

# **Eingebettete Biosignalverarbeitung und integrierte Regelung eines Ganzkörper-Exoskelettes für die Neurorehabilitation**

## **Struktur und Verarbeitungsarchitektur des RECUPERA-Reha Exoskelettes**

Dr.-Ing. **H. Wöhrle**, DFKI Robotics Innovation Center, Bremen  
Dr. Elsa Kirchner, DFKI Robotics Innovation Center/Universität Bremen

### **Kurzfassung**

Ziel von RECUPERA-Reha ist die Entwicklung eines innovativen Exoskelettes, welches für die Rehabilitation von Schlaganfall-Patienten eingesetzt werden kann. Hierbei ist es von essentieller Bedeutung, dass die Kombination von elektromechanischen Innovationen, komplexen Kontrollarchitekturen und die Nutzung von physiologischen Signalen des Patienten miteinander kombiniert werden, damit unterschiedliche Trainingsmodalitäten unterstützt werden können. Durch die Kombination von hierarchischen Regelungsarchitekturen und Biosignalen kann das System Patienten genau in der Form unterstützen, dass Patienten im Rahmen der Rehabilitation optimal gefördert und gefordert werden. Um das System für den alltäglichen Gebrauch nutzbar zu machen, ist es dafür erforderlich, dass es autark von externer Hardware operieren kann. Dies macht den Einsatz alternativer Verarbeitungs- und Hardwarearchitekturen notwendig.

### **Abstract**

The aim of RECUPERA-Reha is the development of an innovative exoskeleton, which can be used for the rehabilitation of stroke patients. It is essential to combine the combination of electromechanical innovations, complex control architectures and the use of physiological signals from the patient in order to support different training modalities. The combination of hierarchical control architectures and biosignals enables the system to support patients precisely in the form that patients are optimally supported and challenged within the framework of rehabilitation. In order to make the system usable for everyday use, it is necessary that it can operate independently from external hardware. This requires the use of alternative processing and hardware architectures.

### **1. Einleitung**

Häufig sind Schlaganfälle verbunden mit schwerwiegenden motorischen Einschränkungen der Betroffenen und in Folge dessen deren Invalidität und Pflegebedürftigkeit. Durch gezielte

Therapiemaßnahmen können die Einschränkungen je nach Diagnose teilweise oder nahezu vollständig kompensiert werden. Infolge des demografischen Wandels ist jedoch mit einer starken Zunahme hinsichtlich der Inzidenz von Schlaganfällen auszugehen, so dass die hierdurch entstehenden Kosten für das Gesundheitssystem eine große Belastung bedeuten und eine angemessene Therapie der Schlaganfallpatienten kaum mehr möglich sein wird.

Als Versuchsmodell wurde am DFKI Robotics Innovation Center ein zweibeiniges Ganzkörper-Exoskelett entwickelt, welches Patienten gezielt bei der Therapie mittels neurorehabilitativer Techniken unterstützen kann. Das System bietet sowohl Übungsmöglichkeiten in der privaten Umgebung als auch neue Therapiemöglichkeiten für die klinische bzw. ambulante Therapie.

Aus den Anforderungen an das System aus therapeutischer Sicht und den Erfahrungen bei der Entwicklung von komplexen Robotersystemen am DFKI liegt ein Schwerpunkt bei der Entwicklung des Systems in der dezentralen, aus mehreren Schichten bestehenden Regelungs- und Verarbeitungsarchitektur. Diese ermöglicht eine an den jeweiligen Patienten angepasste Therapie, indem beispielsweise Patienten bei Bewegungen nur in dem Maße unterstützt werden, wie es erforderlich ist (assist-as-needed). Infolge dessen muss sich der Patient bei den Übungen aktiv beteiligen, was zu einer Verbesserung des Therapieerfolges führen kann. Die Anpassung der Regelung des Systems an den individuellen Bedarf des Patienten wird dabei mit Hilfe einer Echtzeit-Analyse physiologischer Daten (Elektroenzephalogramm und Elektromyogramm) ermöglicht, welche innerhalb des Systems durchgeführt wird. Diese erlaubt es, Bewegungsintentionen des Patienten zu detektieren und Aussagen über die Bewegungsfähigkeit des Patienten zu treffen, beispielsweise über die von dem Patienten selbst generierte Kraft bei der Bewegung einer Extremität.

Hinsichtlich der Datenmengen die für diese Zwecke analysiert werden müssen, ist dabei festzustellen, dass Eigenschaften vorliegen, die aus dem Bereich Big Data als die „Vier V“ bekannt sind. Volume (es werden extrem große Datenmengen erzeugt), Velocity (die Datenmengen werden mit großer Geschwindigkeit erzeugt, Ergebnisse sollen so schnell wie möglich vorliegen), Variety (die Daten können unterschiedlichster Natur sein) und Veracity (die Daten können von schlechter Qualität sein) [1]. Hierbei weist die Anwendung des RECUPERA-Reha jedoch Besonderheiten auf – es handelt sich um Mobile Big Data. Das System muss Echtzeitanforderungen genügen, jegliche Verzögerung in der Datenverarbeitung etwa in Folge von Netzwerklatenz ist nicht tolerierbar.

Folglich muss die Sensordatenverbreitung innerhalb des RECUPERA-Reha Exoskelettes durchgeführt werden. Hierbei gibt es jedoch wiederum eine Reihe weiterer Einschränkungen, die den Einsatz leistungsfähiger Rechner verhindern. Erstens ist der zur Verfügung stehende

Platz sehr gering, zweitens muss die Leistungsaufnahme minimal sein, um Akkulaufzeit zu maximieren und Wärmeentwicklung zu minimieren. Dies verhindert den Einsatz leistungsfähiger generischer Rechner – üblicherweise nehmen diese zusammen mit der notwendigen Elektronik zu viel Platz ein und weisen sie einen hohen Energieverbrauch auf.

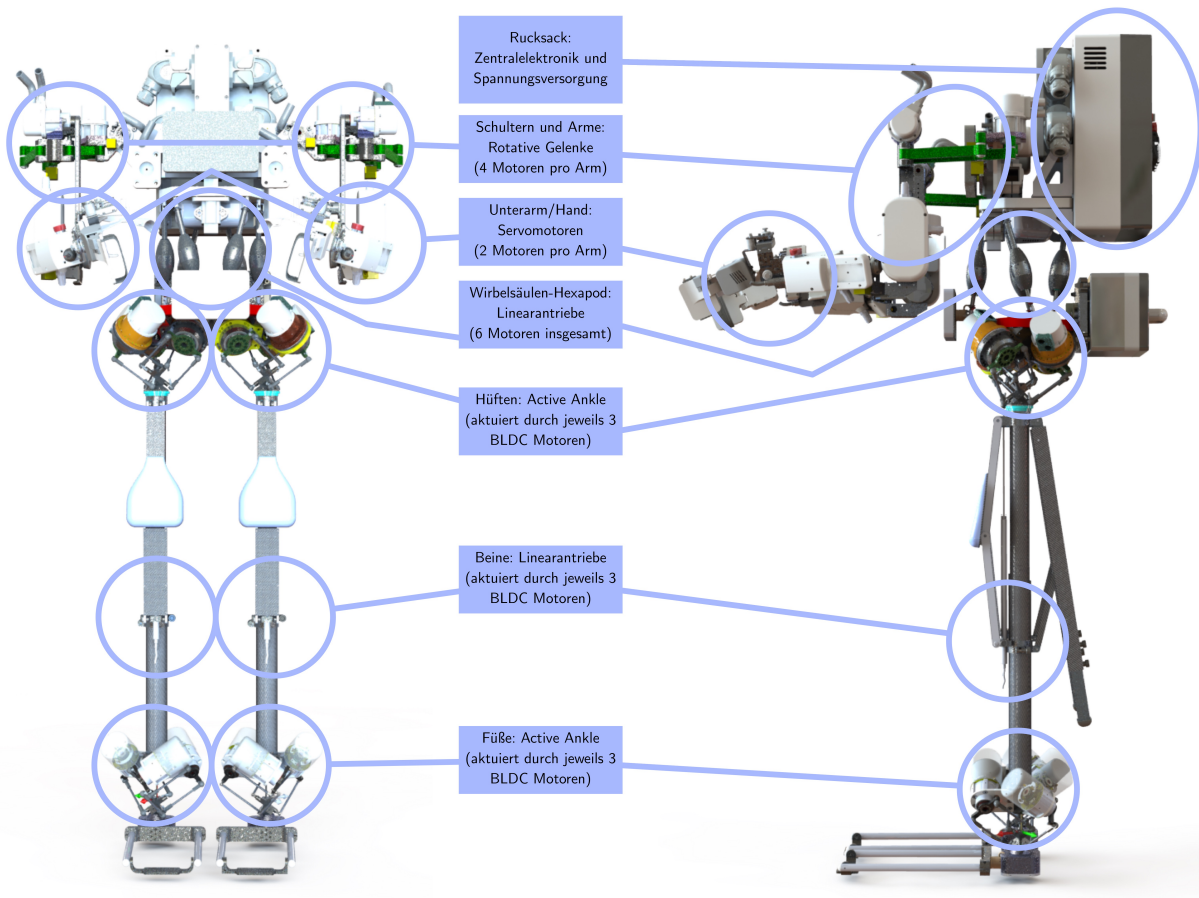
Ein wesentlicher Faktor bei der Implementierung der Regelungs- und Verarbeitungsarchitektur des Exoskelettes stellt daher die Verwendung rekonfigurierbarer Hardware in Form von FPGAs dar. Rekonfigurierbare Hardware ermöglicht es, herkömmliche Rechner zu ersetzen, was zu einer wesentlichen Steigerung der Rechengeschwindigkeit bei reduziertem Platz- und Energiebedarf führen kann.

Die erlaubt es, in dem RECUPERA-Reha Exoskelett eine dezentrale Low- bzw. First-Level-Regelung und Motorkommutierung auf Gelenkebene durchzuführen, die harten Echtzeitanforderungen genügt und einen wesentlichen Faktor für die Sicherheit des Systems darstellt. Eine weitere wichtige Funktion spielt rekonfigurierbare Hardware bei der Implementierung der übergeordneten Regulationsschichten, insbesondere bei der eingebetteten Biosignalverarbeitung. Die dabei eingesetzten komplexen und rechenaufwändigen Methoden der Signalverarbeitung und des maschinellen Lernens stellen insbesondere für eingebettete Systeme eine Herausforderung dar. Die Verwendung von maßgeschneiderten Signalverarbeitungsketten auf Basis von rekonfigurierbarer Hardware und Datenfluss-Architekturen ermöglicht jedoch die Integration dieser Operationen in das RECUPERA-Reha Exoskelett.

## **2. Mechanisch-Kinematisches System-Design des RECUPERA-Reha Exoskelettes**

Aufgrund des Anwendungsfokus des RECUPERA-Reha Exoskelettes als aktiv aktuierte Mensch-Maschine Schnittstelle ist es unerlässlich, dass schon die mechanischen Komponenten des Systems sowohl eine sichere, aber auch komfortable, Operation des Systems und damit einhergehend eine auf den Anwender zugeschnittene Unterstützung ermöglicht.

Um diese Anforderungen zu erfüllen, besteht das Exoskelett aus einer Reihe von eng zusammen arbeitenden seriellen und parallelen Mechanismen. Zum Zwecke der Aktuation kommen insgesamt sieben verschiedene Aktuatoren zum Einsatz, die je nach Einsatzzweck passend ausgewählt bzw. designt wurden.



**Abbildung 1: Aufbau des RECUPERA-Reha Exoskelettes. Links: Ansicht von Vorne, Rechts: Ansicht von der Seite.**

Das mechanische Design des Systems ist in Abbildung 1 dargestellt. Jedes Körperteil des Exoskelettes benötigt spezielle mechanische Konstruktionen, die den anatomischen Gegebenheiten des Menschen angepasst sind. Im einfachsten Falle, wie zum Beispiel in den Ellenbogen, kommen klassische rotative Antriebe zum Einsatz, wie sie in der Robotik häufig genutzt werden. Bei anderen Gelenken müssen jedoch komplexere Mechanismen eingesetzt werden. So kommen beispielsweise in den Fuß- und Hüftgelenken sogenannte *Active Ankles* zum Einsatz, die mittels einer Parallelkinematik ein nahezu kugelförmigen Bewegungsraum ermöglichen [1], während zur Aktuierung der Schulter eine seriellen Anordnung von Antrieben, die zusammen ein fünfgliedriges Koppelgetriebe bilden, verwendet wird. Dies erlaubt es, dass sich die Schultern um eine virtuelle Drehachse bewegen können, um den Bewegungsraum des menschlichen Schultergelenkes als Kugelgelenk zu unterstützen.

In diesen Fällen müssen jeweils mehrere Motoren genutzt werden, um ein einzelnes Gelenk zu aktuierten. Zum Zwecke der Aktuierung der aktiven Gelenke kommen dadurch insgesamt 28 unabhängige bürstenlose Gleichstrommotoren (engl. brushless direct current, BLDC) zum Einsatz, sowie vier Servo- und zwei Hilfsmotoren. Um allgegenwärtig einen Überblick über

den Zustand des Systems zu erhalten, werden eine Reihe von unterschiedlichen Sensoren verwendet (z.B. Positionencoder, Hall-Sensoren sowie Spannungs- und Stromsensoren in den Gelenken für Aktuation und Regelung der Motoren, Force-Torque-Sensoren an wichtigen Schnittstellen zwischen Mensch und System, sowie kapazitive Sensoren für Benutzerinteraktion mit dem Therapeuten).

Jeder dieser Motoren benötigt eine eigene Regelung, die lokal und in Echtzeit ausgeführt wird. Aus diesen Eigenschaften wird ersichtlich, dass für das RECUPERA-Reha Exoskelett komplexe, dezentrale Regelungsarchitekturen, und damit einhergehend, Sensorsignalverarbeitungs- und Rechenarchitekturen benötigt.

### 3. Datenverarbeitungs- und Regelungsarchitektur

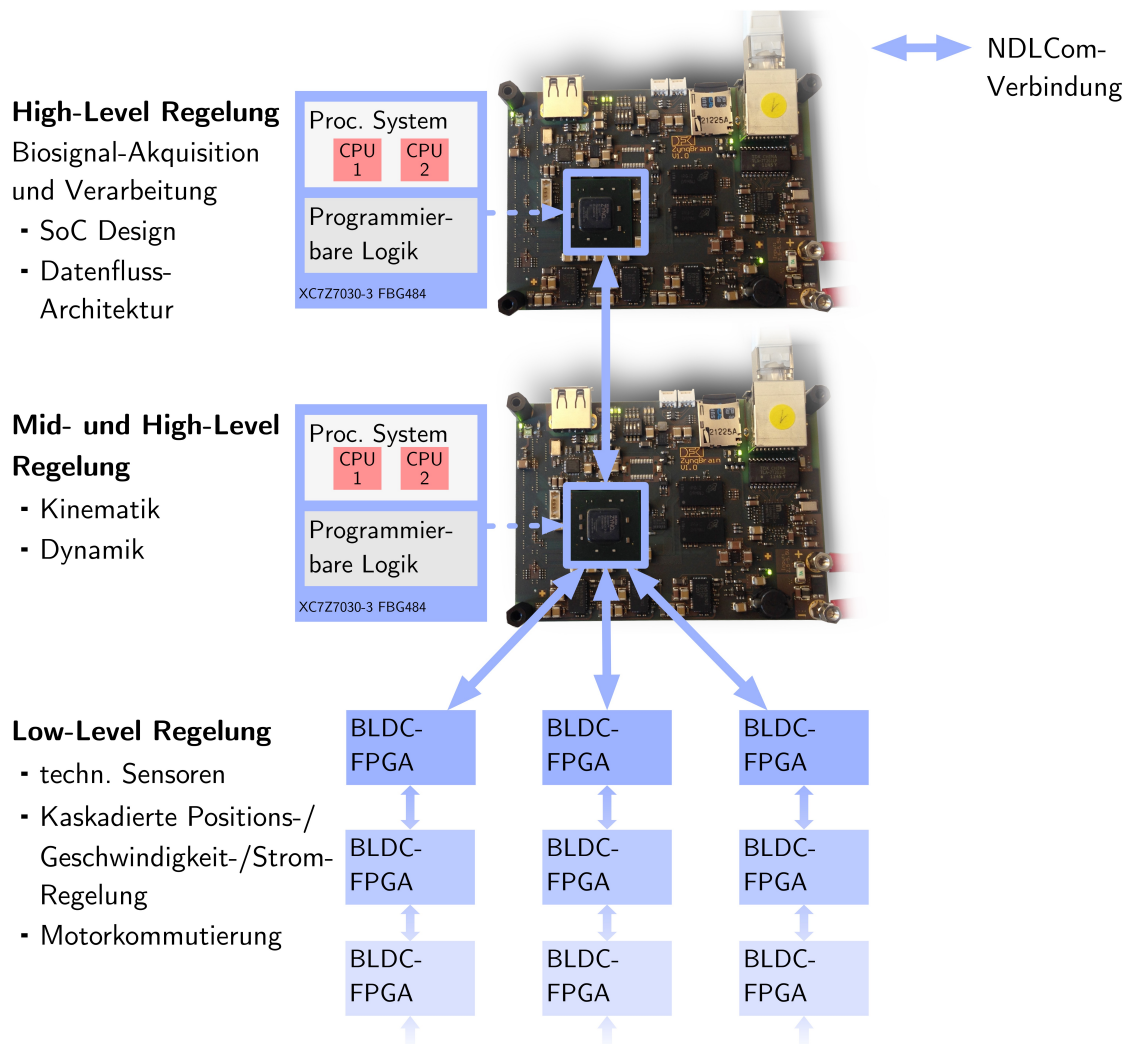
Die grundsätzliche Architektur der Datenverarbeitung und Regelung des RECUPERA-Reha Exoskelettes ist in Abbildung 2 dargestellt. Die Architektur folgt einem Schichtenmodell, welches in drei Schichten unterteilt ist:

- **Low- bzw. First-Level Regelung:** Auf dieser Ebene ist die Regelung eines einzelnen Motors angesiedelt
- **Mid-Level-Regelung:** Auf dieser Ebene ist die Implementierung der verschiedenen Betriebsmodi realisiert, um unterschiedliche Therapiemodi zur Verfügung zu stellen
- **High-Level-Regelung:** Diese Ebene dient der Bereitstellung übergeordneter Funktionen, wie beispielsweise die Benutzerinteraktion.
- Eine Besonderheit stellt die **Biosignal-Verarbeitung** dar, welche ebenfalls Teil der Mid- und High-Level Regelung ist.

Diese Verarbeitungsebenen sind unterschiedlichen Hardware-Komponenten zugeordnet, welche im Folgenden genauer beschrieben werden.

#### 3.1 Dezentrale First-/Low-Level-Regelung

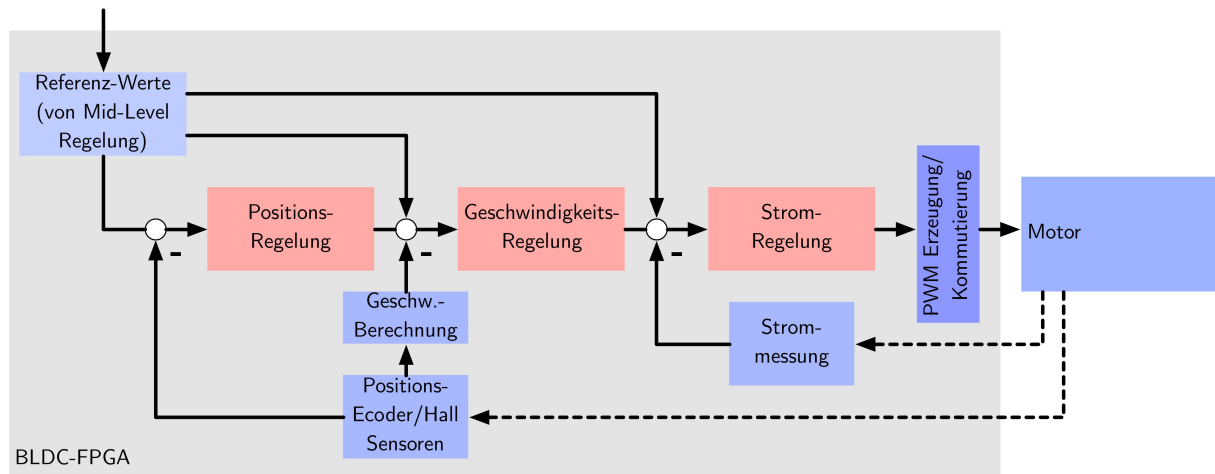
Jedes Subsystem des Exoskelettes besteht aus einer Reihe von unabhängig operierenden Gelenk-Elektroniken. Jede Gelenk-Elektronik enthält einen Spartan-6 FPGA als zentrale Komponente, welcher für die parallele Signalverarbeitung motorassoziierter Sensoren (z.B. Positionencoder und Hall-Sensoren) und die Regelung sowie Kommutierung der Motoren eingesetzt wird. Die Gelenk-Elektroniken sind in Abbildung 2 als BLDC-FPGA bezeichnet.



**Abbildung 2: Gundsätzliche Architektur der Datenverarbeitung im RECUPERA-Reha Exoskelett**

Die Gelenk-Elektroniken sind untereinander durch ein Netzwerk mit einer Baumstruktur, dem sogenannten Nodelevel-Data-Link Communication (NDLCOM) Protokoll verbunden [2]. Dieser modulare Ansatz hat eine Reihe von Vorteilen gegenüber einer rein zentralen Verarbeitungs- und Regelungsarchitektur: (1) Sensorsignale können direkt im Anschluss an die Akquisition verarbeitet werden, (2) die Regelung und Aktuation der Motoren kann in Echtzeit und nahezu verzögerungsfrei durchgeführt werden, (3) die notwendige Bandbreite des Gesamt-Netzwerkes innerhalb des Systems kann auf ein Minimum reduziert werden, (4) die einzelnen Subsysteme des Exoskelettes können unabhängig voneinander betrieben werden, und (5) erhöht der Ansatz die Robustheit und Sicherheit des Systems maßgeblich. Insbesondere der Punkt (5) ist von besonderer Bedeutung, da das System direkt mit Menschen im Kontakt steht. Um hierbei die Sicherheit zu erhöhen, besitzt jedes Gelenk

einen Satz von vordefinierten Minimal- und Maximalwerten zu einer Reihe von Parametern (beispielsweise Minimal- und Maximalposition bzw. -auslenkung des Gelenkes, maximaler Stromverbrauch/maximales Drehmoment und Geschwindigkeit), deren Einhaltung fortlaufend kontrolliert wird. Aufgrund der harten Echtzeitfähigkeit der eingesetzten FPGAs kann dann ohne Verzögerung auf Verletzungen dieser Bedingungen reagiert werden, um beispielsweise den jeweiligen Motor abzuschalten und dadurch Verletzungen des Patienten zu vermeiden.



**Abbildung 3: Lokale Sensorsignalverarbeitung, Regelung, und Motorkommutierung**

Die First-Level Regelung, d.h. die Regelung der einzelnen Aktuatoren des Systems wird ebenfalls unter harten Echtzeit-Bedingungen innerhalb der Gelenk-Elektroniken durchgeführt. Hierzu ist in jedem Gelenk ein kaskadierter PID-Regler implementiert, welcher aus jeweils einer Regelschleife für Positions-, Geschwindigkeits- und Strom-Regelung besteht, siehe Abbildung 3. Die Regelungsmodi können sowohl einzeln als auch in Kombination genutzt werden. Insbesondere die Stromregelung besitzt für das RECUPERA-Reha-Exoskelett eine große Bedeutung, da der von einem BLDC-Motor verwendete Strom proportional zu dem erzeugten Drehmoment ist. Dadurch kann eine Kraftregelung ermöglicht werden, die optimal auf die notwendige Unterstützung des jeweiligen Patienten zugeschnitten ist. Darüber hinaus ermöglicht dies eine Gravitationskompensation des Exoskelettes, d.h. es wird gewährleistet, dass das System das eigene Gewicht trägt.

#### 4.2 Zentrale Mid-Level-Regelung

Die Mid-Level-Regelung ist zentral in der ersten Verarbeitungseinheit des Ganzkörper-Systems implementiert. Alle Gelenk-Elektroniken senden in festen Intervallen Telemetrie-Nachrichten an die Zentralelektronik, welche die übermittelten Daten sammelt und miteinander kombiniert. Diese Telemetrie-Nachrichten werden, je nach Inhalt, mit Intervallen von 10 oder 20 ms verschickt. Auf der Basis des Inhaltes dieser Nachrichten kann der

Gesamtzustand des Systems ermittelt werden, was für komplexe Regelungsaufgaben, die über die reine Regelung eines einzelnen Motors hinausgehen, essentiell ist.

Insbesondere für die im Rahmen der Therapie-Konzepte eingesetzte *assist-as-needed*-Regelung ist es notwendig, dass die Dynamik des Systems und die Kräfte bzw. Drehmomente, welche ein Proband auf das System überträgt, bei der Regelung berücksichtigt werden.

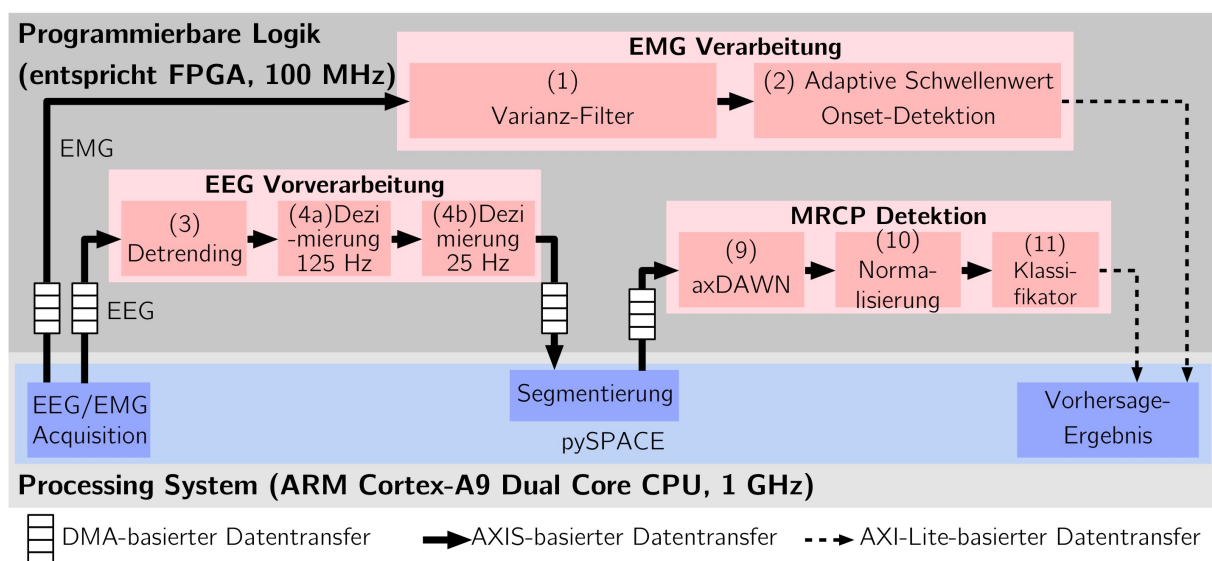
Um diese Aufgaben zu lösen und die große Menge der Daten der Gelenk-Elektroniken zu sammeln und zu verarbeiten, ist eine hohe Rechenleistung notwendig. Dennoch ist es ebenfalls unerlässlich, dass eine große Anzahl verschiedener Software-Bibliotheken mit unterschiedlichsten Anwendungsfällen genutzt werden kann. Daher wird als Zentralelektronik des RECUPERA-Reha Exoskelettes ein integriertes System-on-Chip (SoC) auf Basis des Xilinx Zynq® eingesetzt. Dieser besteht aus einem Zweikern Cortex A9-Prozessor und programmierbarer Logik, welche hinsichtlich der Funktionalität einem FPGA entspricht. Dieses Design ermöglicht es, mit Hilfe der CPU ein Linux-basiertes Betriebssystem mitsamt der Vielzahl der dadurch zur Verfügung stehenden Software-Bibliotheken zu nutzen. Dies ist insbesondere bei komplexen robotischen Anwendungen notwendig, um die vielfach in Bibliotheken implementierten Algorithmen mit wenig Aufwand in das System zu integrieren. Andererseits erlaubt dieser Ansatz es aber auch, Teile der Funktionen, die rechenaufwändig sind und/oder Echtzeitanforderungen unterliegen, in den FPGA-Teil des SoC auszulagern. Dadurch kann die Fähigkeit des FPGAs, Rechnungen massiv parallel auszuführen, genutzt werden.

## **5. Integrierte Biosignalverarbeitung**

Um die Regelung des RECUPERA-Reha Exoskelettes an die Bedürfnisse des Patienten anzupassen, werden fortlaufend dessen Biosignale ausgewertet. Hierbei stehen insbesondere zwei physiologische Signale im Fokus: das Elektromyogramm und das Elektroenzephalogramm. Mittels des Elektromyogramms können anhand der Muskelaktivität der Probanden Bewegungen verlässlich kurz (d.h. wenige ms) vor deren tatsächlicher Ausführung detektiert werden [3]. Eine Alternative stellt die Detektion von Bewegungen vor deren Ausführung stellt das EEG dar, welches die Bewegungen sogar schon bis zu einigen hundert ms vor deren Ausführung detektieren kann [4], sich jedoch auch als unzuverlässig und störungsanfällig erweisen kann. Am günstigsten ist daher die Kombination dieser beiden Modalitäten, da dadurch die jeweiligen Vorteile der beiden Modalitäten genutzt werden können, um beispielsweise die Verlässlichkeit der Bewegungsvorhersage zu erhöhen [5] [6].



Um Bewegungsintentionen der Patienten zu detektieren, müssen wie in Abbildung 4 dargestellt, eine Reihe von rechenaufwändigen Algorithmen aus den Bereichen der digitalen Signalverarbeitung und des maschinellen Lernens angewandt werden. Ein Problem stellen dabei die Dimension der Daten (z.B. kann das EEG mit bis zu 128 Kanälen und jeweils einer Sampling-Rate von 5 kHz akquiriert werden) und die angestrebte Unabhängigkeit des RECUPERA-Reha Exoskelettes dar, d.h. die gesamte Signalverarbeitung muss innerhalb des Systems ohne Unterstützung durch externe Rechner in Echtzeit durchgeführt werden. Hierbei erweisen sich klassische Rechnerarchitekturen für eingebettete Systeme als nicht ausreichend leistungsfähig.



**Abbildung 4: Verarbeitungsschritte zur Detektion von Bewegungen und korrespondierende Software-Hardware-Partitionierung.**

Aus diesem Grund wird, wie oben angemerkt, eine Software-Hardware-Partitionierung angewandt. Auf der Software-Seite basiert die Verarbeitung auf dem am DFKI RIC basierten Framework pySPACE [7], während die eigentliche Signalverarbeitung und Klassifikation in der programmierbaren Logik durchgeführt wird.

Ein solcher Ansatz verlangt jedoch die Anwendung einer spezifischen Rechnerarchitektur, die auf die Anwendung zugeschnitten ist. Aufgrund der typischen Struktur von Systemen, die für Signalverarbeitung und maschinelles Lernen eingesetzt werden, eignet sich hierbei insbesondere das sogenannte Datenflussparadigma [8]. Dieses stellt ein radikales Gegenmodell zu klassischen Prozessoren (sowohl die von-Neumann als auch die Harvard-Architektur) dar, welche instruktionsgesteuert operieren. Klassische kontrollflußgesteuerte Systeme sind zwar sehr generisch, weisen jedoch auch einige entscheidende Nachteile auf: (1) Inhärente Serialität – Parallelität muss durch den Entwickler explizit berücksichtigt werden, was sich häufig als komplex und fehleranfällig darstellt [9]. (2) Der Speicherzugriff

stellt einen Flaschenhals dar, da alle Daten im Hauptspeicher des Rechnersystems gespeichert sind und vor der Verarbeitung erst zum Prozessorkern transportiert werden müssen.

Diese Nachteile liegen bei Datenflussarchitekturen nicht vor. In Datenflussarchitekturen fließt ein Strom von Daten durch sog. Knoten bzw. Aktoren und wird dabei durch die in den Aktoren implementierten Algorithmen transformiert. Sobald Daten für einen Aktor vorliegen, wird dieser aktiviert und führt seine Operation auf den Daten aus. Aufgrund der inhärenten Parallelität der FPGAs können alle Aktoren als Pipeline agieren, d.h. zur gleichen Zeit schon auf unterschiedlichen Daten des Datenstromes operieren. Darüber hinaus können alle atomaren Operationen innerhalb eines einzelnen Knotens ebenfalls gleichzeitig aktiv sein. Eine solche Datenflussarchitektur weist nicht das Problem des Speicherzugriffs auf: die Daten werden direkt von Aktor zu Aktor weitergeleitet. Ein potenzieller Nachteil ist allerdings die Anwendungsspezifität der Datenflussarchitektur. Die realisierte Struktur liegt als Hardware vor, die auf die jeweils aktuelle Anwendung zugeschnitten ist. Durch die Verwendung von rekonfigurierbarer Hardware, wie in RECUPERA-Reha, ist es jedoch möglich, dass die Datenfluss-Systeme je nach Anwendung ausgewählt und aktiviert werden. Wie in [6] beschrieben, ergeben sich durch diese Strategie signifikante Verbesserungen hinsichtlich der Leistungsaufnahme und Verarbeitungszeit des Systems.

## **5. Daten sind das neue Gold – Datenserialisierung und –synchronisierung**

Insbesondere für wissenschaftliche Zwecke ist es unumgänglich, dass die Funktion eines technischen Systems genauestens überwacht und sämtliche Zustände protokolliert werden. Im Falle des RECUPERA-Reha Exoskelettes ist es aber ebenfalls notwendig, dass die technischen Daten des Systems stets mit den Daten abgeglichen werden, die Aufschluss über den Zustand des Patienten liefern. Für diese Zwecke wurde in RECUPERA eine Datenbankschnittstelle entwickelt, welche sämtliche Daten des Systems synchronisiert und effizient abspeichern kann.

Der Aufbau der Datenbankschnittstelle ist in Abbildung 5 dargestellt. Im Kern besteht die Schnittstelle aus zwei komplementären, verteilten NoSQL-Datenbanken. Zur Speicherung von Metadaten, welche die Konfiguration des Systems und Informationen über ein Experiment bzw. eine Anwendungssitzung enthalten, wird eine dokumentenbasierte Datenbank (MongoDB) eingesetzt. Die eigentlichen Daten, welche während der Anwendung aufgenommen werden (Biosignal- und Betriebsdaten des Systems), weisen hingegen eine Zeitreihen-Struktur auf. Um für diese Daten eine effiziente Speicherung und geeignete Zugriffsmöglichkeiten zur Verfügung zu haben, wird eine spaltenorientierte Datenbank

(Apache Cassandra) genutzt. Biosignal- und technische Daten werden mit Hilfe einer Realtime-Clock synchronisiert, die jedes Datenpaket mit einem akkuraten Zeitstempel versieht. Die Speicherung der Daten selbst ist nicht zeitkritisch und kann daher in externen Systemen mit großer Speicherkapazität erfolgen. Für den effizienten Transfer der Daten werden Google Protobuf und MQTT eingesetzt.

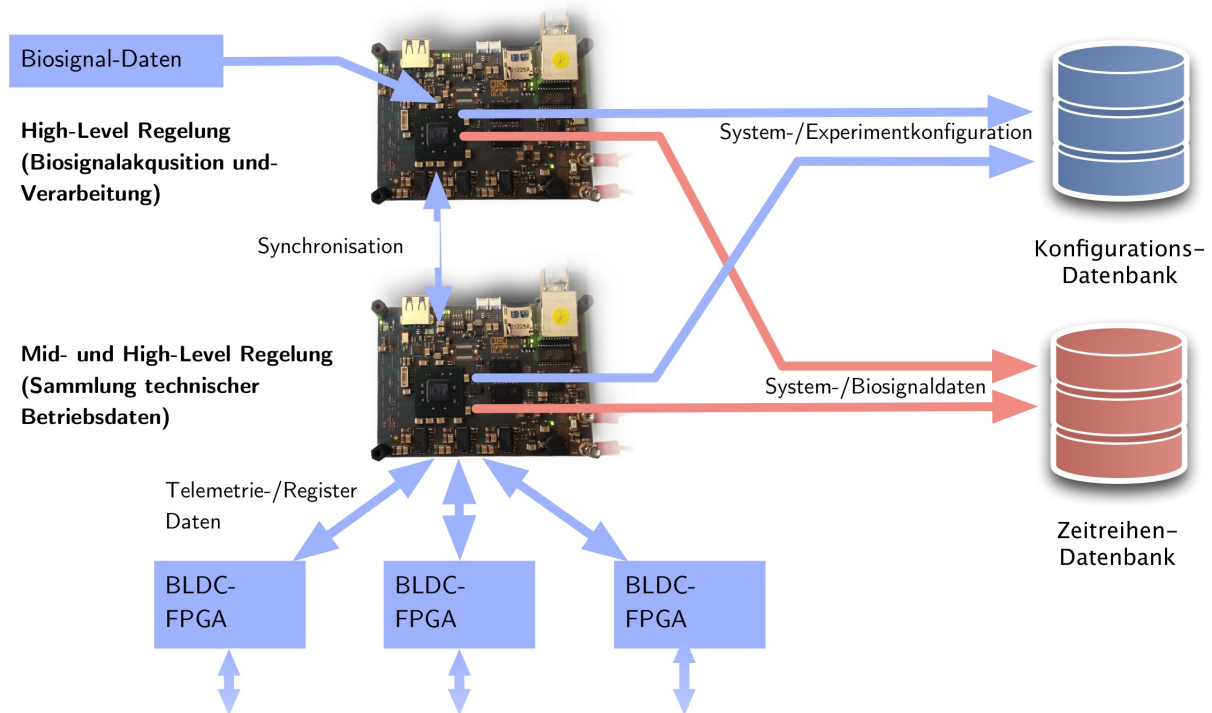


Abbildung 5: Monitoring des Systems und Datenspeicherung

## 6. Zusammenfassung und Ausblick

Auf Basis der Kombination der im RECUPERA-Reha eingesetzten Techniken ergibt sich ein leistungsfähiges Instrument, welches große Vorteile in zukünftigen Anwendungen für die Rehabilitation bietet. Darüberhinaus lassen sich eine Reihe von Methoden und Technologien, angefangen bei den Mechanismen über die Regelung und Kinematik bis hin zu den alternativen Rechnerarchitekturen, die in diesem Rahmen entwickelt wurden, jedoch auch zukünftig in anderen Anwendungsfeldern einsetzen.

In langfristigen Studien und Anwendungen sollen die Eigenschaften des Systems eingehend evaluiert und weitere Anwendungsfelder erschlossen werden.

## Danksagung

Diese Arbeit wurde im Rahmen des Vorhabens RECUPERA-Reha von der Raumfahrt-Agentur des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) mit Mitteln des

Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages unter dem Förderkennzeichen 01IM14006A gefördert.

## Literaturverzeichnis

- [1] IBM. The Four V's of Big Data. [Online]. <http://www.ibmbigdatahub.com/infographic/four-vs-big-data>
- [2] Marc Simnofske, Shivesh Kumar, Bertold Bongardt, and Frank Kirchner, "Active Ankle - an Almost-Spherical Parallel Mechanism," in *47th International Symposium on Robotics (ISR 2016)*, München, 2016, pp. 37-42.
- [3] Martin Zenzes, Peter Kampmann, Tobias Stark, and Moritz Schilling, "NDLCom: Simple Protocol for Heterogeneous Embedded Communication Networks," in *Proceedings of the Embedded World Exhibition & Conference*, Nürnberg, 2016, pp. -.
- [4] Marc Tabie and Elsa Andrea Kirchner, "EMG Onset Detection - Comparison of different methods for a movement prediction task based on EMG," in *Proceedings of the 6th International Conference on Bio-inspired Systems and Signal Processing*, Barcelona, 2013.
- [5] Anett Seeland, Laura Manca, Frank Kirchner, and Elsa Andrea Kirchner, "Spatio-temporal Comparison between ERD/ERS and MRCP-based Movement Prediction," in *Proceedings of the 8th International Conference on Bio-inspired Systems and Signal Processing (BIOSIGNALS-15)*, Lissabon, 2015.
- [6] Elsa Andrea Kirchner, Anett Seeland, and Marc Tabie, "Multimodal Movement Prediction - Towards an Individual Assistance of Patients," *PLoS ONE*, vol. 9, no. 1, 2014.
- [7] Hendrik Wöhrle, Marc Tabie, Su-Kyoung Kim, Frank Kirchner, and Elsa Andrea Kirchner, "A Hybrid FPGA-Based System for EEG- and EMG-Based Online Movement Prediction," *MDPI Sensors*, vol. 17, no. 1552, pp. -, July 2017.
- [8] Mario Michael Krell et al., "pySPACE - a signal processing and classification environment in Python," *Frontiers in Neuroinformatics*, vol. 7, no. 40, 2013.
- [9] Edward A. Lee and David G. Messerschmitt, "Synchronous data flow," *Proceedings of the IEEE*, vol. 75, no. 9, 1987.
- [10] Krste Asanovic, Rastislav Bodik, and et. al., "A view of the parallel computing landscape," *Communications of the ACM*, vol. 52, no. 10, 2009.