

Interaktionsstrategien für Tetraplegiker bei der Steuerung von Unterstützungsrobotern

Nina Rudigkeit , Shiva Alsharif, Björn Mindermann, Axel Graeser

Rückkehr in das Berufsleben

Rückkehr an den Arbeitsplatz für Tetraplegikerin



Retrokatalogisierung des Bestandes

Robotersystem übernimmt
alle manuellen Tätigkeiten:

- entnehmen
- 2. System
 - aufschlagen, umblättern
- zurückstellen

Nutzerin gibt über
Spracheingabe die Daten in
Datenbank der SUB
Bremen ein

Voll autonomes Robotersystem?

- Vollständige Erledigung einer Aufgabe
 - 85 % der Aufgaben
 - 15 % unvollständig oder Abbruch
 - Abbruch mehrheitlich durch Probleme in der Bildverarbeitung
 - Beleuchtungsänderungen
 - „Eselohren in Büchern“
 - Bücher mit Wasserschaden
- Teilautonomes System mit Eingriff des Nutzers
 - 95 % der Aufgaben
 - 5 % unvollständig oder Abbruch
- Intuitive Eingriffsmöglichkeit durch Nutzer
 - Problem erkannt – Überlegenes optisches System des Nutzers
 - Stopp für Robotersteuerung
 - Korrigierender Eingriff – z. B. Positionskorrektur
 - Re-Start Robotersteuerung

Human Machine Interface für Tetraplegiker

Hier: „Vollständige Steuerung durch Nutzer“
„Keine Autonomie des Roboters“

generelle/spezielle Anforderungen

Steuerung in 3D

Adaptiv: Signalumfang des Nutzers

Intuitiv: Kommandos und resultierende Roboterbewegung

Robust: unbeabsichtigte Signale, Steuersignale und Umschaltbefehle

Feedback: sichere und effiziente Information des Nutzers

Gut steuerbar: Gleichmäßig, präzise und effizient im 3D-Raum

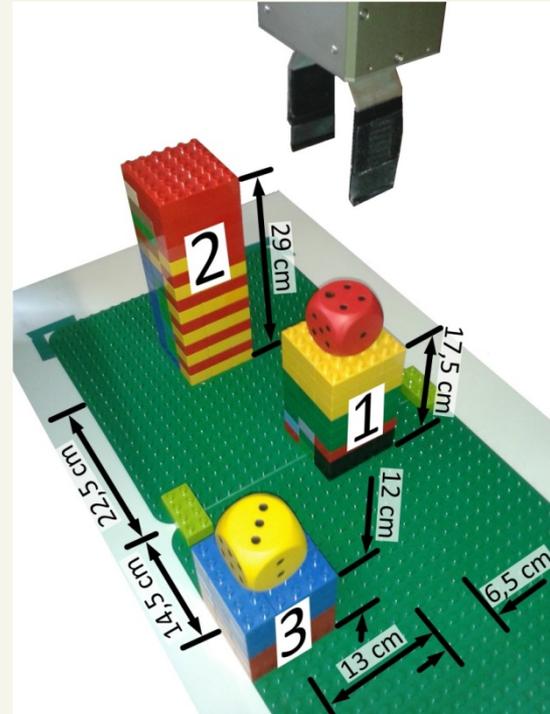
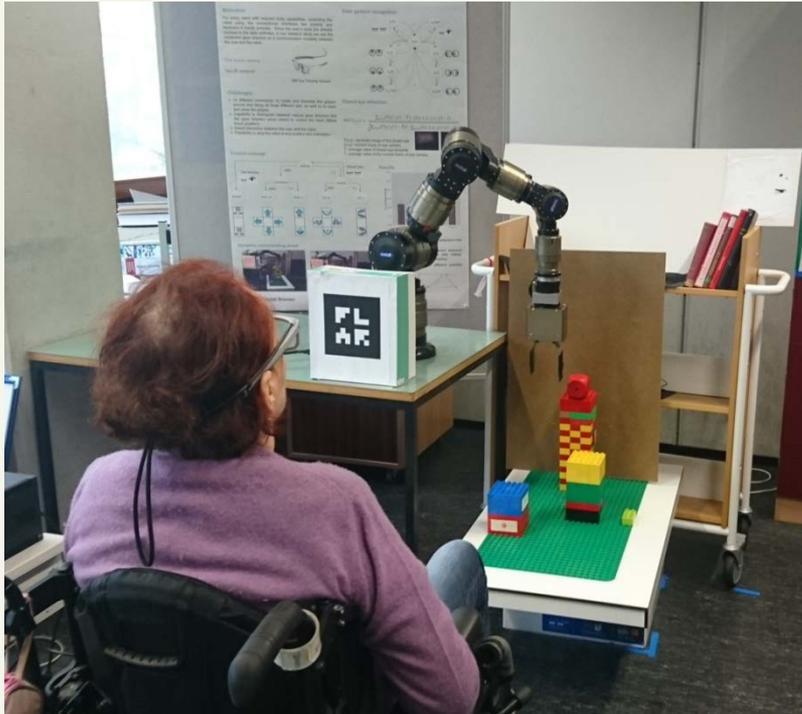
Echtzeitfähig: einfache Algorithmen

Lösungsstrategien

Steuerung des Roboters durch:

- **Kopf-Gesten**
 - IMU (Inertial Measurement Unit)
 - MARG (Magnetic, Angular Rate, and Gravity)
 - AHRS (Attitude Heading Reference System)
- **Augen-Gesten**
 - Eye-Tracker
- **Gehirnaktivität**
 - Brain Computer Interfaces
- **Sprachsteuerung**
 - Hier nicht betrachtet

Evaluation



Evaluation mit

- n-Gesunden
n1 - Frauen
n2 - Männer
- m - Tetraplegiker
BUK in Hamburg
- m = 1
Tetraplegikerin, die
am IAT
arbeitet.

1. Teilaufgabe:

Würfel von Turm Nr. 1 auf
Turm Nr. 2 platzieren.

2. Teilaufgabe:

Würfel von Turm Nr. 3 auf
Turm Nr. 1 platzieren.

Evaluation mit Frau Lena Kredel

- Evaluation unter Laborbedingungen
- Ausführung
 - Weitgehend freies Ausprobieren
 - Fragebogen
 - „Thinking Aloud“
 - Messung Fehlerraten der Umschaltelemente
 - Messung Umschaltzeiten
- Evaluation unter semi-realistischen Bedingungen
 - Flasche aus Kühlschrank greifen und Wasser in ein Glas gießen
 - Bearbeitungszeit
 - Identifikation von Problemen
 - „Thinking Aloud“



Direkte Robotersteuerung durch Kopfbewegungen

Drehratensensoren

- Messen Drehgeschwindigkeit
- Prinzip: Coriolis-Effekt

Beschleunigungssensoren

- Messen Summe aller Beschleunigungen entlang der sensitiven Achse
- Prinzip: Feder-Masse-Prinzip

Magnetfeldsensoren

- Magnetfeldstärke entlang der sensitiven Achse
- Prinzip: z.B. Hall-Effekt

Sensordatenfusion

- Gewichtung der Daten aufgrund ihrer Zuverlässigkeit in einer bestimmten Situation
- Kalman-Filter: Statistisch optimale Schätzung
 - Redundanz der Sensordaten
 - Vorherige Werte



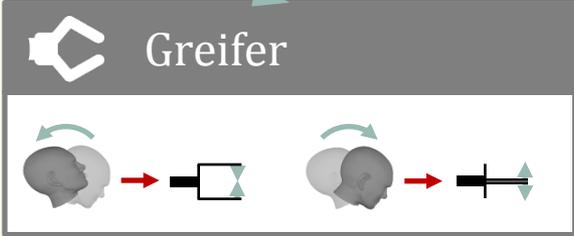
Abbildung der Freiheitsgrade DoF

3-DoF-Kopf; ≥ 6 -DoF-Roboter

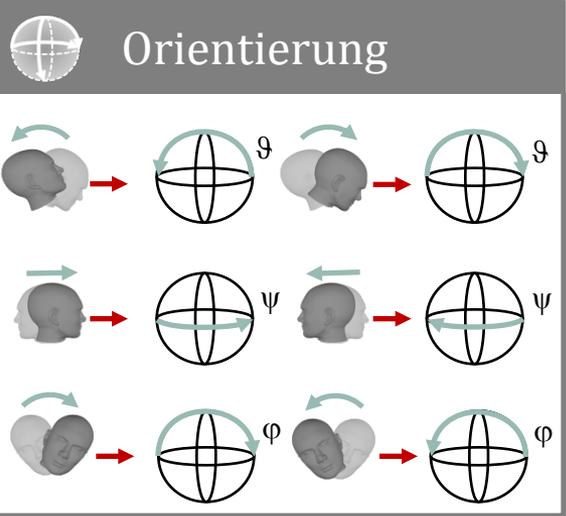
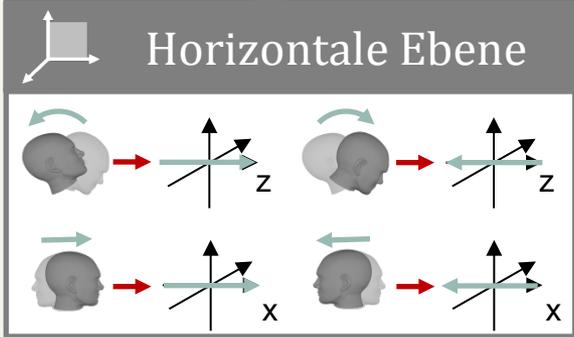
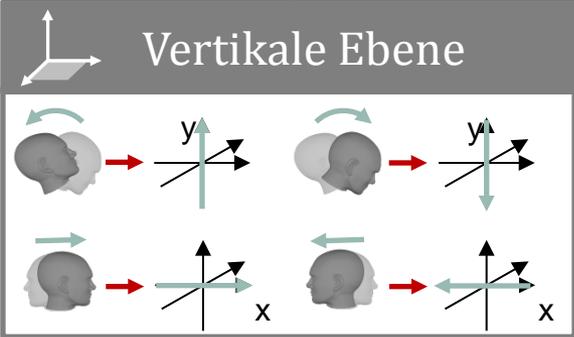
- a) Umschalten zwischen Gruppen (Kopfgeste)
- b) Proportionale Steuerung einschalten (Schieber)
- c) Proportionale Steuerung in der Gruppe (Kopfbewegung)

Roboterarm mit Greifer

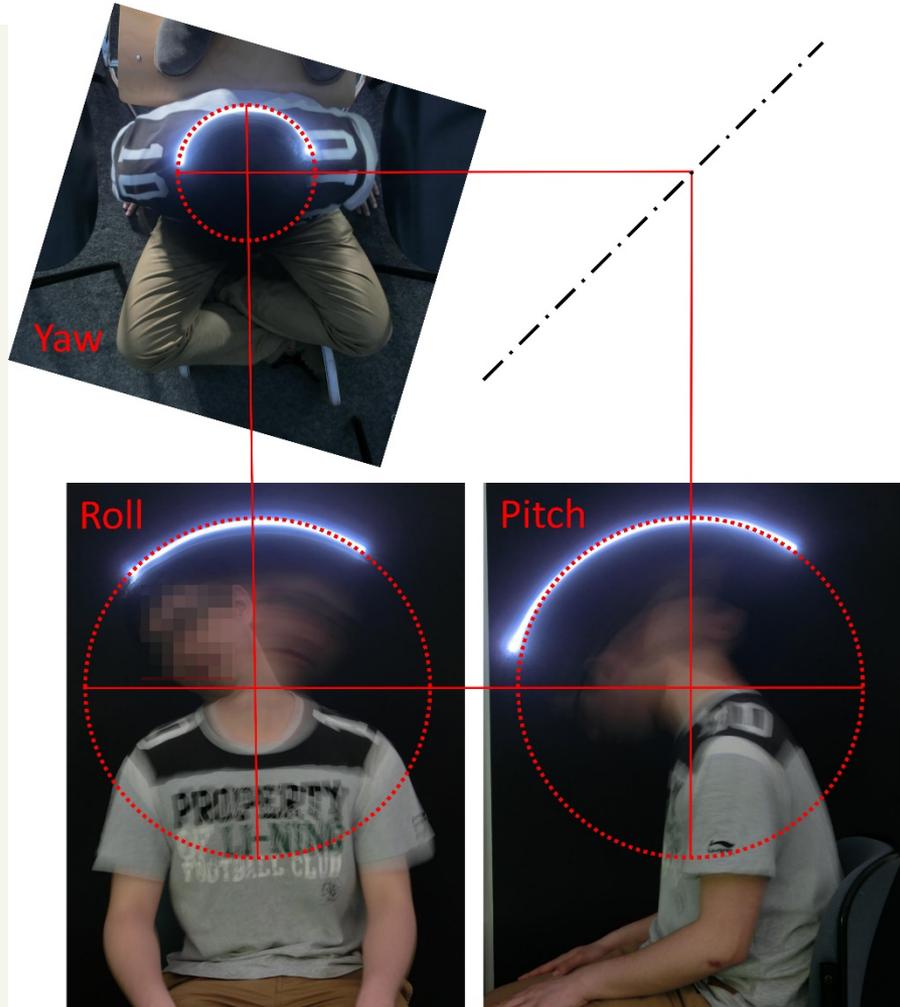
Pose



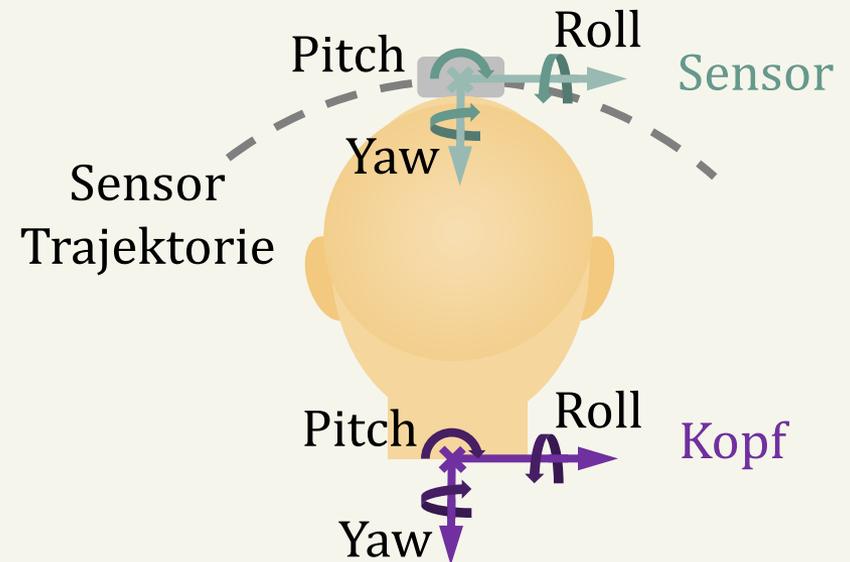
Position



Sensor Positionierung



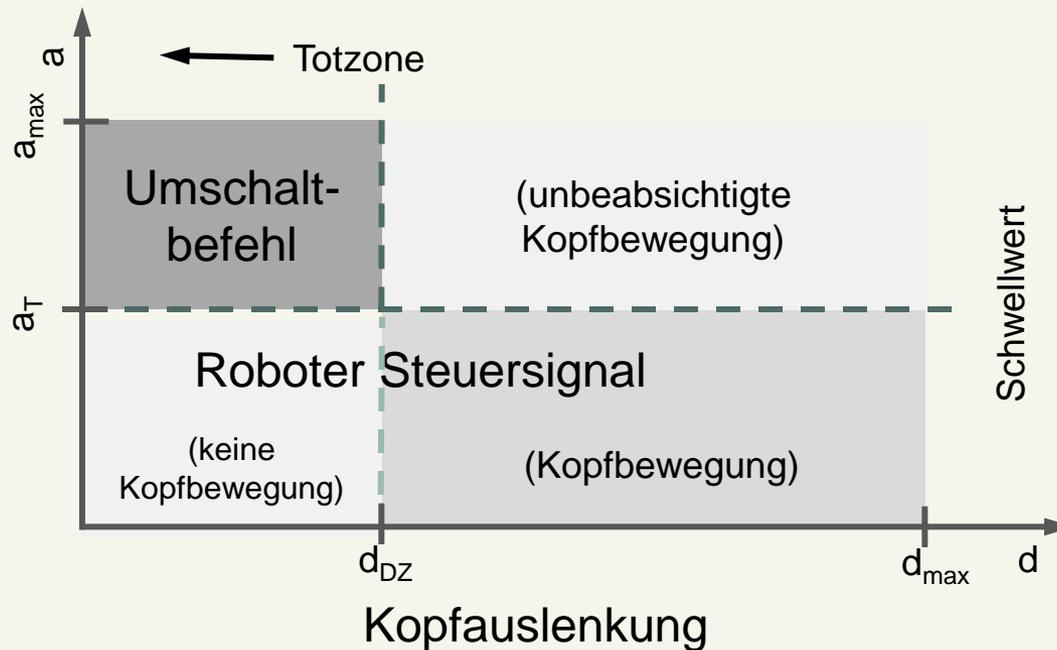
- Starrer Körper auf Kopf bewegt sich auf Kugeloberfläche
- Wenn Yaw-Achsen übereinstimmen:
 - Kopfwinkel = Sensorwinkel
- Nur Definition der Ruhelage



Umschaltbefehl

- Anforderungen
 - Hohe Zuverlässigkeit
 - Geringe Latenz
 - Keine Interferenz mit anderen Signalen
 - Keine zusätzliche Hardware

Lineare Sensorbeschleunigung



→ Kopfgeste

Analyse der...

- Anfangsbeschleunigung
 - Amplitude: Separation von Steuersignalen
 - Richtung: Separation von übrigen Gesten*
- Kopfwinkel
 - Form: Separation von unbeabsichtigten Bewegungen

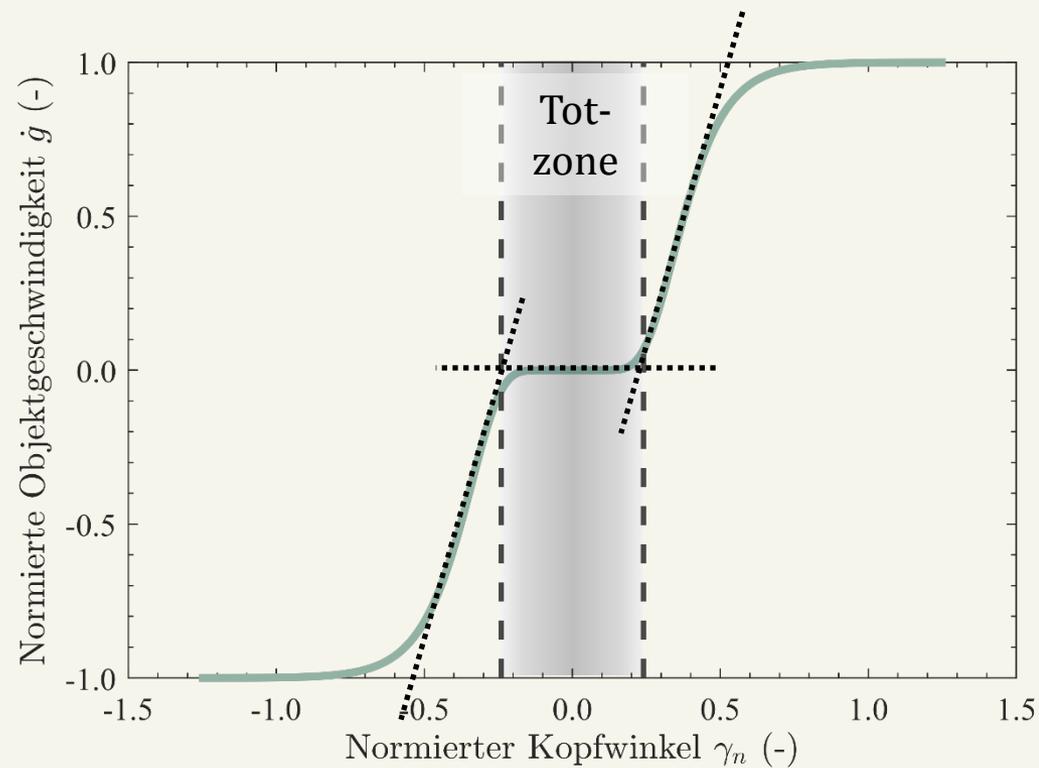
*Ursprünglich ausgelegt für 4 Gesten (**Nicken nach unten**, oben, links und rechts)

Proportionale Roboterbewegung

- Direkte Steuerung der Roboter-DOFs in einer Gruppe
- Abbildung von Kopf-**Position** auf Roboter-**Geschwindigkeit**
- GOMPERTZ-Funktion
 - Sehr kleine Auslenkungen → keine Steuerung
 - Kleine Auslenkungen → langsame, präzise Bewegungen
 - Mittlere Auslenkungen → schnelle, grobe Bewegungen

! Bei Wechsel in Roboter-Modus zunächst Leerlauf zur Vermeidung ungewollter Bewegungen

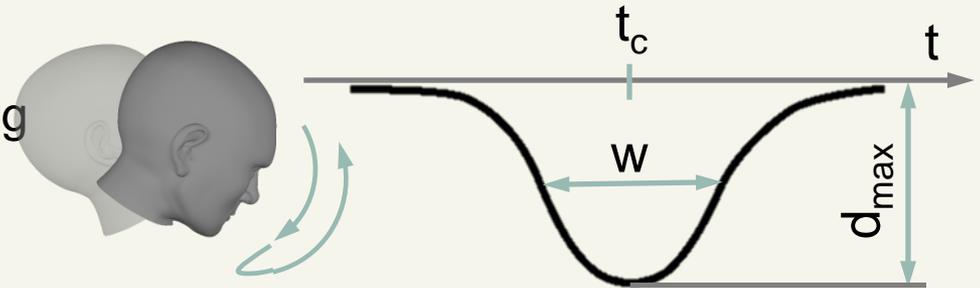
$$\dot{g} = \begin{cases} A_{\max} \cdot e^{\delta \cdot e^{r \cdot \gamma_n}} & \text{wenn } \gamma_n > 0 \\ -A_{\max} \cdot e^{\delta \cdot e^{-r \cdot \gamma_n}} & \text{sonst} \end{cases}$$



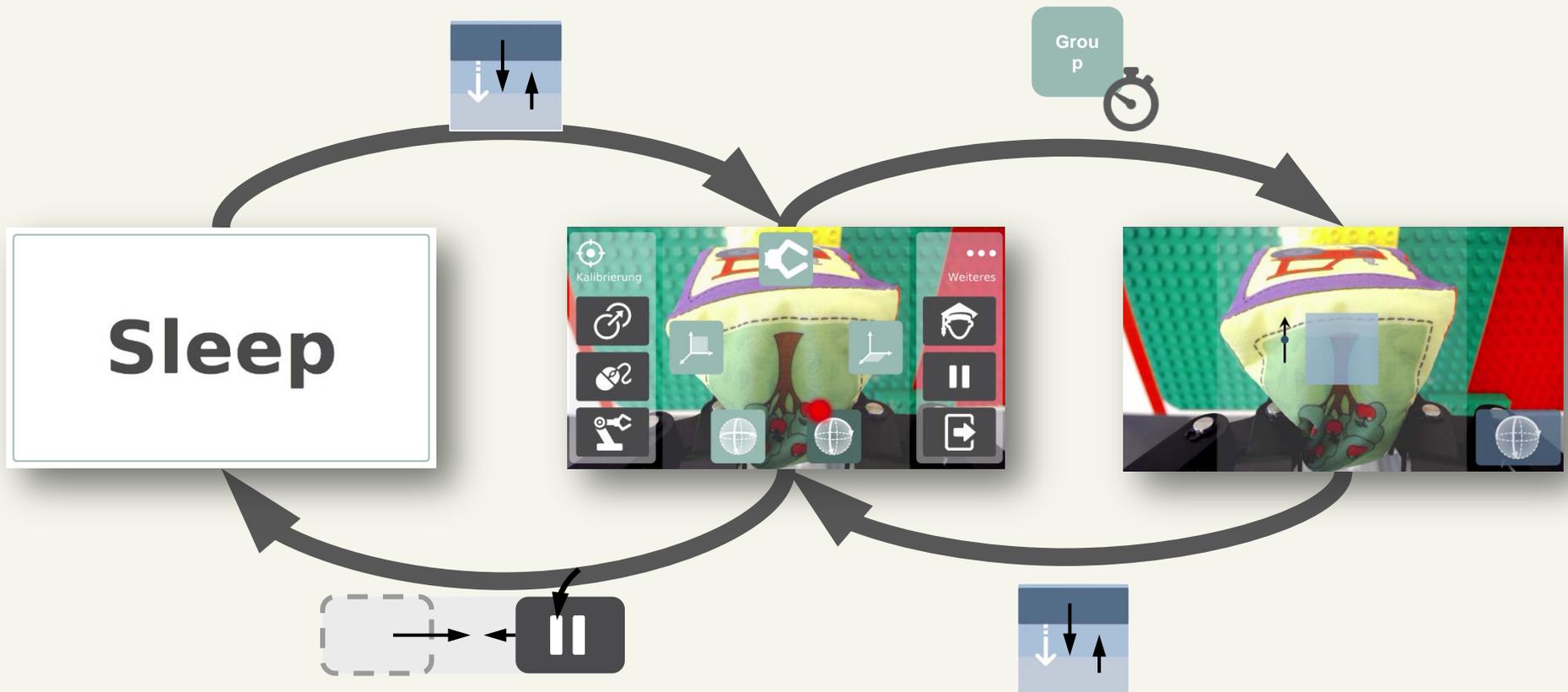
- Fensterung auf Basis linearer Beschleunigung
 - startet bei Aktivität
 - stoppt bei Ruhe
- Entscheidungsbaum
 - Fensterlänge
 - Richtung der Anfangsbeschleunigung
- Fit einer Gauß-Funktion
- Klassifikation, wenn...
 - ...Amplitude groß genug
 - ...Bewegung schnell genug
 - ...Bewegung gaußförmig genug
 - ...Kopplung nicht-dominanter DOFs klein genug

Vorteile

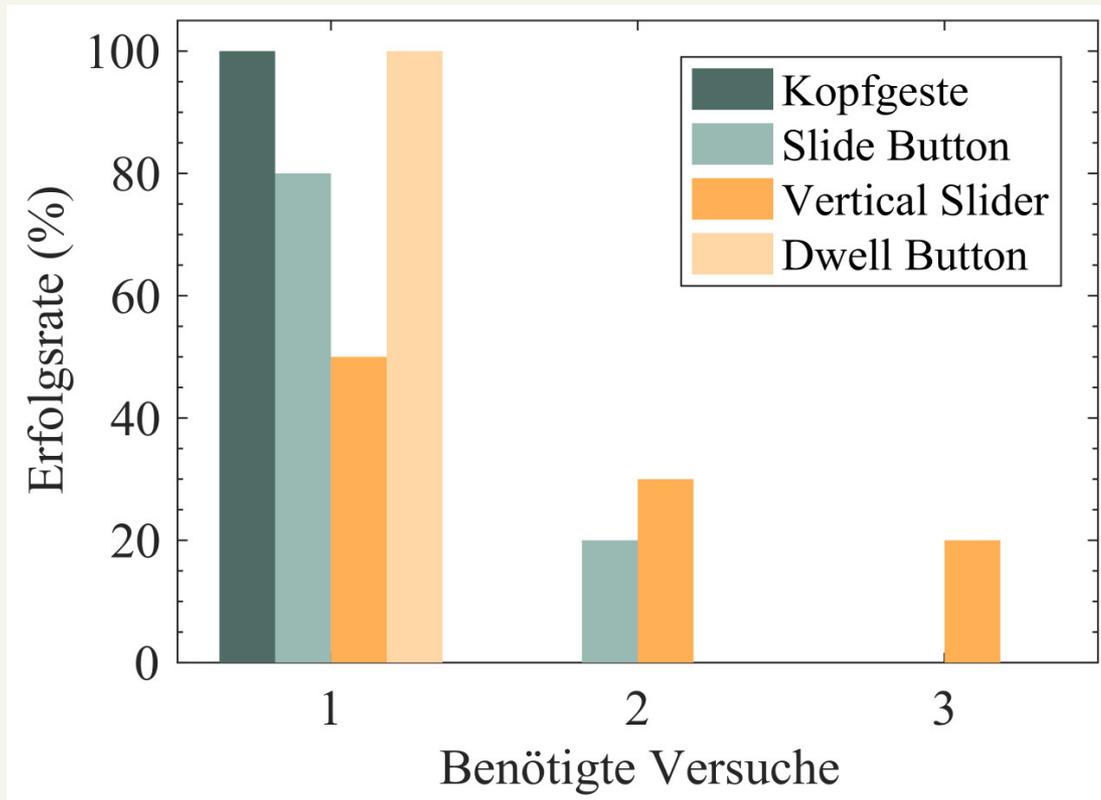
- Adaptive Fensterung
 - Ideale Klassifikationsbedingungen
 - Recheneffizient
- Vorselektion
 - Kleiner Feature-Space → keine Dimensionsreduktion notwendig
- Einfache Schwellwerte statt komplexer Klassifikation



Kontrollstruktur



Ergebnisse



Human Machine Interface für Tetraplegiker

Hier: „Vollständige Steuerung durch Nutzer“
„Keine Autonomie des Roboters“

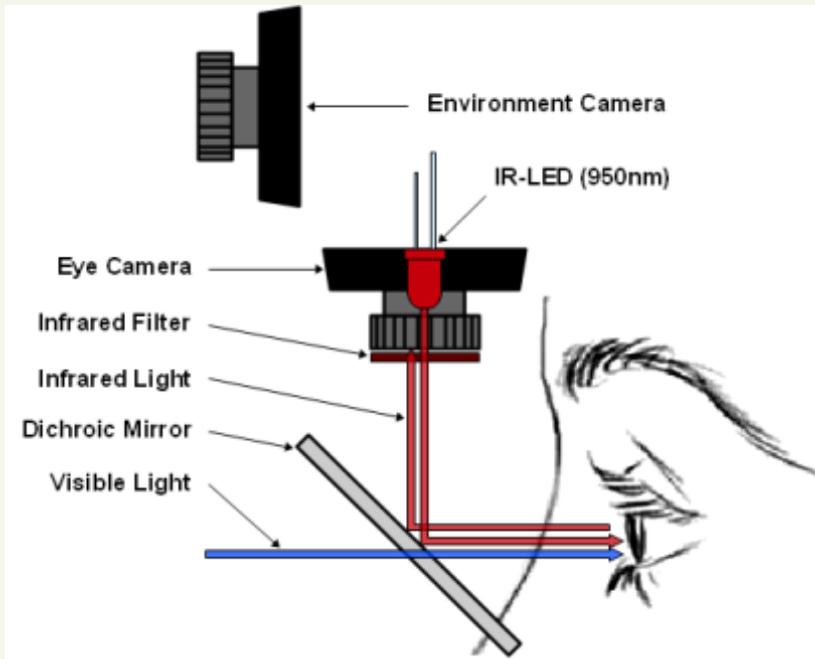
Lösungsstrategien

Steuerung des Roboters durch:

- **Kopf-Gesten**
 - IMU (Inertial Measurement Unit)
 - MARG (Magnetic, Angular Rate, and Gravity)
 - AHRS (Attitude Heading Reference System)
- **Augen-Gesten**
 - Eye-Tracker
- **Gehirnaktivität**
 - Brain Computer Interfaces
- **Sprachsteuerung**
 - Hier nicht betrachtet

Eye-Tracker

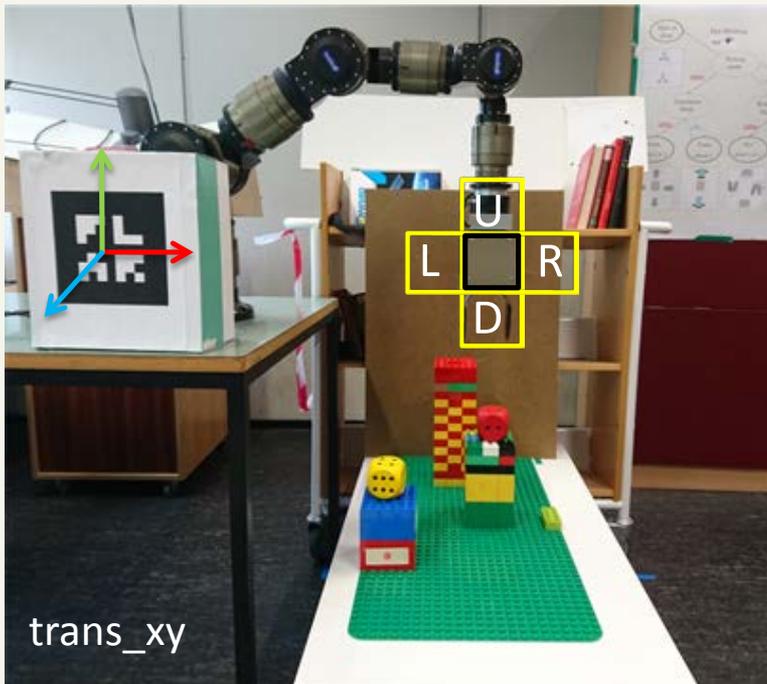
Schematische Darstellung sBCI-System



Kommerzielles System

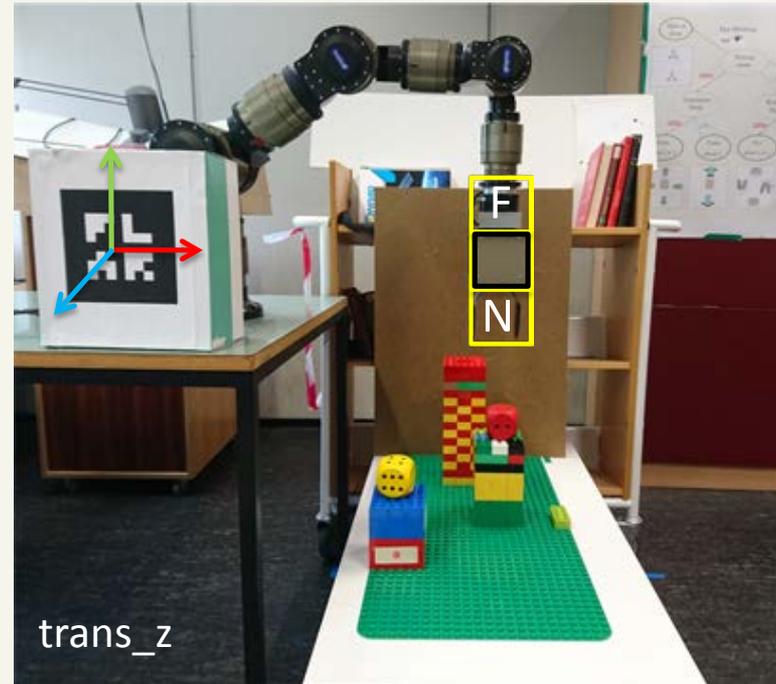


Bewegungsbefehle über dynamische Sichtbereiche



trans_xy

Achsenzuordnung: x-rot, y-grün
L-Left, R-Right, U-Up, D-Down



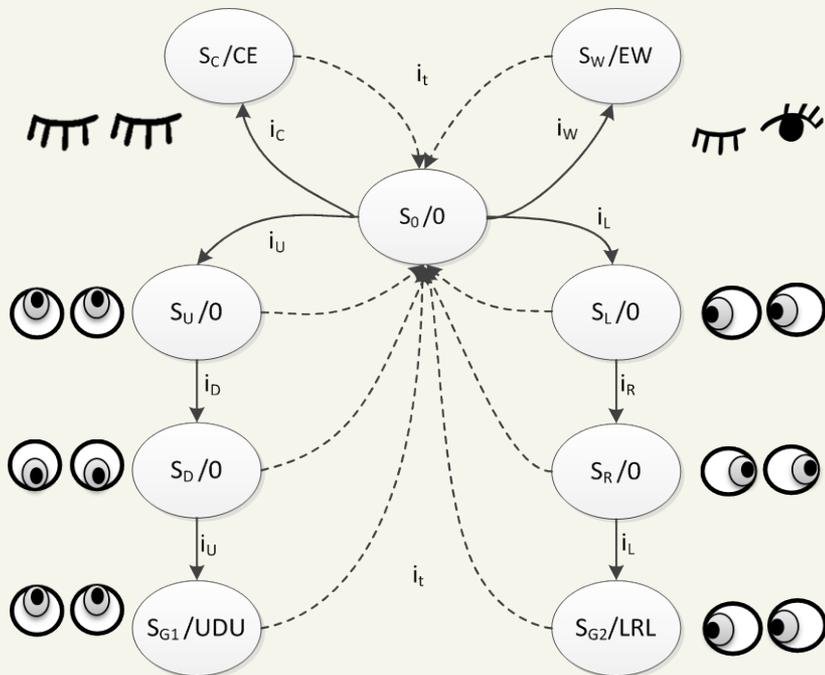
trans_z

Achsenzuordnung: z-blau,
F-Far, N-Near

Augengesten, Freiheitsgrade DoF

2-DoF-Augen; Blinken, Schließen; ≥ 6 -DoF-Roboter

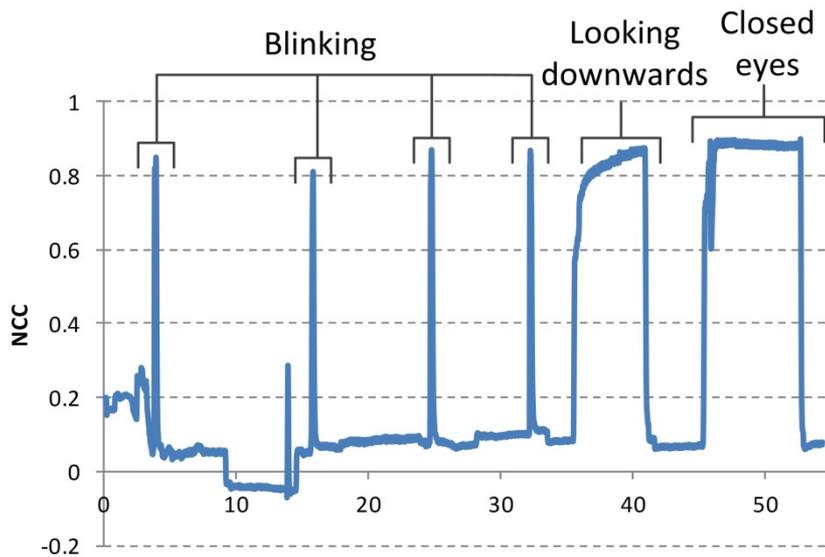
Einzelne Ereignisse



Endlicher Zustandsautomat zur Erkennung

- Blickrichtung wird in fünf Hauptbereiche unterteilt:
 - Right, Left, UP, Down, Center
- Augengesten:
 - UDU
 - LRL
 - Closed eyes – ein Schritt zurück
 - Eye winking – Greifer Modus

Augenzustandserkennung



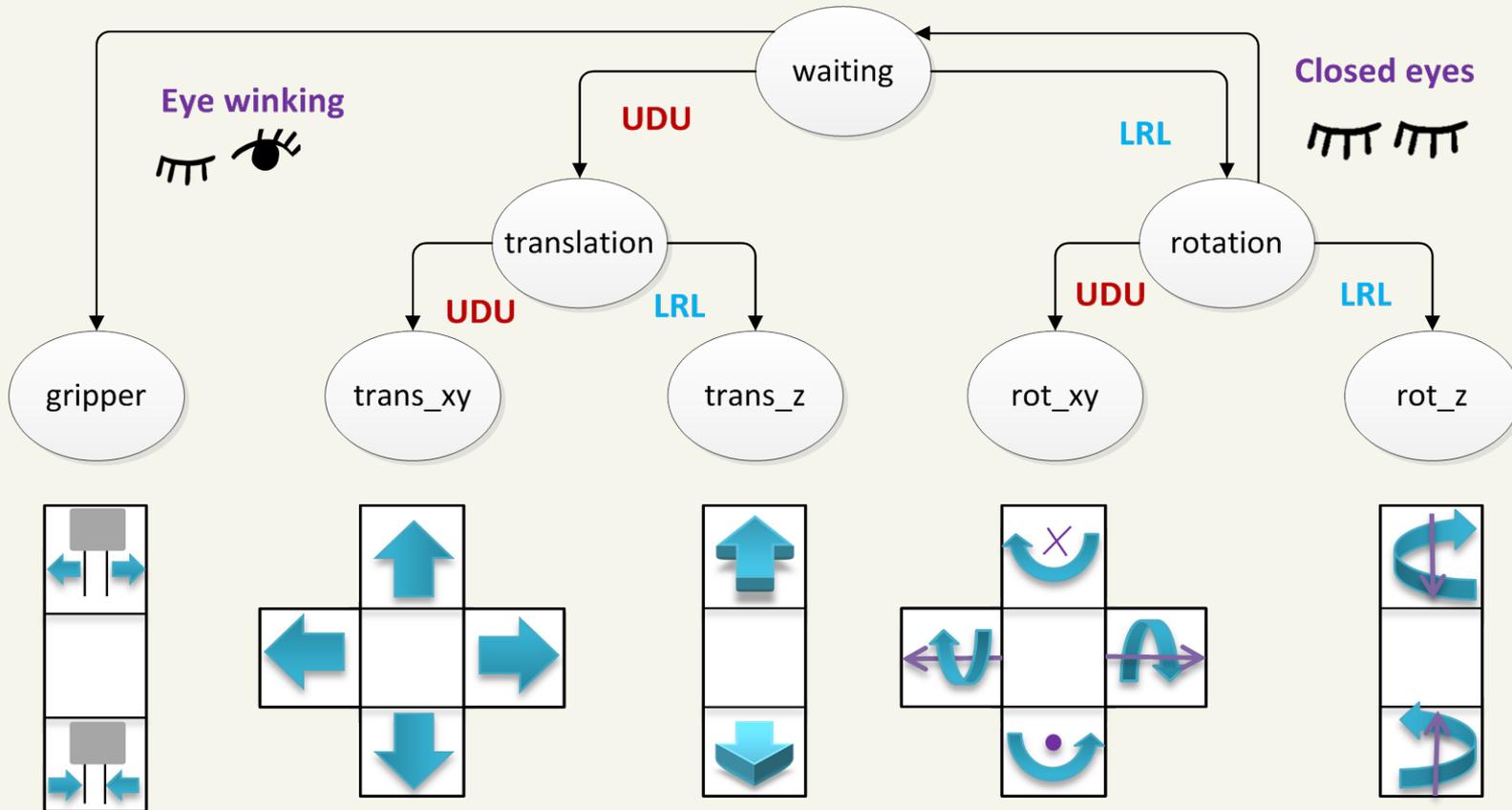
Looking downwards



Closed eye

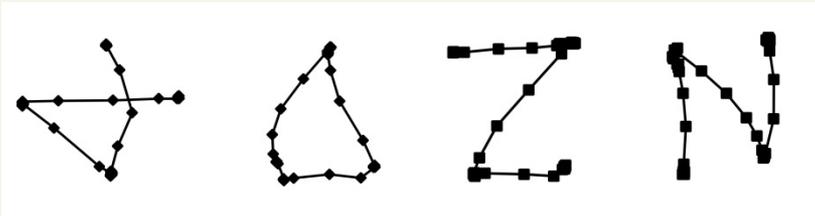
- Normalisierte Kreuzkorrelation
- Pupillenradius
- Zeitdauer
- Als redundante Information zur Erhöhung der Robustheit

Steuerungskonzept

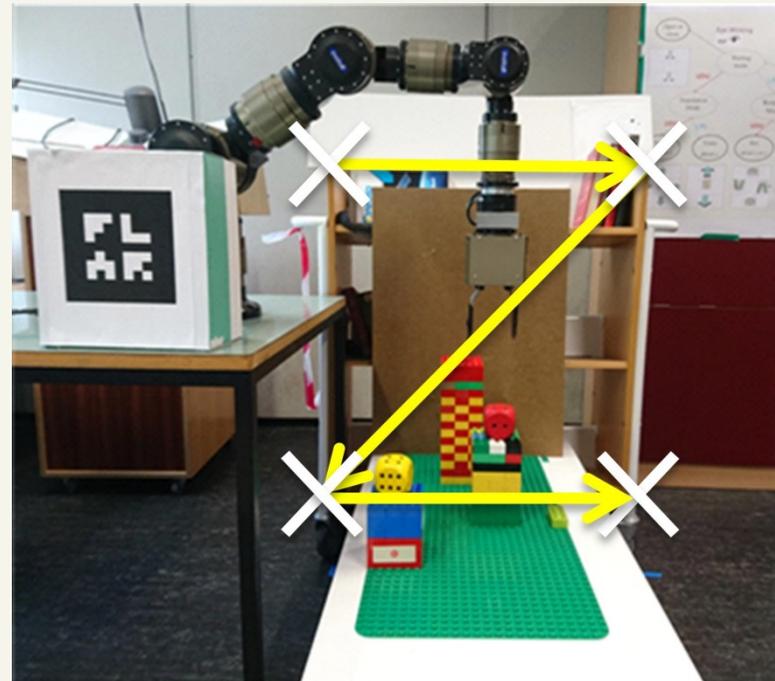


Komplexe Augengesten

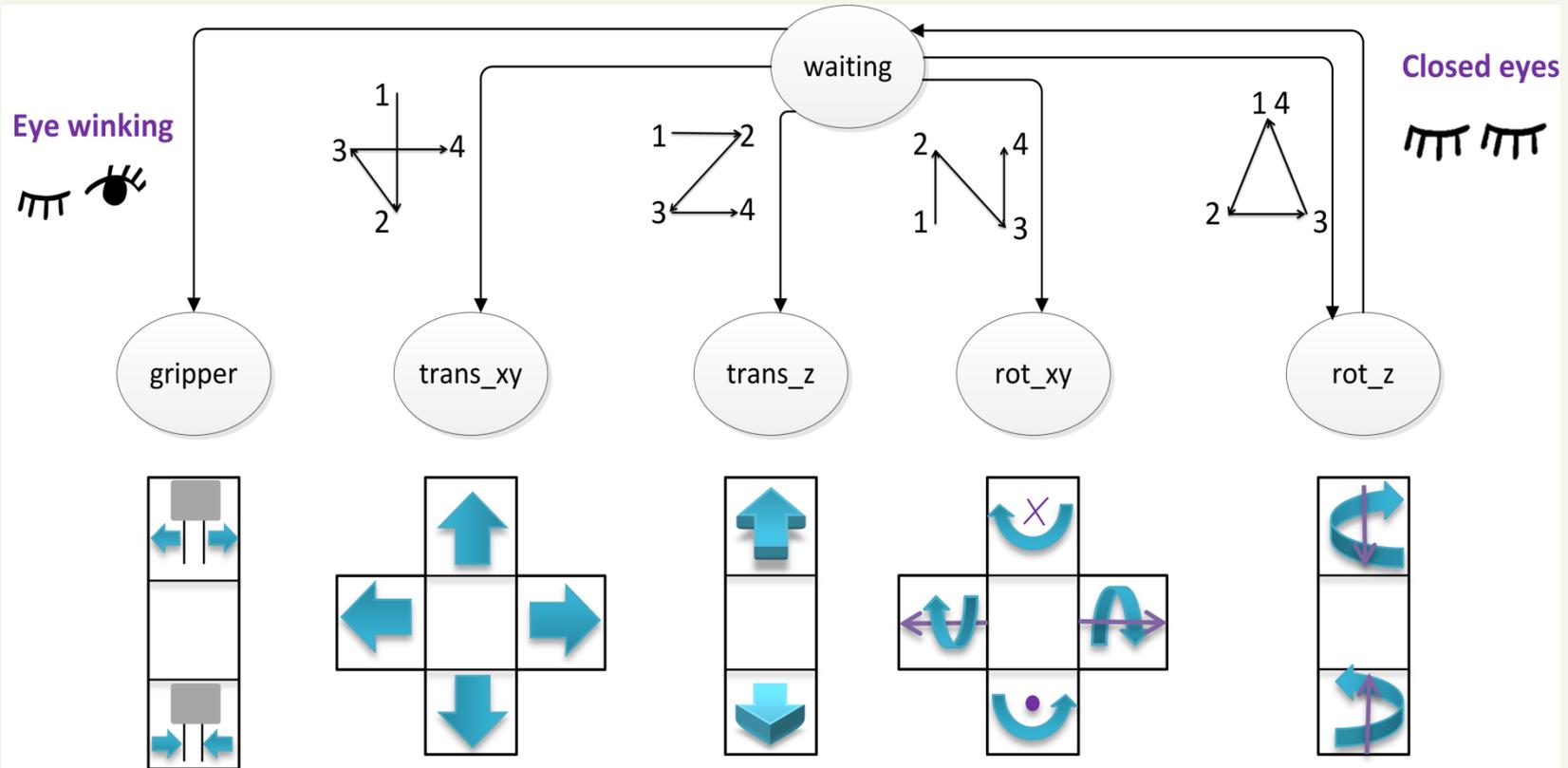
- Folge von Bewegungen
- Template vorgegeben
- Algorithmus basiert auf Dynamic Time Warping



- Augenbewegung

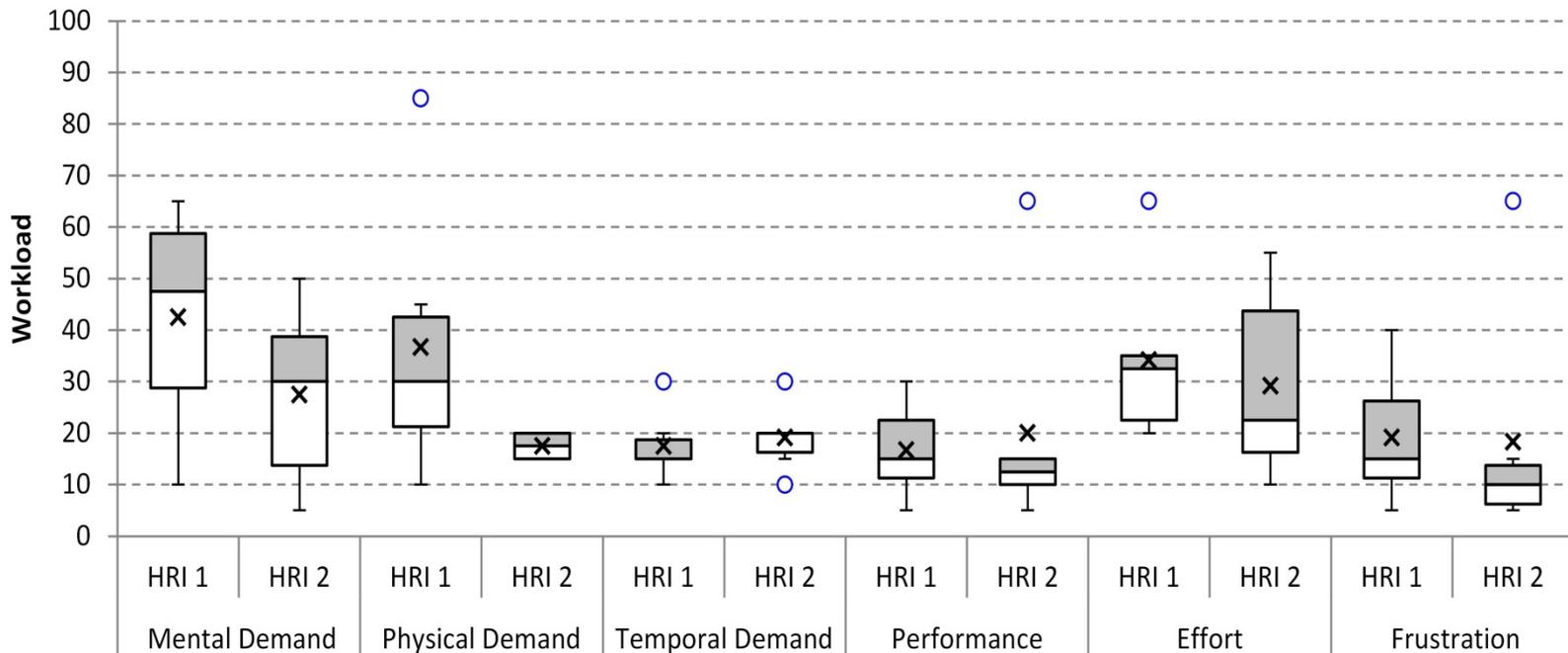


Direkte Umschaltung



Subjektive Ergebnisse

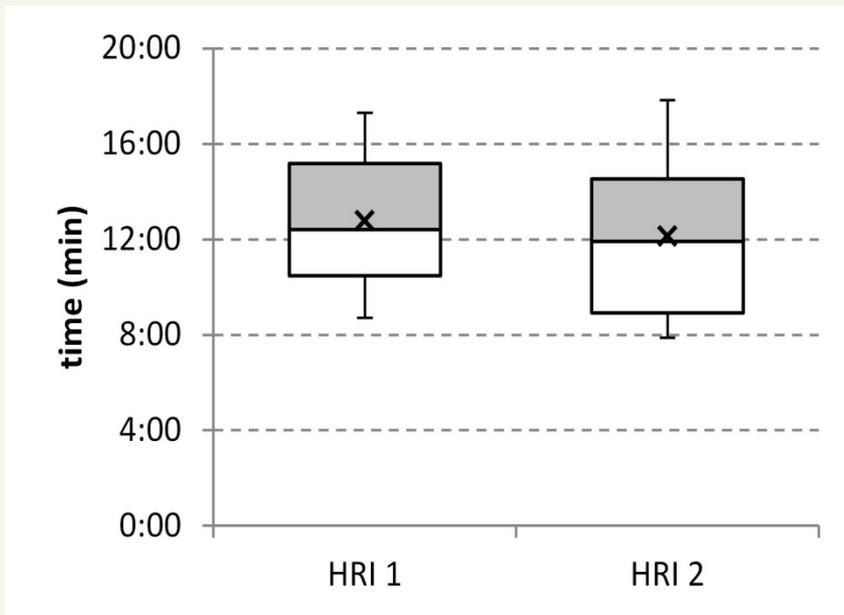
- Belastungsmessung - Raw NASA – Task Load Index
- Antwort der Nutzer (6 Personen)



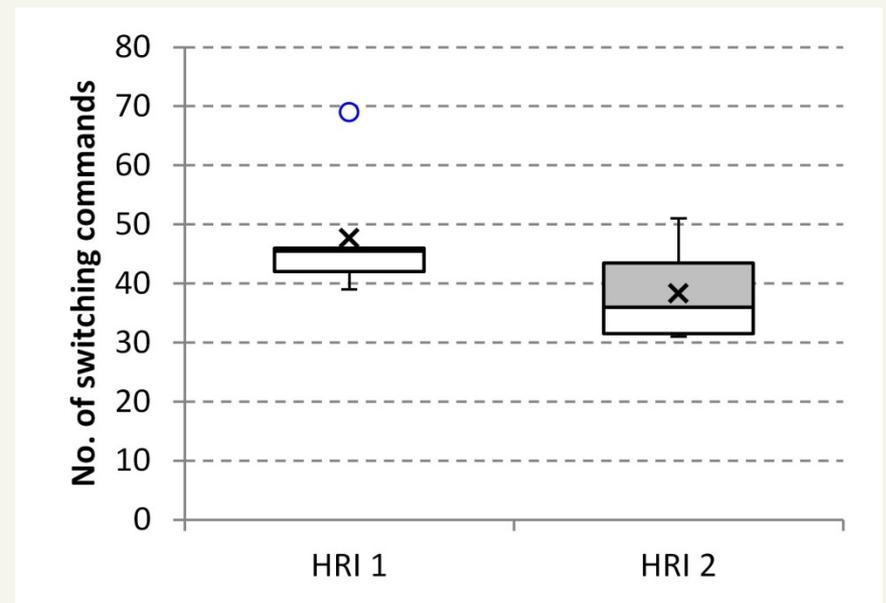
HRI1 – einfache Gesten, HRI2 – komplexe Gesten

Objektive Ergebnisse Umsetzen von zwei Würfeln

Zeit



Umschaltkommandos



Human Machine Interface für Tetraplegiker

Hier: „Vollständige Steuerung durch Nutzer“
„Keine Autonomie des Roboters“

Lösungsstrategien

Steuerung des Roboters durch:

- **Kopf-Gesten**
 - IMU (Inertial Measurement Unit)
 - MARG (Magnetic, Angular Rate, and Gravity)
 - AHRS (Attitude Heading Reference System)
- **Augen-Gesten**
 - Eye-Tracker
- **Gehirnaktivität**
 - Brain Computer Interfaces
- **Sprachsteuerung**
 - Hier nicht betrachtet

generelle/spezielle Anforderungen

- 1) **Adaptiv:** Signalumfang des Nutzers
- 2) **Intuitiv:** Kommandos und resultierende Roboterbewegung
- 3) **Robust:** unbeabsichtigte Signale, Steuersignale und Umschaltbefehle
- 4) **Feedback:** sichere und effiziente Information des Nutzers
- 5) **Gut steuerbar:** Gleichmäßig, präzise und effizient im karthesischen Raum
- 6) **Echtzeitfähig:** einfache Algorithmen

Erfassung der Hirnsignale

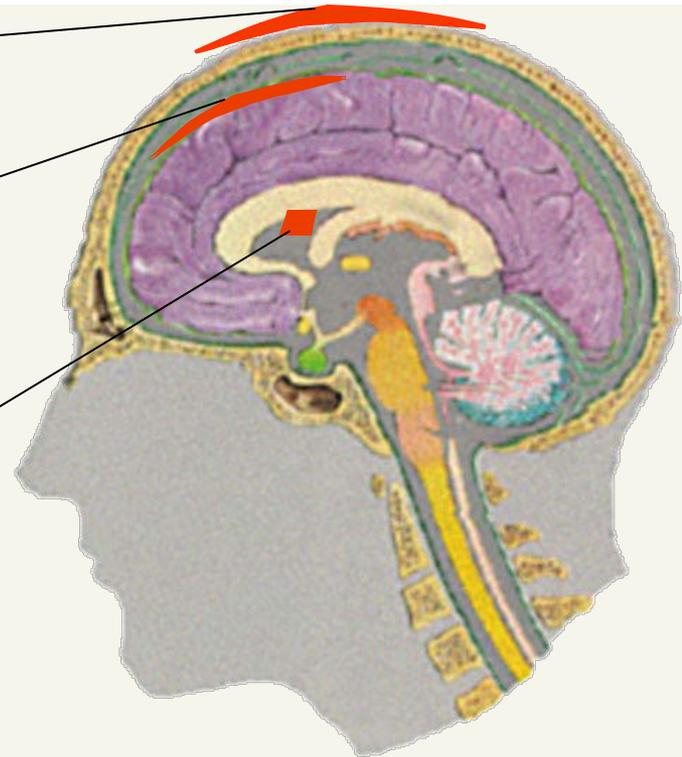
iat

Institut für
Automatisierungstechnik

Electroencephalogram
(EEG) – scalp

Electrocorticogram
(ECoG) – inside the skull

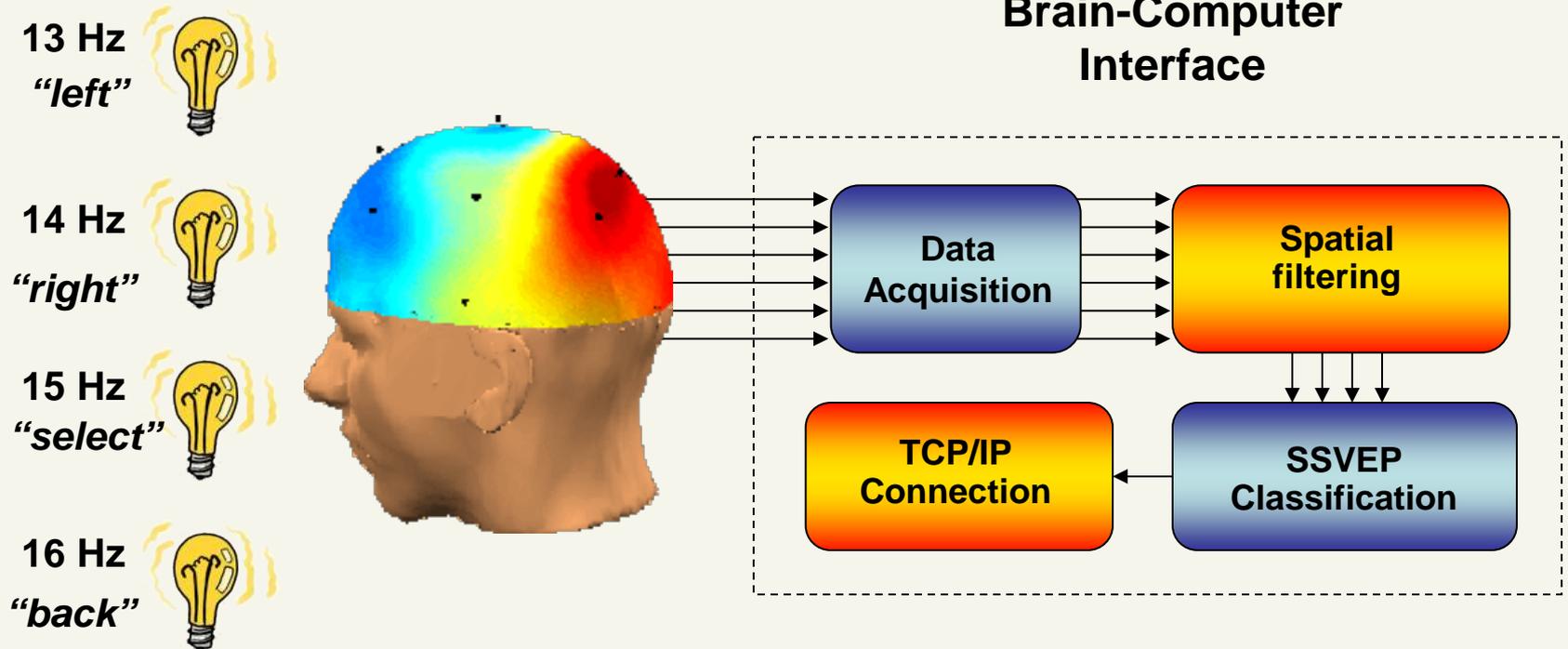
Single cell or small cell groups



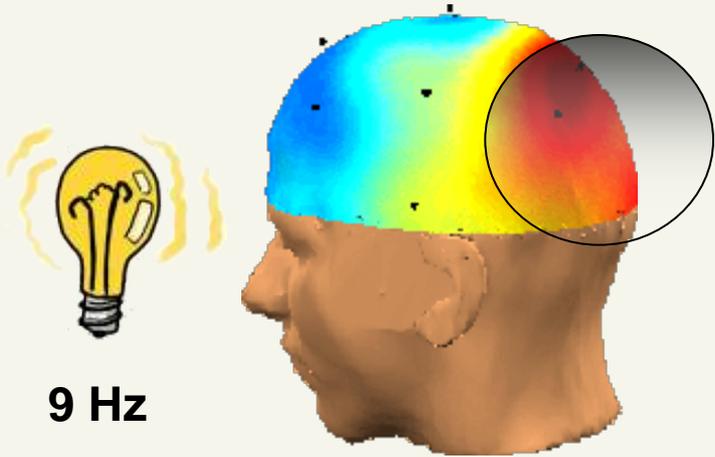
SSVEP-basiertes BCI

SSVEP-Steady State Visual Evoked Potential

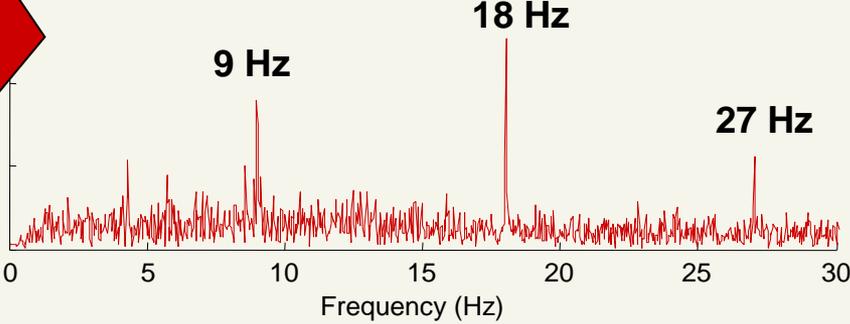
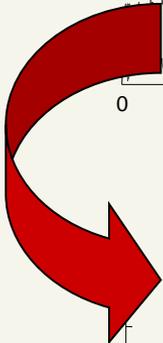
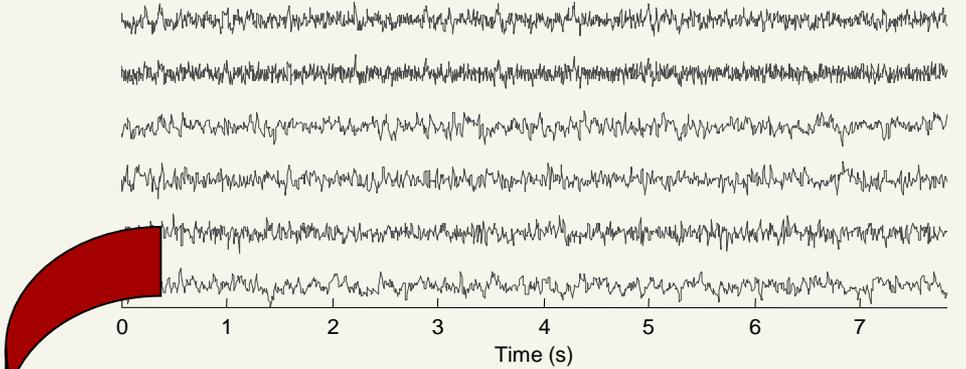
Brain-Computer Interface



Steady-State Visual Evoked Potentials



FFT



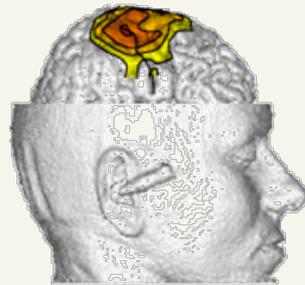
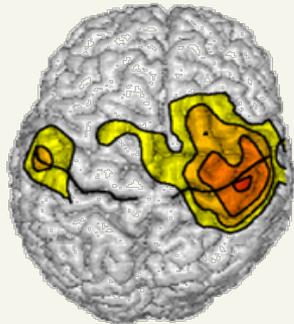
ERD/ERS-basiertes BCI

ERD/ERS (Event-Related (De)-Synchronization)

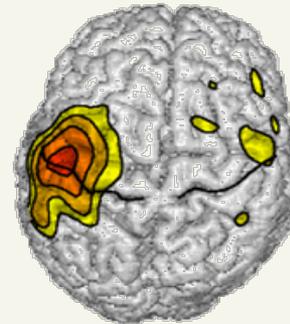
Bewegungsvorstellungen, um bestimmte Muster im Gehirn zu erzeugen

Training notwendig

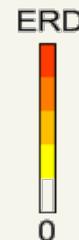
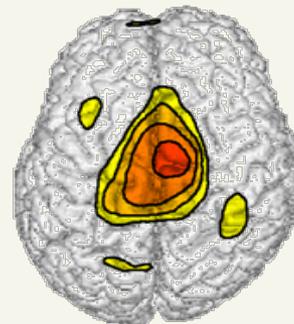
Left hand 9-13Hz



Right hand 9-13Hz



Foot 18-23Hz



Pfurtscheller et al, 1999

Gehirnaktivität, BCI-nicht invasiv Kombination mehrere Systeme

Methoden

- SSVEP – Steady State Visual Evoked Potentials
- ERD/ERS (Event-Related (De)-Synchronization)
 - Bewegungsvorstellungen, Motion Imagination
 - Linke Hand, rechte Hand, Füße

BCI + Eye Tracker = sBCI

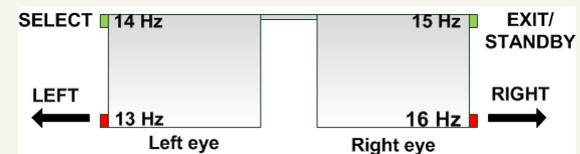
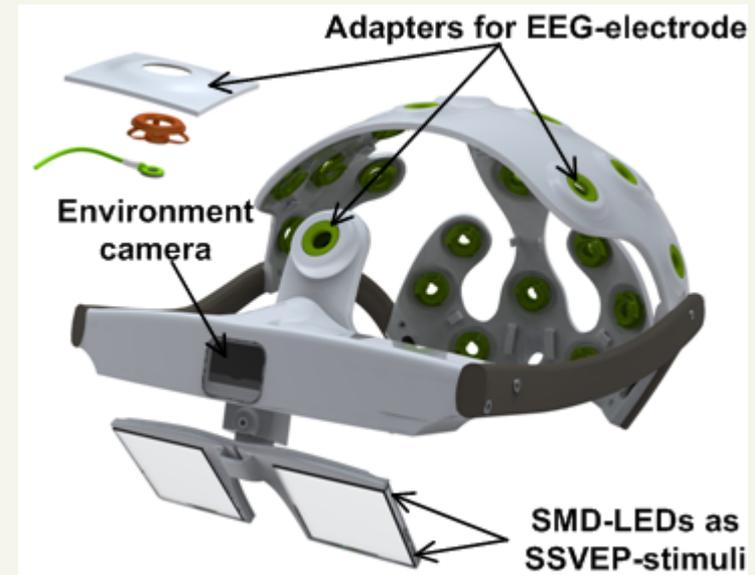


Abbildung der Freiheitsgrade DoF

4-DoF-SSVEP; 3-DoF-MI; ≥ 6 -DoF-Roboter

BCI-Problem

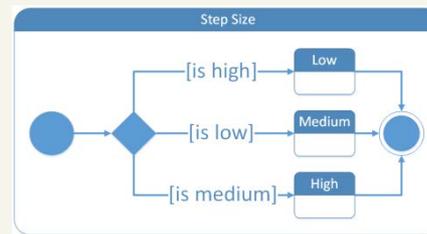
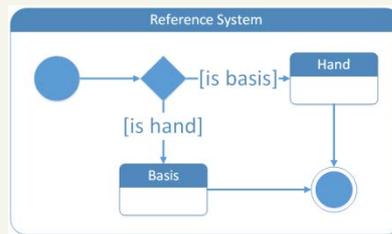
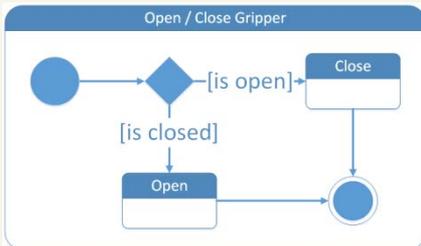
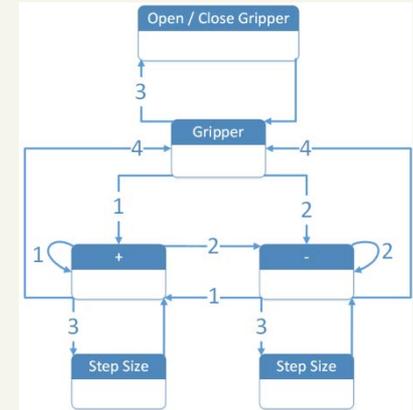
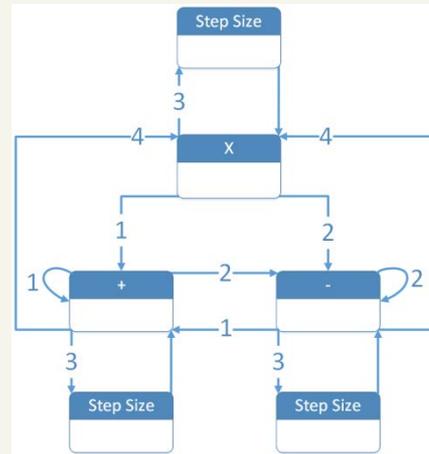
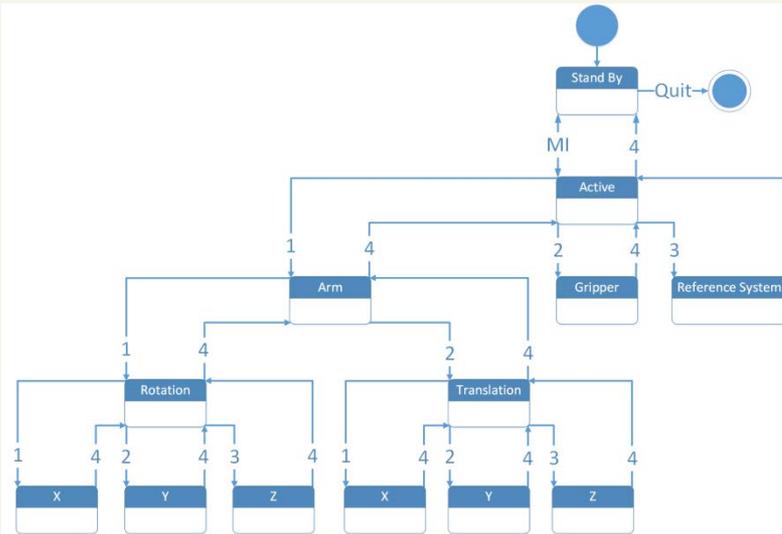
Informationstransferrate

- SSVEP
 - ≤ 120 Bit/min oder
 - ≤ 2 Bit/sec
- ERD/ERS - MI
 - ≤ 10 Bit/min oder
 - ≥ 6 sec/Bit

Lösung

- MI für die Aktivierung
- SSVEP für die Steuerung
- Signalfolge als Steuereingang
 - Zweidimensionale Signale
 - 16 statt 4 Freiheitsgrade

Zustandsautomat Robotersteuerung



Zustandsautomat zweidimensionale Signale

Actions			Commands		Image
			1.	2.	
X	Translation	+	1	1	
		-	1	2	
	Rotation	+	1	3	
		-	1	4	
Y	Translation	+	2	1	
		-	2	2	
	Rotation	+	2	3	
		-	2	4	
Z	Translation	+	3	1	
		-	3	2	
	Rotation	+	3	3	
		-	3	4	
Gripper	+	4	1		
	-	4	2		
	Open / Close	4	3		
Reference System	Basis / Hand	4	4		

Zusammenfassung

Steuerung des Roboters durch:

- **Kopf-Gesten**
 - IMU (Inertial Measurement Unit)
 - MARG (Magnetic, Angular Rate, and Gravity)
 - AHRS (Attitude Heading Reference System)
- **Augen-Gesten**
 - Eye-Tracker
- **Gehirnaktivität**
 - Brain Computer Interfaces
- **Kombination mehrere Systeme**
 - sBCI
- **Sprachsteuerung**
 - Hier nicht betrachtet

Zukunft

- Einheitliche Aufgabenstellung
- Test mit mehreren Tetraplegikern
- Entwicklung in Richtung eines Produktes
 - Roboterarm
 - Benutzerschnittstellen
 - Automatische Adaption an die Vielfalt der Bewegungseinschränkungen



Institut für
Automatisierungstechnik

Vielen Dank

- Grundlegende technische Probleme implantierbarer Systeme
 - Biokompatibilität
 - Größe
 - Drahtlose Signalübertragung
 - Energieverbrauch
 - Stabilität
 - Anregung

Anforderungen an Invasive Systeme

- Implantate
 - Ableitung einzelner Neurone
 - Ableitung von Gruppen von Neuronen
 - Anregung von Neuronengruppen

Grundlegende technische Probleme implantierbarer Systeme

Forderung	Heute erreichbar	Zukunft
Biokompatibilität	Nicht gegeben, maximal 6 Monate implantierbar	Jahrzehnte
Größe Elektronik	40*40 mm	3*3 mm
Energieverbrauch	< 50 mW	< 10 mW
Energieversorgung	drahtgebunden, Batterie	drahtlos
Anregung	Nicht integriert	Integriert mit Messung
Signalübertragung	Drahtgebunden	Drahtlos
Implantierbarkeit	Verletzungsgefahr	verletzungsfrei