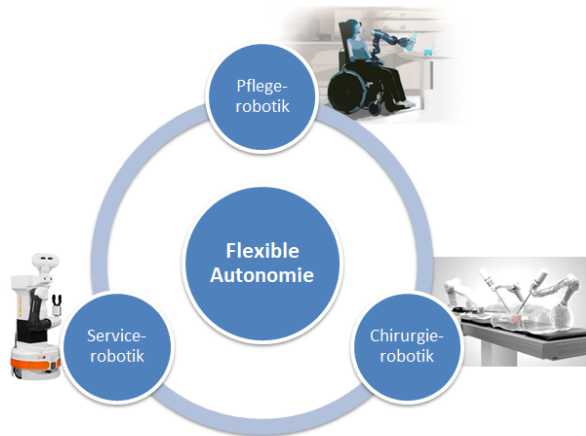


KompetenzZENTrum für flexible AUtonomie in der Tele-Robotik (ZENT-AUR)

Förderkennzeichen 16SV8582

Bernhard Weber¹, Freek Stulp¹, Jörn Vogel¹, Julian Klodmann¹, Linda Onnasch²,
Markus Schneider³, Benjamin Stähle³, Jürgen Graef³, Marc Hassenzahl⁴,
Judith Dörrenbächer⁴, Sabine Maasen⁵, Henning Mayer⁶ und Benjamin Lipp⁶



¹Deutsches Zentrum für Luft-
und Raumfahrt e. V.
Linder Höhe
51147 Köln

²Humboldt-Universität
Berlin
Unter den Linden 6
10117 Berlin

³Hochschule
Ravensburg-Weingarten
Doggenriedstraße
88250 Weingarten

⁴Universität
Siegen
Adolf-Reichwein-Straße 2
57076 Siegen

⁵Universität
Hamburg
Mittelweg 177
20148 Hamburg

⁶Technische Universität
München
Arcisstraße 21
80333 München

16.1 Ziele des Kompetenzzentrums

Zielsetzung von **ZENT-AUR** ist es, eine sichere und intuitive **Interaktionsstrategie** für die **Mensch-Autonomie-Interaktion in der Telerobotik** zu entwickeln, die in

Bereichen der **Alltagsassistentz und in der Chirurgie** evaluiert wird.

16.1.1 Motivation des Kompetenzzentrums

Der Einsatz von Robotern in Alltagsumgebungen birgt große Herausforderungen aufgrund der Komplexität dynamischer Umgebungen, hohen Aufgabenanforderungen und der Schwierigkeit, Risiken adäquat abzuschätzen (z. B. Clabaugh und Mataric 2019, Kunze et al. 2018). In vielen Bereichen, vom autonomen Fahren bis zur roboterassistierten Chirurgie, vom Satellitenbau im Orbit bis hin zur Pflegerobotik, sind **hybride Lösungen** nötig, bei denen sich robotische Autonomie und Telerobotik ergänzen. Wenn die menschlichen Fähigkeiten erforderlich sind, können diese mittels **telerobotischer Lösungen** eingebunden werden, bei denen der Mensch den Roboter direkt manuell steuern kann. Telerobotik kombiniert somit die Stärken des Menschen (z. B. Entscheidungsvermögen) mit denen des Roboters (z. B. Präzision), was einen breiten Einsatz in zahlreichen alltagsnahen Anwendungen erschließt, weit über die schon heute etablierten Anwendungen (z. B. Agrarrobotik, Telechirurgie) hinaus. Telerobotische Systeme bieten darüber hinaus den einzigartigen Vorteil, dass der Mensch nicht mit einem autonomen Roboter alleine gelassen wird. So können bspw. Angehörige mit Patient*innen auf einer Quarantänestation durch den Roboter vor Ort direkt interagieren.

Das Kompetenzzentrum wird den **Interaktionsansatz der flexiblen Autonomie** in drei Anwendungen evaluieren, der einen Wechsel zwischen verschiedenen Autonomiegraden von manueller Steuerung, über Teilautonomie bis hin zur völligen Autonomie ermöglicht (s. Abb. 16.1). ZENT-AUR setzt sich zum Ziel, neben der technisch sicheren Umsetzung des Ansatzes, eine **menschzentrierte Interaktionsstrategie** für die Mensch-Autonomie-Interaktion (MAI) zu entwickeln und zu evaluieren, die **domänenübergreifend** Anwendung finden kann. Das Hauptaugenmerk des Kompetenzzentrums richtet sich auf den teleoperierenden Menschen und wie dieser effizient und intuitiv einen Roboter mit unterschiedlichen Autonomiegraden steuern kann. Dabei wird ein **ganzheitlicher Ansatz** verfolgt, der die Perspektiven der Ingenieurwissenschaft, Psychologie, User Experience Forschung sowie verantwortlicher Forschung und Innovation vereint und sicherstellt, dass die technischen Lösungen langfristig auch auf

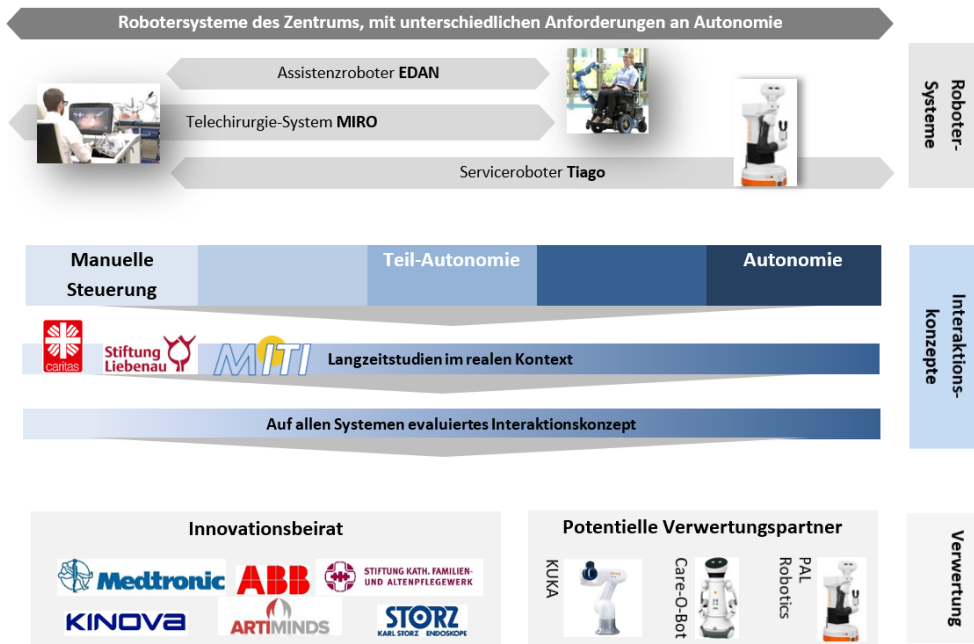


Abbildung 16.1: ZENT-AUR Robotersysteme, die unterschiedliche Autonomieanforderungen abbilden. Interaktionskonzepte der flexiblen Autonomie werden in drei Domänen evaluiert. Verwertungsoptionen werden im Innovationsbeirat vorbereitet.

neue Anwendungsbereiche übertragen werden können. Am Institut für Robotik und Mechatronik (DLR) wurden bereits **Telerobotik-Systeme für Pflege- und Serviceaufgaben, sowie für die Chirurgie** entwickelt und evaluiert, die auch im Zentrum zum Einsatz kommen werden. Die eingesetzten Technologien sind ausgereift, was durch mehrere telerobotische Weltraummissionen eindrucksvoll demonstriert werden konnte. Das telechirurgische System wurde an Medtronic lizenziert und ist bereits als kommerzielles Produkt im Einsatz. Die DLR-Systeme decken ein weites Spektrum an verschiedenen Graden der Roboterautonomie ab, von der manuellen Steuerung durch den Menschen über teilautonome, überwachte Systeme bis hin zur vollständigen Autonomie. Ein Umschalten zwischen den Kontrollmodi ist mit den DLR-Systemen möglich: Ein Roboter kann z. B. manuell bis zu einer Tür gesteuert werden, der Roboter erkennt die menschliche Intention und öffnet diese autonom, wenn Benutzer*innen dies wünschen.

Im Wesentlichen arbeitet das Kompetenzzentrum ZENT-AUR auf zwei übergeordnete

Ziele hin:

- **ZENT-AUR erschließt einen völlig neuen Aktionsradius robotischer Assistenzsysteme:** Die menschenzentrierte Entwicklung eines Ansatzes der flexiblen Autonomie, der den Wechsel zwischen Kontrollmodi – von der manuellen Steuerung bis hin zur völligen robotischen Autonomie – ermöglicht.
- **Ein vielseitiger Ansatz und viele Anwendungsmöglichkeiten:** Es wird ein modularer, generischer Werkzeugkasten der flexiblen Autonomie entwickelt und in drei Anwendungsgebieten mit unterschiedlichen Anforderungen, Robotersystemen und Nutzer*innen umfangreich evaluiert.

16.1.2 Thema des Verbundprojektes

Im Folgenden sollen die drei Anwendungsfelder und Systeme von ZENT-AUR beschrieben werden.

16.1.2.1 Robotische Assistenz für körperlich eingeschränkte Menschen: EDAN

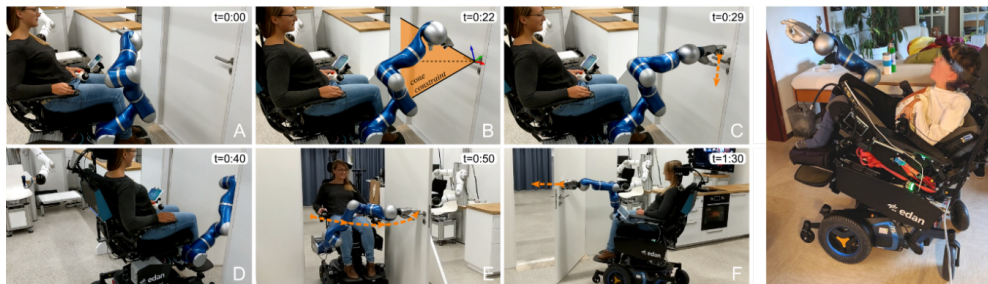


Abbildung 16.2: Robotersystems EDAN: Ein robotischer Arm ist an einem Rollstuhl montiert und kann von Betroffenen z. B. via Tablet oder Mini-Joystick gesteuert werden. Links: Öffnen einer Tür mit anschließendem Hindurchfahren mithilfe geteilter Kontrolle. Rechts: Foto aus einem Pilotexperiment in dem eine Nutzerin mit spinaler Muskelatrophie das EDAN System benutzt.

Das **Robotersystem EDAN** wird in Caritas-Einrichtungen **körperlich eingeschränkte Menschen** unterstützen. Im System EDAN können Nutzer*innen durch einen integrierten robotischen Arm am Rollstuhl Aufgaben erledigen, die ihnen sonst nicht möglich wären. Dabei spielt die Unterstützung durch (teil-)autonome Funktionen eine wesentliche Rolle, da körperlich eingeschränkte Menschen Eingabegeräte nur sehr

limitiert nutzen können. EDAN unterstützt dabei bei alltäglichen Aufgaben wie in Abbildung 16.2 (links) angedeutet. Vision des Assistenzroboters ist es, Menschen mit Bewegungseinschränkungen zu einem erfüllteren und selbständigeren Leben zu verhelfen. Die Robotik ist mit der jetzt erstmalig verfügbaren Technologie der sicheren Mensch-Roboter-Interaktion, Echtzeit-3D-Bildverarbeitung zur Umwelt-/ Personenerkennung in der Lage hier einen wichtigen Beitrag zu leisten. Im EDAN-Roboter sind diese Technologien zu einem Gesamtsystem integriert worden, welches bereits in Feldversuchen getestet wurde (s. Abb. 16.2, rechts).

16.1.2.2 Serviceroboter als Alltagsassistent im betreuten Wohnen: TIAGo



Abbildung 16.3: Robotersysteme TIAGo und Marvin: Links: TIAGo sortiert Objekte auf Basis eines nutzerspezifischen Weltmodells (RA2), Mitte: Roboter Marvin schenkt Glas Wasser ein; Rechts: Proband teleoperiert Roboter Marvin mittels Mundsteuerung.

In Kooperation mit der Stiftung Liebenau wird die Hochschule Ravensburg-Weingarten (RWU) den kommerziell verfügbaren **Assistenzroboter TIAGo** (PAL Robotics) in Einrichtungen für **betreutes Wohnen** zum Einsatz bringen. Hierbei handelt es sich um eine robotische Plattform, die höhere Autonomiegrade umsetzen kann. Derartige Assistenzroboter werden im Pflegebereich vornehmlich zur Entlastung des Personals (Hol- und Bringdienste) und zur Erledigung von monotonen Tätigkeiten (Bsp. Erinnerung Medikamenteneinnahme, Trinken) eingesetzt. Trotz des hohen Grades an Autonomie sind aber Systeme wie TIAGo bei Einsätzen in der Praxis auf die Möglichkeit einer menschlichen Intervention in komplexen bzw. gefährlichen Situationen angewiesen. Durch die in RA2 (RobotKoop) entwickelten kooperativen Zielverhandlungsmodule inkl. Weltmodell ist TIAGo außerdem in der Lage spezifischer auf Nutzerbedarfe einzugehen. Im Kontext von ZENT-AUR wird TIAGo neben seinen autonomen Funktionen um die Teleoperation erweitert. Pfleger*innen oder auch

medizinisches Fachpersonal können so direkt den Roboter in der Einrichtung steuern und Kontakt mit Bewohner*innen aufnehmen.

16.1.2.3 Roboterassistierte minimal-invasive Chirurgie: MIRO

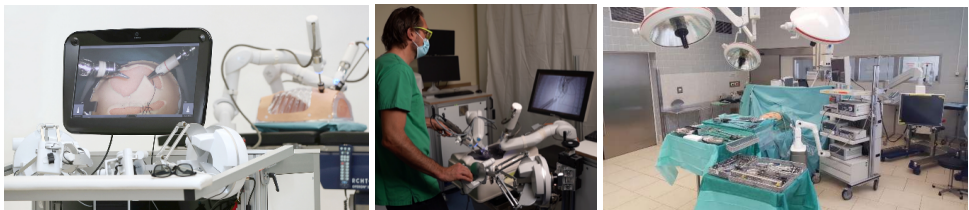


Abbildung 16.4: Telechirurgie-System MiroSurge (links), bestehend aus Chirurgenkonsole und den Roboterarmen am OP-Tisch. Experimental-OP beim Partner MiTi (mitte, rechts), in dem das System mit Chirurgen evaluiert werden kann.

Neben der Roboterassistenz für alltägliche, haushaltsnahe Aufgaben, soll der Ansatz auch im Bereich der **Telechirurgie** in Kooperation mit der **Forschungsgruppe MiTi** (TU München) angewandt werden. Telechirurgische Systeme ermöglichen präzisere und schonendere operative Eingriffe im Vergleich zu traditionellen Operationsverfahren. Der Teleoperator hat dabei ein hohes Maß an Verantwortung, weswegen eine reibungslose und intuitive Mensch-Roboter-Interaktion (MRI) einen hohen Stellenwert einnimmt. Entsprechend muss die Abstimmung von Assistenzfunktionen bereits bei niedrigem Autonomiegrad individuell auf die Bedürfnisse und Fähigkeiten der Chirurg*innen erfolgen, um klinische Relevanz zu schaffen und schließlich Akzeptanz zu finden.

Das DLR bereitet schon jetzt einen Experimental-OP in der Einrichtung des assoziierten Partners MiTi am Klinikum rechts der Isar vor. Das MiroSurge System (s. Abb. 16.4, links) wird dort installiert und es können längsschnittliche Studien mit Chirurg*innen verschiedenen Ausbildungsstandes und fachlicher Ausrichtung realisiert werden (s. Abb. 16.4, mitte und rechts). Als chirurgische Aufgaben werden hierbei standardisierte Modelle (vgl. Laubert et al. 2018) verwendet. Aufgrund des dynamisch-unstrukturierten Aktionsfeldes im Patienten stehen im Bereich der Telechirurgie insbesondere niedrige Autonomiegrade, wie geteilte Steuerung bis zur überwachten Teil-Autonomie im Fokus (z. B. sensorbasierte Gewebescans, Endoskopführung oder haptische Verbotszonen).

16.1.2.4 Interaktionsspezifische Forschungsfragen

Folgende wissenschaftliche Fragen sollen in den drei Anwendungsszenarien beantwortet werden:

- Wie kann Mensch-Autonomie-Interaktion (MAI) **intuitiv, sicher und adäquat** umgesetzt werden? Wie können bspw. die menschliche Intention oder auch situative Gefahrenpotentiale erkannt werden und eine entsprechende Funktionsallokation vorgeschlagen werden?
- Wie kann MAI so gestaltet werden, dass der teleoperierende Mensch ein hohes Maß an **Situationsbewusstsein und Systemvertrauen** entwickelt. Was sind valide Metriken und Benchmarks zur Bewertung des soziotechnischen Gesamtsystems?
- Bei der flexiblen Funktionsallokation in der MAI stellt sich grundsätzlich die Frage, **wer Transitionen von einem Kontrollmodus zum anderen vorschlagen bzw. initiieren sollte**: Die Automation (adaptive Steuerung) oder der Mensch (adaptierbare) oder beide (mixed Ansätze)?
- Wie wird **Handlungsträgerschaft, Autonomie und Kontrolle zwischen Mensch und System** ausgehandelt und umverteilt durch (Teil-)Automatisierung von Arbeitsprozessen?
- Welche **sozio-technischen Umweltfaktoren** spielen bei der erfolgreichen Einbettung von MAI eine Rolle (z. B. Arbeitsteilung und -abläufe, professionelles Selbstverständnis der Belegschaft)?
- Welche **sozialen Nutzungsfelder** existieren, in denen Telerobotik bisher keine

oder kaum Anwendung findet? Kann Telerobotik über die praktischen Aufgaben hinaus eine neue, positive Art der Mensch-Mensch-Kommunikation ermöglichen?

16.1.3 Gesamtziel des Kompetenzzentrums

Das Kompetenzzentrum verfügt über jahrzehntelange Erfahrungen in Bereich telerobotischer, teilautonomer sowie autonomer robotischer Systeme in einem breiten Spektrum von Anwendungen (z. B. Chirurgie, Pflege, Assistenz für Menschen mit Behinderung, Industrierobotik). Diese Erfahrung zeigt auch, dass Robotersysteme nur dann praxistaugliche Assistenten werden können, wenn sie auch in weniger strukturierten, dynamischen Situationen zuverlässig und adaptiv reagieren können. Deshalb ist es das zentrale Ziel des Kompetenzzentrums, eine **ganzheitliche Systemlösung der flexiblen Autonomie** zu entwickeln, wodurch sich ein breites Spektrum an Interaktionsmöglichkeiten erschließt. Angesichts wachsenden Fachkräftemangels, dem Kostendruck in Betreuung, Pflege und Medizin bedarf es solcher vielseitigen Lösungen, wodurch ZENT-AUR auch den gesellschaftlichen Anforderungen an interaktiver Assistenzrobotik gerecht wird.

Hierzu wird auch ein beständiger, intensiver Diskurs mit assoziierten Partnern und Nutzer*innengruppen in den jeweiligen Domänen geführt. Um frühzeitig auch Industriepartner einzubinden, wird ein **Innovationsbeirat** gegründet, der das Projekt begleitet, neuartige Lösungs- und Umsetzungsstrategien diskutiert und v.a. das spätere Verwertungspotential im Blick hat.

Das Kompetenzzentrum wird die bereits bestehenden **Interaktionsfähigkeiten der robotischen Systeme sinnvoll kombinieren bzw. erweitern**. Die im Rahmen von RA2 von den technischen Partnern entwickelten robotischen Interaktionsfähigkeiten (insb. im Bereich der Intentions- und Kontexterkennung) werden auch in ZENT-AUR zum Einsatz gebracht bzw. angepasst und die Teleoperationstechnologie des DLR wird auf ein kommerzielles System (TIAGo) übertragen. Ein wichtiger technischer Entwicklungsschritt wird die sichere und robuste Implementierung des Wechsels zwischen den Kontrollmodi darstellen. Die vom DLR entwickelten Ansätze der Intentionserkenkung (basierend auf z. B. Jain und Argall 2018, Gopinath und Argall 2020) sowie die Erken-

nung von gefährlichen Situationen, die von der Hochschule Ravensburg-Weingarten (RWU) entwickelt werden, sollen hierbei als eine Entscheidungsgrundlage für Wechsel des Kontrollmodus fungieren.

ZENT-AUR eröffnet eine neue Perspektive auf die Mensch-Roboter-Interaktion, denn neben dem Menschen in direkter Interaktion mit dem Roboter, **spielt nun vor allem der teleoperierende Mensch** eine tragende Rolle und ZENT-AUR wird sich vorrangig dieser Schnittstelle zum Menschen widmen. Umso wichtiger ist es, dass ein wissenschaftlicher Ansatz verfolgt wird, der den Prinzipien der menschenzentrierten Gestaltung (gemäß ISO 9241, „Ergonomie der Mensch-System-Interaktion“) entspricht. Die Forschungsagenda wird stark interdisziplinär geprägt sein und verbindet die Zentrumskompetenzen im Bereich kognitiver Psychologie, UX, Interaktionsdesign und ELSI (s. Abb. 16.5).

				
Ingenieurwiss.	Ingenieurwiss.+ UX	Sozialwissenschaft	Interaktionsdesign	Psychologie
Techn. Konzepte, Implementierung auf DLR- Systemen	Implementierung auf kommerziellen Systemen, Interface-Design	Responsible Research & Innovation (RRI), Nachhaltigkeit	Interaktions-konzept, User Experience	Einbindung psychologischer Konzepte

Abbildung 16.5: Partner des Kompetenzzentrums ZENT-AUR, vertretene Forschungsdisziplinen und Beiträge

Nutzungskontext und Nutzer*innengruppen in den jeweiligen Domänen werden aus diesen verschiedenen Blickwinkeln analysiert und in der Konzeptions-, Entwicklungs- und Evaluationsphase eingebunden. Basierend auf den identifizierten Anforderungen wird ein Interaktionskonzept der flexiblen Autonomie in einem **stark partizipativen und iterativen Vorgehen** entwickelt, das in Fokusgruppen, VR Simulationen, Labortests entwicklungsbegleitend und zuletzt in mehreren Kampagnen im realen Kontext der Anwendungsdomänen getestet wird. Zusammen mit den assoziierten Partnern werden hierfür Testszenarien entworfen, die für die Praxis relevante Situationen abdecken und zugleich eine valide und systematisch empirische Analyse erlauben. Integrativer Teil des iterativen Gestaltungs-prozesses ist die Definition von relevanten Benchmarks und Bewertungsmetriken, die z. B. neben der Aufgabenperformanz das Wohlbefinden

der Nutzer*innen (Hassenzahl 2010, Hassenzahl et al. 2013) und die Sicherheit des Menschen auf der robotischen Seite abbilden. Eine weitere wichtige Bewertungsebene ist die der verantwortlichen Forschung und Innovation, um eine werteorientierte und nachhaltige Gestaltung zu gewährleisten.

Insgesamt trägt ZENT-AUR durch die **multimethodische und multiperspektivische empirische Agenda** in drei Anwendungen substantiell zur Verbesserung der Datenlage in der Assistenzrobotik bei. Dabei wird auf entsprechenden Vorerfahrungen des Zentrums aufgebaut. So wurde z. B. im Rahmen eines HGF Validierungsprojektes das Telechirurgie-System MiroSurge bereits mit Chirurgen evaluiert (Weber 2013). Diese Arbeiten waren entscheidend für die erfolgreiche Lizenzierung des Systems an Medtronic. Eine aktuelle Arbeit in Zusammenarbeit mit dem DLR hat sich darüber hinaus explizit der Frage gewidmet, wie autonome Funktionen in die Telechirurgie eingebettet werden können (Gölz 2020).

Auch das Robotersystem EDAN wurde bereits in Pilotversuchen mit Probanden mit spinaler Muskelatrophie erprobt. Im Rahmen der Pilotstudie wurde das System in der Wohnumgebung der Probanden zum Ausführen von Aktivitäten des täglichen Lebens genutzt. Fokus der bisherigen Untersuchungen lag auf der EMG-basierten Nutzerschnittstelle und den teilautonomen Fähigkeiten des Robotersystems, welche die Ausführung von haushaltsnahen Tätigkeiten unterstützen.

Die RWU verfügt neben den in RA2 durchgeführten Forschungsarbeiten bereits über einschlägige Erfahrungen aus vorigen FuE Projekten (RABE 2017-2021, AsRoBe 2013-2016, ZAFH Servicerobotik 2008-2013, vgl. Weber-Fiori et al. 2017) in der genannten Anwendungsdomäne. In RA2 (Projekt RobotKoop) wurden u.a. Module zur lernfähigen semantischen Umfeldanalyse (insb. Erkennung von Anomalien in Haushaltsumgebungen), ein systemübergreifendes, standortunabhängiges Kommunikationsinterface und verschiedene Möglichkeiten des adaptiven Lernens von Nutzerpräferenzen, sowie das Lernen durch Demonstration entwickelt und im Rahmen von Nutzerstudien getestet.

16.2 Alleinstellungsmerkmale und Abgrenzung zum Stand der Wissenschaft und Technik

16.2.1 Internationaler Stand der Wissenschaft und Technik

16.2.1.1 Ansätze der flexiblen Autonomie in der Robotik

Die meisten Ansätze der flexiblen Autonomie stammen aus den Bereichen Luftfahrt bzw. Fahrzeugtechnik, es existieren jedoch auch einzelne Forschungsarbeiten im Bereich der Robotik. So nutzen z. B. Birk und Pfingsthorn 2006 das Konzept der adaptiven Autonomie, um eine Mensch-Maschine-Schnittstelle zur Steuerung von mehreren mobilen Roboterplattformen („Search & Rescue“ Szenario) zu modellieren. Schwerpunkt der Forschungsarbeit ist die Verbesserung der direkten, manuellen Steuerung der Roboter und die adaptive Visualisierung der Steuerungsprozesse in der graphischen Nutzeroberfläche. Im Wesentlichen kann hier zwischen einer joystickbasierten, direkten Steuerung und einer navigationspunktbasierter Steuerung gewechselt werden. Die Arbeit beschränkt sich jedoch auf die Beschreibung des Implementierungskonzepts, Evaluationsdaten aus Nutzerstudien fehlen. Auch Schermerhorn und Scheutz (2009) schlagen ein Konzept der flexiblen Autonomie für ein Team aus menschlichen und robotischen Agenten vor. In einer Simulationsstudie mit 10 Teilnehmer*innen sollten Gesteinsproben in einer planetaren Explorationsmission analysiert werden. In der Studie wurde reine Teleoperation mit adaptiver Autonomie verglichen, wobei die Autonomiefunktion sich an übergeordneten Zielpriorisierungen orientierte (Nutzen-Kosten-Analyse). Die Autoren berichten eine bessere Teamleistung in letzterer Bedingung und eine geringere kognitive Beanspruchung des Menschen. Roehr und Shi (2010) schlagen ebenso einen Ansatz für ein Mensch-Roboter-Team vor, in dem sowohl Mensch als auch Roboter den Autonomiegrad graduell anpassen können. In einer reinen Systemsimulation war ein Umschalten zwischen vollständiger Autonomie, beidseitig anpassbarer Autonomie und manueller Steuerung möglich, wobei die Anpassung der Autonomie auf Basis des menschlichen Systemvertrauens bzw. der Erfolgswahrscheinlichkeit des Roboters, die geplante Aktion erfolgreich auszuführen, erfolgt. In der Zusammenschau lässt sich festhalten, dass ein dringender Forschungsbedarf auf dem Feld der flexiblen Autonomie besteht. In einer systemati-

schen Überblicksarbeit konstatieren Mostafa et al. (2019) mehrere Forschungslücken im Bereich der flexiblen Autonomie über die Robotik hinaus: 1) es existiert noch **kein ausgewogenes und vollständiges Konzept der flexiblen Autonomiesteuerung**, 2) es gibt wenige Ansätze, die **Nutzerpräferenzen berücksichtigen**, 3) oftmals beschränken sich die Ergebnisse auf **Simulationsstudien oder sehr deterministische Umgebungen** und 4) zentrale Metriken wie das **Situationsbewusstsein** des Menschen werden zu selten bzw. gar nicht eingebunden.

16.2.1.2 Telechirurgische Robotersysteme

Robotische Assistenzsysteme werden derzeit zunehmend zur Marktreife entwickelt. Die chirurgischen Anwendungsdomänen sind vielfältig und umfassen beispielsweise Systeme für die Orthopädie, die Neuro- und Wirbelsäulenchirurgie sowie die Herz- und Gefäßchirurgie. Hierbei werden unterschiedliche Steuerungsansätze, wie die manuelle Führung teils unterstützt durch Ansätze der geteilten Steuerung, die automatisierte Ausführung geplanter Trajektorien oder die Teleoperation eingesetzt (Klodmann et al. 2020). Teleoperierte Systeme spielen, neben der Herz- und Gefäßchirurgie, insbesondere in den chirurgischen Domänen der Laparoskopie (Viszeralchirurgie, Urologie, Gynäkologie) eine Rolle, auf die in diesem Projekt der Fokus liegt. Die kommerziell verfügbaren Systeme in diesem Anwendungsfeld integrieren allerdings lediglich einen niedrigen Autonomiegrad (Haidegger 2019). Funktionalitäten umfassen die Wiederherstellung der Hand-Auge-Koordination, eine adaptierbare konstante Bewegungsskalierung oder eine Tremorfilterung.

Aktuell werden Ansätzen der geteilten Steuerung erforscht. Hierbei steuert der Chirurg das System, während einzelne Freiheitsgrade aktiv durch das System begrenzt werden (sog. “Virtual Fixtures”, z. B. Bowyer et al. 2013). Weitere Forschungsansätze zur Teil-Automatisierung von chirurgischen Kernaufgaben, wie dem chirurgischen Nähen oder der stumpfen Dissektion zeigen zwar gute Ergebnisse unter Laborbedingungen, können aber noch nicht in kommerzielle Systeme transferiert werden (z. B. Attanasio et al. 2021). Nicht zuletzt befinden sich entsprechende Standards zur Berücksichtigung des Autonomiegrads bei der Entwicklung robotischer Assistenzsysteme, die den Zulassungsprozess erleichtern können, derzeit erst in der Entwicklungs- bzw. Etablierungsphase. Zwar gibt es einige vielversprechende Ansätze höhere Autonomie-

grade in der roboterassistierten Chirurgie für entkoppelte chirurgische Kernaufgaben technisch zu implementieren, die **Forschungslücke menschzentrierte Interaktionskonzepte mit flexibler Autonomie herzuleiten, technologisch umzusetzen und in groß angelegten Feldstudien zu evaluieren besteht aber weiterhin.**

16.2.1.3 Robotische Assistenzsysteme für körperlich eingeschränkte Menschen

Im Bereich der **Pflegerobotik bzw. Assistenz für Menschen mit Behinderung** basieren die auf dem Markt verfügbaren Systeme auf rein manueller Steuerung. In der Regel handelt es sich dabei um Roboterarme, die am Elektrorollstuhl der Nutzer*in montiert werden, und dann über dieselbe Schnittstelle gesteuert werden, welche auch zur Steuerung des Rollstuhls genutzt wird. Die am Markt befindlichen Systeme verfügen über **keine nennenswerten Autonomiefunktionen**. Es lassen sich lediglich einzelne Bewegungen aufzeichnen und wieder abspielen, dabei geschieht aber keine Anpassung an die aktuelle Umgebung des Roboters. Da ein solcher Roboterarm für die Nutzer*in oftmals die einzige Möglichkeit zur physischen Interaktion mit der Umgebung darstellt, kommt der Autonomie der Nutzer*innen hier eine besonders wichtige Rolle zu. Um die Steuerung der Systeme zu erleichtern, werden Methoden der geteilten Kontrolle vielfältig erforscht, es sind aber keine Systeme bekannt, die diese Methoden im Bereich Assistenzrobotik für Menschen mit Behinderung in einem Gesamtsystem außerhalb des Labors einsetzen. Das DLR System EDAN verfügt über ein breites Spektrum an Autonomiefunktionen, von manueller Steuerung, über geteilte Kontrolle bis hin zur überwachten Ausführung. Dabei erlauben die Drehmoment- und Ganzkörperregelung die sichere Durchführung von koordinierten Aufgaben. Hinsichtlich der Mensch-Technik-Interaktion kann am System EDAN auch die Mensch-Technik-Mensch Interaktion analysiert werden, da der primäre Nutzer des Roboters das System direkt steuert und durch den Roboter mit sekundären Nutzer*innen in Interaktion treten kann.

Im Bereich der **Pflegerobotik sind autonome Systeme noch nicht marktreif** und es besteht ein großer Forschungsbedarf hinsichtlich komplexerer Interaktionsfähigkeiten (Graf 2020). Zusammen mit dem Fraunhofer Institut Stuttgart konnte das DLR die Einbindung der Teleoperation z. B. auf dem Care-o-Bot System schon erfolgreich demonstrieren.

16.2.1.4 Intentions- und Gefahrenerkennung

Mit der Verfügbarkeit von (teil-)autonomen Roboterfähigkeiten, bedarf es auch einer Methode, um diese Roboterfähigkeiten adäquat einzusetzen bzw. sie dem Nutzenden zum richtigen Zeitpunkt anzubieten. Um dies zu ermöglichen, muss zum einen ermittelt werden, welche Tätigkeiten in der akuten Situation ausgeführt werden können. Anschließend müssen diese Optionen hinsichtlich der Intention des Nutzers bewertet werden. Hierbei spielen semantische Informationen über die Umgebung und vorhandene Objekte eine große Rolle. Mittels dieser semantischen Planung lassen sich auch komplizierte Aufgaben in logische Einzelschritte zerlegen und anschließend mit autonomen Robotern ausführen (Bartels et al. 2013, Leidner 2019, Garrett et al. 2020). Basierend auf diesen Methoden kann neben der Planung einer Aktionsfolge auch ermittelt werden, welche Tätigkeiten in dem gegebenen Weltzustand gerade ausführbar sind. Für Roboter die geteilte Kontrolle anbieten, kann dann eine **Intentionserkennung** realisiert werden. Hier werden typischerweise die Nutzendenkommandos, die Lage der Objekte mit denen interagiert werden können, und die aktuelle Position des Roboterarms verwendet, um die gerade vom Nutzenden beabsichtigte Aufgabe zu erkennen (Gopinath und Argall 2020).

Verschiedene Methoden der künstlichen Intelligenz wurden in unterschiedlichen Bereichen für die **Risikobewertung und die Gewährleistung der Sicherheit** eingesetzt (Ertle et al. 2012). Zum Beispiel schlagen Jang et al. (2020) einen Ansatz zur Bildklassifizierung und Objekterkennung vor, um gefährliche Situationen zu identifizieren. Viele ähnliche Methoden, die die Bildanalyse nutzen, wurden kürzlich untersucht, um die Erkennung von Gefahren zu verbessern (Chang et al. 2019). Das Hauptproblem bei der Bildanalyse ist jedoch, dass es sich um Low-Level-Daten handelt, die keine Semantik haben. Kürzlich wurden auch logikbasierte Systeme untersucht, die mit semantischen High-Level-Daten arbeiten (Hata et al. 2019). Diese Methoden sind zwar sehr leistungsfähig, haben aber den Nachteil, dass sie nicht generalisieren und mit Veränderungen umgehen können. Aufgrund der zunehmenden Verwendung von semantischen Informationen in der KI gehen viele Domänen dazu über, Knowledge Graphs als Datenrepräsentationssystem zu verwenden (Hogan et al. 2021). Daher ist es wichtig, über neuronale Netzwerkmodelle zu verfügen, die diese Wissensgraphen lernen können (sog. Graph Neurale Netze, GNN) genannt. Verschiedene GNN-Modelle

wurden für verschiedene Anwendungen wie Bildklassifizierung, Textklassifizierung und Clustering usw. verwendet. Aber es gibt nur sehr wenige Arbeiten, die den Einsatz von GNNs für die Situationsanalyse und Risikobewertung untersuchen (Yoon et al. 2019, Jiang 2020).

16.2.2 Vorteile gegenüber konkurrierenden Lösungsansätzen

Klares Alleinstellungsmerkmal von ZENT-AUR ist die Einbindung menschlicher Kompetenz in Ergänzung zur robotischen Autonomie. Der Schwerpunkt der bisherigen Forschung und Entwicklungsbemühungen in der Assistenzrobotik liegen zweifelsohne darin, vollautonome Agenten in den Lebensalltag des Menschen zu integrieren. Telerobotische Ansätze hingegen waren bislang eher spezialisierten Expertensystemen vorbehalten. Durch die teleoperative Zuschaltung des Menschen und gleichzeitiger Nutzung der lokalen robotischen Autonomiefunktionen lassen sich die bisherigen Grenzen der Assistenzrobotik überwinden.

Dies stellt in der Robotik einen einzigartigen Versuch dar und durch ZENT-AUR wird der Nachweis erbracht, dass der Ansatz der flexiblen Autonomie über Systeme, Nutzer*innengruppen und Domänen hinweg erfolgreich eingesetzt werden kann. ZENT-AUR löst sich somit von der isolierten Betrachtung einzelner Anwendungsausschnitte und bietet ein vielseitiges, modulares und individualisierbares Konzept. ZENT-AUR entwickelt einen eigenständigen, neuartigen Ansatz der sich auf den Bereich der teleoperativen Steuerung eines Robotersystems mit unterschiedlichen Assistenzmöglichkeiten konzentriert. Das gesamte Spektrum von adaptierbarer bis adaptiver Automationsmanagements sowie Aufgaben- und Nutzer*innenanforderungen aus drei Anwendungsdomänen sollen hierbei abgedeckt werden. Ein umfassender Ansatz der flexiblen Autonomie wurde bislang noch nicht entwickelt und es liegen auch nur einzelne empirische Daten aus empirischen Nutzerstudien zu diesem Thema in realistischen Umgebungen vor. Die Playbook-Metapher (z. B. Miller und Parasuraman 2007) bietet zwar einen allgemeinen Ansatz der flexiblen Autonomie, fokussiert allerdings eher die Überwachung von mehreren hochautomatisierten Systemen (z. B. UAVs oder Flugzeuge).

Nach unserem jetzigen Kenntnisstand ist davon auszugehen, dass keine Patent- und Schutzrechte einer Verwertung des geplanten Vorhabens entgegenstehen. Die Entwicklungsarbeiten zum telechirurgischen MiroSurge System des DLR sind in das telechirurgische Systems HUGO™ RAS von Medtronic eingeflossen. Der nunmehr erfolgreiche Einsatz dieses Systems im klinischen Kontext verdeutlicht, dass die sehr anspruchsvollen klinischen Normen und Standards durch den Systemansatz erfüllt werden können. Auch für das System EDAN gilt, dass nicht der DLR LBR Teil der Verwertung sein wird, sondern andere kommerzielle Systeme letztlich zum Einsatz kommen sollen. Generell steht hier die Entwicklung von Interaktionskonzepten im Vordergrund, die eher in Form von Standards/ Normen der Wirtschaft zur Entwicklung von Produkten dienen. Ein Beispiel hierfür sind z. B. die Arbeiten zur Sicherheit der physikalischen Mensch-Roboter-Interaktion die am Institut für Robotik und Mechatronik durchgeführt wurden (Haddadin 2013), die in die geltenden DIN Sicherheitsnormen eingeflossen sind (DIN EN ISO 10218-2 Kapitel 5.10.5, Technische Spezifikation ISO/TS 15066 zu Kraft- und Leistungsbegrenzungen). Neben dem Interaktionskonzept ist ein zentrales Resultat eine Software-Anwendung (Toolbox), die die Implementierung des Ansatzes der flexiblen Autonomie auf verschiedenen Zielsystemen ermöglichen soll. Eine derartige Anwendung existiert bislang nicht und stellt eine wegweisende Entwicklung für den breiten Einsatz des Konzepts in unterschiedlichsten Domänen dar.

Auch wenn derzeit allgemeine Prozesse und Maßnahmen zum Design sicherheitskritischer Systeme existieren, so gibt es doch spezielle Anforderungen an (teil-) autonome bzw. intelligente Systeme, welche Sicherheitskonzepte voraussetzen, die weit über die derzeit existierenden Ansätze hinausgehen. Speziell in dynamischen Umgebungen treten schnell Situationen ein, die weder vorhersagbar noch modellierbar sind. Die wenigen Arbeiten, die sich mit solchen Systemen beschäftigen bieten entweder nur Teillösungen oder beschreiben lediglich die Problematik ohne einen zufriedenstellenden Lösungsansatz anzubieten. Der hier geplante, auf Graphen basierende Ansatz ermöglicht es eine Vielzahl heterogener Informationen zu speichern und diese mittels Graph-Neuronale-Netzwerke zu verarbeiten. Diese Technik ist relativ neu und wurde noch nicht in dieser Form für den Einsatz der Sicherheitskonzeption in der Robotik untersucht.

16.2.3 Risikodarstellung

Das größte technische und somit auch wirtschaftliche Risiko stellt sicherlich der **Dauereinsatz der komplexen robotischen Systeme** im Anwendungsfeld dar. Die beiden DLR Demonstratoren sind prototypische Eigenentwicklungen. Obgleich schon mehrere und umfangreiche Experimente mit diesen Systemen durchgeführt wurden, bleibt das Restrisiko eines Ausfalls während der geplanten Studien. Das DLR verfügt jedoch über Ersatzsysteme und institutseigene Elektronik- und Mechatronik-werkstätten.

Aus wissenschaftlich-technischer Sicht stellt sich ZENT-AUR der Herausforderung, einen **Ansatz der flexiblen Autonomie** zu entwickeln, der für **unterschiedlichste Anwendungsszenarien einsetzbar** sein soll. Damit verbunden sind diverse Anforderungsprofile durch die jeweiligen Aufgabencharakteristika sowie der Nutzer*innen-gruppen. Ein Risiko ist demnach, dass diese Diversität nicht adäquat in einem Gesamtmodell abzubilden ist. Als Lösungsstrategie soll ein möglichst generisches Framework geschaffen werden, dass je nach spezifischem Anforderungsprofil modifizierbar/ parametrisierbar ist. Welche Parameter hier von Bedeutung sind (z. B. adaptierbare vs. adaptive Autonomie), muss im Verlauf des Projekts als Teil der Evaluation entschieden werden. In diesem Kontext wird auch die Akzeptanz der Interaktionskonzepte und der eingebundenen Autonomiefunktionen durch den Nutzenden darüber entscheiden, ob das Konzept erfolgreich sein kann. Auch hier stellt die Diversität der Nutzer*innengruppen eine potentielle Herausforderung dar. Gegebenenfalls werden hier unterschiedliche Bedienmodi (Experten- vs. Novizenmodus) implementiert.

Durch die Anwendung und Evaluation des Gesamtkonzepts in **drei unterschiedlichen Anwendungsszenarien mit drei assoziierten Partnern und mit drei unterschiedlichen Robotersystemen** wird der besondere Förderungsbedarf von ZENT-AUR deutlich. Hieraus resultieren diverse technische Anpassungs- bzw. Wartungsarbeiten an den Systemen; zudem werden drei parallele Evaluationskampagnen vorangetrieben mit entsprechend hohen Aufwendungen für Personal, Sachmittel bzw. Unteraufträge. Das wirtschaftliche Risiko erscheint hierbei jedoch insofern kalkulierbar, als dass in allen drei Szenarien bereits ähnliche Evaluationsstudien mit den assoziierten Partnern mit sehr gutem Erfolg durchgeführt wurden. Das MiroSurge System besteht schon fast zehn Jahren und das DLR hat umfangreiche Erfahrungen mit Nutzerstudien (z. B. Weber

et al. 2013). Das kommerzielle Pendant des Systems ist bereits im klinischen Einsatz. Ähnliches gilt für EDAN, auch hier wurden zahlreiche Studien mit der Zielgruppe im Labor aber auch im realen Nutzungskontext erfolgreich durchgeführt. Das Zielsystem TIAGo ist ein kommerzielles System mit dem ebenfalls Nutzer*innen-studien in Rahmen von RA2 (RobotKoop) durchgeführt wurden.

Weiterhin ergibt sich der Förderungsbedarf dadurch, dass die Projektziele nur durch einen dezidiert **multidisziplinären Ansatz** zu erreichen sind: neben der technischen Entwicklung, sind Expertise in der Mensch-Autonomie-Interaktion (Psychologie, Interaktionsdesign, Interfacegestaltung) und ethische Gesichtspunkte von größter Bedeutung.

16.3 Wissenschaftliche und technische Methoden sowie Arbeitsziele des Kompetenzzentrums

Im Folgenden wird ein Überblick über das wissenschaftliche Prozedere (16.3.1) und die zentralen Arbeitsziele (16.3.2 und 16.3.3) gegeben.

16.3.1 Das wissenschaftliche Prozedere



Abbildung 16.6: Projektphasen und wissenschaftliche Aktivitäten

Der **wissenschaftliche Prozess** gliedert sich in folgende vier Phasen (s. Abb. 16.6): 1)

Analysephase: mittels qualitativer Methoden (Interviews, Beobachtungen, Fokusgruppen) werden Nutzer*innengruppen, relevante Aufgaben und mögliche Autonomiefunktionen in den drei Anwendungsdomänen Chirurgie, Behinderten- und Alltagsassistenz bestimmt. 2) *Konzeptphase:* Das Interaktionskonzept und das Interface wird konzipiert. Existierender Ansätze und Metriken der MAI werden geprüft und evaluiert. Erste kleinformatige Studien (Fokusgruppen etc.) zur Konzeptvalidierung werden durchgeführt. 3) *Evaluationsphase:* Nach Implementierung der technischen Anforderungen, Interaktionsstrategien und Interfaces auf allen Robotersystemen werden mehrere formative Studien im Labor und VR mit Nutzer*innen in allen Domänen durchgeführt und der Ansatz weiter optimiert. Hierbei kann der in GINA (RA2) entwickelte VR Simulator des DLR genutzt werden. In zwei abschließenden Feldkampagnen soll der längerfristige Einsatz mit größeren Stichproben diskutiert und validiert werden. 4) *Aufbau einer Datenbasis:* Alle empirischen Daten werden systematisch in einer Datenbank dokumentiert.

Dabei werden Methoden der integrierten Forschung in allen relevanten Phasen einen zentralen Stellenwert einnehmen. Bei der MRI ist gerade in sensiblen Bereichen mit vulnerablen Nutzern*innen (Pfleger, Menschen mit Behinderung) **ELSI und “Responsible Research and Innovation” (RRI)** von größter Bedeutung. Es geht hier insbesondere darum, die Technikentwicklung responsiv (bzgl. Nutzer*innenbedürfnissen) und inklusiv (bzgl. heterogener Nutzerprofile) zu gestalten. Von Beginn an sollen deswegen Nutzer*innenbefragungen, qualitative Interviews und auch Fokusgruppen mit Nutzer*innen und Domänenexpert*innen durchgeführt werden, um etwaige Risiken und Vorbehalte in der Nutzung vorzubeugen. ELSI und RRI Aspekte sollen identifiziert und hinsichtlich ihrer Relevanz beurteilt werden. Gerade in punkto Systemakzeptanz, Aufgabenteilung zwischen Mensch und Technik, Umgang mit Personendaten, Sicherheit, Privatsphäre, Stigmatisierung durch robotische Assistenz, Umgang mit sozialen Rollen müssen die Konzepte frühzeitig und systematisch bewertet werden.

Es wird eine **sozio-technische, systemische Perspektive auf MAI** entwickelt: Gelingende MAI ist wesentlich von deren Einbettung in Anwendungskontexte abhängig. Akzeptanz ist die abhängige Variable eines gelungenen Aushandlungsprozesses zwischen Entwickler*innen, Forschenden und Nutzer*innen bezüglich der Umverteilung von Kompetenzen, Kontrolle und Autonomie. Anstatt in technologieinduzierten Risiken

zu denken, ermöglicht ein „Responsible Research and Innovation“ (RRI) Ansatz, die **MAI als reflexiven Forschungs- und Innovationsprozess** zu untersuchen, der durch eine frühzeitige Einbindung von Stakeholdergruppen, Nutzer*innen und Bürger*innen auf eine breitere Basis gestellt wird (Schomberg 2013, Felt 2018). **Partizipative und deliberative Workshops und Dialogformate** sollen die spezifischen gesellschaftlichen Werte und Bedarfe entlang von Use Cases sichtbar machen und in eine **für die Entwicklung verfügbare Form** übersetzen. Darüber hinaus kommen anwendungsorientierte, ko-kreative Formate der partizipativen Technikgestaltung wie bspw. Rapid Prototyping oder Design Thinking zum Einsatz.

16.3.2 Gesamtmodell und Toolbox der flexiblen Autonomie

Ausgehend vom aktuellen Stand der Forschung soll ein Gesamtmodell der flexiblen Autonomie unter Einbindung der Expertise in den Bereichen UX, Interaktionsforschung, kognitive Psychologie und Responsible and Research Innovation im intensiven Dialog mit den jeweiligen Nutzer*innengruppen entwickelt werden. Dabei soll zwischen verschiedenen Kontrollmodi gewählt werden können, die unterschiedliche Autonomiegrade („Degree of Automation“, DoA) zwischen direkter, manueller Steuerung, geteilter Kontrolle und überwachter Autonomie abbilden (vgl. Draper 1995). Das Modell soll ein möglichst großes Spektrum hinsichtlich des Autonomiemanagements abbilden, d.h. sowohl der teleoperierende Mensch als auch das System sollen – je nach individueller Präferenz und Aufgabenanforderung – generell in der Lage sein, den Autonomiegrad anzupassen. So ist es vorstellbar, dass bei Aufgaben, bei denen menschliche Fertigkeiten und Fähigkeiten aufgrund der Aufgabenkomplexität unverzichtbar sind (z. B. in der Telechirurgie) der Autonomiegrad durch den Menschen adaptierbar ist, wohingegen bei vergleichsweise einfachen und repetitiven Aufgaben (z. B. Hol- und Bringdienste in Alltagsumgebung) das System selbst den Autonomiegrad adaptiv anpasst. Aus diesem Grunde werden in ZENT-AUR Applikationsfelder untersucht, die sich hinsichtlich der Aufgabenanforderungen und adäquatem Autonomiemanagement deutlich unterscheiden (s. Abb. 16.7).

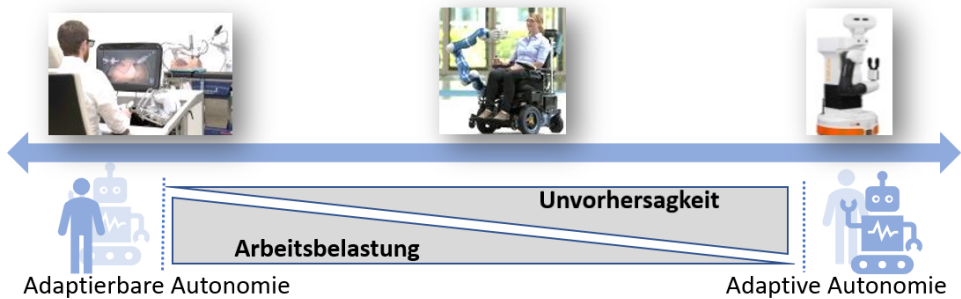


Abbildung 16.7: Spektrum zwischen adaptierbarer und adaptiver Autonomie und die Effekte auf die menschliche Arbeitsbelastung bzw. Vorhersagbarkeit des Systems (adaptiert aus Miller et al. 2000); Einordnung der ZENT-AUR Anwendungsfelder.

Sowohl adaptierbare als auch adaptive Autonomie bringen nicht nur Vorteile, sondern bergen auch substantielle Risiken für Nutzer*innen. Obgleich ein System, dass den Wechsel zwischen den DoA selbständig adaptiert, die Arbeitsbelastung des Menschen naturgemäß reduziert, kann sie jedoch auch dazu führen, dass der Mensch sich nicht mehr im ausreichenden Maße des aktuellen Systemstatus bewusst ist und das Systemverhalten unvorhersagbar wird (z. B. Miller und Parasuraman 2007, Billings und Woods 1994; siehe auch Abb. 16.7).

Im Projekt stellt die Vermeidung zu hoher Arbeitsbelastung und von Konflikten zwischen robotischer Steuerung und menschlicher Kontrolle (Mostafa et al. 2019) durch angemessene Konzepte der Mensch-System-Interaktion und der Schnittstellengestaltung ein wichtiges wissenschaftliches Ziel dar. Als **konzeptionelles Rahmenmodell** kann hierbei z. B. die „**Playbook**“-**Metapher** (Miller und Parasuraman 2007) dienen, in dem die Gefahr hoher Arbeitsbelastung bei adaptierbarer Autonomie durch vorab definierte Pläne der Autonomiezuweisung reduziert wird. In diesem Ansatz kann der DoA auf verschiedenen Abstraktionsebenen für einen bestimmten Aufgabenkomplex angepasst werden (Simmons et al. 2000). Der Mensch kann bei der Ausführung der Aktionen intervenieren und nötige Anpassungen vornehmen. In ZENT-AUR soll ein Ansatz gewählt werden, der zusätzlich zum Autonomiemanagement (adaptierbar bis adaptiv) im Vorfeld individuelle Präferenzen, Erfordernisse der Performance und des Wohlbefindens in den Ansatz der Autonomiesteuerung integriert.

Die **Software-Architektur** bzw. **Toolbox**, die in ZENT-AUR entwickelt werden soll, greift die Idee des Playbooks auf (s. Abb. 16.8). Basis des Systems ist ein Aufgabenmodell, das von Mensch und System geteilt wird und in dem alle relevanten Teilschritte einer Aufgabe und deren Semantik hinterlegt sind. Der Mensch kommandiert über eine grafische Nutzerschnittstelle (GUI), die Instruktionen werden von einem Analyse- und Planungsmodul (APM) verarbeitet und der Mensch erhält Rückmeldungen über die geplanten Abläufe und aktuellen Systemzustände. Das APM hat Zugriff auf aufgabenspezifische Planer und entsprechende ausführbare Kommandos und schickt Zustandsdaten an das Event Handling, die durch die systemspezifischen Regelungsalgorithmen interpretiert werden. Über das Event Handling sind auch Interventionen/Modifikationen während der Aufgabenausführung möglich.

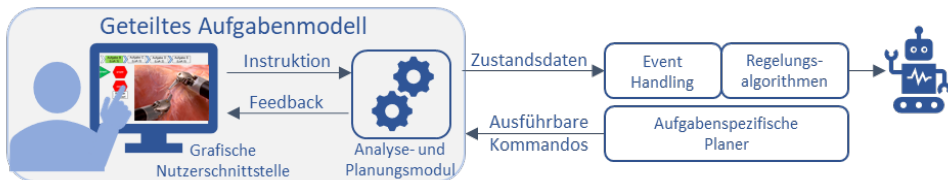


Abbildung 16.8: Software-Architektur für ein Konzept der flexiblen Autonomie (nach Miller et al. 2000)

Um den Anforderungen aus diversen Anwendungsszenarien gerecht zu werden, sollte es die Toolbox ermöglichen, einzelne Aufgabenmodule zu definieren, wobei der Automatisierungsgrad (DoA) entweder von Nutzer*innen vorgegeben wird (adaptierbare Autonomie) oder durch das System (adaptiv). Abbildung 16.9 (links) veranschaulicht skizzenhaft, welche Dimensionen im Ansatz der flexiblen Autonomie Berücksichtigung finden sollten. Dabei soll der gewählte Automatisierungsgrad entlang zentraler Evaluationskriterien bewertet werden und der Automatisierungsgrad ggf. angepasst werden (s. Abb. 16.9, rechts).

Die menschenzentrierte Gestaltung des Gesamtsystems folgt den einschlägigen Standards (Normenreihe **ISO 9241**: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion; insbesondere die **Teile 9241-110** und **-210** zu Interaktionsprinzipien, **-810** zu robotischen, intelligenten und autonomen Systemen und **-940** zur Evaluation taktiler und haptischer Interaktionen). Neben der **Gebrauchstauglichkeit**, **Zuverlässigkeit** und **Flexibilität** des Gesamtsystems und **Systemvertrauen** (z. B. de Visser und Parasuraman 2011,

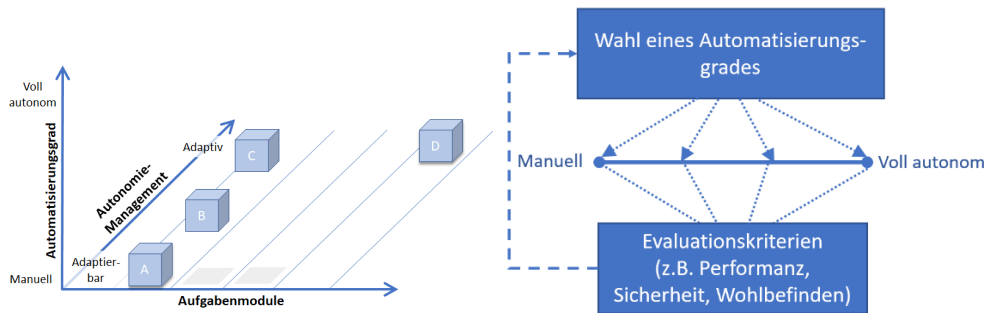


Abbildung 16.9: Links: Dimensionen des Ansatzes: Aufgabenmodule, Automatisierungsgrade und Autonomiemanagement; Rechts: Flowchart zur Anpassung des Automatisierungsgrades mithilfe von Evaluationskriterien (nach Parasuraman et al. 2000)

Lee und See 2004, Mostafa et al. 2015, Parasuraman et al. 2008) sollen zusätzlich einschlägige Metriken aus dem Bereich der Telerobotik und der Mensch-Autonomie-Interaktion ausschlaggebend für die empirische Evaluation des Ansatzes und seiner iterativen Optimierung sein.

Das Interaktionskonzept sowie das Interface werden so gestaltet, dass möglichst große Systemtransparenz und somit ausreichendes **Situationsbewusstsein** des teleoperierenden Menschen erzielt werden, d.h. der Mensch hat alle relevanten Aspekte der Situation im Blick, versteht deren Bedeutung und ist in der Lage die weitere Entwicklung der Situation vorwegzunehmen (z. B. Endsley et al. 1996, Endsley und Garland 2000). Zudem wird ein besonderes Augenmerk auf die **mentale Arbeitsbelastung** gelegt, die durch die Verarbeitung aller Informationen verursacht wird.

Neben dem primär kognitiv-orientierten Vermeiden von Arbeitsbelastung und Problemen der Gebrauchstauglichkeit muss auch das **Wohlbefinden der Nutzer*innen** in den Blick genommen werden. Nicht jede machbare und aus Sicht der Performanzoptimierung mögliche Verteilung von Aufgaben zwischen Mensch und Maschine ist aus Sicht des Menschen wünschenswert. Aus dieser Perspektive bestehen Aufgaben nicht nur aus für den Menschen oder die Maschine mehr oder weniger geeigneten Operationen, sondern aus für den Menschen mehr oder weniger **bedeutungsvollen** Operationen (Klapperich et al. 2020). Die Autonomie des Menschen ist per se ein zentrales Element von Wohlbefinden (z. B. Ryan und Deci 2000). Ein hohes Maß an

Autonomie erzeugt ein Gefühl der Kontrolle und Verursachung. Diese Ursachenzuschreibung, das Verantwortlich-Sein, ist wiederum wichtig für subjektive Zufriedenheit. Ziel im vorliegenden Ansatz ist es, gerade bei hohen Anteilen adaptiver Autonomie der technischen Unterstützung, diese so zu gestalten, dass sie die Bedeutung der Aktivität aus Sicht des Menschen möglichst wenig mindert oder im besten Fall noch erhöht. Eine Strategie ist es, die Operationen zu automatisieren, die *nicht* als unmittelbar sinnstiftend erlebt werden (Lenz et al. 2019). Beispielsweise, könnte das Nähen am Ende eines medizinischen Eingriffs von Chirurg*innen als kaum bedeutungsvoll erlebt und damit vom Roboter übernommen werden. Es wäre aber auch denkbar, dass dieser Operation als Abschluss des medizinischen Eingriffs eine besondere Bedeutung zukommt und somit durch den Roboter hervorgehoben und nur unterstützt werden sollte. Diese Perspektive des Wohlbefindens erfordert erweiterte Analyseansätze, wie beispielsweise Aufgabenanalysen, die sinnstiftende Operationen identifizieren, deren Ergebnisse wiederum in die Ausgestaltung des Modells fließen werden. ZENT-AUR erweitert also eine grundlegend performanz- und kognitiv-orientierte Perspektive auf die Allokation von Autonomie zwischen Mensch und Maschine explizit um eine bedeutungs- und emotional-orientierte Perspektive.

Die wesentlichen **Parameter und Konfigurationen des Gesamtmodells** sollen vorrangig in Laborstudien mit simulierten, generischen Robotersystemen untersucht und evaluiert werden. Zentrale Ergebnisse der Arbeiten sind ein elaboriertes und evaluiertes wissenschaftliches Modell und eine vielseitige, generische Toolbox der flexiblen Autonomie. Zielsetzung ist ein übertragbarer Ansatz der sich auf andere Anwendungen übertragen lässt, die sich Telerobotik bisher kaum oder gar nicht zunutze machen (Pflege, Erziehung, Bildung).

16.3.3 Umsetzung und Evaluation in den Domänen

Neben der Entwicklung des theoretischen Modells und der Toolbox, stellen die Umsetzung in den jeweiligen Domänen und die Durchführung von **Nutzer*innenstudien in praxisnahen Umgebungen** mit den DLR-Prototypen sowie dem kommerziellen Roboter TIAGo zentrale Arbeitsschritte dar.

1) Das telechirurgische System MiroSurge soll im Teleoperationsmodus, mit geteilter Kontrolle und einzelnen teilautonomen Schritten betrieben werden (z. B. sensorbasierte Gewebescans, Endoskopführung oder haptische Augmentierung von Trajektorien oder Verbotszonen). Welche Arbeitsschritte konkret assistiert werden, hängt hierbei von den Ergebnissen der Analysephase ab.

Die Studien können in Fortführung jahrelanger Kooperation mit klinischen Partnern unter realistischen Bedingungen an Modellen durchgeführt werden. Das MiTi kann hierbei Chirurgen aus diversen Fachdisziplinen (Viszeralchirurgie, Urologie und Gynäkologie) und unterschiedlichen Erfahrungen mit telechirurgischen Systemen rekrutieren. Für den gesamten Projektzeitraum werden 5-6 Chirurgen von Klinikum rechts der Isar für Interviews, Fokusgruppen, kleinere qualitative Studien zur Verfügung stehen. Für die Feldstudien im Experimental-OP des MiTi wird von einer Zahl von mindestens 20 bis zu 50 Chirurgen ausgegangen.

Zur technischen Umsetzung stehen grundlegende Technologiebausteine zur Verfügung. Das telechirurgische System MiroSurge mit diversem Instrumentarium bildet die Basis. Darauf aufbauend können verschiedene Ansätze zur Bewegungsskalierung, haptischer Augmentierung von statischen und dynamischen Systemgrenzen (z. B. Arbeitsraumgrenzen, Kollisionsvermeidung), anwendungsbezogene räumliche Virtual Fixtures (geometrische Primitive, beliebige Trajektorien und Oberflächen) und kraftbezogene Virtual Fixtures (z. B. Limitierung von Interaktionskräften beim Fadenzug) kombiniert werden, um kontextbezogen Arbeitsschritte mit verschiedenen Autonomiegraden zu gestalten. Zur Verdeutlichung der Interaktion mit räumlichen Virtual Fixtures von Verbotszonen dient Abbildung 16.10.

Der Autonomiegrad könnte in diesem Szenario verändert werden, indem das System die sensible anatomische Struktur selbst erkennt und daraufhin anbietet diese manuell oder selbstständig als Verbotszone zu aktivieren (A, B). Bei der weiteren Exposition der Struktur könnte autonom eine Erweiterung des Virtual Fixtures erfolgen. Übersteuert der Chirurg die haptische Verbotszone (C), wählt das System nach persönlichen Präferenzen oder anderen Kriterien die weitere Art der Augmentierung (D oder E). In ähnlicher Form könnte die Interaktion zur Durchführung sensor-basierter Gewebescans oder haptischen Führungen erfolgen.

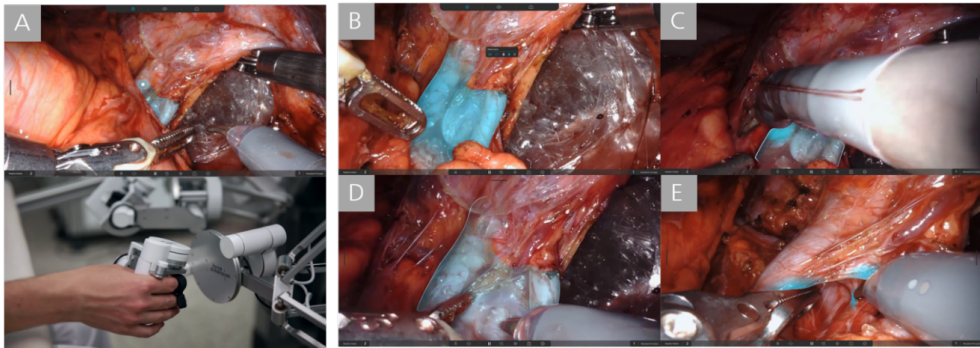


Abbildung 16.10: Interaktion zur Konfiguration einer haptisch augmentierten Verbotszone. A) Manuelle Markierung der anatomischen Struktur durch das Eingabegerät (DoA0); B) Manuelle Aktivierung der Verbotszone; C) Haptische und visuelle Augmentierung (DoA2); D) Visuelle Augmentierung (DoA1); E) Visuelle Augmentierung nur in Kontaktbereichen (DoA1).

2) Teleoperationssysteme für körperlich eingeschränkte Menschen (EDAN): Der Rollstuhlassistent EDAN kann vom Nutzenden sowohl im manuellen Modus, sowie mittels teilautonomer Unterstützung gesteuert werden. Die Teilautonomie hilft dem Nutzenden bei der Ausführung von Aktivitäten des täglichen Lebens. Derzeitig existieren Unterstützungsfunktionen für das Öffnen von Türen und Schubladen, das Öffnen eines Kühlschranks, sowie das Einschenken eines Getränks aus einer Flasche in einen Becher mit anschließendem Trinken. Weitere teilautonome Fähigkeiten, wie z. B. das Bedienen einer Mikrowelle, sind derzeit in Entwicklung und können basierend auf den Ergebnissen der ersten Analysephase realisiert werden. Tätigkeiten, für die keine teilautonomen Fähigkeiten verfügbar sind, können im manuellen Steuerungsmodus ausgeführt werden. Um die MRI zu analysieren und zu verbessern, können im Rahmen

der Studien Steuerungsparameter des Systems an die Vorlieben der Nutzer*innen angepasst werden. Diese umfassen u.a. die Geschwindigkeit mit der der Roboter oder der Rollstuhl bewegt werden können und die automatische Aktivierung von Fähigkeiten auf Basis der Intentionserkennung.

In Kooperation mit der Caritas soll das System EDAN mit körperlich eingeschränkten Menschen erprobt und evaluiert werden. Hierbei bauen wir auf unseren Erfahrungen aus Studien mit unseren Pilotnutzer*innen auf. Da es sich bei den Proband*innen um Menschen mit starken körperlichen Einschränkungen handelt, muss das EDAN System für eine Studie an die Bedürfnisse der Nutzer*innen angepasst werden. Es bedarf hier unter anderem einer individuellen Anpassung des Rollstuhls, z. B. Anpassung und Auspolsterung des Sitzes, sowie der Anpassung der zu verwendenden Steuerungsschnittstelle (Joystick, Head-Array, Kinn-Joystick). Im Hinblick auf diesen Konfigurationsaufwand, und da die Nutzer das System und seine Steuerungsmodi zunächst kennenlernen müssen, ist es geplant die Studienteilnehmenden das System in mehreren sich wiederholenden Sessions benutzen zu lassen. Angedacht ist eine Gesamtzahl von mindestens 10 Probanden, signifikant größere Fallzahlen sind in diesem Kontext aufgrund des Anpassungsaufwands realistischerweise nicht umsetzbar.

3) Autonomer Serviceroboter (TIAGo) mit Teleoperation: Der Serviceroboter TIA-Go kann flexibel zwischen Teleoperation bis hin zur überwachten Autonomie eingesetzt werden. Mit Fokus auf ein betreutes Wohnumfeld soll ein Szenario implementiert werden, in dem ein Mensch telerobotisch Bewohner und Pflegepersonal der Einrichtung bei alltäglichen Aufgaben unterstützt. Generell ist das System dafür ausgelegt viele Aufgabenschritte autonom zu lösen, der Teleoperator unterstützt zusätzlich bei komplexen Interaktionen mit der Umgebung oder sozial bzw. ethisch bedeutsamen Interaktionen mit dem Bewohner. Ein Beispiel hierfür wäre die Gabe von Medikamenten, für die das Fachpersonal verantwortlich zeichnet und die teleoperativ erfolgen sollte. Auch das regelmäßige Angebot, Getränke zu sich zu nehmen, spielt bei älteren Menschen eine wichtige Rolle und könnte in Form von Teleoperation mit einer sozialen Interaktion verbunden werden. Für die Durchführung der Feldstudien stehen nach aktuellem Stand von Seiten der Stiftung Liebenau bis zu 25 Einwohner*innen mit unterschiedlichem Pflegebedarf, eine Pflegefachkraft und 2-3 unterstützende Mitarbeiter*innen je Schicht zur Verfügung. Die qualitativen Vorstudien werden von 5 Pflegefachkräften

begleitet. Die quantitativen Feldstudien werden mit bis zu 20 Teleoperator*innen mit verschiedenen fachlichen Hintergründen durchgeführt.

4) Demonstration einer Teleoperations-Infrastruktur. Zukünftige Implementierungen von teleoperativen Systemen legen die Einrichtung von **Leitständen** nahe, von denen aus technisches oder medizinisches Fachpersonal die robotischen Systeme mit flexibler Autonomie steuern könnten. Das DLR verfügt bereits über eine solche Infrastruktur und im Rahmen von ZENT-AUR soll dieses Gesamtsystem exemplarisch demonstriert werden. Dies erlaubt auch die Durchführung eines Versuchs ohne Präsenz der Wissenschaftler*innen vor Ort.

16.4 Nachhaltigkeit und Verwertungsplan

- Das Kompetenzzentrum initiiert einen Innovationsberat und intensiviert die langjährige Kooperation mit Partnern aus Forschung und Industrie um Verwertungsstrategien vorzubereiten.
- Das DLR hat in der Vergangenheit zahlreiche Ausgründungen hervorgebracht.
- ZENT-AUR wird in Form eines Innovationshubs über die Projektlaufzeit hinweg verstetigt.
- DLR, RWU und Universität Siegen bringen ihre Erfahrungen aus RA2 (GINA, RobotKoop) zu Vernetzung und projektübergreifender Verwertung mit ein.

16.4.1 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Robotische Autonomie und Telerobotik sind breite Forschungsfelder. Die Fragen die entstehen, wenn reibungslos und intuitiv zwischen verschiedene Autonomiegraden gewechselt werden sollte, wurden bisher aber kaum erforscht – weder aus Sicht der robotischen Technologie noch der Mensch-Roboter Interaktion. Die skizzierten ZENT-AUR Konzepte werden mit **prototypischen sowie kommerziellen Robotersystemen** über **diverse Anwendungsdomänen** und **Nutzer*innengruppen** hinweg erprobt und evaluiert. Zentrale wissenschaftliche Errungenschaft wäre das Gesamtkonzept zum sicheren und reibungslosen Umschalten zwischen verschiedenen Kontrollmodi, welches in einer Vielzahl von Anwendungen einsetzbar wäre. Durch die geplanten qualitativen und quantitativen Studien können substantielle Forschungsbeiträge der

involvierten Disziplinen vorgelegt werden. Daraus können auch allgemeine Richtlinien bzw. Standards zur menschenzentrierten Gestaltung von Teleoperationssystemen und entsprechender Interaktionskonzepte abgeleitet werden.

Alle Zentrumspartner werden durch **umfangreiche Öffentlichkeitsarbeit** zur Verbreitung der Forschungsergebnisse beitragen. Vorbild kann hier das “SMiLE” Projekt (Link; siehe Rubrik “Presse”) des DLR sein bei dem auch das System EDAN zum Einsatz kam oder auch das Weltraum-Projekt “Kontur-2” des DLR bei dem Roboter aus dem All teleoperiert wurden (Weber et al. 2019) und über das sogar in der Tagesschau berichtet wurde. Hierzu zählt auch der **Wissenstransfer** auf Fachkonferenzen, durch Fachpublikationen, aber auch durch Wissenstransfer mit Industriepartnern durch den Innovationsbeirat und andere bestehende Netzwerke (z. B. DIH-Hero) als Basis für zahlreiche zukünftige Forschungsprojekte im Zentrum. Durch die akademischen Partner des Zentrums kann eine **Integration des Forschungsprojekts in die Hochschullehre** (z. B. in “Human Factors”-Vorlesungen, Seminararbeiten, Abschlussarbeiten) und ggfs. gemeinsame Betreuung von **Promotionsarbeiten** durch Projektpartner*innen erfolgen.

Durch die Ergebnisse der mehrstufigen Versuchskampagnen (VR, Labor, Feldstudien) in drei Anwendungsszenarien entsteht eine umfangreiche, **systematisch aufbereitete Datenbasis**, die sowohl qualitative (Nutzerbefragungen, Fokusgruppen etc.) als auch quantitative empirische Ergebnisse (Experimente, Feldversuche) mit allen erhobenen Metriken umfasst. Zudem können auf Basis der Ergebnisse, **allgemeine Richtlinien** zur menschenzentrierten Gestaltung von Robotersystemen mit flexibler Autonomie und entsprechenden Interaktionskonzepten abgeleitet werden.

Der Ansatz ist für eine **Vielzahl von Entwicklungen im Bereich der Roboterassistenz** von Bedeutung, da viele autonom ausgelegte Systeme durch eine **teleoperative Rückfallebene** ihren Einsatzradius deutlich erweitern können und Autonomiefehler kompensieren können. Idealerweise ersetzt der Ansatz der flexiblen Autonomie den Techniker bzw. Wartungsingenieur vor Ort, wodurch überhaupt erst ein umfassender Einsatz in der Praxis denkbar ist. Zudem eröffnet sich in pflegerisch/ häuslichen Einsatzfeld (z. B. Quarantäne) die Option einer über den Roboter vermittelten Kontaktaufnahme durch Angehörige, Pfleger*innen und medizinisches Fachpersonal. Diese

Ergebnisse von ZENT-AUR sind sicherlich nicht nur für die Assistenzrobotik sondern ggf. auch für **andere Domänen** wie der Luftfahrt oder Automobilbereich **von Interesse**, die sich mit der MAI befassen. Hier arbeitet das DLR Institut für Robotik und Mechatronik bereits seit Jahren mit anderen DLR Instituten (Institut für Flugführung, Institut für Verkehrssystemtechnik, DLR Braunschweig) eng zusammen.

ZENT-AUR bietet darüber hinaus eine generische Plattform, die auch die **Steuerung multipler robotischer Systeme** (z. B. häusliche Pflege, Katastrophenschutz, etc.) von einem Leitstand als eine Erweiterung ermöglicht. Direkt verwertbar werden die Ansätze des Kompetenzzentrums auch in weiteren wissenschaftlichen Projekten wie der anstehenden **Weltraummission MARC-II** der Europäischen Raumfahrtagentur ESA, bei der auch das DLR Institut für Robotik und Mechatronik beteiligt ist. Hier sollen mehrere robotische Systeme in einem Szenario der planetaren Exploration in unterschiedlichen Kontrollmodi von Astronauten, die sich auf der ISS befinden, gesteuert werden.

Zentrale Plattform zur Verstetigung von ZENT-AUR wird ein “Innovationhub” für die kooperative Forschung mit anderen Forschungseinrichtungen und Industriepartnern, basierend auf dem ZENT-AUR-Innovationsbeirats. Dieses Innovationshub bietet: 1) FE-Arbeiten im Bereich der Telerobotik, der flexiblen Autonomie und 2) empirische Evaluation von MRI-Konzepten mit der für ZENT-AUR entwickelten VR Testplattform, im Labor und in praxisnahen Umgebungen. Durch das große Netzwerk zu nationalen und internationalen Partnern und die Anwendungsnähe des Projekts, ist eine zukünftige Verwertung des in diesem Projekt entstehenden geistigen Eigentums realistisch. So hat das DLR **in der Vergangenheit bereits mehrfach erfolgreich Roboter-Technologien an weltweit renommierte Firmen aus diversen Domänen lizenziert**. Je nach Domäne und Marktreife der Systeme sind dabei unterschiedliche Verwertungspläne und Kunden denkbar. Das MIRO Innovation Lab des DLR stellt hierbei eine ideale Verwertungsplattform im Bereich der Chirurgie und DIH-HERO für gesamten Healthcare Bereich dar. Im Bereich Pflege und Assistenz bauen wir zudem auf die langjährige Kooperation mit Caritas und Franka Emika (einer DLR Ausgründung). Die Einbindung renommierter Firmen, die das Projekt ZENT-AUR während der gesamten Laufzeit in Form des **Innovationsbeirats** begleiten werden, werden hier einen großen Vorteil für die spätere Verwertung darstellen und diverse Spin-off Projekte könnten daraus entstehen.

Eine weitere mögliche Verwertungsstrategie eröffnet sich über **Ausgründungen**. Das DLR fördert solche Initiativen, so dass allein im Zeitraum seit 2003 zwölf Ausgründungen aus dem Institut für Robotik und Mechatronik zu verzeichnen sind.

16.4.2 Wirtschaftliche Anschlussfähigkeit mit Zeithorizont

Kurzfristig (2-3 Jahre): ZENT-AUR ist ein führendes Zentrum als MRI Innovationhub geworden (basierend auf dem MIRO Innovation Lab des DLR) mithilfe des Innovationsbeirats und weiteren assoziierten Partnern aus den Anwendungsdomänen. Neue Systemlösungen im Bereich der flexiblen Autonomie werden generiert und an neue Einsatzfelder angepasst. Eine Infrastruktur bzw. ein Testzentrum für systematische Evaluationskampagnen (Human Factors und UX Bewertung) mit der entwickelten VR Umgebung, Labor und praxisnahen Testumgebungen (Chirurgie zusammen mit MiTi, Pflege zusammen mit Caritas) wurde aufgebaut. Der Innovationshub bietet Beratung/ Expertise zur Durchführung von Evaluationskampagnen im Feld.

Längerfristig (3-5 Jahre): Aus heutiger Sicht erscheint es sehr wahrscheinlich, dass sich schon mittelfristig Lizenzeinnahmen durch das entwickelte Gesamtkonzept erzielen lassen. Die kontaktierten und involvierten Industriepartner haben deutlich gemacht, dass eine Verwertung auch im industriellen Kontext sehr viel versprechend ist. Eine weitere wichtige Möglichkeit stellt hierbei die Ausgründung von Start-Up-Firmen aus dem Kompetenzzentrum, die Teilergebnisse vom DLR lizenzieren und zur Marktreife bringen, dar. Damit könnte ein größeres Ökosystem geschaffen werden, das letztendlich zum langfristigen marktwirtschaftlichen Erfolg der Assistenzrobotik in der Zukunft beiträgt.

Langfristig (>5 Jahre): Durch den demografischen Wandel und wachsenden Mangel an Fachpersonal in Pflege, Medizin und Betreuung ist mit einer zunehmenden Nachfrage an Roboterlösungen zu rechnen und dem Thema des Kompetenzzentrums kommt auch langfristig eine große Bedeutung zukommen.

16.5 Struktureller Aufbau des Verbundes

16.5.1 Bisherige Arbeiten und Vorerfahrungen der Verbundpartner

Das **Institut für Robotik und Mechatronik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR)** ist seit Jahrzehnten die **international anerkannte deutsche Adresse für angewandte Roboterforschung**. Durch nationale und internationale Kooperationen ist das RMC in ein weites Robotik-Netzwerk eingebunden. Das Institut für Robotik und Mechatronik kann auf die Erfahrung **mehrerer erfolgreicher Weltraummissionen** zurückgreifen. So wurde bereits 1993 im Rahmen des ROTEX Experiments, zum ersten Mal ein Roboter im Space Shuttle von der Erde aus teleoperiert und der Roboter war zudem in der Lage autonome Greifoperationen durchzuführen (Hirzinger et al. 1994). Im Projekt Kontur-1 wurde 2005 ein zweiachsiger Roboterarm ROKVISS an der Außenhülle der ISS montiert und mit Krafterückkopplung teleoperiert (Hirzinger et al. 2005). Ähnliche Experimente wurden 2015 im Kontur-2 Experiment durchgeführt, in dem verschiedene Roboter auf der Erde von der ISS aus gesteuert wurden (Artigas et al. 2016, Weber et al. 2019). In der Mission METERON SUPVIS wurde die Teleoperation von Robotern auf eine neue Ebene gebracht, indem die Autonomie des Roboters in den Vordergrund gestellt wurde. Mittels eines Tabletcomputers gelang es z. B. Alexander Gerst auf der ISS den humanoiden Roboter Rollin' Justin in den Laboren des Instituts für Robotik und Mechatronik fernzusteuern (Schmaus et al. 2018). Diese Entwicklungen finden auch terrestrischen Einsatz, zum Beispiel in der industriellen Produktion, Arbeiten in schwer zugänglicher Umgebung, sowie im Service-, Gesundheits- und Assistenzbereich. Zentrales Element der Robotikforschung ist der im Institut entwickelte **nachgiebige Leichtbauroboter**. Diese Technologie ermöglicht eine sichere physische MRI. Das Institut verfügt über vielfältige, teils anthropomorphe Systeme, die diverse Autonomiefunktionen haben, aber auch teleoperativ gesteuert werden können. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf **Robustheit und Intuitivität der teleoperativen Systeme** gelegt. Diese Steuerungsmodalitäten wurden z. B. im **Projekt „SMiLE“** im Bereich Assistenzrobotik eingesetzt. In diesem Projekt wurden praxisnahe Evaluationen der DLR Robotersysteme im Kontext der Pflege durchgeführt. **Erste Versuche zu den Teilautonomiefunktionen** des Systems EDAN wurden bislang mit Versuchspersonen mit spinaler Muskelatrophie durchgeführt. Weiterführende

Studien im Pflegeheim sind in Planung, bei denen auch das DLR-Robotersystem JUSTIN zum Einsatz kommen soll (s. Abb. 16.11, Bsp. des Projekts „SMiLE“).



Abbildung 16.11: Injektion (l.), Bettenaufbereitung (r.) in Teleoperation bzw. mit geteilter Kontrolle durchgeführt.

Ähnliche Studien wurden in der Vergangenheit auch mit dem **Telechirurgie-System MIRO** durchgeführt. Das RMC kann neben den Erfahrungen mit Teleoperationssystemen für diverse Anwendungsdomänen auch die für das geplante Projekt zentralen Technologien vorweisen. Hierzu zählt vorwiegend die semantische Zustandsschätzung, d.h. das generelle Verständnis was die Aktionen, die vom Roboter ausgeführt werden, bedeuten. Diese bildet die Grundlage für das nahtlose Umschalten zwischen den Autonomieebenen. Weiterhin können die durch Teleoperation durchgeführten Aktionen durch Methoden des maschinellen Lernens (z. B. Lernen durch Demonstration) generalisiert werden und somit in ähnlichen Situationen auch durch andere Robotersysteme (z. B. Tiago) ausgeführt werden.

Das Institut für KI (IKI) der Hochschule Ravensburg-Weingarten (Prof. Schneider) kann auf über zwanzig Jahre Erfahrung mit Anwendungen des maschinellen Lernens in den verschiedensten Gebieten wie etwa Medizin, Maschinenbau, Robotik, etc. zurückgreifen. Im ZAFH Servicerobotik zur Entwicklung und Erprobung von intelligenten mobilen Serviceroboter wurde das Innovationsthema Alltagstauglichkeit von Servicerobotern erschlossen und stark weiterentwickelt. Der Einsatz von künstlicher Intelligenz ermöglichte es das Verhalten von Servicerobotern zu lernen, wodurch sich diese adaptiv an ihre Umgebung anpassen können. Weiter beschäftigte sich das Projekt mit der Verifikation von Sicherheitseigenschaften bei autonomen Systemen. Der ZAFH Servicerobotik wird über die Förderphase hinaus als Exzellenzcluster weitergeführt und dient weiterhin als Anlaufstelle und Ansprechpartner für das Innovationsthema alltagstaugliche Serviceroboter. Im Projekt RABE wurde, speziell für die stationäre Langzeitpflege, ein intelligenter Rollator entwickelt, welcher sowohl die Pflegekräfte entlasten, als auch den Bewohnern der Pflegeheime ein autonomeres Leben ermöglicht.

Durch einen eingebauten Elektromotor unterstützt der RABE-Rollator das Bewältigen längerer Strecken, Überwinden von Gefällen und erleichtert den Transport von Zuladung. Mittels entsprechender Sensorik und der Fähigkeit zur Navigation soll der Rollator darüber hinaus auch autonom kurze Strecken zurücklegen können. Zum Beispiel kann der Rollator nachts, oder wenn die Benutzer*in beim Essen ist, eine Parkposition aufsuchen. Auch kann er die Benutzer*in an bestimmte vordefinierte Orte führen. Im AsRoBe Projekt (Assistenzroboter für Menschen mit körperlicher Behinderung) wurde vor dem Hintergrund des demographischen Wandels untersucht, ob mobile Serviceroboter für Menschen mit körperlicher Behinderung eine Hilfe sein können.

Prof. Dr. Sabine Maasen ist Inhaberin der Professur für Wissenschafts- und Innovationsforschung, die im Rahmen der Exzellenzstrategie zur Stärkung des Transferbereichs an der **Universität Hamburg** geschaffen wurde. Ihre Forschungsarbeiten richten sich erstens auf neue Formen der gesellschaftlich verantwortlichen Wissensproduktion (Inter-, Transdisziplinarität, Partizipation), zweitens auf den Zusammenhang von forcierter Innovationstätigkeit und gesellschaftlicher Legitimation von Forschung (neuer Gesellschaftsvertrag mit der Wissenschaft) und drittens auf wissenschafts- und technologiebezogene Aspekte der Selbst- und Fremdregulierung des Körpers (Neurogouvernementalität, Soziale Robotik). Gleichzeitig ist sie wissenschaftliche Direktorin der TransferAgentur (<https://www.uni-hamburg.de/transfer.html>), die das Ziel verfolgt, den Austausch zwischen wissenschaftlichen und nichtwissenschaftlichen Akteurinnen und Akteuren zu beleben. Kernbereiche der TransferAgentur sind Themen der Innovation und Gründung, der Bildung und Qualifizierung aber auch der ko-kreativen Forschung und des gesellschaftlichen Engagements. Die übergreifende Vision besteht darin, die vielfältigen Wechselwirkungen von Wissenschaft, Technologie und Gesellschaft sowohl zu beforschen als auch zu gestalten.

Prof. Dr. Marc Hassenzahl ist Professor für „Ubiquitous Design“ in der Wirtschaftsinformatik an der wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät der Universität Siegen. Die Arbeitsgruppe (10 Designer*innen, 2 Psycholog*innen, eine Informatikerin, ein Techniker) beschäftigt sich sowohl wissenschaftlich als auch praktisch mit der Gestaltung interaktiver Produkte. Dies umfasst den vollständigen Prozess, also sowohl methodische Aspekte der benutzerzentrierten Analyse und Evaluation (sozialwissenschaftlich fundierte Durchführung und Analyse von Befragungen, Beobachtungen) als auch konkretes Erlebnis- und Interaktionsdesign. Teilbereiche des von Prof. Hassenzahl mitentwickelten „Experience Designs“ und des wohlbefindensorientierten Gestaltungsansatzes werden in mehreren aktuellen und vergangenen Projekten des BMBF gefördert, z. B. GINA (das Begleitforschungsprojekt der Förderlinie RA2), Sympartner (Entwicklung eines Social-Companion-Roboters), NoStress (Entspannung durch VR), HIVE (Begleitforschung zu NoStress), Nähe auf Distanz (Partizipative Entwicklung von Verbundenheitstechnologien) und e-VITA (Wohlbefinden im Alter). Außerdem finden seine Arbeiten Einsatz in Wirtschaftskooperationen mit z. B. Honda (Telerobotik in der Pflege) oder Siemens Healthcare (Arbeitszufriedenheit im Gesundheitswesen). Die Arbeitsgruppe veröffentlicht kontinuierlich auf hochwertigen, internationalen Konferenzen in der HCI und im Design, sowie in ausgezeichneten Journals.

Prof. Dr. Linda Onnasch leitet das Fachgebiet Ingenieurpsychologie an der Humboldt-Universität zu Berlin mit aktuell sechs Mitarbeitenden und weiteren assoziierten Wissenschaftler*innen. Die Forschung von Frau Onnasch umfasst die Mensch-Roboter-Interaktion (MRI) und die Mensch-Automation-Interaktion (MAI). Im Bereich der MRI forscht das Fachgebiet an der Wirksamkeit von Anthropomorphismus als Gestaltungselement der MRI. Im Bereich der MAI geht es vor allem um Fragen der flexiblen Automationsgestaltung und den Einfluss adaptiver und adaptierbarer Assistenzsysteme auf Leistung, Vertrauen und Aufmerksamkeit. Frau Prof. Onnasch hat bereits in diversen nationalen und internationalen Forschungsprojekten mitgewirkt. Unter anderem hat sie die Forschungsprojekte „Ethische und soziologische Aspekte der Mensch-Roboter-Interaktion“ sowie „Team-Mental-Models in Mensch-Roboter-Teams: Einsatzszenarien und Stand der Technik“ für die Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsgesundheit (BAuA) geleitet, im EU-Projekt „HoliDes – Holistic Human

Factors and System Design of Adaptive Cooperative Human-Machine Systems“ (Artemis) sich mit der Gestaltung und Evaluation technischer Systeme im Automobil-, Luftfahrt-, Leitwarten- und Medizintechniksektor beschäftigt. Aktuell ist Sie PI in den BMBF-geförderten Projekten „CUBES Circle“, in dem es um eine technische Lösung der Nahrungsmittelproduktion der Zukunft geht (Fokus menschenzentrierte Gestaltung) und im Projekt „RoMi - Roboterunterstützung bei Routineaufgaben zur Stärkung des Miteinanders in Pflegeeinrichtungen“. Die Arbeitsgruppe veröffentlicht kontinuierlich auf internationalen Konferenzen (z. B. Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting), sowie in ausgezeichneten wissenschaftlichen Zeitschriften (z. B. International Journal of Social Robotics, Human Factors, ACM Transactions on Human-Robot Interaction).

16.5.2 Funktion der einzelnen Partner im Zentrum und Beschreibung der geplanten Umsetzungskette im Projekt

Das DLR (Institut für Robotik und Mechatronik) fungiert als Zentrums-koordinator, ist zuständig für Vernetzung und die Etablierung eines Innovationsbeirats (AP1). In AP2 werden der Anwendungskontext und Anforderungen psychologisch (Humboldt-Univ. Berlin, HU und Univ. Siegen, US) und aus Perspektive verantwortlicher Forschung und Innovation (Univ. Hamburg, UH) analysiert und bewertet. DLR und die Hochschule Ravensburg-Weingarten (RWU) sind die beiden technischen Partner des Zentrums, die vorrangig die Robotersysteme für die geplanten Studien anpassen und geeignete Autonomiefunktionen implementieren. Diese Partner werden technische Anforderungen in AP 2 identifizieren. Zudem passen DLR und RWU die Robotersystem in AP3 entsprechend an. HU, US und UH sind federführend bei der Entwicklung des theoretischen Gesamtmodells der flexiblen Autonomie, wobei RWU (Prof. Graef) sich vor allem der Konzeption der Nutzerschnittstelle widmet. Auf Basis der Ergebnisse aus AP 2 und 4 wird das DLR eine generische Toolbox vom DLR in AP5 entwickelt und implementiert. Die beiden technischen Partner sind in AP6 dafür zuständig, die Testszenarien in Labor und Feld umzusetzen und alle Partner sind bei der Durchführung der Studien und der Dokumentation der Ergebnisse involviert.

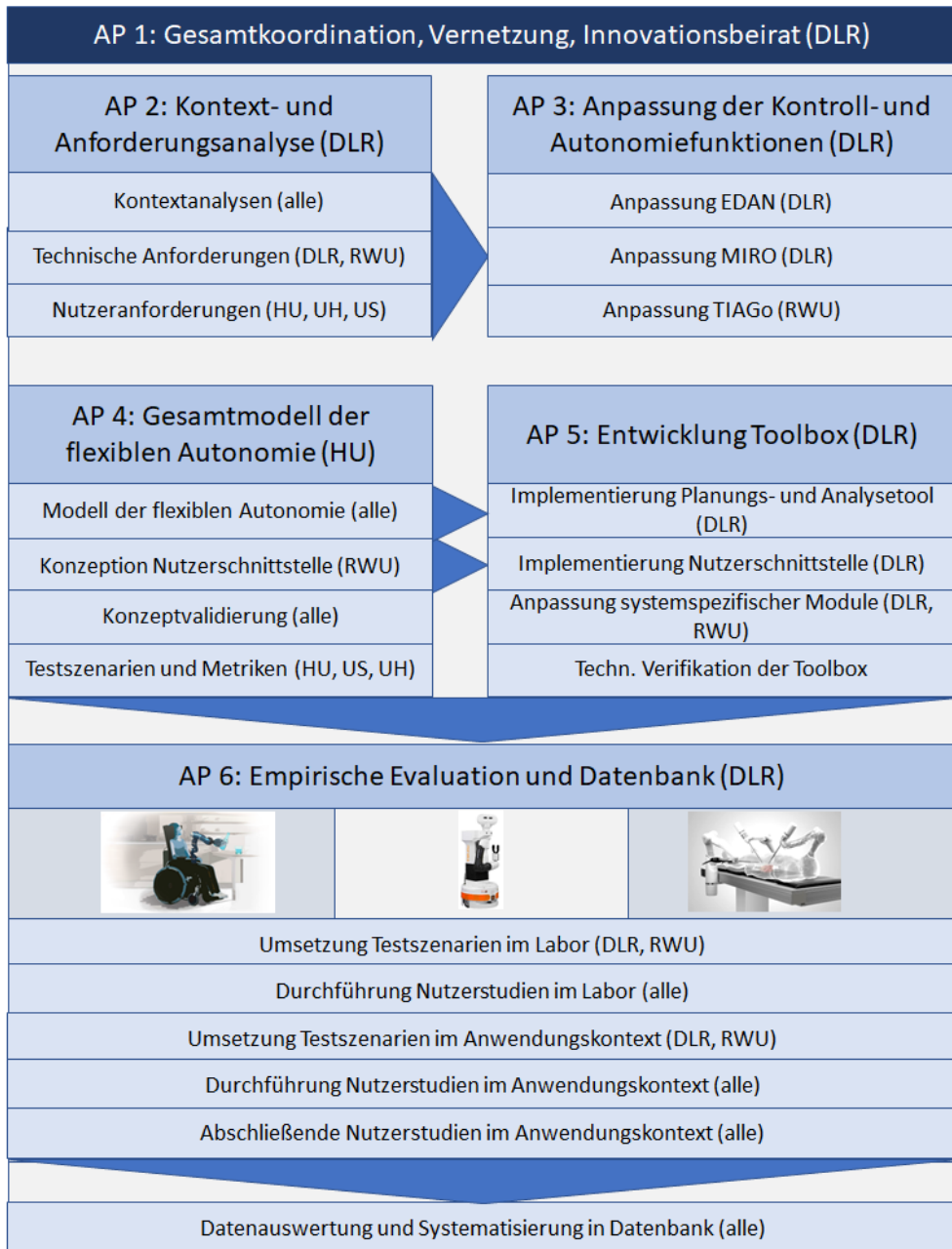


Abbildung 16.12: Umsetzungskette im Projekt.

16.5.3 Einbindung weiterer Akteure

Caritas-Verband der Erzdiözese München und Freising. Im Bereich der Assistenz für Menschen mit Behinderung führt das DLR die erfolgreiche Kooperation mit der Caritas fort (s. LoI). Die Caritas bietet für Menschen mit Behinderung unterschiedliche Wohnformen an. Das ambulant betreute Wohnen wurde für Menschen mit geistiger und/oder körperlicher Behinderung eingerichtet, die alleine oder mit einem Partner in einer Wohnung leben und dabei Unterstützung benötigen. Die Häuser sind Wohnangebote mit Begleitung, Betreuung, Förderung und Pflege für Menschen mit körperlichen und mehrfachen Behinderungen unterschiedlichen Alters. In den Betreuungseinrichtungen sollen die geplanten Feldstudien durchgeführt werden und ausgewählte Angestellte der Einrichtungen bzw. körperlich eingeschränkte Patienten werden während der gesamten Projektlaufzeit die Entwicklungen z. B. in Form von Fokusgruppen, Interviews etc. begleiten.

Forschungsgruppe für minimal-invasive interdisziplinäre therapeutische Intervention (MITI). Eine enge und jahrelange Kooperation besteht auch zwischen dem Institut für Robotik und Mechatronik (DLR) und dem MiTi (s. LoI). Das MiTi ist eine interdisziplinäre Forschungsgruppe am Klinikum rechts der Isar der Technischen Universität München, die innovative diagnostische Verfahren und therapeutische Lösungen für die minimal-invasive Chirurgie entwickelt. Seit der Gründung durch Prof. Dr. med. Hubertus Feussner im Jahre 1999 legt MITI großen Wert auf Interdisziplinarität. Kompetenzen aus Ingenieurwissenschaften, Industrie und Klinik treffen im MITI aufeinander, so dass ein Know-How-Zentrum für Medizintechnik entstanden ist. Bei der Forschungsarbeit legt MITI besonderen Wert auf die Tauglichkeit und Anwendbarkeit der Entwicklungen im klinischen Alltag. Dies wird bei jedem Projekt durch die enge Zusammenarbeit von Ingenieuren und klinisch tätigen Ärzten erreicht. Das DLR richtet zusammen mit dem MiTi einen Experimental-OP am Klinikum rechts der Isar ein, stellt Chirurgen als projektgleitende Berater für ZENT-AUR ab und organisiert die Chirurg*innenrekrutierung für die Feldstudien und deren Durchführung.

Stiftung Liebenau. Die Stiftung Liebenau ist eine kirchliche Stiftung privaten Rechts mit rund 40 Tochtergesellschaften, Beteiligungen verschiedener Art und mehreren selbstständigen Stiftungen. Im Verbund mit der Stiftung Hospital zum Heiligen

Geist (Kisslegg) ist sie in Deutschland, Österreich, Italien, Bulgarien, der Schweiz und der Slowakei tätig. Die Stiftung Liebenau setzt sich für die größtmögliche Selbstbestimmung und Teilhabe aller Menschen am gesellschaftlichen Leben ein. Entsprechend ist die Stiftung in fünf Aufgabenfeldern tätig: Bildung, Gesundheit, Pflege und Lebensräume, Teilhabe und Familie und Service und Produkte. Bis zu 30 000 Menschen nehmen jährlich deren Leistungen in Anspruch oder engagieren sich in der Stiftung. Gemeinsam mit vielen Partnern im In- und Ausland sollen die Rahmenbedingungen sozialer Arbeit weiterentwickeln und die Lebenssituation der begleiteten Menschen verbessert werden. Die geplanten Feldstudien mit dem TIAGo System sollen im Haus Magdalena (Ehningen, Kreis Böblingen) durchgeführt werden.

Für den **Innovationsbeirat**, der die Arbeiten des Kompetenzzentrums kontinuierlich begleiten und darüber hinaus verstetigen soll, konnten bereits ArtiMinds, ABB Automation, Kinova, Medtronic, Storz und die Stiftung Kath. Familien- und Altenpflegewerk gewonnen werden. Die gewonnen Partner haben die große Relevanz des Themas des Kompetenzzentrums für ihre industriellen Anwendungen bzw. Systeme hervorgehoben (siehe LoIs). Darüber hinaus soll während der Projektlaufzeit weitere Partner eingebunden werden, die hier kurz aufgelistet sind (bestehende Kooperationen mit * markiert):

Medizin. *Klinisch-wissenschaftliche Partner:* Klinikum rechts der Isar*, TUM-CAMP*, Universitätsklinikum Freiburg*. *Medizinisch-technische Netzwerke:* MedTechPharma e.V.*; MedicalValley (Multiplikatoren). *Dt. Roboterhersteller für Medizinanwendungen:* KUKA Medical Robotics*, Siemens-Healthineers, avateramedical, Wälischmiller, AKTORmed, etc. *Internationale Unternehmen für Assistenzrobotik in der teleoperierten Laparoskopie:* Intuitive Surgical, Cambridge Medical Robotics, Distal Motion, Senhance Transenterix, etc. Weitere zahlreiche Kontakte können über das vom DLR gegründeten MIRO Innovation Lab und durch die Kernpartnerschaft im europäischen Digital Innovation Hub – Healthcare Robotics (DIH-HERO) aufgebaut werden.

Pflege/Assistenz: Orthopädieforum Erlangen*, KBZO*, ottobock*

Kontakte/ Kooperationen mit Herstellern von Robotersystemen wie z. B.:



16.5.4 Zusammenarbeit mit dem Transferprojekt

Das Transferprojekt soll aktiv beim Wissenstransfer bzgl. Evaluationsmethoden und Metriken unterstützt werden. Durch die drei Anwendungsdomänen kann ZENT-AUR wichtige Beiträge zur Generalisierbarkeit von Metriken, ELSI Aspekten und Benchmarks beisteuern.

Auch bei den avisierten jährlichen Wettbewerben kann ZENT-AUR durch die Vielseitigkeit des Lösungsansatzes und die Einbindung des Menschen via Teleoperation sicherlich eine Schlüsselrolle spielen. Generell könnte der Fokus von ZENT-AUR sich als äußerst interessante und komplementäre Perspektive zu den anderen Projekten erweisen, die vorrangig die Interaktion zwischen autonomem Roboter und Mensch in der direkten Umgebung betrachten. Hier könnten sich schon innerhalb der RA3 Laufzeit starke Synergien ergeben. Das DLR hat z. B. schon in der Vergangenheit die Teleoperationstechnologie zusammen mit dem Fraunhofer Institut in Stuttgart auf dem Care-o-Bot System demonstriert.

Eine Datenbasis soll erstellt werden, in der die Ergebnisse aus allen drei Domänen integriert werden sollen. Diese Datenbasis könnte im engen Austausch mit dem Transferprojekt gestaltet und generisch aufgesetzt werden, so dass auch die anderen Projekte diese nutzen könnten. Das DLR hat zudem verschiedenen OS-Entwicklungen vorzuweisen (z. B. LN Manager, RAFCON) die voraussichtlich auch in ZENT-AUR Verwendung finden werden und zur Verfügung gestellt werden können.

ZENT-AUR kann eine Schlüsselfunktion bei der Unterstützung des projektübergreifenden Wissenstransfers einnehmen, da innerhalb des Projekts eine Synthese dreier Anwendungsszenarien erfolgt. Darüber hinaus bringt das DLR Vorerfahrung durch technische Begleitung in RA2 (GINA-Technik), die Hochschule Ravensburg-Weingarten als technischer Partner in RA2 RobotKoop und die Universität Siegen als Verbundkoordinator von GINA mit ein. Generell, kann das DLR zahlreiche Kontakte im Bereich Robotik einbringen und verfügt über jahrzehntelange Kompetenzen im Bereich Lizenzierung/ Technologie-Transfer.

Literaturverzeichnis

- Jordi Artigas, Ribin Balachandran, Cornelia Riecke, Martin Stelzer, Bernhard Weber, Jee-Hwan Ryu, und Alin Albu-Schaeffer. Kontur-2: force-feedback teleoperation from the international space station. In *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 1166–1173. IEEE, 2016.
- Aleks Attanasio, Bruno Scaglioni, Elena De Momi, Paolo Fiorini, und Pietro Valdastri. Autonomy in surgical robotics. *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*, 4:651–679, 2021.
- Georg Bartels, Ingo Kresse, und Michael Beetz. Constraint-based movement representation grounded in geometric features. In *2013 13th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, pages 547–554. IEEE, 2013.
- Charles E Billings und D D Woods. Concerns about adaptive automation in aviation domains. In *Human performance in automated systems: Current research and trends*, pages 24—29. Erlbaum, 1994.
- Andreas Birk und Max Pfungsthorn. A HMI supporting adjustable autonomy of rescue robots. In *Robot Soccer World Cup*, pages 255–266. Springer, 2006.
- Stuart A Bowyer, Brian L Davies, und Ferdinando Rodriguez y Baena. Active constraints/virtual fixtures: A survey. *IEEE Transactions on Robotics*, 30(1): 138–157, 2013.
- Yue Chang, Zecheng Du, und Jie Sun. Dangerous behaviors detection based on deep learning. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Artificial Intelligence and Pattern Recognition*, pages 24–27, 2019.
- Caitlyn Clabaugh und Maja Matarić. Escaping oz: Autonomy in socially assistive robotics. *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*, 2:33–61, 2019.
- Ewart de Visser und Raja Parasuraman. Adaptive aiding of human-robot teaming: Effects of imperfect automation on performance, trust, and workload. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 5(2):209–231, 2011.

- John V Draper. Teleoperators for advanced manufacturing: Applications and human factors challenges. *International Journal of Human Factors in Manufacturing*, 5(1): 53–85, 1995.
- Mica R Endsley und Daniel J Garland. *Situation awareness analysis and measurement*. CRC Press, 2000.
- Mica R Endsley, Raja Parasuraman, und M Mouloua. Automation and situation awareness in automation and human performance: Theories and applications, pages 163 – 181, 1996.
- Philipp Ertle, Holger Voos, und Dirk Söffker. Utilizing dynamic hazard knowledge for risk sensitive action planning of autonomous robots. In *2012 IEEE International Symposium on Robotic and Sensors Environments Proceedings*, pages 162–167. IEEE, 2012.
- Ulrike Felt. Responsible research and innovation. *Handbook of genomics, health and society*, 2018.
- Caelan Reed Garrett, Chris Paxton, Tomás Lozano-Pérez, Leslie Pack Kaelbling, und Dieter Fox. Online replanning in belief space for partially observable task and motion problems. In *2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 5678–5684. IEEE, 2020.
- Anna-Lena Gölz. *Robotik in der Chirurgie-Ein reziproker Systemansatz*. PhD thesis, Hochschule für Gestaltung Schwäbisch Gmünd, 2020.
- Deepak E Gopinath und Brenna D Argall. Active intent disambiguation for shared control robots. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 28(6):1497–1506, 2020.
- Birgit Graf. Assistenzroboter für die Pflege. *Zeitschrift für Gerontologie und Geriatrie*, 53(7):608–614, 2020.
- Sami Haddadin. *Towards safe robots: approaching Asimov’s 1st law*, volume 90. Springer, 2013.

- Tamás Haidegger. Autonomy for surgical robots: Concepts and paradigms. *IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics*, 1(2):65–76, 2019.
- Marc Hassenzahl. Experience design: Technology for all the right reasons. *Synthesis lectures on human-centered informatics*, 3(1):1–95, 2010.
- Marc Hassenzahl, Kai Eckoldt, Sarah Diefenbach, Matthias Laschke, Eva Len, und Joonhwan Kim. Designing moments of meaning and pleasure. experience design and happiness. *International journal of design*, 7(3), 2013.
- Alberto Hata, Rafia Inam, Klaus Raizer, Shaolei Wang, und Enyu Cao. AI-based safety analysis for collaborative mobile robots. In *2019 24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, pages 1722–1729. IEEE, 2019.
- Gerd Hirzinger, Bernhard Brunner, Johannes Dietrich, und Johann Heindl. Rotex-the first remotely controlled robot in space. In *Proceedings of the 1994 IEEE international conference on robotics and automation*, pages 2604–2611. IEEE, 1994.
- Gerd Hirzinger, Klaus Landzettel, Detlef Reintsema, Carsten Preusche, Alin Albu-Schäffer, Bernd Rebele, und Matthias Turk. Rokviss-robotics component verification on ISS. In *Proc. 8th Int. Symp. Artif. Intell. Robot. Autom. Space (iSAIRAS)(Munich 2005) p. Session2B*, 2005.
- Aidan Hogan, Eva Blomqvist, Michael Cochez, Claudia D’amato, Gerard De Melo, Claudio Gutierrez, Sabrina Kirrane, José Emilio Labra Gayo, Roberto Navigli, Sebastian Neumaier, et al. Knowledge graphs. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 54(4):1–37, 2021.
- Siddarth Jain und Brenna Argall. Recursive bayesian human intent recognition in shared-control robotics. In *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pages 3905–3912. IEEE, 2018.
- Sein Jang, Lkhagvadorj Battulga, und Aziz Nasridinov. Detection of dangerous situations using deep learning model with relational inference. *Journal of Multimedia Information System*, 7(3):205–214, 2020.

- Meng Jiang. Improving situational awareness with collective artificial intelligence over knowledge graphs. In *Artificial Intelligence and Machine Learning for Multi-Domain Operations Applications II*, volume 11413, page 114130J. International Society for Optics and Photonics, 2020.
- Holger Klapperich, Alarith Uhde, und Marc Hassenzahl. Designing everyday automation with well-being in mind. *Personal and Ubiquitous Computing*, 24(6):763–779, 2020.
- Julian Klodmann, Christopher Schlenk, Szilvia Borsdorf, Roland Unterhinninghofen, Alin Albu-Schäffer, und Gerd Hirzinger. Robotische Assistenzsysteme für die Chirurgie. *Der Chirurg*, 91(7):533–543, 2020.
- Lars Kunze, Nick Hawes, Tom Duckett, Marc Hanheide, und Tomáš Krajník. Artificial intelligence for long-term robot autonomy: A survey. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 3(4):4023–4030, 2018.
- Tilman Laubert, Hamed Esnaashari, Paul Auerswald, Anna Höfer, Michael Thomaschewski, Hans-Peter Bruch, Tobias Keck, und Claudia Benecke. Conception of the Lübeck Toolbox curriculum for basic minimally invasive surgery skills. *Langenbeck’s Archives of Surgery*, 403(2):271–278, 2018.
- John D Lee und Katrina A See. Trust in automation: Designing for appropriate reliance. *Human factors*, 46(1):50–80, 2004.
- Daniel Sebastian Leidner. *Cognitive reasoning for compliant robot manipulation*. Springer, 2019.
- Eva Lenz, Marc Hassenzahl, und Sarah Diefenbach. How performing an activity makes meaning. In *Extended Abstracts of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pages 1–6, 2019.
- C Miller, Michael Pelican, und Robert Goldman. ‘Tasking’ interfaces for flexible interaction with automation: Keeping the operator in control. In *Proceedings of the Conference on Human Interaction with Complex Systems*, pages 123–128. HICS Urbana-Champaign, IL, 2000.

- Christopher A Miller und Raja Parasuraman. Designing for flexible interaction between humans and automation: Delegation interfaces for supervisory control. *Human factors*, 49(1):57–75, 2007.
- Salama A Mostafa, Mohd Sharifuddin Ahmad, Azhana Ahmad, Muthukkaruppan An-namalai, und Saraswathy Shamini Gunasekaran. An autonomy viability assessment matrix for agent-based autonomous systems. In *2015 International Symposium on Agents, Multi-Agent Systems and Robotics (ISAMSR)*, pages 53–58. IEEE, 2015.
- Salama A Mostafa, Mohd Sharifuddin Ahmad, und Aida Mustapha. Adjustable autonomy: a systematic literature review. *Artificial Intelligence Review*, 51(2): 149–186, 2019.
- Raja Parasuraman, Thomas B Sheridan, und Christopher D Wickens. A model for types and levels of human interaction with automation. *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics-Part A: Systems and Humans*, 30(3):286–297, 2000.
- Raja Parasuraman, Thomas B Sheridan, und Christopher D Wickens. Situation awareness, mental workload, and trust in automation: Viable, empirically supported cognitive engineering constructs. *Journal of cognitive engineering and decision making*, 2(2):140–160, 2008.
- Thomas M Roehr und Yuping Shi. Using a self-confidence measure for a system-initiated switch between autonomy modes. In *Proceedings of the 10th international symposium on artificial intelligence, robotics and automation in space, Sapporo, Japan*, pages 507–514, 2010.
- Richard M Ryan und Edward L Deci. Self-determination theory and the facilitation of intrinsic motivation, social development, and well-being. *American psychologist*, 55(1):68, 2000.
- Paul Schermerhorn und Matthias Scheutz. Dynamic robot autonomy: Investigating the effects of robot decision-making in a human-robot team task. In *Proceedings of the 2009 international conference on multimodal interfaces*, pages 63–70, 2009.
- Peter Schmaus, Daniel Leidner, Thomas Krüger, Andre Schiele, Benedikt Pleintinger, Ralph Bayer, und Neal Y Lii. Preliminary insights from the meteron supvis justin

- space-robotics experiment. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 3(4):3836–3843, 2018.
- Rene Schomberg. A vision of responsible research and innovation. *Responsible Innovation: Managing the Responsible Emergence of Science and Innovation in Society*, pages 51–74, 2013.
- Reid Simmons, David Apfelbaum, Dieter Fox, Robert P Goldman, Karen Zita Haigh, David J Musliner, Michael Pelican, und Sebastian Thrun. Coordinated deployment of multiple, heterogeneous robots. In *Proceedings. 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2000)(Cat. No. 00CH37113)*, volume 3, pages 2254–2260. IEEE, 2000.
- Bernhard Weber. *Context inquiry on robot-assisted minimally-invasive surgery*. Interner DLR Bericht, 2013.
- Bernhard Weber, Anja Hellings, Andreas Tobergte, und Martin Lohmann. *Human performance and workload evaluation of input modalities for telesurgery*. GfA Press, 2013.
- Bernhard Weber, Ribin Balachandran, Cornelia Riecke, Freek Stulp, und Martin Stelzer. Teleoperating robots from the international space station: Microgravity effects on performance with force feedback. In *2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pages 8144–8150. IEEE, 2019.
- Barbara Weber-Fiori, Benjamin Stähle, Steffen Pfiffner, Benjamin Reiner, Wolfgang Ertel, und Maik H-J Winter. Marvin, ein Assistenzroboter für Menschen mit körperlicher Behinderung im praktischen Einsatz. In *Digitale Transformation von Dienstleistungen im Gesundheitswesen III*, pages 269–285. Springer, 2017.
- Minji Yoon, Bryan Hooi, Kijung Shin, und Christos Faloutsos. Fast and accurate anomaly detection in dynamic graphs with a two-pronged approach. *Proceedings of the 25th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining*, page 647–657, 2019.