



Benjamin Plöchl, BSc

**Redesign des Neurorehabilitationsgerätes TYMO® aus technischer,
therapeutischer und wirtschaftlicher Sicht**

MASTER'S THESIS

to achieve the university degree of

Diplom-Ingenieur

Master's degree programme: Bioimaging and Bioinstrumentation

Submitted to

Graz University of Technology

Supervisor

Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn., Jörg Schröttner

Institut für Health Care Engineering

mit Europaprüfstelle für Medizinprodukte

Ing. Valentin Cee

Tyromotion GmbH

Graz, July 2017

EIDESSTÄTLICHE ERKLÄRUNG

AFFIDAVIT

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die fangegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit.

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.

Datum / Date

Unterschrift / Signature

Die Technische Universität Graz übernimmt mit der Betreuung und Bewertung einer Masterarbeit keine Haftung für die erarbeiteten Ergebnisse: Eine positive Bewertung und Anerkennung (Approbation) einer Arbeit bescheinigt nicht notwendigerweise die vollständige Richtigkeit der Ergebnisse.

Kurzzusammenfassung

Der Schlaganfall ist weltweit eine der Hauptursachen für Behinderungen. Häufige Folgen sind beispielsweise Beinschwäche, sensorischer Verlust und Gleichgewichtsprobleme. Das Neurorehabilitationsgerät TYMO® der Tyromotion GmbH ist ein sensorbasiertes Rehabilitationsgerät zur Therapie der unteren Extremität. Durch eine eingehende Analyse des IST-Standes sollen mögliche Verbesserungspotentiale aus technischer, therapeutischer und wirtschaftlicher Sicht erarbeitet werden. Durch das Redesign des Geräteaufbaues, der Elektronik zur Messdatenerfassung und der Firmware konnten diese Verbesserungspotentiale umgesetzt werden. Dank des Redesigns konnte ein vereinfachter Geräteaufbau, eine genauere Kraft- und Neigungsmessung sowie eine vereinfachte Bedienung des Gerätes erreicht werden. Dadurch kann die Qualität der Therapie gesteigert und zukünftige Therapieansätze ermöglicht werden.

Schlüsselwörter: Rehabilitation, Redesign, Gleichgewicht, Elektronik, Kraftmessung, Neigungsmessung

Abstract

Stroke is one of the leading causes of disability worldwide. Common consequences are, for example, leg weakness, sensory loss and balance problems. The TYMO® neurorehabilitation device from Tyromotion GmbH is a sensor-based rehabilitation device for the treatment of the lower extremity. Through an in-depth analysis of the actual state, potentials for improvement from a technical, therapeutic and economic perspective will be developed. Due to the redesign of the device, the electronics for data acquisition and the firmware, these improvement potentials could be implemented. Based on the redesign, a simplified device structure, a more precise force and tilt measurement as well as improved usability of the device could be achieved. In this way, the quality of the therapy can be increased and future therapeutic approaches can be made possible.

Keywords: rehabilitation, redesign, balance, electronics, force measurement, tilt measurement

Inhalt

| | | |
|--------|---|----|
| 1. | Einleitung | 8 |
| 2. | Aufgabenstellung | 11 |
| 3. | Methoden | 12 |
| 3.1. | Erarbeiten von Verbesserungsvorschlägen | 12 |
| 3.2. | Bewertung der Verbesserungsvorschläge | 14 |
| 3.2.1. | Aufwand-Nutzen Analyse | 15 |
| 3.2.2. | Beispiel zur Bewertung von Verbesserungsvorschlägen | 15 |
| 3.3. | Definition der Anforderungen an das Redesign | 16 |
| 3.4. | Auslegung und Dimensionierung der Messelektronik | 17 |
| 3.4.1. | Auslegung Kraftmessung | 17 |
| 3.4.2. | Auslegung Winkelmessung | 26 |
| 3.4.3. | Aspekte der elektrischen Sicherheit | 29 |
| 3.5. | Entwicklung der Firmware | 31 |
| 3.5.1. | Handling der Peripherie | 32 |
| 3.6. | Methoden zur Verifizierung der Messdaten | 33 |
| 3.6.1. | Kolmogorov-Smirnov Test | 33 |
| 3.6.2. | Verifizierung der Kraftmessung | 33 |
| 3.6.3. | Verifizierung der Winkelmessung | 34 |
| 3.6.4. | Verifizierung der Bluetooth-Übertragung | 35 |
| 3.6.5. | Verifizierung des Energiemanagements | 36 |
| 4. | Ergebnisse | 37 |
| 4.1. | Erarbeitete Verbesserungsvorschläge | 37 |
| 4.2. | Bewertung der Verbesserungsvorschläge | 40 |
| 4.3. | Definition der Anforderungen an das Redesign | 41 |
| 4.4. | Umsetzung der Verbesserungspotentiale | 43 |

| | | |
|----------|--|----|
| 4.4.1. | Redesign des Geräteaufbaus und Optimierung der Usability | 43 |
| 4.4.2. | Auswahl kritischer Komponenten | 49 |
| 4.4.3. | Redesign der Elektronikplatine..... | 54 |
| 4.4.4. | Redesign der Firmware..... | 56 |
| 4.5. | Messergebnisse zur Verifizierung der Anforderungen..... | 59 |
| 4.5.1. | Messergebnisse zur Verifizierung der Kraftmessung | 59 |
| 4.5.1.2. | Messergebnisse zur | 61 |
| 4.5.2. | Verifizierung der Winkelmessung..... | 66 |
| 4.5.3. | Verifizierung der Bluetooth Verbindung | 73 |
| 4.5.4. | Verifizierung der Energieversorgung..... | 74 |
| 5. | Diskussion | 76 |
| 5.1. | Diskussion der Methoden..... | 76 |
| 5.1.1. | Erarbeiten von Verbesserungsvorschlägen | 76 |
| 5.1.2. | Aufwand-Nutzen Analyse | 76 |
| 5.2. | Diskussion der Ergebnisse | 77 |
| 5.2.1. | Redesign des Geräteaufbaus | 77 |
| 5.2.2. | Auswahl kritischer Komponenten | 77 |
| 5.2.3. | Redesign der Elektronik..... | 77 |
| 5.2.4. | Redesign der Firmware..... | 79 |
| 5.2.5. | Verifizierung der Messgenauigkeit der Kraftmessung | 80 |
| 5.2.6. | Verifizierung der Winkelmessung..... | 81 |
| 5.2.7. | Verifizierung der Bluetooth Verbindung | 82 |
| 6. | Schlussfolgerung | 83 |
| 7. | Literatur..... | 84 |
| 8. | Anhang | 86 |
| 8.1. | Ergebnisse..... | 86 |

| | | |
|--------|---|----|
| 8.1.1. | Messergebnisse der Kraftmessungen | 86 |
| 8.1.2. | Messergebnisse der Winkelmessung | 90 |
| 8.1.3. | Messergebnisse der Bluetooth Verbindungsmessung | 91 |

Abkürzungen

| | |
|---------|-----------------------------------|
| ADC | Analog Digital Converter |
| CAPA | Corrective and Preventive Actions |
| CMRR | Common Mode Rejection Ratio |
| DAC | Digital Analog Converter |
| FCC | Federal Communications Commission |
| IC | Integrated Circuit |
| IQR | Interquartile Range |
| KS-Test | Kolmogorov-Smirnov-Test |
| LSB | Least Significant Bit |
| MCU | Micro Control Unit |
| PDI | Program and Debug Interface |
| RTC | Real Time Counter |
| SEM | Standard Error of the Mean |
| TR3 | TYMO® Revision 3 (Referenzdesign) |
| TR4 | TYMO® Revision 4 (Redesign) |

1. Einleitung

Der Schlaganfall ist weltweit eine der Hauptursachen für Behinderungen. Die Folgen eines Schlaganfalls können sowohl physische, als auch kognitive und psychologische Beeinträchtigungen beinhalten. Physische Symptome, die häufig nach einem Schlaganfall auftreten sind zum Beispiel Beinschwäche, sensorischer Verlust sowie Gleichgewichtsprobleme. Bei mehr als 50% der Patienten verlangsamt sich der Gang, sodass es zu Beeinträchtigungen im Alltag des Betroffenen kommt. Etwa 30% der Patienten leiden unter Funktionsverlust in einer der oberen Extremitäten. Die Wiederherstellung von Gehfähigkeit sowie Arm- / Handfunktion ist daher ein wesentliches Ziel der Rehabilitation. [1]
[2]

Ansätze für die Rehabilitation umfassen im Wesentlichen zwei grundlegende Prinzipien. Zum einen besitzt das zentrale Nervensystem die Fähigkeit der Adaption oder Neuroplastizität und ist somit in der Lage sich selbst zu reorganisieren um verlorene kognitive und motorische Fähigkeiten wiederherzustellen. Zum anderen ist jedoch nach dem Auftreten eines Schlaganfalles ein fortlaufendes und fachgerechtes Training der motorischen Fähigkeiten notwendig. Ein wirkungsvolles Training muss daher vor allem die Aufmerksamkeit und die Motivation des Patienten ansprechen und fordern. [3]

Tyromotion® gehört zu den weltweit führenden Herstellern von robotik- und computergestützte Rehabilitationsgeräten. Der Fokus des Unternehmens liegt auf der Erforschung und Entwicklung von Technologien durch den Einsatz von leistungsfähigen mechatronischen Systemen in der Rehabilitation. Diese Systeme unterstützen Ärzte und Therapeuten bei der Erreichung ihres Zieles, Patienten schneller und motivierender durch den Rehabilitationsprozess zu begleiten. [4]

TYMO® ist ein sensorbasiertes Rehabilitationsgerät für statische und dynamische Therapieanwendung (Abbildung 1). Durch das kompakte und kabellose Design sind eine Vielzahl an Therapieoptionen möglich, wie beispielsweise das Verbessern des Gleichgewichts und der posturalen Kontrolle, oder des aktiven Krafteinsatzes und der Stützaktivität der oberen Extremitäten. [4]

Unter posturaler Kontrolle versteht man das Erhalten, Erlangen oder Wiederherstellen der Balance während einer Aktivität in aufrechter Körperhaltung. [5]



Abbildung 1: Rehabilitationsgerät TYMO® [4]

Das Gerät gleicht vom grundsätzlichen Aufbau einem Balance-Board, verfügt jedoch zusätzlich über eine elektronische Kraft- und Winkelmessung. Durch vier Kraftsensoren an der Unterseite können die Bodenreaktionskräfte senkrecht zur Therapie-Platte gemessen werden. So kann beispielsweise der Schwerpunkt oder das Gewicht eines auf dem Gerät stehenden Patienten erfasst werden (Abbildung 2). Mit Hilfe der Winkelmessung kann die Neigung der Therapieplatte gemessen werden. Durch das Anbringen von Rollkörpern an der Unterseite des Gerätes ist das Trainieren der Balance möglich (Abbildung 3). Durch den integrierten Akku und die kabellose Datenübertragung via Bluetooth zum PC ist das Gerät mobil und kann vielseitig eingesetzt werden.

Durch die Auswertung und Anzeige der Messdaten in einer entsprechenden Software erhalten sowohl der Patient als auch der Therapeut Feedback über den Verlauf der aktuellen Therapie. In sogenannten Assessments lassen sich Parameter wie Schwerpunkts-Verteilung und Auftrittskraft bestimmen. Mit Hilfe von Therapiespielen können aufgabenorientierte Übungen mit spielerischem Hintergrund durchgeführt werden. Dadurch ist es möglich eine motivierende und interaktive Therapie zu gestalten.

Seit der Markteinführung des Gerätes hat sich gezeigt, dass durch die permanente Weiterentwicklung von Therapie und Technologie, aber auch die Erfahrungen, welche im Laufe der Anwendung gesammelt werden konnten, potentielle Verbesserungen des Gerätes möglich sind. Diese Verbesserungen sollen im Zuge eines Redesigns in das aktuelle Gerätedesign einfließen und so zur kontinuierlichen Verbesserung und Weiterentwicklung der zahlreichen Aspekte des Therapiegerätes beitragen.



Abbildung 2: Messung des Schwerpunktes durch Kraftmessung [6]



Abbildung 3: Messung des Neigungswinkels durch Anwendung mit einem Rollkörper [6]

2. Aufgabenstellung

Im Zuge dieser Arbeit soll ein Redesign des Rehabilitationsgerätes TYMO® durchgeführt werden. Hierfür werden die aktuellen Vor- und Nachteile des Gerätes sowie Verbesserungsvorschläge aus technischer, therapeutischer und wirtschaftlicher Sicht erfasst und bewertet. Aus den bewerteten Verbesserungsvorschlägen sollen die Anforderungen an das Redesign erarbeitet werden.

Die Umsetzung der Verbesserungspotentiale soll durch das Redesign des Geräteaufbaus, der Elektronik sowie der Firmware erfolgen. Hierbei ist darauf zu achten, die daraus resultierenden Veränderungen am Gerät so effizient wie möglich zu gestalten, um die bereits vorhandenen Ressourcen des Unternehmens bestmöglich auszunutzen. Bei dem Redesign der Elektronik-Hardware ist besonders die Auslegung der Kraftmessung sowie der Winkelmessung des Gerätes zu beachten.

Für die neu entwickelte Firmware zur Messdatenerfassung und Kommunikation muss die Kompatibilität zur bestehenden Software gegeben sein. Sofern Verbesserungspotentiale bestehen, sollen zusätzliche Gerätefunktionen mit Hilfe der Firmware integriert werden. Bei der Entwicklung der Firmware ist auf eine gute Wartbarkeit und Erweiterbarkeit des Source-Codes zu achten.

Nach erfolgtem Redesign sollen die durchgeführten Verbesserungen an einem Prototyp oder einem Nullseriengerät verifiziert werden. Die Wirksamkeit der Maßnahmen soll auch durch Vergleichsmessungen der wichtigsten Geräteeigenschaften zwischen Referenzmodell und Redesign überprüft werden.

3. Methoden

3.1. Erarbeiten von Verbesserungsvorschlägen

Das Redesign des Rehabilitationsgerätes TYMO® soll ein breites Spektrum an Verbesserungspotentialen beinhalten. Daher wird im Zuge der Vorbereitung versucht ein möglichst umfangreiches Bild der IST-Situation zu erheben. Gemäß der Aufgabenstellung stehen bei dem Redesign die folgenden drei Aspekte im Vordergrund:

- Therapeutische Aspekte
- Technische Aspekte
- Wirtschaftliche Aspekte

Im Bereich der Therapie sollen Maßnahmen getroffen werden, welche die Arbeit von Therapeuten erleichtern, und bessere und möglicherweise neue Therapiemöglichkeiten für Patienten bieten.

Technische Aspekte beinhalten Verbesserungsmaßnahmen, welche zum Beispiel aufgrund von neueren Technologien oder gesteigertem Knowhow getroffen werden können.

Das Redesign soll nach Möglichkeit auch die Wirtschaftlichkeit des Gerätes verbessern. Mögliche Vereinfachungen, wie etwa im Gerätedesign oder der Montage, können sich beispielsweise positiv auf den Produktionsprozess und somit auf die Kosteneffizienz des Gerätes auswirken.

Um die oben genannten Aspekte ausreichend berücksichtigen zu können, ist es notwendig die möglichen Verbesserungsvorschläge aus mehreren unterschiedlichen Blickwinkeln zu erarbeiten. Wesentliche Einflüsse auf das Redesign können daher aus den folgenden Bereichen stammen:

- Therapie
- Qualitätsmanagement
- Vertrieb
- Qualitätssicherung
- Produktion
- Entwicklung

In Abbildung 4 sind die Bereiche, welche sich auf das Redesign auswirken können grafisch dargestellt.

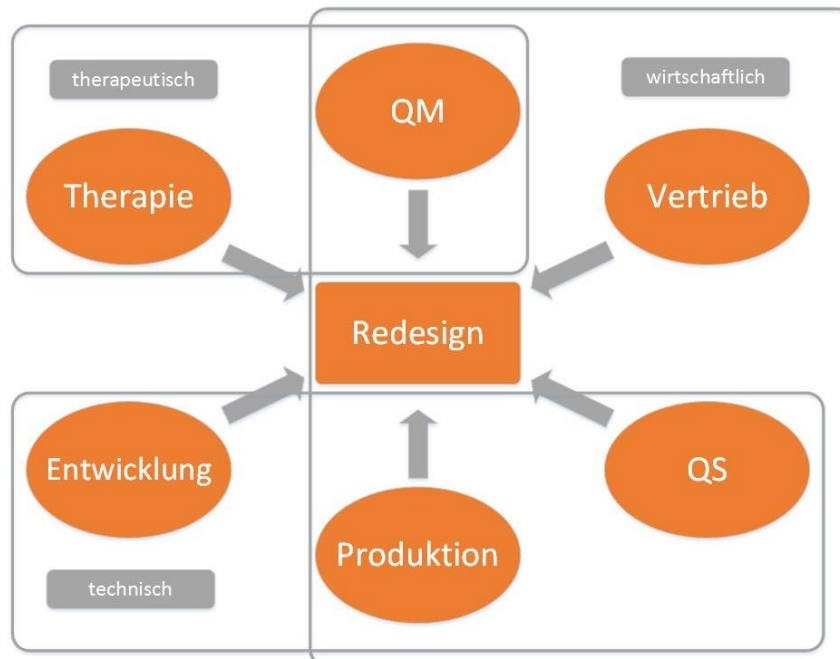


Abbildung 4: Wesentliche Einflüsse auf das Redesign und Arten von Verbesserungspotentialen

Um aus jedem Einflussbereich optimale Ergebnisse zu erhalten, wurden je nach Bereich unterschiedliche Ansätze gewählt um Verbesserungsvorschläge zu erarbeiten. Teilweise kann auf Qualitätsmanagement Werkzeuge wie etwa einen kontinuierlichen Verbesserungsprozess zurückgegriffen werden. In vielen Fällen, wie zum Beispiel der Produktion, lassen sich mögliche Verbesserungsvorschläge durch die Analyse des Produktionsprozesses, sowie persönliche Gespräche und Befragungen der Produktionsmitarbeiter erfassen. In Tabelle 1 sind die Ansätze zum Erfassen von Verbesserungsvorschlägen aufgelistet.

Tabelle 1: Ansätze zum Erfassen von Verbesserungsvorschlägen

| Einflussbereich | Ansätze zum Erarbeiten von Verbesserungsvorschlägen |
|---------------------|---|
| Therapie | <ul style="list-style-type: none"> • Befragung von Therapeuten |
| Qualitätsmanagement | <ul style="list-style-type: none"> • Kontinuierlicher Verbesserungsprozess • CAPA |
| Vertrieb | <ul style="list-style-type: none"> • Auswertung von Kundenfeedback und Feedback von Vertriebsmitarbeitern |
| Qualitätssicherung | <ul style="list-style-type: none"> • Auswertung von Reklamationsdaten • Auswertung von in-process controls |
| Produktion | <ul style="list-style-type: none"> • Analyse des Produktionsprozesses • Befragung von Produktionsmitarbeitern |
| Entwicklung | <ul style="list-style-type: none"> • Analyse des Gerätedesigns • Kontinuierlicher Verbesserungsprozess |

3.2. Bewertung der Verbesserungsvorschläge

Aufgrund der Vielzahl an Verbesserungsvorschlägen ist es sinnvoll, eine Bewertung und Priorisierung dieser durchzuführen. Dadurch soll außerdem eine effiziente und strukturierte Umsetzung der Maßnahmen gewährleistet werden.

Zuerst werden die Verbesserungsvorschläge danach bewertet, ob deren Umsetzung im Rahmen dieser Arbeit möglich ist. Dies trifft beispielsweise nicht für die Bereiche Software und Konstruktion zu. Diese möglichen Verbesserungen werden jedoch an die entsprechenden Bereiche kommuniziert.

Anforderungen, die aus unterschiedlichen Bereichen entstammen, jedoch dieselbe Verbesserungsmaßnahme zur Folge haben, werden zusammengefasst. Den verbleibenden Punkten werden nun Prioritäten entsprechend ihrem Aufwand-Nutzen Verhältnis zugeordnet (Abschnitt 3.2.1). Im Rahmen dieser Arbeit gilt, dass Punkte mit hoher und mittlerer Priorität umgesetzt werden müssen und Punkte mit niedriger Priorität umgesetzt werden können, sofern dafür die entsprechenden Kapazitäten vorhanden sind.

3.2.1. Aufwand-Nutzen Analyse

Wesentlich für ein Verbesserungspotential ist, dass der Nutzen der Umsetzung dessen Aufwand übersteigt. Aus diesem Grund wird für jeden Verbesserungsvorschlag das Aufwand-Nutzen Verhältnis betrachtet. Aufwand und Nutzen einer möglichen Verbesserung werden dabei als gering, mittel oder hoch eingestuft. Gemäß der in Tabelle 2 dargestellten Aufwand-Nutzen-Matrix kann so jedem Verbesserungsvorschlag eine Priorität zugeordnet werden.

Somit kann auf objektive Art entschieden werden, ob ein Verbesserungsvorschlag auch tatsächlich ein Verbesserungspotential birgt.

Die Verwendung der Aufwand-Nutzen Matrix ist im Folgenden kurz erklärt:

- Zu jedem Verbesserungsvorschlag wird der benötigte Aufwand abgeschätzt. Mögliche Bewertungskriterien können zum Beispiel Kosten, Arbeitsaufwand oder die Auswirkung auf andere Bauteile sein.
- Zu jedem Verbesserungsvorschlag wird der daraus resultierende Nutzen abgeschätzt. Mögliche Bewertungskriterien können beispielsweise die Häufigkeit der Nennung des Verbesserungsvorschlages sein. Auch durch die Abschätzung von Kostenersparnissen kann ein möglicher Nutzen abgeleitet werden.
- Aus dem geschätzten Aufwand und dem geschätzten Nutzen ergibt sich, gemäß Tabelle 2, die Priorität der Verbesserungspotentiale.

3.2.2. Beispiel zur Bewertung von Verbesserungsvorschlägen

Ein Beispiel für die Anwendung der Aufwand-Nutzen-Analyse kann anhand des Verbesserungspotentials „Verbesserung der Winkelmessung“ durchgeführt werden (s. Tabelle 14):

- Nutzen: Der Verbesserungsvorschlag wurde in den Bereichen Entwicklung, Qualitätssicherung und Therapie genannt. Eine Umsetzung würde daher bereits eine Verbesserung in drei Bereichen bewirken. Der Verbesserungsvorschlag wird somit mit dem Nutzen „hoch“ bewertet.

- Aufwand: Eine Verbesserung der Winkelmessung kann durch ein Redesign der Elektronikplatine bewirkt werden. Hierfür wird der Aufwand mit „mittel“ bewertet.
- Aus Tabelle 2 ergibt sich somit für den Verbesserungsvorschlag „Verbesserung der Winkelmessung“ die Priorität „hoch“.

Tabelle 2: Einteilung der Prioritäten der Verbesserungsvorschläge nach dem Aufwand-Nutzen Verhältnis (Aufwand-Nutzen Matrix)

| | | Priorität | | |
|---------|--------|-----------|--------|--------|
| | | Mittel | Hoch | Hoch |
| Gering | | Mittel | Hoch | Hoch |
| Mittel | | Niedrig | Mittel | Hoch |
| Hoch | | Niedrig | Mittel | Mittel |
| Aufwand | Nutzen | Gering | Mittel | Hoch |

3.3. Definition der Anforderungen an das Redesign

Aus den erarbeiteten Verbesserungsvorschlägen werden nun die Anforderungen an das Redesign abgeleitet.

Bei der Definition der Anforderungen ist darauf zu achten, die daraus resultierenden Veränderungen am Gerät so effizient wie möglich zu gestalten um die bereits vorhandenen Ressourcen des Unternehmens bestmöglich auszunutzen. Kritische Komponenten, wie beispielsweise die bereits eingesetzten Kraftsensoren, oder das verwendete AC/DC-Netzteil sind aus Gründen der Prozesssicherheit weiterhin zu verwenden.

Bei elektronischen Komponenten, wie zum Beispiel dem Mikrocontroller und dessen Programmierung, soll wenn möglich auf Unternehmensstandards zurückzugreifen werden, da hier bereits Langzeiterfahrungen vorhanden sind.

Des Weiteren muss die spätere Einbindung in den Produktions- und Qualitätssicherungs-Prozess bereits während des Redesigns beachtet und umgesetzt werden. Dies bedeutet, die derzeit etablierten Prozesse für Material- und Warenwirtschaft, Produktion, Endkontrolle, Qualitätssicherung, Verpackung, etc. entweder so wenig wie möglich zu beeinflussen oder zu optimieren.

3.4. Auslegung und Dimensionierung der Messelektronik

Um die in Tabelle 16 angeführten Anforderungen an die Messelektronik zu erreichen, werden die wichtigsten Parameter, sowohl für die Kraftmessung als auch für die Winkelmessung, vor dem Schaltungsentwurf berechnet. Nachfolgend sind die grundlegenden Methoden zur Schaltungsauslegung beschrieben.

3.4.1. Auslegung Kraftmessung

3.4.1.1. Schematischer Aufbau der Kraftmessung

Die Kraftmessung erfolgt mittels einer DMS Halbbrücke welche auf dem Trägermaterial des Kraftsensors aufgebracht ist (Abbildung 5).

Die Messbrücke wird im Ausschlagverfahren als Messumformer verwendet und wandelt eine am Sensor auftretende Kraft F in eine proportionale Brückenspannung V_B um. Um einen Offset des Kraftsensors oder eine eventuelle Vorspannung ausgleichen zu können, wird die Messbrücke über einen einstellbaren Widerstand abgeglichen. Die Beschaltung der DMS-Halbbrücke ist in Abbildung 6 schematisch dargestellt.

Bevor das Ausgangssignal der Messbrücke im Analog-Digital-Wandler erfasst und somit der weiteren digitalen Verarbeitung zugeführt werden kann, muss das Sensorsignal vorverstärkt werden. Typischerweise wird hierfür ein Instrumentenverstärker verwendet, welcher eine hohe Verstärkung bei guter Signalqualität bietet. Die Messkette der Kraftmessung ist in Abbildung 7 dargestellt.

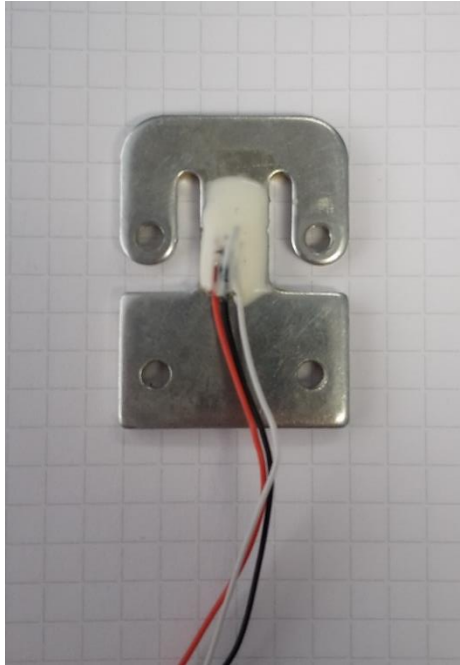


Abbildung 5: Kraftsensor mit DMS-Halbbrücke

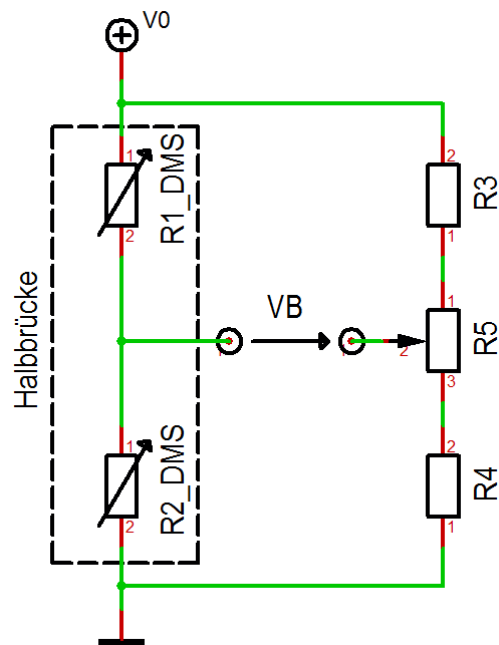


Abbildung 6: Beschaltung der DMS Halbbrücke. R1_DMS und R2_DMS bilden die veränderlichen Widerstände der Halbbrücke, R3, R4 und R5 bilden die Referenzspannung. R5 wird zum Nullabgleich der Brücke verwendet.

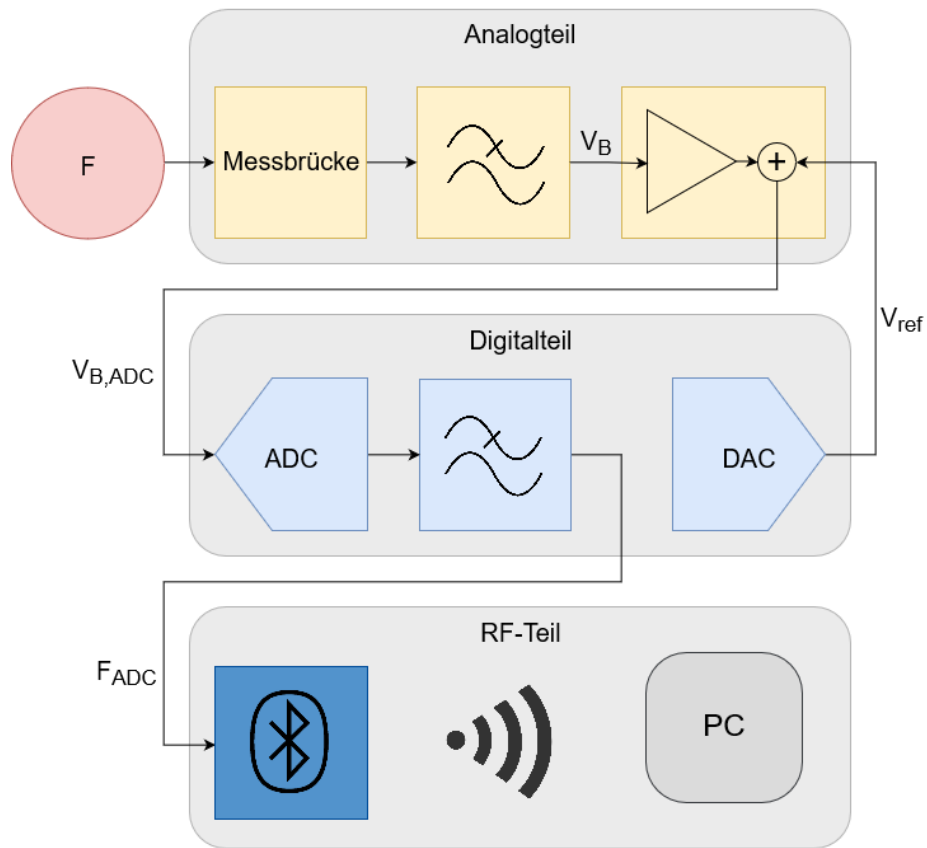


Abbildung 7: Schematischer Aufbau der Messkette. Der Kraftsensor wandelt die einwirkende Kraft in eine proportionale Spannung um. Im Analogteil erfolgt die Vorfilterung und die Verstärkung. Im Digitalteil wird das verstärkte Spannungssignal mittels eines ADC gewandelt und anschließend gefiltert. Der DAC dient zum Abgleichen des Messsignals. Der digitale Kraftwert wird mittels Bluetooth an den PC gesendet.

Die Kraftmessung wird durch zahlreiche Parameter beschrieben welche beispielsweise den Messbereich, die Auflösung oder die Verstärkung definieren. In Tabelle 3 sind diese mit ihren jeweiligen Wertebereichen und Einheiten angeführt. Die wichtigsten Parameter werden in den folgenden Abschnitten genauer erläutert, beziehungsweise berechnet.

Tabelle 3: Parameter der Kraftmessung

| Parameter | Abkürzung | Wert | Einheit |
|---|-----------------------|-----------------------------|---------|
| Last | F | 0 ... F_{\max} | N |
| Nennlast | F_0 | 500 | N |
| Maximallast | F_{\max} | 800 | N |
| ADC Kraftwert | $F_{\text{ADC,raw}}$ | -2048 ... 2047 | LSB |
| ADC Kraftwert, justiert | F_{ADC} | 0 ... 800 | LSB |
| Kraftauflösung | ΔF | - | N/LSB |
| Sensitivität | S | 0,0007 | V/V |
| Versorgungsspannung | V_0 | 3,3 | V |
| Brückenspannung | V_B | 0 ... $V_{B, \max}$ | V |
| Brückenspannung bei maximaler Belastung | $V_{B, \max}$ | - | V |
| Verstärkte Brückenspannung | $V_{B, \text{ADC}}$ | 0 ... $V_{\text{ADC, ref}}$ | V |
| Verstärkung | G | 0 ... G_{\max} | 1 |
| Verstärkung ADC | G_{ADC} | 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 | 1 |
| ADC Auflösung | R_{ADC} | 12 | Bit |
| ADC Referenzspannung | $V_{\text{ADC, ref}}$ | 1,964 | V |
| Negative ADC Eingangsspannung | V_{inn} | 0,3 | V |
| DAC Referenzspannung | $V_{\text{DAC, ref}}$ | 1,964 | V |
| Referenzspannung | V_{ref} | 0 ... $V_{\text{DAC, ref}}$ | V |

3.4.1.2. Berechnung der maximalen Auflösung

Wie in Abbildung 7 dargestellt, liefert der Kraftsensor ein analoges Spannungssignal, welches der auftretenden Kraft proportional ist. Ein wichtiger Parameter der Kraftmessung ist daher die Auflösung des nachfolgenden quantisierenden Systems, da diese sich direkt auf die Genauigkeit des Messergebnisses auswirkt. Der analoge Kraftwert wird mit Hilfe eines Analog-Digital-Wandlers im Mikrocontroller erfasst und in einen digitalen Wert umgewandelt. Die erreichbare Kraftauflösung, also die kleinste messbare Kraftdifferenz, ist somit lediglich vom Kraftmessbereich, also der Maximallast F_{max} , und von der Auflösung des Analog-Digital-Wandlers R_{ADC} abhängig. Gleichung (1) zeigt die Berechnung der Kraftauflösung. Hierbei ist zu beachten, dass der ADC im differentiellen Modus betrieben wird. Es wird also die Differenzspannung zwischen der verstärkten Brückenspannung am positiven ADC-Eingang und einer konstanten Spannung am negativen ADC-Eingang V_{inn} gewandelt. Zwar wird hierdurch die Auflösung R des positiven Messbereichs des Analog-Digital-Wandlers um 1 Bit verringert (Vorzeichenbit), jedoch verfügt der differentielle Modus über eine zusätzliche Verstärkung G_{ADC} , welche während der Laufzeit eingestellt werden kann. Somit ist es möglich die Verstärkung und folglich den Messbereich dynamisch anzupassen.

$$\Delta F = \frac{F_{max}}{2^{(R_{ADC}-1)}} \quad (1)$$

3.4.1.3. Berechnung der maximalen Verstärkung

Die Gesamtverstärkung der Kraftmessung muss groß genug gewählt werden, um die geforderte Kraftauflösung im jeweiligen Messbereich zu erreichen. Die maximal mögliche Verstärkung ist jedoch begrenzt durch die Ausgangsspannung der Messbrücke bei Maximallast $V_{B,max}$ und der ADC-Referenz-Spannung $V_{ADC,ref}$ (Gleichung (2)). Die Ausgangsspannung für eine beliebige Last F der Messbrücke kann gemäß Gleichung (3) berechnet werden.

$$G_{max} = \frac{V_{ADC,ref}}{V_{B,max}} \quad (2)$$

$$V_B = \frac{F}{F_0} S V_0 \quad (3)$$

Setzt man in Gleichung (3) für die Last F die Maximallast F_{max} ein so kann die maximal mögliche Verstärkung entsprechend Gleichung (4) dargestellt berechnet werden.

$$G_{max} = \frac{V_{ADC,ref}}{S V_0} \frac{F_0}{F_{max}} \quad (4)$$

3.4.1.4. Berechnung des ADC-Wertes

Der digitale Messwert des Analog-Digital-Wandlers kann durch Gleichung (5) berechnet werden. [7]

$$F_{ADC,raw} = \frac{(V_{B,ADC} - V_{inn})}{V_{ADC,ref}} 2^{(R_{ADC}-1)} G_{ADC} \quad (5)$$

Wie in Abbildung 7 dargestellt wird zu der verstärkten Brückenspannung die vom Digital-Analog-Wandler generierte Spannung V_{ref} addiert. Dadurch ist es möglich den Offset der Messschaltung genau einzustellen. Die tatsächlich am ADC-Eingang anliegende Brückenspannung ergibt sich folglich aus Gleichung (6).

$$V_{B,ADC} = \frac{F}{F_0} S V_0 G + V_{ref} \quad (6)$$

Setzt man die tatsächliche Brückenspannung aus Gleichung (6) nun in Gleichung (5) ein, so kann damit der ADC-Wert $F_{ADC,raw}$ in Abhängigkeit der am Sensor auftretenden Kraft F berechnet werden (Gleichung (7)). Mit diesem Zusammenhang können nun die Parameter so eingestellt werden, dass die Anforderungen an die Kraftmessung erfüllt sind.

$$F_{ADC,raw} = \frac{(\frac{F}{F_0} S V_0 G + V_{ref} - V_{inn})}{V_{ADC,ref}} 2^{(R_{ADC}-1)} G_{ADC} \quad (7)$$

3.4.1.5. Berechnungen mittels Tabellenkalkulation

Um die in Abschnitt 3.4.1.4 beschriebenen Gleichungen besser auswerten zu können, wird eine Berechnung mittels Tabellenkalkulation durchgeführt. Hierzu werden sämtliche Parameter der Kraftmessung und die zugehörigen Gleichungen in einer Tabelle eingetragen. Anhand dieser Methode können bestimmte Parameter sehr einfach bestimmt und das Verhalten der Messschaltung beobachtet werden. Beispielsweise ist bei vorgegebener Verstärkung und vorgegebenem Messbereich direkt ersichtlich, ob eine ausreichende Auflösung über den gesamten Messbereich erreicht wird.

Des Weiteren können mit Hilfe dieser Methode auch komplexere Bedingungen simuliert werden. Beispielsweise lässt sich ein Kraftsensor-Offset, welcher durch einen vertrimmten oder ungenauen Kraftsensor entstehen kann, einstellen und dessen Auswirkungen beobachten. Liegt ein Parameter außerhalb seiner zulässigen Grenzen, so kann dies interaktiv angezeigt werden.

Tabelle 4 zeigt ein Beispiel für die Berechnung mittels Tabellenkalkulation. Die Tabelle wurde in die Bereiche Messbrücke, Messverstärker, Analog-Digital-Wandler und Digital-Analog-Wandler, mit den jeweiligen Kenndaten unterteilt. Die Parameter können interaktiv geändert werden und fließen stets aktuell in die Berechnung ein.

Tabelle 5 zeigt ein Beispiel für die Ergebnisse der Tabellenkalkulation. Zu den möglichen Kraftwerten werden jeweils die berechnete Brückenspannung, die verstärkte Brückenspannung, der berechnete ADC Wert und die erreichte Auflösung angezeigt.

Tabelle 4: Berechnung mittels Tabellenkalkulation und deren einstellbare Parameter

| Messbrücke | Abkürzung | Wert | Einheit |
|---------------------------|-------------------------|-------------|----------------|
| Versorgungsspannung | V_0 | 3,3 | V |
| Sensitivität | S | 0,0007 | V/V |
| Nennlast | F_0 | 500 | N |
| Sensitivität p. N | | 0,000005 | V/N |
| Nulloffset | E_{offset} | 0 | V/V |
| | | | |
| Messverstärker | Abkürzung | Wert | Einheit |
| Referenzspannung | V_{ref} | 0,20 | V |
| Verstärkung | G | 330 | |
| | | | |
| ADC | Abkürzung | Wert | Einheit |
| ADC Auflösung | R_{ADC} | 12 | Bit |
| ADC Maximalwert | | 2048 | LSB |
| ADC Referenzspannung | $V_{\text{ADC,ref}}$ | 1,964 | V |
| Neg. ADC | | | |
| Eingangsspannung | V_{inn} | 0,2 | V |
| ADC Verstärkung | G_{ADC} | 1 | |
| | | | |
| DAC | Abkürzung | Wert | Einheit |
| DAC Auflösung | R_{DAC} | 12 | Bit |
| DAC Maximalwert | | 4096 | LSB |
| DAC Referenzspannung | $V_{\text{DAC,ref}}$ | 1,964 | V |
| DAC ΔV | ΔV_{DAC} | 0,0005 | V/LSB |
| $V_{\text{ref,DAC,soll}}$ | | 418 | LSB |
| $V_{\text{ref,DAC}}$ | | 418 | LSB |

Tabelle 5: Berechnete Daten der Kraftmessung mittels Tabellenkalkulation

| F (N) | V_B (V) | V_{B,ADC} (V) | F_{ADC,raw} (LSB) | ΔF (N/LSB) |
|--------------|--------------------------|------------------------------|----------------------------------|-------------------|
| 0 | 0 | 0,200427734 | 0 | 0,629 |
| 1 | 0,00000462 | 0,201952334 | 2 | 0,629 |
| 2 | 0,00000924 | 0,203476934 | 4 | 0,629 |
| 3 | 0,00001386 | 0,205001534 | 5 | 0,629 |
| 4 | 0,00001848 | 0,206526134 | 7 | 0,629 |
| 5 | 0,0000231 | 0,208050734 | 8 | 0,629 |
| 6 | 0,00002772 | 0,209575334 | 10 | 0,629 |
| 7 | 0,00003234 | 0,211099934 | 12 | 0,629 |
| 8 | 0,00003696 | 0,212624534 | 13 | 0,629 |
| 9 | 0,00004158 | 0,214149134 | 15 | 0,629 |
| 10 | 0,0000462 | 0,215673734 | 16 | 0,629 |
| 20 | 0,0000924 | 0,230919734 | 32 | 0,629 |
| 30 | 0,0001386 | 0,246165734 | 48 | 0,629 |
| 40 | 0,0001848 | 0,261411734 | 64 | 0,629 |
| 50 | 0,000231 | 0,276657734 | 80 | 0,629 |
| 60 | 0,0002772 | 0,291903734 | 96 | 0,629 |
| 70 | 0,0003234 | 0,307149734 | 112 | 0,629 |
| 80 | 0,0003696 | 0,322395734 | 128 | 0,629 |
| 90 | 0,0004158 | 0,337641734 | 144 | 0,629 |
| 100 | 0,000462 | 0,352887734 | 159 | 0,629 |
| 200 | 0,000924 | 0,505347734 | 318 | 0,629 |
| 300 | 0,001386 | 0,657807734 | 477 | 0,629 |
| 400 | 0,001848 | 0,810267734 | 636 | 0,629 |
| 500 | 0,00231 | 0,962727734 | 795 | 0,629 |
| 600 | 0,002772 | 1,115187734 | 954 | 0,629 |
| 700 | 0,003234 | 1,267647734 | 1113 | 0,629 |
| 800 | 0,003696 | 1,420107734 | 1272 | 0,629 |

Ein weiterer Vorteil der Berechnung mittels Tabellenkalkulation ist die einfache grafische Darstellung der berechneten Werte (Abbildung 8). So können zum Beispiel sehr einfach mögliche Nichtlinearitäten in der Messkette identifiziert werden.

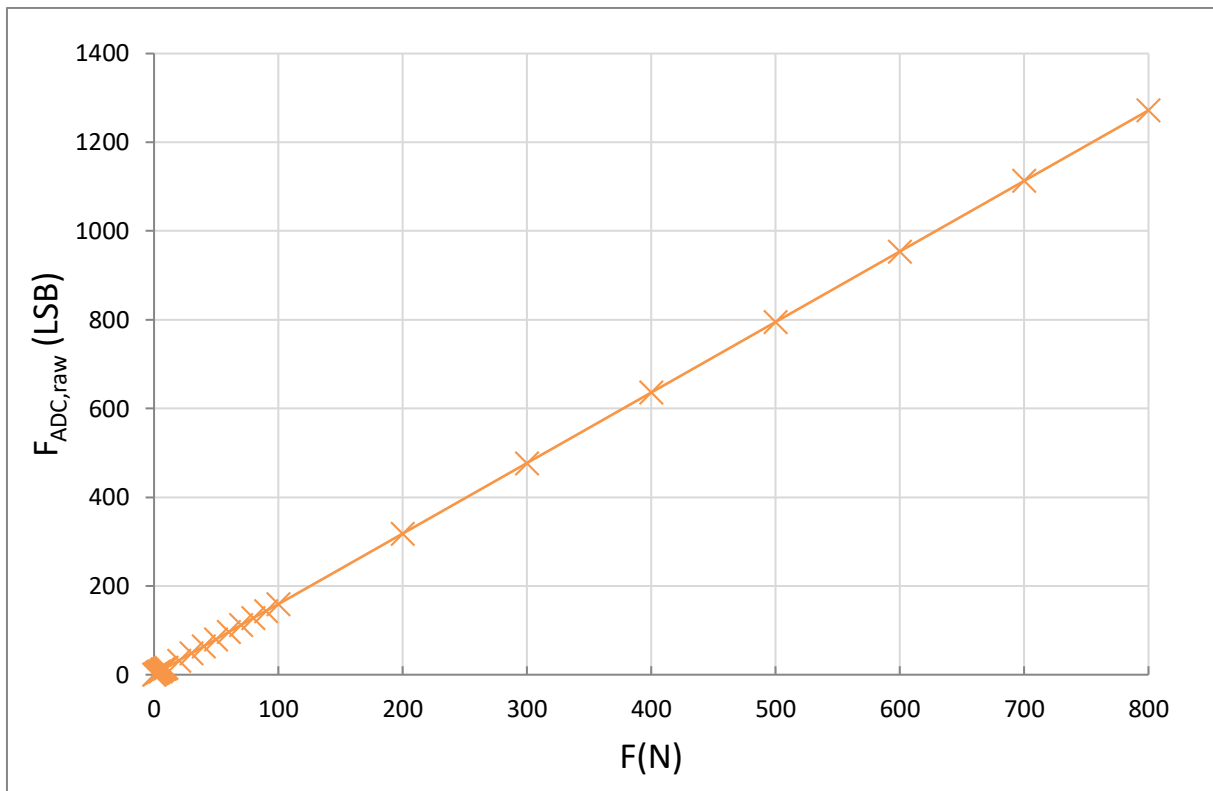


Abbildung 8: Darstellung der berechneten ADC-Werte $F_{\text{ADC,raw}}$ bei gegebener Last F aus der Tabellenkalkulation.

3.4.2. Auslegung Winkelmessung

3.4.2.1. Schematischer Aufbau der Winkelmessung

Für die Messung des Neigungswinkels wird ein digitaler Beschleunigungssensor verwendet. Der Sensor misst die auf ihn einwirkende Beschleunigung in den drei kartesischen Raumachsen a_x , a_y und a_z und stellt die Messwerte in digitaler Form dem Mikrocontroller zur Verfügung. Durch die konstante Erdbeschleunigung g , welche stets in Richtung des Erdmittelpunktes gerichtet ist, besteht dabei immer ein Bezug zur derzeitigen Neigung. Die prinzipielle Funktion der Neigungsbestimmung durch Messen der Erdbeschleunigung ist in Abbildung 9 dargestellt.

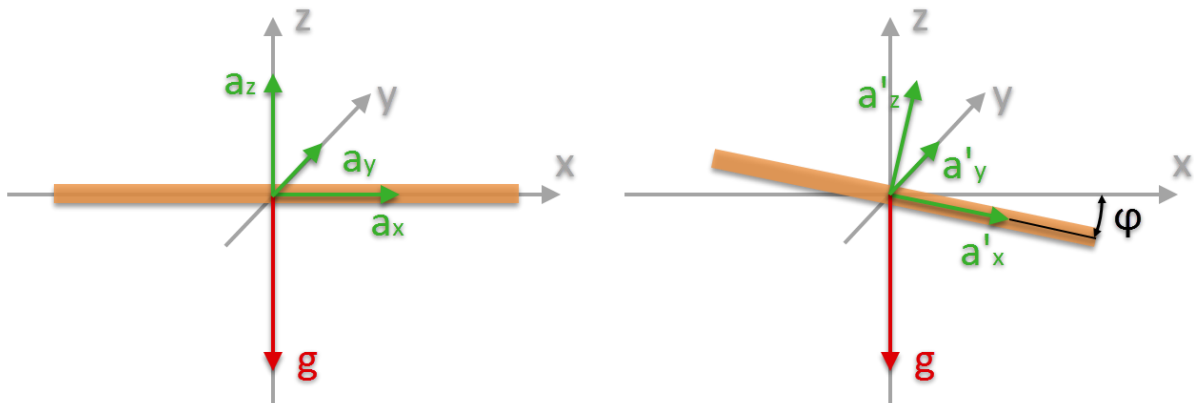


Abbildung 9: Darstellung des Neigungswinkels der Therapieplatte und die auf den Sensor wirkenden Beschleunigungen a_x , a_y und a_z welche sich aus der Erdbeschleunigung ergeben.

In Abbildung 9 links ist die Therapieplatte horizontal positioniert. Die Erdbeschleunigung wirkt daher nur auf die z-Achse des Beschleunigungssensors. Sofern das Gerät sich in Ruhe befindet ist die Beschleunigung in Richtung der x- und y-Achse gleich Null:

$$\begin{aligned} a_z &= -g \\ a_x &= 0 \\ a_y &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

Wird die Therapieplatte nun, wie in Abbildung 9 rechts, um den Winkel φ um die y-Achse geneigt, so wirkt die Erdbeschleunigung g sowohl in Richtung der x-Achse als auch in Richtung der z-Achse des Sensors. Die Beschleunigungswerte können wie in Gleichung (9) berechnet werden.

$$\begin{aligned} a'_z &= -g \cos(\varphi) \\ a'_x &= g \sin(\varphi) \end{aligned} \quad (9)$$

Durch die gemessene Beschleunigung kann somit auf den Neigungswinkel der Therapieplatte rückgerechnet werden (Gleichung (10)).

$$\varphi = \arcsin\left(\frac{a_x}{g}\right) \quad (10)$$

Analog kann die Neigung der Therapieplatte auch bei einer Rotation um den Winkel θ um die x-Achse ermittelt werden. Hierfür ist lediglich der entsprechende Beschleunigungswert der y-Achse a_y einzusetzen (Gleichung (11)).

$$\theta = \arcsin\left(\frac{a_y}{g}\right) \quad (11)$$

Auch die Winkelmessung kann durch zahlreiche Parameter beschrieben werden. In Tabelle 6 sind diese mit ihrem jeweiligen Wertebereich und der zugehörigen Einheit angeführt. Da für die Winkelmessung stets die Erdbeschleunigung herangezogen wird, ist es üblich die Beschleunigungsmesswerte als Vielfaches der Erdbeschleunigung g anzugeben. Dies wird in weiterer Folge auch so gehandhabt.

Tabelle 6: Parameter der Beschleunigungs- und Winkelmessung

| Parameter | Abkürzung | Wert | Einheit |
|---------------------------|---------------------------------|--------------------|---|
| Neigungswinkel um y-Achse | φ | ± 90 | $^\circ$ |
| Neigungswinkel um x-Achse | θ | ± 90 | $^\circ$ |
| Winkelauflösung | $\Delta \varphi, \Delta \theta$ | - | $^\circ/\text{LSB}$ |
| Beschleunigung | a_x, a_y, a_z | $0 \dots a_{\max}$ | $\text{m/s}^2; g$ |
| Messbereich | a_{\max} | ± 2 | $\text{m/s}^2; g$ |
| Beschleunigungswert | a_{LSB} | $-512 \dots 511$ | LSB |
| Beschleunigungsauflösung | Δa | - | $\text{m/s}^2/\text{LSB}; g/\text{LSB}$ |
| Sensorauflösung | R_a | 10 | Bit |

3.4.2.2. Berechnung der maximalen Winkelauflösung

Die Winkelauflösung bezeichnet den kleinsten messbaren Winkelunterschied in der Neigung der Therapieplatte. Sie ist direkt abhängig vom Auflösungsvermögen des Beschleunigungssensors Δa (Gleichung (12)).

$$\Delta a = \frac{a_{\max}}{2^{(R_a-1)}} \quad (12)$$

Auch hier ist zu beachten, dass der Messbereich sowohl positive als auch negative Beschleunigungswerte beinhaltet.

Aus den Gleichungen (10) und (11) folgt, dass die Auflösung des Neigungswinkels nicht über den gesamten Messbereich konstant ist, da sich der eigentliche Winkel über die nichtlineare Arkussinusfunktion aus der Beschleunigung errechnet. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 46 dargestellt.

Die Winkelauflösung $\Delta\varphi$ ergibt sich aus der Differenz zweier Winkel, die sich um die kleinstmögliche Beschleunigungsdifferenz Δa unterscheiden (Gleichung (13)).

$$\Delta\varphi = \arcsin(a_x + \Delta a) - \arcsin(a_x) \quad (13)$$

3.4.3. Aspekte der elektrischen Sicherheit

Da es sich bei dem Therapiegerät um ein Medizinisch-Elektrisches-Gerät (ME-Gerät) handelt müssen Maßnahmen zum Schutz vor Risiken durch elektrischen Strom getroffen werden. [8]

Insbesondere ist darauf zu achten, dass die vorhandenen Schutzkonzepte durch das Redesign nicht beeinträchtigt werden. Gemäß EN60601-1 Kapitel 6 ist das Gerät als „intern mit Strom versorgt“ klassifiziert. Da der bestimmungsgemäße Gebrauch jedoch auch während des Ladevorgangs möglich ist kommt folgender Absatz zur Anwendung:

„INTERN MIT STROM VERSORGTE ME-GERÄTE, die eine Anschlussmöglichkeit an ein VERSORGUNGSNETZ haben, müssen die Anforderungen an ME-GERÄTE der SCHUTZKLASSE I oder ME-GERÄTE der SCHUTZKLASSE II einhalten, wenn sie an das VERSORGUNGSNETZ angeschlossen sind, und die Anforderungen an INTERN MITSTROM VERSORGTE ME-GERÄTE einhalten, wenn sie nicht an das VERSORGUNGSNETZ angeschlossen sind.“
(zitiert aus [9], 6.2)

Das bestehende Konzept des intern mit Strom versorgten Gerätes beziehungsweise der Schutzklasse II und Anwendungsteil des Typs BF wird daher im Zuge des Redesigns beibehalten. Die Vorgaben zum Schutz gegen die von ME-Geräten ausgehenden elektrischen Gefährdungen werden aus der Norm EN60601-1 [9] entnommen.

In Abbildung 10 ist ein Beispiel für ein ME-Gerät Schutzklasse II mit Metallummantelung gezeigt. Dies entspricht in etwa dem Aufbau des Redesigns. Der Unterschied besteht darin,

dass das Netzteil von dem Gerät abgesteckt werden kann wonach es als intern mit Strom versorgtes Gerät betrieben wird.

Die Vorgaben für die einzuhaltenden Luft- und Kriechstrecken zum Patientenschutz sowie die Spannungsfestigkeit der Isolierungen wurden aus Tabelle 6 und Tabelle 12 der Norm EN60601-1 [9] entnommen und in Tabelle 7 zusammengefasst.

Der Schutz des Patienten kann durch den Einsatz eines geeigneten Netzteils und die Einhaltung der Vorgaben aus Tabelle 7 gewährleistet werden.

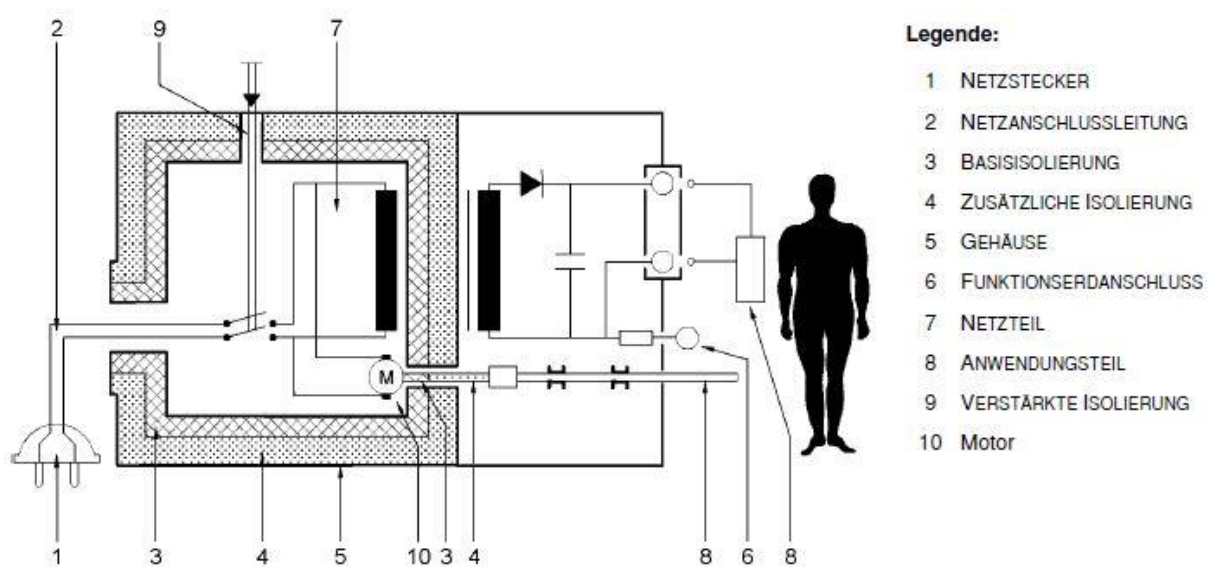


Abbildung 10: Beispiel für ein ME-Gerät der Schutzklasse II mit Metallummantelung (Abbildung entnommen aus [9], Bild 4)

Tabelle 7: Schutzmaßnahmen zum Patientenschutz [9]

| | Schutz vom Netzteil | | Schutz von Sekundärstromkreisen | |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------------|-----------------------|
| | Eine MOPP | Zwei MOPP | Eine MOPP | Zwei MOPP |
| Spannungsfestigkeit | 1500 V _{eff} | 4000 V _{eff} | 500 V _{eff} | 1000 V _{eff} |
| Luftstrecke | 2,5 mm | 5 mm | 0,8 mm | 1,6 mm |
| Kriechstrecke | 4 mm | 8 mm | 1,7 mm | 3,4 mm |

3.5. Entwicklung der Firmware

Als Firmware wird die Software des Mikrocontrollers bezeichnet. Sie steuert die wichtigsten Abläufe der Elektronikplatine und somit auch des Gesamtgerätes wie etwa die Messdatenerfassung, die Signalverarbeitung und die Kommunikation zur Software am PC.

Um bei der Entwicklung der Firmware möglichst strukturiert vorgehen zu können, werden im Vorhinein die allgemeinen Aufgaben und Anforderungen analysiert und definiert. In Tabelle 8 sind die allgemeinen Anforderungen aufgelistet.

Der Source Code der Firmware wird mit Hilfe von Bascom-AVR, einem Windows-Basic-Compiler für AVR Mikrocontroller der Firma MCS Electronics, entwickelt. Bascom gilt als sehr Benutzerfreundlich, bietet viele vorgefertigte Funktionen und bildet den derzeitigen Unternehmensstandard für die Entwicklung von Firmware.

Tabelle 8: Allgemeine Anforderungen an die Firmware

| # | Anforderung |
|----|--|
| 1 | Erfassen und Verarbeiten der Daten der Kraftmessung |
| 2 | Erfassen und Verarbeiten der Daten der Neigungsmessung |
| 3 | Überwachen des Akku-Ladezustandes |
| 4 | Maßnahmen zum Energiesparen |
| 5 | Einlesen und verarbeiten des Taster Signals |
| 6 | Handling der Status-LED |
| 7 | Handling des akustischen Feedbacks |
| 8 | Initialisierung des Bluetooth Moduls |
| 9 | Kommunikation zwischen Gerät und PC |
| 10 | Nullabgleich Funktionen für Kraft- und Winkelmessung |
| 11 | Firmware Update über Bluetooth mittels Bootloader |

3.5.1. Handling der Peripherie

Zu den wesentlichen Aufgaben der Firmware gehört unter anderem der Datenaustausch mit der Peripherie. Um einen kontrollierten Ablauf der Firmware sicherzustellen wird ein Großteil der Aufgaben in einer sequenziellen Ablaufsteuerung bewältigt. Diese führt wichtige und nicht zeitkritische Aufgaben in einer fest vorgegebenen Reihenfolge aus. Zeitkritische Aufgaben, wie etwa das Einlesen der Messdaten, erfolgen asynchron zu dieser Sequenz, vorwiegend über Interrupt-Routinen. In Abbildung 11 sind die wichtigsten Peripherie-Komponenten und deren Verarbeitung in der MCU dargestellt.

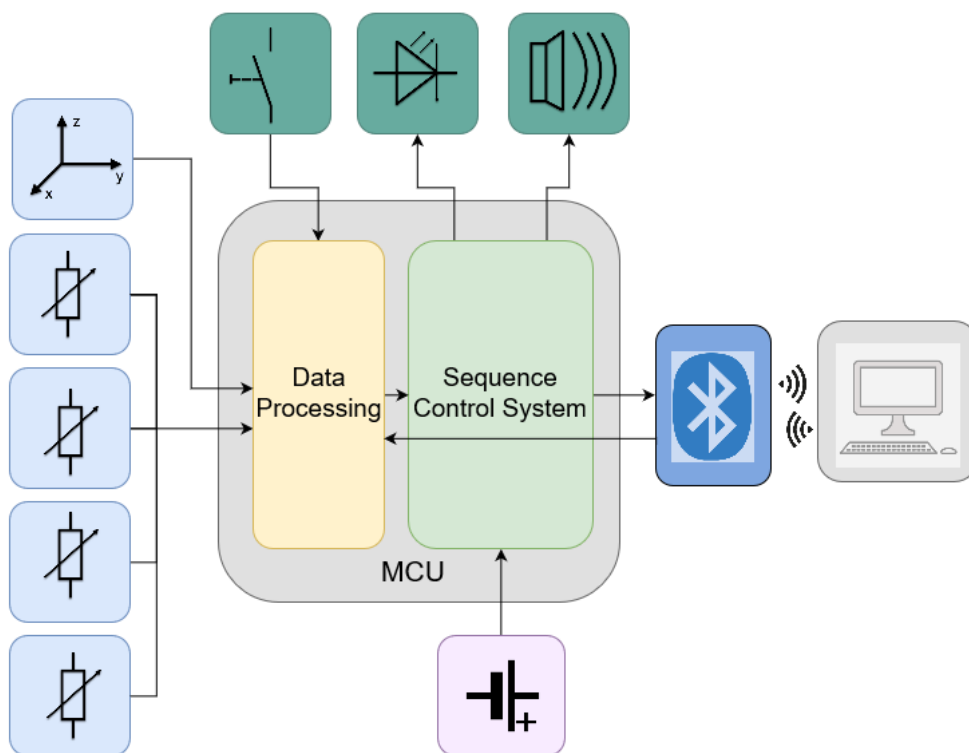


Abbildung 11: Darstellung der wichtigsten elektronischen Peripherie und deren Verarbeitung in der MCU

3.6. Methoden zur Verifizierung der Messdaten

3.6.1. Kolmogorov-Smirnov Test

Vor der Auswertung der Messdaten wird untersucht, ob den Messdaten eine Normalverteilung zugrunde liegt. Dies beeinflusst die Wahl der statistischen Parameter, welche zur Auswertung herangezogen werden.

Zum Test, ob die Messdaten aus einer normalverteilten Grundgesamtheit entstammen, wird der Kolmogorov-Smirnov-Test (KS-Test) mit einem Signifikanzniveau von $\alpha=5\%$ verwendet. Die Berechnungen wird mit MATLAB (The MathWorks Inc., Natick, USA) durchgeführt. [10]

Dem KS-Test liegen folgende Hypothesen zu Grunde:

- H_0 : Die Messdaten entstammen aus einer normalverteilten Grundgesamtheit
- H_1 : Die Messdaten entstammen nicht aus einer normalverteilten Grundgesamtheit

Der Test erfolgt für die Messreihen der Kraftwerte bei einer Belastung von jeweils 0 N und 98,1 N sowie für die Messreihen der Winkelmessung in den zwei Messpunkten mit den höchsten Standardabweichungen. Für jede Messreihe werden 400 Messwerte verwendet, dies entspricht einer Messdauer von 6 Sekunden.

3.6.2. Verifizierung der Kraftmessung

Für die Verifizierung der Kraftsensoren muss der vom Gerät gemessene Ist-Wert mit einem bekannten Soll-Wert verglichen werden. Dieser Soll-Wert wird durch eine definierte Kraft auf den Sensor oder das Gesamtgerät vorgegeben.

Um einen möglichst exakten Soll-Wert aufbringen zu können, werden für die Kraftmessung Prüfgewichte verwendet. Die Gewichte wurden vor der Verifizierung mit einer kalibrierten Laborwaage genau vermessen. Die zur Verfügung stehenden Prüfgewichte und deren tatsächliches Gewicht sind in Tabelle 9 angeführt.

Tabelle 9: Verwendete Prüfgewichte und deren gemessenes Gewicht

| Bezeichnung | kg (gemessen) |
|-------------|---------------|
| 2kg | 1,998 |
| 5kg | 4,996 |
| 10kg | 9,992 |
| 102 | 10,057 |
| 103 | 9,81 |
| 104 | 9,9 |
| 105 | 10,051 |
| 106 | 10,007 |
| 225 | 4,667 |
| Norm 5 | 5,996 |
| Norm 10 | 9,992 |

Durch die Kombination der Prüfgewichte können nun Messreihen mit definiertem Soll-Wert an den einzelnen Sensoren durchgeführt werden. Die aus der Kombination der Prüfgewichte resultierenden Soll-Werte sind in Tabelle 10 angeführt.

Tabelle 10: Kombination der Prüfgewichte und daraus resultierende Soll-Werte

| Prüfgewicht | Prüfkraft | Verwendete Gewichte |
|-------------|-----------|---|
| kg | N | |
| 0,0000 | 0,00 | 0 |
| 1,9980 | 19,60 | 2kg |
| 4,9960 | 49,01 | 5kg |
| 9,9920 | 98,02 | 10kg |
| 19,9510 | 195,72 | 104+105 |
| 29,9680 | 293,89 | 104+105+106 |
| 39,9500 | 391,91 | 104+105+106+10kg |
| 49,7600 | 488,15 | 103+104+105+106+10kg |
| 59,8170 | 586,80 | 102+103+104+105+106+10kg |
| 69,4800 | 681,60 | 102+103+104+105+106+10kg+5kg+225 |
| 85,4680 | 838,44 | 102+103+104+105+106+10kg+5kg+225+Norm10+Norm5 |

3.6.3. Verifizierung der Winkelmessung

Um die Messung der Neigungswinkel zu verifizieren, muss ein definierter Winkel als Soll-Wert vorgegeben werden. Dieser Winkel wird durch das Aufstellen des Gerätes auf einer schiefen Ebene erreicht. Durch die Geometrie des Aufbaus kann der Winkel sehr genau vorgegeben werden (Abbildung 12).

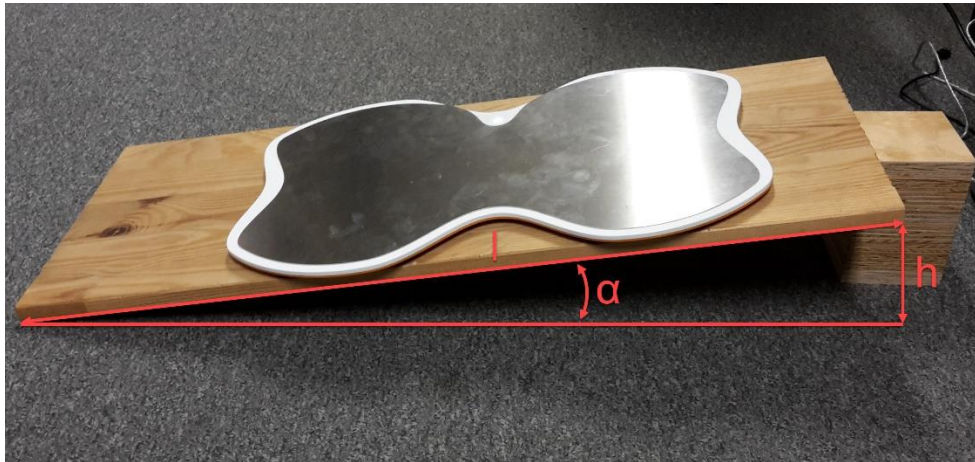


Abbildung 12: Vorgabe des Winkels für die Verifizierung der Winkelmessung

Der Winkel α wird durch die Abmessungen des Messaufbaus bestimmt und kann mit Gleichung (14) berechnet werden. Die daraus resultierenden Soll-Werte für die Winkelmessung sind in Tabelle 11 angeführt.

$$\theta = \arcsin\left(\frac{h}{l}\right) \quad (14)$$

Tabelle 11: Vorgegebene Winkel für die Verifizierung der Winkelmessung

| l | h | α |
|-----------|-----------|----------------------------|
| mm | mm | ° |
| 803 | 0,0 | 0,00 |
| 803 | 36,3 | 2,59 |
| 803 | 74,0 | 5,29 |
| 803 | 110,5 | 7,91 |
| 803 | 145,5 | 10,44 |

3.6.4. Verifizierung der Bluetooth-Übertragung

Um die Stabilität der Bluetooth-Übertragung zu verifizieren, wird die Übertragungsrate zwischen Gerät und PC mit einer geeigneten Software überwacht (Device Monitoring Studio, HHD Software Ltd., London, UK). Diese ermöglicht es, den aktuellen Datentransfer sämtlicher Schnittstellen aufzuzeichnen. Liegt die beobachtete Übertragungsrate unterhalb der zu erwartenden Übertragungsrate oder treten starke Schwankungen auf, so ist dies ein Indiz für

eine mangelnde Stabilität der Verbindung. Die zu erwartende Übertragungsrate R_{BT} (Byte/s) ergibt sich aus der Sendefrequenz f_{send} (Hz) und aus der Paketgröße S_{frame} (Byte) der übertragenen Daten durch Gleichung (15).

$$R_{BT} = f_{send} * S_{frame} \quad (15)$$

3.6.5. Verifizierung des Energiemanagements

Die Berechnung der Akkulaufzeit erfolgt durch die Messung des Stromverbrauchs i_s (A) in den entsprechenden Betriebszuständen. Durch die gegebene Akkukapazität C_{bat} (Ah) kann so die zu erwartende Laufzeit t (h) bestimmt werden (Gleichung (16)). Zu beachten ist, dass der Akku laut Hersteller nur zu ca. 80% bezogen auf die Nennkapazität entladen werden sollte. [11]

$$t = \frac{C_{bat} * 80\%}{i_s} \quad (16)$$

4. Ergebnisse

4.1. Erarbeitete Verbesserungsvorschläge

Tabelle 12 zeigt die erarbeiteten Verbesserungsvorschläge aus den in Abschnitt 3.1 genannten Bereichen. Um die einzelnen Punkte weiter zu konkretisieren wurden zu jedem Verbesserungsvorschlag zusätzlich die folgenden Aspekte definiert:

- Betroffenes Bauteil oder Komponente: Bauteil, Komponente, Baugruppe oder Gerätefunktion die von dem Verbesserungsvorschlag betroffen ist.
- Betroffener Bereich: Bereich der von einer etwaigen Umsetzung des Verbesserungsvorschlages betroffen ist (Elektronik, Konstruktion oder Software).
- Quelle: Quelle aus welcher der Verbesserungsvorschlag entstammt (z.B. QS, QM, Produktion, etc.)
- Status: Manche Verbesserungsvorschläge beziehen sich auf Verbesserungen, welche bereits in vorangegangenen Revisionen umgesetzt wurden. Diese Verbesserungsvorschläge wurden trotzdem in Tabelle 12 aufgenommen jedoch mit dem Status „behoben“ bewertet. Die entsprechenden Maßnahmen, mit denen die Probleme behoben wurden, finden sich in Tabelle 13.

Tabelle 12: Verbesserungsvorschläge aus den Bereichen Therapie, Qualitätsmanagement, Vertrieb, Qualitätssicherung, Produktion und Entwicklung

| # | Verbesserungsvorschlag | betroffenes Bauteil oder Komponente | betroffener Bereich | Quelle | Status |
|----|--|-------------------------------------|---------------------------|---------------------|---------|
| 1 | Mehr Stabilität bei Belastung durch Sprung (Aktive Therapie) | Kraftsensoren | Konstruktion | Therapie | behoben |
| 2 | Verbesserte Kraftmessung | Elektronik Hardware | Elektronik | Therapie | offen |
| 3 | Bessere Rutschfestigkeit der Rollkörper auf Untergrund | Rollkörper | Konstruktion | Therapie | offen |
| 4 | Rollkörper „knackt“ bei Belastung | Rollkörper | Konstruktion | Therapie | behoben |
| 5 | Geeignete Transporttasche z.B. für Hausbesuche | Verpackung | Konstruktion | Therapie / Vertrieb | offen |
| 6 | Therapiespiel für Gleichgewichtstraining, Gangschule, Stützaktivität, etc. | Therapiespiel | Software | Therapie | offen |
| 7 | Ausgangsposition bei jedem Spiel fix auswählbar | Dokumentation | Software | Therapie | offen |
| 8 | Möglichkeit zur Aufzeichnung der Bewegung des Schwerpunktes | Postural Sway Assessment | Software | Therapie | offen |
| 9 | Therapiespiel für Be- und Entlastung | Therapiespiel | Software | Therapie | offen |
| 10 | Verringertes Rauschen der Winkelmessung | Winkelmessung | Elektronik | Therapie | offen |
| 11 | Bluetooth Modul mit FCC Zertifizierung | Bluetooth Modul | Elektronik | QM | offen |
| 12 | Verbesserte Kraftmessung | Kraftmessung | Elektronik | Vertrieb | offen |
| 13 | Stabilere Ladebuchse | Elektronik Hardware | Elektronik / Konstruktion | Entwicklung | offen |
| 14 | Verbesserte Kraftmessung | Kraftmessung | Elektronik | Entwicklung | offen |
| 15 | Verbesserte Winkelmessung | Lagesensor | Elektronik | Entwicklung | offen |
| 16 | Verbesserung des Energiemanagements | Elektronik Hardware | Elektronik | Entwicklung | offen |
| 17 | Einfachere Erreichbarkeit des Ein/Aus Schalters | Elektronik Hardware | Elektronik / Konstruktion | Entwicklung | offen |
| 18 | Einfachere Montage der Magnetladebuchse | Elektronik Hardware | Elektronik / Konstruktion | Produktion | offen |
| 19 | Kabeldurchmesser des Netzteils an Stecker anpassen | Magnetladestecker (Ladegerät) | Elektronik / Konstruktion | Produktion | behoben |

| | | | | | |
|----|---|--------------------------------|---------------------------|------------|---------|
| 20 | DMS Beschriftung auf Platine richtigstellen | Platinen Beschriftung | Elektronik | Produktion | offen |
| 21 | Vereinfachter Workflow für das Bedaten der Elektronikplatine | Elektronik Hardware / Firmware | Elektronik / Software | Produktion | offen |
| 22 | Akku Schutzmodul mit breiteren Lötstellen | Elektronik Hardware | Elektronik | Produktion | offen |
| 23 | Schablone für das Aufkleben der Trittplatte | Schablonen | Konstruktion | Produktion | offen |
| 24 | Verbesserung der Genauigkeit und der Kalibriermöglichkeit des Prüfstandes | Prüfstand | Elektronik / QS | QS | offen |
| 25 | Vereinfachung der Prüfstands-Software für bessere Effizienz | Prüfstand | Software | QS | offen |
| 26 | Vereinfachtes Handling des Gerätes Während der Produktion | Oberflächenschutz | Konstruktion | QS | offen |
| 27 | Verbesserte Winkelmessung (Rauschen) | Lagesensor | Elektronik | QS | offen |
| 28 | Besserer Halt der Rollkörper | Rollkörper | Konstruktion | QS | behoben |
| 29 | Verbesserte Stabilität der Kraftsensoren | Kraftsensoren | Konstruktion | QS | behoben |
| 30 | Stabilere Ladebuchse | Elektronik Hardware | Elektronik / Konstruktion | QS | offen |
| 31 | Verbessertes BT Modul | Bluetooth Modul | Elektronik | QS | offen |

Tabelle 13: Maßnahmen bei bereits behobenen Verbesserungsvorschlägen

| # | Verbesserungsvorschlag | Maßnahmen |
|---|---|---|
| 1 | Mehr Stabilität bei Belastung durch Sprung (Aktive Therapie); Verbesserte Stabilität der Kraftsensoren | Mechanischer Anschlag zum Schutz vor plastischer Verformung der Kraftsensoren |
| 2 | Rollkörper „knackt“ bei Belastung | Verbessertes Design der Rollkörper |
| 3 | Kabeldurchmesser des Netzteils an Stecker anpassen | Verwendung eines passenden Netzteiles |
| 4 | Besserer Halt der Rollkörper | Verwendung von mehreren Magneten zur Fixierung |
| 5 | Verbesserte Stabilität der Kraftsensoren | Mechanischer Anschlag zum Schutz vor plastischer Verformung der Kraftsensoren |

4.2. Bewertung der Verbesserungsvorschläge

Wie in Abschnitt 3.2.1 beschrieben, wurden die Verbesserungsvorschläge nach ihrem Aufwand-Nutzen-Verhältnis priorisiert. Mehrfach genannte Verbesserungsvorschläge wurden, sofern möglich, zu einzelnen Verbesserungspotentialen zusammengeführt. Verbesserungsvorschläge die nicht im Bereich Elektronik umzusetzen sind wurden aus der Liste entfernt. Tabelle 14 enthält die verbleibenden und bewerteten Verbesserungspotentiale mit der jeweils zugeordneten Priorität.

Tabelle 14: Bewertete und Priorisierte Verbesserungsvorschläge

| # | Verbesserungspotential | Bereich | Aufwand | Nutzen | Priorität |
|----|--|---------------------------|---------|--------|-----------|
| 1 | Neues Bluetooth Modul mit FCC Zertifizierung | Elektronik | Mittel | Hoch | Hoch |
| 2 | Verbesserung der Kraftmessung | Elektronik | Mittel | Hoch | Hoch |
| 3 | Verbesserung des Energiemanagements | Elektronik | Gering | Mittel | Hoch |
| 4 | DMS Beschriftung auf Platine richtigstellen | Elektronik | Gering | Hoch | Hoch |
| 5 | Vereinfachter Workflow für das Bedaten der Elektronikplatine | Elektronik | Gering | Hoch | Hoch |
| 6 | Verbesserung der Winkelmessung | Elektronik | Mittel | Hoch | Hoch |
| 7 | Stabilere Ladebuchse | Elektronik / Konstruktion | Hoch | Hoch | Mittel |
| 8 | Einfachere Erreichbarkeit des Ein/Aus Schalters | Elektronik / Konstruktion | Mittel | Mittel | Mittel |
| 9 | Einfachere Montage der Magnetladebuchse | Elektronik / Konstruktion | Hoch | Mittel | Mittel |
| 10 | Akku Schutzmodul anpassen | Elektronik | Mittel | Gering | Niedrig |

4.3. Definition der Anforderungen an das Redesign

Zu den erarbeiteten Verbesserungspotentialen in Tabelle 14 wurde nun der jeweilige IST-Stand erhoben um mögliche Lösungsansätze zu finden mit denen eine Umsetzung des Redesigns möglich ist. Dabei konnten folgende Ansätze identifiziert werden:

- Redesign des Geräteaufbaus
- Optimierung der Usability
- Auswahl kritischer Komponenten
- Redesign der Elektronik
- Redesign der Firmware

Der IST-Stand sowie die Zuordnung der jeweiligen Lösungsansätze zu den Verbesserungspotentialen findet sich in Tabelle 15.

Hieraus konnten nun die genauen Anforderungen an die einzelnen Aspekte des Redesigns definiert werden welche in Tabelle 16 zusammengefasst sind. Diese Anforderungen bilden die Grundlage für die Umsetzung der Verbesserungspotentiale.

Tabelle 15: Identifizierung des IST-Standes und Zuordnung der Lösungsansätze

| # | Verbesserungspotential | IST-Stand | Lösungsansatz |
|----|--|---|---|
| 1 | Neues Bluetooth Modul mit FCC Zertifizierung | <ul style="list-style-type: none"> • Bluetooth Modul ohne FCC Kennzeichnung verwendet • ungünstige Platzierung der Antenne • Klasse 2 Bluetooth | <ul style="list-style-type: none"> • Redesign des Geräteaufbaues • Auswahl kritischer Komponenten |
| 2 | Verbesserte Kraftmessung | <ul style="list-style-type: none"> • Permanenter Offset • Ungünstige Justiermethode • Fehler vor allem im Bereich des Körpergewichtes störend | <ul style="list-style-type: none"> • Redesign der Elektronik • Redesign der Firmware • Auswahl kritischer Komponenten |
| 3 | Verbesserung des Energiemanagements | <ul style="list-style-type: none"> • Wenig Möglichkeiten zur Energieeinsparung • keine optimale Erreichbarkeit des Tasters • hoher Standby Verbrauch | <ul style="list-style-type: none"> • Redesign der Elektronik • Redesign der Firmware • Optimierung der Usability • Auswahl kritischer Komponenten |
| 4 | DMS Beschriftung auf Platine richtigstellen | <ul style="list-style-type: none"> • keine optimale Beschriftung auf der Platine | <ul style="list-style-type: none"> • Redesign der Elektronik |
| 5 | Vereinfachter Workflow für das Bedaten der Elektronikplatine | <ul style="list-style-type: none"> • keine aktuelle Software • umständliches Handling beim Bedaten | <ul style="list-style-type: none"> • Redesign der Elektronik • Redesign der Firmware |
| 6 | Verbesserte Winkelmessung | <ul style="list-style-type: none"> • Schlechte Nullpunktstabilität • hohes Sensorrauschen | <ul style="list-style-type: none"> • Redesign der Elektronik • Redesign der Firmware • Auswahl kritischer Komponenten |
| 7 | Stabilere Ladebuchse | <ul style="list-style-type: none"> • ungünstige Einbausituation der Ladebuchse | <ul style="list-style-type: none"> • Redesign des Geräteaufbaues |
| 8 | Einfachere Erreichbarkeit des Ein-Aus Tasters | <ul style="list-style-type: none"> • Taster schwer erreichbar und an der Geräteunterseite • Gerät wird daher oft nicht ausgeschaltet | <ul style="list-style-type: none"> • Redesign des Geräteaufbaues • Optimierung der Usability |
| 9 | Einfachere Montage der Magnetladebuchse | <ul style="list-style-type: none"> • ungünstige Einbausituation der Ladebuchse | <ul style="list-style-type: none"> • Redesign des Geräteaufbaues |
| 10 | Akku Schutzmodul anpassen | <ul style="list-style-type: none"> • Abstand der Löt-Pads passt nicht optimal zu Akku | <ul style="list-style-type: none"> • Auswahl kritischer Komponenten |

Tabelle 16: Anforderungen an das Redesign

| # | Verbesserungspotential | Anforderung |
|----|--|--|
| 1 | Neues Bluetooth Modul mit FCC Zertifizierung | <ul style="list-style-type: none"> • BTM mit FCC Zertifizierung • Reichweite > 3m • Interne Antenne • Bluetooth Standard 2.1 EDR |
| 2 | Verbesserte Kraftmessung | <ul style="list-style-type: none"> • Messbereich: 0-1200N gesamt • Messbereich: 0-500N pro Sensor • Messgenauigkeit <5%±2LSB • Auflösung ≤ 1N |
| 3 | Verbesserung des Energiemanagements | <ul style="list-style-type: none"> • Laufzeit im Vollbetrieb min. 8 h • Standby Zeit > 2 Wochen |
| 4 | DMS Beschriftung auf Platine richtigstellen | <ul style="list-style-type: none"> • Eindeutige Benennung der Anschlüsse |
| 5 | Vereinfachter Workflow für das Bedaten der Elektronikplatine | <ul style="list-style-type: none"> • Implementieren einer PDI Schnittstelle • Verwenden eines Bootloaders (über Bluetooth) |
| 6 | Verbesserte Winkelmessung | <ul style="list-style-type: none"> • Messbereich > ±10° pro Richtung • Genauigkeit ±1° • Auflösung ≤ 0,5° |
| 7 | Stabilere Ladebuchse | <ul style="list-style-type: none"> • Schutz gegen Bruch und Lösen der Kontakte |
| 8 | Einfachere Erreichbarkeit des Ein-Aus Tasters | <ul style="list-style-type: none"> • Optimierte Platzierung des Ein-Aus Tasters |
| 9 | Einfachere Montage der Magnetladebuchse | <ul style="list-style-type: none"> • Vereinfachung des Produktionsablaufes |
| 10 | Akku Schutzmodul anpassen | <ul style="list-style-type: none"> • Akku Schutzmodul mit geeigneteren Abmaßen verwenden |

4.4. Umsetzung der Verbesserungspotentiale

4.4.1. Redesign des Geräteaufbaus und Optimierung der Usability

Im Zuge des neuen Platinen Konzeptes wurde eine grundlegende Änderung des Geräteaufbaus realisiert. Hauptbestandteil dieser Änderung ist eine Neupositionierung der Elektronikplatine in den mittleren Bereich des Gerätes.

In Abbildung 13 ist der Aufbau des Referenzdesigns zu sehen. Hierbei befindet sich die Elektronikplatine im linken Teil des Gerätes. Sämtliche Peripherie wie z.B. Bluetooth-Antenne,

Ladebuchse, oder Status-LED sind über einzelne Leitungen an der Platine angeschlossen. Zusätzlich wird sowohl für die Status-LED als auch die Bluetooth-Antenne eine eigene Platine benötigt. Dies verursacht neben zusätzlichen Kosten auch zusätzliche Arbeits- und Montagezeit im Zuge der Produktion.

In Abbildung 14 ist der Aufbau des Redesign zu sehen. Hierbei wurde die Elektronikplatine in die Mitte des Gerätes platziert. Dies setzt zwar bestimmte konstruktive Anpassungen voraus, gestaltet sich jedoch im Gesamtbild als äußerst vorteilhaft.

Aus der Neupositionierung der Elektronikplatine ergeben sich folgende Vorteile:

- Allgemein geringerer Verkabelungsaufwand
- Geringere Leitungslänge der Kraftsensoren
- Eine statt zuvor drei Platinen
- Ladebuchse wird direkt auf der Platine montiert daher höhere Stabilität und einfachere Montage
- Bessere Positionierung des Bluetooth-Moduls und dessen Antenne
- Kein externer Anschluss der Bluetooth Antenne
- Kein externer Anschluss der Status LED
- Bessere Erreichbarkeit des Ein-Aus Tasters da von Geräteoberseite zugänglich
- Aufbau verbessert das Handling während der Produktion

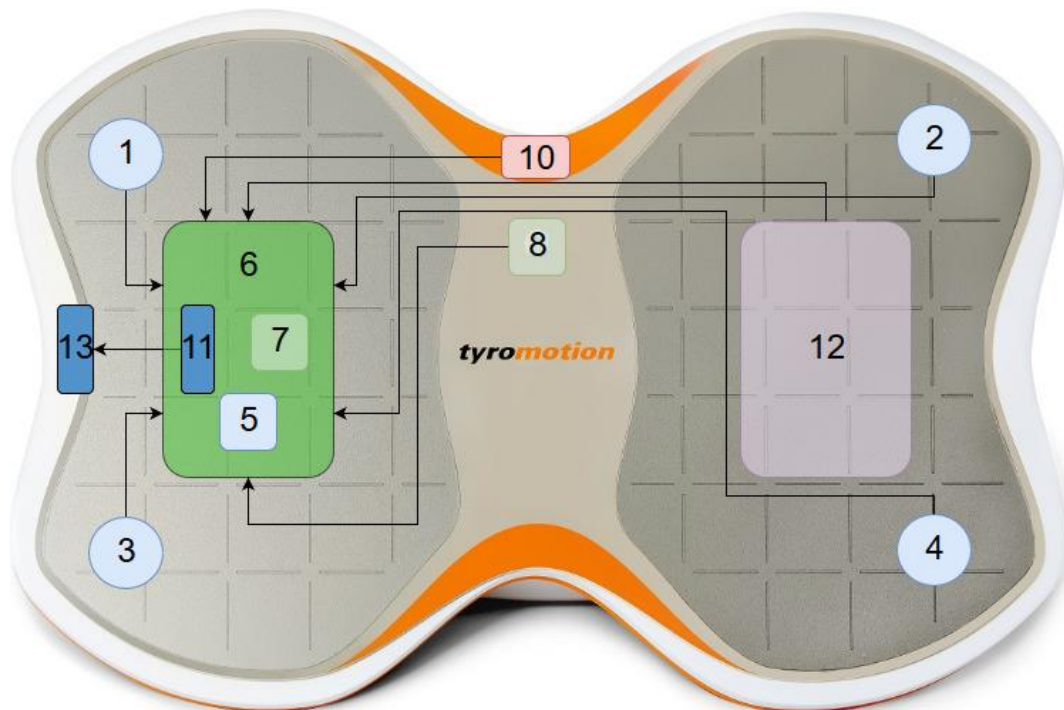


Abbildung 13: Elektronischer Aufbau des Referenzdesigns:

- 1,2,3,4: Kraftsensoren
- 5: Beschleunigungssensor
- 6: Elektronikplatine
- 7: Ein/Aus Taster
- 8: LED-Platine
- 10: Ladebuchse
- 11: Bluetooth Modul
- 12: Akku
- 13: PCB Bluetooth Antenne

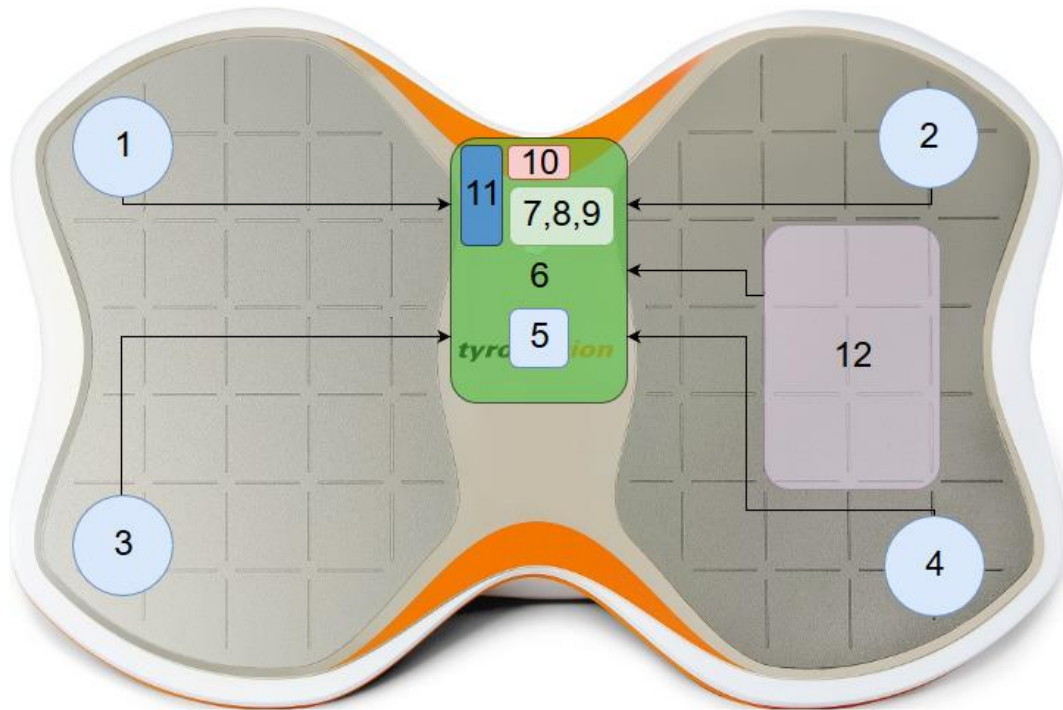


Abbildung 14: Elektronischer Aufbau des Redesigns TR4:

- 1,2,3,4: Kraftsensoren
- 5: Beschleunigungssensor
- 6: Elektronikplatine
- 7: Ein/Aus Taster
- 8: LED (integriert)
- 9: Summer
- 10: Ladebuchse
- 11: Bluetooth Modul (mit integrierter Antenne)
- 12: Akku

4.4.1.1. Anbringen der Ladebuchse an der Elektronikplatine

Die Ladebuchse zum Aufladen des integrierten Akkus kann nun direkt in die Platine integriert werden. Dies ermöglicht sowohl eine höhere Stabilität der Ladebuchse als auch einen verringerten Verdrahtungsaufwand im Inneren des Gerätes.

4.4.1.2. Integrieren der Status-LED auf der Elektronikplatine

Die Status Led, zum Anzeigen des aktuellen Gerätezustandes, kann nun direkt in die Elektronikplatine integriert werden. Dies erspart die bisher benötigte zusätzliche LED-Platine und deren Verdrahtung im Inneren des Gerätes. Durch die Auswahl eines sehr kompakten SMD Gehäuses ist der Platzbedarf auf der Platine minimal.

4.4.1.3. Ausrichtung des Bluetooth Moduls

Durch die mittig angebrachte Platine ergibt sich eine optimierte Position für das Bluetooth Modul. Die Ausrichtung der Antenne erfolgt nun zur Geräte Vorderseite, und somit in den meisten Anwendungsfällen direkt in Richtung des Bluetooth Empfängers am PC. Des Weiteren ist es durch die Neuausrichtung möglich ein Bluetooth Modul mit integrierter Antenne (Chip Antenne) zu verwenden. Dies erspart das Anbringen und die Verdrahtung der externen PCB-Antenne.

4.4.1.4. Position des Ein-Aus Tasters

Der Ein-Aus Taster befindet sich nun an der Geräte Oberseite. Dies ermöglicht eine einfachere Bedienung im Vergleich zu dem Taster an der Gräte Unterseite. Der Taster wurde als kapazitives Touch Element ausgeführt. Dies bietet eine höhere Stabilität gegen mechanische Abnutzung sowie einen besseren Eindringenschutz gegen Staub und Feuchtigkeit.

4.4.1.5. Verringerter Verkabelungsaufwand der Kraftsensoren

Durch die mittige Positionierung der Platine verringert sich die Leitungslänge zu den Kraftsensoren in Inneren des Gerätes. Dies erleichtert die Produktion da nun auf Einziehhilfen verzichtet werden kann. Zusätzlich wirkt sich eine verringerte Leitungslänge positiv auf die Signalqualität aus.

4.4.1.6. Montage, Austausch und Wartung

Der Einbau der Platine wurde so gestaltet, dass ein einfacher Austausch bei etwaigen Reparaturen erfolgen kann. Hierzu wird die Platine in einer Kunststoff Halterung (Einschub Modul) befestigt welche danach in das Gerät eingeschoben wird. Dies ermöglicht auch das Vorfertigen von Baugruppen während der Produktion.

4.4.1.7. Optimierung des Bedienkonzeptes

Durch das Anbringen des Ein-Aus Tasters an der Geräteoberseite ist dieser im Vergleich zum derzeitigen Design wesentlich einfacher zu erreichen. Des Weiteren ist der Taster nun nicht mehr durch eine Ausnehmung in der Platinen Abdeckung zu betätigen, sondern kann durch Berühren der Touch Oberfläche betätigt werden. Durch die vereinfachte Bedienung ist es dem Anwender besser möglich, das Gerät nach dem Gebrauch auszuschalten. Dies erhöht zusätzlich die Akkulaufzeit und verringert die Anzahl an Ladezyklen. Die Einbaulage des Tasters ist in Abbildung 15 dargestellt. Um die Bedienerfreundlichkeit weiter zu verbessern wurde ein akustischer Signalgeber (Piezo-Summer) in das Gerät integriert. Somit ist es möglich dem Anwender, zum Beispiel beim Bedienen des Tasters, zusätzlich ein akustisches Feedback zu geben.



Abbildung 15: Position des Ein/Aus Tasters; Links: Taster an der Geräte Unterseite (Referenzmodell); Rechts: Taster an der Geräte Oberseite (Redesign)

4.4.2. Auswahl kritischer Komponenten

Die Anforderungen an das Redesign aus Tabelle 16 können zum Teil durch den Einsatz verbesserter Elektronikbauteile umgesetzt werden. Des Weiteren müssen für kritische Komponenten bestimmte Anforderungen definiert werden um eine Auswahl und eine Bewertung nach objektiven Kriterien zu ermöglichen. In Tabelle 17 sind diese Komponenten und deren Anforderungen aufgelistet.

Tabelle 17: Anforderungen an kritische Komponenten

| kritische Komponenten | Anforderung |
|------------------------|--|
| Bluetooth Modul | <ul style="list-style-type: none"> • BTM mit FCC Zertifizierung • geringer Stromverbrauch • Reichweite > 3m • Integrierte Antenne • Bluetooth Standard 2.1 • Geringe Abmessung • Einfache Konfigurierung |
| Mikrocontroller | <ul style="list-style-type: none"> • geringer Stromverbrauch • 12 Bit, 4 Kanal ADC • 12 Bit, 4 Kanal DAC • I2C Schnittstelle • UART Schnittstelle |
| Spannungsregler | <ul style="list-style-type: none"> • geringer Ruhestrom • Enable/Disable Möglichkeit • geringe Drop-Out Spannung |
| Beschleunigungssensor | <ul style="list-style-type: none"> • Messbereich > $\pm 1g$ • Auflösung ≤ 10 Bit • I2C Schnittstelle • geringer Stromverbrauch |
| Instrumentenverstärker | <ul style="list-style-type: none"> • Verstärkung >330 • gute CMMR |

4.4.2.1. Auswahl des Bluetooth Moduls

Gemäß den Anforderungen aus Tabelle 17 wurden zunächst verschiedene Bluetooth Module ausgewählt, welche für das Redesign in Frage kommen. Tabelle 18 zeigt das Ergebnis der Recherche.

Tabelle 18: Übersicht möglicher Bluetooth Module

| | BTM-112 (Rayson) | PAN1322-SPP (Panasonic) | RN-41 (Microchip) | LM780 (LM Technologies) |
|---------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|---|
| Bluetooth Standard | 2.0 + EDR | 2.1 + DER | 2.1+EDR | 2.1+EDR |
| Stromaufnahme | 46 mA | 40 mA | 65 mA | 19 mA |
| Reichweite | N/A | 10 m | Bis 100 m | Bis 30 m |
| FCC Zertifizierung | nein | ja | ja | ja |
| Integrierte Antenne | nein | ja | ja | ja |
| Konfigurierung über AT-Kommando | ja | ja | ja | ja |
| Abmessungen | L: 25 mm B: 14,5 mm H: 2,2 mm | L: 15,6 mm B: 8,7 mm H: 2,8 mm | L: 20 mm B: 13,4 mm H: 2 mm | L: 26.92 mm B: 15.20 mm H: 2.0 mm |

Aufgrund der geringen Abmessungen bei gleichzeitig moderatem Stromverbrauch und Erfüllung aller Anforderungen wurde zunächst das Bluetooth Modul PAN1322-SPP ausgewählt. Mit diesem Modul konnte jedoch in der geplanten Einbausituation die geforderte Reichweite nicht erreicht werden. Um das Risiko von Verbindungsproblemen so gering wie möglich zu halten wurde das Bluetooth Modul RN-41 der Firma Microchip ausgewählt. Dieses Modul bietet eine erheblich höhere Sendeleistung weist jedoch einen etwas höheren Energiebedarf auf. Dieser liegt bei geeigneter Implementierung des Moduls im akzeptablen Bereich. [12]

4.4.2.2. Auswahl des Mikrocontrollers

Das zentrale Element der Elektronik Hardware bildet der Mikrocontroller. Dieser ist für die Datenerfassung, Datenverarbeitung und die Ablaufsteuerung des Gerätes zuständig. Bei der Auswahl des Mikrocontrollers wurden die Anforderungen aus Tabelle 17 berücksichtigt.

Ein weiteres Kriterium für die Auswahl ist die Berücksichtigung des Unternehmensstandards wie in Abschnitt 3.3 beschrieben. Aufgrund dessen sollte Vorzugsweise ein 8 Bit Mikrocontroller des Typs Atmel AVR verwendet werden. Die genannten Anforderungen beschränkt bei gegebenem Typ die Auswahl auf folgende zwei Modelle:

- ATxmega64A1U-AU
- ATxmega128A1U-AU

Aufgrund des größeren Flash-Speichers von 128kByte bei nur geringfügig höherem Preis wurde das Modell ATxmega128A1U-AU ausgewählt. Die genauen Leistungsdaten des Mikrocontrollers sind den Datenblättern [13] und [14] zu entnehmen .

4.4.2.3. Auswahl der Spannungsregler

Ein Spannungsregler dient dazu eine konstante, geregelte Spannung für die Elektronik zur Verfügung zu stellen. Im konkreten Fall wird die Akku-Spannung welche je nach Ladezustand in einem Bereich von ca. 3,6 V bis 4,2 V liegen kann auf eine Spannung von 3,3 V geregelt. Da es Bereiche der Elektronik gibt, welche in ausgeschaltetem Zustand nicht versorgt werden müssen wurden für die diese Bereiche jeweils eigene Spannungsregler mit Disable-Funktion verwendet. Dies ermöglicht es per Mikrocontroller Teile der Elektronik, wie beispielsweise die Kraftmessung oder das Bluetooth-Modul, komplett von der Spannungsversorgung zu trennen, wenn diese nicht benötigt werden, und somit Akkukapazität einzusparen. Im ausgeschaltetem Zustand benötigt der Spannungsregler lediglich einen sehr geringen Ruhestrom von $< 1\mu\text{A}$.
[15]

4.4.2.4. Auswahl des Beschleunigungssensors

Der bisher verwendete Beschleunigungssensor erfüllt prinzipiell alle Anforderungen an die Winkelmessung. Aufgrund eines ungünstigen Layouts der Platine wurde das Messsignal jedoch negativ beeinflusst was oft in fehlerhaften Beschleunigungswerten resultierte. Das Layout der Platine wurde optimiert um eine bestmögliche Signalqualität zu erlangen (Abbildung 16). Die Vorteile dieses Beschleunigungssensors sind seine hohe Genauigkeit und der geringe Energieverbrauch.

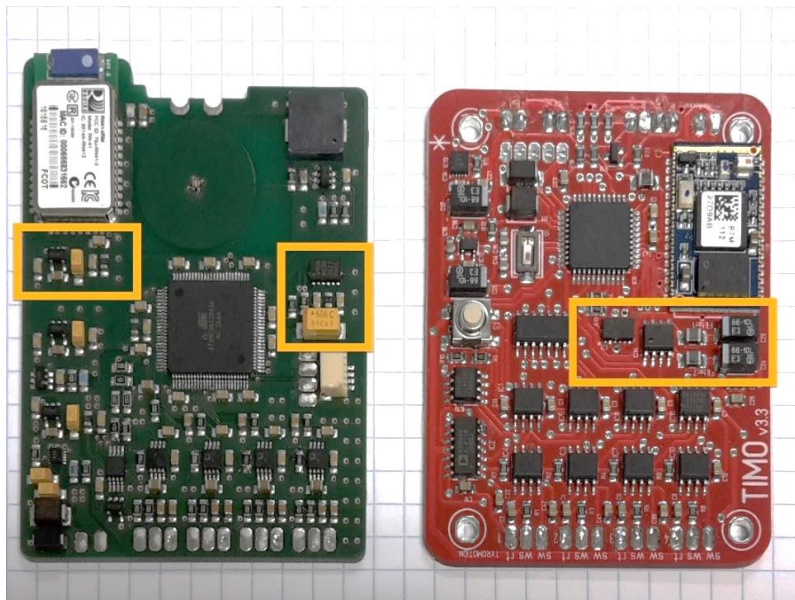


Abbildung 16: Layout der Spannungsversorgung des Beschleunigungssensors; links: Redesign mit eigenem Spannungsregler für das Bluetooth-Modul und Stützkondensator für den Beschleunigungssensor; rechts: Beschleunigungssensor und Bluetooth-Modul werden über dieselbe Leiterbahn versorgt.

4.4.2.5. Auswahl des Instrumentenverstärkers

Der Instrumentenverstärker dient zur Verstärkung und Anpassung der Brückenspannung V_B an den Spannungsbereich des Analog-Digital-Wandlers. Bei dem verwendeten Instrumentenverstärker handelt es sich um eine hochqualitative Type mit gutem Rauschverhalten (AD8223, Analog Devices). Durch den Einsatz eines Instrumentenverstärkers mit geringfügig bessere Eigenschaften wurde versucht die Qualität der Kraftmessung weiter zu erhöhen. Vor allem die Gleichtaktunterdrückung (CMRR) konnte durch den neuen

Instrumente Verstärker (AD8226, Analog Devices) verbessert werden. Weitere Details können den jeweiligen Datenblättern [16] und [17] entnommen werden.

Tabelle 19: Vergleich der Gleichtaktunterdrückung der Instrumentenverstärker

| | AD8223 | AD8226 |
|------------------------|------------|-------------|
| Instrumentenverstärker | AD8223 | AD8226 |
| CMRR, DC to 60 Hz | min. 90 dB | min. 120 dB |

4.4.2.6. Auswahl des Akku Schutzmodules

Um den eingebauten Lithium-Polymer Akku gegen Tiefentladung, Überspannung und Überstrom, zum Beispiel im Falle eines Kurzschlusses, zu schützen wird dieser mit einem Schutzmodul versehen. Dieses Modul wird direkt an den Anschlusskontakten des Akkus angebracht um einen optimalen Schutz, auch etwa bei beschädigten Leitungen; zu gewährleisten. Bei der aktuell verwendeten Type passen die Abstände der Löt-Pads nicht optimal zu den Kontakten des Akkus. Es wurde daher versucht ein neues Schutzmodul zu finden, bei dem die Kontaktabmessungen besser zu der des Akkus passen, um den Lötprozess während der Produktion zu vereinfachen. Die Recherche hat ergeben, dass es lediglich eine relevante Alternative zu dem derzeit verwendeten Schutzmodul gibt. Jedoch sind auch die Abmessungen dieses Moduls nicht optimal für den verwendeten Akku geeignet (Abbildung 17). Das Verbesserungspotential konnte daher nicht umgesetzt werden. Da die Priorität dieses Verbesserungspotential als niedrig eingestuft wurde, ist die Umsetzung optional.

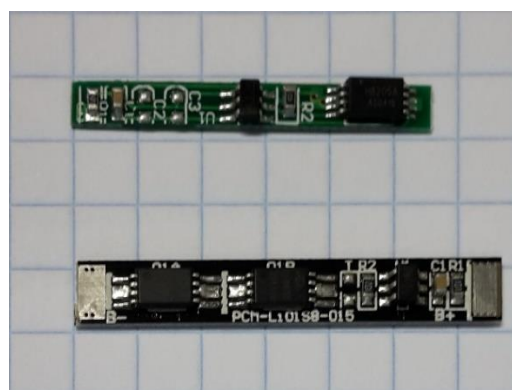


Abbildung 17: Vergleich der Akku-Schutzmodule; oben: derzeit verwendetes Modul; unten: alternatives Modul

4.4.3. Redesign der Elektronikplatine

Das Design der Elektronikplatine wurde vollständig überarbeitet, wodurch wesentliche Verbesserungspotentiale umgesetzt werden konnten. Im Folgenden sind die wichtigsten Änderungen erläutert. In Abbildung 18 sind die einzelnen Bereiche der Elektronikplatine beschrieben.

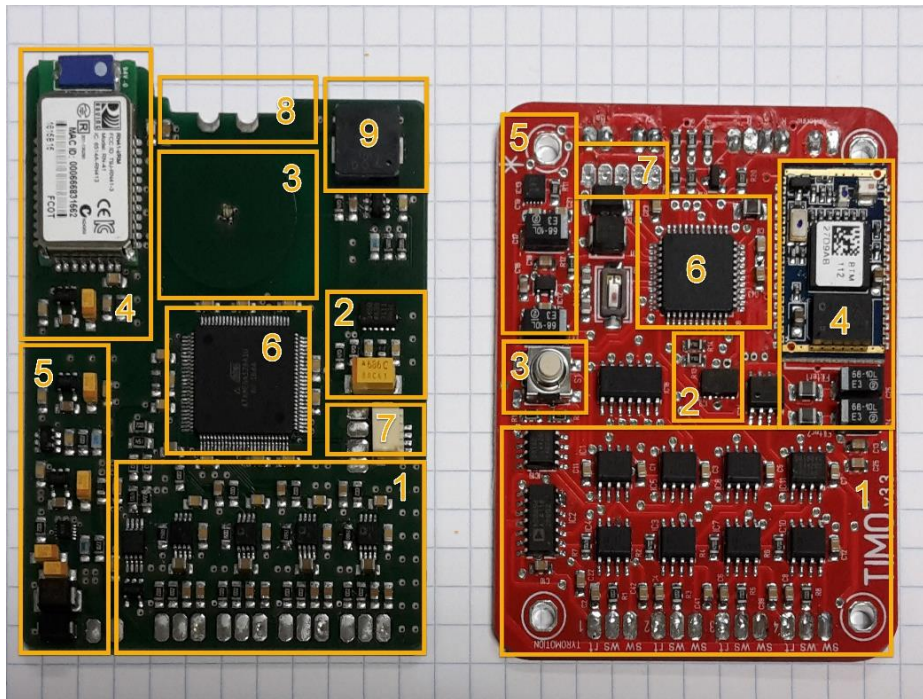


Abbildung 18: Bezeichnung der wichtigsten Platinen Bereiche.

Links: Redesign, Rechts: Referenzdesign

- Analog teil (1)
- Beschleunigungssensor (2)
- Taster und Status LED (3)
- RF Teil (Bluetooth) (4)
- Spannungsregler (5)
- Mikrocontroller (6)
- Programmierbuchse (7)
- Ladebuchse (8)
- Akustischer Signalgeber (9)

4.4.3.1. Anpassen der DMS Beschriftung

Die Beschriftung der DMS Anschlüsse auf der Platine Abbildung 18 (1) erfolgte bisher nach den Aderfarben der Anschlussleitungen. Da diese Farbcodierung seitens des Herstellers nicht immer gleich ist, kann es hierdurch zu Verwechslungen kommen. Die Beschriftung der Löt-Pads wurde geändert, so dass nun die Signalnamen der jeweiligen Anschlüsse auf der Platine aufgedruckt sind. Die farbliche Zuordnung kann somit in der Montageanweisung des Geräts erfolgen und erfordert im Falle einer Änderung keine Bearbeitung des Bestückungsdrucks auf der Platine.

4.4.3.2. Vereinfachtes Bedaten des Mikrocontrollers

Die Schnittstelle für das Bedaten des Mikrocontrollers ist bisher nur über eine eigens dafür entworfene Platine mit Federkontakt-Stiften zugänglich da die dafür vorgesehenen Kontakte auf der Platine aus Platzgründen als Pads ausgeführt waren (Abbildung 18 (7)). Die Schnittstelle wurde nun zur Vereinfachung des Workflows als Stecker ausgeführt. Dies ermöglicht die Verwendung eines Standard-Programmieradapters welcher bereits für ähnliche Prozesse im Zuge der Gerätefertigung eingesetzt wird. Das Bedaten des Mikrocontrollers lässt sich somit einfacher und schneller in den Produktionsprozess integrieren.

4.4.3.3. Anpassung der Ladebuchse und Vereinfachung der Montage

Die Kontakte der Ladebuchse wurden bisher mit Aderleitungen an der Platine angeschlossen (Abbildung 13). Dies verursacht einen zusätzlichen Verkabelungsaufwand und eine erschwerte Anbringung der Ladkontakte am Gehäuse. Durch die mittige Positionierung und dem Verbau der Platine in einem Einschub-Modul ist es nun möglich die Ladkontakte direkt an der Platine zu verlöten. Dies erleichtert die Montage und erhöht zusätzlich die Stabilität der Ladebuchse.

4.4.3.4. Vereinfachung der Erreichbarkeit des Ein-Aus Tasters

Wie in Punkt 4.4.1.7 beschrieben wurde die Erreichbarkeit des Ein-Aus Tasters verbessert in dem dieser nun an der Oberseite des Gerätes platziert ist. Um eine ausreichende mechanische Stabilität zu gewährleisten und den Eindringenschutz gegen Staub und Feuchtigkeit zu erhöhen

wurde der Taster als kapazitives Touch-Element ausgeführt (Abbildung 15). Dies ermöglicht ein Betätigen des Tasters durch Berührung der Gehäuseoberfläche an der gekennzeichneten Stelle. Zur Implementierung der Touch Erkennung wurde ein Touch-Sensor IC der Firma Microchip verwendet (siehe [18]). Dieser integrierte Schaltkreis ermöglicht eine sehr einfache und kompakte Implementierung der Touch-Elektrode in das Gerätedesign und sorgt für eine zuverlässige Funktion des Tasters (Abbildung 18 (3)). Details zur Funktion des Tasters können der entsprechenden Application-Note (siehe [19]) entnommen werden.

4.4.4. Redesign der Firmware

Die Firmware wurde im Zuge des Redesigns zur Gänze neugestaltet. Teile der bestehenden Firmware konnten zwar sinngemäß übernommen werden, jedoch war aufgrund wesentlicher Umstrukturierungen eine vollständige Neugestaltung notwendig. Bei dem Redesign der Firmware wurde prinzipiell auf folgende Punkte besonderes Augenmerk gelegt:

- Möglichst konsequente strukturierte Programmierung
- Einheitliche und verständliche Benennung von Variablen
- Vermeidung von „Hard-Coding“ wenn sinnvoll
- Einheitlicher und leicht verständlicher Aufbau
- Einfache Wartbarkeit und Erweiterbarkeit
- Durchgehende und verständliche Kommentierung

Der allgemeine Aufbau sowie der grobe Ablauf der Firmware sind in Abbildung 19 dargestellt. Aus Gründen der besseren Übersicht beinhaltet dies jedoch nur die wichtigsten Funktionen und Kommandos, die in der Firmware ausgeführt werden. Zur detaillierten Funktionsweise der Firmware sei an dieser Stelle an den Source-Code verwiesen. Es wurde durchgehend auf eine verständliche Kommentierung geachtet, wodurch sich die Funktionsweise der Firmware sehr einfach aus dem Source-Code erschließt.

Im Zuge des Redesigns wurden die Anforderungen aus Tabelle 8 umgesetzt. Zusätzlich zu den allgemeinen Anforderungen wurden jedoch weitere Verbesserungen implementiert welche im Folgenden kurz erläutert werden.

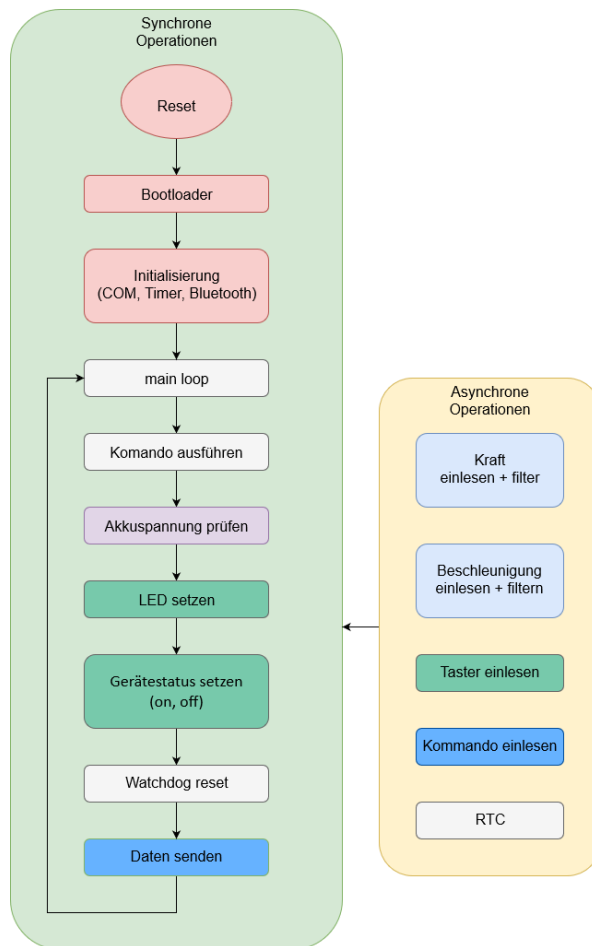


Abbildung 19: Ablauf der wichtigsten Firmware Funktionen

4.4.4.1. Vereinfachter Justierungs-Prozess der Kraftsensoren

Jeder Kraftsensor muss nach erfolgter Endmontage des Gerätes justiert werden bevor eine korrekte Anzeige des Kraftwertes gewährleistet ist. Bei der Justierung wird der angezeigte Ist-Wert mit dem Soll-Wert verglichen. Aus dem Quotient der beiden Werte ergibt sich der sogenannte k-Wert für den jeweiligen Sensor (Gleichung (17)).

$$k_{Sensor} = \frac{F_{soll}}{F_{ist}} \quad (17)$$

Der k-Wert wird im Gerät gespeichert und bei jeder weiteren Messung berücksichtigt, sodass der korrekte Kraftwert angezeigt wird.

Die Justierung wird durch Belasten des Sensors mit einem kalibrierten Prüfgewichtgewicht durchgeführt. Der Wert des Gewichtes wird dem Gerät per Kommando als aktueller Soll-Wert übergeben. Die Berechnung und Speicherung des k-Wertes erfolgt danach automatisch direkt im Gerät.



Abbildung 20: Justierung des Kraftsensors mit 10kg Prüfgewicht

4.4.4.2. Automatische Ausschaltfunktion

Um den Bedienkomfort des Gerätes weiter zu verbessern wurde eine automatische Abschaltfunktion implementiert. Diese schaltete das Gerät ab, falls es über eine Zeitdauer von mehr als 60 Minuten nicht mit dem PC verbunden ist. Hierdurch wird gewährleistet, dass der Akku sich nicht völlig entleert, sollte vergessen werden das Gerät auszuschalten. Durch eine verringerte Anzahl an Ladezyklen erhöht sich auch die Lebensdauer des Akkus. Um die Usability weiter zu verbessern ist es nun auch möglich das Gerät direkt per Software auszuschalten. Das dafür notwendige Kommando wurde in der neuen Firmware implementiert.

4.5. Messergebnisse zur Verifizierung der Anforderungen

Im folgenden Abschnitt sind die Messergebnisse zur Verifizierung der Anforderungen aus Punkt 4.3 angeführt.

Die Verifizierung wurde mit dem Gerät der Seriennummer TP4-2017-003 durchgeführt. Es handelt sich hierbei um einen finalen Prototyp welcher weitgehend identisch zum tatsächlichen Seriengerät ist.

4.5.1. Messergebnisse zur Verifizierung der Kraftmessung

4.5.1.1. Test der Parameter der Kraftmessung auf Normalverteilung

Vor der Auswertung der Parameter der Kraftmessung wurde die statistische Verteilung der Messwerte überprüft. Hierzu wurden von jedem Kraftsensor zwei Messreihen aufgezeichnet und mit Hilfe des Kolmogorov-Smirnov-Tests überprüft, ob die Grundgesamtheit der Daten einer Normalverteilung entspricht. Für alle vier Sensoren hat sich in jedem der zwei gemessenen Arbeitspunkte gezeigt, dass die Null-Hypothese N_0 des KS-Tests zum gegebene Signifikanzniveau α abgelehnt wird ($h=1$) (Tabelle 20).

In Abbildung 21 bis Abbildung 28 sind die Histogramme sowie die empirischen Verteilungsfunktionen der Messungen mit einer Belastung von 98,02N und den dazugehörigen Funktionen der Normalverteilung dargestellt.

Die Abweichung der Messreihen zur Normalverteilung sind auch in Abbildung 21 bis Abbildung 28 zu erkennen. Auch aufgrund der geringen Streuung der Messwerte ist keine signifikante Ähnlichkeit zur Normalverteilung gegeben.

Zur Auswertung der Messreihen wurde daher der Median als Lageparameter sowie der Interquartilsabstand als Streuungsmaß verwendet. Diese zeigen sich stabiler gegenüber Ausreißern und sind für nicht normalverteilte Stichproben aussagekräftiger.

Tabelle 20: Ergebnisse des KS-Tests für alle vier Sensoren in jeweils zwei Arbeitspunkten

| | 0 N | | 98,02 N | |
|----------|--------------|------|--------------|------|
| | KS-Parameter | | KS-Parameter | |
| | h | p | h | p |
| Sensor 1 | 1 | 0,00 | 1 | 0,00 |
| Sensor 2 | 1 | 0,00 | 1 | 0,00 |
| Sensor 3 | 1 | 0,00 | 1 | 0,00 |
| Sensor 4 | 1 | 0,00 | 1 | 0,00 |

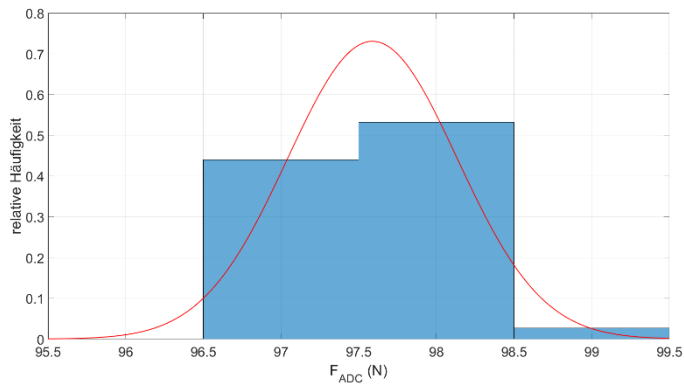


Abbildung 21: Histogramm Sensor 1, F=98,02N

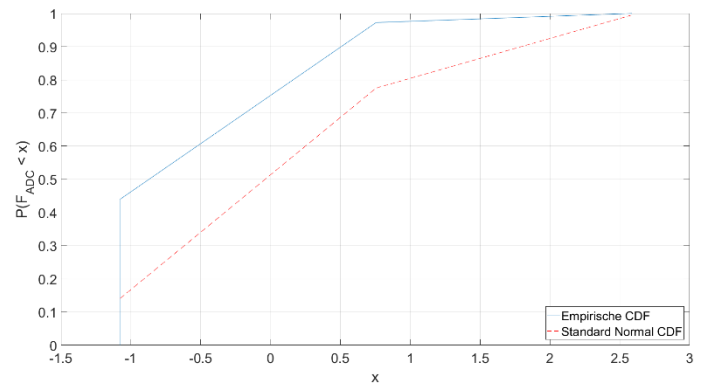


Abbildung 22: CDF Sensor 1, F=98,02N

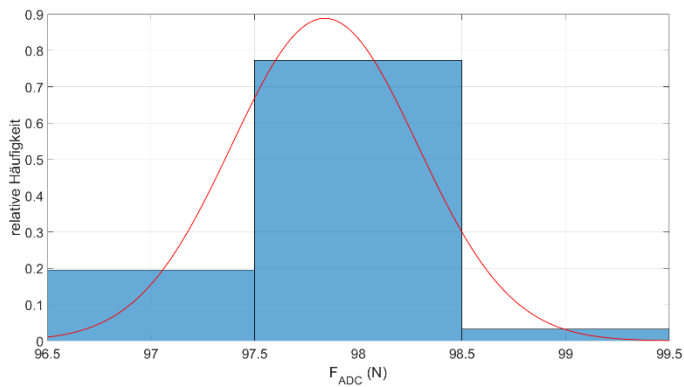


Abbildung 23: Histogramm Sensor 2, F=98,02N

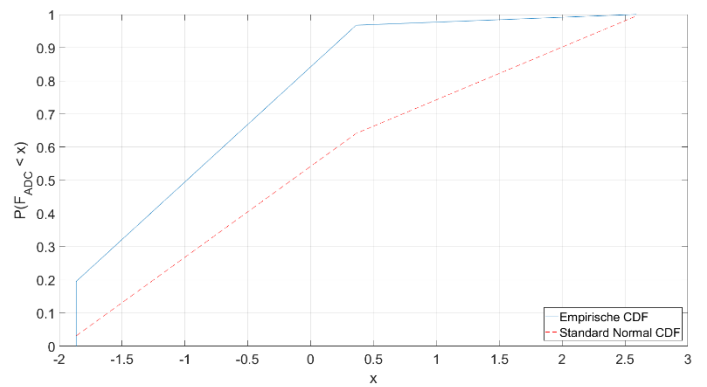


Abbildung 24: CDF Sensor 2, F=98,02N

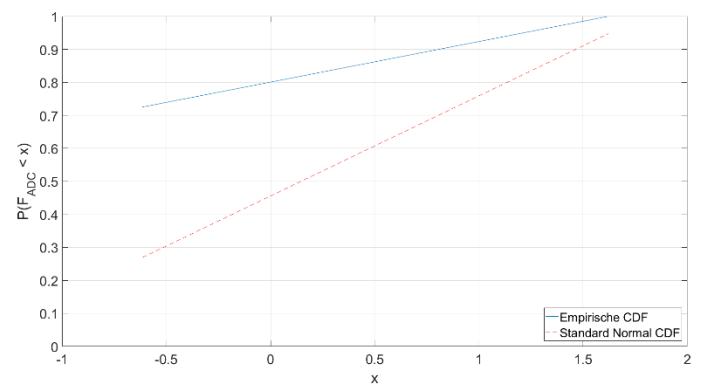
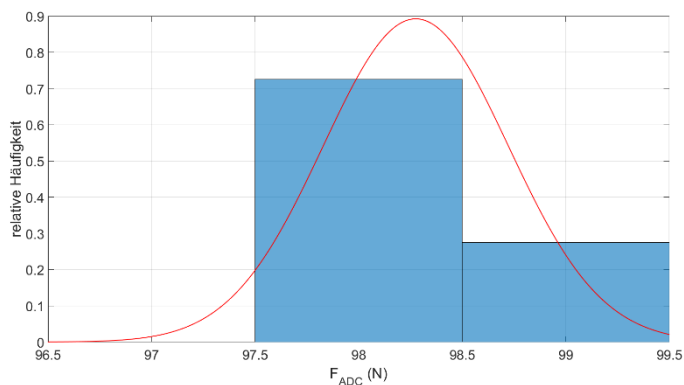


Abbildung 25: Histogramm Sensor 3, F=98,02N

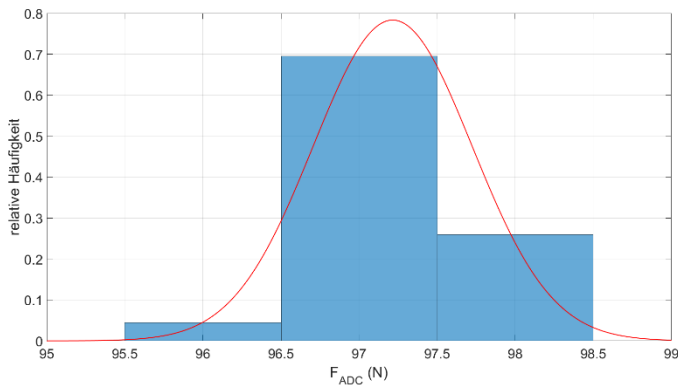


Abbildung 27: Histogramm Sensor 4, F=98,02N

Abbildung 26: CDF Sensor 3, F=98,02N

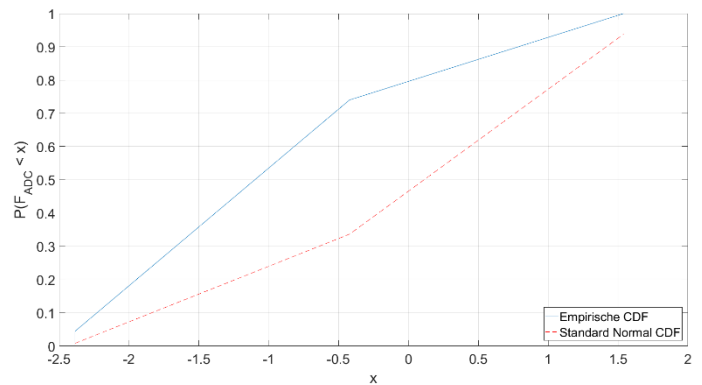


Abbildung 28: CDF Sensor 4, F=98,02N

4.5.1.2. Messergebnisse zur Verifizierung der Genauigkeit der Kraftmessung

Um die Messgenauigkeit zu bestimmen, wurde jeder Kraftsensor einzeln sowie das Gesamtgerät mit einem Prüfgewicht belastet und der gemessene Wert mit dem Sollwert verglichen. Um ein signifikantes Ergebnis zu erhalten, wurden bei jeder Messung 400 Werte berücksichtigt was einer Messdauer von 6 Sekunden entspricht. Die Messergebnisse sind in Tabelle 28 bis Tabelle 32 (siehe Abschnitt 8.1.1) zusammengefasst. Des Weiteren sind in den Tabellen die jeweiligen oberen und unteren Fehlergrenzen für die Toleranzbereiche $\pm 1\% \pm 1\text{LSB}$ und $\pm 3\% \pm 2\text{LSB}$ sowie der absolute und der relative Fehler (F_a , F_r) angegeben. Die Mediane der Messungen sowie die Toleranzbereiche sind in den Abbildung 29 bis Abbildung 33 veranschaulicht. Die Auflösung der Kraftsensoren beträgt 1N pro LSB.

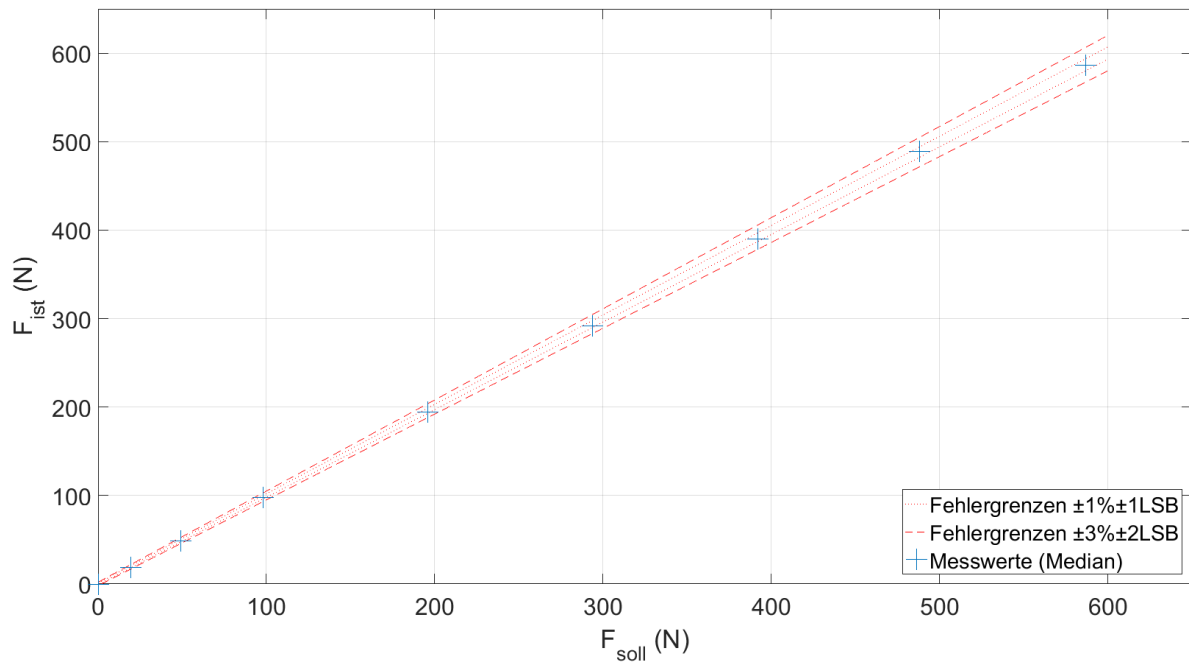


Abbildung 29: Auswertung Redesign Kraftsensor 1

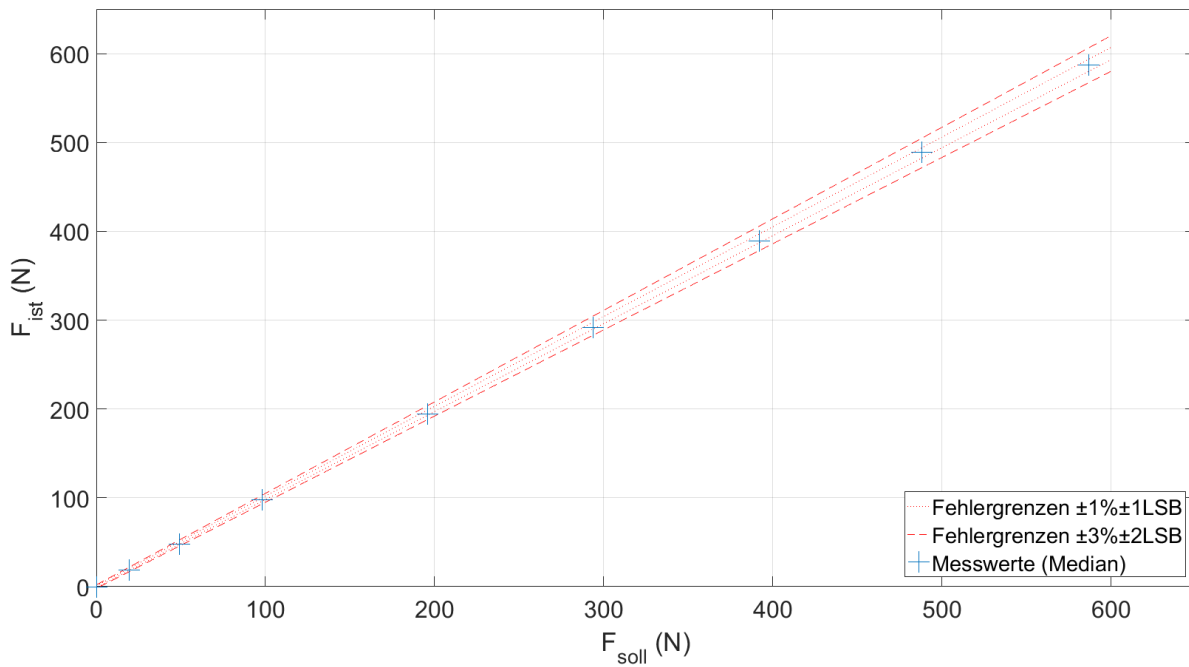


Abbildung 30: Auswertung Redesign Kraftsensor 2

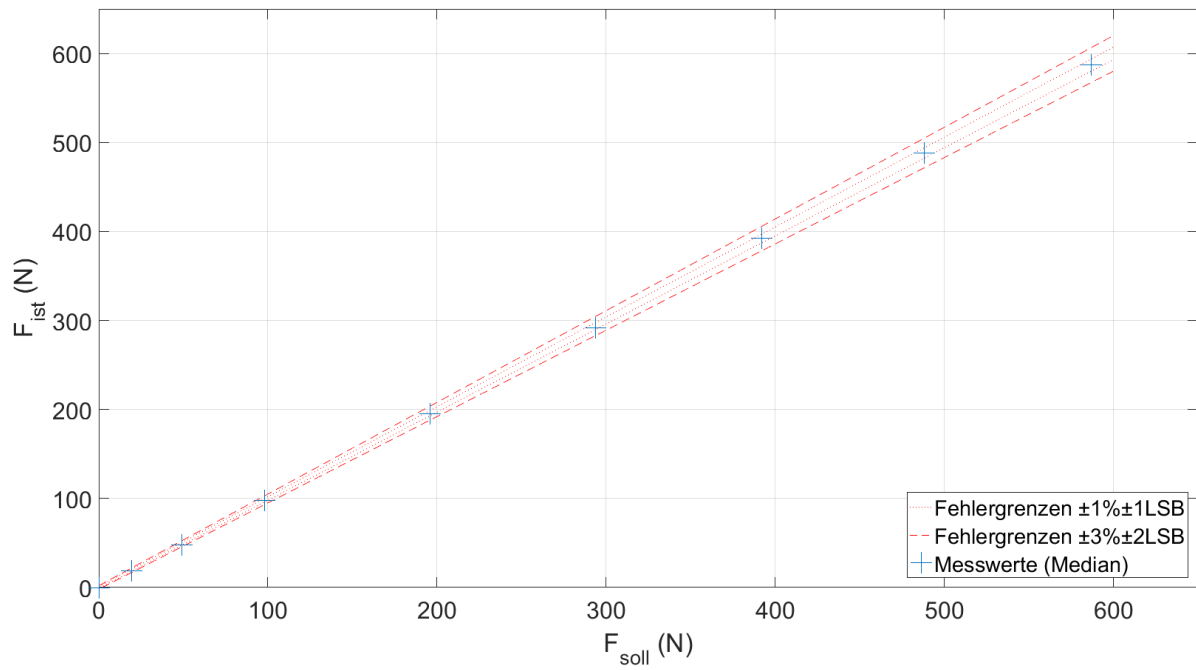


Abbildung 31: Auswertung Redesign Kraftsensor 3

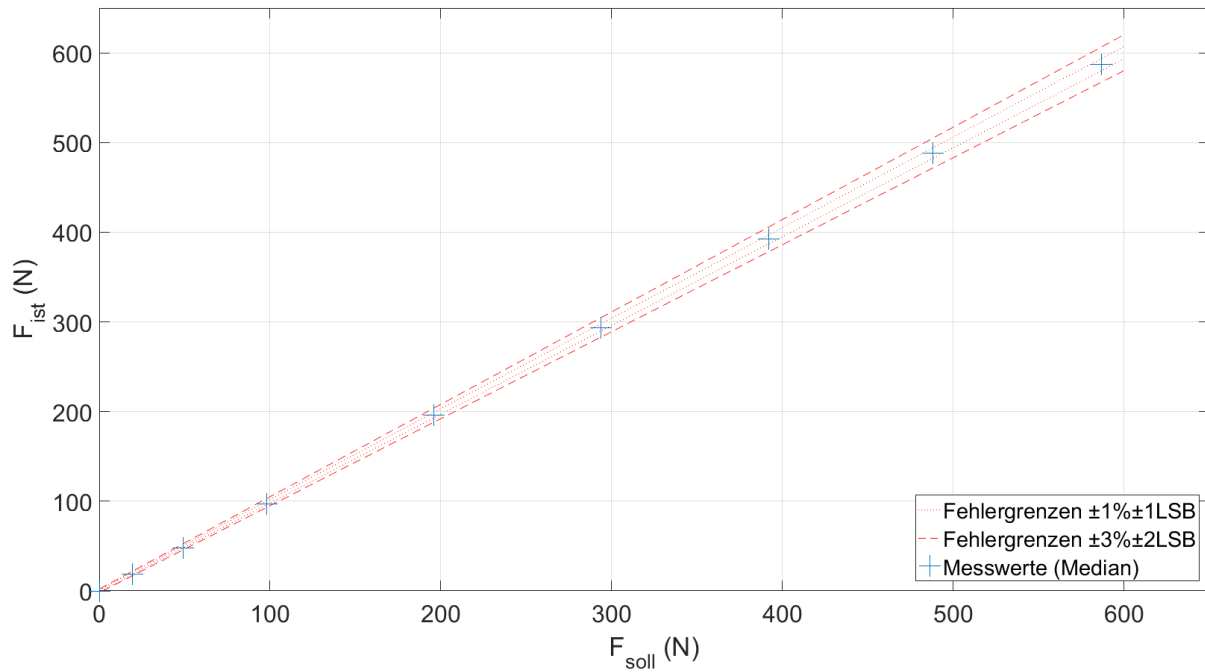


Abbildung 32: Auswertung Redesign Kraftsensor 4

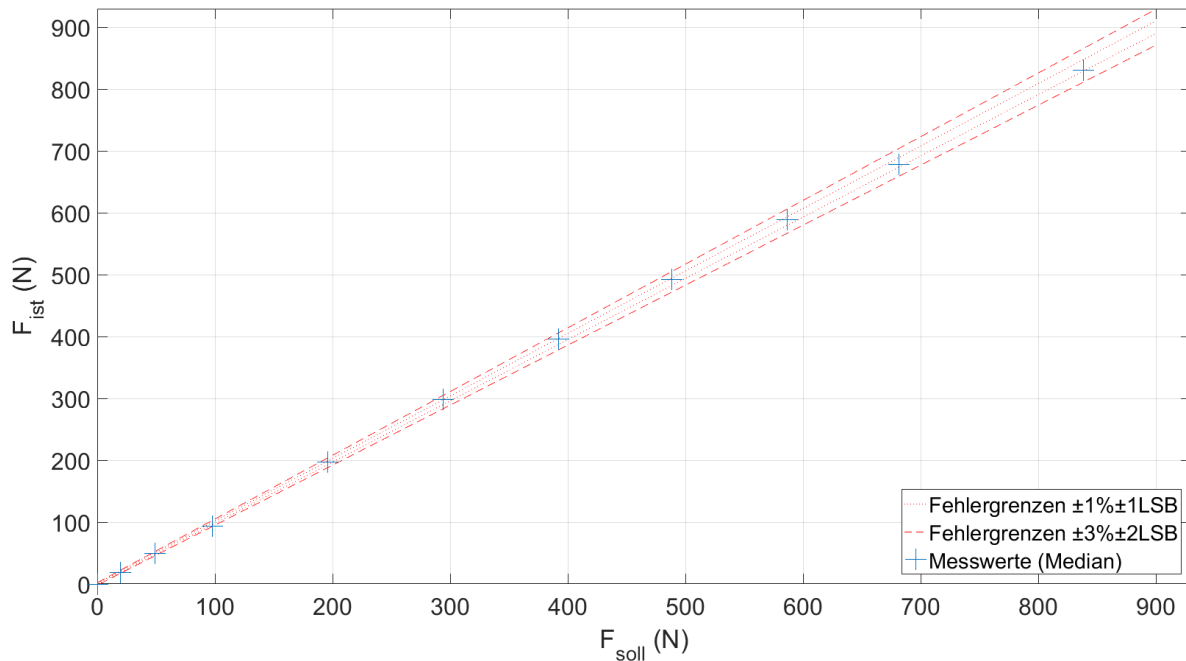


Abbildung 33: Auswertung Redesign Gesamt

4.5.1.3. Driftverhalten der Kraftmessung

Um das Driftverhalten bei hohen Belastungen zu ermitteln, wurden mehrere Messreihen im Abstand von zwei Minuten über einen Zeitraum von zehn Minuten aufgenommen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 21 und in Abbildung 34 dargestellt.

Tabelle 21: Driftverhalten Redesign über 10 min bei Gesamtbelastung mit 838,44 N

| t | Soll | | Median | IQR | Fo | Fu | Fo | Fu | Fa | Fr |
|-----|--------|--------|--------|------|----------|----------|----------|----------|--------|--------|
| | kg | N | | | +1%+1LSB | -1%-1LSB | +3%+2LSB | -3%-2LSB | | |
| min | | | N | N | N | N | N | N | N | % |
| 0 | 85,468 | 838,44 | 823,00 | 1,00 | 847,825 | 829,057 | 865,594 | 811,288 | -15,44 | -1,84% |
| 2 | 85,468 | 838,44 | 822,00 | 1,00 | 847,825 | 829,057 | 865,594 | 811,288 | -16,44 | -1,96% |
| 4 | 85,468 | 838,44 | 823,00 | 3,00 | 847,825 | 829,057 | 865,594 | 811,288 | -15,44 | -1,84% |
| 6 | 85,468 | 838,44 | 821,00 | 3,00 | 847,825 | 829,057 | 865,594 | 811,288 | -17,44 | -2,08% |
| 8 | 85,468 | 838,44 | 826,00 | 3,00 | 847,825 | 829,057 | 865,594 | 811,288 | -12,44 | -1,48% |
| 10 | 85,468 | 838,44 | 824,00 | 3,25 | 847,825 | 829,057 | 865,594 | 811,288 | -14,44 | -1,72% |

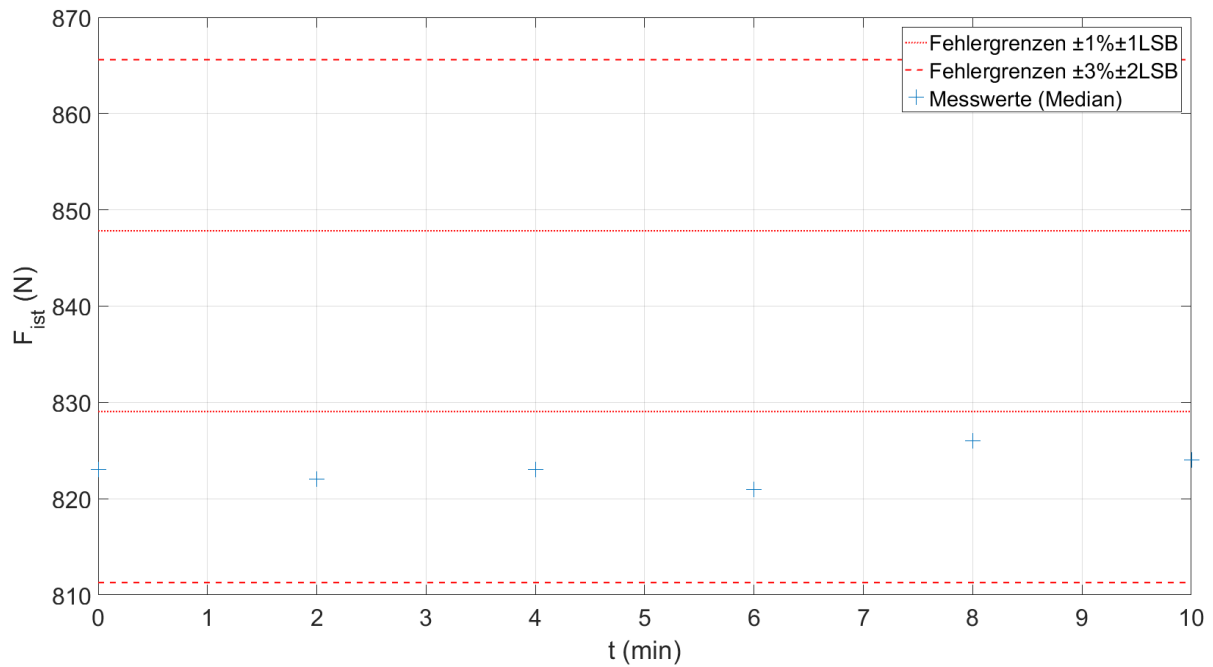


Abbildung 34: Driftverhalten Redesign über 10 min bei Gesamtbelastung mit 838,44 N

4.5.1.4. Vergleichsmessung der Kraftmessung mit dem Referenzdesign

In Abbildung 35 sind die Messdaten des Redesigns und die Messdaten des Referenzdesigns für die Gesamtbelastung dargestellt. Die detaillierten Messergebnisse des Referenzdesigns finden sich im Abschnitt 8.1.1. Die Vergleichsmessung wurde mit dem Gerät TR3-2014-034 durchgeführt.

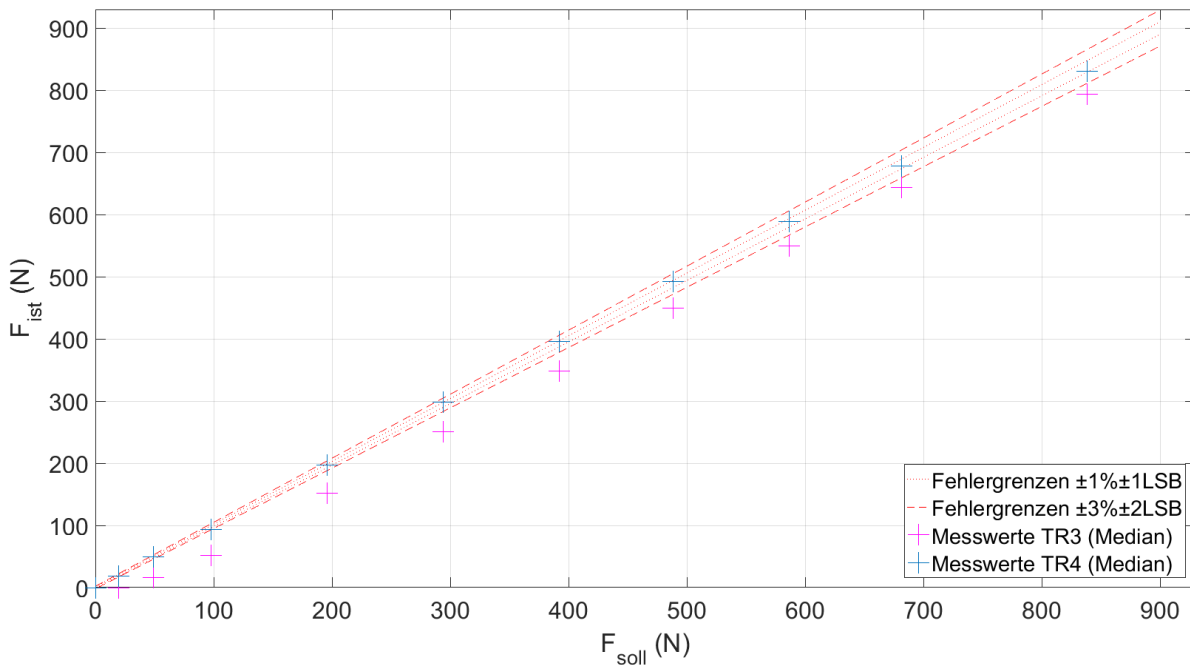


Abbildung 35: Vergleichsmessung der Gesamtbelastung zwischen Referenzdesign (TR3) und Redesign (TR4)

4.5.2. Verifizierung der Winkelmessung

4.5.2.1. Test der Parameter der Winkelmessung auf Normalverteilung

Vor der Auswertung der Parameter der Winkelmessung wurde die statistische Verteilung der Messwerte überprüft. Um eine mögliche Normalverteilung der Werte erkennen zu können, wurden hierbei jene Winkel als Messpunkte ausgewählt, welche die höchste Standardabweichung zeigten.

Für beide Winkel φ und θ (siehe Abschnitt 3.4.2.1) hat sich in den zwei gemessenen Arbeitspunkten gezeigt, dass die Null-Hypothese N_0 des KS-Tests zum gegebenen Signifikanzniveau α abgelehnt wird ($h=1$) (Tabelle 22).

In Abbildung 36 bis Abbildung 43 sind die Histogramme sowie die empirischen Verteilungsfunktionen der jeweiligen Messungen und die dazugehörigen Funktionen einer Normalverteilung dargestellt.

Da die Nullhypothesen zu dem gegebenen Signifikanzniveau $\alpha=5\%$ abgelehnt wurde, muss davon ausgegangen werden, dass die Daten nicht normalverteilt sind.

Die Abweichungen der Messreihen zur Normalverteilung sind auch in Abbildung 36 bis Abbildung 43 zu erkennen. Wie bereits bei der Kraftmessung beobachtet werden konnte, ist aufgrund der geringen Streuung der Messwerte auch hier keine signifikante Ähnlichkeit zur Normalverteilung gegeben.

Zur Auswertung der Winkelmessung wurde daher der Median als Lageparameter sowie der Interquartilsabstand als Streuungsmaß verwendet.

Tabelle 22: Ergebnisse des KS-Tests für beide Neigungswinkel in zwei Arbeitspunkten

| | Winkel | KS-Parameter | |
|-----------|--------|--------------|------|
| | ° | h | p |
| φ | 2,6 | 1 | 0,00 |
| φ | 7,9 | 1 | 0,00 |
| θ | -2,6 | 1 | 0,00 |
| θ | -10,44 | 1 | 0,00 |

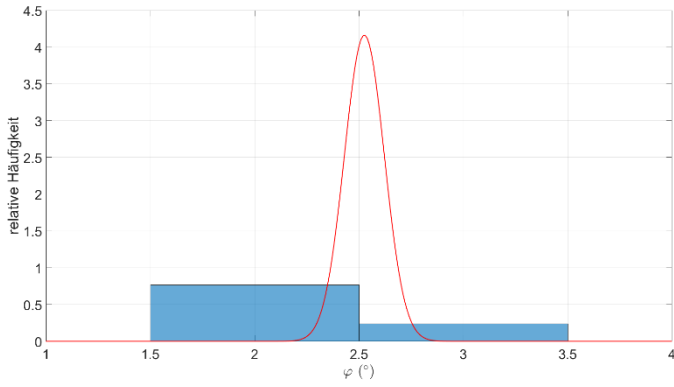


Abbildung 36: Histogramm $\phi = 2,6^\circ$

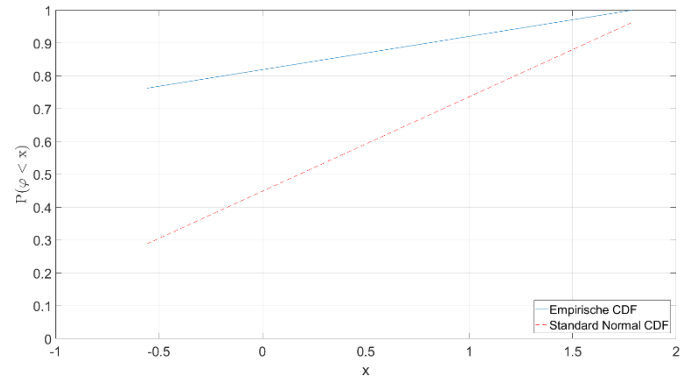


Abbildung 37: CDF $\phi = 2,6^\circ$

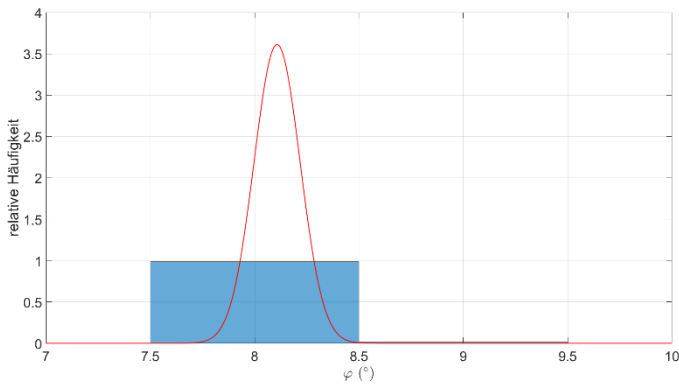


Abbildung 38: Histogramm $\phi = 7,9^\circ$

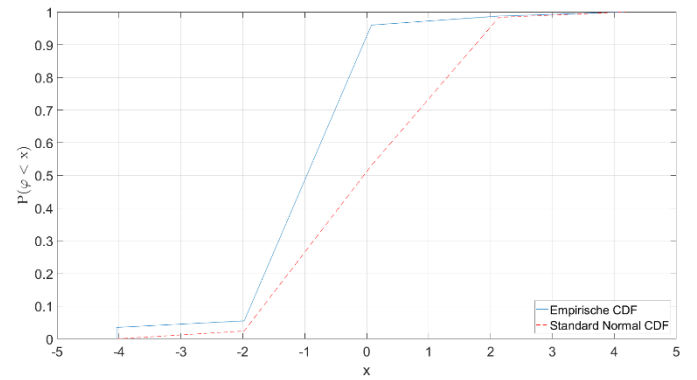


Abbildung 39: CDF $\phi = 7,9^\circ$

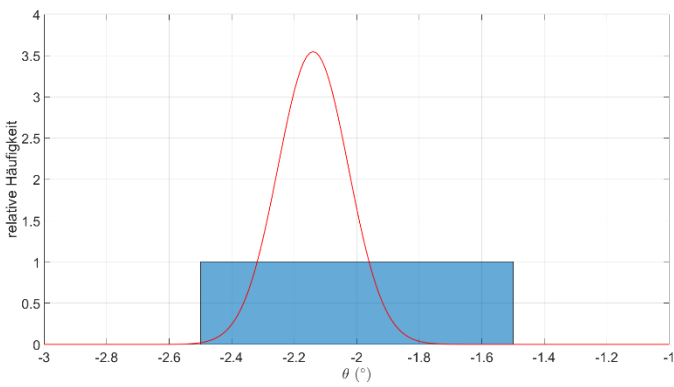


Abbildung 40: Histogramm $\theta = -2,6^\circ$

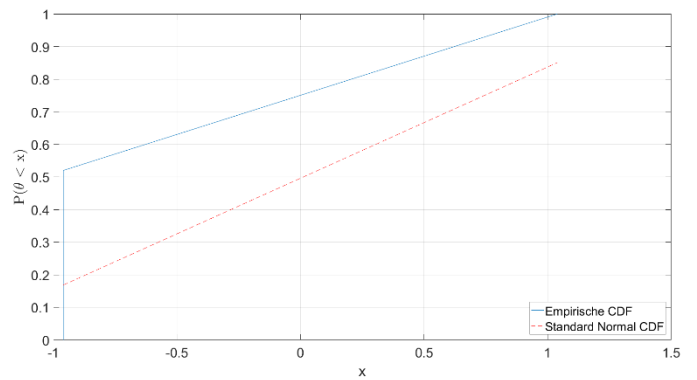


Abbildung 41: CDF $\theta = -2,6^\circ$

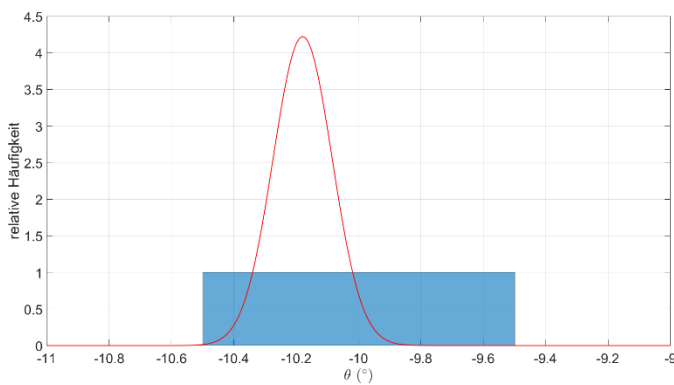


Abbildung 42: Histogramm $\theta = -10,44^\circ$

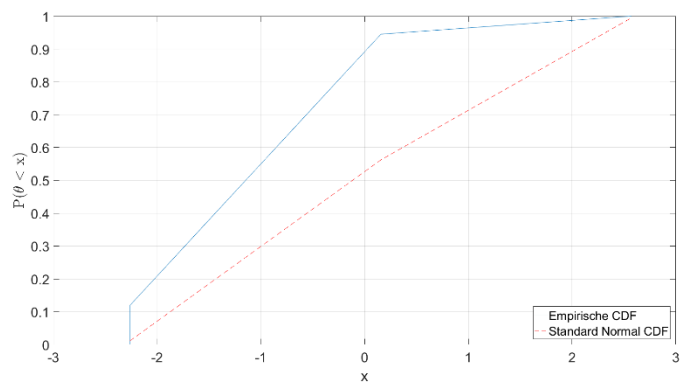


Abbildung 43: CDF $\theta = -10,44^\circ$

4.5.2.2. Verifizierung der Messgenauigkeit der Winkelmessung

Um die Messgenauigkeit zu verifizieren, wurde das Gerät wie in Abschnitt 3.6.3 beschrieben auf einer schiefen Ebene aufgestellt und die gemessenen Werte des Neigungswinkels mit dem Sollwert verglichen. Um ein signifikantes Ergebnis zu erhalten, wurden bei jeder Messung 400 Werte berücksichtigt was einer Messdauer von 6 Sekunden entspricht. Die Messergebnisse sind in Tabelle 38 und Tabelle 39 zusammengefasst (siehe Abschnitt 8.1.2). Des Weiteren sind in den Tabellen die jeweiligen oberen und unteren Fehlergrenzen für die Toleranzbereiche $\pm 0,25^\circ$ und $\pm 0,75^\circ$ sowie der absolute und relative Fehler angegeben. Die Mediane der Messungen sowie die Toleranzbereiche sind in Abbildung 44 und Abbildung 45 dargestellt.

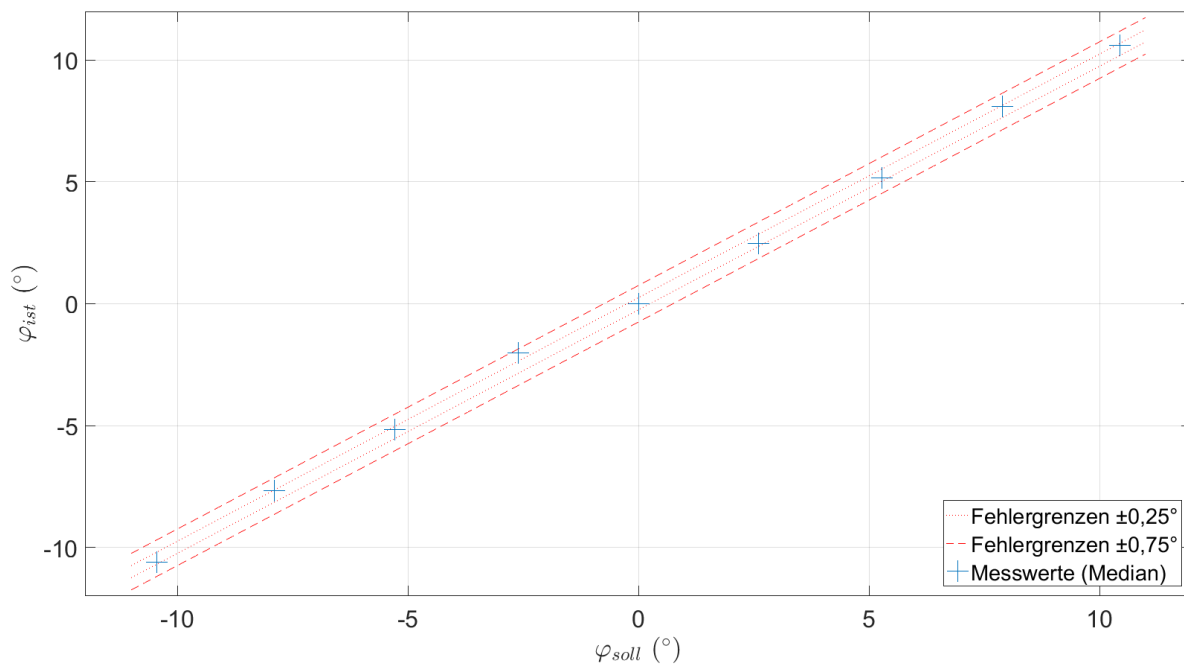


Abbildung 44: Messergebnisse Neigungsmessung φ Redesign

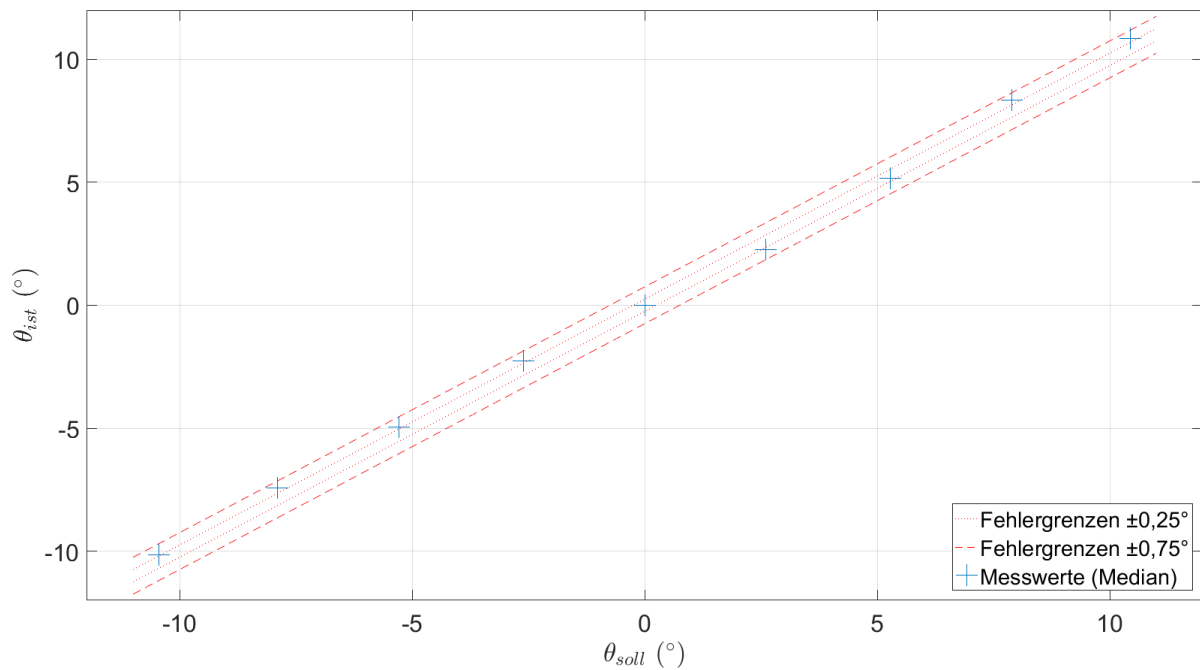


Abbildung 45: Messergebnisse Neigungsmessung θ Redesign

4.5.2.3. Berechnung der Winkelauflösung der Winkelmessung

Gemäß Abschnitt 3.4.2.2 wurde die erreichbare Winkelauflösung berechnet. Abbildung 46 zeigt die berechneten Neigungswinkel bei gegebenem Beschleunigungswert. In Abbildung 47 ist die Abhängigkeit der Winkelauflösung vom Neigungswinkel dargestellt. Für einige Winkel sind die Auflösungen gemäß Gleichung (13) in Tabelle 23 angeführt.

Tabelle 23: Berechnete Winkelauflösung der Winkelmessung

| a_x (g) | φ ($^{\circ}$) | $\Delta \varphi$ ($^{\circ}$) |
|-----------|--------------------------|---------------------------------|
| 0,00 | 0,00 | 0,225 |
| 0,13 | 7,18 | 0,227 |
| 0,25 | 14,48 | 0,232 |
| 0,38 | 22,02 | 0,243 |
| 0,50 | 30,00 | 0,260 |
| 0,63 | 38,68 | 0,288 |
| 0,75 | 48,59 | 0,341 |
| 0,88 | 61,04 | 0,468 |
| 1,00 | 90,00 | 5,076 |

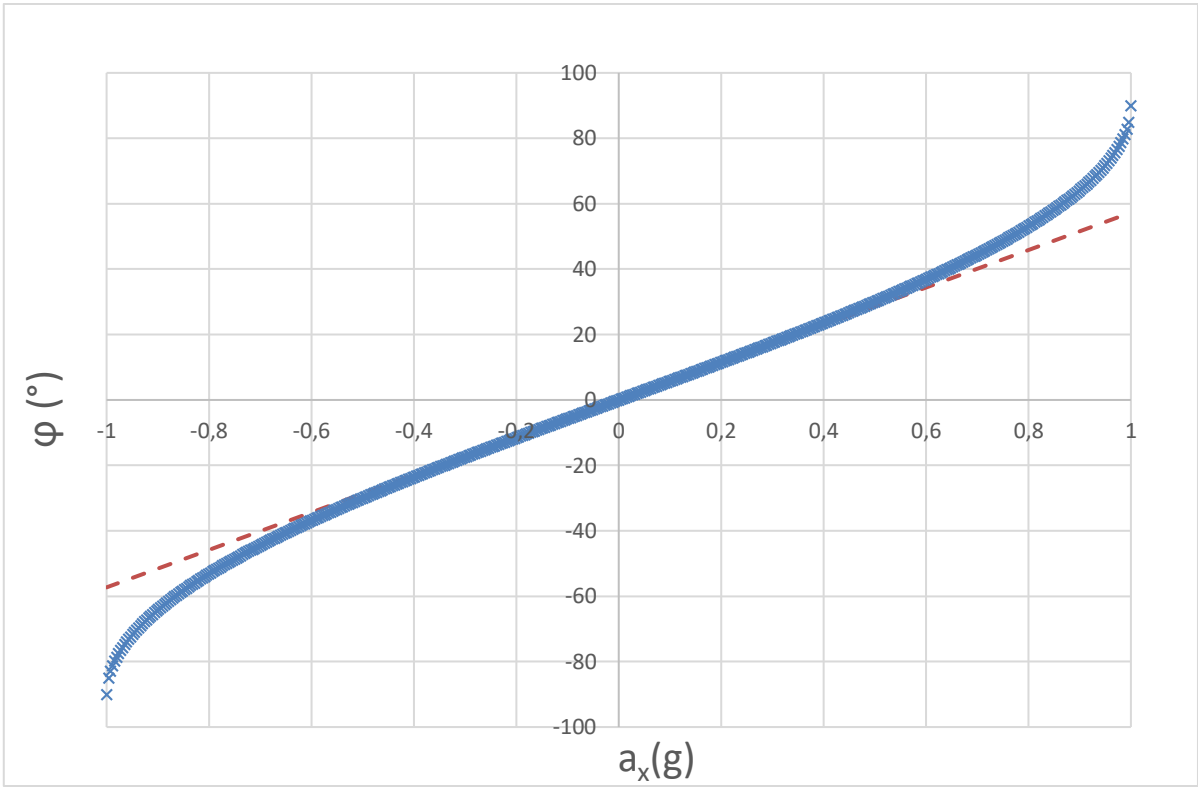


Abbildung 46: Berechneter Neigungswinkel φ bei gegebenem Beschleunigungswert a_x .

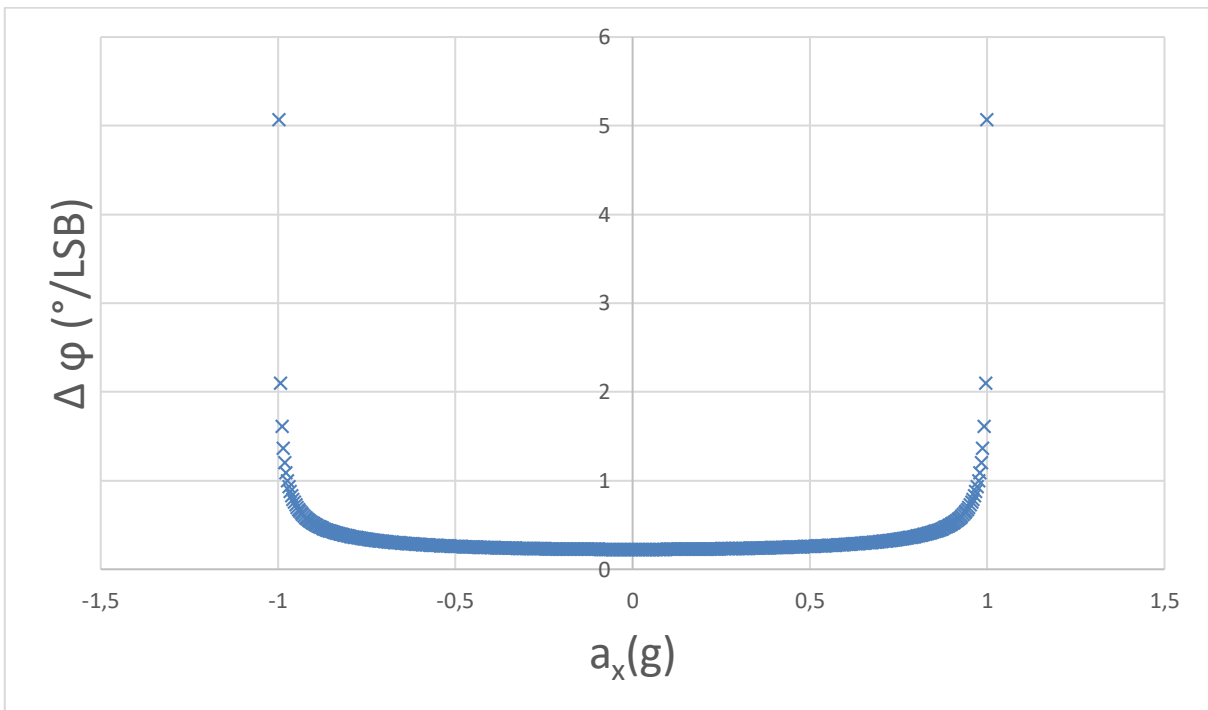


Abbildung 47: Winkelauflösung $\Delta\varphi$ in Abhängigkeit des Beschleunigungswertes a_x im Bereich $[-1,1]$

4.5.2.4. Vergleichsmessung der Winkelmessung mit dem Referenzdesign

In Abbildung 35 sind die Messdaten des Redesigns und die Messdaten des Referenzdesigns für die Neigungswinkel φ und θ dargestellt. Die detaillierten Messergebnisse des Referenzdesigns finden sich in Tabelle 40 und Tabelle 41 in Abschnitt 8.1.2. Die Vergleichsmessung wurde mit dem Gerät TR3-2014-034 durchgeführt.

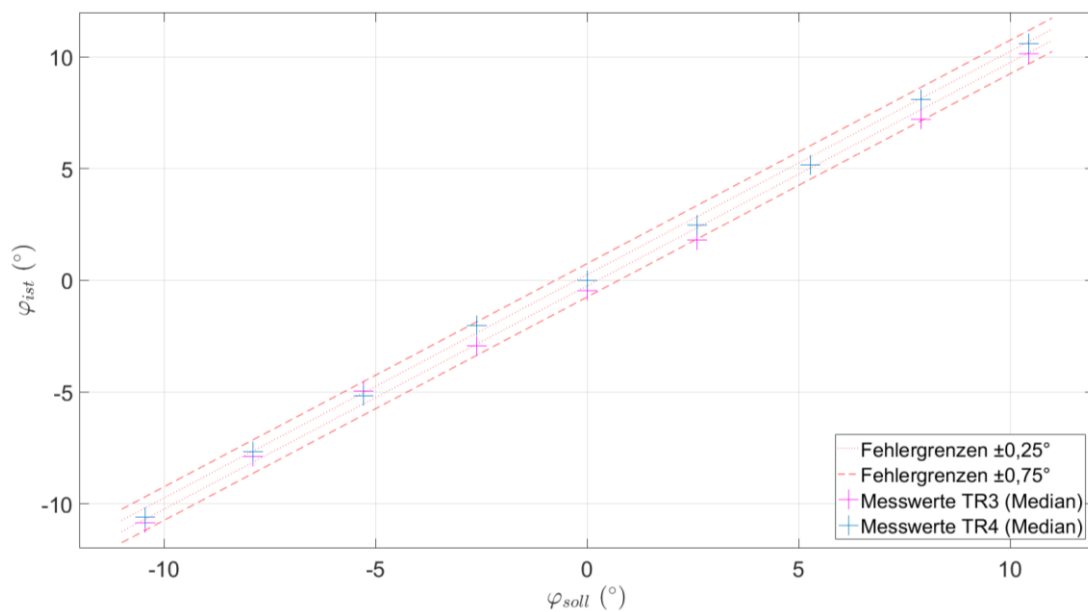


Abbildung 48: Vergleich des Neigungswinkels φ Referenzdesign (TR3) und Redesign (TR4)

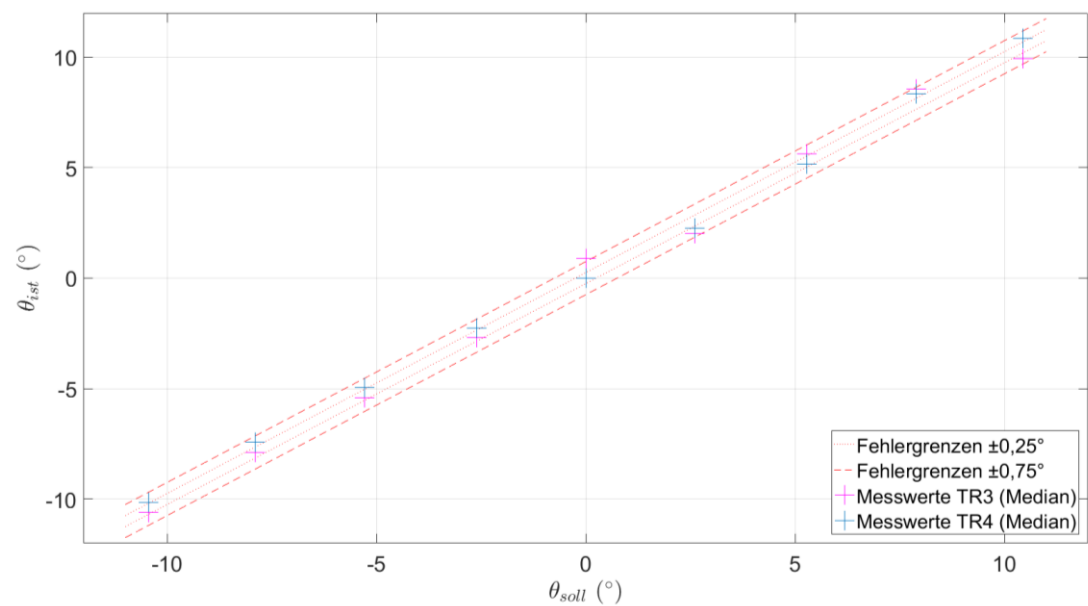


Abbildung 49: Vergleich des Neigungswinkels θ Referenzdesign (TR3) und Redesign (TR4)

4.5.3. Verifizierung der Bluetooth Verbindung

Zur Verifizierung der Stabilität der Bluetooth-Verbindung wurde die Übertragungsrate vom Gerät an den PC gemessen. Die Messung erfolgte jeweils für drei Minuten aus drei, sechs, neun und zwölf Metern Entfernung. Abbildung 50 zeigt den Verlauf der Übertragungsrate aus einer Entfernung von drei Metern (spezifizierter Anwendungsbereich). Die Abbildungen aller weiteren Verbindungsmessungen finden sich in Abschnitt 8.1.3. In Tabelle 24 sind die Mittelwerte der Messungen aufgelistet.



Abbildung 50: Messung der Bluetooth Übertragungsrate des Redesign aus 3m Entfernung

Tabelle 24: Mittelwert der Übertragungsraten der Bluetooth-Verbindung über 3 min

| Entfernung | Übertragungsrate soll | Übertragungsrate gemessen (Mittelwert) |
|------------|--------------------------|--|
| m | Bytes/s | Bytes/s |
| 3 | 900 | 911 |
| 6 | 900 | 915 |
| 9 | 900 | 915 |
| 12 | 900 | 915 |

4.5.4. Verifizierung der Energieversorgung

Um die zu erwartende Akkulaufzeit des Gerätes zu bestimmen, wurde der Stromverbrauch des Gerätes in den unterschiedlichen Betriebszuständen gemessen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 25 und Tabelle 26 angeführt.

Der Verbrauch in ausgeschaltetem Zustand konnte auf ca. 210 μA gesenkt werden, was zu einer berechneten Standby-Zeit von über zehn Monaten führt. Betrachtet man nun noch weitere Aspekte wie zum Beispiel das Ein- und Ausschalten des Gerätes so stellt sich die Situation wie folgt dar: Durch den schwer erreichbaren Ein- und Ausschalter des Referenzdesigns wurde das Gerät nach dem Ende der Therapie in den meisten Fällen nicht ausgeschaltet. Hierdurch ist selbst bei Nichtgebrauch eine relativ hohe Stromaufnahme gegeben. Das Redesign löst dieses Problem in dem zum einen der Ein-Aus-Taster einfach zu erreichen ist und zum anderen sich das Gerät bei längerem Nichtgebrauch selbständig abschaltet (Abschnitt 4.4.4.2). Der Stromverbrauch in ausgeschaltetem Zustand konnte zudem drastisch reduziert werden, was die Situation weiter verbessert. Stellt man nun die Akkulaufzeit als Funktion der Betriebsstunden pro Tag dar, so ergeben sich, bei Berücksichtigung dieser Aspekte, die in Abbildung 51 gezeigten Laufzeiten.

Tabelle 25: Stromverbrauch Redesign

| Gerätestatus | Stromaufnahme |
|----------------------|---------------|
| | mA |
| Aus | 0,21 |
| Ein, nicht verbunden | 73,60 |
| Ein, Daten Senden | 109,10 |

Tabelle 26: Stromverbrauch Referenzdesign

| Gerätestatus | Stromaufnahme |
|----------------------|---------------|
| | mA |
| Aus | 7,04 |
| Ein, nicht verbunden | 42,71 |
| Ein, Daten Senden | 76,40 |

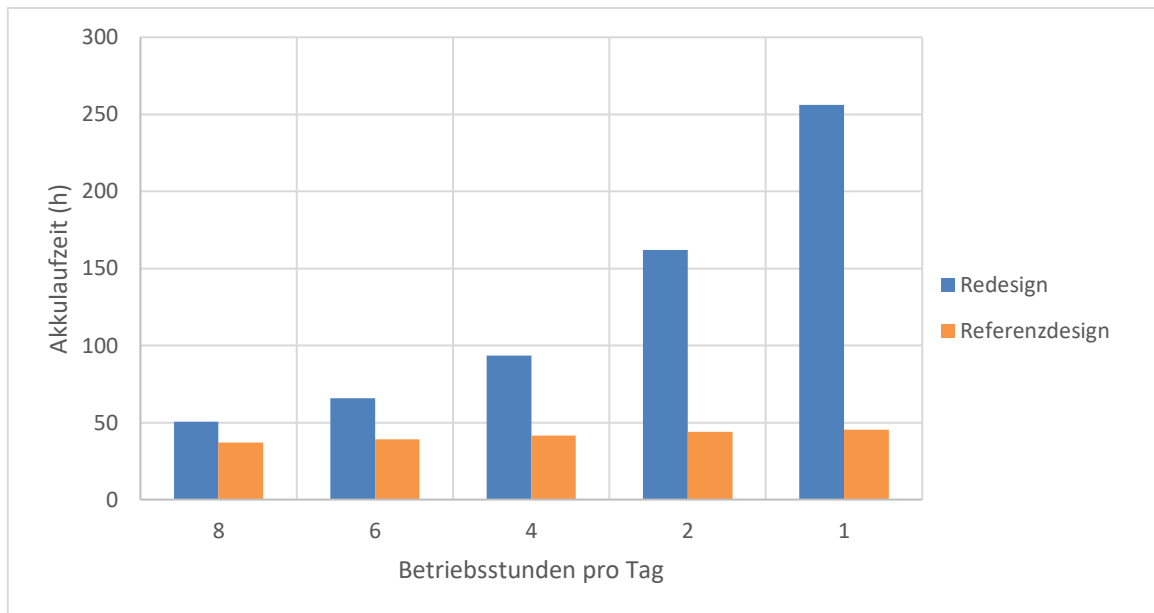


Abbildung 51: Akkulaufzeit in Abhängigkeit der Betriebsstunden pro Tag unter der Annahme, dass die Geräte nach der Therapie nicht vom Benutzer ausgeschaltet werden.

5. Diskussion

5.1. Diskussion der Methoden

5.1.1. Erarbeiten von Verbesserungsvorschlägen

Die grundlegende Vorgehensweise des Erarbeitens der Verbesserungsvorschläge hat sich als sehr positiv herausgestellt. Es zeigte sich wie wichtig es ist, bereits vor Beginn möglichst viele Aspekte des Redesigns zu betrachten. Nur so ist es möglich, die Anforderungen an das Redesign objektiv und strukturiert zu definieren.

Bei der Analyse von Verbesserungsvorschlägen haben sich besonders jene Prozesse als nützlich erwiesen, welche über eine gute Dokumentation verfügen, wie beispielsweise Reklamationsstatistiken seitens der Qualitätssicherung, des Vertriebs und der Produktion. Aus diesen Dokumenten können sehr gezielte Anforderungen und Verbesserungsvorschläge für die jeweiligen Anwendungen und Produkte erarbeitet werden.

5.1.2. Aufwand-Nutzen Analyse

Die Aufwand-Nutzen Analyse hat sich als nützliches Werkzeug zur Priorisierung der Verbesserungspotentiale herausgestellt. Ein Großteil der abgeschätzten Prioritäten hat sich als korrekt erwiesen. Es ist jedoch zu beachten, dass meist nicht alle Aspekte vorab richtig eingeschätzt werden können.

Rückblickend lässt sich daher festhalten, dass vor allem komplexe Aufwände, wie beispielsweise der Einsatz eines neuen Bluetooth Moduls, eher unterschätzt wurden. Eine Abhilfe kann hierbei eine noch detailliertere Vorab-Recherche zur Verwendung von bestimmten Technologien und Bauteilen bringen.

Der Nutzen von Verbesserungsvorschlägen ist ebenfalls nicht immer eindeutig abschätzbar. Hier ist es umso wichtiger auf bereits vorhandenes Knowhow und die Erfahrungen des Entwicklungsteams, der Therapeuten und des Produktmanagements zurückzugreifen. Dadurch ergeben sich häufig sehr wertvolle Beiträge zur richtigen Bewertung der Verbesserungsvorschläge.

5.2. Diskussion der Ergebnisse

5.2.1. Redesign des Geräteaufbaus

Durch den veränderten Aufbau des Gerätes wurden weitreichende Verbesserungen in vielen Bereichen erreicht. Das Gerätedesign wurde zwar auch von konstruktiver Seite her verändert, bleibt jedoch in seinem grundlegenden Aufbau gleich. Daher sind keine gravierenden Eingriffe in Warenwirtschafts-, Produktions- und QS-Prozesse notwendig. Des Weiteren können Zubehörteile sowie Verpackungen des Referenzdesigns weiterhin unverändert verwendet werden, was die Serienüberleitung wesentlich erleichtert.

Es konnte eine Verringerung der Stücklisten Positionen erreicht werden. Dies bedeutet eine geringere Komplexität sowohl für die Produktion des Gerätes als auch für die erforderliche Warenwirtschaft. Zusätzlich ermöglicht der Modulare Aufbau eine einfachere Organisation des Produktionsprozesses. Bauteilgruppen, wie zum Beispiel das Einschubmodul mit Elektronikplatine, können unabhängig vom Gesamtgerät vorgefertigt werden. Dadurch wird eine Verringerung der Fertigungszeit und somit eine deutliche Kostenersparnis erreicht.

5.2.2. Auswahl kritischer Komponenten

Die Auswahl der kritischen Komponenten hat sich insofern als richtig erwiesen, als dass damit alle Anforderungen an das Redesign erreicht werden konnten. Es hat sich gezeigt, dass ein wesentlicher Teil der Entwicklungsressourcen für das Testen dieser Komponenten eingeplant werden sollte. Vor allem bei Technologien und Bauteilen für die noch keine oder wenig Erfahrung vorliegen ist dies entscheidend. Um die Tests parallel zum Entwicklungsprozess so bald wie möglich durchführen zu können, bieten sich sogenannte Demo-Boards oder Entwicklungs-Kits an. Diese erleichtern die anfängliche Implementierung und ermöglichen gleichzeitig das Testen des jeweiligen Bauteils noch vor der Implementierung im ersten Prototyp.

5.2.3. Redesign der Elektronik

Ein Großteil der Verbesserungspotentiale konnte durch das Redesign der Elektronik umgesetzt werden. Im Zuge der Entwicklung wurde versucht mit möglichst geringem Entwicklungsrisiko

sowohl in Bezug auf Entwicklungszeit als auch Funktionalität zu arbeiten. Nachfolgend sind einige Maßnahmen aufgeführt, welche das aktuelle Design potentiell verbessern könnten jedoch auch ein gewisses Maß an Entwicklungsrisiko und somit eine relativ lange Implementierungszeit bedeutet würden.

Tabelle 27: Mögliche Maßnahmen zur weiteren Verbesserung der Elektronik

| Maßnahme | Vorteil | Nachteil |
|--|---|--|
| Verbesserte MCU (z.B. 32 Bit ARM Architektur) | Erhöhte Rechenleistung | Höhere Stromverbrauch, wenig Erfahrung mit Architektur |
| Verwendung eines externer ADC | Höhere Auflösung, Höhere Abtastrate | Kosten |
| Bluetooth 4.0 (Low Energy) | Sehr geringer Stromverbrauch, Kostengünstig | Höherer Implementierungsaufwand, Reichweite möglicherweise zu gering |
| Verwendung von Wägezellen (DMS-Vollbrücken) | Verbesserte Kraftmessung | Schwierige Einbausituation |
| Verwendung eines Low-Cost Beschleunigungssensors | geringere Kosten | Geringere Genauigkeit der Winkelmessung |

Besonders hervorzuheben ist das verbesserte Platinen Layout des Beschleunigungssensors. Obwohl bei dem Redesign derselbe Beschleunigungssensor wie beim Referenzdesign eingesetzt wird, hat sich die Signalqualität, bezogen auf den Interquartilsabstand der Messwerte, aufgrund des neuen Layouts deutlich verbessert (siehe dazu Tabelle 38 bis Tabelle 41 in Abschnitt 8.1.2). Dies ist auf die Empfindlichkeit des Sensors auf Schwankungen der Versorgungsspannung zurückzuführen, welche im Zuge des Redesigns beseitigt werden konnten.

Da es sich um ein ME-Gerät handelt muss dieses die Anforderungen an die Elektromagnetische Verträglichkeit nach EN 60601-1-2 erfüllen. Das Gerätedesign kann einen wesentlichen Einfluss auf die elektromagnetische Abstrahlung haben oder beispielsweise Empfindlichkeiten gegenüber elektrostatischen Entladungen (ESD) aufweisen. Die Einhaltung der Anforderungen wurde von einem akkreditierten Prüflabor überprüft und bestätigt. [20]

5.2.4. Redesign der Firmware

5.2.4.1. Überarbeitung des Source-Codes

Die Implementierung in Bascom gestaltete sich als sehr benutzerfreundlich, bietet viele vorgefertigte Funktionen wodurch sehr einfach und schnell funktionsfähiger Code generiert werden kann.

Eine weitere Verbesserung der Firmware wäre durch eine Implementierung in C möglich. C bietet viele Möglichkeiten um das Konzept der strukturierten Programmierung noch konsequenter umsetzen zu können. Des Weiteren gibt es für viele Anwendungen gut dokumentierte Code-Beispiele und Application-Notes welche die Implementierung komplexer Funktionen, wie zum Beispiel Digitalen Filtern, vereinfachen.

5.2.4.2. Vereinfachter Justierungs-Prozess der Kraftsensoren

Die Justierung des Kraftsensors durch die Berechnung des k-Wertes wurde bisher durch eine Referenzmessung mit einem externen Kraftsensor durchgeführt. Da dieser Prozess jedoch sehr zeitaufwändig ist und die Möglichkeit von Messunsicherheiten des Referenzsystems birgt, wurde eine neue Methode zur Justierung entwickelt.

Der Vorteil dieser Methode ist, dass ein einfaches externes Referenzsystem ausreicht. Die Justierung kann beispielsweise mit einem Prüfgewicht durchgeführt werden. Kalibrierte Prüfgewichte sind sehr zuverlässig und einfach in der Handhabung. Für die durchgeführten Messungen wurden die Sensoren mit einem Prüfgewicht von 10 kg justiert. Je höher das bei der Justierung verwendete Gewicht, desto genauer kann der k-Wert berechnet werden, da der relative Fehler zu größeren Werten hin abnimmt und somit das Ergebnis weniger beeinflusst wird. Die Dauer des Justiervorganges konnte durch die neue Methode ebenfalls deutlich reduziert werden was sich positiv auf den Produktionsprozess auswirkt.

5.2.4.3. Einfache Erweiterbarkeit und Anpassung an neue Anforderungen

Aufgrund des strukturierten Aufbaus und der einfachen Erweiterbarkeit des Source-Codes ist es nun möglich die Firmware an unterschiedlichste neue Anforderungen anzupassen.

Beispielsweise ist es einfach möglich einen Modus zu implementieren, welcher nur die Summe der vier Bodenreaktionskräfte der Kraftsensoren überträgt. Durch die stark reduzierte Menge an Daten könnte in diesem Modus eine höhere Übertragungsfrequenz erreicht werden wodurch neue Anwendungen, wie zum Beispiel eine vereinfachte Analyse der Standbeinphase während des Ganges, möglich werden. Vor allem in Bezug auf zukünftige Anwendungsgebiete und mögliche neue Therapiekonzepte ist dies von großem Vorteil.

5.2.5. Verifizierung der Messgenauigkeit der Kraftmessung

In den Abbildungen (16 bis 19) sind die Messungen der einzelnen Kraftsensoren von 0 N bis ca. 600 N zu sehen. In den Diagrammen sind zusätzlich die Fehlergrenzen für die beiden Grenzwerte von $\pm 1\% \pm 1\text{LSB}$ und $\pm 3\% \pm 2\text{LSB}$ eingezeichnet. Die prozentuale Angabe bezieht sich dabei auf den gemessenen Wert, die Angabe der signifikanten Stelle bezieht sich auf die absolute Auflösung. Die einzelnen Sensoren liegen an den gewählten Messpunkten im Messbereich von 0 N bis 600N im Median stets innerhalb der Toleranz von $\pm 1\% \pm 1\text{LSB}$.

Bei der Auswertung der Gesamtgenauigkeit wurde die Sensorplatte im Bereich zwischen 0 N bis ca. 850 N belastet. Die Messpunkte 19,6 N, 98,02 N und 293,89 N liegen im Median innerhalb der Toleranz von $\pm 3\% \pm 2\text{LSB}$. Die restlichen Messpunkte liegen innerhalb der Toleranz von $\pm 1\% \pm 1\text{LSB}$.

Die in Abschnitt 4.3 und Tabelle 16 erarbeiteten Anforderung an die Genauigkeit von $< 5\% \pm 2\text{LSB}$ konnte somit erreicht werden. Im Vergleich zum Referenzdesign ergeben sich daher vor allem im unteren Messbereich eine erhebliche Verbesserung der Genauigkeit (Tabelle 37).

Es ist zu beachten, dass sich die ermittelte Messgenauigkeit auf ein einziges Gerät bezieht. Bei gleichbleibender Qualität aller Komponenten ist jedoch von keiner signifikanten Schwankung der Leistungsmerkmale bei weiteren Geräte auszugehen. Um eine bessere Aussage über die gesamte Geräteserie treffen zu können, empfiehlt es sich jedoch im Zuge der ersten Seriengeräte weitere Messungen zur Verifizierung der Messgenauigkeit durchzuführen.

5.2.6. Verifizierung der Winkelmessung

5.2.6.1. Platinen Layout des Beschleunigungssensors

Das untypisch hohe Rauschen und die geringe Nullpunktstabilität der Neigungsmessung des Referenzdesigns wurde im Vorfeld analysiert und konnte auf ein ungünstiges Layout der Spannungsversorgung des Beschleunigungssensors zurückgeführt werden. Wie in Abbildung 16 rechts zu sehen ist, werden das Bluetooth-Modul und der Beschleunigungssensor über dieselbe Leiterbahn mit Spannung versorgt. Da das Bluetooth-Modul jedoch einen relativ hohen und ungleichmäßigen Stromverbrauch aufweist wird dadurch die Versorgungsspannung des Beschleunigungssensors beeinflusst. Diese Problematik wurde im neuen Platinen Layout gelöst, in dem zum einen ein jeweils ein eigener Spannungsregler für Bluetooth-Modul und Beschleunigungssensor verwendet wurde und zum anderen die Spannungsversorgung des Sensors mit einem Kondensator direkt am IC gestützt wird (Abbildung 16 links). Dadurch wurde eine deutlich geringere Streuung der Messwerte erreicht.

5.2.6.2. Verifizierung der Messgenauigkeit der Winkelmessung

Bei der Messung des Winkels φ liegen, bis auf den Messpunkt bei $-2,6^\circ$, alle Werte innerhalb der $\pm 0,25^\circ$ Toleranz. Bei dem genannten Messpunkt könnte es sich um einen Fehler beim Aufstellen des Gerätes auf der geneigten Unterlage handeln da eine derartige Nichtlinearität in diesem Bereich als eher unwahrscheinlich einzustufen ist. Bei der Messung des Winkels θ liegen die meisten Werte außerhalb der $\pm 0,25^\circ$ jedoch innerhalb der $\pm 0,75^\circ$ Toleranz-Grenze.

Die in Abschnitt 4.3 und Tabelle 16 erarbeitete Anforderung an die Genauigkeit von $< 1^\circ$ konnte somit erreicht werden.

Die beste Auflösung wird in horizontaler Lage bei $\varphi=0^\circ$ erreicht ($\Delta\varphi=0,225^\circ$). Im geforderten Messbereich von $\pm 10^\circ$ liegt die Auflösung unterhalb des angestrebten Wertes von $< 0,5^\circ$. Die Betrachtungen gelten analog auch für den Winkel θ .

Vergleicht man die Messwerte des Redesigns mit dem Referenzdesign (Abbildung 49) so konnte eine Verbesserung der Messgenauigkeit erreicht werden. Besonders hervorzuheben ist jedoch die Nullpunktstabilität des Redesigns. Die gemessenen Werte in der horizontalen Lage weisen über die gesamte Messdauer den konstanten Wert von 0° auf (Tabelle 38 und

Tabelle 39). Dies stellt eine große Verbesserung bei der Verwendung des Gerätes dar, da diese Lage der Ausgangspunkt für viele Therapieanwendung ist (z.B. Bei Messung des Schwerpunktes).

Wie bereits bei der Verifizierung der Kraftmessung erwähnt wurde ist auch hier zu beachten, dass sich die ermittelte Messgenauigkeit auf ein einziges Gerät bezieht. Bei gleichbleibender Qualität aller Komponenten ist jedoch von keiner signifikanten Schwankung der Leistungsmerkmale bei weiteren Geräten auszugehen. Um eine bessere Aussage über die gesamte Geräteserie treffen zu können, empfiehlt es sich auch für die Winkelmessung im Zuge der ersten Seriengeräte weitere Messungen zur Verifizierung der Messgenauigkeit durchzuführen.

5.2.7. Verifizierung der Bluetooth Verbindung

Die gemessene Übertragungsrate der Bluetooth Verbindung liegt im erwarteten Bereich. Selbst bei einer Entfernung von über 10 Metern konnte eine einwandfreie Übertragung gewährleistet werden. Des Weiteren wurden im Verlauf der Messungen keine starken Schwankungen der Übertragungsrate festgestellt, was auf eine stabile Datenverbindung hinweist.

6. Schlussfolgerung

Durch die eingehende Analyse des IST-Standes des Therapiegerätes TYMO®, konnten zahlreiche Verbesserungspotentiale identifiziert und deren Priorität bewertet werden. Die Umsetzung erfolgte durch ein umfassendes Redesign des Geräteaufbaus, der Elektronik und der Firmware des Gerätes.

Durch das Redesign konnte sowohl die Genauigkeit der Kraftmessung als auch der Neigungsmessung gesteigert werden. Durch die erhöhte Messgenauigkeit kann die Qualität der Therapie, vor allem im Bereich des Balance-Trainings durch Neigungsmessung, deutlich erhöht werden. Zahlreiche weitere Geräteeigenschaften, wie etwa die Bluetooth-Verbindung, das Energiemanagement und die Bedienbarkeit, wurden im Zuge des Redesigns ebenfalls überarbeitet und verbessert.

Die Firmware zur Messdatenerfassung und Ablaufsteuerung des Gerätes wurde neugestaltet und mit zahlreichen Verbesserungen versehen. Diese ermöglichen neue Therapieansätze und Verwendungsmöglichkeiten zum Beispiel im Bereich der Ganganalyse. Zusätzlich wurde bei der Entwicklung der Firmware Wert auf einfache Wartbarkeit und Erweiterbarkeit gelegt, um Möglichkeiten für zukünftige Anwendungsgebiete zu schaffen.

Die Optimierung des Geräteaufbaus führt zu einer reduzierten Anzahl an Komponenten im Gesamtgerät und vereinfacht somit nicht nur den Produktionsprozess, sondern wirkt sich auch positiv auf die dazugehörigen Warenwirtschaftsprozesse aus. Dadurch kann in der Serienproduktion von einer Kostenersparnis ausgegangen werden.

7. Literatur

- [1] S. Hesse, J. Mehrholz, and C. Werner, "Robot-assisted upper and lower limb rehabilitation after stroke: walking and arm/hand function.," *Dtsch. Arztebl. Int.*, vol. 105, no. 18, pp. 330–6, May 2008.
- [2] F. Batchelor, K. Hill, S. Mackintosh, and C. Said, "What works in falls prevention after stroke?: a systematic review and meta-analysis.," *Stroke.*, vol. 41, no. 8, pp. 1715–22, Aug. 2010.
- [3] B. H. Dobkin and A. Dorsch, "New evidence for therapies in stroke rehabilitation.," *Curr. Atheroscler. Rep.*, vol. 15, no. 6, p. 331, Jun. 2013.
- [4] Tyromotion GmbH, "Tyromotion, Computer- und Robotik-gestützte Rehabilitation," 2016. [Online]. Available: <http://tyromotion.com/produkte/tymo>. [Accessed: 02-Jun-2017].
- [5] A. S. Pollock, B. R. Durward, P. J. Rowe, and J. P. Paul, "What is balance?," *Clin. Rehabil.*, vol. 14, no. 4, pp. 402–6, Aug. 2000.
- [6] Tyromotion GmbH, "TYMO® Therapy Plate Gebrauchsanweisung / Manual," 2015. [Online]. Available: <http://tyromotion.com/services/downloads>. [Accessed: 02-Jun-2017].
- [7] Atmel Corporation, "AN_8032 - AVR1300: Using the XMEGA ADC," 2013. [Online]. Available: <http://www.microchip.com/wwwproducts/en/ATXMEGA128A1U>. [Accessed: 02-Jun-2017].
- [8] Direktive 93/42/EWG über Medizinprodukte, "Richtlinie 93/42/EWG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 14. Juni 1993 über Medizinprodukte," 1993.
- [9] EN 60601-1, "Medizinische elektrische Geräte - Teil 1: Allgemeine Festlegungen für die Sicherheit einschließlich der wesentlichen Leistungsmerkmale," 2007.
- [10] The MathWorks, "Matlab - Kolmogorov-Smirnov Test." [Online]. Available: <https://de.mathworks.com/help/stats/kstest.html>. [Accessed: 02-Jun-2017].
- [11] Lipopower, "Längere Akkuzyklenzeit durch schonenden Betrieb!" [Online]. Available:

- <http://shop.lipopower.de/navi.php?s=23>. [Accessed: 02-Jun-2017].
- [12] Microchip Technology Inc., “RN41/RN42N Class 1 Bluetooth® Module with EDR Support,” 2014. [Online]. Available: <http://www.microchip.com/wwwproducts/en/RN41>. [Accessed: 02-Jun-2017].
- [13] Atmel Corporation, “Atmel AVR XMEGA AU - Complete Datasheet,” 2013. [Online]. Available: <http://www.microchip.com/wwwproducts/en/ATXMEGA128A1U>. [Accessed: 02-Jun-2017].
- [14] Atmel Corporation, “ATxmega64A1U/128A1U Datasheet,” 2014. [Online]. Available: <http://www.microchip.com/wwwproducts/en/ATXMEGA128A1U>. [Accessed: 02-Jun-2017].
- [15] Texas Instruments, “Ultralow-Noise High Psrr Fast Rf 200-Ma Low-Dropout Linear Regulators,” 2006. [Online]. Available: <http://www.ti.com/product/TPS79333-EP>. [Accessed: 02-Jun-2017].
- [16] I. Analog Devices, “Single-Supply, Low Cost Instrumentation Amplifier AD8223,” 2017. [Online]. Available: <http://www.analog.com/en/products/amplifiers/instrumentation-amplifiers/ad8223.html>. [Accessed: 02-Jun-2017].
- [17] I. Analog Devices, “Wide Supply Range, Rail-to-Rail Output Instrumentation Amplifier AD8226,” 2017. [Online]. Available: <http://www.analog.com/en/products/amplifiers/instrumentation-amplifiers/ad8226.html>. [Accessed: 02-Jun-2017].
- [18] Atmel Corporation, “Single-key QTouch® Touch Sensor IC AT42QT1010,” 2017. [Online]. Available: <http://www.microchip.com/wwwproducts/en/AT42QT1010>. [Accessed: 02-Jun-2017].
- [19] Atmel Corporation, “QTAN0079 Buttons, Sliders and Wheels, Sensor Design Guide,” 2011. [Online]. Available: <http://www.microchip.com/wwwproducts/en/AT42QT1010>. [Accessed: 02-Jun-2017].
- [20] Forschungsgesellschaft der FH Kärnten EMV- Mess- und Prüflabor, “Test report No.: PB16G569 EMC Test Tymo R4,” 2016.

8. Anhang

8.1. Ergebnisse

8.1.1. Messergebnisse der Kraftmessungen

Tabelle 28: Messergebnisse Redesign Kraftsensor 1

| Soll | | Median | IQR | Fo +1%+1LSB | Fu -1%-1LSB | Fo +3%+2LSB | Fu -3%-2LSB | Fa | Fr |
|-------|--------|--------|------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------|--------|
| kg | N | N | N | N | N | N | N | N | % |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,00 | 1,000 | -1,000 | 2,000 | -2,000 | 0,00 | - |
| 2,00 | 19,60 | 19,00 | 0,00 | 20,796 | 18,404 | 22,188 | 17,012 | -0,60 | -3,06% |
| 5,00 | 49,01 | 49,00 | 1,00 | 50,501 | 47,521 | 52,481 | 45,540 | -0,01 | -0,02% |
| 9,99 | 98,02 | 98,00 | 1,00 | 100,002 | 96,041 | 102,962 | 93,081 | -0,02 | -0,02% |
| 19,95 | 195,72 | 194,00 | 0,00 | 198,677 | 192,762 | 203,591 | 187,848 | -1,72 | -0,88% |
| 29,96 | 293,89 | 292,00 | 1,00 | 297,827 | 289,949 | 304,705 | 283,071 | -1,89 | -0,64% |
| 39,95 | 391,91 | 390,00 | 1,00 | 396,829 | 386,990 | 405,667 | 378,152 | -1,91 | -0,49% |
| 49,76 | 488,15 | 489,00 | 1,00 | 494,027 | 482,264 | 504,790 | 471,501 | 0,85 | 0,18% |
| 59,82 | 586,80 | 586,00 | 1,00 | 593,673 | 579,937 | 606,409 | 567,201 | -0,80 | -0,14% |

Tabelle 29: Messergebnisse Redesign Kraftsensor 2

| Soll | | Median | IQR | Fo +1%+1LSB | Fu -1%-1LSB | Fo +3%+2LSB | Fu -3%-2LSB | Fa | Fr |
|-------|--------|--------|------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------|--------|
| kg | N | N | N | N | N | N | N | N | % |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,00 | 1,000 | -1,000 | 2,000 | -2,000 | 0,00 | - |
| 2,00 | 19,60 | 19,00 | 0,00 | 20,796 | 18,404 | 22,188 | 17,012 | -0,60 | -3,06% |
| 5,00 | 49,01 | 48,00 | 0,00 | 50,501 | 47,521 | 52,481 | 45,540 | -1,01 | -2,06% |
| 9,99 | 98,02 | 98,00 | 0,00 | 100,002 | 96,041 | 102,962 | 93,081 | -0,02 | -0,02% |
| 19,95 | 195,72 | 194,00 | 1,00 | 198,677 | 192,762 | 203,591 | 187,848 | -1,72 | -0,88% |
| 29,96 | 293,89 | 292,00 | 1,00 | 297,827 | 289,949 | 304,705 | 283,071 | -1,89 | -0,64% |
| 39,95 | 391,91 | 389,00 | 1,00 | 396,829 | 386,990 | 405,667 | 378,152 | -2,91 | -0,74% |
| 49,76 | 488,15 | 489,00 | 1,00 | 494,027 | 482,264 | 504,790 | 471,501 | 0,85 | 0,18% |
| 59,82 | 586,80 | 587,00 | 1,00 | 593,673 | 579,937 | 606,409 | 567,201 | 0,20 | 0,03% |

Tabelle 30: Messergebnisse Redesign Kraftsensor 3

| Soll | | Median | IQR | Fo +1%+1LSB | Fu -1%-1LSB | Fo +3%+2LSB | Fu -3%-2LSB | Fa | Fr |
|-------|--------|--------|------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------|--------|
| kg | N | N | N | N | N | N | N | N | % |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,00 | 1,000 | -1,000 | 2,000 | -2,000 | 0,00 | - |
| 2,00 | 19,60 | 19,00 | 0,00 | 20,796 | 18,404 | 22,188 | 17,012 | -0,60 | -3,06% |
| 5,00 | 49,01 | 48,00 | 1,00 | 50,501 | 47,521 | 52,481 | 45,540 | -1,01 | -2,06% |
| 9,99 | 98,02 | 98,00 | 1,00 | 100,002 | 96,041 | 102,962 | 93,081 | -0,02 | -0,02% |
| 19,95 | 195,72 | 195,00 | 1,00 | 198,677 | 192,762 | 203,591 | 187,848 | -0,72 | -0,37% |
| 29,96 | 293,89 | 292,00 | 0,00 | 297,827 | 289,949 | 304,705 | 283,071 | -1,89 | -0,64% |
| 39,95 | 391,91 | 392,00 | 0,00 | 396,829 | 386,990 | 405,667 | 378,152 | 0,09 | 0,02% |
| 49,76 | 488,15 | 488,00 | 1,00 | 494,027 | 482,264 | 504,790 | 471,501 | -0,15 | -0,03% |
| 59,82 | 586,80 | 587,00 | 1,00 | 593,673 | 579,937 | 606,409 | 567,201 | 0,20 | 0,03% |

Tabelle 31: Messergebnisse Redesign Kraftsensor 4

| Soll | | Median | IQR | Fo +1%+1LSB | Fu -1%-1LSB | Fo +3%+2LSB | Fu -3%-2LSB | Fa | Fr |
|-------|--------|--------|------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------|--------|
| kg | N | N | N | N | N | N | N | N | % |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,00 | 1,000 | -1,000 | 2,000 | -2,000 | 0,00 | - |
| 2,00 | 19,60 | 19,00 | 1,00 | 20,796 | 18,404 | 22,188 | 17,012 | -0,60 | -3,06% |
| 5,00 | 49,01 | 48,00 | 0,00 | 50,501 | 47,521 | 52,481 | 45,540 | -1,01 | -2,06% |
| 9,99 | 98,02 | 97,00 | 1,00 | 100,002 | 96,041 | 102,962 | 93,081 | -1,02 | -1,04% |
| 19,95 | 195,72 | 196,00 | 1,00 | 198,677 | 192,762 | 203,591 | 187,848 | 0,28 | 0,14% |
| 29,96 | 293,89 | 293,00 | 0,00 | 297,827 | 289,949 | 304,705 | 283,071 | -0,89 | -0,30% |
| 39,95 | 391,91 | 392,00 | 1,00 | 396,829 | 386,990 | 405,667 | 378,152 | 0,09 | 0,02% |
| 49,76 | 488,15 | 488,00 | 1,00 | 494,027 | 482,264 | 504,790 | 471,501 | -0,15 | -0,03% |
| 59,82 | 586,80 | 587,00 | 1,00 | 593,673 | 579,937 | 606,409 | 567,201 | 0,20 | 0,03% |

Tabelle 32: Messergebnisse Redesign Gesamtgerät (Summe aller vier Kraftsensoren)

| Soll | | Median | IQR | Fo +1%+1LSB | Fu -1%-1LSB | Fo +3%+2LSB | Fu -3%-2LSB | Fa | Fr |
|-------|--------|--------|------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------|--------|
| kg | N | N | N | N | N | N | N | N | % |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | 3,00 | 1,000 | -1,000 | 2,000 | -2,000 | 0,00 | - |
| 2,00 | 19,60 | 18,00 | 2,00 | 20,796 | 18,404 | 22,188 | 17,012 | -1,60 | -8,17% |
| 5,00 | 49,01 | 49,00 | 3,00 | 50,501 | 47,521 | 52,481 | 45,540 | -0,01 | -0,02% |
| 9,99 | 98,02 | 94,00 | 3,00 | 100,002 | 96,041 | 102,962 | 93,081 | -4,02 | -4,10% |
| 19,95 | 195,72 | 197,50 | 1,00 | 198,677 | 192,762 | 203,591 | 187,848 | 1,78 | 0,91% |
| 29,96 | 293,89 | 298,00 | 2,00 | 297,827 | 289,949 | 304,705 | 283,071 | 4,11 | 1,40% |
| 39,95 | 391,91 | 396,00 | 3,00 | 396,829 | 386,990 | 405,667 | 378,152 | 4,09 | 1,04% |
| 49,76 | 488,15 | 492,00 | 1,00 | 494,027 | 482,264 | 504,790 | 471,501 | 3,85 | 0,79% |
| 59,82 | 586,80 | 589,00 | 2,00 | 593,673 | 579,937 | 606,409 | 567,201 | 2,20 | 0,37% |

| | | | | | | | | | |
|--------|--------|--------|------|---------|---------|---------|---------|-------|--------|
| 69,48 | 681,60 | 678,00 | 3,00 | 689,415 | 673,783 | 704,047 | 659,151 | -3,60 | -0,53% |
| 85,468 | 838,44 | 831,00 | 0,00 | 847,825 | 829,057 | 865,594 | 811,288 | -7,44 | -0,89% |

Tabelle 33: Messergebnisse Referenzdesign Kraftsensor 1

| Soll | | Median | IQR | Fo +1%+1LSB | Fu -1%-1LSB | Fo +3%+2LSB | Fu -3%-2LSB | Fa | Fr |
|-------|--------|--------|------|----------------|----------------|----------------|----------------|--------|---------|
| kg | N | N | N | N | N | N | N | N | % |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,000 | -1,000 | 2,000 | -2,000 | 0,00 | - |
| 2,00 | 19,60 | 4,00 | 0,00 | 20,796 | 18,404 | 22,188 | 17,012 | -15,60 | -79,59% |
| 5,00 | 49,01 | 34,00 | 0,00 | 50,501 | 47,521 | 52,481 | 45,540 | -15,01 | -30,63% |
| 9,99 | 98,02 | 83,00 | 1,00 | 100,002 | 96,041 | 102,962 | 93,081 | -15,02 | -15,32% |
| 19,95 | 195,72 | 183,00 | 1,00 | 198,677 | 192,762 | 203,591 | 187,848 | -12,72 | -6,50% |
| 29,96 | 293,89 | 282,00 | 0,00 | 297,827 | 289,949 | 304,705 | 283,071 | -11,89 | -4,05% |
| 39,95 | 391,91 | 379,00 | 1,00 | 396,829 | 386,990 | 405,667 | 378,152 | -12,91 | -3,29% |
| 49,76 | 488,15 | 478,00 | 1,00 | 494,027 | 482,264 | 504,790 | 471,501 | -10,15 | -2,08% |
| 59,82 | 586,80 | 584,00 | 0,00 | 593,673 | 579,937 | 606,409 | 567,201 | -2,80 | -0,48% |

Tabelle 34: Messergebnisse Referenzdesign Kraftsensor 2

| Soll | | Median | IQR | Fo +1%+1LSB | Fu -1%-1LSB | Fo +3%+2LSB | Fu -3%-2LSB | Fa | Fr |
|-------|--------|--------|------|----------------|----------------|----------------|----------------|--------|---------|
| kg | N | N | N | N | N | N | N | N | % |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,000 | -1,000 | 2,000 | -2,000 | 0,00 | - |
| 2,00 | 19,60 | 1,00 | 0,00 | 20,796 | 18,404 | 22,188 | 17,012 | -18,60 | -94,90% |
| 5,00 | 49,01 | 31,00 | 0,00 | 50,501 | 47,521 | 52,481 | 45,540 | -18,01 | -36,75% |
| 9,99 | 98,02 | 81,00 | 0,00 | 100,002 | 96,041 | 102,962 | 93,081 | -17,02 | -17,37% |
| 19,95 | 195,72 | 183,00 | 1,00 | 198,677 | 192,762 | 203,591 | 187,848 | -12,72 | -6,50% |
| 29,96 | 293,89 | 281,00 | 1,00 | 297,827 | 289,949 | 304,705 | 283,071 | -12,89 | -4,39% |
| 39,95 | 391,91 | 377,00 | 1,00 | 396,829 | 386,990 | 405,667 | 378,152 | -14,91 | -3,80% |
| 49,76 | 488,15 | 477,00 | 1,00 | 494,027 | 482,264 | 504,790 | 471,501 | -11,15 | -2,28% |
| 59,82 | 586,80 | 575,00 | 0,00 | 593,673 | 579,937 | 606,409 | 567,201 | -11,80 | -2,01% |

Tabelle 35: Messergebnisse Referenzdesign Kraftsensor 3

| Soll | | Median | IQR | Fo +1%+1LSB | Fu -1%-1LSB | Fo +3%+2LSB | Fu -3%-2LSB | Fa | Fr |
|-------|--------|--------|------|----------------|----------------|----------------|----------------|--------|----------|
| kg | N | N | N | N | N | N | N | N | % |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,000 | -1,000 | 2,000 | -2,000 | 0,00 | - |
| 2,00 | 19,60 | 0,00 | 0,00 | 20,796 | 18,404 | 22,188 | 17,012 | -19,60 | -100,00% |
| 5,00 | 49,01 | 27,00 | 0,00 | 50,501 | 47,521 | 52,481 | 45,540 | -22,01 | -44,91% |
| 9,99 | 98,02 | 77,00 | 0,00 | 100,002 | 96,041 | 102,962 | 93,081 | -21,02 | -21,45% |
| 19,95 | 195,72 | 177,00 | 1,00 | 198,677 | 192,762 | 203,591 | 187,848 | -18,72 | -9,56% |

| | | | | | | | | | |
|-------|--------|--------|------|---------|---------|---------|---------|--------|--------|
| 29,96 | 293,89 | 276,00 | 1,00 | 297,827 | 289,949 | 304,705 | 283,071 | -17,89 | -6,09% |
| 39,95 | 391,91 | 373,00 | 1,00 | 396,829 | 386,990 | 405,667 | 378,152 | -18,91 | -4,82% |
| 49,76 | 488,15 | 473,00 | 0,00 | 494,027 | 482,264 | 504,790 | 471,501 | -15,15 | -3,10% |
| 59,82 | 586,80 | 566,00 | 0,00 | 593,673 | 579,937 | 606,409 | 567,201 | -20,80 | -3,55% |

Tabelle 36: Messergebnisse Referenzdesign Kraftsensor 4

| Soll | | Median | IQR | Fo +1%+1LSB | Fu -1%-1LSB | Fo +3%+2LSB | Fu -3%-2LSB | Fa | Fr |
|-------|--------|--------|------|----------------|----------------|----------------|----------------|--------|---------|
| kg | N | N | N | N | N | N | N | N | % |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,000 | -1,000 | 2,000 | -2,000 | 0,00 | - |
| 2,00 | 19,60 | 3,00 | 0,00 | 20,796 | 18,404 | 22,188 | 17,012 | -16,60 | -84,69% |
| 5,00 | 49,01 | 33,00 | 0,00 | 50,501 | 47,521 | 52,481 | 45,540 | -16,01 | -32,67% |
| 9,99 | 98,02 | 82,00 | 0,00 | 100,002 | 96,041 | 102,962 | 93,081 | -16,02 | -16,34% |
| 19,95 | 195,72 | 180,00 | 0,00 | 198,677 | 192,762 | 203,591 | 187,848 | -15,72 | -8,03% |
| 29,96 | 293,89 | 280,00 | 1,00 | 297,827 | 289,949 | 304,705 | 283,071 | -13,89 | -4,73% |
| 39,95 | 391,91 | 378,00 | 0,00 | 396,829 | 386,990 | 405,667 | 378,152 | -13,91 | -3,55% |
| 49,76 | 488,15 | 480,00 | 0,00 | 494,027 | 482,264 | 504,790 | 471,501 | -8,15 | -1,67% |
| 59,82 | 586,80 | 575,00 | 1,00 | 593,673 | 579,937 | 606,409 | 567,201 | -11,80 | -2,01% |

Tabelle 37: Messergebnisse Referenzdesign Gesamtgerät (Summe aller vier Kraftsensoren)

| Soll | | Median | IQR | Fo +1%+1LSB | Fu -1%-1LSB | Fo +3%+2LSB | Fu -3%-2LSB | Fa | Fr |
|-------|--------|--------|------|----------------|----------------|----------------|----------------|--------|----------|
| kg | N | N | N | N | N | N | N | N | % |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,000 | -1,000 | 2,000 | -2,000 | 0,00 | - |
| 2,00 | 19,60 | 0,00 | 0,00 | 20,796 | 18,404 | 22,188 | 17,012 | -19,60 | -100,00% |
| 5,00 | 49,01 | 16,00 | 1,00 | 50,501 | 47,521 | 52,481 | 45,540 | -33,01 | -67,35% |
| 9,99 | 98,02 | 52,00 | 3,00 | 100,002 | 96,041 | 102,962 | 93,081 | -46,02 | -46,95% |
| 19,95 | 195,72 | 152,00 | 1,00 | 198,677 | 192,762 | 203,591 | 187,848 | -43,72 | -22,34% |
| 29,96 | 293,89 | 251,00 | 1,00 | 297,827 | 289,949 | 304,705 | 283,071 | -42,89 | -14,59% |
| 39,95 | 391,91 | 348,00 | 2,00 | 396,829 | 386,990 | 405,667 | 378,152 | -43,91 | -11,20% |
| 49,76 | 488,15 | 449,00 | 1,00 | 494,027 | 482,264 | 504,790 | 471,501 | -39,15 | -8,02% |
| 59,82 | 586,80 | 550,00 | 1,00 | 593,673 | 579,937 | 606,409 | 567,201 | -36,80 | -6,27% |
| 69,48 | 681,60 | 644,00 | 2,00 | 689,415 | 673,783 | 704,047 | 659,151 | -37,60 | -5,52% |
| 85,47 | 838,44 | 794,00 | 2,00 | 847,825 | 829,057 | 865,594 | 811,288 | -44,44 | -5,30% |

8.1.2. Messergebnisse der Winkelmessung

Tabelle 38: Messergebnisse Neigungsmessung φ Redesign

| Soll | | Median | IQR | STD | Fo +0,25° | Fu -0,25° | Fo +0,75° | Fu -0,75° | Fa | Fr |
|--------|--------|--------|------|-------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------|--------|
| g | ° | ° | ° | ° | ° | ° | ° | ° | ° | % |
| -46,21 | -10,44 | -10,62 | 0,00 | 0,000 | -10,190 | -10,690 | -9,690 | -11,190 | -0,18 | 1,73 |
| -35,05 | -7,90 | -7,66 | 0,00 | 0,000 | -7,650 | -8,150 | -7,150 | -8,650 | 0,24 | -3,01 |
| -23,47 | -5,28 | -5,17 | 0,00 | 0,000 | -5,030 | -5,530 | -4,530 | -6,030 | 0,11 | -1,99 |
| -11,57 | -2,60 | -2,02 | 0,00 | 0,202 | -2,350 | -2,850 | -1,850 | -3,350 | 0,58 | -22,21 |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,050 | 0,250 | -0,250 | 0,750 | -0,750 | 0,00 | - |
| 11,57 | 2,60 | 2,47 | 0,00 | 0,426 | 2,850 | 2,350 | 3,350 | 1,850 | -0,13 | -4,91 |
| 23,47 | 5,28 | 5,17 | 0,00 | 0,000 | 5,530 | 5,030 | 6,030 | 4,530 | -0,11 | -1,99 |
| 35,05 | 7,90 | 8,12 | 0,00 | 0,486 | 8,150 | 7,650 | 8,650 | 7,150 | 0,22 | 2,73 |
| 46,21 | 10,44 | 10,62 | 0,00 | 0,131 | 10,690 | 10,190 | 11,190 | 9,690 | 0,18 | 1,73 |

Tabelle 39: Messergebnisse Neigungsmessung θ Redesign

| Soll | | Median | IQR | STD | Fo +0,25° | Fu -0,25° | Fo +0,75° | Fu -0,75° | Fa | Fr |
|--------|--------|--------|------|------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------|--------|
| g | ° | ° | ° | ° | ° | ° | ° | ° | ° | % |
| -46,21 | -10,44 | -10,16 | 0,00 | 0,41 | -10,190 | -10,690 | -9,690 | -11,190 | 0,28 | -2,64 |
| -35,05 | -7,90 | -7,44 | 0,00 | 0,00 | -7,650 | -8,150 | -7,150 | -8,650 | 0,46 | -5,88 |
| -23,47 | -5,28 | -4,95 | 0,00 | 0,00 | -5,030 | -5,530 | -4,530 | -6,030 | 0,33 | -6,26 |
| -11,57 | -2,60 | -2,25 | 0,22 | 0,50 | -2,350 | -2,850 | -1,850 | -3,350 | 0,35 | -13,56 |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,250 | -0,250 | 0,750 | -0,750 | 0,00 | - |
| 11,57 | 2,60 | 2,25 | 0,00 | 0,00 | 2,850 | 2,350 | 3,350 | 1,850 | -0,35 | -13,56 |
| 23,47 | 5,28 | 5,17 | 0,00 | 0,40 | 5,530 | 5,030 | 6,030 | 4,530 | -0,11 | -1,99 |
| 35,05 | 7,90 | 8,34 | 0,00 | 0,09 | 8,150 | 7,650 | 8,650 | 7,150 | 0,44 | 5,61 |
| 46,21 | 10,44 | 10,85 | 0,00 | 0,00 | 10,690 | 10,190 | 11,190 | 9,690 | 0,41 | 3,93 |

Tabelle 40: Messergebnisse Neigungsmessung φ Referenzdesign

| Soll | | Median | IQR | Fo +0,25° | Fu -0,25° | Fo +0,75° | Fu -0,75° | Fa | Fr |
|--------|--------|--------|------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------|--------|
| g | ° | ° | ° | ° | ° | ° | ° | ° | % |
| -46,21 | -10,44 | -10,85 | 0,23 | -10,190 | -10,690 | -9,690 | -11,190 | -0,41 | 3,93 |
| -35,05 | -7,90 | -7,89 | 0,45 | -7,650 | -8,150 | -7,150 | -8,650 | 0,01 | -0,14 |
| -23,47 | -5,28 | -4,95 | 0,45 | -5,030 | -5,530 | -4,530 | -6,030 | 0,33 | -6,26 |
| -11,57 | -2,60 | -2,92 | 0,22 | -2,350 | -2,850 | -1,850 | -3,350 | -0,32 | 12,39 |
| 0,00 | 0,00 | -0,45 | 0,45 | 0,250 | -0,250 | 0,750 | -0,750 | -0,45 | - |
| 11,57 | 2,60 | 1,80 | 0,22 | 2,850 | 2,350 | 3,350 | 1,850 | -0,80 | -30,85 |

| | | | | | | | | | |
|-------|-------|-------|------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|
| 23,47 | 5,28 | 5,17 | 0,45 | 5,530 | 5,030 | 6,030 | 4,530 | -0,11 | -1,99 |
| 35,05 | 7,90 | 7,21 | 0,23 | 8,150 | 7,650 | 8,650 | 7,150 | -0,69 | -8,75 |
| 46,21 | 10,44 | 10,16 | 0,23 | 10,690 | 10,190 | 11,190 | 9,690 | -0,28 | -2,64 |

Tabelle 41: Messergebnisse Neigungsmessung θ Referenzdesign

| Soll | | Median | IQR | Fo +0,25° | Fu -0,25° | Fo +0,75° | Fu -0,75° | Fa | Fr |
|--------|--------|--------|------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------|--------|
| g | ° | ° | ° | ° | ° | ° | ° | ° | % |
| -46,21 | -10,44 | -10,62 | 0,23 | -10,190 | -10,690 | -9,690 | -11,190 | -0,18 | 1,73 |
| -35,05 | -7,90 | -7,89 | 0,46 | -7,650 | -8,150 | -7,150 | -8,650 | 0,01 | -0,14 |
| -23,47 | -5,28 | -5,40 | 0,23 | -5,030 | -5,530 | -4,530 | -6,030 | -0,12 | 2,28 |
| -11,57 | -2,60 | -2,70 | 0,23 | -2,350 | -2,850 | -1,850 | -3,350 | -0,10 | 3,74 |
| 0,00 | 0,00 | 0,90 | 0,23 | 0,250 | -0,250 | 0,750 | -0,750 | 0,90 | - |
| 11,57 | 2,60 | 2,02 | 0,23 | 2,850 | 2,350 | 3,350 | 1,850 | -0,58 | -22,21 |
| 23,47 | 5,28 | 5,63 | 0,23 | 5,530 | 5,030 | 6,030 | 4,530 | 0,35 | 6,56 |
| 35,05 | 7,90 | 8,57 | 0,23 | 8,150 | 7,650 | 8,650 | 7,150 | 0,67 | 8,48 |
| 46,21 | 10,44 | 9,94 | 0,23 | 10,690 | 10,190 | 11,190 | 9,690 | -0,50 | -4,83 |

8.1.3. Messergebnisse der Bluetooth Verbindungsmessung



Abbildung 52: Messung der Bluetooth Übertragungsrates des Redesign aus 6m Entfernung

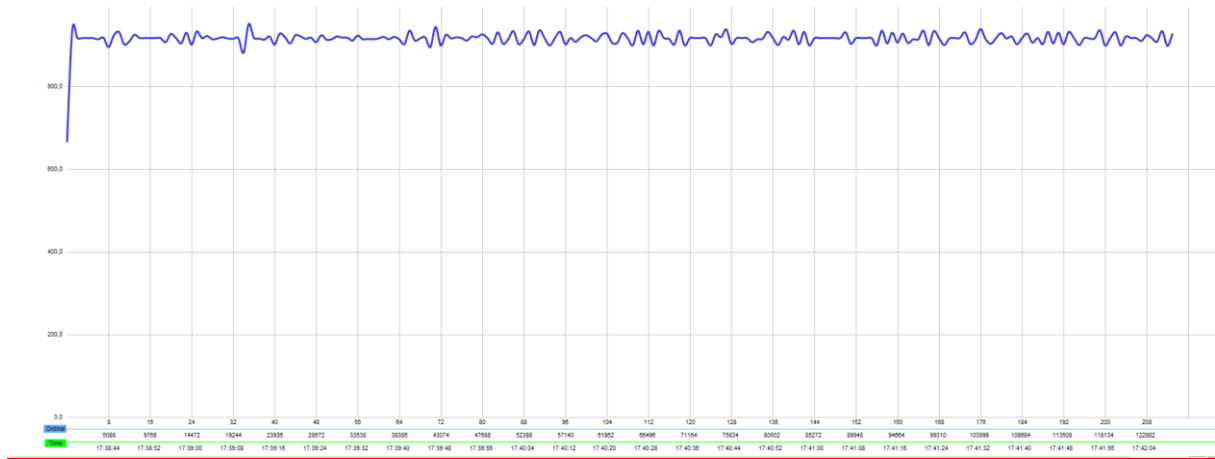


Abbildung 53: Messung der Bluetooth Übertragungsrate des Redesign aus 9m Entfernung

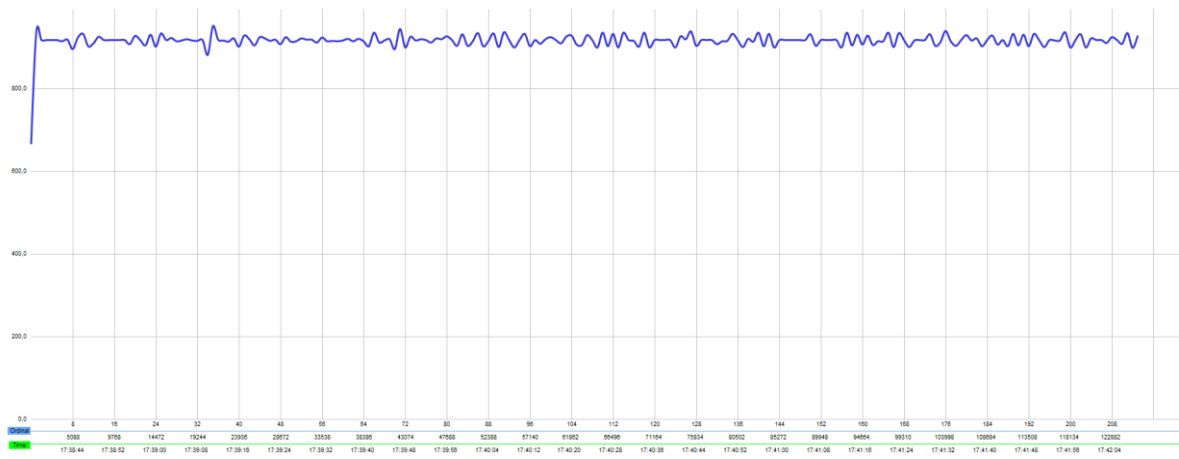


Abbildung 54: Messung der Bluetooth Übertragungsrate des Redesign aus 12m Entfernung