

# Fähigkeitsorientierte Aufgabenzuordnung für die Mensch-Roboter-Kollaboration in sicherheitskritischen Einsatzsituationen

IRIS GRÄSSLER, Universität Paderborn, Heinz Nixdorf Institut, Lehrstuhl für Produktentstehung, Deutschland

JENS POTTEBAUM, Universität Paderborn, Heinz Nixdorf Institut, Lehrstuhl für Produktentstehung, Deutschland

DANIEL ROESMANN, Universität Paderborn, Heinz Nixdorf Institut, Lehrstuhl für Produktentstehung, Deutschland

NILS MANDISCHER, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Institut für Getriebetechnik, Maschinendynamik und Robotik, Deutschland

MARIUS GÜRTLER, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Institut für Getriebetechnik, Maschinendynamik und Robotik, Deutschland

MATHIAS HÜSING, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Institut für Getriebetechnik, Maschinendynamik und Robotik, Deutschland

BURKHARD CORVES, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Institut für Getriebetechnik, Maschinendynamik und Robotik, Deutschland

In kritischen Einsatzsituationen der Menschenrettung, Brandbekämpfung, technischen Hilfe oder im ABC-Einsatz können Roboter zur Erhöhung der Effizienz und gleichzeitig zur Reduktion der Risiken für Rettungskräfte beitragen. Dazu muss die Mensch-Roboter-Kollaboration in einsatztaktischen Konzepten realisiert werden. Der vorliegende Beitrag stellt dazu ein Vorgehen zur fähigkeitsorientierten Aufgabenzuordnung für die Mensch-Roboter-Kollaboration in kritischen Einsatzsituationen mit Einbindung in die Einsatz-Aufbauorganisation vor. Hierzu werden bestehende Ansätze der fähigkeitsgerechten Aufgabenzuordnung für die Mensch-Roboter-Kollaboration aus der Produktionstechnik sowie der Anwendungskontext analysiert. Technologiegetrieben und bedarfsorientiert werden Anforderungen abgeleitet. Ziel der Adaption ist ein Matchmaking zwischen Aufgaben, die aus Prozessschritten gefolgert werden, und Fähigkeiten, die für Mensch und Roboter auf der Grundlage eines übergreifenden Modells abgebildet werden. Damit kann die Effizienz von Einsätzen und die Sicherheit von Einsatzkräften gesteigert werden.

## 1 EINLEITUNG

Die Robotik hat sich aufgrund von Verbesserungen in der Sensorik, in der Informationsverarbeitung sowie in der Energieversorgung in den letzten Jahrzehnten rasant entwickelt. Die Einsatzdomänen reichen von Staubsaugrobotern für den Haushalt bis hin zu turbinengetriebenen Luftfahrzeugen für die militärische Aufklärung [1]. Bei mobilen Robotern handelt es sich um mechatronische Systeme, die sich durch mechanische, elektrische/elektronische sowie informationstechnische Elemente auszeichnen [2]. Derartige mobile Roboter sind ein Spezialgebiet der Rettungsrobotik. In kritischen Einsatzsituationen, die beispielsweise durch Unzugänglichkeit, Einsturzgefahr oder Kontamination mit Schadstoffen gekennzeichnet sind, können Roboter zur Erhöhung der Effektivität und gleichzeitig zur Reduktion der Risiken für Rettungskräfte beitragen [3]. Sie werden dabei entweder für klar definierte Aufgaben mit hoher Automatisierung eingesetzt (z.B. Schadstoffmessungen) oder durch einen Operator gesteuert (z.B. Personenortung) [4].

---

Permission to make digital or hard copies of part or all of this work for personal or classroom use is granted without fee provided that copies are not made or distributed for profit or commercial advantage and that copies bear this notice and the full citation on the first page. Copyrights for third-party components of this work must be honored. For all other uses, contact the owner/author(s).

© Copyright held by the owner/author(s).

Manuscript submitted to ACM

Die Akzeptanz für derartige Systeme ist für den jeweiligen Einsatzfall kritisch zu würdigen [5]. Im Innenangriff der Feuerwehr existieren aktuell keine kommerziellen Roboter, die mit dem Menschen aktiv interagieren. Entscheidend für den zielführenden Einsatz von Robotern ist die aufgabenbezogene Disposition und die sichere Kollaboration zwischen Roboter und Mensch [4]. Hierzu ist eine integrative Sicht auf menschliche und technische Fähigkeiten erforderlich.

Der vorliegende Beitrag stellt ein Vorgehen zur fähigkeitsorientierten Aufgabenzuordnung für die Mensch-Roboter-Kollaboration in kritischen Einsatzsituationen mit Einbindung in die Einsatz-Aufbauorganisation vor. Der Beitrag ist wie folgt gegliedert: In Kapitel 2 werden mithilfe einer systematischen Literaturrecherche die Grundlagen der Mensch-Roboter-Kollaboration mit Fokus auf bestehende Ansätze der fähigkeitsorientierten Aufgabenzuordnung analysiert. Die Untersuchung des Anwendungskontexts umfasst den aktuellen Stand der Rettungsrobotik sowie Prozesse in der Einsatzorganisation der Feuerwehr. Ansätze der fähigkeitsorientierten Aufgabenzuordnung werden insbesondere in der Produktionstechnik erforscht, wo beispielsweise Montagetätigkeiten kollaborativ bearbeitet werden. Zur Adaption werden Anforderungen an das Vorgehen im Kontext von Einsatzprozessen der Feuerwehr abgeleitet. Im Kapitel 3 wird das SysML-basierte konzipierte Vorgehen vorgestellt, welches in Kapitel 4 an einem realitätsnahem Anwendungsfall evaluiert wird. Abschließend werden eine Zusammenfassung und ein Ausblick auf zukünftige Forschung im Bereich der Mensch-Roboter-Kollaboration in der Feuerwehr gegeben.

## 2 GRUNDLAGEN

Grundlagen der Mensch-Roboter-Kollaboration, der Rettungsrobotik und der Einsatztaktik stellen die theoretische Basis für die weiterführende Entwicklung dar. Sie dienen der Bestimmung von Anforderungen an ein Vorgehen zur fähigkeitsorientierten Aufgabenzuordnung in der Mensch-Roboter-Kollaboration in sicherheitskritischen Einsatzsituationen. In den Anforderungen müssen die Ebenen von grundlegender Roboter-Handhabung bis zur Integration in die Einsatzorganisation abgebildet werden.

### 2.1 Mensch-Roboter-Kollaboration

Der Einsatz von Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK) ermöglicht es, die Stärken von Mensch und Roboter flexibel und vor allem aufeinander abgestimmt einzusetzen. Dadurch können Leistungen gesteigert, Risiken gemindert und Entlastungen für den Menschen geschaffen werden. Grundsätzlich existiert keine einheitliche Taxonomie für die Klassifizierung der MRK [6]. Die DIN EN ISO 10218-2 schlägt eine Klassifikation anhand der Variablen Interaktionsform und Rolle des Menschen vor. Daraus resultieren die drei Ausprägungen Ko-Existenz, Kooperation und Kollaboration [7]. Bei den Ausprägungen Kooperation und Kollaboration erfolgt eine Zusammenarbeit mit gemeinsamer Zielsetzung. Grundlagen der Aufgabenplanung für die MRK existieren in der Produktionstechnik. Takata und Hirano [8] schlagen einen Algorithmus zur Aufgabenverteilung vor, der die Gesamtkosten in unsicheren Umgebungen minimiert, indem Zuordnungsmuster und änderungswahrscheinlichkeiten berücksichtigt werden. Die Aufgabenzuordnung bei Fechter et al. [9] basiert auf der möglichen Automatisierbarkeit von Tätigkeiten. Der Mensch übernimmt lediglich die verbleibenden Tätigkeiten. Dahingegen bindet Beumelburg [10] neben den technischen Fähigkeiten auch die personellen Fähigkeiten in die Aufgabenzuordnung ein. In einem multi-kriteriellen Ansatz wird die Zuordnung vor den Unternehmenszielen optimiert. Ein ähnliches fähigkeitsorientiertes Vorgehen wird hierzu auch von Ranz et al. [11] vorgeschlagen, bei dem die Fähigkeit für eine Aufgaben über die drei Dimensionen Prozesszeit, Investitionskosten und Prozessqualität bestimmt wird. Einen weiteren Ansatz schlagen Blankemeyer et al. [12] vor. Die Zuordnung erfolgt nach einem sequentiellen Vorgehen. Nach einem Quick-Check erfolgt eine simulative Überprüfung und abschließend eine arbeitswissenschaftliche Bewertung.

## 2.2 Rettungs- und Einsatzrobotik

Roboter finden in der Feuerwehr und Notrettung zunehmend Anwendung. Insbesondere durch den Brand in Notre Dame 2019 [13] oder die Aufräumarbeiten am Nuklearkraftwerk Fukushima [14–16] erhalten derartige Systeme auch populärwissenschaftliche Aufmerksamkeit. Grundsätzlich werden Rettungsroboter aufgrund ihres Einsatzgebiets auf dem Boden (Bodenroboter bzw. Unmanned Ground Vehicle/UGV) und in der Luft (Drohnen bzw. Unmanned Aerial Vehicle/UAV). Drohnen werden vornehmlich zur Lageerkundung weitläufiger Areale oder zur Abwehr von Fremdflugkörpern eingesetzt [3], drängen aber auch zunehmend in den Inneneinsatz. Bodenroboter treten in zwei Formen auf: Laufroboter und Raupen- bzw. Radroboter. Laufroboter eignen sich besonders für stark unebenes Gelände. Durch die komplexe Regelung und hohen Kosten gibt es bisher allerdings nur wenige Produkte mit Marktreife. Einen wichtigen Meilenstein für Rettungsrobotik stellte die DARPA Robotics Challenge dar [17], durch die 2015 viele neue Entwicklungen im Bereich Laufroboter angestoßen wurden.

Bei der Brandbekämpfung am Boden werden Raupen- und Radroboter verwendet [3]. Wie auch alle zuvor genannten Systeme, werden diese Roboter vornehmlich teleoperiert. Vollautonome Roboter kommen nur sehr selten und ausschließlich in der Forschung zur Anwendung. Autonomie in der direkten Nähe von Menschen im Brandeinsatz gibt es gar nicht. Die Systeme, die zum Einsatz kommen, dienen der direkten Brandbekämpfung, i.d.R. von außen, oder zur Erkundung unbekannter Lagen – als Vorhut für den Angriffstrupp. Roboter- und menschlicher Angriff im Gebäude sind dabei strikt räumlich oder zeitlich getrennt. In den Projekten NIFTi [18], TRADR [19] und ICARUS [14] wurden Strategien für gemischte Teams erforscht. Der Fokus lag dabei allerdings auf der Verbesserung der Systematik und Ausprägung von Nutzerschnittstellen für Ferndiagnostik und Erkundung ohne direkte Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK) am Einsatzort. In Deutschland schlossen sich Vertreter aus Forschung und Anwendung zum BMBF Cluster „Deutsches Rettungsrobotik Zentrum e.V.“ (DRZ) zusammen. Durch das DRZ wird der erste Roboterleitwagen betrieben, der den mobilen Einsatz von Robotern in Gefahrenlagen erlaubt. Das National Centre of Competence in Research Robotics (NCCR) ist ein Zusammenschluss Schweizer Robotik-Experten und erforscht u.a. Drohnen und Laufroboter, sowie deren Technik-Technik-Kollaboration.

## 2.3 Prozesse im Einsatz

Roboter müssen in die Einsatzorganisation integriert werden. Dazu ist zunächst die Planung und Bereitstellung von Mitteln [20] zu betrachten, um einen Roboter an den Einsatzort zu transportieren, einsatzbereit zu machen und zu operieren. Roboter sind Einsatzmittel, die von taktischen Einheiten wie Trupp, Gruppe und Staffel eingesetzt werden. Entsprechend können sie als Grundausstattung der Einheit auf einem Fahrzeug verlastet werden. Ein Beispiel ist die RTE-Roboterplattform, die die Firma Rosenbauer im Hilfeleistungslöschgruppenfahrzeug (HLF)-Konzept im Heck verstaute und über eine Ladebühne in den operativen Einsatz bringt. Eine Alternative ist die Disposition eines Roboters als einzelnes Einsatzmittel oder über ein spezielles Fahrzeugkonzept (z.B. einen "Gerätewagen Robotik (GW-R)"). In diesem Fall ist die Bündelung mehrerer Roboter möglich (vgl. [4]).

Maßgeblich ist der Bedarf, der sich über die Gesamt-Bilanz im Prozessmanagement einer Organisation ergibt [21]. Je nach einsatztaktischem Konzept kann z.B. entschieden werden, eine enge Bindung des Einsatzmittels an die taktische Einheit zu schaffen, so dass es intuitiv, schnell und sicher in üblichen Einsatzsituationen eingesetzt werden kann. Soll der Einsatz in besonderen Lagen erfolgen, die z.B. erst bei Unzugänglichkeit eines Gebietes oder der Kontamination mit einem Schadstoff gegeben ist, kann eine materielle Spezialeinheit gebildet werden. Zu berücksichtigen ist auch die Anzahl an Robotern sowie deren Verteilung im gesamten, potenziellen Einsatzgebiet. Für eine Feuerwehr ist dies

beispielsweise das Kreis- oder Stadtgebiet. Die Planung erfolgt im Zuge der regulären Bedarfsplanung [22]. Dabei müssen Fähigkeiten von Mensch und Technik als Gesamtsystem auf den Bedarf ausgerichtet werden.

Perspektivisch ist eine Einbindung eines Roboters in die taktische Einheit denkbar. Ein (semi-)autonomer Roboter kann mit einer Einsatzkraft eine Aktionseinheit bilden und analog zu einem Trupp agieren. In der Aufbauorganisation sind weitere Szenarien möglich wie beispielsweise die Ergänzung eines Trupps um einen Roboter. Mit der Einordnung ist auch zu spezifizieren, welcher Führungsstelle der Betrieb eines Roboters zugeordnet wird und von wo er gesteuert wird. Auch im autonomen Betrieb ist eine Stelle festzulegen, die Not-Funktionen bedienen kann. In jedem Fall sind Einsatzkräfte zu schulen, um einerseits das Vertrauen in die Technik und andererseits den intuitiv sicheren Betrieb zu gewährleisten. Entsprechende Strategien und Sicherheitsaspekte sind entscheidend für den operativen Betrieb. Randbedingungen wurden besonders mit Bezug zu UAV in Anwenderorganisationen etabliert [23].

## 2.4 Anforderungen an das Vorgehen

Das Vorgehen basiert auf einem Ansatz für die Integration von Human Factors in Cyber-Physische Produktionssysteme von Gräßler et al. [24], der auf die Anwendungsfälle von Einsatzkräften insbesondere der Feuerwehr adaptiert wird. Grundlage ist der fähigkeitsorientierten Matchmaking-Ansatz von Hammerstingl und Reinhart [25] und dessen Erweiterung auf soziotechnische Systeme. Die Adaption beruht auf Anforderungen, die einerseits bedarfsbezogen aus Einsatztaktik und Gefahrenszenarien abgeleitet und andererseits technologiegetrieben aus den Eigenschaften verfügbarer und in Forschung befindlicher Rettungsrobotik gefolgert werden. Ausgangspunkt ist die Prozessperspektive aus der Stationierung in die Einsatzorganisation (vgl. Prozesse im Einsatz), die Verbindung von Mensch und Technik (vgl. Einsatz- und Rettungsrobotik) bis hinein in die Fähigkeitsmodellierung (vgl. Mensch-Roboter-Kollaboration) :

- Req1 **Anwendung über den gesamten Einsatz:** Potenzielle Aufgaben sind in allen Phasen von der Stationierung (Vorbereitung) über die Disposition bis in den Einsatz zu berücksichtigen. Daher sind diese Prozesse sowie zugehörige Aktivitäten in einem Referenzprozessmodell zu hinterlegen.
- Req2 **Soziotechnische Modellierung:** Zur Beschreibung des gesamten soziotechnischen Systems muss in der Modellierung sowohl die Repräsentation menschlicher als auch technischer Fähigkeiten erfolgen. Hierzu ist eine gemeinsame Modellierungssprache auszuwählen.
- Req3 **Einheitliche Beschreibung von Fähigkeitsträgern:** Für die Auswahl von Fähigkeitsträgern oder Aktionseinheiten müssen diese durch ein einheitliches Konzept beschrieben werden. Innerhalb des Vorgehens sollen die Fähigkeitsträger mit ihren Fähigkeiten und Eigenschaften beschrieben werden, um mögliche Tätigkeiten innerhalb des Prozesses in der Einsatzsituation zu erfüllen.
- Req4 **Deskriptives, übergreifendes Modell für Fähigkeiten:** Als Basis für die fähigkeitsorientierte Aufgabenzuordnung muss ein konsistentes Fähigkeitsmodell definiert sein. Das Modell soll auf einem Abstraktionsgrad analog für die Mensch und Roboter eingesetzt werden können.
- Req5 **Ableich zwischen Prozessschritten und Fähigkeitsträgern:** Das Vorgehen muss eine nachvollziehbare Entscheidung für die Zuordnung von Fähigkeitsträgern zu Aufgaben enthalten. Dieses Matchmaking soll mittels Soll-/Ist-Abgleich von Prozessanforderungen und Fähigkeiten der Menschen und Roboter erfolgen.

Im Folgenden liegt der Schwerpunkt auf der fähigkeitsorientierten Aufgabenzuordnung. Die Modellierung in Bezug auf Req2 bis Req4 bildet dazu die Grundlage, um Req5 in Bezug auf den Rahmen aus Req1 zu erfüllen. Das Matchmaking ist Zielsetzung im nachfolgend beschriebenen Vorgehensmodell.

### 3 VORGEHEN ZUR FÄHIGKEITSORIENTIERTEN AUFGABENZUORDNUNG

Zur Modellierung wird die System Modeling Language (SysML) verwendet. SysML wird als Modellierungssprache im Systems Engineering von cyber-physischen Systemen eingesetzt und wird durch den SysML Extension Mechanism auf die soziotechnische Perspektive erweitert. Das Vorgehen unterteilt sich in vier Schritte (siehe Abbildung 1). Diese Schritte stellen die Basis für möglichkeitsorientierten Aufgabenzuordnung für die Mensch-Roboter-Kollaboration und können je Einsatztrupp adaptiert, erweitert und detailliert werden. Die vier Schritte werden in Abbildung 1 vorgestellt und nachfolgend detailliert.

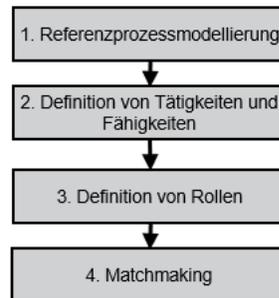


Fig. 1. Vorgehen zur möglichkeitsorientierten Aufgabenzuordnung

- (1) **Referenzprozessmodellierung:** Initialer Schritt ist die Referenzmodellierung für Einsätze der Feuerwehr. Die Referenzmodellierung für die Einsatzsituation erfolgt vergleichbar mit Hussung et al. [26] auf Basis des Vorgehens nach Schütte [27]. Dabei werden fünf Phasen durchlaufen: a) Problemdefinition; b) Konstruktion des Referenzmodellrahmens; c) Konstruktion der Referenzmodellstruktur; d) Komplettierung; e) Anwendung. Das Ziel ist die Entwicklung eines Referenzprozessmodells für die Aufgaben der Feuerwehr im Einsatz. Gesetze, Verordnungen und Richtlinien (z.B. FwDV100 [28]; FwDV3 [29]; VüH-Feu NRW [30]; Dewulf und Tappert [31]; Zündorf [32]) sowie Führung und Einsatztaktiken sowie -strategien (z.B. Pulm [33]; Richmann [21]) bilden die Grundlage für die Modellierung. Es werden die SysML-Modellarten Aktivitätsdiagramm und Zustandsdiagramm verwendet. Das Prozessmodell unterteilt sich Teilmodelle, die in einer zeitlich-logischen Abfolge strukturiert sind. Abbildung 2 zeigt den Prozess der „Bergung einer verunglückten Person“ mit Fokus auf den Prozessschritt „Biologische Ortung durchführen“. Tätigkeiten ergeben sich anschließend aus den Zuständen sowie Zustandsänderungen.
- (2) **Definition von Fähigkeiten:** Kern des zweiten Schritts ist die Zuordnung von Soll-Fähigkeiten zu den Prozessschritten aus dem Referenzprozessmodell. Hierzu werden den Prozessschritten kombinierte Fähigkeiten und Fähigkeitsprimitive zugeordnet, wobei kombinierte Fähigkeiten sich aus einem Zusammenschluss aus elementaren Fähigkeiten ergeben. Zur Bestimmung der Fähigkeiten werden Erkenntnisse aus der Handhabungstechnik (wie u.a. Hammerstingl und Reinhart [25]; Hesse und Malisa [34]; VDI-Richtlinie 2860 [35]) genutzt und eine Fähigkeitstaxonomie aufgestellt (siehe Abbildung 3). Die unterschiedlichen Fähigkeiten werden durch Parameter und Begrenzungen beschrieben. Parameter beschreiben hierzu die quantitative Ausprägung einer Fähigkeit, wie beispielsweise die Traglast in Kilogramm. Die Vorgabe der Begrenzungen, wie beispielsweise der Anzahl an „Greifern“ zur Begrenzung der Fähigkeit Speichern, sind notwendig, um die Eigenschaften eines Fähigkeitsträgers genau abzubilden.

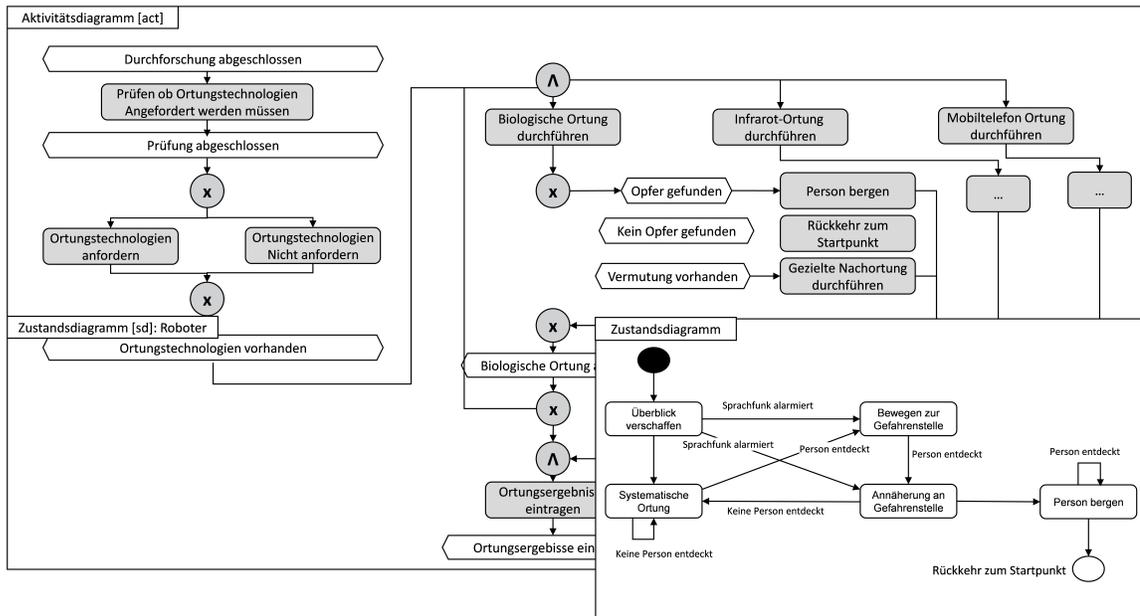


Fig. 2. Auszug aus dem Teilprozessmodell Bergung von Verunglückten

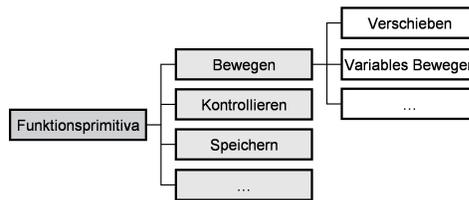


Fig. 3. Ausschnitt der Fähigkeitstaxonomie

- (3) **Definition von Rollen:** Zur geeigneten Aufgabenzuordnung von Fähigkeitsträgern zu Tätigkeiten wird das SysML Metamodell mittels UML profil packages um die Konzepte von role, human agents und roboter agents erweitert. In UML-Profilidiagrammen werden hierzu Stereotypen erstellt. Abbildung 4 zeigt einen Ausschnitt aus dem Profildiagramm, in dem der menschliche sowie der technische Akteur mit zugehörigen Attributen und Ausprägungen dargestellt ist. Zur Beschreibung des menschlichen Akteurs werden der Dienstgrad, das Qualifikationsniveau der agierenden Person sowie die Erfahrung im Einsatz genutzt. Der roboter agent wird über drei Elemente beschrieben. Dies sind dem Roboterdatenblatt entnommen. Weiterhin wird der Roboter über seine Ausrüstung beschrieben. Dies sind zum einen die verbauten Sensoren, die er zur Wahrnehmung der Umgebung nutzt, und zum anderen mögliche Aufbauten und Aktorik.
- (4) **Matchmaking:** Das Matchmaking erfolgt innerhalb von drei sequentiellen Schritten. Im ersten Schritt werden die prozess- und einsatzbezogenen Anforderungen ermittelt. Unter Berücksichtigung der einsatzbezogenen Situation werden die prozessspezifische Soll-Fähigkeiten („process requirements“) detailliert und erweitert. Die Soll-Fähigkeiten werden über die in Phase 2 beschriebene Fähigkeiten und Parameter beschrieben. Nachfolgend

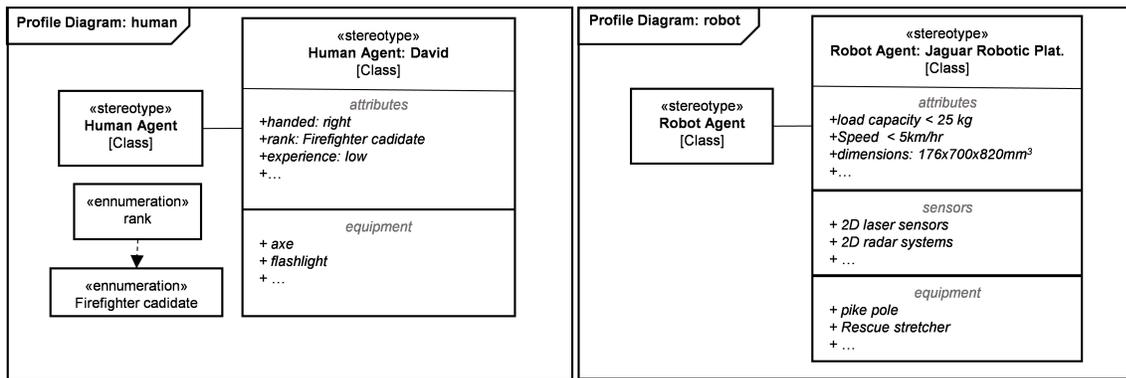


Fig. 4. Beispiel eines Human Agent und eines Robot Agents

erfolgt der Matchmaking-Prozess. Hierbei erfolgt der Abgleich zwischen Soll- und Ist-Fähigkeiten. Daneben werden Randbedingungen, die sich aus dem Einsatz ergeben, wie beispielsweise Zugänglichkeiten abgeglichen. Abschließend erfolgen die Bewertung und Aufgabenzuordnung.

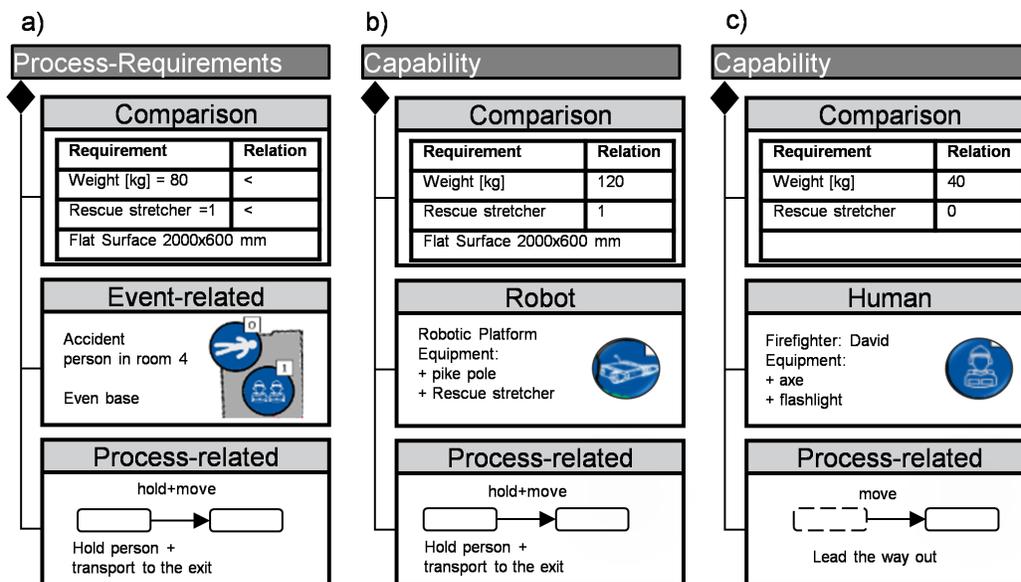


Fig. 5. Teilmodelle des Matchmaking: a) Prozessanforderungen, b) Roboter, c) Mensch

#### 4 VALIDIERUNG

Die Validierung erfolgt am Beispiel eines Einsatzszenarios „Personenbergung“ in einem Feuerwehreinsatz: Eine bewegungsunfähige Person an einem zum Einsatzbeginn unbekanntem Ort muss aus einem verrauchten Innenbereich gerettet



geborgenen Person im Raum zu bewegen (siehe in Abbildung 5). Da die Karte nun aufgedeckt ist, kann der Roboter den Verunglückten ohne direkt zugeordneten Trupp aus dem Gebäude transportieren. Die Person wird auf die Trage des Roboters geladen und anschließend vom Roboter aus dem Gebäude befördert und andere Sicherheitstrupp bzw. letztlich den Rettungsdienst übergeben.

## 5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Der vorliegende Beitrag liefert ein Vorgehen zur fähigkeitsorientierten Aufgabenzuordnung für die Mensch-Roboter-Kollaboration in kritischen Einsatzsituationen. Der Ansatz beruht auf einem gemeinsamen Modell, das sowohl personelle Fähigkeiten von Einsatzkräften als auch maschinelle Fähigkeiten von Rettungsrobotern abbildet. Das Vorgehen unterteilt sich in vier Schritte, die sequentiell durchgeführt werden. Ziel ist, Flexibilität in der Zuordnung von Aufgaben zu Ressourcen unter Einhaltung von Prozessanforderungen zu erreichen. Die Anwendung wird an einem realitätsnahen Beispiel evaluiert, bei dem eine verunglückte Person durch einen erweiterten Rettungstrupp bestehend aus Mensch und Roboter geborgen wird. Zur Modellierung wird aufgrund des Systembezugs und der Erweiterbarkeit SysML verwendet. Die erfolgreiche Evaluation liefert erste Erkenntnisse über die modellbasierte fähigkeitsorientierte Aufgabenzuordnung in der Mensch-Roboter-Kollaboration in der Feuerwehr. Durch die Anwendung solcher Methoden kann ein neuer Grad an Autonomie für Rettungsroboter erreicht werden. Einsatzkräfte werden von der direkten Steuerung eines Roboters entlastet. Aufbauend auf der Zustandserkennung kann der Roboter mittels probabilistischer Modelle die erkannten Merkmale des Menschen wie Bewegungsmuster, -richtung und -geschwindigkeit, benutzte Ausrüstung und Körperhaltung einem Prozess-Zustand im Referenzprozessmodell zuordnen. Dies bildet die Grundlage, um davon abhängig eigene Tätigkeiten des Referenzprozessmodells zu selektieren. Dieses Potenzial kann zur Steigerung der Effizienz von Einsätzen und der Sicherheit von Einsatzkräften genutzt werden. Nächste Forschungsziele sind einerseits die Robustheit der Zustandserkennung durch den Roboter, sowie die empirische Analyse des Kollaborationsverhaltens von Mensch und Roboter. Sicherheitsaspekte sind auf Basis bestehender Konzepte zu adaptieren.

## LITERATUR

- [1] Johannes Bix. *Mobile Robotik in der bandsynchronen Montage zur flexiblen Mensch-Roboter-Interaktion*. Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung. Fraunhofer Verlag, Stuttgart, 2019.
- [2] VDI. 2206 Entwicklung cyber-physischer Systeme (CPMS), 2020.
- [3] Jeffrey Delmerico, Stefano Mintchev, Alessandro Giusti, Boris Gromov, Kamilo Melo, Tomislav Horvat, Cesar Cadena, Marco Hutter, Auke Ijspeert, Dario Floreano, Luca M. Gambardella, Roland Siegwart, and Davide Scaramuzza. The current state and future outlook of rescue robotics. *Journal of Field Robotics*, 36(7):1171–1191, 2019.
- [4] Lars Baumgartner, Stefan Kohlbrecher, Juliane Euler, Tobias Ritter, Milan Stute, Christian Meurisch, Max Muhlhauser, Matthias Hollick, Oskar von Stryk, and Bernd Freisleben. Emergency communication in challenged environments via unmanned ground and aerial vehicles. In *Global Humanitarian Technology Conference*, pages 1–9, 2017.
- [5] Julian Weidinger, Sebastian Schlauderer, and Sven Overhage. Is the Frontier Shifting into the Right Direction? A Qualitative Analysis of Acceptance Factors for Novel Firefighter Information Technologies. *Information Systems Frontiers*, 20(4):669–692, 2018.
- [6] Christoph Petzoldt, Dennis Keiser, Henrik Siesenis, Thies Beinke, and Michael Freitag. Ermittlung und Bewertung von Einsatzpotenzialen der Mensch-Roboter-Kollaboration. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 116(1-2):8–15, 2021.
- [7] DIN EN ISO 10218-2. Industrieroboter - Sicherheitsanforderungen - Teil 2: Robotersysteme und Intergration, 2012.
- [8] Shozo Takata and Takeo Hirano. Human and robot allocation method for hybrid assembly systems. *CIRP Annals*, 60(1):9–12, 2011.
- [9] Manuel Fechter, Petra Foith-Förster, Marc Sascha Pfeiffer, and Thomas Bauernhansl. Axiomatic Design Approach for Human-robot Collaboration in Flexibly Linked Assembly Layouts. *Procedia CIRP*, 50:629–634, 2016.
- [10] Katharina Beumelburg. *Fähigkeitsorientierte Montageablaufplanung in der direkten Mensch-Roboter-Kooperation*. Stuttgart, universität, dissertation, 2005, Universität Stuttgart, Heimsheim, 2005.
- [11] Fabian Ranz, Vera Hummel, and Wilfried Sihm. Capability-based Task Allocation in Human-Robot Collaboration. *Procedia Manufacturing*, 9:182–189, 2017.

- [12] S. Blankemeyer, D. Pischke, T. Stuke, C. Ridder, W. Herfs, S. Storms, S. Roggendorf, O. Petrovic, V. Weißkamp, T. Seckelmann, A. Barthelmey, A.-K. Ermer, and J. Deuse. Aufgabenorientierte Zuordnung von Arbeitsinhalten zwischen Mensch und Roboter. In *Projektatlas Kompetenz Montage*, pages 92–97. RWTH Aachen University, Aachen, 2019.
- [13] Peter Holley. Firefighters had a secret weapon when Notre Dame caught fire: A robot named 'Colossus'. *The Washington Post*, April 18, 2019.
- [14] Geert de Cubber, Daniela Doroftei, Daniel Serrano, Keshav Chintamani, Rui Sabino, and Stephane Ourevitch. The EU-ICARUS project: Developing assistive robotic tools for search and rescue operations. In *2013 International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics*, pages 1–4, Piscataway, NJ, 2013.
- [15] Keiji Nagatani, Seiga Kiribayashi, Yoshito Okada, Kazuki Otake, Kazuya Yoshida, Satoshi Tadokoro, Takeshi Nishimura, Tomoaki Yoshida, Eiji Koyanagi, Mineo Fukushima, and Shinji Kawatsuma. Emergency response to the nuclear accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plants using mobile rescue robots. *Jornal of Field Robotics*, 30(1):44–63, 2013.
- [16] Robing R. Murphy. *Disaster Robotics*. MIT Press, Cambridge, 2017.
- [17] Matthew Spenko, Stephen Buerger, and Karl Iagnemma, editors. *The DARPA robotics challenge finals: humanoid robots to the rescue*, volume 121 of *Springer tracts in advanced robotics*. Springer, Cham, 2018.
- [18] G.J.M. Kruijff, I. Kruijff-Korbayová, S. Keshavdas, B. Larochele, M. Janiček, F. Colas, M. Liu, F. Pomerleau, R. Siegwart, M. A. Neerinx, R. Looije, N.J.J.M Smets, T. Mioch, J. van Diggelen, F. Pirri, M. Gianni, F. Ferri, M. Menna, R. Worst, T. Linder, V. Tretyakov, H. Surmann, T. Svoboda, M. Reinštein, K. Zimmermann, T. Petříček, and V. Hlaváč. Designing, developing, and deploying systems to support human–robot teams in disaster response. *Advanced Robotics*, 28(23):1547–1570, 2014.
- [19] Joachim de Greeff, Tina Mioch, Willeke van Vught, Koen Hindriks, Mark A. Neerinx, and Ivana Kruijff-Korbayová. Persistent Robot-Assisted Disaster Response. In Takayuki Kanda, Selma Šabanović, Guy Hoffman, and Adriana Tapus, editors, *HRI'18 companion*, pages 99–100, New York, NY, USA, 2018.
- [20] Karsten Homrighausen. Einsatzvorbereitung und Einsatzplanung. In Redaktion BRANDSschutz/Deutsche Feuerwehr-Zeitung, editor, *Das Feuerwehr-Lehrbuch*, pages 175–203. Kohlhammer Verlag, Stuttgart, 2019.
- [21] Dennis Richmann. *Geschäftsprozessmanagement bei der Feuerwehr*. Kohlhammer Verlag, Stuttgart, 2020.
- [22] Thomas Lindemann. *Feuerwehrbedarfsplanung*. Kohlhammer Verlag, Stuttgart, 2021.
- [23] European Emergency Number Association. Remote Piloted Airborne Systems (RPAS) and the Emergency Services, 2015.
- [24] Iris Gräßler, Dominik Wiechel, and Daniel Roesmann. Integrating human factors in the model based development of cyber-physical production systems. *Procedia CIRP Design*, 100:518–523, 2021.
- [25] Veit Hammerstingl and Gunther Reinhart. Fähigkeiten in der montage, 2017. Version 1.0.
- [26] Cai Hussung, Jana-Rebecca Rehse, Constantin Houy, and Peter Fettke. Entwicklung eines Referenzprozessmodells für Rettungseinsätze der Feuerwehr und Anwendung als Grundlage eines Prozessassistenzsystems. In Norbert Gronau, Moreen Heine, K. Poustcchi, and H. Krasnova, editors, *WI2020 Zentrale Tracks*, pages 522–537. GITO Verlag, 2010.
- [27] Reinhard Schütte. *Grundsätze ordnungsmäßiger Referenzmodellierung: Konstruktion konfigurations- und anpassungsorientierter Modelle*. Neue Betriebswirtschaftliche Forschung. Gabler Verlag, Wiesbaden, 1998.
- [28] Feuerwehr-Dienstvorschrift 100. FwDV 100 Führung und Leitung im Einsatz Führungssystem, 1999.
- [29] Feuerwehr-Dienstvorschrift 3: FwDV 3 Einheiten im Lösch- und Hilfeleistungseinsatz, 2008.
- [30] Ministerium des Innern des Landes Nordrhein-Westfalen. Konzept für die vorgeplante überörtliche Hilfe im Brandschutz und der Hilfeleistung durch die Feuerwehren im Land Nordrhein-Westfalen, 2017.
- [31] Reiner Dewulf and Carsten Tappert. *Einsatzlehre-Taktische Regeln*, 2008.
- [32] Johannes Zündorf. Einführung in das Taktische Arbeitsblatt, 2008.
- [33] Markus Pulm. *Einsatztaktik für Führungskräfte: Praxiswissen für Gruppenführer*. Fachbuchreihe Brandschutz. Kohlhammer Verlag, Stuttgart, 2017.
- [34] Stefan Hesse and Viktorio Malisa. *Grundlagen der Handhabungstechnik*. Carl Hanser Verlag, München, 2020.
- [35] VDI-Richtlinie 2860. Montage- und Handhabungstechnik: Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen, Begriffe, Definition, Symbole, 1990.