Fähigkeiten in der Montage

Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*)
Technische Universität München

Boltzmannstrasse 15
85748 Garching

Dipl.-Ing. Veit Hammerstingl
Tel.: +49.(0)89.289.15533
E-Mail: Veit.Hammerstingl@tum.de

Diese Arbeit ist im Rahmen des Forschungsprojektes AKOMI (**AK⊗MI**) am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München (TUM) durchgeführt worden. Weitere Informationen unter: www.iwb.mw.tum.de

Zitation

BibTeX / BibLaTeX:

```
@misc{Hammerstingl.2017,
  author = {Hammerstingl, Veit and Reinhart, Gunther},
  title = {Fähigkeiten in der Montage},
  year = {2017},
  note = {Version 1.0},
  url = {http://mediatum.ub.tum.de/?id=1370174},
  urldate = {2017-07-01},
  doi = {10.13140/RG.2.2.22520.75526}
}
```

Lizenz

„Fähigkeiten in der Montage“ von Dipl.-Ing. Veit Hammerstingl und Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung - Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International Lizenz. Über diese Lizenz hinausgehende Erlaubnisse können Sie unter Veit.Hammerstingl@iwb.mw.tum.de erhalten.

Über das Forschungsprojekt

Ziel des Forschungsprojektes **AK⊗MI** ist die Steigerung Rekonfigurationsfähigkeit von Montageanlagen. Über Plug&Produce-Ansätze können Betriebsmittel automatisiert konfiguriert und ad-hoc vernetzt werden. Das Konzept basiert dabei auf Standard-Industiekomponenten, welche automatisiert mit einer digitalen Fähigkeitenbeschreibung (Bestandteil des *Digital Twins*) erweitert und synchronisiert werden.

Projektlaufzeit: 09/2012 – 12/2015

Förderer	Projektträger
Gefördert durch Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie	VDI|VDE|IT

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 4
2 Definitionen 6
3 Elementare Fähigkeiten 9
3.1 Methode zur Ermittlung 9
3.2 Taxonomie 10
3.2.1 Standardisierte elementare Fähigkeiten in der Montage 10
3.2.2 Konfigurationsfähigkeiten 13
3.2.3 Anwenderspezifische elementare Fähigkeiten 14
3.3 Erläuterungen zur Taxonomiestruktur 14
3.4 Untersuchte Quellen 17
3.4.1 Bücher und Normen 17
3.4.2 Dissertationen 17
3.4.3 Veröffentlichungen 18
4 Parameter elementarer Fähigkeiten 19
4.1 Grundlegende Parameter 19
4.1.1 Prozesssbezogene Parameter 19
4.1.2 Produktbezogene Parameter 20
4.2 Angewandte Methodik 21
4.3 Auflistung elementarer Fähigkeitenparameter 23
4.3.1 Grundparameter aktorischer Fähigkeiten 23
4.3.2 Grundparameter sensorischer Fähigkeiten 24
4.3.3 Standardisierte Fähigkeiten 25
4.3.4 Konfigurationsfähigkeiten 30
5 Zusammengesetzte Fähigkeiten 32
5.1 Methode zur Ermittlung 33
5.2 Übersicht zusammengesetzter Fähigkeiten 33
5.3 Parameter zusammengesetzter Fähigkeiten 35
6 Umsetzung 36
7 Literaturverzeichnis 39
8 Review 42

1. Einleitung

Eine der größten Herausforderungen der Digitalisierung stellt die semantische Beschreibung von Daten dar. Nur mit einem einheitlichen Verständis über die Bedeutung von Daten lassen sich Informationen interoperabel zwischen Systemen austauschen.

Im Bereich der Automatisierungstechnik wird intensiv an der Umsetzung dienstbasierter Architekturen (engl. Service oriented Architectures, SOA) gearbeitet. Hierbei sollen Geräte ihre Fähigkeiten hardwareunabhängig im Netzwerk als Dienste anbieten. Mit einem semantischen Verständnis können andere Systeme nach notwendigen Funktionalitäten suchen und diese zur Erfüllung ihrer Aufgaben nutzen. Durch eine funktionale Betrachtung sowohl des Produktionsprozess als auch der Betriebsmittel entstehen neue Flexiblitäten in der Planung und im Einsatz von Ressourcen. Eine lösungsneutrale Beschreibung von Produktionsmittelfähigkeiten ermöglicht Ansätze der automatisierten Ressourcenplanung sowie aufgabenorientierten Konfiguration und Programmierung.

Mit dem flächendeckenden Einzug von OPC UA in eine Vielzahl von Hardwarekomponenten scheint eine technologische Basis für diese Vision geschaffen zu sein. Einzig eine umfassende semantische Definition der Fähigkeiten von Automatisierungskomponenten steht noch aus. Zwar existieren bereits vereinzelte Informationsmodelle, die darin definierten Dienste stellen jedoch meist eine gerätemodellspezifische Sicht dar und sind für eine lösungsneutrale Prozessbeschreibung wenig geeignet.

Dies motiviert die vorliegende Arbeit, eine Übersicht von prozessbeszogenen lösungsneutralen Fähigkeiten (bzw. Diensten) in der Automatisierungstechnik zu liefern.

Neben einer reinen Auflistung möglicher Fähigkeiten ist die Definition notwendiger Parameter von ebenso großer Bedeutung. Ohne Spezifikation eines Parametersets ist ein Großteil der existierenden Fähigkeiten nicht auf Komponenten abbildbar, da zur Ausführung notwendige Einflussgrößen fehlen. Dies wurde von bisherigen Arbeiten meist nur am Rande behandelt. *Der zweite Teil dieser Arbeit nimmt sich dieser Thematik an.*

Die beschriebenen Fähigkeiten stellen einen Bestandteil der virtuellen Repräsentanz („Digital Twin“) von Automatisierungsgeräten dar. Weitere Bestandteile dieser sind (unter anderem) Status- und Identifikationsinformationen, Standortdaten, eine physikalische und kinematische Beschreibung sowie Safetyaspekte. Weitere Informationen sind in Hammerstingl et al. (2016) sowie Backhaus, Hammerstingl et al. 2017 zu finden.

Diese Arbeit konzentriert sich auf den Bereich der Montage. Aufgrund der Vielzahl und Vielfalt an Fähigkeiten kann die vorliegende Taxonomie nur einen Auszug bieten. Ausgehend von der erarbeiteten Taxonomie wird geschätzt, dass ca. **300 Fähigkeiten** existieren, welche ungefähr zu gleichen Teilen aus aktorischen und sensorischen Elementen bestehen. Viele der Fähigkeiten besitzen hierbei gänzlich unterschiedliche Paramerterklassen (vgl. Kapitel 4), womit der Darstellungs- und Definitionsaufwand erkenntlich wird. Die umfassende Definition aller Fähigkeiten wird deshalb als Aufgabe der Normungsausschüsse oder Community gesehen.

Diese Arbeit besitzt folgende Ziele:

- Definition von in dieser Domäne häufig verwendeten Begrifflichkeiten (z. B. Fähigkeit)
- Schaffung einer konsolidierten Taxonomie für Fähigkeiten von Automatisierungsgeräten in der Montagetechnik
- Schaffung eines Bewusstseins für bisher unterrepräsentierte Fähigkeitenklassen (Sensorik, Anzeigeelemente, etc.)
- Übersicht von fähigkeitenspezifischen Parametern
- Methodik für die Herleitung weiterer Skillparameter
- Vorbereitung für zukünftige Standardisierung
- Diskussionsgrundlage

2. Definitionen

(Elementare) Fähigkeit (engl. *Skill*)

Durch ein Gerät angebotene lösungsneutrale Funktionalität, welche aus einer aufgabenspezifischen Sicht (Prozesssicht) beschrieben ist[1]. „Lösungsneutral" bedeutet in diesem Zusammenhang eine hersteller- und bauformunabhängige Beschreibungsform. Fähigkeiten sind elementar, können also *nicht* weiter in Sub-Fähigkeiten zerlegt werden. Fähigkeiten werden von einer einzel ansteuerbaren Komponente angeboten (z. B. Greifer, Sensor, Frequenzumrichter). Fähigkeiten besitzen ein spezifisches Set an Ein- und Ausgangsparametern und können automatisiert mit *Prozessschritten* (und deren Anforderungen) abgeglichen werden. Beispiele für Fähigkeiten sind *Greifen*, *Anwesenheit prüfen*, *Bewegen*, *Einschrauben* etc.

Zusammengesetzte Fähigkeit (engl. *Composite Skill*)

Durch einen Zusammenschluss von Geräten angebotene höherwertige lösungsneutrale Funktionalität, welche aus einer aufgabenspezifischen Sicht (Prozesssicht) beschrieben ist. „Lösungsneutral" bedeutet in diesem Zusammenhang eine hersteller- und bauformunabhängige Beschreibungsform. Zusammengesetzte Fähigkeiten bestehen aus einem Ablauf von elementaren Fähigkeiten und können mit *Aufgaben* (und deren Anforderungen) automatisiert abgeglichen werden. Sie besitzen spezifische Ein- und Ausgangsparameter, welche sich von den einzelnen Parametern der elementaren Fähigkeiten unterscheiden können. Als Beispiel könnte die Steuerungskomponente einer Montagezelle den Composite Skill *Lampe montieren* anbieten. Das Steuerungsprogramm definiert dabei einen Ablauf von Elementarfähigkeiten (vgl. Kapitel 5), welche durch die einzelnen Komponenten in der Zelle (Roboter, Transporteinrichtungen etc.) angeboten und ausgeführt werden.

Prozessschritt (engl. Process Step)

Elementare Operation eines Prozessablaufs, welche *nicht* weiter in Subschritte zerlegt werden kann. Produktionsabläufe können auf Basis von Prozessschritten (und Tasks) beschrieben werden. Prozessschritte korellieren semantisch mit Gerätefähigkeiten, auf dieser Basis kann ein automatisiertes Matchmaking zwischen Beiden stattfinden. Aus diesem Grund lassen sie sich auch als *prozessbezogene* Fähigkeiten beschreiben. Die Ausprägung

[1] Morrow & Khosla (1997) beschreibt *Skills* von Robotern erstmals als die Bereitstellung „höherwertiger Funktionalitäten". Cândido & Barata (2007) bezieht Skills auf die Produktionstechnik, als Aktionen, die den Fertigungsprozess unterstützen.

der definierten Parameter (Anforderungen des Prozesses) kann sich von den angebotenen Geräteeigenschaften (der Fähigkeiten) unterscheiden. Hierdurch ergibt sich die Notwendigkeit eines dynamischen Eignungsabgleichs zwischen Prozessbeschreibung und Gerätefähigkeiten.

Aufgabe (engl. Task)

Prozessablauf, welcher aus einer Sequenz von elementaren Prozessschritten zusammengesetzt ist. Aufgaben korellieren semantisch mit *zusammengesetzten Fähigkeiten*, auf dieser Basis kann ein automatisiertes Matchmaking stattfinden. Aufgaben können zu (höherwertigen) Aufgaben verknüpft werden. Produktionsabläufe können auf Basis von Tasks (und Prozessschritten) beschrieben werden. Die Ausprägung der definierten Parameter (Anforderungen der Aufgabe) kann sich von den angebotenen Gerätefähigkeiten unterscheiden. Hierdurch ergibt sich die Notwendigkeit eines dynamischen Eignungsabgleichs zwischen Aufgaben und zusammengesetzten Gerätefähigkeiten.

Dienst (engl. Service)

Ein Dienst ist die softwareseitige Umsetzung einer elementaren oder zusammengesetzten Gerätefähigkeit, beispielsweise mittels einer dienstbasierten Architektur wie OPC UA.

Abbildung 1 zeigt das zugehörige Metamodell.

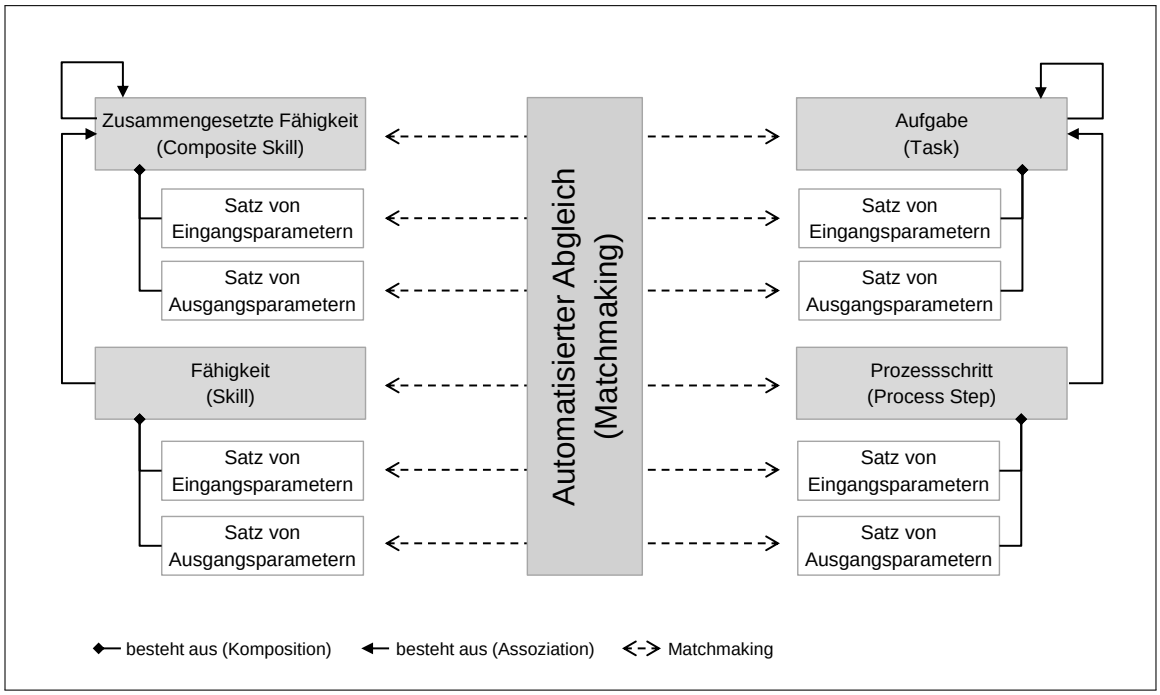

Abbildung 1 Metamodell von Fähigkeiten

Hinweis: Aufgrund der semantischen Gleichheit zwischen Fähigkeiten & Prozessschritten bzw. zusammengesetzten Fähigkeiten & Aufgaben, existieren insgesamt zwei (statt vier) Taxonomien, welche je nach Beschreibung entweder auf Prozess- oder auf Geräteseite Einsatz finden können.

3. Elementare Fähigkeiten

3.1. Methode zur Ermittlung

Die nachfolgend aufgelistete Taxonomie ist eine Synthese aus verschiedenen Quellen (vgl. Abschnitt 3.4). Hierzu wurde national und international nach Veröffentlichungen, Normen und Disserationen im Bereich von Fähigkeitentaxonomien und -ontologien gesucht.

Die Basis der vorliegenden Taxonomie stellen hierbei die Auflistung von Montagefunktionen nach Lotter & Wiendahl (2012) sowie die Normen VDI 2860 und DIN 8593-4 dar. Diese wurden strukturell konsolidiert und an manchen Stellen maßgeblich erweitert (bspw. im Bereich der Kontrolloperationen). Auf Basis der Begriffsdefinitionen (Kapitel 2) wurden elementare Fähigkeiten stärker von zusammengesetzten Fähigkeiten getrennt[1] – auch in ihrer Semantik.

Mittels eines Vergleichs zwischen Geräten im Demonstrator AK⊗MI und gesammelten Fähigkeiten wurden weitere allgemeine Skills (z. B. Mensch-Maschine-Interaktion) sowie gerätespezifische Fähigkeiten entwickelt und eingeordnet.

Weitere Erläuterungen zu einzelnen Zweigen sind unter Abschnitt 3.3 gegeben. Auszüge dieser Taxonomie sind unter Hammerstingl et al. (2015) und Backhaus, Hammerstingl et al. (2017) gereviewt veröffentlicht.

[1] So kann beispielsweise *Besprühen* (entgegen der Literatur) nicht als elementare Fähigkeit gesehen werden, da sich Besprühen aus der Düsenfunktionalität *Sprühen* und einer Bewegungsart (z. B. eines Roboters) zusammensetzt. *Sprühen* gilt somit als Fähigkeit, *Besprühen* als zusammengesetzte Fähigkeit.

3.2. Taxonomie

Fähigkeiten können unterschiedliche Ausprägungen besitzen, welche in den nachfolgenden Abschnitten beschrieben werden. Abbildung 2 zeigt hierzu eine Übersicht.

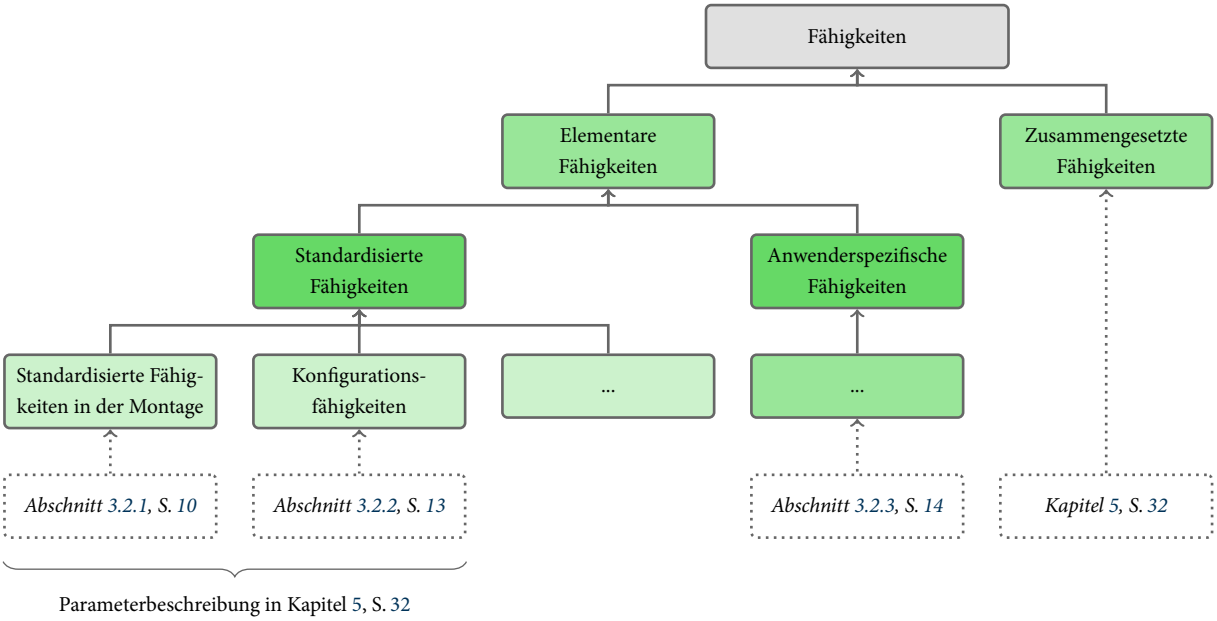

Abbildung 2 Ausprägungen von Fähigkeiten

3.2.1. Standardisierte elementare Fähigkeiten in der Montage

Abbildung 3 und Abbildung 4 geben eine Übersicht der elementaren Fähigkeiten in der Montage. Die Zweige in den Auflistungen stellen nur strukturierende Elemente dar, die durch Geräte angebotenen Fähigkeiten sind ausnahmslos Blätter[2].

[2] https://de.wikipedia.org/wiki/Baum_(Graphentheorie)

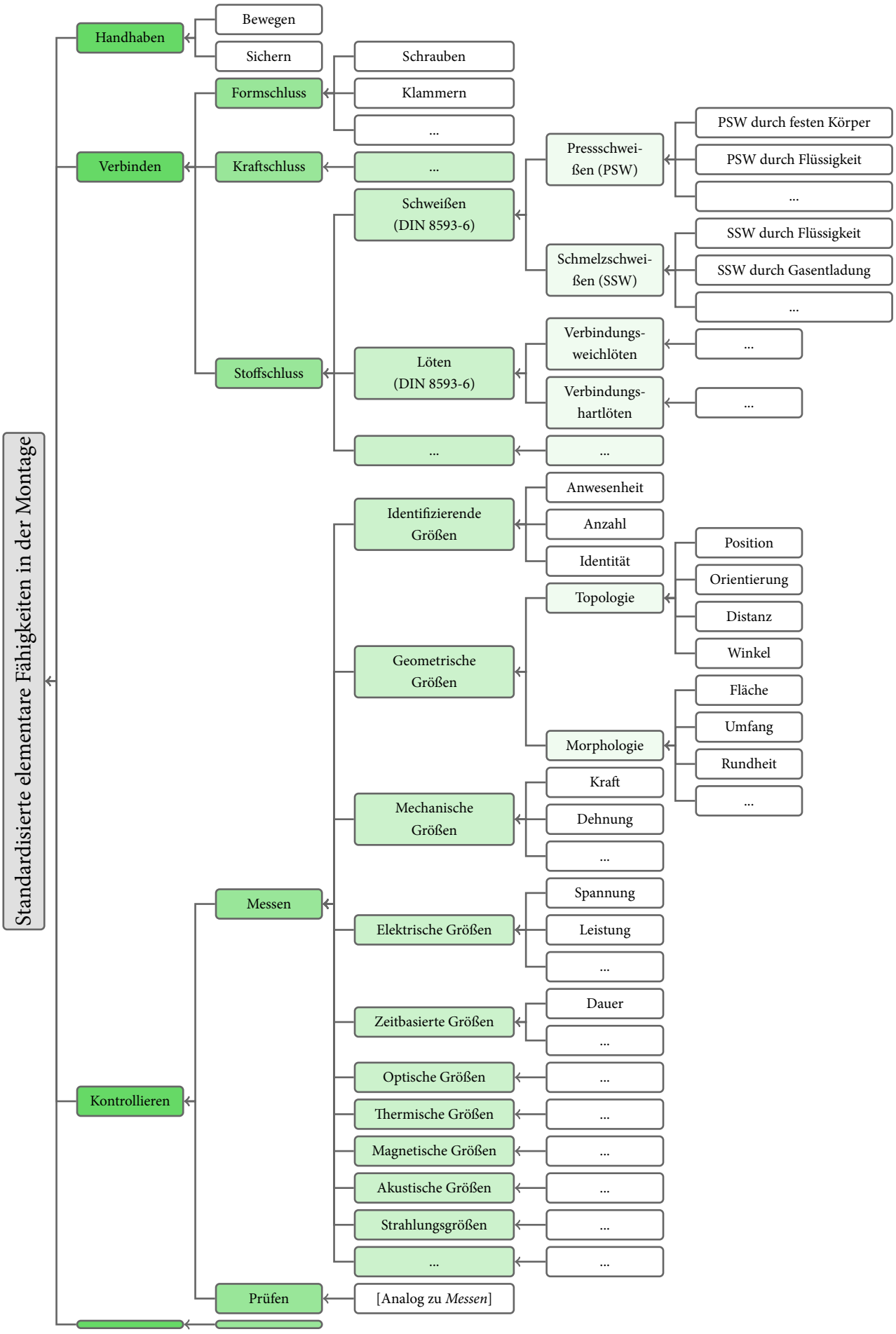

Abbildung 3 Standardisierte elementare Fähigkeiten in der Montage (weiß)

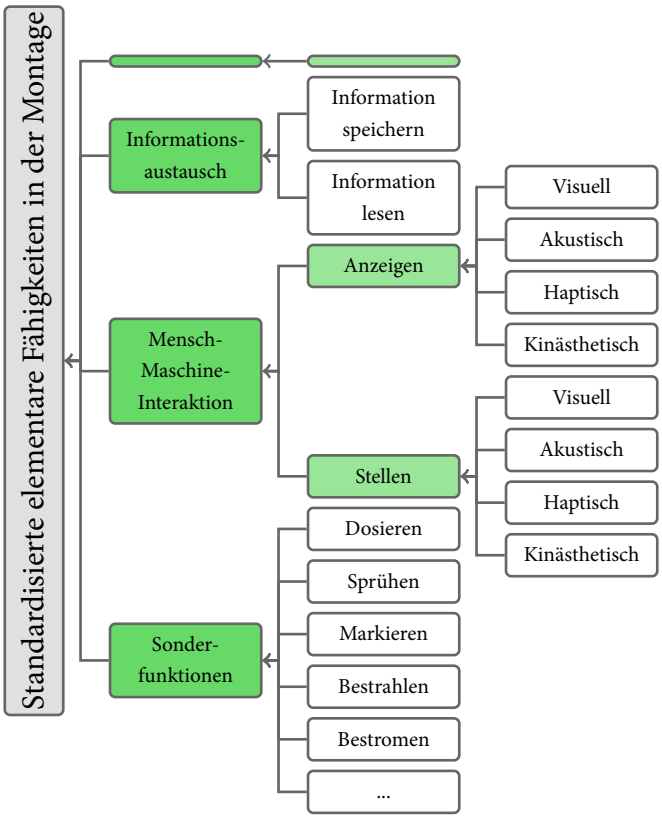

Abbildung 4 Standardisierte elementare Fähigkeiten in der Montage (Fortsetzung)

3.2.2. Konfigurationsfähigkeiten

Neben prozessseitig ausgerichteten Fähigkeiten, existieren Fähigkeiten, welche zur generellen Steuerung von Automatisierungskomponenten genutzt werden. Auch wenn diese nicht mehr alleinig als Funktionalität im Produktionsprozess gelten, erfüllen sie nach wie vor die Definition der Hersteller- und Bauformunabhängigkeit.

Die definierten Konfigurationsfähigkeiten wurden aus verschiedenen Anwendungsfällen im Forschungsprojekt **AK⊗MI** entwickelt und sind in Abbildung 5 dargestellt.

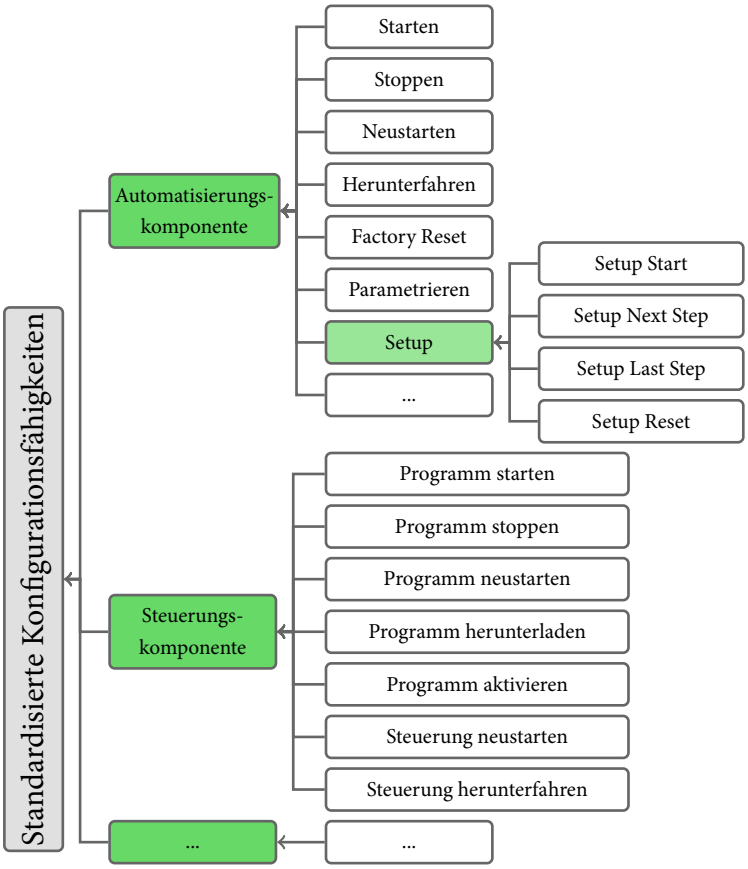

Abbildung 5 Standardisierte Konfigurationsfähigkeiten (weiß)

Die Fähigkeit *Parametrierung* ermöglicht das Einrichten von Automatisierungsgeräten durch andere Softwaresysteme. Die Parametercharakteristika sind herstellerspezifisch (bspw. „`set_vel_tcp=1.8`“) und können aus technischen Spezifikationen bzw. Expertenwissen bzw. erschlossen werden. Demhingegen stellt *Setup* eine Fähigkeit dar, bei dem das Gerät seine Einrichtungsprozedur unter Zuhilfenahme eines menschlichen Anwenders durchführt. Hierzu sendet es schrittweise einfache Arbeitsaufforderungen an den Anwender (ähnlich der Fehlerbehebung heutiger Kopiersysteme).

Steuerungskomponenten stellen Recheneinheiten dar (wie etwa SPS, IPC oder Roboter-

steuerungen), welche die softwareseitige Koordination des Produktionsprozesses sowie die Signalverarbeitung von primitiven Komponenten übernehmen.

3.2.3. Anwenderspezifische elementare Fähigkeiten

Die unter Abschnitt 3.2.1 beschriebene Taxonomie erlaubt aufgrund ihrer semantischen Standardisierung eine herstellerübergreifende Interoperabilität. Natürlich können Anwender auch eigene Fähigkeiten entwickeln, welche nur in einem begrenztem Gerätespektrum Implementierung finden (bspw. *Messe Deckelspaltmaß*).

Abbildung 6 Anwenderspezifische elementare Fähigkeiten in der Montage

Der Nachteil, dass andere Softwaressyteme nur noch begrenzt[3] bis gar kein Verständnis mehr über den vom Gerät angebotenen Dienst besitzen, wird durch den Vorteil ausgeglichen, eine auf die Aufgabe zugeschnittenen Fähigkeit definieren zu können. Auf Kosten von implizit definiertem und implementiertem Wissen kann der Anwender hiermit eventuell Modellierungsaufwand reduzieren. Nachdem dieser Ansatz der Zielstellung einer übergreifenden Interoparabilität entgegen läuft, sollte hierauf nach Möglichkeit verzichtet werden[4].

3.3. Erläuterungen zur Taxonomiestruktur

3.3.1. Allgemeine Strukturhinweise

- Die Gessamtstruktur entnimmt Ausszüge aus Lotter & Wiendahl (2012), Backhaus & Reinhart (2015), Schmidt (1992), Hesse & Schnell (2014), Schmidtke & Jastrzebska-Fraczek (1993) sowie den Normen VDI 2860 und DIN 8593-4.
- Fähigkeiten können auf unterschiedlichen Hierarchieebenen auftreten. Während Beispielseise *Bewegen* direkt unter dem Hauptbereich *Handhaben* einzuordnen ist, zerfällt die Kontrolle geometrischer Größen in einer Vielzahl von Ebenen.
- Die in Normen angegebenen Funktionsprozesse sind oftmals als Task zu betrachten und stellen keine „Fehlstellen“ in dieser Fähigkeitentaxonomie dar. So ist bspw. *Menge teilen* eine Zusammensetzung aus Bewegen und Auslagern und somit als Task zu sehen.

[3] Durch die Nutzung eines wissensbasierten Systems und der Einordnung der neu definierten Fähigkeit innerhalb einer Ontologie lassen sich durch automatisiertes Schlussfolgern noch Teilaussagen treffen.

[4] Als Beispiel ist die IEC 61131-3 (Programmierung von SPS) zu nennen, deren Interoperabilität zwischen Engineeringtools verschiedener Hersteller durch die Einführung spezifischer Sonderbausteine stark reduziert wurde.

3.3.2. Verbinden

- Insbesondere bei Fähigkeiten aus dem *Verbinden*-Ast ist zu beachten, dass diese sowohl als elementare als auch als zusammgengesetzte Fähigkeit auftreten können. So kann *Schmelzschweißen durch Gasentladung* sowohl einer einzelnen Fähigkeit eines Schweißgerätes entsprechen, als auch als Task modelliert sein – beispielsweise wenn Bewegungsbahnen mit betrachtet werden.

3.3.3. Handhaben

- *Bewegen*: Das Bewirken eines Materialflussen im Prozess wird auch als Möglichkeit des *Bewegens* angesehen. Oftmals kann ein Materialfluss nur durch Kombination mehrerer Fähigkeiten entstehen (z. B. *Bewegen* + *Sichern*). In diesem Fall tritt *Bewegen* als Composite Skill (bzw. Task) auf.

- *Sichern*: Die Fähigkeit besitzt zwei abhängige Zustände, das *Halten* und *Lösen*. Beide Zustände beziehen sich auf eine gemeinsame Zielmenge. Für eine Modellierung erscheint es deshalb sinnvoll, dass ein Gerät (z. B. Greifer) die Fähigkeit des *Sicherns* anbietet und über dessen Parameter der Halten- / Lösen-Zustand definiert wird. Der Zustand des Sicherns (Haltend / Gelöst) wird deshalb über die Fähigkeitenparameter bestimmt und nicht als voneinander unabhängige Fähigkeiten modelliert[5].

3.3.4. Kontrollieren

- Die vorliegenden Quellen vernachlässigen insbesondere die sensorische Fähigkeitenseite und bieten hier nur unzureichende Strukturierung. Dies wurde in vorliegender Taxonomie behoben.

- Um eine möglichst vollständige Übersicht zu bekommen, wurde bei der Ermittlung der Kontrollfähigkeiten eine Gruppierung nach physikalischen Gesichtspunkten gewählt. Aufgrund der großen Anzahl messbarer Größen (mehrere Hundert, vgl. Hesse & Schnell 2014) kann hier nur ein Auszug präsentiert werden. Die Einordnung neuer Fähigkeiten durch den Anwender wird mit der vorgegebenen Struktur als machbar angesehen.

- Es wird davon ausgegangen, dass jede existierende physikalische Größe sowohl gemessen (numerisches Ergebnis) als auch geprüft (boolsches Ergebnis) werden soll. Hieraus ergibt sich ein identischer Fähgikeitenzweig für *Messen* und *Prüfen*[6].

- Für die Darstellung geometrischer Größen wurden die Funktionen unterschiedlicher Bildverarbeitungswerkzeuge analysiert, mit der Norm VDI 2860 abgeglichen und neu strukturiert (vgl. Hammerstingl et al. 2015).

---

[5] Damit unterscheidet sich die Modellierung von bestehenden Quellen.
[6] Jedoch mit Unterschieden in den Fähigkeitenparametern! Vgl. Kapitel 4.

3.3.5. Informationsaustausch

- Oftmals müssen technische Systeme Informationen nutzen, welche an anderer Stelle erhoben wurden. Hierzu ist es notwendig, Fähigkeiten zur Datenablage zu definieren. So kann beispielsweise eine Datenbank im Netzwerk die Fähigkeit *Informationen speichern* und *Informationen lesen* anbieten, was von weiteren Geräten genutzt werden kann.

- Nachdem die Informationsstruktur und Semantik stark vom konkreten Anwendungsfall abhängt, können hier nur zwei generische Fähigkeiten zum Lesen und Schreiben von Informationen angegeben werden, eine Spezialisierung erfolgt auf Parameterebene (vgl. Kapitel 4).

3.3.6. Mensch-Maschine-Interaktion

- Auch bei automatisierten Prozessen will der Anwender Statusinformationen überprüfen und Korrekturanweisungen geben können. Aus diesem Grund enthalten technische Anlagen eine Vielzahl von Anzeige- und Bedienelementen. Im Sinne einer semantischen Interoperabilität müssen auch diese mittels Fähigkeiten beschrieben werden.

- Die Aufteilung erfolgt anhand physikalischer Wirkprinzipien. Über die jeweiligen Fähigkeitenparameter kann der Anwender die Anzeige- und Bedienform weiter spezifizieren, bspw. `Optische Information anzeigen -> 2-D-Balkendiagramm`. Die Realisierung der Anzeige/Bedienung erfolgt damit rein auf Geräteseite.

3.3.7. Sonderoperationen

- Viele der in Lotter & Wiendahl (2012) beschriebenen Sonderfunktionen sind eher den Composite Skills (bzw. Tasks) zuzuordnen (z. B. *Auspacken*), und fehlen deshalb in vorliegender Auflistung oder wurden semantisch präzisiert.

3.4. Untersuchte Quellen

3.4.1. Bücher und Normen

- Lotter & Wiendahl (2012): Stellt eine einfache Grundtaxonomie auf Basis der VDI 2860, DIN 8593-4 und DIN 8580 dar. Die fünf Hauptgruppen sind Fügen, Handhaben, Kontrollieren, Justieren und Sonderoperationen. Die Taxonomie bietet eine gute Ausgangsbasis, besitzt aufgrund der Komponsition jedoch die gleichen Nachteile wie die Einzelnormen (etwa VDI 2860). Besonders die Hauptkategorie „Justieren" wird als Zusammensetzung von Fähigkeiten wie etwa dem *Messen*, *Prüfen* und *Bewegen* gesehen und fällt damit unter die Task-Kategorie. Es werden keine Aussagen zu Parametern der einzelnen Fähigkeiten getroffen.

- VDI 2860: Auch diese Norm bietet mit ihrer Taxonomie eine gute Ausgangsbasis. Viele der dargestellten Funktionen sind allerdings mit Überschneidungen behaftet. So lässt sich beispielsweise *Positionieren* als *Bewegen* und *Position prüfen* abbilden. Eine strukturierte Herleitung innerhalb der Subkategorien ist nicht zu erkennen. Insbesondere bei den Kontrollfunktionen wird eine flache Auflistung von nur einigen Prüfoperationen geliefert, die korrespondieren Messfunktionen fehlen großteils. Es werden keine Aussagen zu den Parametern der einzelnen Fähigkeiten getroffen.

- DIN 8593-4: Diese Normengruppe beschreibt eine spezifische Taxonomie für den Prozess *Fügen*. Die Taxonomie wird als Überschneidungsfrei angesehen und kann übernommen werden. Auch hier werden keinerlei Aussagen zu den Parametercharakteristika getroffen.

- DIN 8580: Die Norm stellt umfassende Taxonomien für Fertigungsverfahren dar. Diese betreffen nicht den Bereich der Montage und werden nicht weiter untersucht.

- Feldmann & Spur (2014): Die in bem Buch genannten Auflistungen beziehen sich auf die bekannten Quellen von Lotter & Wiendahl (2012), VDI 2860 und DIN 8593-4.

3.4.2. Dissertationen

- Schmidt (1992): Der Autor bezieht sich in seiner Arbeit auf die VDI 2860, kritisiert dabei die Überschneidungen einzelner Prozesse. Aus dieser Motivation leitet er fünf überschneidungsfreie Grundprozesse der Montage ab: Speichern, Bewegen, Verbinden, Verändern und Vergleichen. Die Trennung der Grundprozesse ist korrekt und wird teilweise als Nomenklatur in der vorliegenden Taxonomie verwendet, jedoch ist für eine Auflistung der Vielzahl an Fähigkeiten eine weitere Sturkutierung unabdingbar.

- Kluge (2011): Der Autor beschreibt eine Fähigkeitenauflistung, welche auf den bekannten Normen VDI 2860 und DIN 8593-4 basiert und entsprechend deren Nachteile besitzt.

- Loskyll (2013): Der Autor baut bei der Entwicklung seiner Funktionsontologie „insbesondere auf der Richtline VDI 2860 auf“.

3.4.3. Veröffentlichungen

- Smale & Ratchev (2009): Die Autoren beschreiben sechs Fähigkeitenklassen in der Montage, ohne weitere Unterteilung. Diese lauten Bewegen, Verbinden, Sichern, Messen, Zuführen und Bearbeiten. Dies korreliert mit den in der Taxonomie vorgestellten Fähigkeiten.

- Huckaby & Christensen (2012): Die Autoren definieren eine Klassifizierungssystematik für roboterbasierte Montagezellen. In der zweistufigen Taxonomie werden Fähigkeiten unterschiedlicher Art in selbigen Ast eingeordnet (z. B. Erkennen, Transportieren, Bohren). Die Herleitung der Fähigkeiten wird nicht weiter beschrieben. Die gesammelten Fähigkeiten werden durch die bereits genannten Normen abgedeckt.

- Backhaus & Reinhart (2015): Der Autor entwickelt eine Fähigkeitentaxonomie auf Basis der von (Schmidt 1992) definierten Grundfunktionen. Hierunter gliedert er die Fähigkeiten der VDI 2860 und DIN 8593-4 ein. Von allen Quellen ist dies die umfangreichste Darstellung, jedoch werden auch hier Kontroll- und Sonderoperationen sowie Fähigkeiten der Mensch-Maschine-Interaktion außen vorgelassen. Die Unterteilung der Fähigkeiten in trennende Merkmale ist vom Autor logisch aufgebaut, wird in vorliegender Arbeit jedoch anders interpretiert. So gibt der Autor bspw. sieben verschiedene Bewegungsarten an (geführt linar, geführt cirular, nicht-geführt, auf der Stelle drehend, etc.). In vorliegender Arbeit sind diese Ausprägungen Parameter einer einzigen Bewegungsfähigkeit. Hierdurch reduziert sich die Komplexität der Taxonomie und durch Aggregation verschiedener Bewegungsparameter in einer Fähigkeit sind Kombinationen der Bewegungsarten durchführbar. Eine Trennung in elementare und zusammengesetzte Fähigkeiten wird bei Backhaus & Reinhart (2015) nicht durchgeführt.

4. Parameter elementarer Fähigkeiten

4.1. Grundlegende Parameter

4.1.1. Prozesssbezogene Parameter

Prozessgrößen

Modelliert ein Anwender einen Prozess auf Basis von Fähigkeiten, müssen spezifische Anforderungen an die Fähigkeit gestellt werden können, z. B. die *Greifkraft* bei der Fähigkeit *Greifen* oder die *Messgenauigkeit* bei der Fähigkeit *Abstand messen*. Diese Parameter werden *Prozessbezogene Eingangsparameter* genannt.

Dem EVA-Prinzip[1] folgend, besitzen Fähigkeiten auch spezifische Ausgangsgrößen. Diese können vom Anwender nicht beinflusst werden, sind als Eingangsgröße für andere Komponenten jedoch unabdingbar (z. B. das Ergebnis einer Messung).

Jeder prozessbezogene Parameter besitzt folgendes Set an Charakteristika:

Bezeichner	Datentyp	Wert *oder* Wertebereich	Einheit	Notwendigkeit (option./verpfl.)	Input/Output

Hier tritt die einzige **Unterscheidung zwischen prozessbezogenen Fähigkeiten und Gerätefähigkeiten auf**: Bei Angabe der Prozessschritt-Parameter (Anforderungen) wird ein *Wertebereich* festgelegt (z. B. Ausführzeit <= $100\,\mathrm{ms}$; Messabweichung < $0{,}1\,\mathrm{mm}$)[2]. Diese Anforderung wird mit dem angebotenen *Einzelparameterwert* auf Seite der Gerätefähigkeit abgeglichen (z. B. Kamerasystem XY: Messabweichiung = $0{,}05\,\mathrm{mm}$). Die Angabe eines Einzelwertes auf Prozessseite erscheint nicht sinnvoll, da die Größe durch ein technisches System niemals im mathematischen Sinne exakt getroffen werden kann, sondern nur möglichst genau angenähert wird.

Eingangsparameter werden grundsätzlich als voneinander unabhängig modellierbar gesehen. Treten Abhängigkeiten auf, so muss das Gerät oder ein Softwarealgorithmus eine Optimierung innerhalb der angegebenen Wertebereiche durchführen.

---

[1] EVA: Eingabe – Verarbeitung – Ausgabe
[2] Dies entspricht einem Wertebereich von 0 – $100\,\mathrm{ms}$ bzw. 0 – $0{,}1\,\mathrm{mm}$

Geometriebeschreibung

Weiterhin existieren geometriebezogene Parameter, welche produktseitig bzw. im Prozess definieren, *wo* die Fähigkeit ausgeführt werden soll. Ein Beispiel ist die Festlegung der Greifpunkte/-flächen bei der Fähigkeit *Greifen*. Bezeichnet werden diese als *Region-of-Interest (ROI)*. Die ROI stellt produktseitig definierte Punkte, Flächen oder Volumina dar und kann analytisch oder diskret (z. B. mittels voxelbasierter Ansätze) modelliert werden.

Wenngleich die ROI bei der überwiegenden Anzahl an Fähigkeiten festgelegt werden muss, existieren Skills, für die eine geometrische Spezifikation irrelevant ist. Beispiel hierfür ist der *Informationsautausch*.

4.1.2. Produktbezogene Parameter

Im Rahmen der Eignungsüberprüfung (Matchmaking) kann es vorkommen, dass Geräte technologisch für den Prozess ungeeignet sind. So kann ein induktiver Sensor *Anwesenheit prüfen* nur bei elektrisch leitenden Materialien durchführen. Diese Parameterklasse ist durch eine rein prozessseitige Betrachtung möglicherweise nicht vollständig abgedeckt, dies ist besonders bei sensorischen Fähigkeiten der Fall. Demnach existieren zusätzliche produktbezogene Parameter (z. B. Werkstofftyp) welche für eine Technologieauswahl verwendet werden. Produktbezogene Parameter werden aus Bauteildatenbanken entnommen und gelten als Eingangsgröße für Prozessschritte. Beispiele hierfür sind die Masse, Abmaße sowie Materialkennwerte.

Abbildung 7 zeigt die vorgestellten Parameterklassen in der Übersicht.

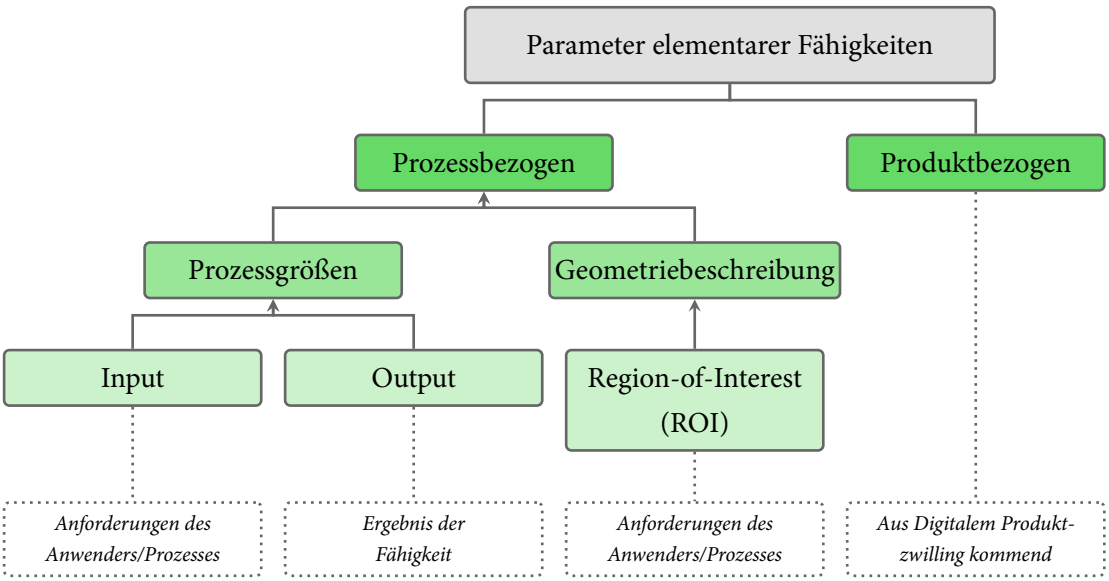

Abbildung 7 Übersicht der Parameter elementarer Fähigkeiten

Ist die Prozessmodellierung abgeschlossen, können die definierten Fähigkeiten (Prozessschritte/Aufgaben) mit den angebotenen Fähigkeiten (Skills/Composite Skills) automatisiert abgeglichen werden. Dabei werden die spezifizierten Fähigkeitenparameter mit den berechneten Eigenschaften der Betriebsmittelfähigkeiten verglichen. Trotz der syntaktikschen und semantischen Gleichheit ist ein sogenanntes *Matchmaking* komplex, da heterogene Randbedingungen aus verschiedenen Domänen Einfluss auf die Eignung eines Gerätes besitzen und Wechselwirkungen zwischen den Geräten existieren.

4.2. Angewandte Methodik

Nachdem Fähigkeiten eine Verbindung zwischen der Betriebsmittelseite und Produkt-/Prozessseite darstellen, sind beide Domänen für eine Parameterherleitung zu betrachten. Um eine Fähigkeit korrekt ausführen zu können, benötigen Geräte unterschiedlicher Bauformen und unterschiedlicher Hersteller unter Umständen verschiedene Parameter. Zur Sammlung der fähigkeitenspezifischen Parameter bieten sich zwei Varianten an:

Variante A: Es werden typische Geräte für eine Fähigkeitenausführung gesammelt, wie etwa verschiedene Barcodescanner für *Identität messen*. Die Menge aller sich unterscheidenden Geräteparameter ergibt das Parameterset für die jeweilige Fähigkeit. Dies stellt in jedem Fall eine Ausführbarkeit auf den Geräten sicher, hat jedoch Nachteile: Erstens kann sich hierbei eine sehr große Menge an heterogenen Parametern ergeben. Bei späterer Fähigkeitenmodellierung müssen alle Parameter durch den Anwender angeben werden, obwohl davon möglicherweise ein Großteil keine Verarbeitung durch das zugewiesene Gerät findet. Dies generiert einen hohen, teilweise nutzlosen Modellierungsaufwand. Zweitens ist die Semantik der ermittelten Parameter mitunter gerätespezifisch und wenig prozessnah. Drittens können Geräte außerhalb der untersuchten Menge mitunter nicht die Fähigkeit ausführen, da notwendige Parameter nicht bei der Definition beachtet wurden. Dies führt evtl. auch zu häufigeren Neudefinitionen der standardisierten Fähigkeitenparameter, was einer Interoperabiltät schadet.

Variante B: Die Fähigkeitenparameter werden rein prozessbezogen und physikalisch beschrieben. Benötigt ein Gerät zur Ausführung der Fähigkieit weitere Informationen, muss es diese selbstständig akquierieren. Dies kann beispielsweise durch einen Teach-In, externen Softwarealgorithmus/Treiber oder Interaktion mit dem Anwender geschehen. Neben diesem verpflichteten Set ist es dem Anwender erlaubt, beliebig weitere, optionale Parameter zu definieren, welche die Menge der geeigneten Betriebsmittel zusätzlich einschränken. Diese Variante hat den Vorteil, dass die Fähigkeitenparameter in jedem Fall Hardwareunabhängig sind, jedoch müssen Geräte mitunter Teach-In-Funktionalitäten oder eine

Konvertierungslogik bereitstellen[3]. Weitere Vorteile ergeben sich aus den Nachteilen von Variante A.

Für eine Definition der Fähigkeitenparameter wird Variante B genutzt. So wurden bspw. die Parameter für Kontrolloperationen aus der DIN 1319-1 hergleitet. Die ermittelten Parameter werden mit den notwendigen Informationen zur Ausführung auf Beispielgeräten validiert (vgl. Abbildung 8, links).

Zur Bestimmung der produktbezogenen Fähigkeitenparameter werden zuerst mögliche physikalische Wirkprinzipien zur Fähigkeitenausführung gelistet (vgl. Abbildung 8, rechts). Zur Reduktion der notwendigen Parameterzahl werden im Anschluss Geräte gesucht, welche diese Fähigkeit in Realität umsetzen. Die gefundene Menge wird dann in für die Fähigkeitenausführung mögliche Funktionsprinzipien kategorisiert. Funktionsprinzipien stellen eine Untergruppe innerhalb des jeweiligen Wirkprinzips dar. Für jedes Prinzip werden die dafür notwendigen physikalischen Bauteilinformationen spezifiziert, welche in Summe die produktbezogenen Parameter der jeweiligen Fähigkeit ergeben. Werte für diese Parameter müssen in firmeninternen Produktdatenbanken vorgehalten werden. Vorteilhaft ist hierbei, dass oftmals ein Charakteristikum (z. B. Materialkennwert) für verschiedene Fähigkeitenparameter genutzt werden kann.

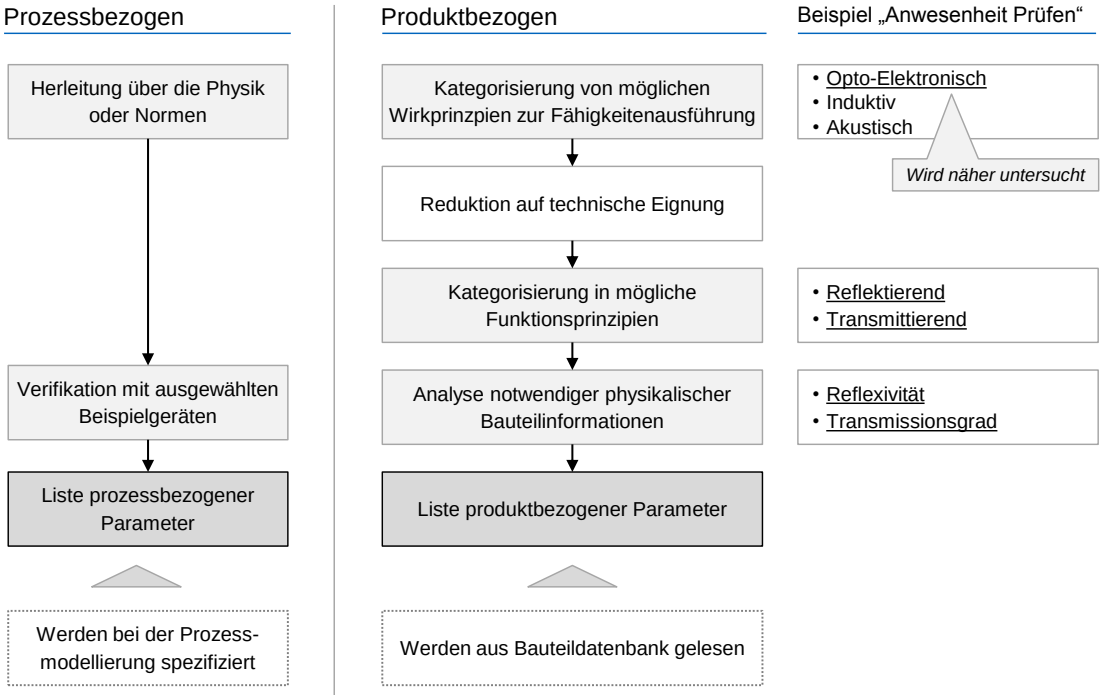

Abbildung 8 Methodik zur Ermittlung der Parameter elementarer Fähigkeiten

[3] Das Beispiel einer Fähigkeitenbasierten Programmierung von Bildverarbeitungssystemen mit Teach-In-Funktionalität kann Hammerstingl et al. (2015) entnommen werden.

4.3. Auflistung elementarer Fähigkeitenparameter

Die nachfolgende Auflistung beschreibt die Parameter exemplarischer Fähigkeiten. Sie werden aus Sicht von Prozessfähigkeiten beschrieben, stellen also Anforderungen an die Betriebsmittel dar. Auf Basis der Grundparameter (Abschnitt 4.3.1 und 4.3.2) und der allgemeinen Methodik (Abschnitt 4.2) können Nutzer fehlende Parametersets selbstständig definieren.

4.3.1. Grundparameter aktorischer Fähigkeiten

Die Eingangsparameter aktorischer Fähigkeiten sind generell spezifisch – ausgenommen die *maximale Ausführzeit* sowie die *Region-of-Interest (ROI)*. Gemeinsam haben alle aktorischen Fähigkeiten die verpflichtenden Ausgabeparameter *Status* und *Fortschritt*.

		Notwendigkeit	*Datentyp*	*Einheit*
Input	...	...	...	...
	ROI	v	region	[Koordinaten]
	Max. Ausführzeit	v	real	ms
Output	Status	v	enum	[Statemachine]
	Fortschritt	v	real	%

Alle numerischen Input-Parameter werden als Wertbereiche angegeben. v: verpflichtend, o: optional

Der *Status* wird als Zustandsautomat umgesetzt, welcher sich an die ANSI/ISA-88.00.01-2010 anlehnt (vgl. Abbildung 9). Als zusätzlicher Zustand wurde *Not configured* aufgenommen, in welchem sich das Gerät initial befindet. Durch Aufruf des Einrichtungsprozesses über die *Setup*-Fähigkeit schaltet dieses in *Idle*. Mittels eines *Factory Resets* kann wieder in den *Not configured*-Zustand gesprungen werden. Der Zustandsautomat gilt für alle Fähigkeiten.

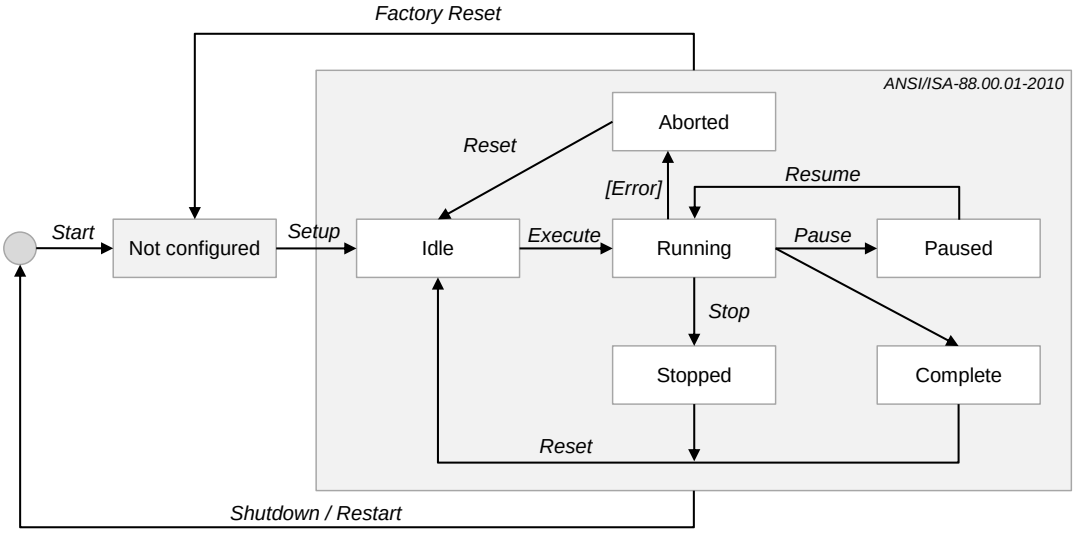

Abbildung 9 Zustandsautomat von Fähigkeiten. In Anlehnung an ANSI/ISA-88.00.01-2010.

4.3.2. Grundparameter sensorischer Fähigkeiten

Bei einem durchzuführendem Messprozess ist die *Einheit* des Ergebnises, die maximale *Messunsicherheit* und die maximale *Ausführzeit* anzugeben. Das Ergebnis stellt einen numerischen Wert in der vorgegebenen SI-Einheit dar.

Fähigkeitenklasse Messen		*Notwendigkeit*	*Datentyp*	*Einheit*
Input	Einheit	v	string	[SI-Einheit]
	Messunsicherheit	v	real	[SI-Einheit] oder Prozent
	ROI	v	region	[Koordinaten]
	Max. Ausführzeit	v	real	ms
	...	o	...	...
Output	Status	v	enum	[Statemachine]
	Ergebnis	v	real	[SI-Einheit]

Alle numerischen Input-Parameter werden als Wertbereiche angegeben. v: verpflichtend, o: optional

Bei Prüffähigkeiten ist ein *Prüfwert* mit SI-Einheit anzugeben. Die Prüfbedingung beschreibt, ob der aktuelle Messwert innerhalb, außerhalb oder gleich der Prüfmenge sein muss. Weiterhin ist die *Prüftoleranz* zu spezifizieren, innerhalb dieser eine Prüfung erfolgreich ist (z. B. *Prüfe Abstand* < 2 mm)[4]. Das Prüfergebnis stellt einen boolschen Wert dar.

[4] Die untere Schranke liegt im Beispiel bei 0 mm.

Fähigkeitenklasse Prüfen		*Notwendigkeit*	*Datentyp*	*Einheit*
Input	Prüfwert	v	real	[SI-Einheit]
	Prüfbedingung	v	string	[Operator]
	Prüftoleranz	v	string/real	[SI-Einheit] oder Prozent
	ROI	v	region	[Koordinaten]
	Max. Ausführzeit	v	real	ms
	...	o	...	
Output	Status	v	enum	[Statemachine]
	Ergebnis	v	bool	true/false

Alle numerischen Input-Parameter werden als Wertbereiche angegeben. v: verpflichtend, o: optional

4.3.3. Standardisierte Fähigkeiten

Bewegen

Bewegen		*Notwendigkeit*	*Datentyp*	*Einheit*
Input	Endpose	v	frame	[Koordinaten]
	Bewegungsart	o	enum	[lin], [circ]
	Posegenauigkeit	o	vector(6)	mm bzw. rad
	Geschwindigkeit	o	real oder function	$^{m}/_{s}$
	Beschleunigung	o	real oder function	$^{m}/_{s^2}$
	Trajektorie	o	frame array	[Koordinaten]
	Trajektoriengenauigkeit	o	vector(6) array	[Koordinaten]
	Max. Ausführzeit	v	real	ms
	...	o	...	...
Output	Status	v	enum	[Statemachine]
	Fortschritt	v	real	%

Alle numerischen Input-Parameter werden als Wertbereiche angegeben. v: verpflichtend, o: optional

Anmerkungen:

Bewegen besitzt keine ROI und wird nicht direkt durch den Anwender modelliert. Dies kommt daher, dass die Start- und Endpose abhängig von der räumlichen Beziehung zwischen ausführendem Gerät und Produkt sind. Demnach ist die Endpose geräteabhängig oder auf Fabrik-Weltkoordinaten bezogen. Beides widerspricht der prozesseitigen Lösungsneutralität. Im Falle eines Fügevorgangs würde vielmehr die ROI des *Fügeskills* die Relativpositionen der Fügepartner beschrieben; aus der ROI der *Halten*-Fähigkeit sowie der Pose des Fügebasisteils kann hieraus die Endpose des Bewegenskills berechnet werden. *Bewegen* besitzt eine wichtige Bedeutung im Materialfluss, jedoch wird dieser im Falle eines Matchmakings nicht durch den Anwender beschrieben, sondern je nach gewählten Betriebsmitteln dynamisch generiert.

Über die maximale Ausführzeit kann das System die Geschwindigkeit und Beschleunigung selbst bestimmen. Werden diese Werte angegeben, können sie als Maximalwert definiert sein oder eine Funktion über die Zeit darstellen. Über die optimale Trajektorie lässt sich eine Bahn zur Zielpose spezifizieren – ansonsten wird diese durch das Gerät berechnet.

Wird die Fähigkeit überbestimmt definiert, etwa durch die Angaben von Geschwindigkeit, Beschleunigung, Genauigkeit und Ausführzeit, obliegt es dem Softwaresystem eine Optimierung innerhalb der gegebenen Wertebereiche durchzuführen, um so auf einen entsprechenden geräteseitigen Wert zu gelangen.

Sichern

Sichern		*Notwendigkeit*	*Datentyp*	*Einheit*
Input	Aktiv	v	bool	true/false
	Sicherungsart	v	enum	[Norm]
	Sicherungskraft	o	real	N
	Posegenauigkeit	o	vector(6)	mm bzw. rad
	ROI	v	region	[Koordinaten]
	Max. Ausführzeit	o	real	ms
	...	o	...	...
Output	Status	v	enum	[Statemachine]
	Fortschritt	v	real	%

Alle numerischen Input-Parameter werden als Wertbereiche angegeben. v: verpflichtend, o: optional

Anmerkungen: Über den Aktivparameter kann ein Sicherungsvorgang gestartet oder beendet werden. Über die Sicherungsart wird ein kraft- oder formschlüssiges Wirkprinzip ausgewählt. Wird keine Kraft angegeben, dann sichert das System mit Maximalkraft.

Verbinden

Lichtbogenschweißen (Gasentladung)		*Notwendigkeit*	*Datentyp*	*Einheit*
Input	Aktiv	v	bool	true/false
	Schweißspannung	v	real	V
	Schweißstrom	v	real	A
	Gastyp	v	enum	[Norm]
	Gasvolumenstrom	v	real	m^3/s
	Elektrodenform	v	enum	[Norm]
	Elektrodenwerkstoff	v	enum	[Norm]
	Drahtvorschubgeschwindigkeit	v	real	m/s
	Drahtwerkstoff	v	enum	[Norm]
	ROI	v	region	[Koordinaten]
	Max. Ausführzeit	o	real	ms
	...	o	...	...
Output	Status	v	enum	[Statemachine]
	Fortschritt	v	real	%

Alle numerischen Input-Parameter werden als Wertbereiche angegeben. v: verpflichtend, o: optional

Anmerkungen: Der Grundwerkstoff ergibt sich aus den Produktinformationen.

Messen

Kraft messen		*Notwendigkeit*	*Datentyp*	*Einheit*
Input	Einheit	v	string	N
	Messunsicherheit	v	real	[SI-Einheit] oder Prozent
	ROI	v	region	[Koordinaten]
	Max. Ausführzeit	v	real	ms
	...	o	...	...
Output	Status	v	enum	[Statemachine]
	Ergebnis	v	real	[SI-Einheit]

Alle numerischen Input-Parameter werden als Wertbereiche angegeben. v: verpflichtend, o: optional

Anmerkungen: Andere Messskills werden (bis auf die Einheit) ähnlich modellliert.

Prüfen

Anwesenheit prüfen		*Notwendigkeit*	*Datentyp*	*Einheit*
Input	Prüfwert	v	real	[Einheitenlos]
	Prüfbedingung	v	string	[Operator]
	Prüftoleranz	v	string/real	[Einheitenlos]
	ROI	v	region	[Koordinaten]
	Max. Ausführzeit	v	real	ms
	...	o	...	
Output	Status	v	enum	[Statemachine]
	Ergebnis	v	bool	true/false

Alle numerischen Input-Parameter werden als Wertbereiche angegeben. v: verpflichtend, o: optional

Anmerkungen: Andere Prüfskills werden (bis auf die Einheit) ähnlich modellliert.

Informationsaustausch

Information speichern		*Notwendigkeit*	*Datentyp*	*Einheit*
Input	Tabelle	o	string	[...]
	Identifizierung	v	string	[...]
	Wertname (Key)	v	string	[...]
	Wert	v	string	[...]
	Max. Ausführzeit	v	real	ms
	...	o	...	...
Output	Status	v	enum	[Statemachine]
	Fortschritt	v	real	%

Alle numerischen Input-Parameter werden als Wertbereiche angegeben. v: verpflichtend, o: optional

Information lesen		*Notwendigkeit*	*Datentyp*	*Einheit*
Input	Tabelle	o	string	–
	Identifizierung	v	string	–
	Wertname (Key)	v	string	–
	Max. Ausführzeit	v	real	ms
	...	o	...	...
Output	Status	v	enum	[Statemachine]
	Fortschritt	v	real	%
	Wert	v	string	–

Alle numerischen Input-Parameter werden als Wertbereiche angegeben. v: verpflichtend, o: optional

Anmerkungen:
Für das Verarbeiten von Informationen ist die Semantik der Information stark von der Aufgabe bzw. Hardware abhängig. Eine generische Fähigkeitenschnittstelle lässt sich demnach

nur aufbauen, wenn die Informationsverarbeitung allgemeingültig gehalten wird. Hiermit wird die semantische Standardisierung eine Ebene „tiefer“ innerhalb der abzuspeichernden Parameterwerte verlegt.

Die *Identifizierung* kennzeichnet eine Entität eindeutig (z. B. ein spezifisches Produkt), an dieses können über die Wertname–Wert–Beziehung Informationen angehängt werden. Die Identifizierung kann als Index gesehen werden, welche mit Key-Value-Paaren befüllt werden. Informationsfähigkeiten besitzen keine ROI, da sie Outputparameter von Gerätefähigkeiten abspeichern und damit nicht direkt produktbezogen sind.

Mensch-Maschine-Interaktion

Informationen visuell anzeigen		*Notwendigkeit*	*Datentyp*	*Einheit*
Input	Anzeigewert	v	[...]	[...]
	Betrachtungszeit	v	enum	[1]
	Datenumfang	v	enum	[2]
	Extremwerte	o	[...]	[3]
	Max. Ausführzeit	v	real	ms
	...	o	...	...
Output	Status	v	enum	[Statemachine]
	Fortschritt	v	real	%

Alle numerischen Input-Parameter werden als Wertbereiche angegeben. v: verpflichtend, o: optional

Anmerkungen:

- Bei Fähigkeiten zur Anzeige wird davon ausgegangen, dass der Anwender nur die Rahmenparameter der Anzeige festlegt und das Gerät die notwendige Anzeigeform und -layout stelbst generiert.
- Fähigkeiten der Mensch-Maschine-Interaktion besitzen keine ROI, da sie Outputparameter von Gerätefähigkeiten verarbeiten und damit nicht direkt produktbezogen sind.
- Über den Datentyp des *Anzeigewerts* (z. B. enumeration oder numerisch) sowie der weiteren Eingabeparameter kann das Anzeigegerät eine geeignete Darstellungsform selbst bestimmen. Im Falle der Fähigkeit *visuelle Anzeige* sind das bspw. Analoganzeigen, Digitalanzeigen oder bildhafte Anzeigen mit ihren jeweiligen Ausprägungen als Istwertanzeige, Differenzanzeige, Voranzeige, Imperative Anzeige etc.[5]. Der Aufbau der Darstellungsform benötigt mitunter Rückfragen beim Anwender (vgl. Abschnitt 3.2.2).
- [1]: Zeitpunktbetrachtung oder historischer Datenverlauf.

[5] vgl. (Schmidtke & Jastrzebska-Fraczek 1993)

- [2]: Anzahl der gleichzeitig anzuzeigenden Informationen (1 bis ∞). Beispielsweise ergibt die Anzeige von zwei Achsgewindigkeiten in einem Diagramm den Datenumfang von *Zwei*.
- [3]: Min.-Max.-Werte zur festlegung der Darstellunggrenzen.

Sonderoperationen

Erwärmen		*Notwendigkeit*	*Datentyp*	*Einheit*
Input	Wärmestrom	v	real	W
	ROI	v	region	[Koordinaten]
	...	o	...	...
Output	Status	v	enum	[Statemachine]
	Fortschritt	v	real	%

Alle numerischen Input-Parameter werden als Wertbereiche angegeben. v: verpflichtend, o: optional

Anmerkungen:
Das Erreichen einer geforderten Zieltemperatur kann über die *Temperatur messen*-Fähigkeit ermittelt und in Kombination als zusammengesetzte Fähigkeit modelliert werden.

4.3.4. Konfigurationsfähigkeiten

Automatisierungskomponente

Allgemein		*Notwendigkeit*	*Datentyp*	*Einheit*
Input	Zeitverzögerung	o	real	ms
	...	o	...	...
Output	Status	v	enum	[Statemachine]
	Fortschritt	v	real	%

Alle numerischen Input-Parameter werden als Wertbereiche angegeben. v: verpflichtend, o: optional

Parametrieren		*Notwendigkeit*	*Datentyp*	*Einheit*
Input	Parametername (Key)	v	string	[...]
	Wert	v	string	[...]
	Max. Ausführzeit	v	real	ms
	...	o	...	...
Output	Status	v	enum	[Statemachine]
	Fortschritt	v	real	%

Alle numerischen Input-Parameter werden als Wertbereiche angegeben. v: verpflichtend, o: optional

Anmerkungen:
Neben den Fähigkeiten des *Informationsaustauschs* ist auch die Fähigkeit der *Parametrierung* stark aufgaben- und hardwareabhängig. Eine Definition muss deshalb auf Fähigkeitenseite generisch erfolgen. Es bietet sich der Einsatz einer Wissensbasis (Ontologie) an, welche aufgrund einer gegebenen Aufgabe die spezifisch für das Gerät notwendigen Parameter ermittelt und diese über die hier genannte Parametrierungsfähigkeit dem Gerät mitteilt.

5. Zusammengesetzte Fähigkeiten

Zusammengesetze Fähigkeiten bestehen aus einer Anordnung von elementaren Fähigkeiten. Beispiele sind *Fügen durch Einpressen* oder *Produkt verpacken*. Die Anzahl und Art der Parameter einer zusammengesetzen Fähigkeit muss nicht per se der Summe der Parameter der elementaren Fähigkeiten entsprechen. Weiterhin können gänzlich neue Fähigkeiten durch eine bestimmte Fähigkeitenkombination sowie Eigenschaften der umsetzenden Betriebsmittel entstehen. Dieses Phänomen wird in Anlehnung an die Psychologie als *Emergenz* bezeichnet. So kann beispielsweise zweimal die elementare Fähigkeit *Anwesenheit prüfen* verwendet werden, um eine (diskrete) *Höhenprüfung* durchzuführen, etwa von Bauteilen an einem Förderband. Die Durchführung der Höhenprüfung setzt jedoch vorraus, dass für die beiden modellierten Elementarfähigkeiten a) verschiedene Geräte ausgewählt werden, b) diese parallel im Raum ausgerichtet sind und c) die Messung bei beiden Fähigkeiten zum gleichen Zeitpunkt aufgerufen wird (vgl. Abbildung 10, links).

Ein weiteres Beispiel ist die Verbindung zweier Geräte über ihre mechanische Schnittstelle, bspw. ein Roboter mit einem Greifer. Durch die Kombination entsteht so ein neues Gesamtgerät, welches zusammengesetzte Fähigkeiten anbieten kann (hier: Handhabung). Dabei ist zu beachten, dass die Sicherungsvorgänge zu Begin und Ende der Handhabung in der Aufgabenmodellierung beide der gleichen (noch unbekannten) Geräteentität zugewiesen werden. Dies erfordert somit eine Art *Template-Konzept* innerhalb der Prozessschritt-Modellierung (vgl. Abbildung 10, rechts)..

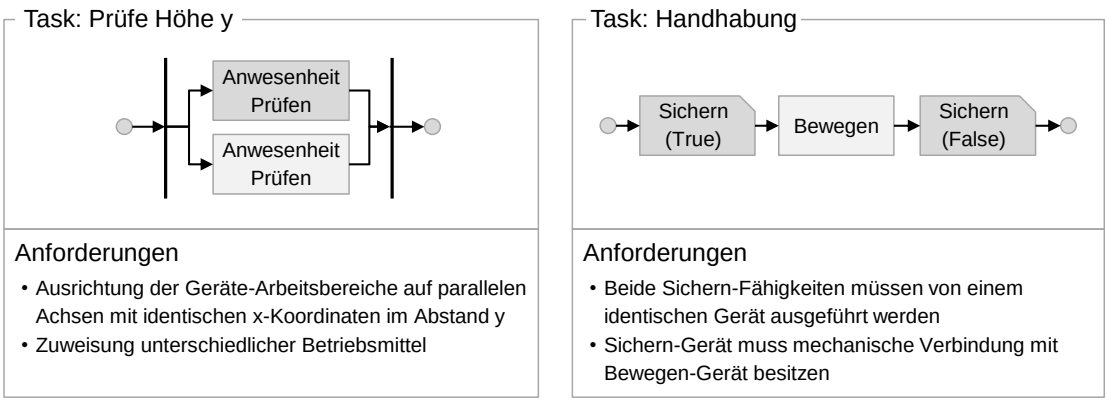

Abbildung 10 Beispiele für Anforderungen an die Task-Modellierung.

Aus den Beispielen ergeben sich folgende Anforderungen an eine Modellierung von Aufgaben:

- Möglichkeit der Modellierung von Kontrollflüssen inklusive zeitlicher Parallelität auf Basis von Prozessschritten (elementaren Fähigkeiten). Hier bietet sich beispielsweise eine Modellierung in Anlehnung an die Ablaufsprache (AS, engl. Sequential Function Chart) der IEC 61131-3 an.
- Möglichkeit zur Gruppierung von Prozessschritten zu Aufgaben.
- Möglichkeit zur Definition von identischen Akteuren während der Modellierung von Kontrollflüssen („Geräte-Templates“)
- Überprüfung geeigneter Geräte auf Basis ihrer mechanischen, elektrischen und informationstechnischen Schnittstellen sowie geometrischen Beziehungen durch die Matchmaking-Software.

5.1. Methode zur Ermittlung

Die Taxonomie zusammengesetzter Fähigkeiten entstand im Zuge der Ermittlung der Taxonomie elementarer Fähigkeiten (vgl. Kapitel 3). Die Aufteilung erfolgt anhand der beschriebenen Definitionen in Kapitel 2.

5.2. Übersicht zusammengesetzter Fähigkeiten

Abbildung 11 zeigt die Taxonomie zusammengesetzer Fähigkeiten (bzw. Tasks). Viele der zusammengesetzten Fähigkeiten ähneln vom Wortlaut der elementaren Fähigkeiten, sie wurden jedoch um Bewegungsoperationen erweitert. So beinhaltet die zusammengesetzte Fähigkeit „Schrauben“ sowohl den Elementarprozess als auch die zugehörigen Bewegungsfahrten.

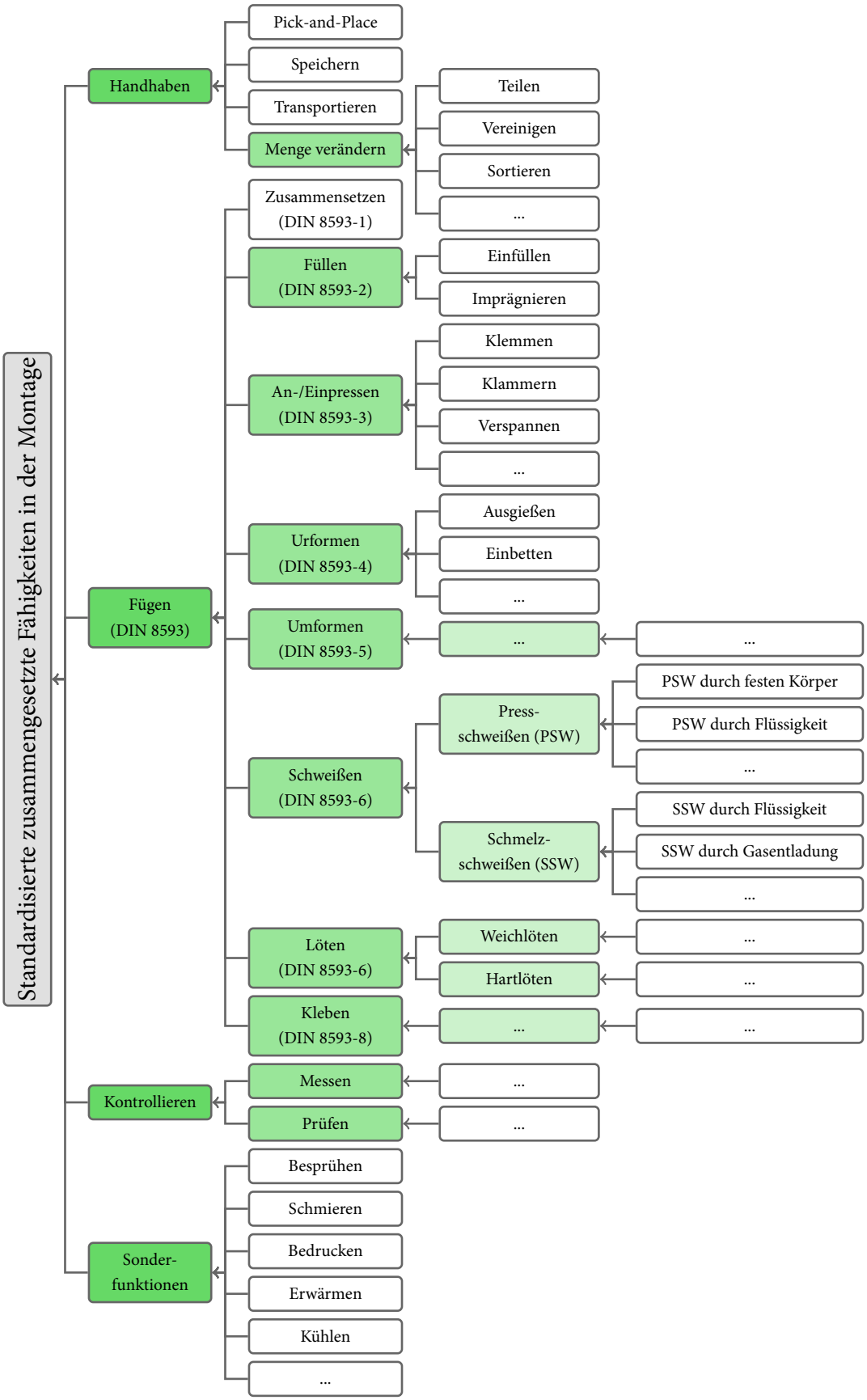

Abbildung 11 Standardisierte zusammengesetzte Fähigkeiten in der Montage

5.3. Parameter zusammengesetzter Fähigkeiten

Speichern

Speichern		*Notwendigkeit*	*Datentyp*	*Einheit*
	Ordnungszahl (OZ)	v	enum	[Norm]
	Lagerungspose	o	frame	[Koordinaten]
	Einlagerung	v	bool	true/false
Input	Speichergröße	o	int	[Koordinaten]
	Max. Durchlaufzeit	o	real	ms
	Max. Ausführzeit	o	real	ms
	...	o	...	...
	Status	v	enum	[Statemachine]
Output	Fortschritt	v	real	%
	Füllstand des Speichers	v	real	%

Alle numerischen Input-Parameter werden als Wertbereiche angegeben. v: verpflichtend, o: optional

Anmerkungen:

- Speichern besteht immer aus Halte- sowie Bewegungsoperationen und wird deshalb als Task gesehen.
- Die Fähigkeit besitzt zwei abhängige Zustände, das *Einlagern* (Speichern aktiv) und das *Auslagern* (Speichern nicht mehr aktiv). Beide Zustände beziehen sich auf eine gemeinsame Menge. Für eine Modellierung erscheint es deshalb sinnvoll, dass ein Gerät (z. B. ein Lager oder Puffer) die Fähigkeit *Speichern* anbietet und über dessen Parameter die Ein- oder Auslagerung definiert wird[1].

[1] Damit unterscheidet sich die Modellierung von bestehenden Quellen.

6. Umsetzung

Ein Auszug der hier vorgestellten Fähigkeiten und zusammengesetzten Fähigkeiten wurde in einer Software umgesetzt, welche die freie Modellierung von Montageprozessen ermöglicht (vgl. Abbildung 12). Hierbei können Prozessschritte und Aufgaben instanziert und als Ablauf beschrieben werden. Die Modellierung des Daten- sowie Materialflusses kann unabhängig voneinander erfolgen. In jedem Prozessschritt können dessen spezifische Parameter angegeben werden.

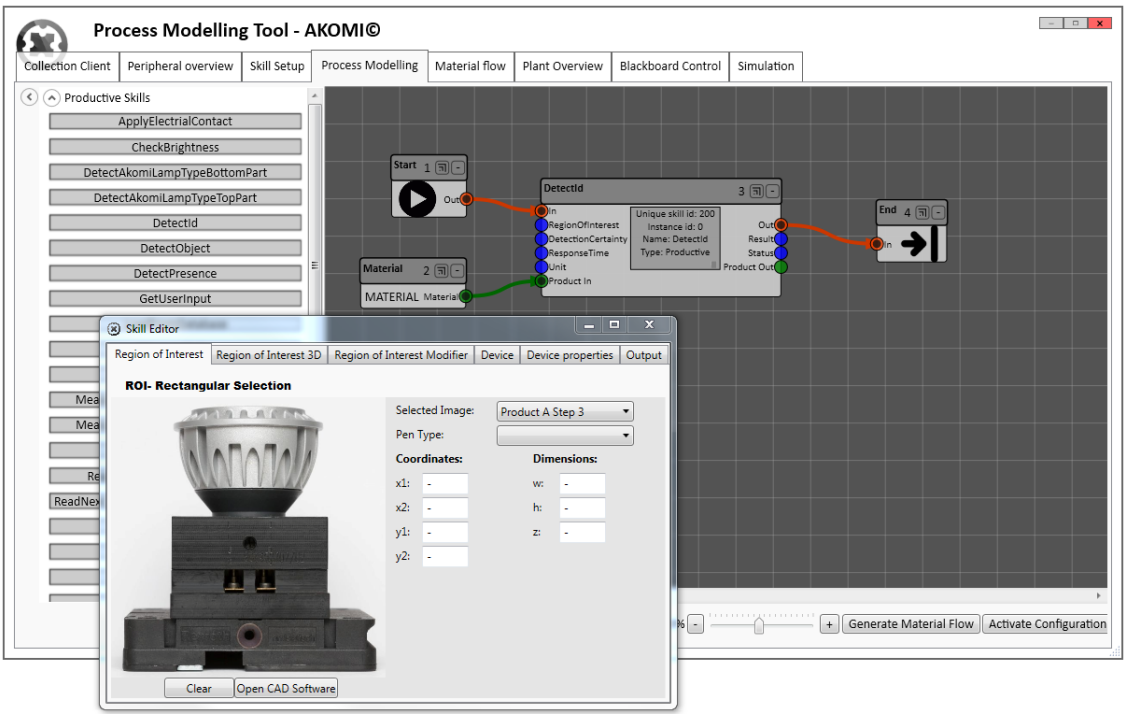

Abbildung 12 Screenshot aus der entwickelten Software zur fähigkeitenbasierten Prozessmodellierung. Links: Fähigkeiten. Rechts: Erstellter Prozessablauf. Unten: Detailfenster zur Parameterspezifikation eines Prozessschrittes.

Mittels einer „Blackboard-Architektur“ werden für jeden Prozessschritt verschiedenste Eignungsprüfungen (z. B. Prozesseignung, Erreichbarkeit im Materialfluss, geometrische Eignung, Kollision etc.) durchgeführt und ein Matchmaking zu geeigneten Betriebsmitteln erstellt. Nachdem geeignete Betriebsmittel erst gegen Ende der Modellbildung bestimmt werden, ist auch der genaue Materialfluss erst zu diesem Zeitpunkt bekannt. Nach Bestätigung des vorgeschlagenen Matchmakings wird dieser somit automatisiert generiert und eingefügt.

Die lösungsneutrale Prozessbeschreibung ist nicht nur Hersteller- sondern zu einem bestimmten Grad auch Wirkprinzipunabhängig[1]. Auch Werker können über Smart Devices die hier vorgestellten Fähigkeiten im Netzwerk anbieten und von der Matchmaking-Software für Prozessschritte eingeplant werden.

Damit ermöglicht der Ansatz Anwendern einen Flexbilitätszuwachs im Bereich der Prozess-, Mengen- und Ausfallflexbilität. Zusätzlich kann bei geplanten Produkt- oder Prozessanpassungen vorab überprüft werden, ob geeignete Betriebsmittel zur Verfügung stehen.

Im Anschluss wird der Prozess über einen Codegenerator in Strukturierten Text (IEC 61131-3) übersetzt und automatisiert auf eine SPS geladen. Diese führt den Prozess echtzeitfähig aus. Die Fähigkeiten komplexer Geräte (wie etwa Roboter und Bildverarbeitungssysteme) werden als Dienste in eigenen OPC UA Servern erstellt. Die Steuerung ruft diese Geräte als Client auf.

Das Konzept wurde am Beispiel eines Montagedemonstrators (vgl. Abbildung 13 und Abbildung 14) umgesetzt.

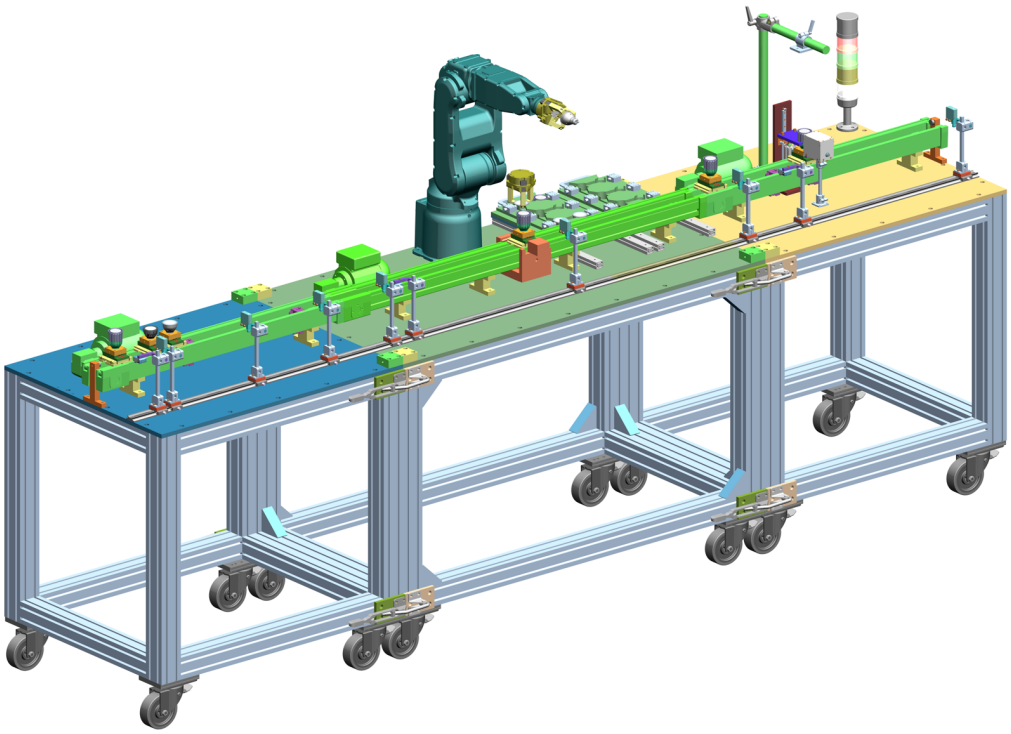

Abbildung 13 Vereinfachtes CAD-Modell des AKOMI-Montagedemonstrators.

[1] Beispielsweise würde sowohl ein mechanischer Taster als auch ein Kamerasystem die identische Fähigkeit *Anwesenheit prüfen* anbieten. Die Matchmaking-Software würde die aufgabenspezifische Eignung ermitteln.

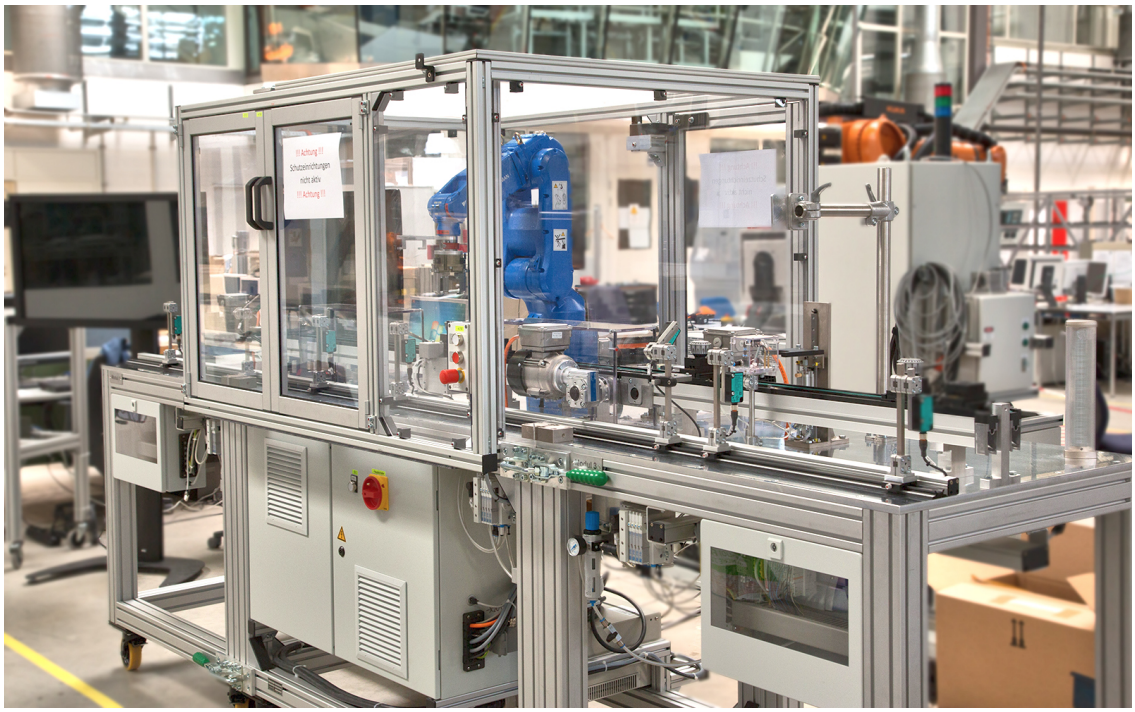

Abbildung 14 AKOMI-Montagedemonstrator (Spende der Firma OSRAM)

7. Literaturverzeichnis

Backhaus & Reinhart 2015
Backhaus, J.; Reinhart, G.: Digital description of products, processes and resources for task-oriented programming of assembly systems. Journal of Intelligent Manufacturing (2015).

Backhaus, Hammerstingl et al. 2017
Backhaus, J.; Hammerstingl, V.; Michniewicz, J.; Stocker, C.; Ulrich, M.; Reinhart, G.: Montage 4.0. In: Reinhart, G. (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0. Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik. München: Hanser, 2017, S. 513–554, ISBN: 978-3-446-44642-7.

Cândido & Barata 2007
Cândido, G.; Barata, J.: A Multiagent Control System for Shop Floor Assembly. In: Mařík, V.; Vyatkin, V.; Colombo, A. W. (Hrsg.): Holonic and Multi-Agent Systems for Manufacturing. Bd. 4659. Lecture Notes in Computer Science. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007, S. 293–302, ISBN: 978-3-540-74478-8.

DIN 1319-1
Deutsches Institut für Normung (1995): Grundlagen der Meßtechnik. DIN. Bd. ICS 17.020; 01.040.17. Berlin: Beuth.

DIN 8580
Deutsches Institut für Normung (2003a): Fertigungsverfahren. DIN. Bd. ICS 01.040.25; 25.020.

DIN 8593-4
Deutsches Institut für Normung (2003b): Fertigungsverfahren Fügen. DIN. Bd. ICS 01.040.25; 25.020; 25.120.99.

Feldmann & Spur 2014
Feldmann, K.; Spur, G. (2014): Handbuch Fügen, Handhaben, Montieren. München: Hanser. 2014.

Hammerstingl et al. 2015
Hammerstingl, V.; Moule, L.; Reinhart, G.: Bildverarbeitungssysteme als cyber-physische Sensoren. atp edition 57 (2015) (11), S. 44–57.

Hammerstingl et al. 2016
Hammerstingl, V.; Reinhart, G.; Zimmermann, P.: Automatisierte Konfiguration und Selbst-

auskunft von Industrierobotern. Intelligente Vernetzung mittels ROS und OPC UA. Industrie 4.0 Management 32 (2016) (6). Eingereicht am 27.11.2015, S. 17–21.

Hesse & Schnell 2014
Hesse, S.; Schnell, G.: Sensoren für die Prozess- und Fabrikautomation. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014. ISBN: 978-3-658-05866-1.

Huckaby & Christensen 2012
Huckaby, J.; Christensen, H. I.: A Taxonomic Framework for Task Modeling and Knowledge Transfer in Manufacturing Robotics. In: Cognitive robotics. Technical report / American Association for Artificial Intelligence WS 2012,6. Palo Alto, Calif.: AAAI Press, 2012, S. 94–101, ISBN: 978-157735571-7.

Kluge 2011
Kluge, S.: Methodik zur fähigkeitsbasierten Planung modularer Montagesysteme. Fakultät für Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik. Dissertation. Universität Stuttgart, 2011. Stuttgart.

Loskyll 2013
Loskyll, M.: Entwicklung einer Methodik zur dynamischen kontextbasierten Orchestrierung semantischer Feldgerätefunktionalitäten. Bd. 25 : Kontextadaptive Automatisierung. Fortschritt-Berichte pak. Kaiserslautern: Techn. Univ, 2013. ISBN: 978-3-943995-29-9.

Lotter & Wiendahl 2012
Lotter, B.; Wiendahl, H.-P.: Montage in der industriellen Produktion. Ein Handbuch für die Praxis. 2., Aufl. VDI-Buch. Berlin: Springer Berlin, 2012. ISBN: 978-3-642-29060-2.

Morrow & Khosla 1997
Morrow, J. D.; Khosla, P. K.: Manipulation task primitives for composing robot skills. In: Proceedings of International Conference on Robotics and Automation. International Conference on Robotics and Automation. (Albuquerque, NM, USA). IEEE. 1997, S. 3354–3359. ISBN: 0-7803-3612-7.

Schmidt 1992
Schmidt, M.: Konzeption und Einsatzplanung flexibel automatisierter Montagesysteme. Bd. Bd. 41. IWB Forschungsberichte. Berlin & New York: Springer, 1992. ISBN: 978-3540550259.

Schmidtke & Jastrzebska-Fraczek 1993
Schmidtke, H.; Jastrzebska-Fraczek, I.: Ergonomie. Daten zur Systemgestaltung und Begriffsbestimmungen. München: Hanser, 1993. ISBN: 978-3-446-43480-6.

Smale & Ratchev 2009
Smale, D.; Ratchev, S.: A Capability Model and Taxonomy for Multiple Assembly System Reconfigurations. IFAC Proceedings Volumes 42 (2009) (4), S. 1923–1928.

VDI 2860
Verein Deutscher Ingenieure (1990): Montage- und Handhabungstechnik - Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole. VDI-Richtlinie. Bd. 2860. Düsseldorf: VDI.

8. Review

Folgende Personen habe diese Veröffentlichung überprüft. Die Anmerkungen der Reviewer wurden entsprechend berücksichtigt.

- Leiber, Daria – Wissenschaftliche Mitarbeiterin im Forschungsprojekt ProMoA (Einsatz von fähigkeitenbasierter Modellierung). Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) – Technische Universität München (TUM).
- Günther, Till – Mitglied des Institutsleitungskreises Themengruppe Montagetechnik und Robotik, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) – Technische Universität München (TUM).
- Heidel, Roland – Mitglied mehrerer Fachausschüsse und Buchautor zum Thema Industrie 4.0, roland.heidel@heidelcom.com