

Der Weg zum bewussten Serviceroboter

Sven Behnke

Universität Bonn
Institut für Informatik VI –
Intelligente Systeme und Robotik
Autonome Intelligente Systeme



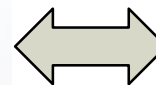
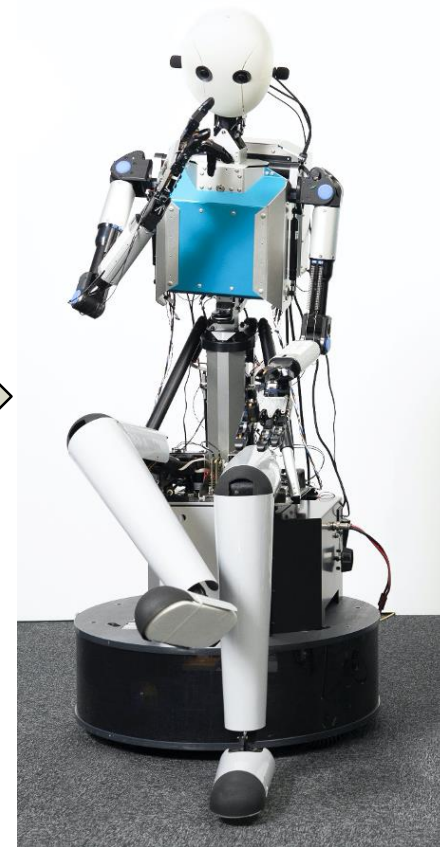
Telepräsenz-Systeme

- Erlauben einem Menschen an einem entfernten Ort präsent zu sein
- Erfassung des entfernten Orts mit Kameras, Mikrofonen, Kraft- und haptischen Sensoren, etc.
- Anzeige der Messungen für den Nutzer
- Erfassung der Bewegungen des Nutzers, Sprache, Mimik, ...
- Übertragung auf den Avatar-Roboter

Bedienstation



Avatar-Roboter



[TELESAR VI, Tachi et al. IJHR 2020]

Telepräsenz-Anwendungen

- Private Besuche
- Geschäftsreisen
- Gesundheitsbereich
- Assistenz
- Arbeit aus der Ferne
- Suche und Rettung
- Weltraum
- Unterwasser
- Automobile
- Vieles mehr ...



[Hung et al. 2023]



[OhmniLabs Ohmni]



[Intuitive Da Vinci]



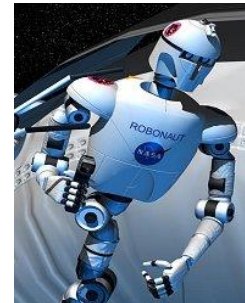
[Pollen Reachy]



[Telexistence]



[KAIST DRC Hubo]



[NASA Robonaut]



[Stanford OceanOneK]



[Fetch]

ANA Avatar XPRIZE-Wettbewerb

- Organisiert durch XPRIZE Foundation
- Gesponsort durch All Nippon Airways (ANA)
- **Ziel:** Entwicklung eines Avatar-Systems, das menschliche Sinne, Handlungen und Präsenz in Echtzeit an einen entfernten Ort übertragen kann
 - Erweiterung der Mensch-Mensch-Kommunikation
 - Übertragung von Fähigkeiten
 - Erkundung gefährlicher oder unzugänglicher Orte
- Jury aus 22 Expert*innen
- Start 03/2018
- **Preisgeld von \$10M**
- 99 Teams angemeldet
09/2019



[XPRIZE]

Finale 11/2022 in Long Beach, CA, USA

- 17 Teams aus 10 Ländern: Führende Forschergruppen und Firmen
- Mission auf entferntem Planet, 10 Aufgaben in gegebener Reihenfolge
- Qualifikationstag, zwei Testtage mit Reduzierung der Teams
➔ Zuverlässigkeit des Systems erforderlich



Inbioidroid Avatar-Hubo AvaDynamics SNU UNIST AlterEgo iCub i-Botics Cyberselves Tangible NimbRo Northeastern AVATRINA Last Mile Pollen Janus Dragon Tree Labs

Aufgaben

- Drei Bereiche:
 - Kommunikation
 - Exploration
 - Fertigkeiten
- Beinhalten Gewicht schätzen und Rauheit fühlen
- Je ein Punkt
- Nutzererfahrung: drei Punkte
- Kommunikationspartner-Erfahrung: zwei Punkte
- Ausführungszeit



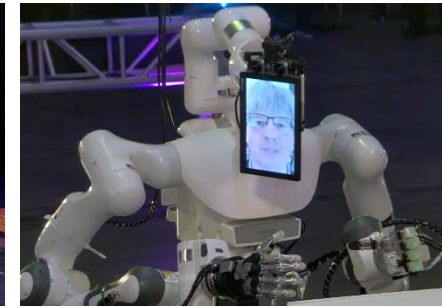
Start



1. Fortbewegung



2. Einführung



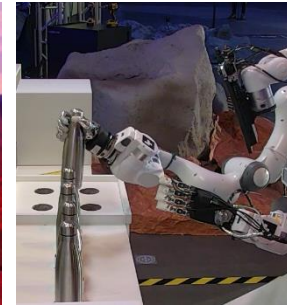
3. Bestätigung



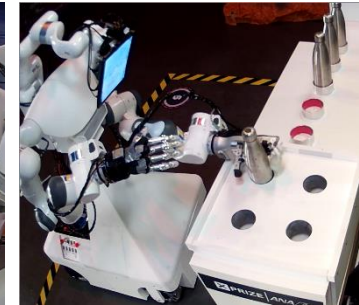
4. Schalter



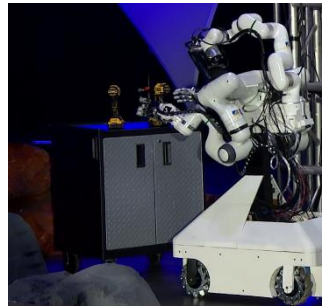
5. Fortbewegung



6. Gewicht schätzen



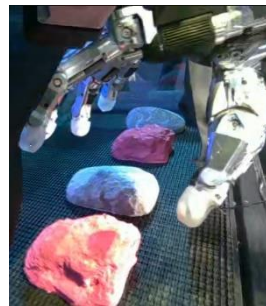
7: Platzierung



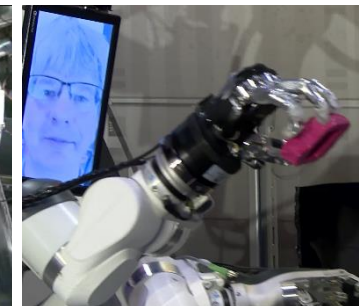
8. Enge Passage



9: Akkuschauber



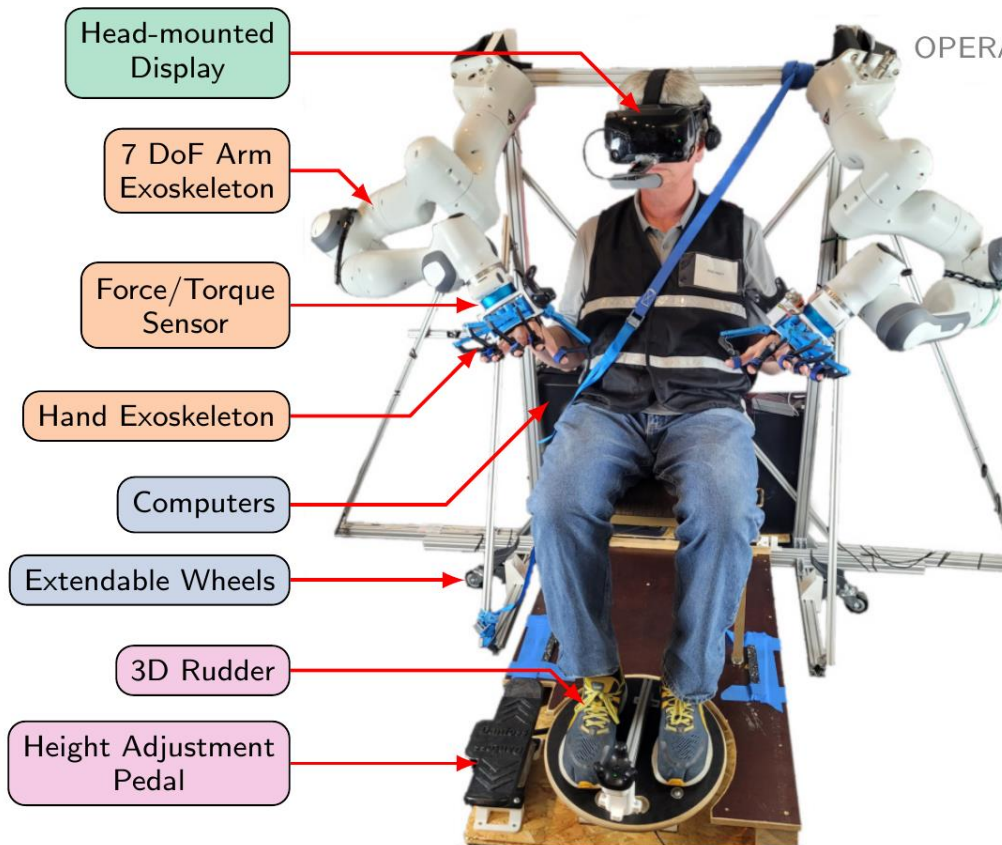
10. Rauheit fühlen



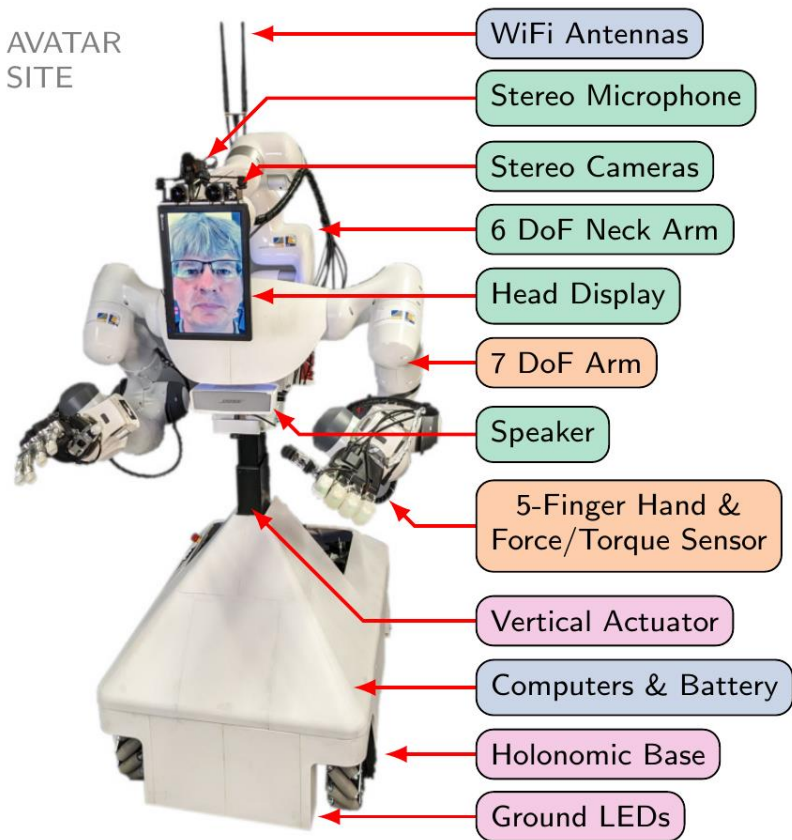
Ende

[XPRIZE]

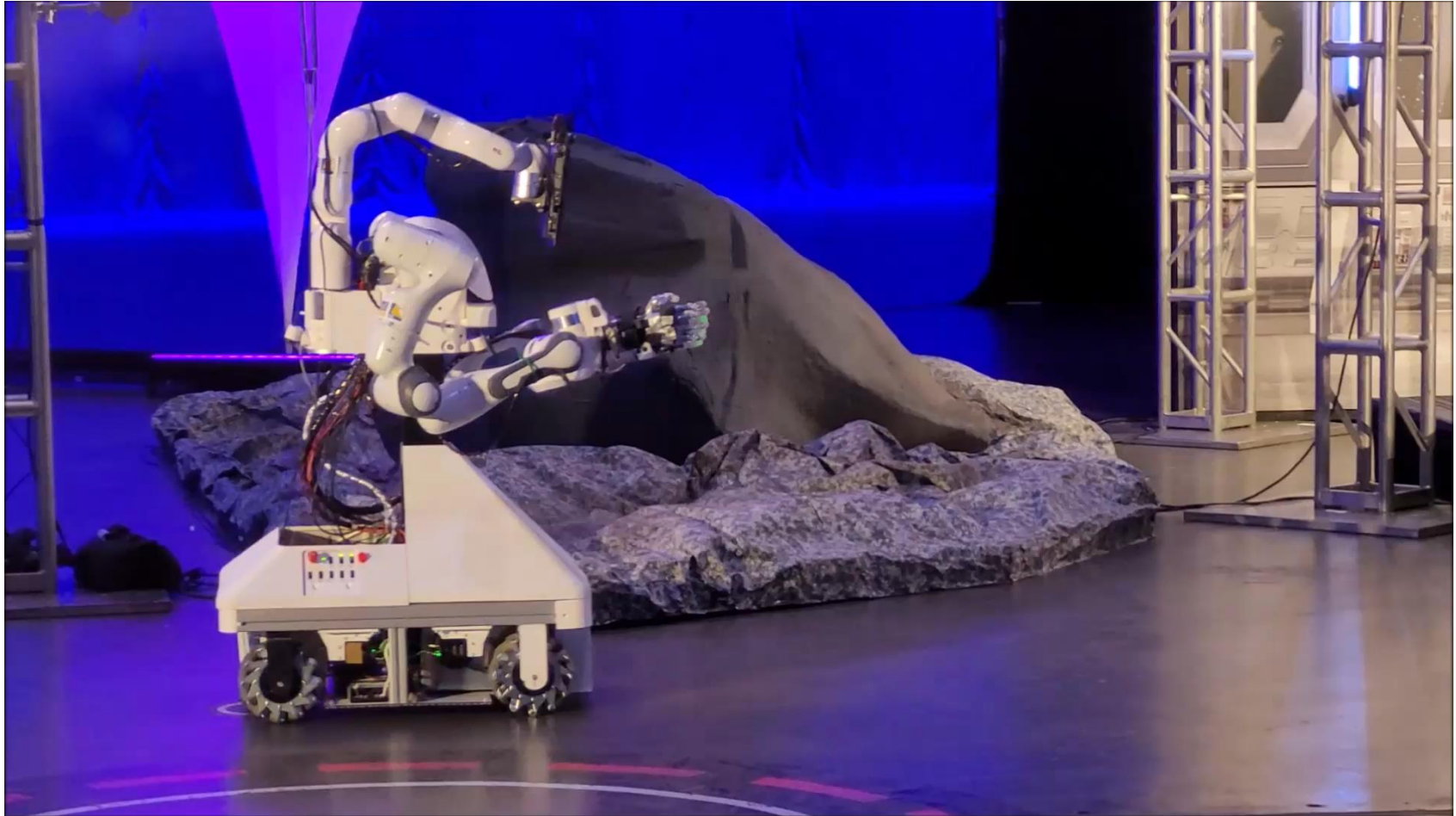
NimbRo Avatar-System



AVATAR SITE

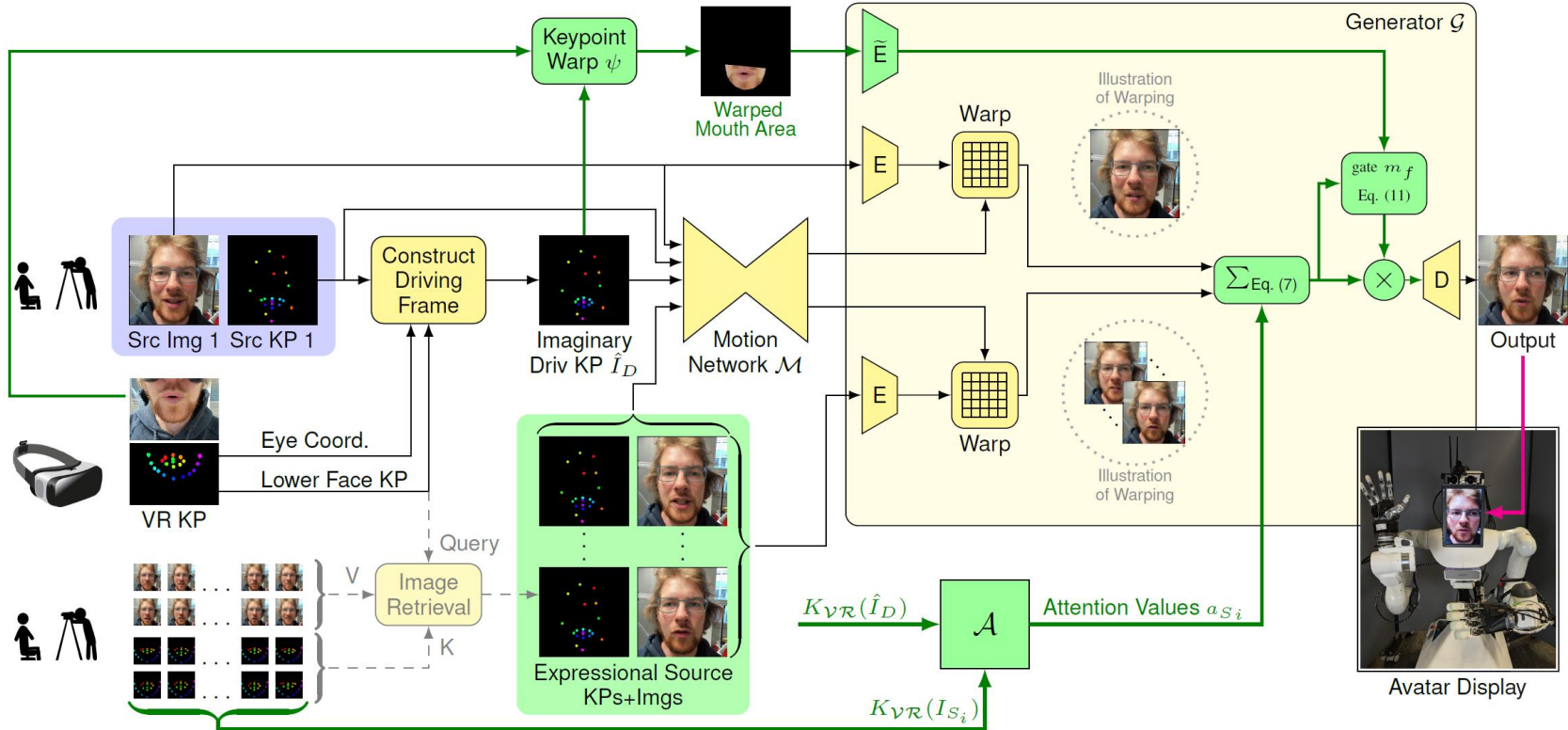


Finale Erster Testtag



Gesichtsanimation

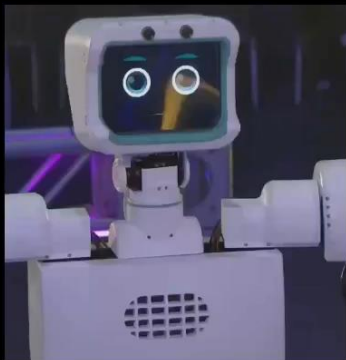
- Aufnahme des Nutzers vor Aufsetzen der Datenbrille
- Live-Animation anhand Video von Augen in Datenbrille und Mundregion



[Rochow et al. IROS 2023]

Gesichtsanimation im Vergleich

Team UNIST



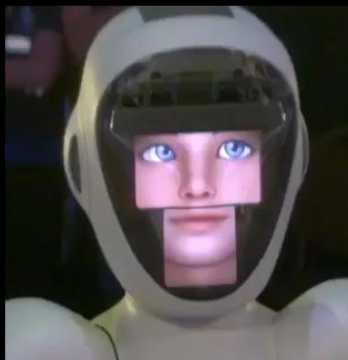
Ours (NimbRo)



Team AVATRINA [13]



Source: Official XPRIZE Avatar live stream



Northeastern [12]

i-BOTICS

Pollen Robotics

Finale Zweiter Testtag



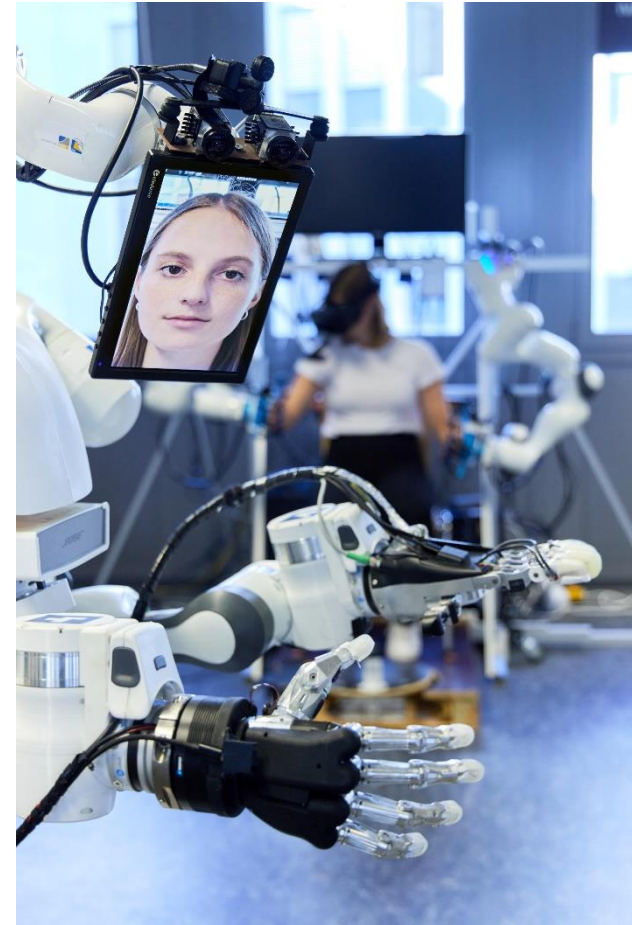
Finale Ergebnisse

Rank	Team name	Time	Task score	Judged score	Total
1	NimbRo (DE)	5:50	10	5	15
2	Pollen Robotics (FR)	10:50	10	5	15
3	Team Northeastern (US)	21:09	10	4.5	14.5
4	AVATRINA (US)	24:47	10	4.5	14.5
5	i-Botics (NL)	25:00	9	5	14
6	Team UNIST (KR)	25:00	9	4.5	13.5
7	Inbiodroid (MX)	25:00	8	5	13
8	Team SNU (KR)	25:00	8	4.5	12.5
9	AlterEgo (IT)	25:00	8	4.5	12.5
10	Dragon Tree Labs (SG)	25:00	7	4	11
11	Avatar Hubo (US)	25:00	6	3.5	9.5
12	Last Mile (JP)	25:00	5	4	9



Motivation für Autonomie

- Längere Latenzen erfordern indirektere Kontrolle
 - Autonome Fähigkeiten, wie Greifen eines Objekts oder Navigieren zu einem Wegpunkt
 - Geteilte Autonomie, bei welcher der Nutzer das Verhalten auf hoher Ebene kontrolliert und die Autonomie die Details auf niedriger Ebene ausfüllt (Reiter & Pferd-Metapher, Flemisch 2003)
- Der Bediener ist nicht immer verfügbar
 - 1:1-Kontrolle oft zu kostspielig
 - ➔ ein Bediener muss viele Roboter beaufsichtigen
 - Probleme mit der Privatsphäre und Verpflichtetheit gegenüber dem Bediener
- KI: Verstehen von Intelligenz durch Schaffung intelligenter Artefakte

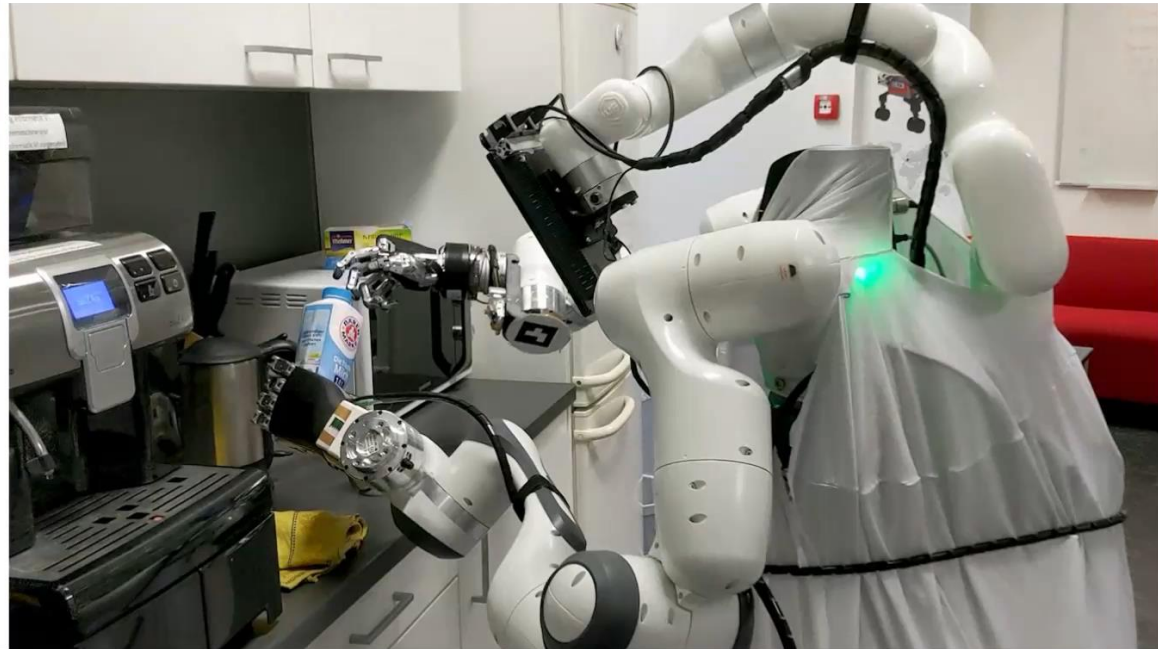


[Foto: Volker Lannert]

Menschliche Bediener sind unerreich



- Zahlreiche Aufgaben durch Teleoperation lösbar
 - Neue Situationen bewältigen, neue Aufgaben lernen
 - Erkennen und Behandeln von Fehlern
- Viel besser als heutige autonome Roboter



2x

Kognitives System des Menschen

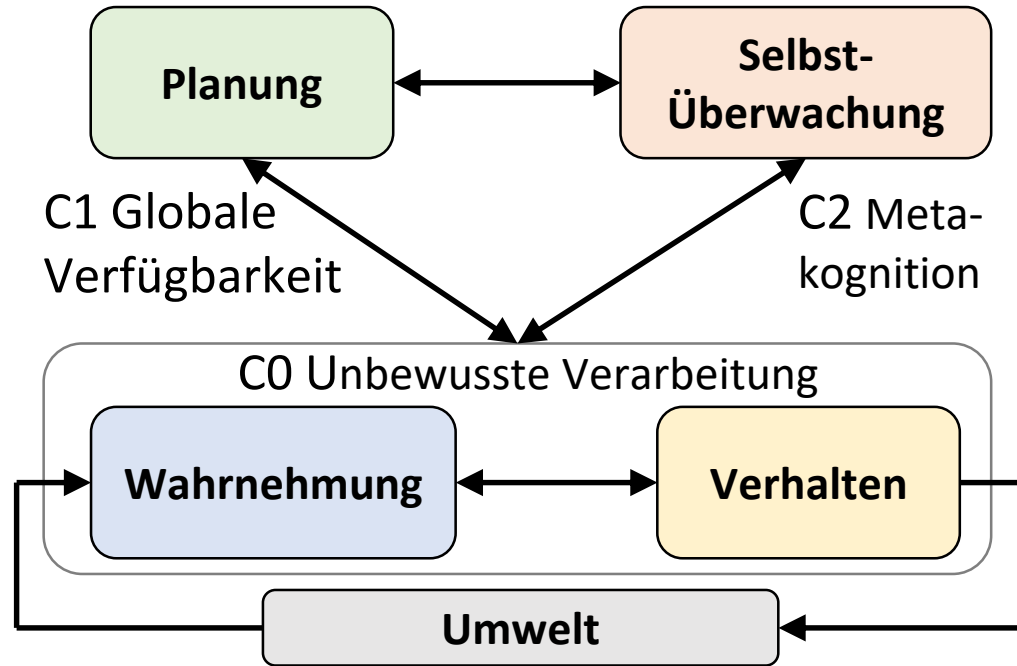
- Die kognitive Architektur des Menschen hat sich so entwickelt, dass wir mit sich verändernder Umwelt klarkommen und uns selbst überwachen können.

System 2

- Langsam, seriell
- Flexibel
- **Bewusst**

System 1

- Schnell, parallel
- Routineaufgaben
- Unbewusst



Kognitive Funktionen nach Kahneman (2011) und Dehaene (2017)

Mein Ziel

- Entwicklung von Methoden zum Erlernen von Wahrnehmung und Planung für Serviceroboter, die über unbewusste Routineaufgaben hinausgehen, indem sie eine **bewusste Verarbeitung** zur Bewältigung neuartiger Situationen und zur Selbstüberwachung einbeziehen



Ansatz

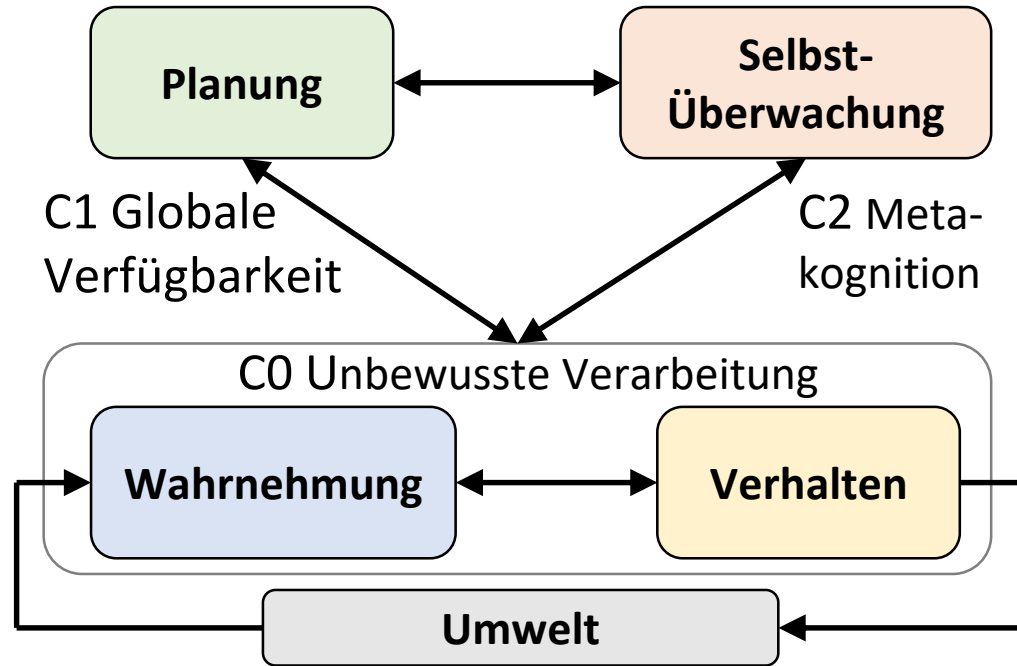
- Orientierung an der menschlichen kognitiven Architektur
- **Bottom-up-Ansatz** sorgt für die **Verankerung** der bewussten Verarbeitung

System 2

- Langsam, seriell
- Flexibel
- Bewusst

System 1

- Schnell, parallel
- Routineaufgaben
- Unbewusst



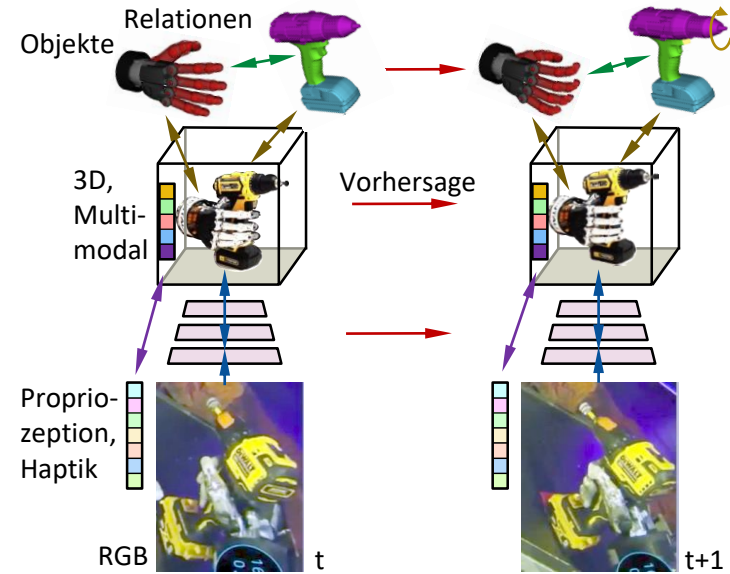
Kognitive Funktionen nach Kahneman (2011) und Dehaene (2017)

Unbewusste Wahrnehmung

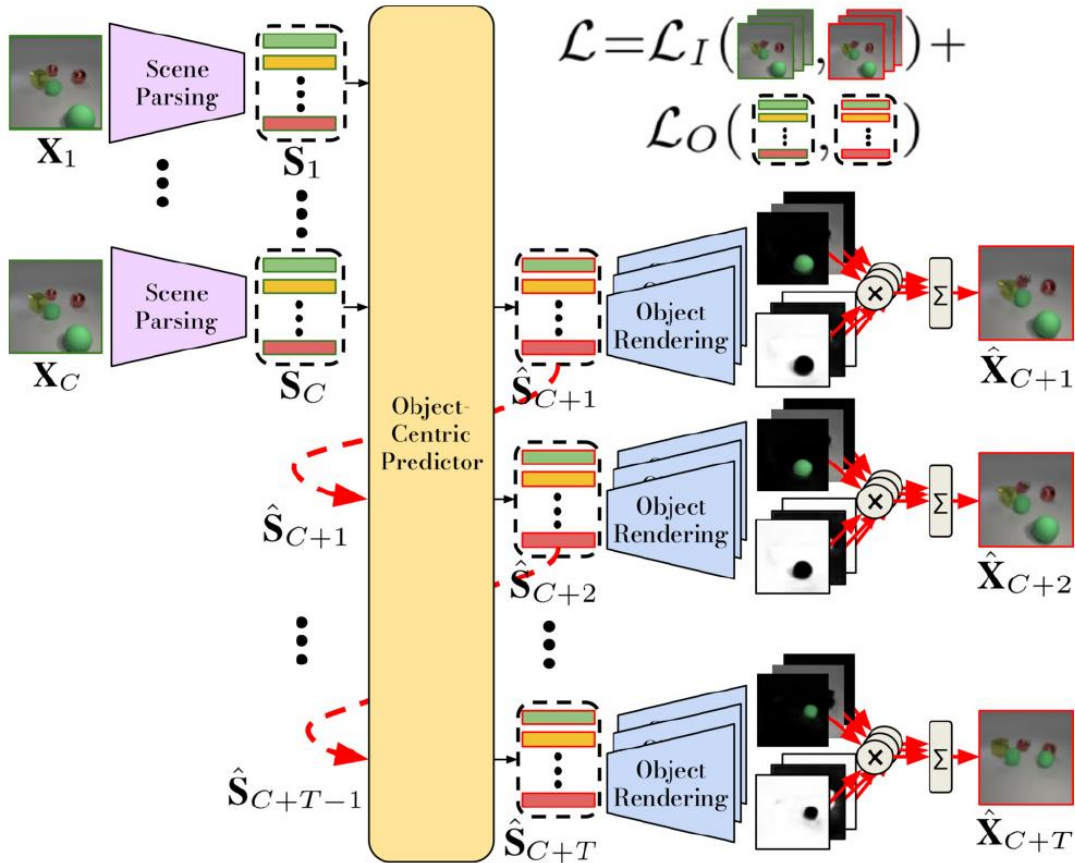
1. Hierarchische Repräsentationen
2. 3D-multimodale Modelle
3. Objekte und deren Relationen
4. Vorhersagen und Tracking

■ Kompositionalität der Szenen

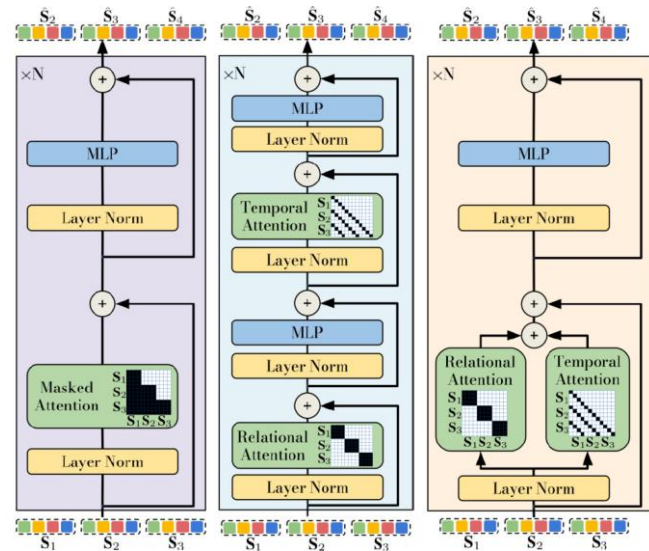
- Objekte und Szenen durch Teile und deren Relationen beschrieben
 - Unendliche Vielfalt durch begrenzte Zahl von Bausteinen
- Ausnutzen von induktiven Bias wie kanonische Koordinaten, 3D projektive Geometrie, Kamerabewegung, Objektrelationen, kompositionale Struktur, hierarchische Kategorisierung, ...



Objektzentrierte Videovorhersage



- Parsen der Szene in Objektslots
- Videosynthese durch Objektbilder und Masken
- Prädiktor entkoppelt zeitliche und relationale Aufmerksamkeit



Objektzentrierte Videovorhersage

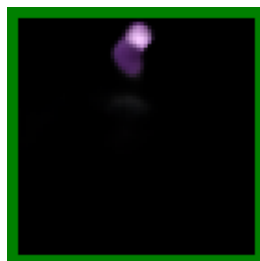
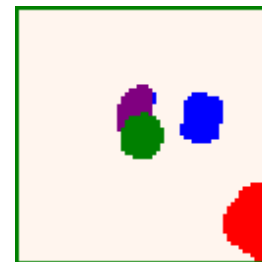
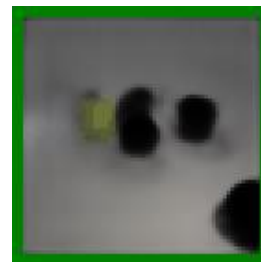
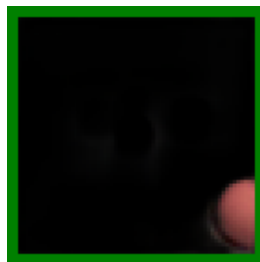
- Objekte werden in verschiedenen Slots repräsentiert
→ Segmentierung der Szene ohne Annotation erlernt

Ground Truth

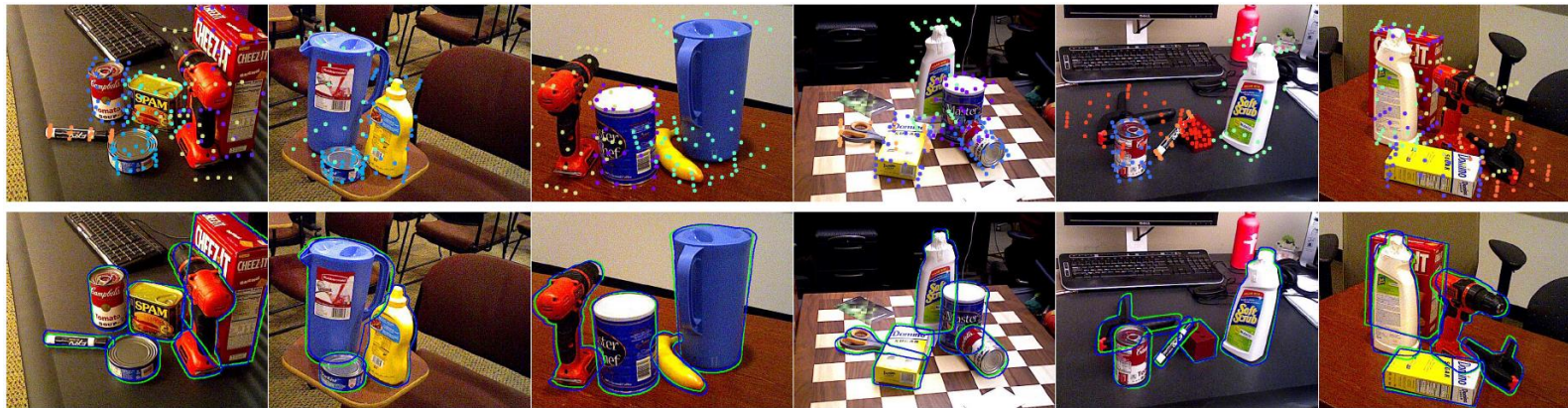
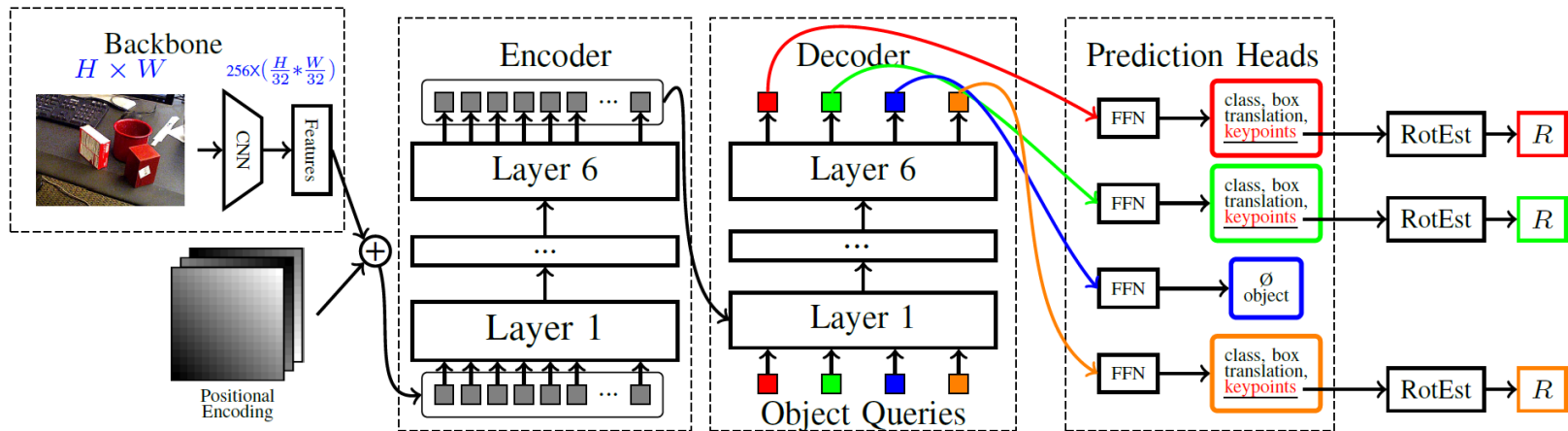
Vorhersage

Objekt-Vorhersagen

Segmentierung



6D-Objektposenschätzung

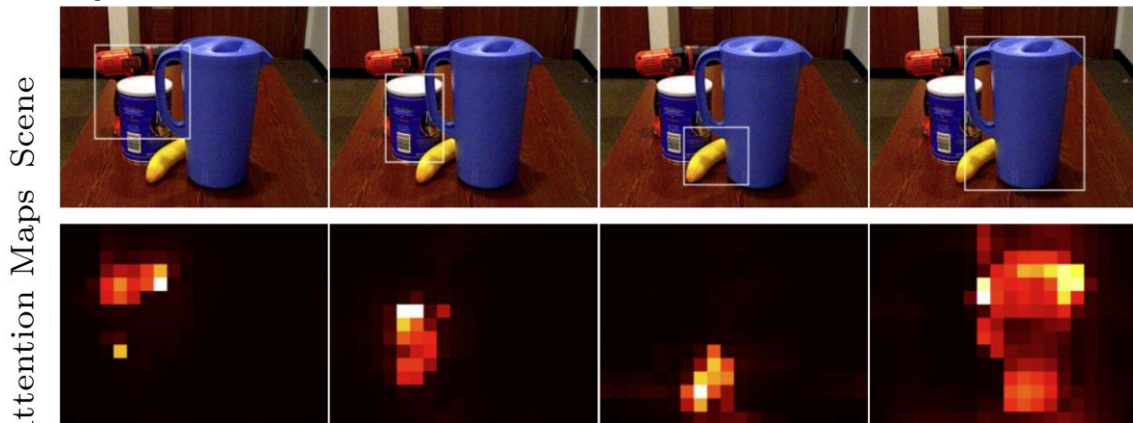


6D-Objektposenschätzung

■ Encoder Selbst-Aufmerksamkeit

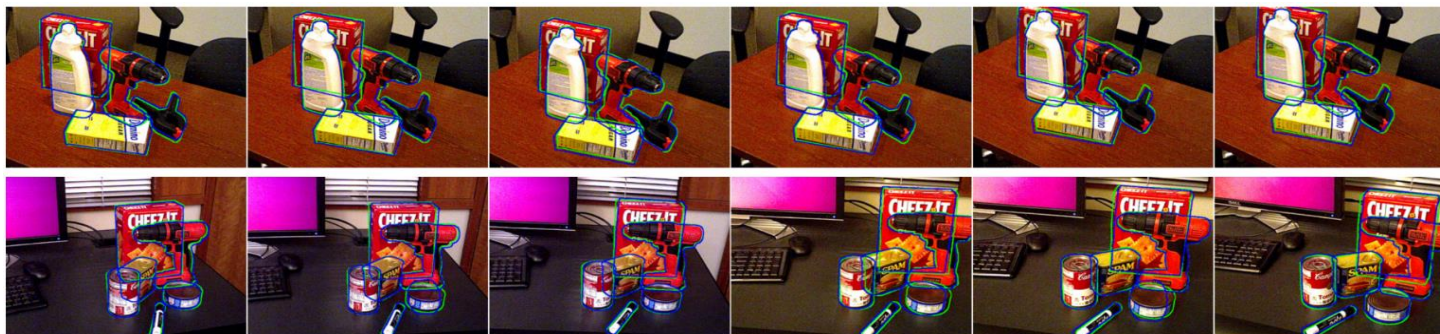
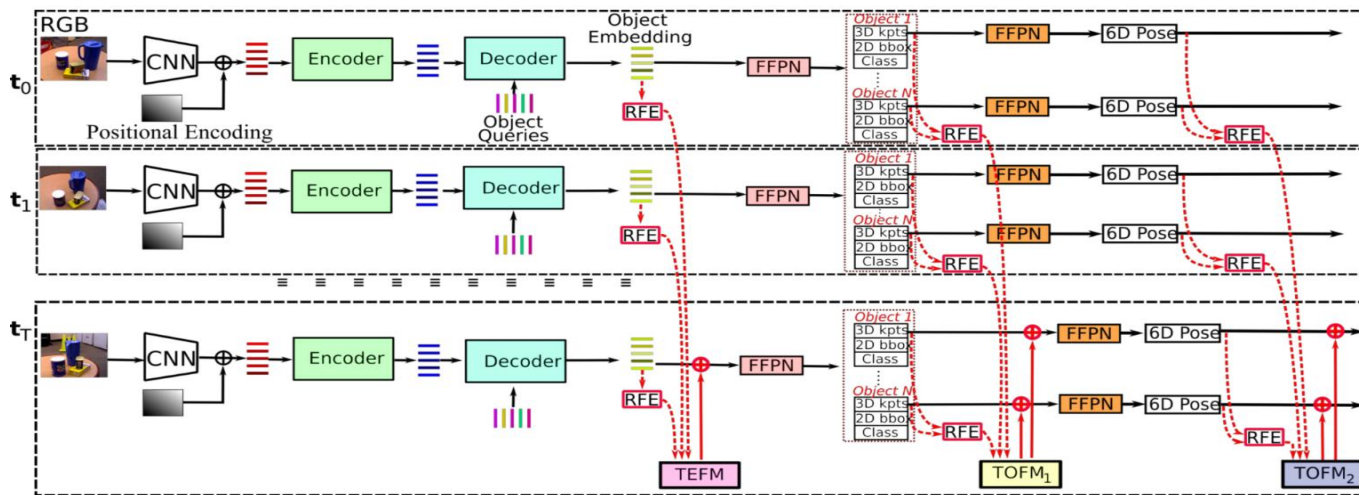


■ Objektdetektionen und Decoder-Kreuzaufmerksamkeit



6D-Objektposenschätzung aus Video

- Zeitliche Fusion von Objekteinbettungen, Objektdeskriptoren und Posen



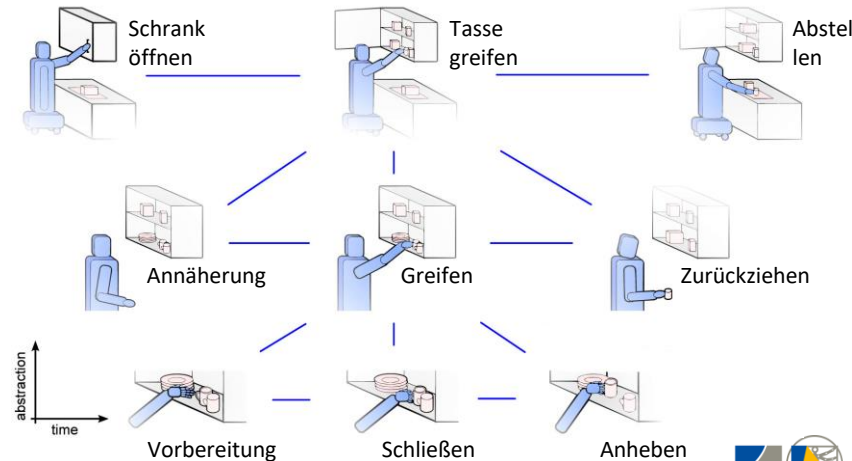
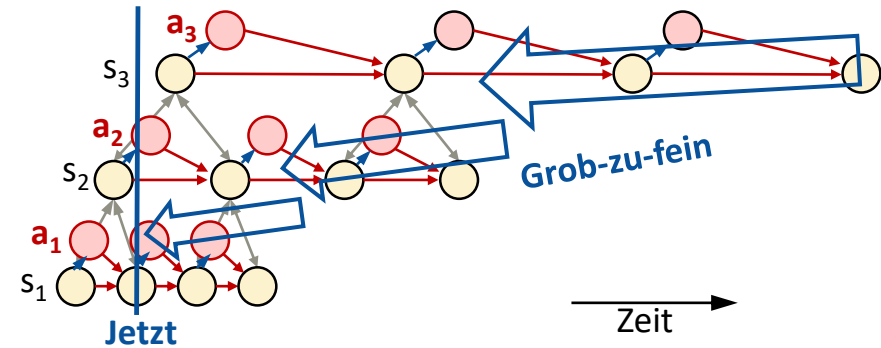
[Periyasamy et al.,
ICRA 2024]

Unbewusste Vorhersage und Kontrolle

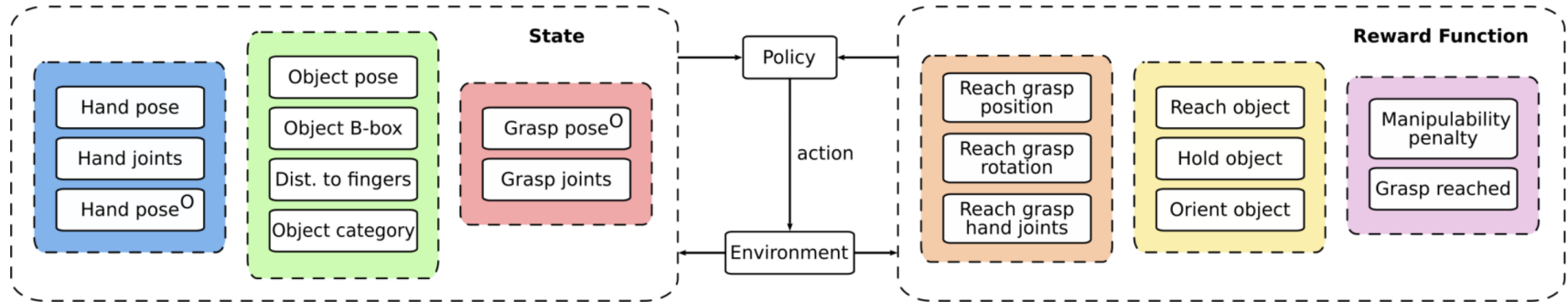
1. Aktionskonditionierte Vorhersagen
2. Kontrolle im Jetzt
3. Wiederverwendbare Fertigkeiten
4. Lernen durch Imitation und Erfahrung

■ Kompositionalität der Aktionen

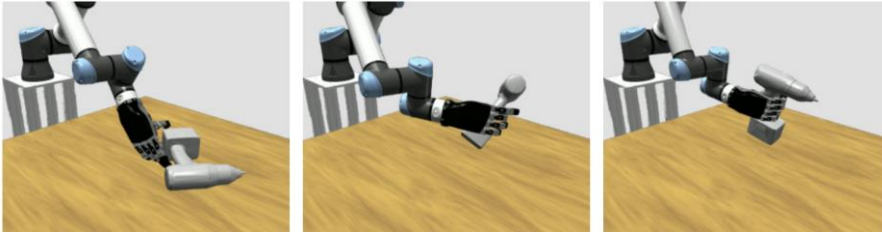
- Verhalten besteht aus Aktionssequenzen, die in Bewegungsprimitive zerlegt werden können
- ## ■ Ausnutzen von induktiven Bias, wie Bindung von Objekten an Variablen, Regeln, Kontrolle im Jetzt ...



Interaktives Funktionales Greifen

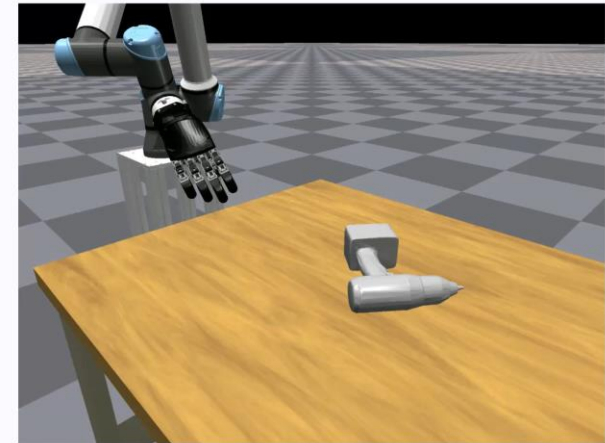


- Dichte Belohnungsfunktion kodiert den gewünschten funktionalen Griff



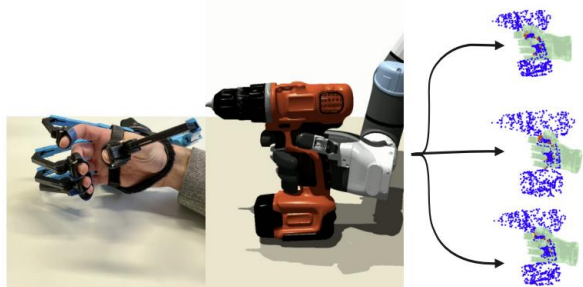
- Lernt Objekte zu repositionieren und zu reorientieren

Experiment: Manipulation of novel drill

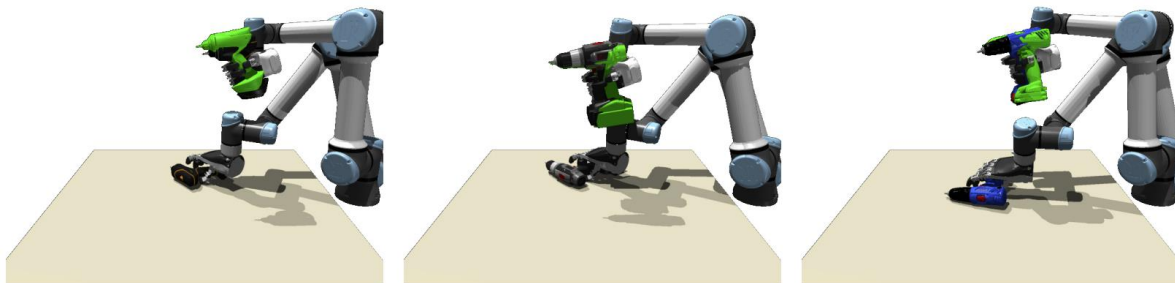


Generalisierung einer Demonstration für Funktionales Greifen

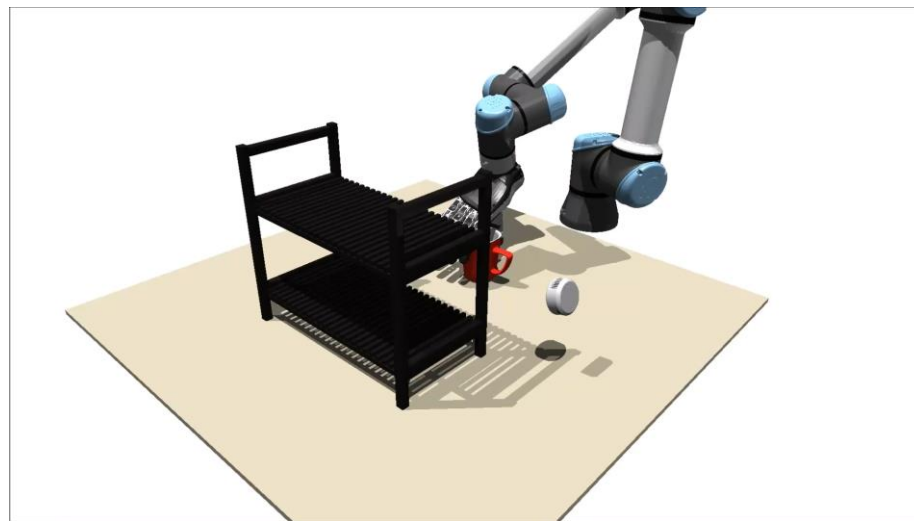
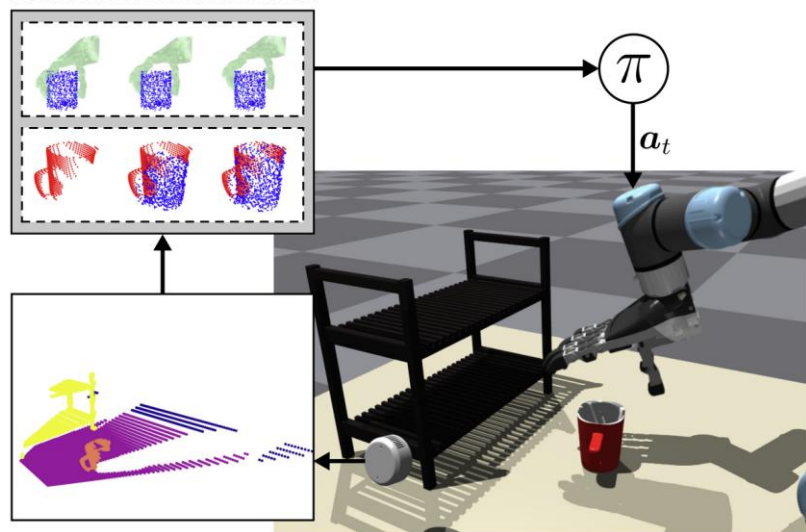
Generalization of a single demonstration



Interactive operation of unseen tools



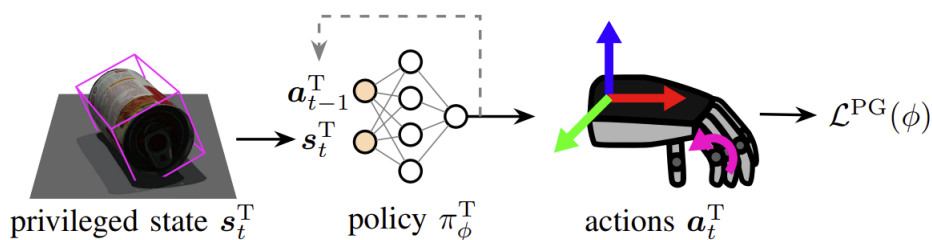
Generalized Demonstration



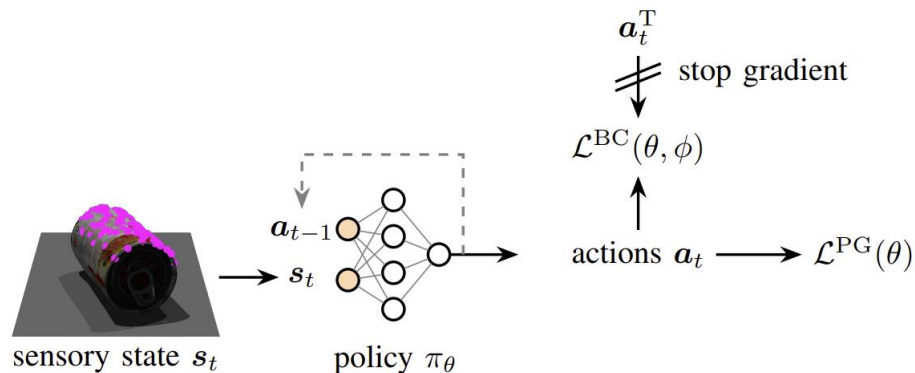
[Mosbach and Behnke CASE 2023, Best Paper Award]

Zero-Shot-Übertragung auf Realsystem durch Basismodell

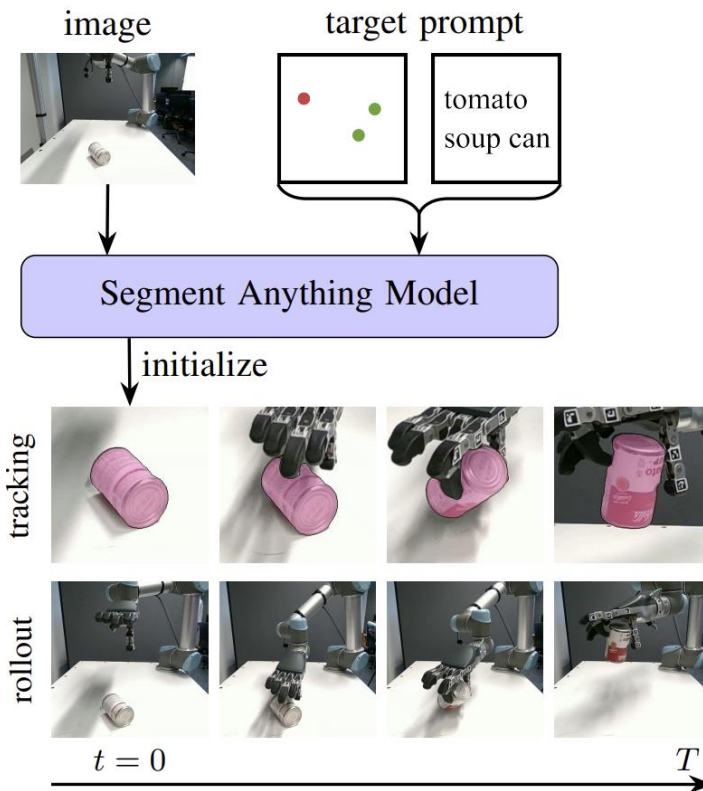
■ Lernen mit Objektpose



■ Lernen mit semantischer Segmentierung

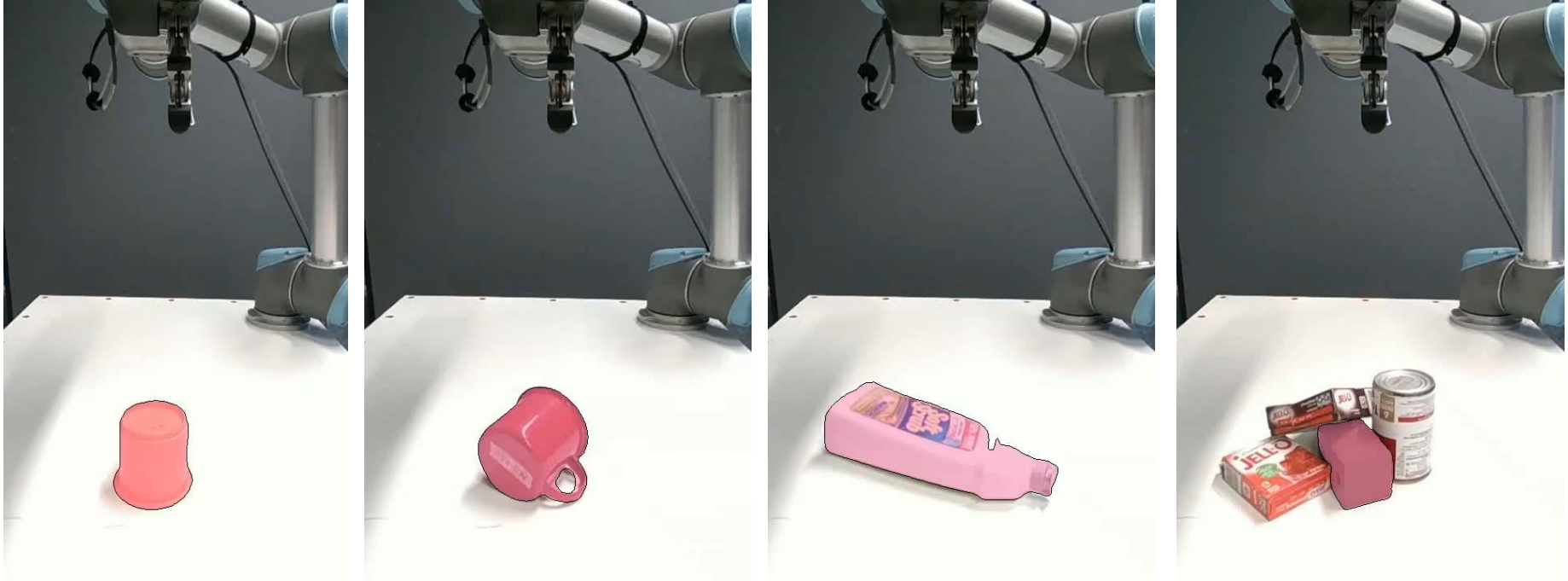


■ Übertragung auf Realsystem



Zero-Shot-Übertragung auf Realsystem durch Basismodell

- Gelernte Policy erhält Sichtbarkeit des Zielobjekts



Bewusste Vorhersagen und Planung

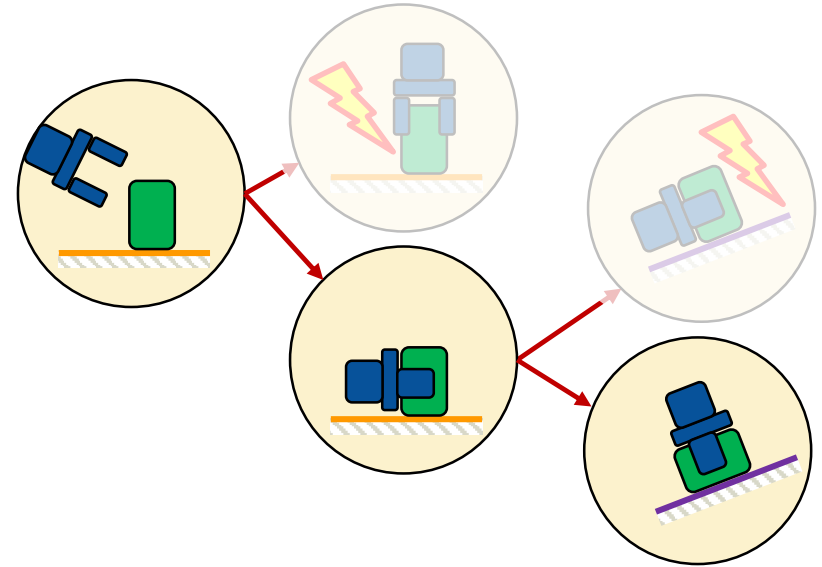
1. Wenige Objekte in Arbeitsgedächtnis
2. Vorhersage des abstrakten Zustands
3. Planung durch Probehandeln
4. Lernen neuer Konzepte

■ Systematische Generalisierung

- Wiederverwendung von Wissen in unendlich vielen neuen Situationen
- Änderung von Objektanzahlen, Konfigurationen, ...

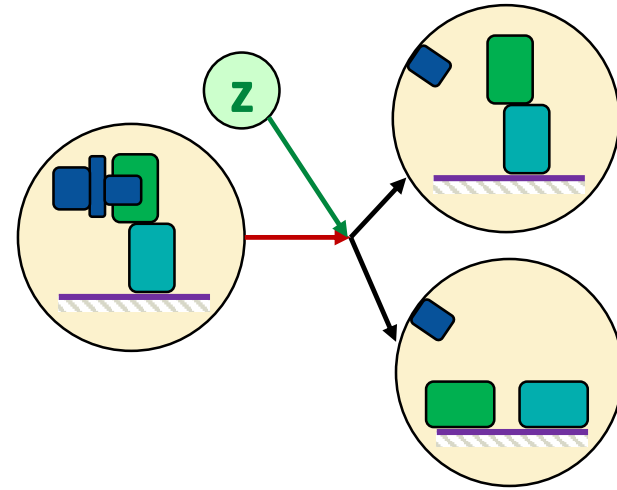
■ Arbeitsgedächtnis als Flaschenhals

- Fokussierung auf wenige Dinge, ignoriere alle anderen die irrelevant sind
- Druck zur Abstraktion: Zusammenfassen von Bausteinen zu höheren Konzepten



Bewusste Selbst-Überwachung

1. Repräsentation von Unsicherheit
2. Vorhersage mehrerer Zukünfte
3. Fehlererkennung und -Behandlung
4. Interaktives Lernen



■ **Selbstaufmerksamkeit**

- Kenntnis der eigenen Fähigkeiten und Grenzen, Gefahr-Wahrnehmung, etc.

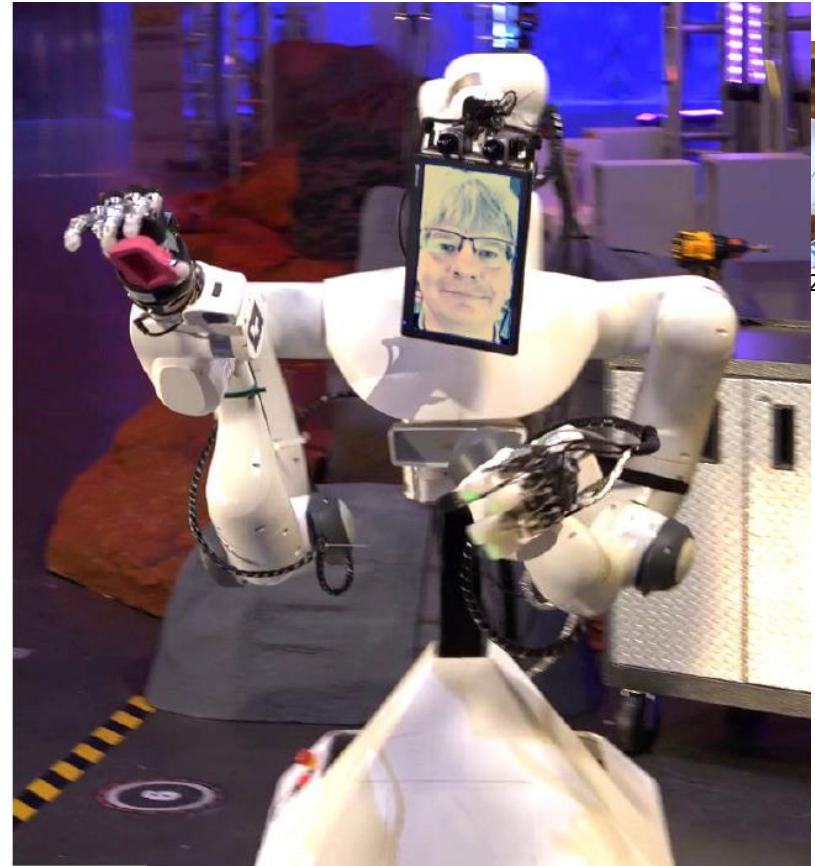
■ Systematische Modellierung und Nutzung von Unsicherheit

- Sammeln weiterer Informationen bei Bedarf
- Vermeidung gefährlicher Situationen
- Erkennung und Behandlung von System 1 - Fehlern

Zusammenfassung

Bewusstsein ist kein Bug, sondern ein Feature!

- Neues Niveau für Serviceroboter
 - **Systematische Generalisierung** von Fertigkeiten und Umgehen mit Veränderung
 - **Selbst-Überwachung:** Informationsbeschaffung bei Bedarf, Risikovermeidung, Fehlererkennung und –Behandlung
- Bewusste Serviceroboter werden Gesellschaft verändern
- Ansatz anwendbar auf zahlreiche Domänen



[XPRIZE]