

**Fachhochschule Aachen**  
**Campus Jülich**

Fachbereich 9  
Medizintechnik und Technomathematik

---

# **Beurteilung der Signalqualität von ballistokardiographischen Signalen mittels maschinellen Lernens**

---

**Bachelorarbeit**  
im Studiengang Scientific Programming

von

**Cay Jakob Rahn**  
Matr.-Nr.: 3145495

16. September 2020

1. Prüfer: Prof. Dr. rer. nat. Alexander Voß  
2. Prüfer: Dr.-Ing. Christoph Hoog Antink



# Erklärung

Diese Arbeit ist von mir selbständig angefertigt und verfasst. Es sind keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt worden.

---

Ort, Datum

---

Unterschrift



# Abstract

Die Beurteilung der Signalqualität bei ballistokardiographischen Signalen ist für eine Anwendung in der Praxis essentiell, wirft aber besonders bei in Betten aufgenommenen Signalen noch große Fragen auf. Ziel dieser Arbeit ist es, Möglichkeiten der Artefakterkennung bei solchen Signalen mittels maschinellen Lernens zu untersuchen. Grundlage sind bereits entwickelte Verfahren und Domainenexpertise.

Schwerpunkte der Arbeit:

- Recherche zu verschiedenen Verfahren des Maschinellen Lernens
- Beurteilung der Qualität bereits existierender Verfahren für Langzeitaufnahmen von bettlägerigen Patient\*innen
- Merkmalskonstruktion auf Basis von Domainenexpertise
- Vergleich verschiedener Verfahren und Eingabeparamater
- Vergleich verschiedener Verfahren und Eingabeparamater
- Untersuchung des Einflusses der Vorverarbeitung des Signals
- Evaluierung und Validierung der Ergebnisse



# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>ix</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>xi</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation . . . . .	1
1.2 Ziel der Arbeit . . . . .	2
1.3 Gliederung . . . . .	2
<b>2 Grundlagen</b>	<b>3</b>
2.1 Medizinische und messtechnische Grundlagen . . . . .	3
2.1.1 Kardiorespiratorisches System . . . . .	3
2.1.2 Übersicht Messtechniken . . . . .	4
2.2 Ballistokardiographie . . . . .	4
2.2.1 Medizinischer und technischer Hintergrund . . . . .	4
2.2.2 Einsatzgebiet . . . . .	5
2.2.3 Signaleigenschaften . . . . .	5
2.2.4 Signalverarbeitung . . . . .	5
2.2.5 Artefakterkennung bei kardiorespiratorischen Signalen . . . . .	5
2.3 Maschinelles Lernen . . . . .	5
2.3.1 Grundprinzipien . . . . .	5
2.3.2 Probleme maschinellen Lernens . . . . .	5
2.3.3 Lernmodelle überwachten Lernens . . . . .	5
2.3.4 Validierung . . . . .	5
2.3.5 Evaluation von Modellen . . . . .	5
<b>3 Messdaten</b>	<b>7</b>
3.1 Erfassung der Messdaten . . . . .	7
3.2 Vorliegende Form . . . . .	7
3.3 Verarbeitung . . . . .	7
3.4 Annotation der Daten . . . . .	7
3.4.1 Möglichkeit 1 . . . . .	7
3.4.2 Anhand der geschätzten Herzraten von Elektrokardiogramm und Ballistokardiogramm . . . . .	7

<b>4</b>	<b>Existierende Verfahren zur Beurteilung der Signalqualität</b>	<b>9</b>
4.1	Ähnlichkeit der Intervallschätzer nach Brüser . . . . .	9
4.2	Schwellwerte für Standardabweichung, Minimum und Maximum . . . . .	9
4.3	Maschinelles Lernen mittels statistischer Merkmale . . . . .	9
4.3.1	Beschriebenes Vorgehen . . . . .	9
4.3.2	Eigene Implementierung . . . . .	9
4.3.3	Ergebnisse im Vergleich . . . . .	9
4.3.4	Evaluation . . . . .	9
<b>5</b>	<b>Eigenes</b>	<b>11</b>
5.1	Eingabeform . . . . .	11
5.2	Merkmalskonstruktion . . . . .	11
<b>6</b>	<b>Ergebnisse und Ausblick</b>	<b>13</b>
6.1	Ergebnisse . . . . .	13
6.2	Ausblick . . . . .	13
	<b>Literatur</b>	<b>15</b>



# Abkürzungsverzeichnis

**BKG** Ballistokardiographie

**EKG** Elektrokardiographie

**PPG** Photoplethysmographie

**SKG** Seismokardiographie



# Abbildungsverzeichnis

2.1	Beispiel eines typischen Ballistokardiographie (BKG)-Signals mit Nomenklatur . . . . .	6
-----	--	---



# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Der derzeitige demographische Wandel stellt das Gesundheitssystem vor eine große Herausforderung: Immer mehr Patient\*innen müssen im Alter überwacht und versorgt werden. Eine kontinuierliche autonome Überwachung von Vitalparametern im Krankenhaus oder auch Zuhause erlaubt es, Erkrankungen frühzeitig zu erkennen oder zu beobachten, ohne dass große Personalkapazitäten von Nöten sind.

Für diesen Anwendungszweck eignen sich vor allem Messmethoden, die die Patient\*innen im Alltag nicht einschränken und wenig invasiv sind. Im Englischen wird dies mit dem Begriff *unobtrusive* bezeichnet. Da es keine zufriedenstellende deutsche Entsprechung gibt, wird dieser im Folgenden nicht übersetzt verwendet werden. Solche *unobtrusive* Messmethoden beinhalten meist keine Notwendigkeit für direkten Körper- oder Hautkontakt, liefern aber Information über Atmung und Herzschlag. Die Herausforderung bei so ermitteltem Signal besteht in der Signalverarbeitung, da Messungenauigkeiten und Alltagsbewegungen zu Störungen im Signal führen. Nicht informatives, also nicht für die Verarbeitung geeignetes Signal muss aber zwingend identifiziert werden, da die Ergebnisse stark verfälscht werden.

Eine solche *unobtrusive* Messmethode ist die Ballistokardiographie (BKG). Sensoren lassen sich beispielsweise in Betten und Stühlen implementieren. Aufgezeichnet werden Aktivitäten des Herzens und der Atmung. Die Signalmorphologie variiert jedoch sowohl zwischen den Patient\*innen als auch innerhalb einer Person sehr stark, wodurch die automatische Beurteilung der Signalqualität erschwert wird. Um eine aussagekräftige Signalverarbeitung zu ermöglichen, ist dies jedoch essentiell. Besonders bei in Betten aufgenommenem Signal ist die Variation des Signals in Kombination mit Artefakten durch Körperbewegungen oder ähnliches problematisch.

## 1.2 Ziel der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit ist es, Möglichkeiten der Beurteilung der Signalqualität von BKG-Signalen mittels maschinellen Lernens zu untersuchen. Im besonderen Fokus liegen dabei Langzeitaufnahmen von bettlägerigen Patient\*innen, da diese sich in der Vergangenheit als besonders anfällig für geringe Signalqualität gezeigt haben.

Dafür werden zunächst existierende Verfahren der Artefakterkennung für die vorliegenden Daten getestet und bewertet. Anschließend wird auf Basis von Domainenexpertise Merkmalskonstruktion betrieben und verschiedene Verfahren und Eingabeparameter verglichen. Auch wird der Einfluss der Vorverarbeitung des Signals untersucht.

Langfristig soll ermöglicht werden, Ballistokardiographie (BKG) im medizinischen Alltag anzuwenden.

## 1.3 Gliederung

## 2 Grundlagen

### 2.1 Medizinische und messtechnische Grundlagen

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Beurteilung der Signalqualität in ballistokardiographischen Signalen. Zum Verständnis der gemessenen Vorgänge und der Problematik in Bezug auf die Signalqualität und dessen Beurteilung ist grundlegendes medizinisches Wissen über die gemessenen Vorgänge und messtechnisches Verständnis nötig. Aufgrund dessen wird hier eine kurze Übersicht über die medizinischen Grundlagen gegeben.

#### 2.1.1 Kardiorespiratorisches System

Das kardiorespiratorische System (zusammengesetzt aus *kardia*, deutsch 'Herz' und *respiratio*, deutsch 'Atmung') setzt sich aus zwei Teilsystemen zusammen, dem kardiovaskulären und dem respiratorischen System, die zusammen die Versorgung der Organe mit sicherstellen.

Das kardiovaskuläre System umfasst das Herz, die Arterien und die Venen. In einem Zyklus wird das sauerstoffreiche Blut von der linken Herzkammer durch die Arterien zu den Organen gepumpt, wo sich der Sauerstoff zur Versorgung dieser vom Blut löst. Die Venen transportieren das nun sauerstoffarme Blut in die rechte Herzkammer. Von dort wird es zur Lunge geführt, mit Sauerstoff angereichert und in die linke Herzkammer geleitet. Damit schließt sich der Zyklus. Die Herzfrequenz ist hierbei und relevanter messbarer Vitalparameter.

Ein Herzschlag selbst besteht aus zwei Phasen: einer füllenden und einer auswerfenden Phase. Während der Diastole, der Erschlaffungs- und Bluteinströmungsphase, füllen sich die Herzkammern mit Blut. Diese Phase endet mit dem Schließen der Herzklappen und die Systole beginnt. Die Systole ist die Anspannungs- und Blutausströmungsphase: Die Herzklappen öffnen sich durch Kontraktion des Herzmuskels und das Blut kann ausströmen.

Das respiratorische System umfasst die Lungen und den Lungenkreislauf. In einem Atemzyklus wird durch gezielte Muskelbewegungen Luft aus der Umgebung eingeatmet. Mit dem eingeatmeten Sauerstoff wird sauerstoffarmes Blut angereichert und anschließend die nun sauerstoffarme Luft ausgeatmet. Hier ist der Vitalparameter der Atemfrequenz messbar.

### 2.1.2 Übersicht Messtechniken

Die untersuchte BKG wird zur Untersuchung oft mit anderen Messmethoden als Referenz aufgenommen. Im Folgenden werden diese kurz vorgestellt.

Die Elektrokardiographie (EKG) zeichnet die elektrischen Aktivitäten des Herzmuskels auf, indem mit mehreren Elektroden die Spannungsänderung gemessen wird. Hier ist die Herzfrequenz sehr gut ablesbar.

Die Photoplethysmographie (PPG) ist ein optisches Messverfahren, bei dem die Menge des von der Haut reflektierten bzw. transmittierten Lichtes gemessen wird. Dadurch kann die Änderung des Blutvolumens gemessen werden; die Lichtmenge nimmt bei Durchlaufen einer Pulswelle durch die Arterie deutlich ab. Dieses Signal bietet Rückschluss auf Atmung und Herzschlag.

Oft gemeinsam mit dem BKG betrachtet wird die Seismokardiographie (SKG), bei der die Vibration der Wand des Brustkorbs durch den Herzschlag aufgezeichnet wird.

## 2.2 Ballistokardiographie

### 2.2.1 Medizinischer und technischer Hintergrund

-



### 2.2.2 Einsatzgebiet

### 2.2.3 Signaleigenschaften

### 2.2.4 Signalverarbeitung

### 2.2.5 Artefakterkennung bei kardiorespiratorischen Signalen

## 2.3 Maschinelles Lernen

### 2.3.1 Grundprinzipien

### 2.3.2 Probleme maschinellen Lernens

### 2.3.3 Lernmodelle überwachten Lernens

### 2.3.4 Validierung

### 2.3.5 Evaluation von Modellen

$$y = +1, \text{ falls } \sum_{i=1}^n w_i \cdot x_i > b$$

$$y = -1, \text{ falls } \sum_{i=1}^n w_i \cdot x_i < b$$

$$qSQI = \begin{cases} \text{excellent (E)} & \text{wenn alle 4 } SQI_i \geq 0,9 \\ \text{acceptable (A)} & \begin{cases} \text{wenn 3 der 4 } SQI_i \geq 0,9 \text{ oder} \\ \text{wenn alle 4 } SQI_i \geq 0,7 \text{ oder} \\ \text{wenn } \text{median}(SQI_1, SQI_2, SQI_3) \geq 0,8 \\ \text{und } SQI_1 \geq 0,5 \text{ und } SQI_4 \geq 0,7 \end{cases} \\ \text{untrustworthy (U)} & \text{sonst} \end{cases}$$

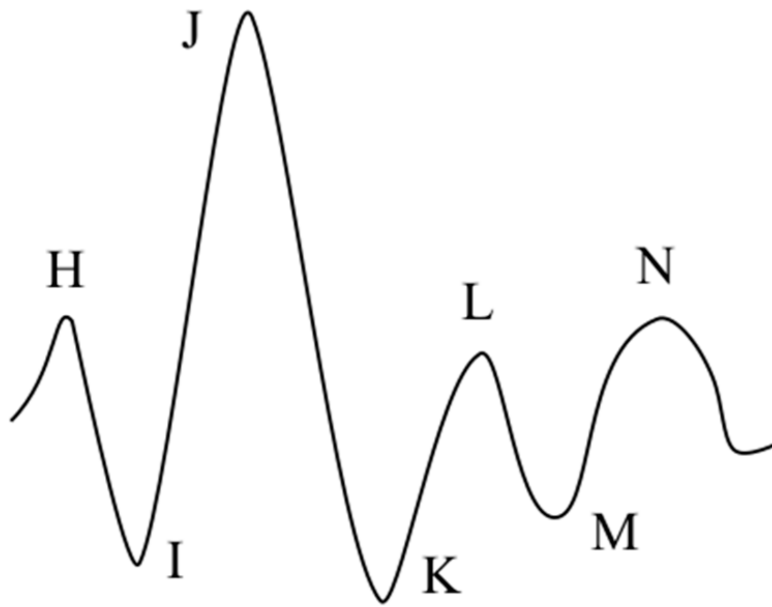


Abbildung 2.1: Beispiel eines typischen BKG-Signals mit Nomenklatur<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup>Entnommen aus Albukhari et al. 2019 nach Starr et al. 1939.

## **3 Messdaten**

### **3.1 Erfassung der Messdaten**

### **3.2 Vorliegende Form**

### **3.3 Verarbeitung**

### **3.4 Annotation der Daten**

Die vorliegenden Daten sind nicht annotiert. Es ist im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich, die Annotation durch Expert\*innen durchführen zu lassen, weshalb auf das parallel aufgenommene EKG zurückgegriffen wird.

#### **3.4.1 Möglichkeit 1**

#### **3.4.2 Anhand der geschätzten Herzraten von Elektrokardiogramm und Ballistokardiogramm**



## **4 Existierende Verfahren zur Beurteilung der Signalqualität**

- gibt einige Verfahren
- Vermutung, dass nicht hinreichend für unsere Daten aus Gründen

### **4.1 Ähnlichkeit der Intervallschätzer nach Brüser**

### **4.2 Schwellwerte für Standardabweichung, Minimum und Maximum**

### **4.3 Maschinelles Lernen mittels statistischer Merkmale**

Ein Algorithmus zur Beurteilung der Signalqualität mittels maschinellen Lernens wird von Sadek et al. im Paper „Sensor data quality processing for vital signs with opportunistic ambient sensing“ beschrieben. Betrachtet werden BKG-Signale, die in einem Massagesessel aufgenommen werden.

#### **4.3.1 Beschriebenes Vorgehen**

#### **4.3.2 Eigene Implementierung**

- Hyperparameter selbst ermittelt, da anderer Anwendungszweck

#### **4.3.3 Ergebnisse im Vergleich**

#### **4.3.4 Evaluation**



## **5 Eigenes**

### **5.1 Eingabeform**

### **5.2 Merkmalskonstruktion**





## **6 Ergebnisse und Ausblick**

### **6.1 Ergebnisse**

### **6.2 Ausblick**



# Literatur

- Albukhari, Almothana, Frederico Lima und Ulrich Mescheder (2019). „Bed-embedded heart and respiration rates detection by longitudinal ballistocardiography and pattern recognition“. In: *Sensors (Switzerland)* 19.6.
- Sadek, Ibrahim et al. (2016). „Sensor data quality processing for vital signs with opportunistic ambient sensing“. In: *Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBS*. Bd. 2016-October. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., S. 2484–2487.
- Starr, Isaac et al. (1939). „Studies on the Estimation of Cardiac Output in Man, and of Abnormalities in Cardiac Function, From the Heart's Recoil and the Blood's Impacts; the Ballistocardiogram“. In: *American Journal of Physiology-Legacy Content* 127.1, S. 1–28.