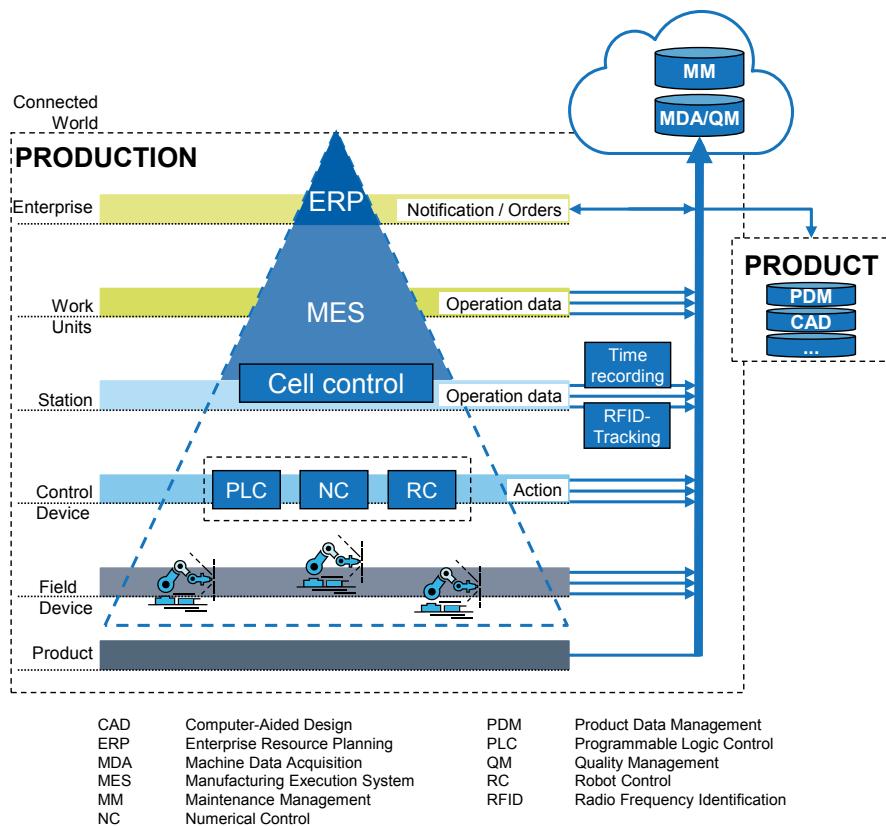


Abbildung 5-1: Zukünftige IT-Struktur produzierender Unternehmen in Anlehnung an [RAMI15] mit Fokus auf Condition Monitoring

5.5 Systemarchitektur von ‚ProCLOUD‘

Ein wesentlicher Bestandteil der IT-Architektur ist die Anbindung der Ebenen *Station* und *Control Device*. Hier werden die signifikanten maschinenbezogenen Daten als Basis für die Zustandsanalyse von Komponenten und Maschinen erfasst. Eine große Herausforderung besteht jedoch in aktuellen Produktionssystemen darin, dass diese Schichten von heterogenen Steuerungen und Kommunikationsschnittstellen geprägt sind und – z. B. durch die Verwendung von OPC DA – keine semantische Konnotation der Daten vorliegt. Gleichzeitig werden primär Bussysteme bzw. einfache Informationsmechanismen innerhalb der Automatisierungspyramide genutzt, die eine Umsetzung komplexer Client-Server-Verbindungen verhindern.

Abbildung 5-2 schlägt daher die Einführung einer Middleware vor, welche den bisherigen OPC DA-Standard mit der Industrie 4.0-konformen OPC UA-Spezifikation verbindet. Dazu werden primär im Middleware-Kern die per DA bereitgestellten Variablen per Informationsmodell semantisch ergänzt und so eine homogene Schnittstelle für das lokale Leitsystem

(MES) und die Cloud zur Verfügung gestellt. Dieses Modell besteht aus generischen Objekten bzw. Typen und Methoden, welche derart hierarchisch aufgebaut werden, dass sie die mechatronische Struktur des jeweiligen CPS abbilden. Dabei werden die Layer *Information* und *Functional* des RAMI realisiert.

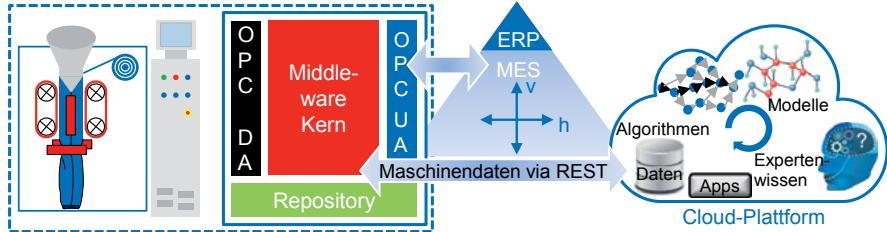


Abbildung 5-2: Ansatz zur Anbindung aktueller Maschinen an ein Cloud-System

Alle Entitäten werden als Knoten in OPC UA Informationsmodellen beschrieben, welche frei – insbesondere auch in der Betriebsphase – reorganisiert oder mehrfach verwendet werden können. Dies bietet in Kombination mit der Cloud Vorteile für die Darstellung und Konfiguration im Produktionsumfeld. Im OPC UA Informationsmodell können so z. B. dynamisch die durch Apps hinzugewonnenen Funktionalitäten angezeigt und konfiguriert werden. Darüber hinaus können Berechnungsergebnisse der Apps als neue „externe“ Informationen in das lokale Informationsmodell eingebunden werden. Durch die neu gewonnene semantische Selbstbeschreibung werden die Komplexität der Konfiguration komplexer Systeme, die Steuerung und die Überwachung signifikant reduziert.

Der zweite Grundlegende Aspekt der Architektur beinhaltet die Anbindung der Middleware über eine REST-API (Representational State Transfer) an die Cloud. Entgegen dem Simple Object Access Protocol (SOAP) Ansatz stellt das REST Paradigma für jede Ressource einen URI (Unique Ressource Identifier) bereit. Die REST-API beinhaltet erst einmal keine Verknüpfung zu oder semantische Beschreibung von (Web-)Services, welche mit den Ressourcen verbunden sind. Services wurden in der ursprünglichen Form von Fielding [FIEL00] nicht vorgesehen. Dadurch ergibt sich zunächst eine strikte Abstraktion und Trennung von Struktur, Verhalten und Inhalt. Ein großer Vorteil des REST-Ansatzes für die Produktionstechnik liegt darin, dass hier eine große Ähnlichkeit zu den hierarchisch organisierten Produktionsstätten existiert. Darüber hinaus lassen sich rechenintensive Aufgaben durch inhärente Skalierungsfunktionalitäten einfacher abbilden, da die Ressourcenverantwortung beim Server liegt. Inzwischen wird mit den RESTful Services eine Ergänzung der reinen Ressourcen um Dienste eingesetzt, um kontinuierliche Berechnungen durchführen zu können. Gleichzeitig werden diese dennoch asynchron ausgeführt, sodass keine komplexen Kommunikationsstrukturen über längere Zeit bestehen bleiben.

Das entwickelte Cloud-System *ProCLOUD* (Cloud-System für die Produktionstechnik) stellt eine umfangreiche API zur Verfügung, um alle das Condition Monitoring betreffenden Ressourcen und Dienste (Apps) nutzen zu können. Um diese API sowohl mensch- als auch maschinenlesbar zu gestalten, wurde die Beschreibungssprache *Swagger*⁴ genutzt. Die Definition beinhaltet mögliche Funktionen – bei REST sind dies primär POST, GET, PUT und DELETE, die benötigten Argumente sowie zu erwartende Ergebnisse. Da das Condition Monitoring im Fokus steht, wurden hier Ansätze wie die VDMA-Richtlinie 24582 [VDMA14a] berücksichtigt. Während diese Richtlinie nur lokale spezifische Instanzbausteine für CM-Aufgaben vorsieht, können in ProCLOUD in einer komplexen Struktur Daten aus zahlreichen

⁴Swagger Framework für APIs - <http://www.swagger.io/>

Quellen abgelegt und verarbeitet werden. Gemäß REST bildet jede Produktionslinie, Maschine, Komponente bzw. jeder Sensor und insbesondere Berechnungsergebnisse eigene Ressourcen. Solche Berechnungsergebnisse werden durch die Apps, welche leistungsfähigen Algorithmen integrieren, erzeugt. Auf diese Weise können die Vorteil der Service Oriented Architecture (SOA) mit dem REST-Paradigma kombiniert werden. Bislang wurden für ProCLOUD unterschiedliche Apps zur reinen Datenerfassung, kontinuierlichen Modellverbesserung sowie Zustandsschätzung implementiert. Die Modelle, welche Ergebnis und Basis für Apps darstellen, werden ebenfalls an zentraler Stelle von ProCLOUD gespeichert. Da die Verschleißmodelle in einer ersten Phase aufgebaut werden müssen, bildet das integrierbare Expertenwissen zur Verknüpfung der Informationen aus dem Entwicklungsprozess – z. B in Form von Matlab-Modellen – und Erfahrungswissen aus der Betriebsphase ebenfalls einen wichtigen Bestandteil.

Auf Basis dieser Grundlage ist es möglich, applikationsspezifische Apps zu entwerfen, welche bestimmte Zielparameter innerhalb einer Anlage optimieren und so aktiv den Produktionsprozess in Abhängigkeit des aktuellen Zustands beeinflussen.

Die generische Referenzarchitektur wurde mit einer Referenzimplementierung ergänzt, aus der im Folgenden Ausschnitte vorgestellt werden.

5.6 Exemplarischer Use-Case: Folienabzugsprozess einer Verpackungsmaschine

Verpackungsmaschinen werden genutzt, um die Produktionskette eines breiten Produktspektrums – z. B. in der Lebensmittelindustrie – abzuschließen. In Abbildung 5-3 ist eine Schlauchbeutelmaschine mit der Folienabzugseinheit und Detailaufnahme eines verschlossenen Abzugsriemens dargestellt. Im Folgenden wird beschrieben, wie unter Verwendung der Referenzarchitektur eine Systematik zur cloudbasierten Überwachung des Maschinenzustands entwickelt wurde.

Der Verpackungsprozess kann dabei wie folgt beschrieben werden (s. Abbildung 5-4):

- Abzug einer rechteckigen Folie von einer Rolle durch zwei Riemen (1)
- Formen eines Folienschlauchs durch vertikales thermisches Siegeln
- Formen des Beutelbodens durch horizontale Siegeleinheit (3)
- Verfüllen des Produktes durch Formatrohr (4)
- Formen des Beutelkopfes durch horizontale Siegeleinheit (3)
- Abtrennen des fertigen Beutels vom Schlauch (5)

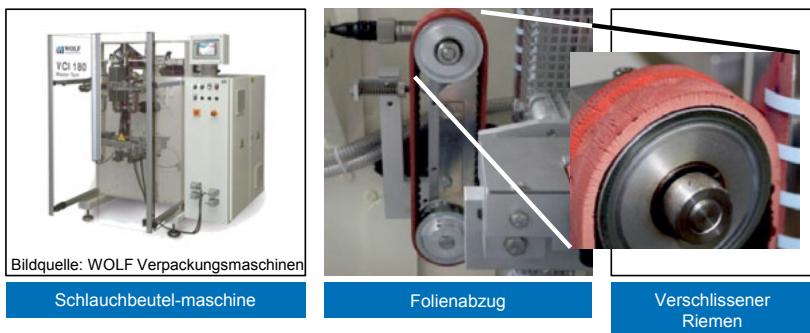


Abbildung 5-3: Schlauchbeutelmaschine und Folienabzugseinheit

Dabei ist im hochtaktenden Verpackungsprozess die Synchronisation unterschiedlicher Bewegungsabläufe essentiell. Unter Verwendung einer elektrischen Königswelle – gekoppelt an die Vertikalbewegung des Siegelstocks – werden z. B. die Motoren für den Folienabzug oder Schneidezeiten synchronisiert. Für einen fehlerfreien Prozess ist insbesondere die Abstimmung der Folienabzugsgeschwindigkeit mit der Taktzeit essentiell.

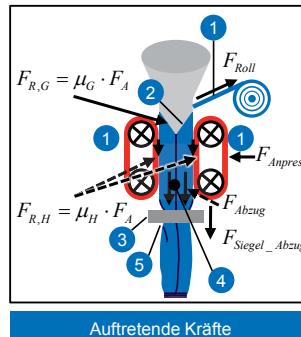


Abbildung 5-4: Auftretende Kräfte im Folienabzugsprozess

Wie in Abbildung 5-4 zu sehen, treten im Abzugsprozess verschiedene Kräfte auf, deren Ungleichgewicht zu Prozessstörungen wie z. B. Schlupfeffekten (Folie, Riemen) und in Folge dessen zu Stillstandszeiten führen können. Liegt beispielsweise eine verschleißinduzierte Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Folie und Siegeleinheit bzw. Taktgeschwindigkeit vor, wird zunächst durch interne Kompensationsmechanismen die Riemengeschwindigkeit erhöht. Sobald ein definierter Grenzwert überschritten wird, bricht der Prozess ab und es kommt zum Maschinenstillstand.

Um hier eine Überwachungssystematik sowohl zur Zustandsschätzung als auch zur späteren Parameteranpassung zu entwerfen, wurde im Rahmen der Forschungsarbeiten der komplette Prozess nach [BREC06] durchlaufen. Letztendlich wurde neben der Schwingungsanalyse (komplex und aufwendig) die Überwachung der Motordrehzahl als Möglichkeit identifiziert, den aktuellen Zustand zu schätzen.

Per ‚Design of Experiments‘ wurden Messdaten zu unterschiedlich verschlissenen Abzugsriemen aufgezeichnet und mit Methoden des Machine Learnings analysiert bzw. klassifiziert. Die besten Ergebnisse liefert dabei der K-Medoids Algorithmus mit der Cosinus-Metrik.

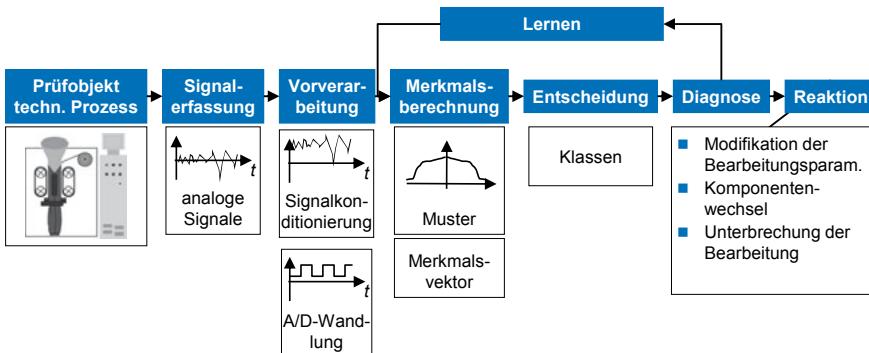


Abbildung 5-5: Schritte zum Entwurf einer Messsystematik nach [BREC06]

1. Referenzimplementierung – Condition Monitoring Apps in ProCLOUD

Im folgenden Kapitel wird beschrieben, wie die im Kapitel 5.3 vorgestellte allgemeine Systemarchitektur dazu genutzt werden kann, um eine Cloud-App zu entwickeln, welche als Referenzimplementierung die Herausforderungen des Use-Cases (s. Kapitel 5.6) löst.

Grundsätzlich müssen im Themenfeld Condition Monitoring zwei Phasen unterschieden werden: die **Modellbildung** und die **Modellanwendung**. Wie in Abbildung 5-6 zu sehen, deckt ProCLOUD beide, zeitlich zunächst getrennte, später parallel verlaufende, Phasen ab.

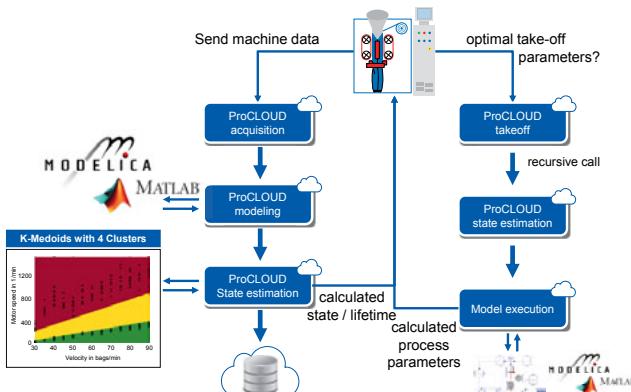


Abbildung 5-6: Referenzimplementierung ProCLOUDtakeoff

Zunächst übermitteln alle verbundenen cyber-physicalen Systeme – die Verpackungsmaschinen in diesem Kontext – kontinuierlich unterschiedliche Sensordaten zum Cloud-System. Durch die REST-API und die damit plattformübergreifend nutzbaren Clients können sowohl steuerungsinterne, als auch -externe Datenquellen berücksichtigt werden. Die so gesammelten Daten können genutzt werden, um ein Komponenten- oder Maschinenmodell aufzubauen und anschließend kontinuierlich mit jedem neuen Datenpunkt weiter zu differenzieren. Hier wird der Vorteil deutlich, dass maschinenübergreifend schnell Daten von Komponenten in unterschiedlichen Phasen ihres Lebenszyklus gesammelt werden können. Ist das Verschleißmodell einmal aufgebaut, können neue Datenpunkte direkt zur Zustandsschätzung genutzt werden.

Der geschätzte Zustand kann nun z. B. genutzt werden, um optimale Abzugsparameter zu bestimmen. Dazu besteht in ProCLOUD die Möglichkeit, Maschinen- und Prozessmodelle einzubinden. Die optimalen Parameter werden so dynamisch berechnet und anschließend zur lokalen Prozesseinstellung zurück an die Verpackungsmaschine übermittelt.

5.7 Evaluation

Das gesamte System wurde bisher in unterschiedlicher Form validiert. Einerseits wurde für das Themenfeld *Zustandsschätzung* die Fehlerrate bestimmt. Mit der aktuellen Algorithmik kommt es zu keinerlei Fehlklassifikation. Dies könnte jedoch darin begründet liegen, dass die vorliegenden Daten – zu einem sehr verschlissenen und einem neuen Riemenpaar gehörend – sehr trennscharf sind. Daher sollen zukünftig – über die Labormaschine hinaus – weitere Verpackungsmaschinen unterschiedlichen Zustands eingebunden werden. Auf der anderen Seite wurde die Lösung der Referenzarchitektur für Condition Monitoring in Kombination mit der Referenzimplementierung validiert. Die komplette Kette vom Shop Floor – z. B. Maschinen – bis in die Cloud und zurück wurde erfolgreich geschlossen.

5.8 Zusammenfassung und Ausblick

In Kapitel 5.6 wurde die cloudbasierte Zustandsschätzung als erste Teil-Referenzimplementierung der vorgestellten Referenzarchitektur beschrieben. In weiteren Arbeiten wurde ein Maschinen- und Prozessmodell erstellt, welches – mit Fokus auf der Folienabzugseinheit – ein optimales Kräftegleichgewicht berechnen kann. Da insbesondere die Anpresskraft eine Eingriffsmöglichkeit zur temporären Prozessverbesserung darstellt, kann diese nach Übermittlung des geschätzten Riemenzustands sowie weiterer Prozessparameter berechnet werden. Zukünftige Arbeiten beschäftigen sich nun damit, aus dem geschätzten Zustand differenzierte Reibkoeffizienten zu berechnen, die dem Modell zur Verfügung gestellt werden können und so den Modellabgleich zu finalisieren.

Ein weiterer wichtiger Aspekt stellt die Prognosefähigkeit von Verschleißmodellen dar. Die Referenzarchitektur bietet die Möglichkeit, die Daten gleicher Komponenten in verschiedenen Phasen des Lebenszyklus zu analysieren. Dadurch kann eine zeitliche Information, z. B. in Abhängigkeit der Maschinenstundenzahl und Taktzahl, ergänzt werden.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung der hier beschriebenen Arbeiten im Rahmen des Exzellenzclusters „Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer“.

5.9 Literaturverzeichnis

- [ATMO14] Atmosudio, A.; Faller, M.; Verl, A.: Durchgängige Datenintegration in die Cloud. Ein Konzept zur cloudbasierten Erfassung von Produktionsdaten. In: *wt Werkstatttechnik online*. 104. Jg., 2014, Nr. 3, S. 151–155.
- [BECH12] Bechhoefer, E.; Morton, B.: Condition monitoring architecture. To reduce total cost of ownership. In: *IEEE Conference on Prognostics and Health Management (PHM)2012*. Denver, Co, 18.-21. June, 2012, Piscataway, NJ, 2012.
- [BITK15] BITKOM Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und Neue Medien e. V.; VDMA Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbauer e. V.; ZVEI Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e. V: Umsetzungsstrategie Industrie 4.0. Plattform Industrie 4.0, April 2015.
- [BREC06] Brecher, C.; Weck, M.: *Werkzeugmaschinen* 3. 6. Aufl., Berlin: Springer, 2006.
- [BREC09] Brecher, C.; Pohlmann, G.; Herfs, W.: Zustandsbasierte Diagnose an Rollenketten von Verpackungsmaschinen. Höchste Beanspruchung bei 140 Takt/min. In: *wt Werkstatttechnik online*. 99. Jg., 2009, 7/8, S. 498–503.
- [BREC10a] Brecher, C. (Hrsg.). *ZuPack. Zustandsorientierte Instandhaltung von Verpackungsmaschinen* (Reihe: Verfügbarkeit von Produktionssystemen als Dienstleistung), Aachen: Apprimus-Verlag, 2010.
- [BREC10b] Brecher, C.: *Zuverlässige Produktionsanlage (ZuPro)*. Verbundprojekt im Rahmenkonzept "Forschung für die Produktion von morgen" des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF). 1. Aufl., Aachen: Apprimus-Verl, 2010.
- [CLOU10] Cloutier, R.; Muller, G.; Verma, D.; Nilchiani, R.; Hole, E.; Bone, M.: The Concept of Reference Architectures. In: *Systems Engineering*. 13. Jg., 2010, Nr. 1, S. 14–27.
- [COLO14] Colombo, A. W.; Bangemann, Thomas, Karnouskos, Statmatis; Delsing, J.; Stluka, P.; Harrison, R.; James, F.; Lastra, J. L. (Hrsg.). *Industrial Cloud-Based Cyber-Physical Systems. The IMC-AESOP approach*, Switzerland: Springer International Publishing, 2014.
- [EICK15] Eickmeyer, J.; Pethig, F.; Schriegel, S.; Niggemann, O.; Givechi, O.; Li, P.; Krüger, T.; Frischkorn, A.; Hoppe, T.: Intelligente Zustandsüberwachung von Windenergieanlagen als Cloud-Service: *Automation 2015*. 16. Branchentreff der Mess- und Automatisierungstechnik: Benefits of Change - the Future of Automation: Kongresshaus Baden-Baden, 11. und 12. Juni 2014. (Reihe: VDI-Berichte, Bd. 2258). Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, 2015.
- [FIEL00] Fielding, T. R.: *Architectural Styles and the Design of Network-based Software Architectures*, 2000.
- [KUHN13] Kuhn, A.: *Zukunft der Instandhaltung*, Dortmund, 22.03.2013.
- [LIAN12] Liang, B.; Hickinbotham, S.; Mcavoy, J.; Austin, J.: Condition Monitoring Under the Cloud. In: *Digital Research*. Oxford, 2012.
- [NAKA11] Nakagawa, E. Y.; Oliveira Antonino, P.; Becker, M.: Reference Architecture and Product Line Architecture. A Subtle But Critical Difference. In: *5th European Conference, ECSA 2011*, Essen, Germany, September 13-16, 2011. Essen, 13.-16. September, 2011, 2011.

-
- [RAMI15] VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik; ZVEI Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e. V: Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI4.0), Düsseldorf, April 2015.
- [VDMA14a] Einheitsblatt. VDMA Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbauer e. V. 24582 (April, 2014). Feldbusneutrale Referenzarchitektur für Condition Monitoring in der Fabrikautomation.
- [VDMA14b] VDMA Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbauer e. V.: VDMA Maschinenbau in Zahl und Bild 2014. VDMA Volkswirtschaft und Statistik, Frankfurt am Main, März 2014.

6 Variantenübergreifende Risikobeurteilung für die Maschinensicherheit

A. Malik, C. Brecher

6.1 Einleitung

Der Maschinenbau ist einer der wichtigsten Industriezweige und stellt einen Kernbereich der Wirtschaft und Gesellschaft in Deutschland dar. Sicherheit, insbesondere hinsichtlich möglicher Schäden an Personen, ist daher einer der wichtigsten Aspekte bei der Konstruktion von Maschinen. Die Richtlinie 2006/42/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über Maschinen – kurz Maschinenrichtlinie genannt – legt dabei allgemein gültige grundlegende Sicherheits- und Gesundheitsschutzanforderungen fest [EURO06, S. 2]. Dieser zufolge liegt es in der Verantwortung der Hersteller, die Übereinstimmung ihrer Maschinen mit den Bestimmungen der Richtlinie nachzuweisen.

Die Bedeutung einer richtlinienkonformen Risikobeurteilung ist in den letzten Jahren stark gestiegen. Sie kann den Hersteller bei Fragen der Haftung absichern und wird vermehrt von Kunden – vor allem im Automobilbau – auch als eigenes Dokument gefordert. Die Durchführung einer rechtskonformen und qualitativ hochwertigen Risikobeurteilung ist mit einem hohen Aufwand verbunden und hat aufgrund der nicht wertschöpfenden Tätigkeit in der Regel im Unternehmen nur geringe Akzeptanz. Hierzu kommt, dass bei der Angebotserstellung meist noch keine sicherheitstechnischen Analysen vorliegen, sodass das Sicherheitskonzept nicht belastbar in den Kosten berücksichtigt werden kann. Zusätzlich bestehen oft Inkonsistenzen zwischen Konstruktionsdaten und der Risikobeurteilung. Gerade die große Variantenvielfalt, bedingt durch die charakteristische Eigenschaft des Maschinen- und Anlagenbau individuelle Kundenwünsche umzusetzen, ist eine weitere Herausforderung, von der sich diese Sparte konfrontiert sieht. Das am WZL der RWTH Aachen University laufende Projekt VariSafe verfolgt daher das Ziel die variantenübergreifende Risikobeurteilung für die Maschinensicherheit zu systematisieren und signifikant zu erleichtern. Die Risikobeurteilung soll dabei an das Variantenmanagement gekoppelt werden, so dass mit der Konfiguration einer Maschine auch die Risikobeurteilung konfiguriert wird. Dabei müssen stets Anforderungen aus der Maschinenrichtlinie beachtet werden, die im Folgenden beschrieben wird.

6.2 Maschinenrichtlinie

Der Artikel 5 der Maschinenrichtlinie listet die Anforderungen vor dem Inverkehrbringen⁵ einer Maschine an den Hersteller bzw. seinen Bevollmächtigten auf [EURO06, S. 6]:

- Die Maschine muss grundlegende Sicherheits- und Gesundheitsschutzanforderungen erfüllen.
- Die Verfügbarkeit technischer Unterlagen einschließlich der Risikobeurteilung muss sichergestellt sein.
- Unterlagen, die für eine sichere Bedienung erforderlich sind, müssen bereitgestellt werden.
- Es muss ein Konformitätsbewertungsverfahren gemäß Artikel 14 der Maschinenrichtlinie durchgeführt werden.

⁵ Inverkehrbringen bedeutet die „erstmalige Bereitstellung einer Maschine oder einer unvollständigen Maschine in der Gemeinschaft im Hinblick auf ihren Vertrieb oder ihre Benutzung“ [EURO06]

- Die EG-Konformitätserklärung ist auszustellen und eine CE-Kennzeichnung ist anzubringen.

Entsprechend der EU-Richtlinie und den jeweiligen nationalen Umsetzungen darf ohne EG-Konformitätserklärung und CE-Kennzeichnung keine Maschine in der Europäischen Union⁶ in den Verkehr gebracht werden.

Für die Konformitätserklärung und CE-Kennzeichnung sind generell fünf Schritte erforderlich (siehe Abbildung 6-1).



Abbildung 6-1: Ablauf für die CE-Zertifizierung [EBER12, S. 66]

Schritt 1: Erstellung der Maschinenspezifikation

In Schritt 1 wird eine Spezifikation der Maschine erstellt. Diese umfasst u. a. Angaben zur Verwendung, Umgebung und Funktion der Maschine sowie zu Leistungsdaten und anzuwendenden Richtlinien bzw. Normen. Im Allgemeinen wird die Spezifikation noch vor der Entwicklungs freigabe angefertigt, da sich daraus Anforderungen für die Konstruktion ergeben. Aus der Spezifikation folgt, welches Konformitätsbewertungsverfahren Anwendung findet. Hierbei wird zwischen normalen und Maschinen mit besonderem oder sehr großem Risikopotenzial unterschieden (z. B. spezielle Sägemaschinen). Für letztere kann zusätzlich zu den beschriebenen Schritten eine externe Prüfstelle erforderlich werden, falls es nicht möglich ist, die Sicherheit durch die Normung nachzuweisen.

Schritt 2: Durchführung von Prüfungen und Nachweisen

In Schritt 2 gilt es, Prüfungen und Nachweise für die Sicherheit durchzuführen und zu dokumentieren [EBER12, S. 70]. Hierfür muss eine Risikobeurteilung vorgenommen werden. „Die Maschine muss dann unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Risikobeurteilung konstruiert und gebaut werden“ [EURO06, S. 11]. Das iterative Verfahren von Risikobeurteilung und -minderung ist in Abbildung 6-2 gezeigt.

Der erste Schritt der Risikobeurteilung ist, die Grenzen der Maschine festzulegen, sofern dies nicht bereits in Schritt 1 durchgeführt wurde. Hierbei werden u. a. verschiedene Betriebsarten, Einsatzbereiche der Maschine, potenziell gefährdete Personengruppen sowie räumliche und zeitliche Grenzen der Maschine festgelegt.

⁶ Hinzu kommen noch Norwegen, Island, Liechtenstein, Schweiz und die Türkei [SCHL13]

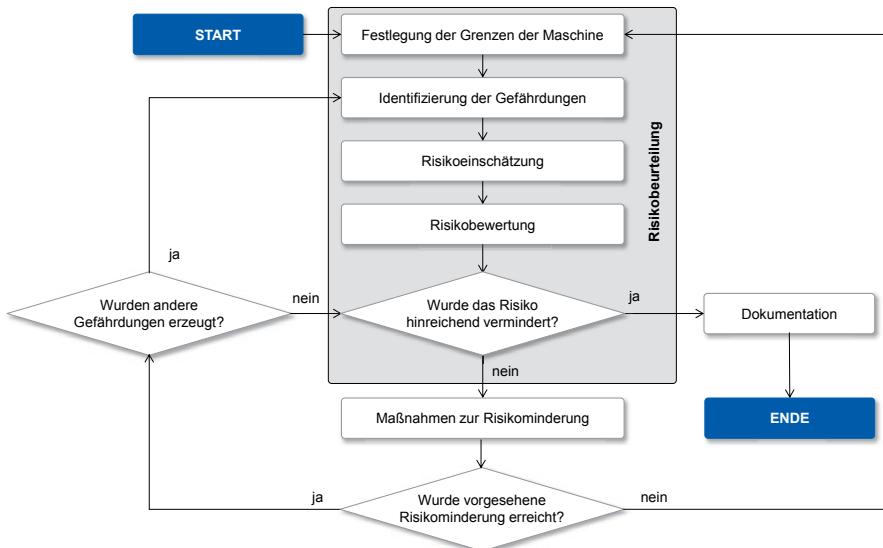


Abbildung 6-2: Iterativer Prozess von Risikobeurteilung und -minderung in Anlehnung an [DIN11]

Im nächsten Schritt gilt es, Gefährdungen der Maschine zu identifizieren. Hierbei muss u. a. beachtet werden [DIN11, S. 19]:

- das Eingreifen von Personen (Einrichten, unterschiedliche Betriebsarten, Stillsetzen, Instandhaltung etc.)
- mögliche Betriebszustände der Maschine (Normalbetrieb, Störungen, Beschädigungen etc.)
- unbeabsichtigtes Verhalten und Fehlanwendungen (Kontrollverlust, reflexartiges Verhalten, Unachtsamkeit etc.)

Jedes identifizierte Risiko muss einzeln unter der jeweiligen Einsatzbedingung eingeschätzt, bewertet und ggf. vermindert werden. Risikoeinschätzung bedeutet, dass Schadensausmaße von Risiken und Eintrittswahrscheinlichkeiten unter Berücksichtigung unterschiedlicher Aspekte (Personengruppen, Häufigkeit der Gefährdungsexposition, Möglichkeit zur Umgehung von Schutzmaßnahmen etc.) eingeschätzt werden. In der anschließenden Risikobewertung wird geprüft, ob das Risiko hinreichend vermindert wurde. Hierbei ist das „Drei-Stufen-Verfahren“ der Risikominderung zu berücksichtigen [DIN11, S. 29]:

1. Inhärent sichere Konstruktion: Risiken werden durch die konstruktive Gestaltung vermindert, z. B. durch Kraftbegrenzung, Vermeidung scharfer Kanten, Emissionsbegrenzung, Werkstoffwahl, Beachtung ergonomischer Grundsätze, Vermeidung elektrischer Gefährdungen und funktional sichere Steuerungsbefehle.
2. Technische Schutzmaßnahmen und / oder ergänzende Schutzmaßnahmen: Falls die Risiken nicht durch die konstruktive Gestaltung vermindert werden können, gilt es andere geeignete Maßnahmen zu suchen, z. B. Schutzeinrichtungen zur Trennung vom Gefährdungsbereich, Lichtschranken, Verriegelungen, Zustandsüberwachungen, Abschirmungen etc.

3. Benutzerinformationen: Restrisiken, die nicht durch die ersten beiden Stufen vermindert werden können, müssen in den Benutzerinformationen aufgeführt sein. Hierzu zählen beispielsweise Bedienanweisungen, die Festlegung von Ausbildungsanforderungen, Warnhinweise, Empfehlungen zur Schutzausrüstung etc.

Die Maschinenrichtlinie schreibt vor, dass der iterative Prozess der Risikobeurteilung und -minderung dokumentiert werden muss. Die für die CE-Zertifizierung erforderlichen technischen Unterlagen umfassen somit u. a. „eine Beschreibung der zur Abwendung ermittelter Gefährdungen oder zur Risikominderung ergriffenen Schutzmaßnahmen und gegebenenfalls eine Angabe der von der Maschine ausgehenden Restrisiken“ [EURO06, S. 47].

Schritt 3: Zusammenstellung der technischen Unterlagen

In Schritt 3 gilt es, die technischen Unterlagen der Maschine zusammenzustellen. Hierbei ist zunächst zwischen internen und externen Unterlagen für den Kunden zu unterscheiden. Typische Unterlagen für den Kunden umfassen beispielsweise die Betriebsanleitung, Wartungspläne, Abnahmeprotokolle und eine Kopie der Konformitätserklärung (siehe Schritt 4). Zur CE-Zertifizierung muss der Maschinenhersteller außerdem detaillierte interne technische Unterlagen mindestens zehn Jahre bereithalten. Der Anhang VII der Maschinenrichtlinie benennt die Unterlagen, z. B. Zeichnungen, Schaltpläne, Berechnungen, Risikobeurteilung, angewandte Normen, Original der Konformitätserklärung etc.

Schritt 4: EG-Konformitätserklärung ausstellen

Mit der EG-Konformitätserklärung erklärt der Hersteller, dass die Maschine den Bestimmungen der Maschinenrichtlinie entspricht. Die Erklärung enthält u. a. den Namen und die Anschrift des Herstellers bzw. seines Bevollmächtigten, die Maschinenbezeichnung sowie in der Regel eine Auflistung der angewandten harmonisierten Normen.

Schritt 5: Informationen und Kennzeichnungen anbringen

In Schritt 5 werden zunächst Hinweise und Warnschilder an der Maschine angebracht, welche auf verbleibende Gefahrstellen und Risiken hinweisen. Darüber hinaus sind an der Maschine der Firmenname, die Bezeichnung der Maschine, die CE-Kennzeichnung, die Baureihen- und Typbezeichnung sowie das Baujahr anzubringen.

6.3 Umsetzung der Maschinenrichtlinie in Unternehmen

Die Beherrschung der Prozesse zur Risikobeurteilung in Unternehmen lässt sich in vier Reifegrade unterteilen, die in Abbildung 6-3 dargestellt sind. Im Reifegrad 0 ist dem Unternehmen der Prozess der Risikobeurteilung unbekannt oder wird ignoriert. Der Reifegrad 0 wurde von den meisten europäischen Maschinenherstellern überwunden, weil der Druck seitens Produkthaftung, Marktaufsicht und Kunden zu groß ist, als dass ein Unternehmen konkurrenzfähig im Reifegrad 0 verbleiben kann. Im Reifegrad 1 kennt das Unternehmen grundsätzlich den Prozess der Risikobeurteilung, es kann aber nicht von systematischen Prozessen gesprochen werden. Die Risikobeurteilung im Reifegrad 1 erfolgt dokumentenbasiert. In der Regel bedeutet dies, dass zum Abschluss der Konstruktion die Risikobeurteilung einer ähnlichen Maschine herangezogen und angepasst wird. Diese Vorgehensweise kann zu unvollständigen oder inkonsistenten Risikobeurteilungen führen und das Unternehmen läuft Gefahr, dass Gefahrstellen der Maschine übersehen werden, nicht mehr aktuelle Beschreibungen im Dokument verbleiben und Normverweise nicht aktualisiert werden. Diese Vorgehensweise ist für den Konstrukteur belastend, da er einerseits unter Termindruck steht und andererseits für seine Konstruktion haften kann bzw. Verantwortung gegenüber seiner Umwelt trägt. Darüber hinaus kommt es vermehrt vor, dass Kunden oder die Marktaufsicht an den Maschinenhersteller

herantreten und die Qualität der Risikobeurteilung bzw. der sonstigen Technischen Dokumentation bemängeln. Oft suchen dann die Unternehmen Hilfe bei Dienstleistern, um die Prozesse der Risikobeurteilung zu verbessern und den Reifegrad 2 zu erreichen.

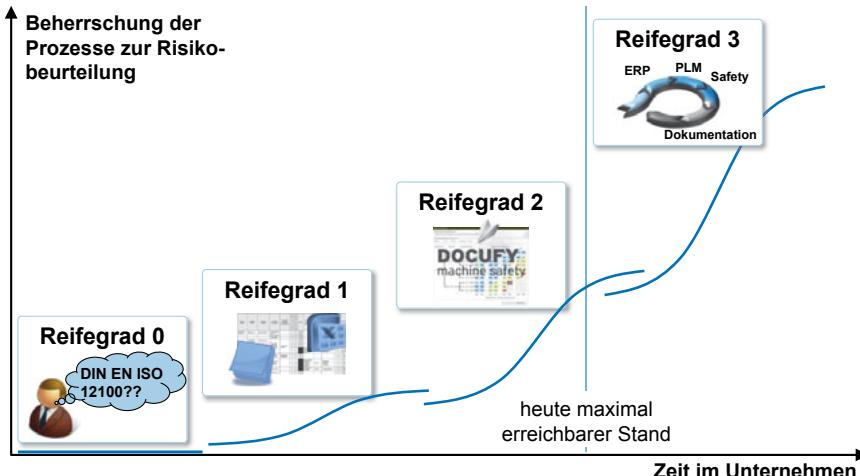


Abbildung 6-3: Reifegrade bei der Risikobeurteilung

Der Reifegrad 2 zeichnet sich dadurch aus, dass die Risikobeurteilung systematisch für jede einzelne Maschine erfolgt, d. h. dass Maschinenbereiche, Baugruppen, Gefahrstellen und Risiken strukturiert verwaltet werden. Die Risikobeurteilung wird dann aus den Einzelementen zusammengestellt. Zudem werden im Unternehmen Prozesse umgesetzt, die eine kontinuierliche Aktualisierung der Normung gewährleisten. Für die systematische Risikobeurteilung wird üblicherweise Spezialsoftware eingesetzt, wie z. B. Docufy Machine Safety. Während im Reifegrad 2 die Qualität der Risikobeurteilung sowie der weiteren Technischen Dokumentation signifikant verbessert wird, ist das Problem der Effizienz noch nicht hinreichend gelöst. Werkzeugmaschinenhersteller klagen über den noch hohen Aufwand, der für eine qualitativ hochwertige Risikobeurteilung erforderlich ist. Eine effiziente Risikobeurteilung kann daher nur durch Datendurchgängigkeit von Konfiguration und Konstruktion zur Risikobeurteilung erreicht werden, wodurch der Reifegrad 3 erreicht werden soll.

6.4 Risikobeurteilung im Kontext der Auftragsabwicklung im Maschinen- und Anlagenbau

Charakteristisch für den Maschinen- und Anlagenbau ist die Umsetzung individueller Kundenwünsche, welche eine Produktionsstrategie im Sinne einer Mass Customization erstrebenswert machen. Hinsichtlich der Produktion kann zwischen Build-to-Stock (BTS) und Build-to-Order (BTO) unterschieden werden. Bei der Produktion im Sinne von BTS wird auf Vorrat produziert. BTO bedeutet, dass die Produktion erst nach Auftragseingang erfolgt. Nach dem Auftragseingang wird beim BTO unterschieden zwischen Configure-to-Order (CTO) und Engineer-to-Order (ETO). Beim CTO wird der Konfigurationsraum vorgeplant und dementsprechend die Produktstruktur ausgelegt. CTO liegt dann vor, wenn Fertigung oder Montage

auftragsspezifisch durchgeführt werden. Letzteres wird auch als Assemble-to-Order (ATO) bezeichnet, wenn die Komponenten eines Endprodukts bereits einbaufertig vorliegen.

Maschinen- und Anlagenhersteller können grob in zwei Gruppen eingeteilt werden: Hersteller von Sondermaschinen mit Fokus auf ETO sowie Hersteller von Serienmaschinen mit Fokus auf CTO. Um zukünftige Kundenanforderungen zu befriedigen, versuchen Maschinenhersteller beide Ansätze zu kombinieren. Maschinen und Anlagen werden dabei als Produktfamilien entwickelt und im Laufe ihres Lebenszyklus durch neue Varianten und Zusatzoptionen ergänzt. Dadurch lässt sich ein hoher Anteil an Anforderungen durch vorgeplante Standardvarianten erfüllen, kundenspezifische Anpassungen bzw. Neuentwicklungen sind dafür in gerinem Maße erforderlich. [BREC11]

Im Hinblick auf die Technische Dokumentation und die Risikobeurteilung ergeben sich durch die Kombination von CTO und ETO besondere Herausforderungen, welche im Folgenden anhand von Abbildung 6-4 erläutert werden. Der Kunde äußert seine Anforderungen dem Vertriebsmitarbeiter des Maschinenherstellers. Der Vertrieb oder die Projektierungsabteilung strukturiert und erweitert diese Anforderungen und leitet diese dann an die Entwicklungsabteilungen weiter (Mechanik, Steuerungstechnik, Elektrik, Hydraulik). Ein großer Teil der Funktionen kann üblicherweise mit Standardfunktionen umgesetzt werden, so dass keine Neukonstruktion erforderlich ist, sondern Konfigurationsmechanismen angewendet werden können. Ein zweiter Teil der Funktionen kann durch Anpassung vorhandener Entwicklungsdaten realisiert werden. Hierzu zählt z. B. das Ersetzen von Komponenten im Stromlaufplan, die Veränderung von Parametern in der Mechanik oder Anpassungen im SPS-Programm. Der dritte, häufig geringste Anteil der Funktionen verlangt eine Neuentwicklung und damit einen Großteil der Entwicklungszeit.

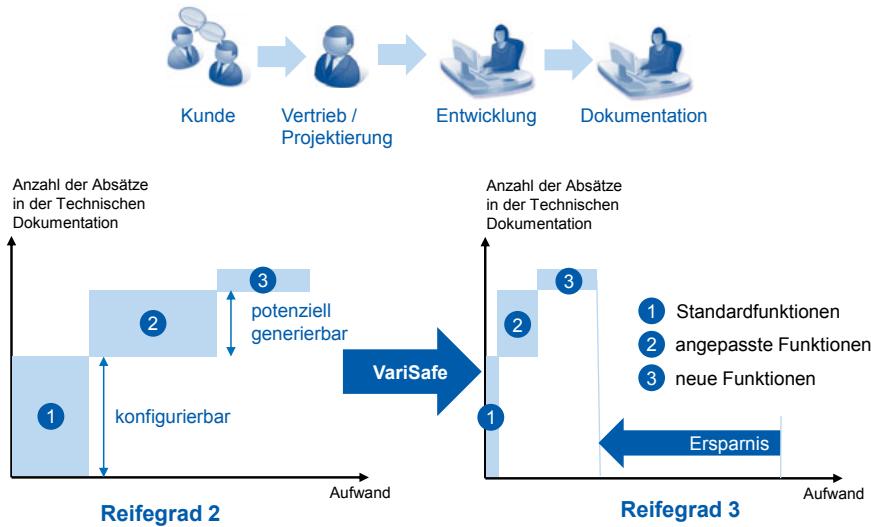


Abbildung 6-4: Technische Dokumentation im Kontext von CTO und ETO [BREC10]

Die Technische Dokumentation inklusive der Risikobeurteilung erfolgt heutzutage größtenteils erst im Anschluss an die Entwicklung. Die Einteilung von Standardfunktionen, angepassten Funktionen und neuen Funktionen spiegelt sich auch hier wider. Der größte Anteil der Technischen Dokumentation bezieht sich auf Standardfunktionen und findet sich bei einer Vielzahl von Maschinenvarianten wieder. Der zweite Anteil bezieht sich auf die angepassten

Funktionen. Hier muss die Technische Dokumentation angepasst werden. Der dritte Anteil bezieht sich auf die neuen Funktionen, die neu dokumentiert und hinsichtlich des Risikos neu beurteilt werden müssen.

Weder im Reifegrad 1 noch im Reifegrad 2 werden die Potenziale zur Konfiguration der Risikobeurteilung ausgeschöpft. Im Reifegrad 2 ist zwar eine modulare Erstellung der Risikobeurteilung möglich, allerdings kann diese nicht variantenspezifisch konfiguriert werden.

6.5 Methoden und Software zur Risikobeurteilung

Zur Unterstützung der Risikobeurteilung werden mehrere Softwarelösungen angeboten. Die Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin hat die Software GESIMA entwickelt [BUND10]. Die Software arbeitet auf Basis einer hierarchischen Strukturierung der Gefahrstellen und unterstützt den Benutzer bei der Suche nach Maßnahmen zur Risikominderung. Die Software Safexpert der österreichischen Firma IBF bietet Funktionen zur hierarchischen Strukturierung der Risikobeurteilung sowie zur Normverwaltung [IBF12]. Sowohl GESIMA als auch Safexpert arbeiten rein projektorientiert. Konfigurationsmechanismen für Baugruppen und Komponenten sind nicht vorgesehen. Das Produkt Docufy Machine Safety [DOCU12] ermöglicht die modulare Erstellung von Risikobeurteilungen. Durch den modularen Aufbau kann der Maschinenhersteller Objekte der Risikobeurteilung wiederverwenden, z. B. die Beschreibung von Gefahrstellen und die entsprechenden Maßnahmen zur Risikominderung. Ein Konfigurationsmechanismus, der eine variantenübergreifende Risikobeurteilung ermöglicht, existiert allerdings noch nicht.

In Forschungsprojekten wurde das Thema Risikobeurteilung bislang wenig adressiert. Das BMBF-Verbundprojekt IMMMA ist der Frage nachgegangen, wie die Maschinenrichtlinie mit Technologien der Virtual Reality aufbereitet werden kann [LANG09]. Im Vordergrund des Projektes stand die Hersteller-Betreiber-Kommunikation durch Simulation und Visualisierung von kritischen Betriebszuständen auf Basis interaktiver 3-D Modelle und nicht die effiziente Erstellung der Risikobeurteilung. Weitere Forschungsprojekte haben sich mit Fragen befasst, wie konkrete Maßnahmen zur Risikominderung zu gestalten sind, z. B. trennende Schutzeinrichtungen von Werkzeugmaschinen [UHLM12].

6.6 Ziele des Projekts VariSafe

Damit der Aufwand für die Erstellung einer Risikobeurteilung bei variantenreichen Maschinen signifikant verringert wird, soll der Maschinenhersteller bei der Planung einer neuen Produktfamilie dahingehend unterstützt werden, dass er die Konformität einzelner Maschinenvarianten zur Sicherheitsnormung systematisch prüfen kann, ohne für jede mögliche Variante eine eigene Risikobeurteilung manuell erstellen zu müssen. Für den häufig auftretenden Fall einer kundenindividuellen Anpassungsentwicklung soll es dem Maschinenhersteller ermöglicht werden, anhand eines Referenzprozesses und eines in Projekt entwickelten informations-technologischen Grundgerüsts die Risikobeurteilung automatisiert zu erstellen. Durch die Automatisierung des Abgleichs entsprechender Maßnahmen zur Risikominderung mit der Maschinendokumentation ergeben sich eine gesteigerte Qualität der variantenspezifischen Risikobeurteilung sowie deren Dokumentation. Einerseits erhält der Hersteller hierdurch eine besser dokumentierte gesetzliche Absicherung und andererseits erhöht dies die Maschinensicherheit bzw. die Sicherheit des Anwenders.

6.7 Lösungsansatz

Grundlage des Lösungsansatzes bilden zunächst Merkmalsmodelle des Variantenmanagements. Merkmalsmodelle werden mittels FODA (Feature-oriented Domain Analysis) beschrieben. FODA beschreibt eine Methodik zur systematischen Identifikation von Gemeinsamkeiten in Produkten für eine abgegrenzte Anwendungsdomäne mit dem Ziel, Kosten zu senken und die Transparenz in der Entwicklung zu erhöhen [vgl. KANG90, S. 23]. Abbildung 6-5 zeigt exemplarisch ein vereinfachtes Merkmalsmodell für eine Werkzeugmaschine des Herstellers Chiron, das der Vertriebssicht bzw. der externen Varianz entspricht. Wählt der Kunde beispielsweise die Option zur Stangenbearbeitung, ist ein Schwenkkopf zwingend erforderlich. Der Schwenkkopf wiederum benötigt das Kettenmagazin für den Werkzeugwechsel.

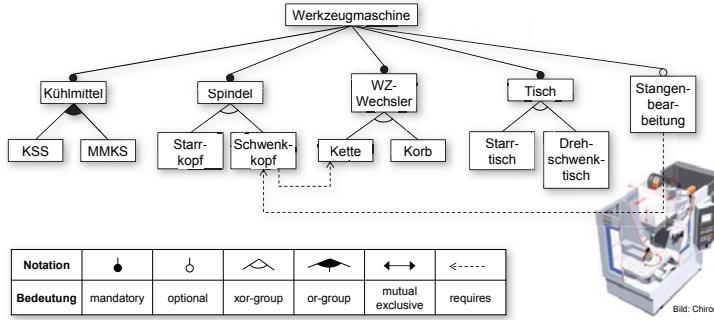


Abbildung 6-5: Exemplarisches Merkmalsmodell für eine Werkzeugmaschinen-Produktfamilie

Die Modelle des Variantenmanagement sollen weiterhin an die Risikobeurteilung gekoppelt werden, indem die Strukturmodelle der Variantenkonfiguration mit Modellen zur Risikobeurteilung vernetzt werden. Abbildung 6-6 zeigt die zentrale Idee des Lösungsansatzes.

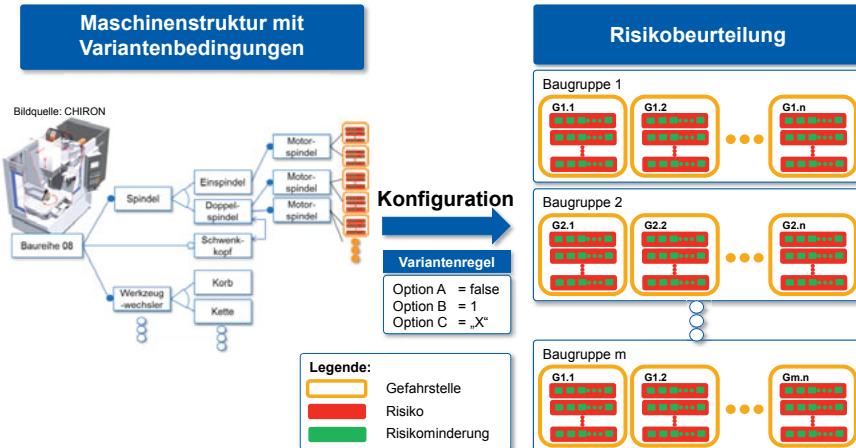


Abbildung 6-6: Erleichterung der Risikobeurteilung durch Variantenmanagement

Wichtiger Baustein ist dabei eine zu entwickelnde Modellierungssprache und eine zu bestimmende Konfigurationslogik, die es dem Maschinenhersteller ermöglichen, die sicherheits-technische Maschinenstruktur mit Variantenbedingungen für unterschiedliche Baureihen zu modellieren und zu konfigurieren. Informationen zu sicherheitsrelevanten Baugruppen einer Maschine, z. B. zu Spindeln und Linearachsen, sollen dabei aus ERP-, PLM- und CAX-Systemen gewonnen werden. Abbildung 6-7 zeigt grob die Struktur einer Werkzeugkette zur variantenübergreifenden Risikobeurteilung.

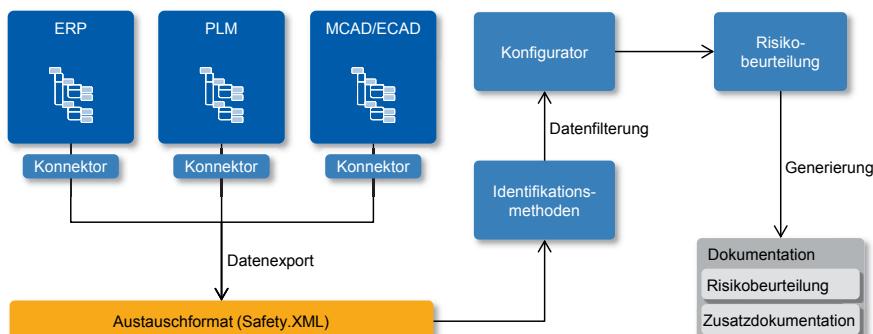


Abbildung 6-7: Konzept für die Datendurchgängigkeit zwischen den Erzeugersystemen und der Risikobeurteilung

Für die Übernahme von Daten aus Erzeugersystemen werden Konnektoren entwickelt, die Informationen in einem geeigneten Austauschformat (Safety.XML) liefern. Diese Daten müssen einer Identifikation unterzogen werden, damit nur die sicherheitsrelevanten Daten für die Risikobeurteilung verwendet werden. Für die Identifikation der Daten werden zwei Ansätze untersucht: Die A-Priori- und die A-Posteriori-Identifikation.

Ziel der A-Priori-Identifikation ist es, zu evaluieren, inwieweit eine frühzeitige Anreicherung der Quelldaten in Bezug auf die Sicherheitstechnik möglich und hilfreich ist. Die erwarteten

Vorteile liegen vor allem in einer Reduktion der Datenmenge sowie einer engeren Verzahnung von Konstruktion und Risikobeurteilung. Zunächst werden daher die ERP- und PLM-Systeme im Hinblick auf die Möglichkeiten zur Informationsanreicherung analysiert. In Bezug auf die Konstruktion wird ermittelt, welche Informationen in diesen Systemen bereitgestellt werden können. Beispielsweise ist es vorstellbar, eine Baugruppe bereits in der Konstruktionsphase als kritisch für die Sicherheit zu kennzeichnen und die Risiken und Gefahrenstellen anzuheften.

Im Fall der A-Posteriori-Identifikation ist es das Ziel, dem Anwender die aus Erzeugersystemen gewonnenen Daten sowie deren Struktur und Eigenschaften zu visualisieren. Darüber hinaus gilt es, Datenursprung und -status anzuzeigen. Zusätzlich können die visualisierten Informationen gefiltert und den sicherheitstechnischen Elementen der Maschinenstruktur zugeordnet werden.

Die durch die beschriebenen Methoden gewonnenen Daten werden innerhalb eines Konfigurationswerkzeugs verwendet, um eine Risikobeurteilung für eine gewählte Maschinenvariante zu konfigurieren. Aus der Konfiguration sollen automatisiert die Risikobeurteilungsdokumentation sowie Zusatzdokumente erzeugt werden. Die Validierung erfolgt anhand mehrerer Varianten von Werkzeugmaschinen einer Produktfamilie.

6.8 Zusammenfassung

Das Forschungsprojekt VariSafe beschäftigt sich mit dem Themenbereich der Risikobeurteilung von Maschinen. Diese richtlinienkonform durchzuführen, stellt für viele Unternehmen eine große Herausforderung dar. Gerade die Variantenvielfalt von Maschinen begründet einen großen Bedarf nach einer Methode zur effizienten Risikobeurteilung. Das Ziel des Projekts ist es, die variantenübergreifende Risikobeurteilung für die Maschinensicherheit signifikant zu erleichtern und effizient zu gestalten. Der Lösungsansatz sieht vor, dass durch die Konfiguration einer Maschine gleichzeitig auch die Risikobeurteilung konfiguriert werden kann. Die Planung einer neuen Produktfamilie soll dahingehend unterstützt werden, dass die Konformität einzelner Maschinenvarianten zur Sicherheitsnormung systematisch geprüft werden kann, ohne für jede mögliche Variante eine eigene Risikobeurteilung manuell erstellen zu müssen.

6.9 Danksagung

Dieser Beitrag entstand im Rahmen des Verbundforschungsvorhabens „Variantenübergreifende Risikobeurteilung für die Maschinensicherheit“ (VariSafe), das mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert und vom Projektrträger, dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. in Berlin (DLR) betreut wird. Die Verantwortung für den Inhalt der vorliegenden Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

6.10 Literatur

- [BREC10] Brecher, C.; Karlberger, A.; Herfs, W.: Wettbewerbsvorteile im Werkzeugmaschinenbau. Effiziente Auftragsabwicklung durch Kombination von Produktlinien-Ansatz und modellbasierter Entwicklung. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 2010, Nr. 11, S. 991–996.
- [BREC11] Brecher, C.; Herfs, W.; Karlberger, A.: Effiziente Auftragsabwicklung für individualisierte Werkzeugmaschinen durch Modellierung von Produktfamilien. In: Brecher, C. (Hrsg.): Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer. Berlin: Springer, 2011, S. 223–247.

-
- [BUND10] Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin: Entwicklung der Software GESIMA - Gestaltung sicherer Maschinen. Ratgeber für Maschinenkonstruktion veröffentlicht, 2010, Nr. 4, S. 6–7.
- [DIN11] DIN Deutsches Institut für Normung e. V. DIN ISO 12100 (2011). Sicherheit von Maschinen - Allgemeine Gestaltungsleitsätze - Risikobeurteilung und Risikominderung (ISO 12100:2010).
- [DOCU12] DOCUFY GmbH: DOCUFY Machine Safety. Version 2.0. Anwenderhandbuch, 2012.
- [EBER12] Eberhardt, O.: Die EU-Maschinenrichtlinie. Praktische Anleitung zur Anwendung der europäischen Richtlinien zur Maschinensicherheit - mit allen Richtlinientexten ; mit Berücksichtigung der neuen Richtlinie 2006/42/EG. 5. Aufl. Renningen: expert, 2012.
- [EURO06] Europäisches Parlament und der Rat der Europäischen Union: Richtlinie 2006/42/EG über Maschinen. Amtsblatt der Europäischen Union: L157/24-DE-9.6.2006, 2006.
- [IBF12] IBF Automatisierungs- und Sicherheitstechnik GmbH: Safexpert 8.1 - Produktinformation. URL: <http://www.ibf.at/fileadmin/pdf/Safexpert%208.1-Produktinformation.pdf>. [Stand: 26.03.2013].
- [KANG90] Kang, K.; Cohen, S.; Hess, J.; Nowak, W.; Peterson, S.: Feature-Oriented Domain Analysis (FODA) Feasibility Study. Report CMU/SEI-90-TR-21, 1990
- [LANG09] Lange, A.; Schulz, T.; Szymanski, H.: Umsetzung von CE-Prozessen durch neue Methoden und interaktive 3-D-Modelle. In: Reichel, J.; Müller, G.; Mandelartz, J. (Hrsg.): Betriebliche Instandhaltung. (Reihe: VDI-Buch): Springer Berlin Heidelberg, 2009, S. 165–175.
- [QZ12] QZ: Frage des Monats. In: QZ Qualität und Zuverlässigkeit, 2012, Nr. 06, S. 6.
- [SCHL13] Schlagowski, H.: Technische Dokumentation im Maschinen- und Anlagenbau. Anforderungen. 1. Aufl. Berlin, Wien, Zürich: Beuth, 2013.
- [UHLM12] Uhlmann, E.; Bell, T.; Duchstein, B.; Meister, F.; Mewis, J.; Mödden, H.: Sicherheit an Werkzeugmaschinen. In: Zeitschr. f. wirtsch. Fabrikbetrieb, 2012, 01-02, S. 33–38.

7 iWePro – Intelligente selbstorganisierende Werkstattproduktion

F. Otto, E. Uhlmann

7.1 Einleitung

Industrie 4.0 verspricht neben mehr Vernetzung, Transparenz und Intelligenz vor allem eine hohe Flexibilität in der Produktion [1, 2]. Künftig soll es möglich sein, bei stabilen Kosten auf verschiedene Produkt- und Prozessvarianten schnell und reibungsarm umzustellen. Im Idealfall sollen selbst Klein- und Kleinst-aufträge – bis hin zur viel genannten Losgröße eins – realisierbar werden, ohne dass die Produktionskosten und -zeiten stark ansteigen.

Ein Lösungsansatz wird in der Dezentralisierung der Steuerungsaufgaben und einer Selbstorganisation der Produktion gesehen [3]. In dem wissenschaftlichen Vorprojekt SOPRO „Selbstorganisierende Produktion“ [4, 5] wurden die Potenziale selbstorganisierender Strukturen in der industriellen Produktion erforscht. Aufbauend auf den Erkenntnissen aus SOPRO werden momentan im Verbundforschungsvorhaben iWePro „Intelligente selbstorganisierende Werkstattproduktion“ [6, 7] neue Lösungen zur Unterstützung der Mitarbeiter in der Produktionsplanung und -steuerung entwickelt. Das Projektkonsortium von iWePro ist mit sechs Industriepartnern und zwei akademischen Partnern besetzt.

In dem zugrunde liegenden Use-Case, der Getriebezahnradfertigung eines deutschen Automobilherstellers (Großserienfertigung), wird die starre Verkettung zwischen den einzelnen Fertigungsstufen aufgelöst. Für die entstandene Struktur wird ein neuer softwareagentenbasierter Steuerungsansatz entwickelt, welcher in Kombination mit einer zentralen Maschinenbelegungsplanung eine hohe Transparenz der Fertigung und die Möglichkeit zur schnellen Umplanung gibt. Dieser Ansatz wird im Projekt mit Hilfe einer Simulation virtuell erprobt und erfahrbar gemacht.

Schon seit langem wird in verschiedenen Produktionsbereichen versucht, flexible Fertigungsstrukturen mit der Hilfe von Softwareagenten zu steuern [8–10]. Für eine vollautomatisierten hochflexible Zylinderkopffertigung wurde bei der DaimlerChrysler AG bereits 1999 anhand einer industrietauglichen Modellanlage nachgewiesen, dass Softwareagenten auch den Anforderungen einer industriellen Produktion gewachsen sind und zu massiven Steigerungen der Flexibilität führen können. Aufgrund der hohen Kosten für die Umsetzung in der operativen Fertigung hat dieses System allerdings keine Verbreitung gefunden [11, 12].

iWePro stellt vor allem den Assistenz- und nicht den Steuerungscharakter in den Vordergrund und zielt nicht auf eine autonome Produktionssteuerung durch die Softwareagenten. Die Mitarbeiter treffen die Entscheidung zur Umplanung von Fertigungsaufträgen, das Assistenzsystem gibt Empfehlungen für diese Planungsentscheidungen und versorgt die Mitarbeiter mit allen notwendigen Informationen auf ihren Smart Devices.

7.2 Ausgangssituation

Den Use-Case von iWePro stellt eine Getriebezahnradfertigung eines großen deutschen Automobilherstellers dar. Die Zahnräder werden in drei großen Fertigungsbereichen hergestellt: Weich-, Hartbearbeitung und Härtgerei. Der werksinterne Kunde der Zahnradfertigung ist die Getriebemontage, deren Kunde ist wiederum die Endmontage der Fahrzeuge. Aus diesem Grund ist eine termingerechte Fertigung der Zahnräder ein kritischer Faktor für den Gesamterfolg eines Automobilherstellers.

Aktuelle Fertigungslinien für Zahnräder – der Name impliziert es bereits – sind in der Regel nach altbekannten Lean-Prinzipien fest verkettet realisiert. Das heißt, die Werkzeugmaschinen für die einzelnen Fertigungsschritte der Komponenten sind mit Hilfe von Rollbahnen verbunden. Die Mitarbeiter legen die Zahnräder auf eine Rollenbahn und die Werkstücke durchlaufen alle notwendigen Fertigungsschritte automatisch. Mit diesem Ansatz lassen sich große Stückzahlen gleicher oder ähnlicher Zahnräder schnell und effizient fertigen. Er stößt allerdings an seine Grenzen, sobald die Losgrößen kleiner werden und die Anzahl der Produktvarianten ansteigt. Ebenso sind die Folgen von Maschinenausfällen bei fest verketteten Maschinen größer als ohne die Verkettung. Tritt eine Störung an einer Maschine auf, ist die gesamte Fertigungslinie blockiert. Weiterhin bestimmt der Fertigungsschritt mit der längsten Dauer den Takt der gesamten Linie. Somit ist ein Teil der Werkzeugmaschinen ggf. nicht voll ausgelastet.

Die beschriebenen Nachteile dieser Fertigungslinien kann man umgehen, indem man die Verkettung auflöst und auf eine Fertigung nach dem Werkstattprinzip umstellt (siehe Abbildung 7-1).

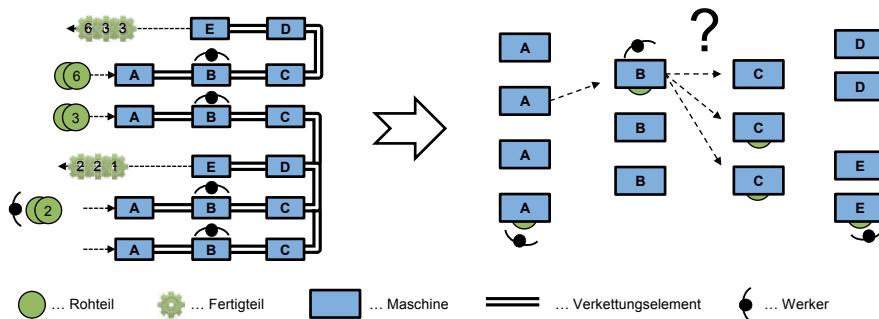


Abbildung 7-1: Aufhebung der Verkettung

Dabei werden Maschinen für gleiche Fertigungsaufgaben örtlich gruppiert, z. B. mehrere Drehmaschinen zu einer Drehmaschinengruppe. Damit wird der Weg der Zahnräder durch die Fertigung (welche Maschine in der jeweiligen Maschinengruppe gewählt wird) flexibel. Die Reihenfolge der Bearbeitungsschritte kann bei Bedarf ebenfalls variabel gestaltet werden. Im Use-Case von iWePro ist Letzteres allerdings nicht möglich, z. B. kommt bei der Fertigung eines Zahnrades zwangsläufig das Drehen vor dem Fräsen, vor der Hartbearbeitung immer die Härtetei. Weiterhin können in einer Fertigung nach dem Werkstattprinzip Maschinengruppen für verschiedene Fertigungsaufgaben unterschiedlich groß ausgelegt und zeitintensivere Bearbeitungsschritte mit mehr Kapazitäten (z. B. mit einer Werkzeugmaschine mehr) ausgestattet werden. Flexibilität und Auslastung des Maschinenparks werden dadurch in der Regel erheblich verbessert.

Durch den Wegfall der Verkettung zwischen den Maschinen müssen die Werkstücke auf eine andere Art von Fertigungsschritt zu Fertigungsschritt transportiert werden. In dem in iWePro betrachteten Use-Case wird dieses mit Hilfe von Bodenrollern realisiert, auf denen sechs bis zehn Körbe mit jeweils vier bis zehn Zahnrädern übereinander gestapelt werden (siehe Abbildung 7-2, rechts). In diesem Beitrag werden diese Bodenroller mit aufliegenden Körben mit bis zu 100 Zahnrädern als „Korbstapel“ bezeichnet.

Jede Werkzeugmaschine wird mit einem Beladeportal mit jeweils drei Stapelplätzen ausgestattet (siehe Abbildung 7-2, links). Der Korbstapel wird für die Bearbeitung in das Beladeportal geschoben; ein Handlingsystem kümmert sich um den Transport der einzelnen Zahnrä-

der in die eigentliche Werkzeugmaschine hinein bzw. aus dieser zurück zum Korbstapel. Dabei wird immer von einem Stapelplatz entnommen (unbearbeitet) und auf einen zweiten gestapelt (fertig bearbeitet). Der dritte Stapelplatz enthält den Korb-stapel, der als nächstes bearbeitet werden soll (siehe Abbildung 7-2, rechts). Nachdem alle Zahnräder eines Korbstapels fertig bearbeitet sind, wird dieser durch die Mitarbeiter aus dem Beladeportal entnommen und zum Puffer des nächsten Fertigungsschrittes geschoben. Die beschriebenen hauptzeitparallelen, automatischen Stapelwechsel der Beladeportale, helfen die Maschinenauslastungen zu maximieren und die Durchlaufzeiten der Korbstapel zu minimieren.

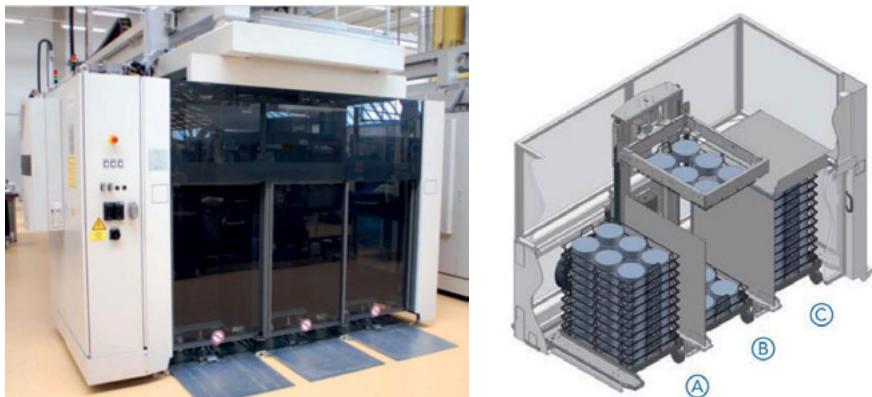


Abbildung 7-2: Beladeportal mit eingeschobenen Korbstapeln [13]

Durch die Aufhebung der Verkettung entsteht ein dynamisches Prozessnetz welches sehr abstimmungsintensiv ist. Damit es beherrschbar bleibt, muss sichergestellt sein, dass alle Beteiligten zu jeder Zeit den Überblick behalten. Zudem muss in einer Werkstattfertigung eine intelligente Planungs- und Steuerungsmethode einen zuverlässigen Produktionsdurchlauf gewährleisten. Sonst könnten Bearbeitungsschritte vergessen werden oder ein Auftrag könnte auf halbem Weg in der Produktion stecken bleiben, da er an einer Bearbeitungsstation wiederholt im Interesse dringenderer Aufträge zurückgestellt wurde.

In klassischen, fest verketteten Fertigungsstrukturen erstellen zentrale Planungssysteme einen global optimierten Belegungsplan. Das Adjektiv global weist hierbei darauf hin, dass die gesamte Fertigung mit allen Maschinen und zu fertigenden Aufträgen betrachtet und optimiert wird. Das Ergebnis eines zentralen Planungssystems ist fix und geht davon aus, dass keine oder nur geringe Störungen auftreten. Nach einer größeren Störung einer Maschine ist die Planung wertlos; plötzlich hinzukommende Eilaufträge oder andere unvorhersehbare Ereignisse lassen jede zuvor getätigte Planung hinfällig werden. Weiterhin ist die Vermittlung des Plans an die Produktionsmitarbeiter zeitintensiv und unflexibel: Sie erfolgt in Einsatzbesprechungen, meist zu Beginn einer Schicht. Spätere Änderungen, die sich aus Umlanplanungen ergeben, verursachen zusätzlichen Besprechungsbedarf.

Hinzu kommt, dass bei der Aufhebung der Verkettung die Freiheitsgrade in der Belegungsplanung um Größenordnungen anwachsen. Zentrale Fertigungsplanungssysteme stellen schon bei verketteten Anlagen hohe Anforderungen an die Hardware der verwendeten PCs. Wie gut zentrale Planungssysteme mit diesen neuen Herausforderungen umgehen können, muss sich zeigen.

7.3 Projekt iWePro

7.3.1 Konzept

Für eine flexible Prozessgestaltung, in einer nach dem Werkstattprinzip organisierten Fertigung, sind die in der Ausgangssituation beschriebenen Vorgehensweisen zur Produktionsplanung und -steuerung zu starr; herkömmliche Optimierungsverfahren drohen zu scheitern. iWePro entwickelt einen flexibleren Ansatz und will durch Dezentralisierung die stark angestiegene Komplexität und das scheinbare Chaos beherrschbar machen. Dazu wird ein modernes Tool zur zentralen Maschinenbelegungsplanung (globale Optimierung) mit einem dezentralen agentenbasierten Steuerungsansatz (lokale Optimierung) zu einem umfassenden Assistenzsystem für die Mitarbeiter der Fertigung kombiniert (siehe Abbildung 7-3).

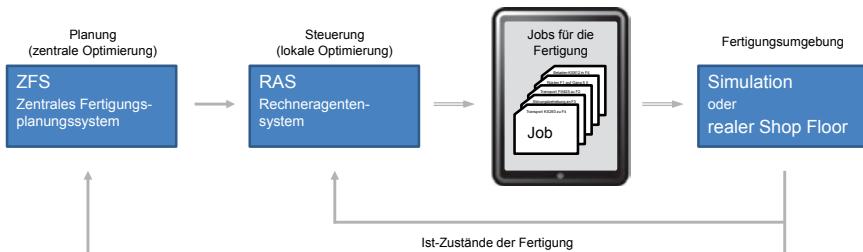


Abbildung 7-3: Ansatz iWePro

Um das Assistenzsystem in den vielen denkbaren Konfigurationen eines realen Shop Floors (Flexibilität der Maschinen, Maschinenmengengerüst, Layout, Anzahl und Organisation der Mitarbeiter, etc.) erproben zu können, wird mit einer Simulation des Shop Floors gearbeitet. Der Test des Assistenzsystems in einer realen Shop Floor Umgebung wäre zu personal- und kostenintensiv; letztendlich auch zu unflexibel um die diversen geplanten Versuche durchzuführen.

Die Mitarbeiter auf dem Shop Floor werden mit Smart Devices ausgestattet mit denen das Assistenzsystem genutzt werden kann. In dem gemischten Planungs- und Steuerungsansatz von iWePro plant die Fertigungsleitung zunächst wie gewohnt mittels des Zentralen Fertigungsplanungssystems (ZFS) die Maschinenbelegung. Diese wird digital an das Rechneragentensystem (RAS) weitergeleitet, welches für die einzelnen Mitarbeiter individuelle Job-Listen auf ihren Smart Devices generiert (siehe Abschnitt 7.3.4, Abbildung 7-4, links) und sie mit allen notwendigen Informationen zum aktuellen Zustand der Fertigung und Planung versorgt. Weiterhin können die Mitarbeiter mit Hilfe des Assistenzsystems die Maschinenbelegung selbstständig und intuitiv ändern. Eine erneute globale Optimierung der Belegungsplanung durch das ZFS wird bei Bedarf vorgenommen und sofort in das RAS übernommen.

Weiterhin ist im Konzept von iWePro ein Transportmanagementsystem (TMS) für die Unterstützung bei der Logistik vorgesehen. Im Use-Case der Zahnrädfertigung werden zwei Kategorien von Transporten der Korbstapel unterschieden. Zum einen gibt es die kurzen Wege in der Weich- und Hartfertigung von Maschine zu Maschine und zum anderen die jeweils langen Wege zwischen Umpackbereich, Weichbearbeitung, Härterei, Hartbearbeitung und End-of-line-Puffer. Letztere sollen durch ein intelligentes Transportmanagementsystem geplant und durchgeführt werden. Dabei entscheidet es selbstständig durch welche Transportmittel wann transportiert wird, welche Mitarbeiter die Transporte durchführen und ob z. B. Züge aus meh-

eren Korbstapeln gebildet werden sollen. Die vom TMS generierten Transportjobs werden in einem eigenen User Interface (UI) angezeigt.

Um die vier beschriebenen Teilsysteme (ZFS, RAS, Simulation und TMS) miteinander und mit der zentralen Datenbank zu verbinden wird im Projekt eine auf Webservices basierende Middleware entwickelt. Diese wird als „Service Layer“ bezeichnet. Er bietet eine Triggerfunktionalität durch welche relevante Objekte im System – z. B. bestimmte Softwareagenten oder ganze Teilsysteme – über Änderungen in der Datenbank informiert werden können. Dabei melden sich die Objekte, die über Änderungen informiert werden wollen beim Service Layer auf die sie interessierenden Felder in der Datenbank an. Alternativ müssten die Objekte zyklisch die sie interessierenden Felder der Datenbank abfragen (sogenanntes Polling). Bei der großen Anzahl zu erwartender Objekt in der Simulation würde der Service Layer überlastet. Abbildung 7-4 zeigt eine Übersicht der Teilsysteme von iWePro und die Daten- und Informationsflüsse zwischen diesen.

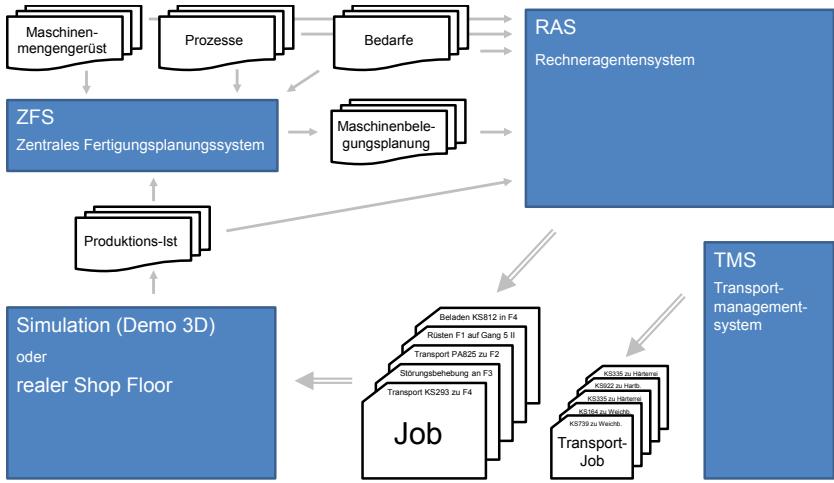


Abbildung 7-4: Daten- und Informationsflüsse in einer Fertigung mit dem Assistenzsystem

In dieser Abbildung wurden Service Layer und Datenbank aus Gründen der Übersicht weggelassen. Sie werden durch Stapel von Datenbanksätzen repräsentiert (z. B. die Bedarfe oder die Maschinenbelegungsplanung). Weiterhin erhebt diese Darstellung keinen Anspruch auf Vollständigkeit und stellt nur eine Auswahl der wichtigsten Daten- und Informationsflüsse dar.

In einer Werkstattfertigung werden unterstützt durch das neuartige Assistenzsystem Informationstransparenz und Dezentralisierung der Prozessverantwortlichkeit bei einer hohen Flexibilität ermöglicht. Dabei stehen die Mitarbeiter auf dem Shop Floor im Mittelpunkt: Sie sind es, die dafür sorgen, dass ein Werkstück termingerecht durch die Fertigung geleitet wird.

7.3.2 Rechneragentensystem

Softwareagenten sind autonom agierende mit ihrer Umwelt kommunizierende Programme, die Ziele verfolgen, welche ihnen durch den Programmierer vorgegeben werden [14, 15]. Sie finden in vielen verschiedenen Bereichen Anwendung [16] vor allem dann, wenn Prozesse automatisiert werden sollen [17–19] oder die Fragestellungen von sich aus eine Simulation von vielen autonomen Intelligenzen impliziert (z. B. Simulationen von Menschen oder Verkehr [20]).

Im RAS werden Werkzeugmaschinen, Korbstapel und weitere Ressourcen jeweils durch einen Software-agenten repräsentiert. Steht für ein Werkstück der nächste Fertigungsschritt an, bittet dessen Softwareagent alle Maschinenagenten um ein Angebot für eine mögliche Fertigung. Angebote der Werkzeugmaschinenagenten enthalten unter anderem die zu erwartenden Fertigungskosten, frühestmögliche Bearbeitungsstartzeiten und eventuelle Notwendigkeiten zur Umrüstung für die Fertigung des anfragenden Zahnrades.

Wie bereits erwähnt, hat das RAS nicht den Anspruch, die Maschinenbelegungsplanung mit seiner dezentralen Intelligenz autonom global optimal zu steuern. Eine bestmögliche Entscheidungsunterstützung wird angestrebt. Die global optimale Maschinenbelegungsplanung – oder zumindest eine die dieser nah ist – wird durch das ZFS bereitgestellt. Grundsätzlich versucht das RAS die Planung des ZFS nachzufahren indem die Jobs und Empfehlungen auf den Smart Devices entsprechend der Maschinenbelegungsplanung des ZFS angezeigt werden. Planen die Mitarbeiter um, tritt eine Störung auf oder driftet die Maschinenbelegung auf dem Shop Floor zu stark von der ZFS-Planung weg, gibt das RAS ggf. davon abweichende Empfehlungen. Liegt keine aktuelle Planung mehr vor, werden auktionsbasiert die jeweils am besten geeigneten Maschinen für den nächsten Arbeitsschritt ermittelt. Allerdings wird in diesem Fall angestrebt, dass so schnell wie möglich eine neue globale Optimierung durch das ZFS vorgenommen wird und der resultierende Maschinenbelegungsplan ins RAS übernommen werden kann.

Die im vorherigen Absatz erwähnte Fertigungssteuerung durch das RAS ohne eine aktuell gültige (bzw. durch das RAS interpretierbare) Maschinenbelegungsplanung des ZFS soll in iWePro ebenfalls erprobt werden. Könnte man die Fertigung auch gänzlich ohne ZFS, rein dezentral zuverlässig steuern? Die Agenten der Korbstapel führen Auktionen mit den Maschinenagenten durch; sie bitten diese um Angebote für die Fertigung und wählen das für sie optimal erscheinende Angebot aus. Kriterien dabei sind zunächst zu erwartende Fertigungskosten, Zeitdauer bis die Maschine verfügbar ist und ob ein Umrüsten für die Fertigung des jeweiligen Korbstapels notwendig ist. Diese Informationen sind in den Angeboten der Maschinenagenten enthalten. Bei dieser recht einfachen Logik ist zu befürchten, dass einzelne Korbstapel zufällig – durch viele für sie ungünstige Entscheidungen – deutlich länger brauchen als andere. Ein Fertigungsauftrag besteht in der Regel aus mehreren Korbstapeln und zur termingerechten Erfüllung eines Fertigungsauftrages gehören alle Korbstapel. Wenn nun z. B. 19 von 20 Korbstapeln fertig bearbeitet im End-of-line-Puffer stehen aber der letzte noch nicht fertig gehärtet ist, gibt es ein Problem. Deswegen werden Korbstapeln und Bedarfen Prioritäten zugeordnet und diese wenn notwendig angepasst um Reihenfolgen zu verändern. Weiterhin kommen im RAS verschiedene Agenten zum Einsatz, die dafür Sorge tragen, dass jeder Korbstapel möglichst termingerecht und aufwandsarm durch die Fertigung gesteuert wird:

Der *Bedarfssagent* repräsentiert einen Bedarf der Montage, der in der Regel aus mehreren Korbstapeln besteht, einen vorgegebenen Liefertermin und eine Priorität besitzt. Er überwacht kontinuierlich, dass alle Korbstapel, die zu ihm gehören, möglichst dicht zusammen bleiben also kein Korbstapel, wie im vorhergehenden Absatz beispielhaft beschrieben, weit in der Fertigung zurück bleibt. Der Bedarfssagent hat die Berechtigung, die Prioritäten der Korbstapel zu modifizieren. Hängt bspw. ein Korbstapel im Grad seiner Fertigstellung weit zurück im Vergleich zu den anderen in seinem Bedarf, wird seine Priorität erhöht. Ist er allen anderen voraus, kann es sinnvoll sein, ihn niedriger zu priorisieren.

Der *Pufferagent* repräsentiert einen Puffer auf dem Shop Floor. Vor den Maschinengruppen, die für jeweils einen Fertigungsschritt zuständig sind, befinden sich Puffer in denen Korbstapel abgestellt werden, bis ihr Fertigungszeitpunkt gekommen ist. Weitere Puffer befinden sich direkt vor den einzelnen Maschinen und an den Ein- und Ausgängen der drei großen Fertigungsbereiche Weichbearbeitung, Härtung und Hartbearbeitung. Alle Puffer können aktiv verwaltet werden. Grundsätzlich wird nach dem Prinzip first in, first out (FIFO) vorgegangen: die Korbstapel, werden nach der Reihenfolge ihrer Ankunft im Puffer weiter geleitet. Kommt

ein Korbstapel in einen Puffer, in dem schon einer oder mehrere Korbstapel stehen, vergleicht der jeweilige Pufferagent dessen Priorität mit denen der anderen. Ggf. wird dann die Reihenfolge der Weiterleitung der Korbstapel im Puffer modifiziert. Ein hoch priorisierter Korbstapel kann so andere überholen.

Der *Rüstoptimierungsagent* hat das Ziel, Umrüstvorgänge zu vermeiden. Das Umrüsten einer Maschine für die verschiedenen Zahnräder ist im Use-Case immer wieder notwendig. Da es nicht nur Maschinen und Mitarbeiter für einen gewissen Zeitraum blockiert und nur von erfahrenen und qualifizierten Mitarbeitern durchführbar ist, wird angestrebt so wenig wie möglich um zu rüsten. Der Rüstoptimierungsagent betrachtet aktuell und zukünftig zu fertigende Bedarfe und Korbstapel, analysiert gegenseitige Beeinflussungen und plant ggf. einzelne Korbstapel um, um unnötiges Rüsten zu vermeiden.

7.3.3 Ziele

Neben Ziel A, der Konzeption und prototypischen Implementierung des beschriebenen Assistenzsystems hat iWePro noch drei weitere Ziele.

Ziel B: Schaffen einer Simulationsumgebung, die ein virtuelles Fertigen von realen Montagebedarfen ermöglicht. Es sollen Simulationsläufe durchgeführt werden, um Einflüsse von verschiedenen Layouts, Maschinenmengengerüsten, Maschinenflexibilität und Steuerungsstrategien etc. ab zu schätzen. In Abschnitt 7.3.6 werden die Simulationsläufe thematisiert.

Ziel C: Das Assistenzsystem soll erlebbar sein. Hierfür wird der sog. Hybride Demonstrator im Projektverlauf aufgebaut. Er kombiniert eine aufwendige Simulation der Zahnrädfertigung mit vielfachen physischen Interaktionsmöglichkeiten. Somit können z. B. erfahrene Fertigungsmitarbeiter noch intensiver in die Systemgestaltung integriert und das Assistenzsystem soweit wie möglich auf die Bedürfnisse der potentiellen Nutzer abgestimmt werden. Der Hybride Demonstrator wird in Abschnitt 7.3.7 vorgestellt.

Ziel D: Erwartungen und Ängste der Mitarbeiter aufnehmen, Änderungen der Rollen und Kompetenzanforderungen an die Mitarbeiter identifizieren und die Entwicklung eines Ausbildungs- und Einführungskonzeptes für das beschriebene Assistenzsystem. Diese Themengebiete werden durch ein renommiertes soziologisches Forschungsinstitut im Projektkonsortium bearbeitet und in folgenden Veröffentlichungen näher thematisiert.

7.3.4 Smart Devices und User Interface

Die Maschinenbelegungsplanung mit dem ZFS wird an einem möglichst leistungsfähigen PC durch die Fertigungssleitung vorgenommen und automatisiert zum RAS übertragen. Auf den Smart Devices werden je nach Situation auf dem Shop Floor individuelle Job-Listen erstellt und den Mitarbeitern angezeigt (siehe Abbildung 7-5, links). Diese wählen sich die Jobs aus, die sie erledigen werden. Die Kollegen sehen die Übernahme des Jobs dann auf ihren Smart Devices angezeigt.

Die individuellen Job-Listen orientieren sich zwar an der zentralen Maschinenbelegungsplanung, reichern diese allerdings mit weiteren Informationen an. Vor jedem Fertigungsschritt fragt der Softwareagent des Korbstapels die Softwareagenten der für den jeweiligen Fertigungsschritt geeigneten Maschinen an. Zurückhaltene Angebote werden durch das Assistenzsystem in Verbindung mit der zentralen Maschinenbelegungsplanung des ZFS zu Systemempfehlungen kombiniert und den Mitarbeitern auf den Smart Devices zur Verfügung gestellt (siehe Abbildung 7-5, rechts).

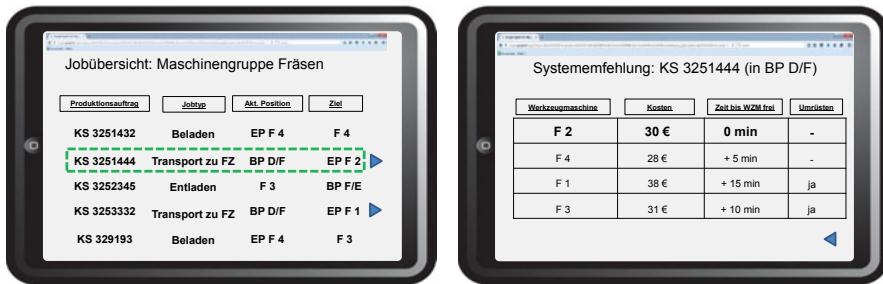


Abbildung 7-5: UI für die Mitarbeiter - Jobübersicht (links), Systemempfehlungen für Maschinenbelegung (rechts)

Die Liste der Systemempfehlungen wird durch das RAS so sortiert, dass die aus seiner Sicht sinnvollste Alternativmaschine ganz oben steht.

Die Smart Devices bieten den Mitarbeitern weiterhin eine schematische Darstellung des Shop Floors (siehe Abbildung 7-6), Listen mit umfassenden Informationen zu allen Aufträgen, Korbstapeln, Werkzeugmaschinen, Puffern, Vorrichtungen in der Fertigung, eine Detailsicht zur Härtetei und eine Übersicht der Key Performance Indicators (KPI) der Fertigung.

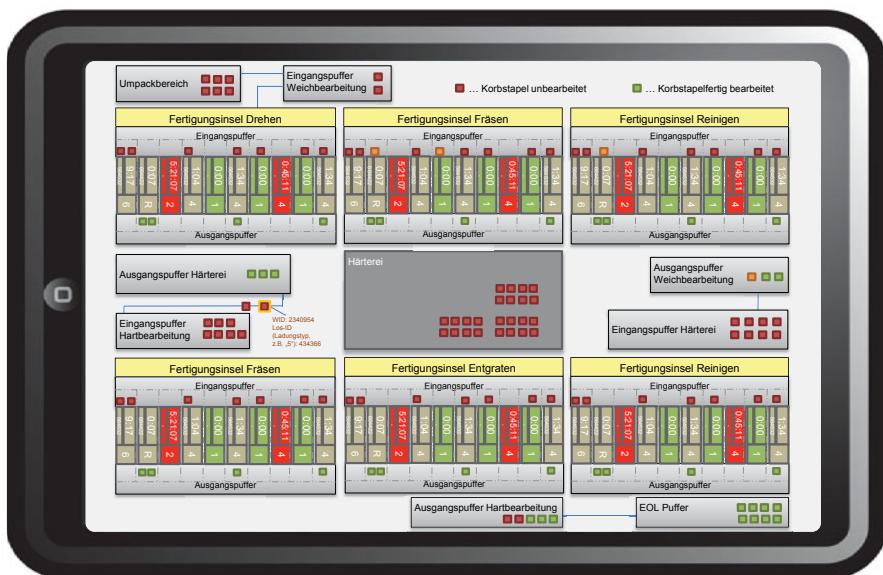


Abbildung 7-6: UI für die Mitarbeiter - Schematische Darstellung des Shop Floors

Eine weitere praktische Funktion der Smart Devices wird durch die integrierte NFC-Leseeinheit (engl. Near Field Communication - NFC) ermöglicht. Sie kann die elektronischen Transponder (sog. RFID-Tags) der Korbstapel lesen und somit Informationen zu deren Inhalt, Status und nächstem Bestimmungsort auf dem Smart Device anzeigen. Nicht nur Korbstapel sondern auch Werkzeuge, Vorrichtungen, bestimmte Arbeitsplätze und andere Objekte in der

Fertigung können RFID-Tags tragen. Viele sinnvolle Anwendungsszenarien sind hiermit umsetzbar.

7.3.5 Systemarchitekturen und Teilsysteme

Den Projektzielen entsprechend ergeben sich für die iWePro-Systemarchitektur drei aufeinander aufbauende Varianten. Die grundlegende Systemarchitektur I (siehe Abbildung 7-7) bildet die Basis für eine reine Simulation der Getriebefertigung und ist zum Erreichen von Projektziel A und B notwendig.

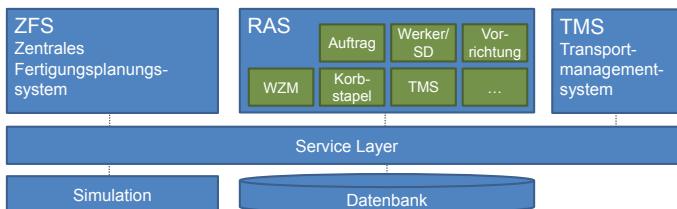


Abbildung 7-7: Systemarchitektur I - Simulationsläufe (siehe Abschnitt 7.3.6)

Im Einzelnen handelt es sich um die folgenden sechs Teilsysteme:

- ZFS – Zentrales Fertigungsplanungssystem: Dieses Teilsystem berechnet zentral eine global optimale Maschinenbelegungsplanung für mehrere Tage bis Wochen. Eingangsdaten hierfür sind u. A. die Materialbedarfe der Montage, die Fertigungsprozesse, das Maschinenmengengerüst, die Flexibilität der Maschinen und die Stückzeiten.
- RAS – Rechneragentensystem: die zentrale, steuernde Instanz von iWePro. Hier sind alle relevanten Objekte des Shop Floors als Softwareagenten repräsentiert, verhandeln miteinander die jeweils nächsten anstehenden Schritte und versorgen die Simulation mit Fertigungsjobs.
- Simulation: Die Shop Floor Simulationssoftware Demo 3D setzt die Jobs aus dem RAS virtuell um und schreibt Statusänderungen aller Ressourcen über den Service Layer in die Datenbank. Sie ermöglicht eine Erprobung der Fertigung nach den neuen Paradigmen ohne einen realen Shop Floor und somit zu überschaubaren Kosten.
- Datenbank: SQL-basiert werden hier alle Stammdaten und aktuelle Status der Ressourcen auf dem Shop Floor (bzw. in der Simulation) gespeichert. Eine Historie der Statusänderungen für die KPI-Berechnung findet sich ebenfalls.
- Service Layer: Diese zentrale – auf Webservices basierende – Middleware verbindet alle Teilsysteme miteinander und mit der Datenbank. Die in Architektur II und III hinzukommenden physischen Objekte werden ebenfalls über den Service Layer angebunden. Weiterhin bietet er eine Triggerfunktionalität. Durch sie werden relevante Objekte im System – z. B. bestimmte Softwareagenten oder ganze Teilsysteme – über Änderungen in der Datenbank informiert ohne diese zyklisch abfragen zu müssen (sogenanntes Polling). Dabei melden sich die Objekte, die über Änderungen informiert werden wollen beim Service Layer auf die sie interessierenden Felder in der Datenbank an.
- TMS – Transportmanagementsystem: Im Use-Case der Zahnradfertigung werden in iWePro zwei Kategorien von Transporten der Korbstapel unterschieden. Zum einen

gibt es die kurzen Wege in der Weich- und Hartfertigung von Maschine zu Maschine und zum anderen die jeweils langen Wege zwischen Umpackbereich, Weichbearbeitung, Härterei, Hartbearbeitung und End-of-line-Puffer. Letztere werden durch ein intelligentes Transportmanagementsystem geplant und durchgeführt. Dabei entscheidet es selbstständig durch welche Transportmittel wann transportiert wird, welche Mitarbeiter die Transporte durchführen und ob z. B. Züge aus mehreren Korbstapeln gebildet werden sollen.

Architektur II (siehe Abbildung 7-8) liegt dem Hybriden Demonstrator (siehe Abschnitt 7.3.7) zugrunde.

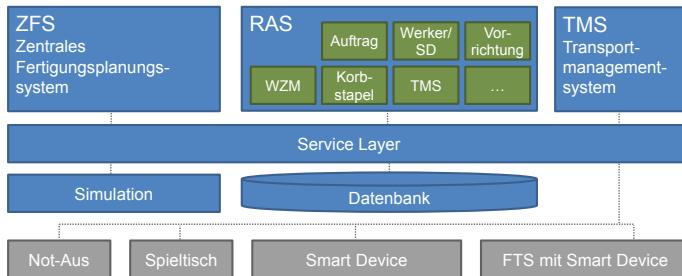


Abbildung 7-8: Systemarchitektur II - Hybrider Demonstrator (siehe Abschnitt 7.3.7)

In ihr kommen vier physische Interaktionsobjekte hinzu:

- Smart Devices: Z. B. Tablets zeigen exakt das User Interface (UI) an, welches später auch den Mitarbeitern auf dem Shop Floor zur Verfügung steht (siehe Abschnitt 7.3.4).
- Spieltisch: Ein RFID-Reader mit vier Antennen in einer Einhausung aus Plexiglas und ein miniaturisierter Korbstapel bilden den sog. Spieltisch. Der miniaturisierte Korbstapel wird mit einem RFID-Tag beklebt und kann damit jeweils genau eine der vier Antennen aktivieren. Die Antennen repräsentieren vier alternative Werkzeugmaschinen in der Simulation und bieten den Probanden die Möglichkeit Entscheidungen eines Mitarbeiters in der Simulation selber zu fällen und somit in die Simulation einzutragen.
- Not-Aus: Ein Not-Aus-Knopf erlaubt es den Probanden eine Maschine in der Simulation in einen Störungszustand zu versetzen. Somit kann demonstriert werden, wie das Assistenzsystem mit solchen Situationen umgeht.
- Fahrerloses Transport System (FTS): Ein selbstfahrender Transportwagen bewegt sich entsprechend der Vorgaben des TMS. Über den Service Layer sind TMS, Assistenzsystem und ein Smart Device, welches das UI des TMS anzeigt, miteinander gekoppelt. Für die Probanden wird die Arbeit mit dem TMS erfahrbar.

Architektur III (siehe Abbildung 7-9) ist für den Einsatz auf dem realen Shop Floor notwendig. Sie wird in iWePro nicht direkt zum Einsatz kommen, ist aber ein wichtiges Instrument um nicht aus dem Blick zu verlieren, dass zwar ein Prototyp entwickelt wird aber das Fernziel ein operativer Einsatz ist.

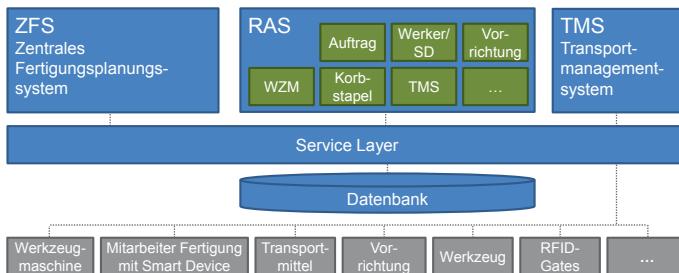


Abbildung 7-9: Systemarchitektur III - realer Shop Floor

In diesem Fall entfällt die Simulation; sie ist genaugenommen nur ein Werkzeug um die Ziele von iWePro erreichen zu können. Gleichzeitig kommen viele neue physische Objekte ins Spiel. Alles was vorher simuliert wurde existiert nun wirklich; z. B. sind die simulierten Werkzeugmaschinen, Mitarbeiter und Korbstapel in diesem Fall ganz real vorhanden und müssen über den Service Layer mit den anderen Komponenten gekoppelt werden. Selbiges gilt z. B. für RFID-Gates, Smart Devices, Transportmittel und Vorrichtungen.

7.3.6 Simulationsläufe

Die Simulation mit Demo 3D ermöglicht das Erfahren und Erproben des Assistenzsystems im Hybriden Demonstrator (siehe Abschnitt 7.3.7) aber auch das rein digitale simulierte Fertigen von realen Montagebedarfen. Für die Simulationen können verschiedenste Szenarien z. B. aus Steuerungsansätzen, Fertigungsstrukturen, Montageprogrammen und Maschinenmengengerüsten (Anzahl und Flexibilität der Werkzeugmaschinen) und verfügbarem Personal kombiniert werden. Abbildung 7-10 zeigt das Beispiel einer Szenariomatrix. In ihr erhält jede Kombination nach durchgelaufener Simulation eine Bewertung (hier als Ampelfarben angedeutet) und kann somit für eine spätere Auswahl von geeigneten Kombinationen der diversen Eigenschaften verwendet werden.

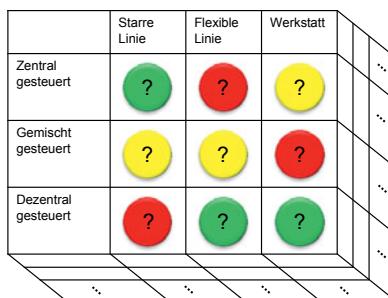


Abbildung 7-10: Szenariomatrix [7]

Unter anderem sollen die folgenden Fragen beantwortet werden: Welcher Aufwand entsteht durch die angestrebte erhöhte Flexibilität? Mit welchen Personalbedarfen ist zu rechnen? Ist sichergestellt, dass alle Aufträge zu ihren vorgegebenen Terminen fertiggestellt werden?

Bei den Simulationsläufen werden KPI (z. B. Maschinenauslastung, Personalauslastung, Work in Progress, Overall Equipment Efficiency) berechnet und ermöglichen somit Abschätzungen bzgl. späterer realer Fertigungslinien und einer Auslegung dieser.

Ein großer Vorteil der Simulationsläufe ist, dass diese gegenüber der Realität beschleunigt und parallel durchgeführt werden können. Wie stark die Simulationsläufe letztendlich beschleunigt werden können, ist zu erproben. Ab einem bestimmten Beschleunigungsfaktor wird das Simulationssystem aus ZFS, RAS, Service Layer, Datenbank und Demo 3D an seine Grenzen stoßen. Dabei ist zu beachten, dass Verhandlungen der Agenten und die zentrale Fertigungsplanung nicht beschleunigt werden können. Hierin liegt ein Fehlerpotential des Vergleiches der Simulation mit der Realität. Eine Neuplanung der Maschinenbelegung, die in Echtzeit angenommen zehn Minuten dauert, nimmt in einer um den Faktor 50 beschleunigten Simulation 500 Minuten ein. Somit wäre für die simulierte Fertigung eine komplette Achtstundenschicht keine aktualisierte zentrale Planung verfügbar. Für diese Problemstellung muss eine Lösung gefunden werden.

7.3.7 Hybrider Demonstrator

Der in iWePro geplante tiefgreifende Paradigmenwechsel auf verschiedenen Ebenen (unter anderem die Produktionsplanung und -steuerung mit erhöhter Ungewissheit und Eigenverantwortung, die umgestellte Organisation der Teams sowie neue User Interfaces) provoziert geradezu die Frage nach der Akzeptanz durch die Mitarbeiter. Werden die neuen Ansätze und Methoden auf dem realen Shop Floor später so gelebt wie intendiert? Hierzu wurde das Konzept des Hybriden Demonstrators entwickelt. Er ermöglicht das Erfahren und Erproben einer Fertigung nach den iWePro-Konzepten. Dazu wird eine aufwendige Simulation der Zahnradfertigung mit Hilfe der Software Demo 3D mit dem Assistenzsystem und physischen Interaktionsmöglichkeiten gekoppelt (siehe Abbildung 7-11).



Abbildung 7-11: Hybrider Demonstrator

Die Probanden nehmen im Hybriden Demonstrator die Rollen eines Mitarbeiters auf dem Shop Floor ein. In der Simulation ist dieser durch eine andere Einfärbung als die durch den Computer gesteuerten anderen Mitarbeiter identifizierbar. Auf einem Smart Device werden die jeweils in der Simulation zu erledigenden Jobs angezeigt. Die Probanden wählen die Jobs

im UI aus und der virtuelle Mitarbeiter erledigt diese. Dabei kommt der sog. Spieltisch zum Einsatz. Hat das Assistenzsystem z. B. Fräsmaschine 3 für den nächsten Job empfohlen, wird der Proband, nachdem er den Job angewählt hat, aufgefordert, den Korbstapel an die Maschine zu bewegen. Nachdem der Proband sich für eine Maschine entschieden und mittels des miniaturisierten Korbstapels die entsprechende RFID-Antenne aktiviert hat, schiebt sein virtuelles Ebenbild in der Simulation den Korbstapel an die entsprechende Maschine. Schiebt ein Proband den Korbstapel an eine andere Maschine als die, die empfohlen wurde, dann will er diesen Korbstapel entweder umplanen oder er tut es ausversehen. Das Assistenzsystem weist den Probanden im UI darauf hin und fragt, ob wirklich eine Umplanung vorgenommen werden soll.

Weiterhin wird ein Not-Aus-Knopf mit der Simulation verbunden. Mit diesem können die Probanden eine Maschine in der Fertigung in den Status „Störung“ versetzen. Somit wird erfahrbar, wie sich das Assistenzsystem in der Realität in verschiedenen, typischen Situationen verhält. Letztendlich ist auch ein Smart Device des TMS in den Hybriden Demonstrator integriert und kann ausprobiert werden.

Das geplante Assistenzsystem soll in einem partizipativen Entwicklungsprozess zusammen mit den späteren Nutzern gestaltet werden. In der frühen Phase von iWePro fanden Workshops und Expertendiskussionen mit den potentiellen Nutzern statt. Prototypen in verschiedenen Stadien sollten mit Hilfe des Hybriden Demonstrators zusammen erprobt werden, um Erfahrungen zu sammeln, eventuelle Schwachstellen aufzudecken und ggf. Modifikationen vornehmen zu können.

7.4 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Artikel wurde das Verbundforschungsvorhaben iWePro „Intelligente selbstorganisierende Werkstattproduktion“ [6, 7] vorgestellt. Für eine nach dem Werkstattprinzip ausgelegte Zahnradfertigung entsteht im Projekt ein agentenbasiertes Assistenzsystem, welches neben umfassender Transparenz ein intuitives Umplanen der Maschinenbelegung durch die Mitarbeiter realisiert. Während die Initialplanung durch ein zentrales, global optimierendes Fertigungsplanungssystem durchgeführt wird, übernimmt das RAS die Kommunikation der Planung an die Mitarbeiter und gibt Empfehlungen für Umplanungen z. B. bei einer Maschinenstörung oder wenn der Plan des zentralen Fertigungsplanungssystems nicht mehr einhaltbar ist.

Menschen, Werkstücke, Maschinen und weitere Ressourcen auf dem Shop Floor kommunizieren und kooperieren mit der Hilfe von Softwareagenten miteinander. Gleichzeitig sind produktionsbezogene Informationen auf dem Smart Devices zu jedem Zeitpunkt verfügbar und werden an jedem Ort situations- und aufgabengerecht dargestellt. Die Mitarbeiter können umfassend und effizient über Auftragsdaten, aktuelle Belegungspläne und weiteres informiert und mithilfe des Assistenzsystems in die Steuerung des Produktionsablaufs eingebunden werden.

In dem betrachteten Use-Case einer Zahnradfertigung eines Automobilherstellers wird überlegt, zukünftig von der starren Verkettung zwischen den einzelnen Fertigungsschritte weg, hin zu einer werkstattorientierten Fertigung überzugehen. Dazu wurde das beschriebene Assistenzsystem gemeinsam mit den zukünftigen Nutzern konzipiert; es wird momentan implementiert und soll durch den Hybriden Demonstrator (siehe Abschnitt 7.3.7) erfahrbar gemacht werden. Während mit Hilfe des Hybriden Demonstrators das Assistenzsystem erfahrbar gemacht werden soll und vor allem die Fragen der Mitarbeiterakzeptanz und gezielten Ausgestaltung des Assistenzsystems thematisiert werden, stehen bei den Simulationsläufen (siehe Abschnitt 7.3.6) vor allem betriebswirtschaftliche Fragestellungen im Vordergrund.

Durch die Einführung eines Assistenzsystems, wie es in iWePro entsteht, würden die Mitarbeiter auf dem Shop Floor umfassend informiert. Gleichzeitig sind dafür neue Denkweisen, mehr Verantwortung für die Disposition und „mehr Mitdenken“ in der Fertigung notwendig.

Der iWePro-Ansatz stellt den Menschen in den Mittelpunkt, das Assistenzsystem unterstützt ihn adaptiv und gibt Empfehlungen, die Entscheidung über eine Umplanung trifft jedoch er. iWePro untersucht die These, dass nach der Umstellung einer Fertigung auf das Werkstattprinzip im Use-Case mit Hilfe des neuartigen Assistenzsystems deutlich flexibler auf immer stärker schwankende Nachfragen, eine steigende Variantenvielfalt und kleinere, häufig variierende Losgrößen reagiert werden kann. Störungen an einzelnen Werkzeugmaschinen legen die gesamten Produktionslinien nicht mehr still, das flexible Prozessnetz passt sich neuen Gegebenheiten ad-hoc an. Das Maschinenmengengerüst kann flexibel an diese Anforderungen angepasst werden, die Maschinenauslastungen steigen. Letztendlich wird das Ergebnis daran gemessen, ob alle Aufträge termingerecht und zu vertretbaren Kosten fertigbar sind.

Mit seiner neuartigen Kombination aus global optimierter Maschinenbelegungsplanung und einem Rechneragentensystem welches Transparenz schafft und Vorschläge zur lokalen Optimierung gibt, leistet iWePro einen wichtigen Beitrag zur Gestaltung und Erprobung der Ansätze von Industrie 4.0.

7.5 Danksagung

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) für die Förderung des Verbundforschungsvorhabens iWePro „Intelligente selbstorganisierende Werkstattproduktion“ im Rahmen der Fördermaßnahme „Intelligente Vernetzung in der Produktion – Ein Beitrag zum Zukunftsprojekt Industrie 4.0“.

7.6 Literaturverzeichnis

- [1] Kagermann, H., Wahlster, W., Johannes Helbig (Hrsg.): Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0: Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0, 2013.
- [2] Bundesverband Informationswirtschaft e.V. (BITKOM), Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. (VDMA), Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. (ZVEI) (Hrsg.): Umsetzungsstrategie Industrie 4.0: Ergebnisbericht der Plattform Industrie 4.0, 2015.
- [3] Bundesministerium für Bildung und Forschung (Hrsg.): Zukunftsbericht „Industrie 4.0“, 2015.
- [4] Fraunhofer IPK: Projekt SOPRO: Selbstorganisierende Produktion.
URL: <http://www.sopro-projekt.de/ueberblick/> [Stand: 08.03.2016].
- [5] Uhlmann, E.; Hohwieler, E.; Kraft, M.: Selbstorganisierende Produktion mit verteilter Intelligenz: Intelligente Werkstücke steuern ihren Weg durch die Fertigung. In: *wt Werkstatttechnik online* 103, Nr. 2, S. 114–117, 2013.
- [6] Fraunhofer IPK: iWePro - Intelligente selbstorganisierende Werkstattproduktion.
URL: <http://www.projekt-iwepro.de/> [Stand: 08.03.2016].
- [7] Uhlmann, E.; Schallock, B.; Otto, F.: Intelligente Werkstattfertigung : Steuerung von Serienprodukten für die Werkstattfertigung mit Industrie 4.0-Lösungen. In: *wt Werkstatttechnik online* 105, Nr. 4, S. 184–189, 2015.
- [8] Ahrens, V.: Dezentrale Produktionsplanung und -steuerung: Systemtheoretische Grundlagen und Anwendungspotentiale. Als Ms. gedr. Düsseldorf: VDI-Verl. (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 2, Fertigungstechnik 472), 1998.
- [9] Teunis, G.: Engpassorientierte Werkstattsteuerung für teilautonome, kooperative Fertigungen. Dissertation. Hannover: Berichte aus dem IFW, Universität Hannover, 2003.

-
- [10] Baumann, M.; Kreske, T.: Störungen ohne Ausnahme: Selbstorganisierende Produktionssteuerungen integrieren Störungen nahtlos. In: PPS Management, Nr. 11, S. 29–32, 2006.
 - [11] Sundermeyer, K.; Bussmann, S.: Einführung der Agententechnologie in einem produzierenden Unternehmen - Ein Erfahrungsbericht. In: Wirtschaftsinformatik 43, Nr. 2, S. 135–142, 2001.
 - [12] Bussmann, S.; Schild, K.: Self-organizing manufacturing control: an industrial application of agent technology. In: Fourth International Conference on MultiAgent Systems, S. 87–94, 2000.
 - [13] Promot Automation GmbH: Prospekt Umstapelzelle Cellmaster.
URL: http://www.promot.at/download/Prospekte/Cellmaster_DE.pdf [Stand: 08.03.2016].
 - [14] Jennings, N. R.: On agent-based software engineering. In: Artificial Intelligence 117, Nr. 2, S. 277–296. URL:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0004370299001071>, 2000.
 - [15] Wooldridge, M.: Agent-based software engineering. In: IEE Proceedings: Software Engineering 144, Nr. 1, S. 26–37, 1997.
 - [16] Brenner, W.; Zarnekow, R.; Wittig, H.: Intelligente Softwareagenten: Grundlagen und Anwendungen. Springer, 1998.
 - [17] Raue Niels; Uhlmann, E.: Automatisierung von hybriden Leistungsbündeln durch ein Agentensystem. In: Klemm, P.; Lechler, A.; Schlechtendahl, J. (Hrsg.): Industrie 4.0 - innovative Konzepte zur Automatisierung. Düsseldorf : VDI Verlag, Fortschritt-Berichte VDI. Reihe 2, Fertigungstechnik, Nr. 693, S. 45–64, 2015.
 - [18] Raue, N.: Agentenbasierte Automatisierung des Betriebs Industrieller Produkt-Service Systeme. Dissertation. Stuttgart: Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin, 2016.
 - [19] VDI 2653. Agentensysteme in der Automatisierungstechnik - Grundlagen, Düsseldorf, 2010.
 - [20] Fei-Yue Wang: Agent-Based Control for Networked Traffic Management Systems. In: IEEE Intelligent Systems 20, Nr. 5, S. 92–96, 2005.

Online-Buchshop für Ingenieure

■■■ VDI nachrichten

Online-Shops



Fachliteratur und mehr - jetzt bequem online recherchieren & bestellen unter: www.vdi-nachrichten.com/
Der-Shop-im-Ueberblick



**Täglich aktualisiert:
Neuerscheinungen
VDI-Schriftenreihen**



BUCHSHOP

Im Buchshop von vdi-nachrichten.com finden Ingenieure und Techniker ein speziell auf sie zugeschnittenes, umfassendes Literaturangebot.

Mit der komfortablen Schnellsuche werden Sie in den VDI-Schriftenreihen und im Verzeichnis lieferbarer Bücher unter 1.000.000 Titeln garantiert fündig.

Im Buchshop stehen für Sie bereit:

VDI-Berichte und die Reihe **Kunststofftechnik**:

Berichte nationaler und internationaler technischer Fachtagungen der VDI-Fachgliederungen

Fortschritt-Berichte VDI:

Dissertationen, Habilitationen und Forschungsberichte aus sämtlichen ingenieurwissenschaftlichen Fachrichtungen

Newsletter „Neuerscheinungen“:

Kostenfreie Infos zu aktuellen Titeln der VDI-Schriftenreihen bequem per E-Mail

Autoren-Service:

Umfassende Betreuung bei der Veröffentlichung Ihrer Arbeit in der Reihe Fortschritt-Berichte VDI

Buch- und Medien-Service:

Beschaffung aller am Markt verfügbaren Zeitschriften, Zeitungen, Fortsetzungsreihen, Handbücher, Technische Regelwerke, elektronische Medien und vieles mehr – einzeln oder im Abo und mit weltweitem Lieferservice

Die Reihen der Fortschritt-Berichte VDI:

- 1 Konstruktionstechnik/Maschinenelemente
- 2 Fertigungstechnik
- 3 Verfahrenstechnik
- 4 Bauingenieurwesen
- 5 Grund- und Werkstoffe/Kunststoffe
- 6 Energietechnik
- 7 Strömungstechnik
- 8 Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik
- 9 Elektronik/Mikro- und Nanotechnik
- 10 Informatik/Kommunikation
- 11 Schwingungstechnik
- 12 Verkehrstechnik/Fahrzeugtechnik
- 13 Fördertechnik/Logistik
- 14 Landtechnik/Lebensmitteltechnik
- 15 Umwelttechnik
- 16 Technik und Wirtschaft
- 17 Biotechnik/Medizintechnik
- 18 Mechanik/Bruchmechanik
- 19 Wärmetechnik/Kältetechnik
- 20 Rechnerunterstützte Verfahren (CAD, CAM, CAE CAQ, CIM ...)
- 21 Elektrotechnik
- 22 Mensch-Maschine-Systeme
- 23 Technische Gebäudeausrüstung

ISBN 978-3-18-369402-0