

# Schlussbericht

## zum bmbf-Vorhaben

**„Verbundprojekt: KI-Steuerungselektronik für energiesparende langlebige Elektromotoren - ECOMAI – Teilvorhaben: KI-erweiterte Motorsteuerung für Trainingsroboter in der medizinischen Rehabilitation“**  
**Förderkennzeichen: 16ME0570**

Gesamtlaufzeit des Vorhabens:

01.05.2022 - 30.04.2025

Zuwendungsempfänger:

neuroConn GmbH  
Albert-Einstein-Str. 3  
98693 Ilmenau

Vorhabensverantwortlicher:

Dipl.-Ing. Klaus Schellhorn

## Zusammenfassung

Elektromotoren bewegen unser tägliches Leben in Laptop-Lüftern und in unseren Autos. Aber all die positiven Effekte haben auch ökologische Auswirkungen, denn Elektromotoren sind für CO<sub>2</sub>-Emissionen verantwortlich. Motorausfälle und unerwartete Ausfallzeiten verursachen wirtschaftliche Schäden. Die Optimierung der Lebensdauer von Elektromotoren ermöglicht daher positive Veränderungen in Bezug auf Umweltsicherheit und Wirtschaftswachstum. Im Rahmen des ECOMAI-Projekts wurden Technologien entwickelt, die Elektromotorantriebssysteme mit einem eingebetteten KI-System verbessern, das auf einer speziellen KI-Hardwareplattform läuft.

Ein Ziel war es, ökologische Elektroantriebe für grüne Systeme mit geringerem Energieverbrauch zu entwickeln. Ein weiterer Schwerpunkt lag auf der Reduzierung der Ausfallzeiten von Transportsystemen und Maschinen durch vorausschauende Wartung.

Das Teilvorhaben der neuroConn GmbH im Projekt ECOMAI hatte das Ziel, eine KI-erweiterte Motorsteuerung für Trainingsroboter in der medizinischen Rehabilitation zu entwickeln. Im Fokus standen robotergestützte Anwendungen für Finger-, Hand- und Armtraining. Die Aufgaben umfassten die Integration von KI in Motorantriebssysteme, die Entwicklung von Hardware- und Softwarearchitekturen sowie den Aufbau einer Entwicklungs- und Testumgebung für MedTech-Anwendungen. Diese sollte die Erfassung biologischer Signale wie EMG und ExG sowie Bewegungsdaten über Akzelerometer ermöglichen, eine Echtzeit-Parameterextraktion mit einer Latenz von unter einer Millisekunde bereitstellen und die Steuerung motorisierter Aktuatoren erlauben. Darüber hinaus sollten Use Cases definiert, Anforderungen abgeleitet und Systemmodelle sowie Datensätze für ökologische Motorantriebe erstellt werden. Die Validierung der Konzepte sollte anhand von Demonstratoren für Finger- und Armrehabilitation erfolgen.

Angeknüpft wurde an den Stand der Technik, bei dem robotergestützte Rehabilitation bereits etabliert ist, jedoch ohne KI-Integration. Bisherige Systeme basieren auf Impedanzkontrolle und

bieten keine adaptive Anpassung an Spastiken oder individuelle Bewegungsmuster. Der manuelle Aufwand für Therapeutinnen und Therapeuten ist hoch und beträgt bis zu 30 Minuten pro Trainingseinheit. KI-Anwendungen existieren zwar, sind aber nicht für ressourcenarme Embedded-Systeme geeignet. Der Innovationsansatz von ECOMAI bestand darin, Tiny Machine Learning auf Mikrocontrollern einzusetzen, um eine KI-gestützte Impedanzkontrolle für eine fein abgestimmte Motorsteuerung zu realisieren. Dabei sollten EMG- und Kinematikdaten genutzt werden, um Bewegungen prädiktiv zu steuern. Ziel war es, den Therapeutenaufwand um zwei Drittel zu reduzieren, Echtzeitfähigkeit unter einer Millisekunde zu erreichen und eine adaptive Anpassung an Spastiken zu ermöglichen.

Ilmenau, zum Jahreswechsel 2025/2026

## 1. Aufgabenstellung

Das Teilvorhaben der neuroConn GmbH im Projekt ECOMAI hatte das Ziel, eine KI-erweiterte Motorsteuerung für Trainingsroboter in der medizinischen Rehabilitation zu entwickeln. Im Fokus standen robotergestützte Anwendungen für Finger-, Hand- und Armtraining. Die Aufgaben umfassten die Integration von KI in Motorantriebssysteme, die Entwicklung von Hardware- und Softwarearchitekturen sowie den Aufbau einer Entwicklungs- und Testumgebung für MedTech-Anwendungen. Diese sollte die Erfassung biologischer Signale wie EMG und ExG sowie Bewegungsdaten über Akzelerometer ermöglichen, eine Echtzeit-Parameterextraktion mit einer Latenz von unter einer Millisekunde bereitstellen und die Steuerung motorisierter Aktuatoren erlauben. Darüber hinaus sollten Use Cases definiert, Anforderungen abgeleitet und Systemmodelle sowie Datensätze für ökologische Motorantriebe erstellt werden. Die Validierung der Konzepte sollte anhand von Demonstratoren für Finger- und Armrehabilitation erfolgen.

## 2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die Firma neuroConn hält auf dem Gebiet der NEUROMODULATION (Neurofeedback, transkranielle Stimulation) seit Ihrer Gründung engen Kontakt mit deutschen und internationalen Forschungseinrichtungen. Die mittlerweile 29 Mitarbeiter der neuroConn GmbH sind im Verbund mit der Mutterfirma neurocare group in den Bereichen Entwicklung (Hard- und Software), Produktion, Vertrieb, Service und Ausbildung tätig. Die neurocare group AG betreibt Behandlungszentren in Australien, Japan, den Niederlanden und den USA für Patienten mit psychiatrischen Erkrankungen wie Depressionen, Zwangsstörungen, ADHS und wird in der Zukunft auch Schmerzbehandlungen bzw. Therapien zur Rehabilitation nach einem Schlaganfall anbieten. In den letzten Jahren wurden neben zahlreichen internationalen Studien zur transkraniellen Gleichstromstimulation, auch Multizentrische Studien der DFG / des BMBF zum Neurofeedback bei Aufmerksamkeitsstörungen (DFG HO2503 4/1, Prof. Holtmann - RUB), der transkraniellen Gleichstromstimulation bei Schlaganfall (NETS, Dr. Hummel - UKE; DC\_Train\_Aphasia, Prof. Flöel - UMG) und bei Depression (DepressionDC, Prof. Padberg - LMU; PsychotherapiePLUS, Prof. Bajbouj - Charité) ausgestattet und in Teilen in hochrangigen Zeitschriften wie Lancet publiziert. neuroConn verfügt über sehr gute Mitarbeiter, die in der Mehrheit ihre Ausbildung am Institut für Biomedizinische Technik der TU Ilmenau (Prof. Haueisen) erhalten haben, zu dem auch heute ein reger Austausch besteht.

Besonders enge Kontakte sind seit der Einführung des DC-STIMULATOR bzw. THERA PRAX<sup>®</sup> im Jahre 2005 mit dem Institut für Klinische Neurophysiologie der Universität Göttingen (Prof. Paulus) bzw. dem Institut für Verhaltensmedizin der Universität Tübingen (Dr. Strehl, Prof. Birbaumer) vorhanden. Im Projektzeitraum konnte die Firma neuroConn ihr Qualitätsmanagement nach Anhang II der Richtlinie 93/42/EWG bei der Benannten Stelle TÜV-SÜD (CE 0123) aufrechterhalten und auf die neue ISO 13485:2016 umstellen. Aufgrund der Vorbereitungen zur neuen MDR wurden Weiterbildungsmaßnahmen besucht, einen Plan für die Umstellung von MDD auf MDR erarbeitet und diesen umgesetzt. Für alle medizintechnischen bzw. neurowissenschaftlichen Produkte existieren nach bestandenen Sicherheitsprüfungen gemäß neuester Normen IEC 60601-1 einschließlich IEC 60601-1-2 Berichte bzw. CB-Zertifikate. Für die messtechnische Evaluierung während der Entwicklung und die Verifikation der Anforderungen an den Demonstrator wurden Messgeräte (Oszilloskope, Präzisionssignalgeneratoren) angeschafft und eigene Messsysteme (mehrkanales universelles Aufzeichnungssystem zur Zeitbereichs- und Spektralanalyse; rauscharmes Nanoampere-Messsystem zur Messung der Genauigkeit, des Offsets, der Linearität und des Eigenrauschens von

Stromquellen) entwickelt und realisiert. Für erste EMV-Messungen zur Bestimmung von Störaussendung und Störfestigkeit steht das CE-LAB in Ilmenau bzw. die proEMV in Strausberg zur Verfügung.

### 3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Planung des Verbundprojektes erfolgte in enger Abstimmung mit den Partnern im ECOMAI Verbund. Arbeitsthemen und Arbeitsinhalte wurden definiert, Projektziele vereinbart und anhand von abrechenbaren Meilensteinen in der Planung mit vorgesehen. Im Projekt übernahm die Firma neuroConn die Bereitstellung und Entwicklung der Hard- und Firmware zur Sensorik und Aktorik für den Use-Case Rehabilitationsroboter zur Arm- und Fingerrehabilitation. Im Jahr 2023 erfolgten vorbereitende Arbeiten für die Arbeitspakete AP2 und AP3. Dabei wurden Anwendungsfälle für Finger-, Hand- und Armtraining gesammelt und die Bedarfe führender Schlüsselkunden ermittelt. Die Anforderungen wurden in den ECOMAI AI-Enhancement Flow übertragen. 2024 stand im Zeichen des Aufbaus der Entwicklungs- und Testumgebung. Neben der Signal- und Bewegungsmessung wurden Echtzeit-Analysen und die Steuerung von Aktuatoren realisiert. Parallel dazu entstanden erste Roboterprototypen für die Hand- und Ellenbogenrehabilitation, und die Hardware-/Software-Architektur sowie Systemmodelle wurden definiert. 2025 folgte die Erweiterung der Testumgebung und die Entwicklung mehrerer modularer Exoskelette für die Fingerrehabilitation. Nach Erprobung wurde die praktikabelste Lösung ausgewählt, und die Steuersoftware für klinische Abläufe implementiert. Abschließend erfolgten die Integration und Validierung der Systeme, womit alle Meilensteine erfolgreich abgeschlossen wurden.

Verschiedene Ausbaustufen der Plattformen wurden zu den verschiedenen Evaluierungsaufgaben und zur Demonstration im Verbund zur Verfügung gestellt. Evaluierungsergebnisse wurden für nächste Entwicklungsschritte herangezogen. Eine iterative, generationsbasierte Herangehensweise, die einer agilen Entwicklung nahekommt, wurde angewandt. Der regelmäßige monatliche Austausch zwischen den Projektpartnern ermöglichte eine ergebnis- und lösungsorientierte Arbeitsweise und trug dazu bei, Risiken im Projekt zu erkennen und diese zu minimieren. Die Zusammenarbeit mit der Firma im Verbund der moteon GmbH und zur Hochschule Bielefeld (HSBI) trugen zum Gelingen des anspruchsvollen Projektzeile bei.

### 4. Wissenschaftlicher und technischer Stand an dem angeknüpft wurde

Angeknüpft wurde an den Stand der Technik, bei dem robotergestützte Rehabilitation bereits etabliert ist, jedoch ohne KI-Integration. Bisherige Systeme basieren auf Impedanzkontrolle und bieten keine adaptive Anpassung an Spastiken oder individuelle Bewegungsmuster. Der manuelle Aufwand für Therapeutinnen und Therapeuten ist hoch und beträgt bis zu 30 Minuten pro Trainingseinheit. KI-Anwendungen existieren zwar, sind aber nicht für ressourcenarme Embedded-Systeme geeignet. Der Innovationsansatz von ECOMAI bestand darin, Tiny Machine Learning auf Mikrocontrollern einzusetzen, um eine KI-gestützte Impedanzkontrolle für eine fein abgestimmte Motorsteuerung zu realisieren. Dabei sollten EMG- und Kinematikdaten genutzt werden, um Bewegungen prädiktiv zu steuern. Ziel war es, den Therapeutenaufwand um zwei Drittel zu reduzieren, Echtzeitfähigkeit unter einer Millisekunde zu erreichen und eine adaptive Anpassung an Spastiken zu ermöglichen.

## 5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Zusammenarbeit mit den Projektpartnern sowie mit der Hochschule Bielefeld (HSBI) sowie die Einbindung ehemaliger Tübinger Doktoranden wie Ethan Rich und Dr. Robert Guggenberger ermöglichte die erfolgreiche Erprobung und Auswahl der praktikabelsten Lösung (MS 3) sowie das Design und die Implementierung der Steuerungssoftware für klinische Abläufe (MS 4).

Die Dissemination der Ergebnisse war breit angelegt. neuroConn leistete Zuarbeit für Veröffentlichungen der Projektpartner u.a. auch zur Darstellung der Projektergebnisse für den PENTA Innovation Award 2025. Weiterhin war die Teilnahme an der embedded world 2025 für neuroConn sehr erfolgreich. Für ein weiteres wissenschaftliches Projekt konnten vor Ende des ECOMAI-Projektes Fördermittel des Bundes in der Zusammenarbeit mit einem Partner für ein Projekt DATIpilot Community – ISy-Care – CP - MOERe - Aufbau und klinische Erstverifikation eines Modul-Ökosystems für die erweiterte neurophysiologische Rehabilitation am Anwendungsbeispiel Schlaganfall eingeworben werden. Hier werden Teilergebnisse aus den im Projekt ECOMAI entwickelten Technologien, dh. anspruchsvoller interaktiver Software samt Aktorik bzw. Sensorik zum Einsatz kommen und weiterentwickelt.

## 6. Erzielte Ergebnisse

Das Projekt ECOMAI wurde erfolgreich abgeschlossen und alle geplanten Meilensteine erreicht. Im Zentrum stand die Entwicklung einer KI-erweiterten Motorsteuerung für robotergestützte Rehabilitation. Dazu wurde eine umfassende Entwicklungs- und Testumgebung für MedTech-Anwendungen geschaffen, die die Erfassung biologischer Signale (EMG, ExG) sowie Bewegungsdaten über Akzelerometer ermöglicht. Ergänzend wurde eine Echtzeit-Parameterextraktion mit einer Latenz von unter einer Millisekunde implementiert und die Steuerung motorisierter Aktuatoren realisiert. Für die Rehabilitation wurden mehrere Prototypen entwickelt: ein modulares Exoskelett für die Fingeraktuierung und ein Arm-Exoskelett mit lastabhängiger Stromregelung. Die KI-Modelle zur prädiktiven Steuerung basierten auf EMG- und Kinematikdaten und erreichten Echtzeitfähigkeit. Proof-of-Concept-Tests belegten eine deutliche Reduktion des Therapeutenaufwands von etwa 30 Minuten auf rund eine Minute pro Anwendung sowie eine hohe Korrelation zwischen vorhergesagten und tatsächlichen Bewegungen. Darüber hinaus leistete neuroConn Beiträge zu den Deliverables 3.2 („Architecture Definition for Ecological Motor Drive Systems“) und 3.3 („HW/SW Architecture Definitions“) sowie zu Deliverable 2.5 durch die Erstellung von Systemmodellen und Datensätzen für ökologische Motorantriebe. Hierzu gehörte auch die Aufzeichnung von Stromverbrauchsdaten bei Ellenbogenaktuation.

Die Zusammenarbeit mit den Projektpartnern ermöglichte die erfolgreiche Erprobung und Auswahl der praktikabelsten Lösung (MS 3) sowie das Design und die Implementierung der Steuerungssoftware für klinische Abläufe (MS 4). Die Integration und Validierung der Systeme wurde fristgerecht abgeschlossen. Die Dissemination der Ergebnisse war breit angelegt. Die entwickelten Konzepte und Prototypen markieren einen entscheidenden Fortschritt hin zu effizienteren, KI-gestützten Rehabilitationslösungen, die den klinischen Aufwand erheblich reduzieren und die Patientenversorgung verbessern. Sie sind elementare Voraussetzungen für zukünftige Forschungsprojekte und zukünftige Anwendungen im Bereich der Rehabilitation nach Schlaganfall.

### 6.1. Ziele & Arbeitspakete

Das Projekt ECOMAI verfolgt das Ziel, KI-gestützte, ökologische Motorantriebe für Anwendungen in der robotischen Rehabilitation zu entwickeln. Im Fokus der hier zusammengefassten Präsentation stehen die verbleibenden Use-Cases im Bereich eines Rehabilitationsrobotersystems. Kernziele sind

- a. eine lastabhängige Stromregelung für elektrische Antriebe und
- b. die Reduktion des erforderlichen Personaleinsatzes in der Rehabilitation auf etwa ein Drittel des heutigen Bedarfs.

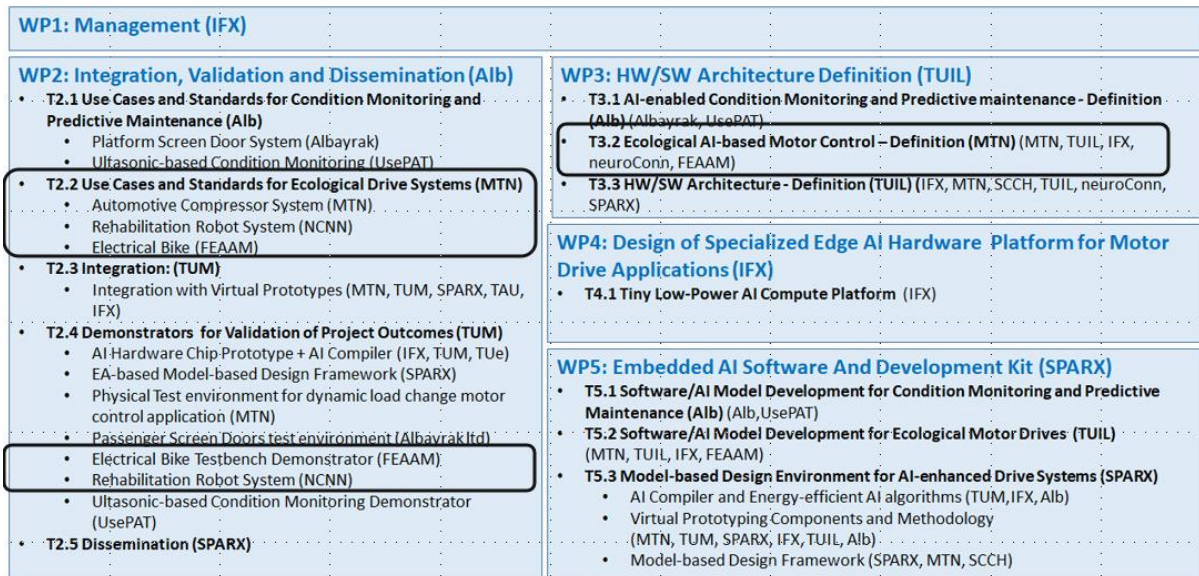


Abbildung 1: Überblick ECOMAI und Zuordnung zu Arbeitspaketen

### 6.2. Use-Cases: Arm- und Finger-Exoskelette

Für das Arm-Training (Arm Base Training, ABT) werden bei Patient:innen mit ausgeprägten Lähmungen die Bewegungen von Schulter, Ellbogen, Handgelenk und Fingern einzeln und systematisch bis an die Leistungsgrenze wiederholt. Ziel ist die schrittweise Wiederherstellung der Mobilität in den jeweiligen Gelenkabschnitten. Die Proof-of-Concept-Umsetzung nutzt ein Ellbogen-Exoskelett mit bürstenlosem Motor und Harmonic-Drive-Getriebe (Drehmoment bis ca. 9 Nm) und demonstriert die lastabhängige Stromregelung in nicht-stationären, biomedizinischen Anwendungsszenarien. Für das Fingertraining wurde ein modularer Exoskelettaufbau mit linearen Aktuatoren entwickelt, um einzelne Finger in Flexion und Extension zu bewegen. Dieser Aufbau adressiert den hohen Bedarf in der Neurorehabilitation (u. a. post Schlaganfall sowie bei muskuloskelettalen Einschränkungen) und dient als Grundlage für die Automatisierung repetitiver Therapiesequenzen.

ECOMAI | Technical Achievements

## NEURO Test environment for upper limb training system - Control in MedTech – Arm

Key project target: **Load** dependent **current** control.

Review > Nervenarzt. 2016 Oct;87(10):1057-1061. doi: 10.1007/s00115-016-0187-9.

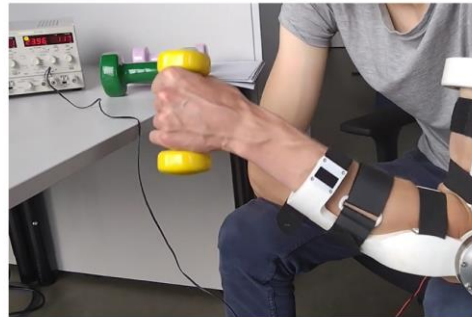
[Arm rehabilitation : Current concepts and therapeutic options]

[Article in German]  
T Platz <sup>1</sup>, L Schmuck <sup>2</sup>

Affiliations + expand  
PMID: 27531207 DOI: 10.1007/s00115-016-0187-9

### Arm base training.

In ABT for patients with severe paralysis, all possible movements of the arm (movements in the shoulder, elbow, wrist and fingers) are practiced individually and **systematically repeated** at the limit of performance. The aim is to restore mobility in the individual sections of the arm.



**Experiment.**  
10 passive curls  
Load: 0 kg, 1 kg and 2 kg



6 | Restricted

**Abbildung 2:** Arm-Exoskelett (Ellbogen) – Komponenten & Konzept

ECOMAI | Technical Achievements

## NEURO Test environment for upper limb training system - Control in MedTech – Finger

Key project target: **Reduce work-force** of professional therapists in rehab **to 1/3 of today's need.**



17 | Restricted



**Abbildung 3:** Finger-Exoskelett – modularer Aufbau

### 6.3. KI-Modelle & Nachweis in Simulation

Zur Ansteuerung der Permanentmagnet-Synchronmotoren wurde ein Feed-Forward-Drehmomentregler (Torque Control) in Zusammenarbeit mit MOTEON eingesetzt. Für die prädiktive Positionsbestimmung der Exoskelette (Gelenkwinkel) wurde ein Dual-Branch-Neuronales Netz entwickelt, das aktuelle EMG-Signale (Elektromyografie) mittels Faltungs- und Aufmerksamkeitsmechanismen analysiert und gleichzeitig die jüngste Kinematik-Historie verarbeitet.

# AI models- structure

NCNN: Feed-Forward Torque Control

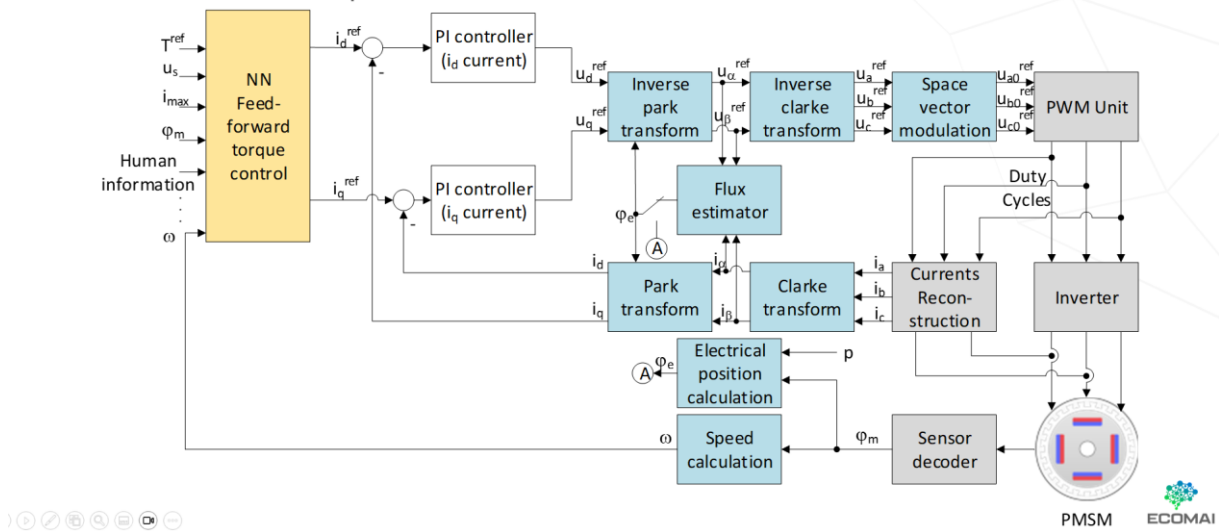


Abbildung 4: Feed-Forward Drehmoment-Regler

Damit entsteht ein physiologisch plausibles Modell, das Muskelaktivierungen und Gelenkstellungen kombiniert; die Inferenz erfolgt auf gleitenden Fenstern von ca. 10 ms.

Das Training der Modelle ist schnell (z. B. 50 Epochen in rund 90 Sekunden) und durch starke Regularisierung auf die jeweilige Session fokussiert. Die Inferenzlatenz liegt in Python bereits im Millisekundenbereich; auf dedizierter Echtzeit-Hardware wird eine Latenz von unter 1 ms erwartet. Die prädizierten kinematischen Größen korrelieren hoch mit den Referenzdaten; verbleibende Fehler werden u. a. auf die kurze Trainingsdauer zurückgeführt.

## NEURO Test environment for upper limb training system - Control in MedTech

Key project target: **AI based** motor control tailored towards a use case in **robotic rehabilitation**.

Use **EMG** to predict the proper position of exoskeleton (**joint angles**)

Uses a dual-branch architecture

- > First branch uses convolutional layers and an attention mechanism to identify the most important features from EMG. During training, EMG fed in here.
  - > Second branch uses its own mini-network to process the history of recent movements. During training, the corresponding kinematic data is fed in here.
- This architecture combines current EMG and past kinematics, which mirrors physiological processing of muscle activation and joint position. Each inference step is performed on a sliding window of 20 samples (10 milliseconds) of EMG.

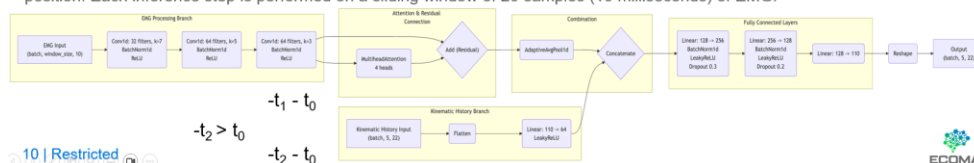
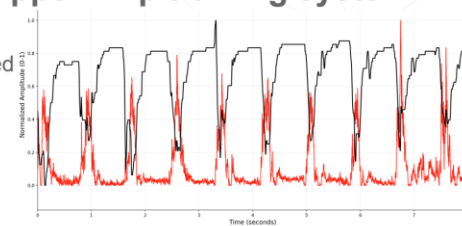


Abbildung 5: Dual-Branch-Netz (EMG + Kinematik) und Trainings-/Validierungsverläufe

ECOMAI | Technical Achievements

## NEURO Test environment for upper limb training system - Control in MedTech

Key project target: **AI based** motor control tailored towards a use case in **robotic rehabilitation**.



nC's real-time Platform  
11 | Restricted

Inference is fast with Python, and will be **less than 1ms on dedicated real-time hardware**

Validation is lower than training loss due to heavy regularization during training – each trained model does not have to generalize outside of a single session

Training is very fast – 50 epochs in 90 seconds

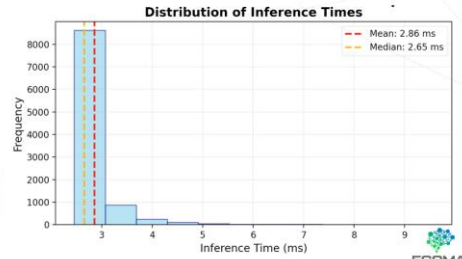


Abbildung 6: Training des Neuronalen Netzes (NN) für das Rehabilitationstraining

ECOMAI | Technical Achievements

## NEURO Test environment for upper limb training system - Control in MedTech

Key project target: **AI based** motor control tailored towards a use case in **robotic rehabilitation**.

Predicted kinematics (motor control parameters) highly correlated with ground truth

Error likely due to very short training (50 epochs)

12 | Restricted

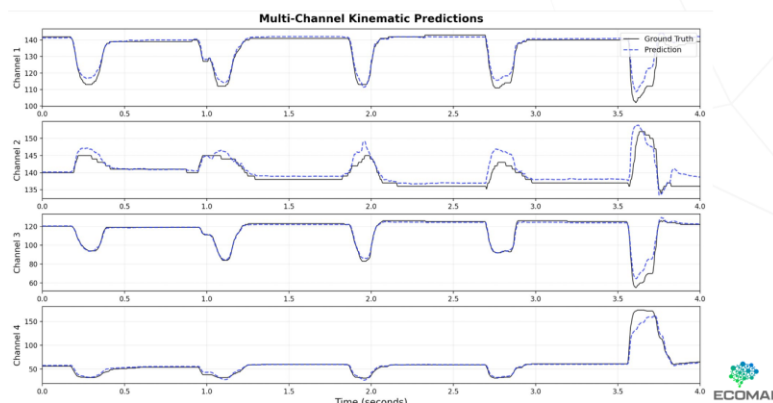


Abbildung 7: Validierung des NN der Mehrkanal-Kinematikvorhersage für das Armtraining

### 6.4. Testaufbauten & Ergebnisse

Im Arm-Setup wurden 10 passive Arm-Curls unter verschiedenen Lasten (0 kg, 1 kg, 2 kg) durchgeführt, um die Wirkung der lastabhängigen Stromregelung zu untersuchen. Im Finger-Setup absolvierten drei Probanden je zehn Zyklen aus Flexion und Extension bei denselben Lastniveaus; die Stromaufnahme stieg erwartungsgemäß mit zunehmender Last.

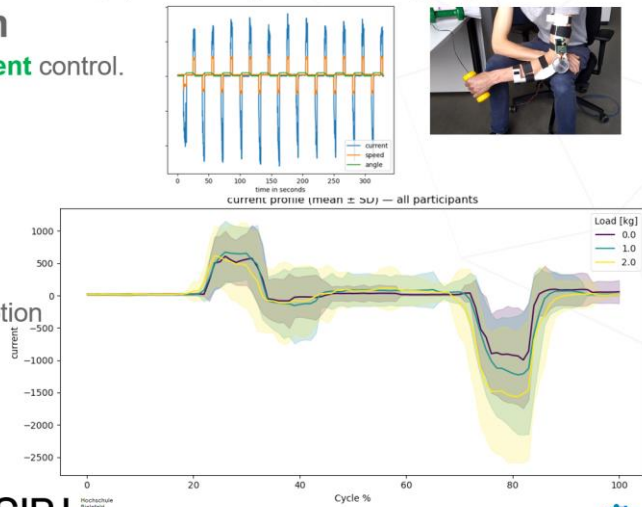
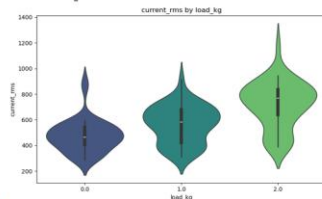
ECOMAI | Technical Achievements

## NEURO Test environment for upper limb training system - Control in MedTech – Arm

Key project target: **Load** dependent **current** control.

### Experiment :

- > 3 participants
- > Loads: 0 kg, 1 kg and 2 kg
- > 10 cycles of flexion and extension
- > **Load dependent current consumption**



16 | Restricted

HS'BI Hochschule Bochum University of Applied Sciences and Arts

ECOMAI

Abbildung 8: Lastabhängige Stromaufnahme bei Arm-Flexion/Extension

Für die Prozessvalidierung am Finger wurden zudem Abläufe mit neun Probanden und drei Operatoren evaluiert: Montage, Parametrierung/Programmierung und Demontage des Exoskeletts konnten in etwa einer Minute durchgeführt werden, wodurch sich der zeitliche Aufwand gegenüber konventionellen repetitiven Therapien (≈ 30 Minuten) drastisch reduzierte.

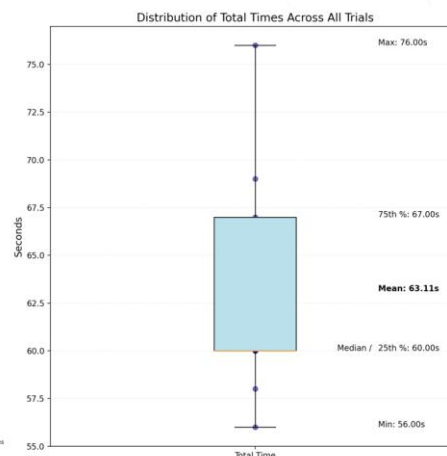
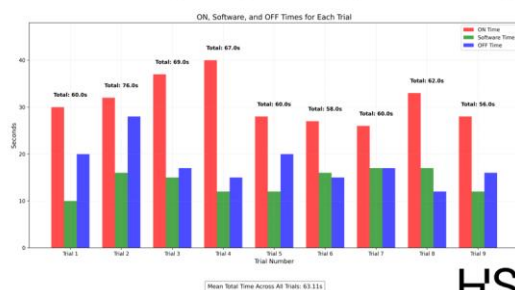
ECOMAI | Technical Achievements

## NEURO Test environment for upper limb training system - Control in MedTech – Finger

Key project target: **Reduce work-force** of professional therapists in rehab **to 1/3 of today's need.**

### Verification:

- > 9 participants / 3 operators
- > Mounting, programming, demounting



18 | Restricted

HS'BI Hochschule Bochum University of Applied Sciences and Arts

ECOMAI

Abbildung 9: Validierung des Finger-Rehabilitationssystems

## 6.5. Innovation & Einordnung zum Stand der Technik

Aktuell existiert kein verbreitetes KI-integriertes Exoskelettsystem, das gezielt für die Rehabilitation entwickelt ist. ECOMAI demonstriert die Integration menschlicher Informationen (EMG, Kinematik) unmittelbar in die Motorregelung und belegt die Machbarkeit durch Proof-of-Concept-Anwendungen am Arm sowie durch modulare Finger-Exoskelette. Die gezeigten Ergebnisse stützen zentrale Projekt-KPIs, insbesondere die Reduktion des erforderlichen Therapeuten-Einsatzes und die technische Realisierbarkeit einer lastabhängigen Stromregelung in realen, nicht-stationären Szenarien.

Ausblick: Die Überführung der Algorithmen auf eine echtzeitfähige Plattform mit < 1 ms Inferenz sowie erweiterte klinische Tests sind logische nächste Schritte. Ebenso empfiehlt sich die Skalierung der modularen Exoskelette auf weitere Gelenke und Patientengruppen sowie die Validierung der Effizienzgewinne (Therapiezeit, Personaleinsatz) in multizentrischen Studien.

## 7. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplanes

An dem im Antrag bzw. der Teilvorhabensbeschreibung getroffenen Annahmen kann weiterhin festgehalten werden. So gehen wir davon aus, dass unter den über 3.000 Kunden von neuroConn befinden sich etwa 800, die Neuromodulationstechnologien in der Rehabilitation einsetzen. Über das neurocare-Kliniknetzwerk (25 vorhandene Kliniken) und in angeschlossenen Partnerkliniken wird der Demonstrator von neuroConn für den Einsatz bei Patienten im Rahmen digitaler Therapiekonzepte für zu Hause weiterentwickelt. Die Markteinführung wird dann in Ländern erfolgen, in denen neurocare-Kliniken bereits vertreten sind bzw. über das Internet. Dies führt zu höherer Akzeptanz und ist ein möglicher Weg, im Moment fehlende klinische Daten und damit auch die Marktzulassung zu erhalten.

Intensivprogramme zur Arm- und Handrehabilitation nach Schlaganfall dauern 3 bis 6 Stunden täglich und gehen über einen Zeitraum von 10-15 Tagen. Eine Therapiestunde kostet im Schnitt zwischen 80 ... 120 €.

Für einen Fingerroboter setzen wir den Verkaufspreis unter Beachtung gegenwärtiger Preise und durch Hinzunahme der in diesem Projekt zu entwickelnden Ansteuerungs- und Überwachungstechnologien auf 25.500 € und für einen Armroboter auf 36.500 €. Diese Einmalinvestition liegt unter den jährlichen Personalkosten eines Physiotherapeuten. Eine weitere Kostenreduktion kann dann erfolgen, wenn genügend klinische Daten vorliegen.

	2026	2027	2028
<b>Fingerroboter</b>	127.500 €	510.000 €	3.825.000 €
<b>Armroboter</b>	182.000 €	730.000 €	5.475.000 €

### Zeithorizont

Während und nach Projektlaufzeit:  
drei bis fünf Jahre nach Projektende:

### Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

- Verkauf von Finger- und Armroboter bzw. Anbieten von Dienstleistungen in den neurocare-Kliniken und kooperierenden Rehabilitationseinrichtungen

Nach fünf Jahren nach Projektende

- Breitere Anwendungen der Finger- und Armrobotik ggf. auch im Heimbereich

### Zeithorizont

Während und nach Projektlaufzeit:

Drei bis fünf Jahre nach Projektende:

Nach fünf Jahren nach Projektende

### Wissenschaftliche Erfolgsaussichten

- Mindestens eine redigierte wissenschaftliche Veröffentlichung oder gleichwertige Konferenzteilnahme
- Start von mindestens einem Forschungsprojekt
- Mindestens eine Veröffentlichung bzw. Konferenzteilnahme, die zeigt, dass die Anwendungen der ECOMAI-KI Anwendungen in neurocare-Kliniken, Rehasentren und ggf. im Heimbereich zu einer Verbesserung der Behandlungsergebnisse führen

## 8. Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordene Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Es sind keine Fortschritte bei anderen Stellen bekannt geworden, die eine gleichwertige Technik für eine KI-erweiterte Motorsteuerung für robotergestützte Anwendungen für Finger-, Hand- und Armtraining in der medizinischen Rehabilitation entwickelten.

## 9. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

Während des Projektes wurden von der Firma neuroConn keine Veröffentlichungen vorgenommen. Eine IEEE-Veröffentlichung der neuroConn zusammen mit der HSBI ist für 2026 in Planung.

Der Arbeitstitel lautet:

**Akim Kapsalyamov, Alexander Hunold, Ethan Rich,** Rena Amelung, Hanno Gerd Meyer and Axel Schneider: Clinically Validated Hand Exoskeletons for Rehabilitation: A Systematic Review of Design Trade-offs and Usability Gaps