

# Technical Report

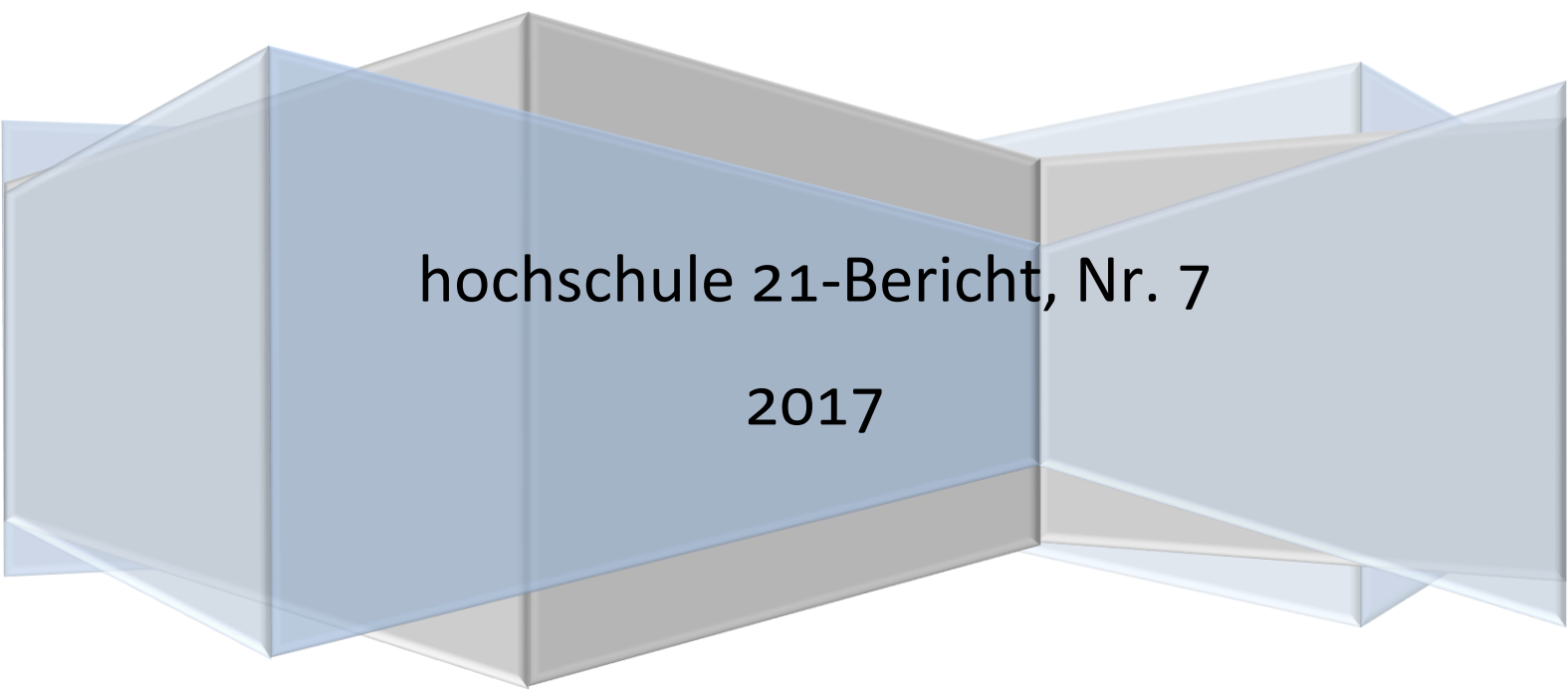
hochschule 21 : **Nr. 7**



## **Projektbericht MARWIN**

**Mobiler autonomer Roboter für Wartung und  
Inspektion**

André Dehne, Nantwin Möller und Thorsten Hermes



hochschule 21-Bericht, Nr. 7

2017

## **hochschule 21-Berichte**

Herausgeber:  
hochschule 21 gemeinnützige GmbH  
Staatlich anerkannte private Fachhochschule  
Harburger Straße 6  
21614 Buxtehude  
Telefon: +49 4161 648 0  
Fax: +49 4161 648 123  
E-Mail: [info@hs21.de](mailto:info@hs21.de)  
<http://www.hs21.de>  
ISSN 2196-5153

# Projektbericht MARWIN

**M**obiler **a**utonomer **R**oboter für **W**artung und **I**nspektion

André Dehne, Nantwin Möller und Thorsten Hermes

hochschule 21 gemeinnützige GmbH

Harburger Straße 6

21614 Hansestadt Buxtehude

*dehne|hermes@hs21.de,*

*nantwin.moeller@stud.hs21.de*



5. April 2017

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>4</b>
1.1	Motivation . . . . .	4
1.2	Anforderungen . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Stand der Technik</b>	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>Mechanischer Aufbau</b>	<b>9</b>
3.1	Antriebskonzept . . . . .	9
3.2	Scherenlift . . . . .	11
3.3	Ladestation/-vorrichtung . . . . .	12
<b>4</b>	<b>Energieversorgung</b>	<b>13</b>
4.1	IT-Hardware . . . . .	13
4.2	Redundanzkonzept . . . . .	14
<b>5</b>	<b>Sensorik</b>	<b>15</b>
5.1	Laserscanner . . . . .	15
5.2	Kamerasysteme . . . . .	15
5.3	Odometrie . . . . .	16
5.4	Interne Sensoren . . . . .	16
<b>6</b>	<b>Software</b>	<b>17</b>
6.1	Lokalisierung . . . . .	17
6.2	Antriebsregelung . . . . .	18
6.3	QR-Datenerfassung . . . . .	19
6.4	State-Machines und Aufgabenverteilung . . . . .	20
6.4.1	SM: MotorUnit . . . . .	20
6.4.2	SM: Lift . . . . .	22
6.4.3	SM: AutoDrive . . . . .	22
6.4.4	SM: Messung . . . . .	22
<b>7</b>	<b>Testfahrten im XFEL</b>	<b>23</b>

<b>8 Auslieferung und Fazit</b>	<b>24</b>
8.1 Auslieferung . . . . .	24
8.2 Fazit . . . . .	24
8.3 Ausblick . . . . .	24
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>27</b>

# 1 Einleitung

Im Rahmen einer Forschungsk Kooperation der Hochschule 21 mit dem Deutschen Elektronen-Synchrotron (DESY) der Helmholtz-Gemeinschaft wurde ein mobiles Robotersystem entwickelt, welches autonome Messaufgaben in der neuen Forschungsanlage „European XFEL“ übernimmt. Das zweijährige Projekt ist ein „proof-of-concept“ für die Aufnahme von robotergestützten Strahlungsmessungen in Beschleunigeranlagen. Es gilt u.a. zu klären, inwiefern ein solches System unter der gegebenen Strahlungsbelastung zuverlässig arbeiten kann. Die verwendete Hardware stammt größtenteils aus dem Consumer-Bereich und ist nicht weiter vor der Strahlung geschützt.

## 1.1 Motivation

Der Bedarf an automatisierten Anlagen und autonomen Robotersystemen ist stetig wachsend. Das zeigt vor allem die aktuelle Entwicklung auf dem Gebiet der (teil-)autonomen Systeme in Richtung autonomer Flugdrohnen für die Paketzustellung (s. [1]), selbstfahrende Autos (s. [2]) oder der führerlose Zug und Bus im öffentlichen Nahverkehr(s. [3]).

Des Weiteren sind Beschleuniger wie beispielsweise PETRA III oder FLASH (beide bei der DESY) in der Regel vielfach überbucht, so dass Forscher, die ihre Experimente durchführen wollen sehr viel Geduld haben müssen. Erschwerend kommt noch hinzu, dass die Beschleuniger gewartet werden müssen. Die Wartungszeit geht dann auch noch von der Experimentierzeit ab. Also ist man bestrebt, die Wartungszeit möglichst zu minimieren.

Was aber muss passieren bevor ein Wartungstrupp in einen Beschleunigertunnel kann? Nach dem Abschalten des betreffenden Beschleunigers, muss ein sog. Strahlungsteam den Tunnel quasi *freimessen*. Das bedeutet, dass die Spezialisten mit Messsonden den kompletten Tunnel an vorgegebenen Messpunkten kontrollieren. Ist keine Strahlung mehr vorhanden, dann kann die Wartung erfolgen. Es liegt quasi auf der Hand, dass dieser Prozess des Freimessens Zeit benötigt, die den Forschern für Experimente nicht zur Verfügung steht. Eine sinnvolle Lösung ist, um die Inspektionszeit zu minimieren, die Strahlungsmessungen (das Freimessen) zu automatisieren.

Die hochschule 21 hatte bereits im Jahr 2013 erstmals an einem nationalen Robotikwettbewerb – Space-Bot Cup 2013 – des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) teilgenommen (vgl. [4]). Ziel war es ein autonomes Robotersystem für planetare Erkundungsmissionen zu entwickeln und zu bauen. Auch am folgenden Space-Bot Cup 2015 konnte die hochschule 21 mit einem Team erfolgreich teilnehmen. Die dort gemachten positiven Erfahrungen bildeten die Grundlage zu der Kooperation mit dem DESY.

## 1.2 Anforderungen

Zur Steigerung der Verfügbarkeit sowie der Effizienz von Wartung, Reparaturen, Inspektionen und Fehlerdiagnosen von wissenschaftlichen beschleunigerbasierten Lichtquellen soll ein mobiles Robotersystem entwickelt werden, welches In-Situ-Inspektionen ohne Unterbrechung des Beschleunigerbetriebs ermöglicht.

Aufgrund von teils schwer zugänglichen und beengten räumlichen Gegebenheiten soll die Roboterplattform mit einem Manipulator ausgerüstet sein, der es erlaubt, Messungen und Inspektionen an den Beschleunigerkomponenten durchzuführen.

Der Roboter wird im European XFEL Tunnel eingesetzt. Auf einer etwa 3.2 km langen Strecke soll möglichst ohne menschliches Eingreifen die Strahlung gemessen werden. Eine Überwachungszentrale soll – soweit möglich – jederzeit den aktuellen Status des Robotersystems einsehen können und ggf. einen manuellen Eingriff durchführen können. Das Robotersystem wird im Rahmen des Projektes zwei Einsatzszenarien bewerkstelligen:

- Szenario 1: Durch (teil-)autonomes und automatisches Abfahren des Beschleunigers sowie der Durchführung von Strahlungsmessungen an vordefinierten Messpositionen soll der Beschleuniger routinemäßig ausgemessen werden. Die Konfiguration der Messpositionen und weiterer Parameter wird über einen Fernzugriff mit einem netzwerkfähigen PC durch entsprechendes Personal durchgeführt.
- Szenario 2: Durch manuelles Anfahren bestimmter Messpositionen kann

das Bedienpersonal ferngesteuerte und punktuelle Messungen am Beschleuniger durchführen.

Der Wechsel zwischen den Szenarien soll jederzeit über den Fernzugriff möglich sein. Die Messdaten werden vom Messgerät aufgenommen und verarbeitet. Über eine definierte Schnittstelle werden die einzelnen Messungen vom Robotersystem mit den aktuellen Positionsdaten angestoßen und beendet.



## 2 Stand der Technik

Die heutige Robotertechnik ist das Ergebnis eines langen Entwicklungsprozesses. Die ersten Entwürfe zu roboterähnlichen Maschinen gab es bereits im 15. Jahrhundert und wurden von Leonardo da Vinci erstellt. Abbildung 1 zeigt einen Nachbau dieses Entwurfes.

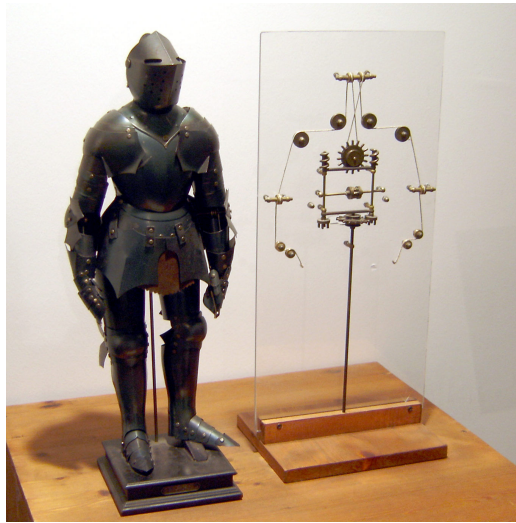


Abbildung 1: Nachbau eines roboterähnlichen Entwurfes von Leonardo da Vinci [5]

Die heutige Robotertechnik wurde besonders von der Automobilindustrie für Schweiß- und Handhabungstätigkeiten angetrieben. Man unterscheidet heute zwischen Industrierobotern und anderen Roboterklassen [6]. Eine allgemein Anerkannte Definition des VDI<sup>1</sup> für Industrieroboter lautet:

„Industrieroboter sind universell einsetzbare Bewegungsautomaten mit mehreren Achsen, deren Bewegungen hinsichtlich Bewegungsfolge und Wegen bzw. Winkeln frei programmierbar und gegebenenfalls sensorgeführt sind. Sie sind mit Greifern, Werkzeugen oder anderen Fertigungsmitteln ausrüstbar und können Handhabungs- und/oder Fertigungsaufgaben ausführen.“ [7, S. 7]

---

<sup>1</sup>Verein Deutscher Ingenieure (VDI)

Die Robotertechnik hat in den letzten Jahren immer mehr Anwendungsgebiete gefunden. Die Technik hat das Potenzial insbesondere in sogenannten 4D-Umgebungen<sup>2</sup> Kosten und Risiken erheblich zu senken. So sehen immer mehr Industrien den Mehrwert von Robotern gegenüber der händischen/manuellen Arbeit in Gebieten mit gefährlichen Umgebungsbedingungen. So wurde beim weltgrößten Partikelbeschleuniger Large Hadron Collider (LHC) in Genf ein schienenbasiertes Robotersystem installiert. Um gefährliche Wartungs- und Inspektionszeiten zu minimieren wurde TIM – Train Inspection Monorail – 2016 zum Einsatz gebracht. Wie in Abbildung 2 bewegt sich TIM schlangenartig an einem Schienensystem durch den Tunnel. TIM verfügt in mehreren Wagons über Greifarme, Sensoren und Kamerasysteme [8].



Abbildung 2: Schienenbasiertes Robotersystem TIM im Large Hadron Collider (LHC)

Ein weiteres Anwendungsfeld im Bereich der 4D-Umgebungen für mobile Roboter ist die Exploration von unwegsamem Gelände wie es beispielsweise nach einem Erdbeben entstanden ist (s. [9]). Wesentliche Erkenntnisse wurden diesbzgl. auch im Rahmen der TRADR-Projektes [10] erworben. Ebenso die Curiosity-Mission (<https://mars.nasa.gov/ms1/>) soll an dieser Stelle nicht unerwähnt bleiben.

---

<sup>2</sup>Umgebungen mit extremen Bedingungen (engl. dirty, dull, distant und dangerous)

## 3 Mechanischer Aufbau

In diesem Kapitel werden die Abschnitte Antriebskonzept, Scherenlift und Ladestation/-vorrichtung thematisiert. Es werden technische Details erläutert, Funktionsweisen prinzipiell dargestellt und mechanische Hintergründe aufgezeigt.

### 3.1 Antriebskonzept

Das Antriebskonzept basiert auf einem Mecanumantrieb (vgl. [11]). Dieser besteht aus vier Mecanumrädern. Ein Mecanumrad zeichnet sich durch die, in der Laufläche im  $45^\circ$  Winkel angebrachten, frei beweglichen, Rollen aus (vgl. Abbildung 3). Anzahl und Größe der Rollen ist dabei je nach Anwendungsfall variabel.

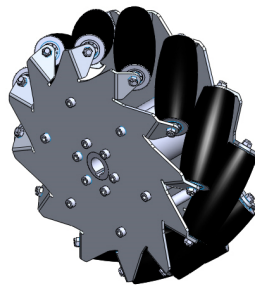


Abbildung 3: Aufbau Mechanumrad

Wichtig ist die Anordnung der Rollen in der Laufläche. Diese können nach links oder rechts ausgerichtet sein. Für diesen Antrieb werden jeweils zwei linke, sowie zwei rechte benötigt. Diese Anordnung ermöglicht ein freies Bewegen in alle horizontalen Richtungen. Diese Eigenschaft ist für den Anwendungs-

fall von Vorteil, da sich der Roboter auf engen Raum bewegt. Außerdem kann so auf Rangierbewegungen verzichtet werden, welche wegen des ausgelegten Messarms zu Kollisionen führen könnte.

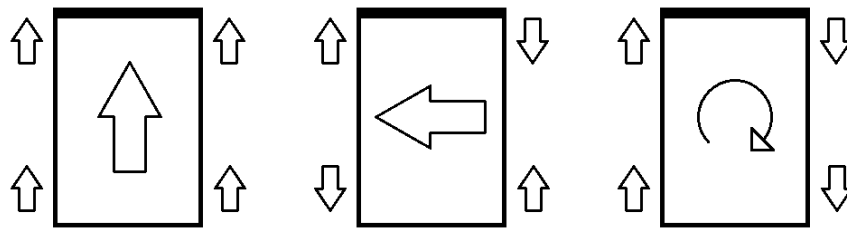


Abbildung 4: Funktionsweise des Mechanumantriebs: links – Vorwärtsfahrt, mitte – Seitwärtsfahrt, rechts – Drehung auf der Stelle

In Abbildung 4 wird die Funktionsweise des Mechanumantriebs ersichtlich. Verschiedene Szenarien, in denen die Laufrichtungen der Räder unabhängig voneinander variiert werden, ermöglichen die bereits erwähnte Bewegungsfreiheit. Diese besteht aufgrund der Ausrichtung der frei beweglichen Rollen. Je nach Drehrichtung der Räder heben sich die Bewegungskräfte gegenseitig auf und eine resultierende Schubkraft entsteht. Die Schubkraft bestimmt die Fahrtrichtung.

Die Räder werden mit Gleichstrom-Getriebemotoren von Drive-System Europe angetrieben. Durch die Untersetzung von 104:1 wird laut [12] bei angelegter Nennspannung von 12 Volt eine Nenndrehzahl von 63 U/min erreicht. Über die Geometrie der Räder ergibt sich eine Umlaufgeschwindigkeit von 50m/min.

### 3.2 Scherenlift

Um Messungen in verschiedenen Höhen vornehmen zu können, muss die Messsonde in ihrer Höhe variabel sein. Da über der Ladestation empfindliche sowie massive Elemente verbaut sind können bei Berührungen Schäden entstehen. Deswegen muss berücksichtigt werden, dass der Roboter in seiner Park-/Ladeposition eine Höhe von 1,70m nicht überschreitet.

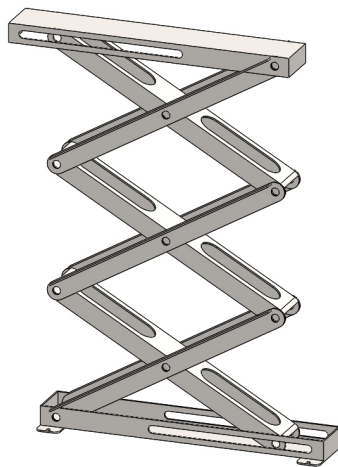


Abbildung 5: Schemenhafte Darstellung des Scherenlifts

Dieser Anforderung wurde mit durch einen sog. Scherenlift genüge getan. Der Lift erreicht im ausgefahrenen Zustand ein vielfaches seiner Bauhöhe. Erreicht wird dies durch die Verwendung von mehreren Scheren (vgl. Abbildung 6). Die Hubbewegung wird durch einen Gleichstrom-Getriebemotoren bewirkt. Dieser treibt eine Spindel an, welche über einen Schlitten die Schere zusammen zieht. Über die Geometrie zieht sich dieser Vorgang durch alle Scheren. Der Lift kann jederzeit um weitere Scherenelemente erweitert werden, um Messpunkte an höher gelegenen Stellen zu erreichen.

### 3.3 Ladestation/-vorrichtung

Da es sich um einen mobilen Roboter handelt, der Akkubetrieben ist, gibt es mehrere Ladestationen, um den Akku zu laden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Roboter autonom agiert. Das heißt, der Ladevorgang muss ebenfalls autonom ablaufen. Nicht zu vernachlässigen ist die Sicherheit. Außenliegende Bauteile der Ladestation dürfen nur Strom führen, wenn der Roboter die Ladeposition erreicht hat.

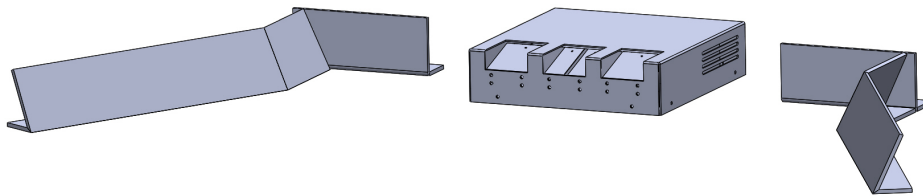


Abbildung 6: Schematische Darstellung der Ladestation mit Führungsschienen und Ladegerät.

Wie in Abbildung 6 zu sehen sind rechts und links neben der Ladestation Einfahrhilfen (Führungsschienen) angebracht. Diese zentrieren den Roboter beim Einfahren in die Station und sorgen somit für eine präzise Positionierung des Roboters. Die Ladestation ist so aufgebaut, dass die beiden innen liegenden Kontakte vom Roboter mechanisch geschlossen werden müssen. Er dann werden die beiden äußeren Kontakte freigeschaltet und die Ladespannung liegt an.

## 4 Energieversorgung

Das Robotersystem wird von einer Lithium-Eisenphosphat (LiFePo<sub>4</sub>) Batterie mit Strom versorgt. Es handelt sich um das Modell „SB12V100E-ZC“ von dem Hersteller „Super B“ mit externen Unterspannungsschutz (s. [13]). Die Batterie hat eine Nennspannung von 13,2 Volt bei einer Nennkapazität von 100 Amperestunden (1.320 Wh). Der wesentliche Vorteil dieser Batterie ist die verhältnismäßig große Kapazität bei kleiner Baugröße und geringem Eigengewicht. Zusätzlich bietet die Batterie über 90 % ihrer Kapazität ein konstantes Spannungsniveau, wodurch eine verlustbehaftete Spannungsregulierung durch nachgeschaltete DC/DC-Wandler minimiert wird (vgl. Abb. 7).

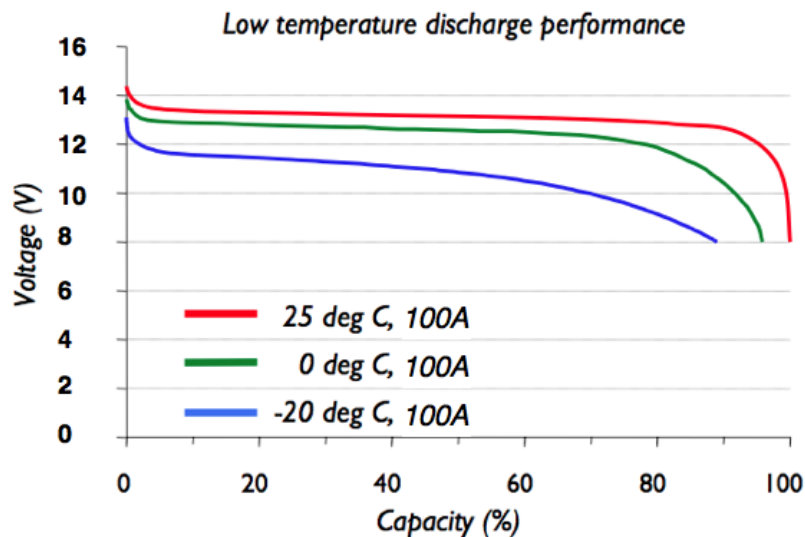


Abbildung 7: Entladung der Batterie bei unterschiedlichen Temperaturniveaus. Quelle: [13]

Die Batterie versorgt die gesamte IT-Hardware über eine Dauer von etwa vier bis fünf Stunden mit Energie. Gemessen wurde im Betrieb eine Stromaufnahme von 15 bis 18 Ampere.

### 4.1 IT-Hardware

Die verbauten IT-Komponenten teilen sich wie folgt auf:

- Zwei Hauptrechner,
- zwei Einplatinenrechner vom Typ „Odroid XU4“ mit eMMC-Flashspeicher,
- ein Router,
- ein Netzwerk-Switch,
- zwei Steuerungseinheiten und
- diverser Sensorik (siehe Kapitel 5).

Die Hauptrechner übernehmen die eigentliche Steuerung des Gesamtsystems, während die Einplatinenrechner als Schnittstellen zu der verbauten Aktorik und Sensorik dienen. Die Komponenten der Hauptrechner wurden selbst ausgewählt und konfiguriert.

## 4.2 Redundanzkonzept

Der Aufbau eines redundanten Systems ist in diesem Anwendungsfall wichtig. Der Roboter agiert in einem Beschleuniger, in dem es dazu kommen kann, dass ein Bit durch freie Elektronen „umkippt“. Dadurch können Softwarefehler entstehen. Da es sich bei den Messungen um sensible Daten handelt, sind Verluste hier zu vermeiden. Auch behindern Systemabstürze die Arbeit des Roboters. Aus diesem Grund sind relevante Hardwarekomponenten in doppelter Ausführung verbaut, so dass ein sog. SPOF (*single point of failure*) nicht entstehen kann. Es gibt zwei Hauptcomputer die als Master/Slave-Kombination installiert sind. Sollte es im Master zu einem Absturz kommen wird er vom Slave neu gestartet. Die Messdaten werden momentan direkt übermittelt. Somit werden sie nicht zwischen gespeichert und es können keine Fehler auftreten. Für den Fall, dass die Übertragung unterbrochen wird könnten die Daten an drei physikalisch verschiedenen Speichern abgelegt werden. Durch die Parallelisierung der Daten würde das Risiko der Datenverfälschung gegen 0 gehen. Diese Funktion besteht bisher lediglich als Konzept. An anderen Stellen liegt ebenfalls noch Potenzial in der Redundanz. Die Steuereinheit, welche alle Systeme freischaltet, muss momentan manuell eingeschaltet werden.



## 5 Sensorik

Zur Erfüllung der in Abschnitt 1.2 beschriebenen Anforderungen ist das Robotersystem mit unterschiedlicher Sensorik ausgestattet. Es existieren eine Vielzahl an optischen Sensoren sowie Sensoren für die Odometrie. Das wird im Folgenden grob skizziert.

### 5.1 Laserscanner

An Vorder- und Rückseite des Roboters ist je ein 2D-Laserscanner vom Typ „UST-10LX“ der Firma Hokuyo installiert. Dieser nimmt einen einzeiligen Scan seiner Umgebung, in einer Reichweite von 10 Metern, auf.

Diese Sensoren haben drei wesentliche Funktionen:

- Sensordaten zur relativen Lokalisierung im Tunnel (siehe Abschnitt 6.1).
- Erkennung der Ausrichtung des Roboters zur Längsrichtung des Tunnels (siehe Abschnitt 6.2).
- Kollisionsvermeidung.

Bei der Kollisionsvermeidung im Speziellen nehmen die Laserscanner sämtliche Objekte in zwei Entfernungsbereichen auf. Befindet sich ein Objekt im Bereich zwischen ein bis zwei Metern wird eine Warnung weitergegeben. Ein Objekt welches sich innerhalb eines Meters Entfernung befindet, löst einen Fehler aus und stoppt den Roboter, so dass kein Schaden entstehen kann.

### 5.2 Kamerasysteme

Das System verfügt über Kamerasysteme zur Fernüberwachung durch das Bedienpersonal. Neben fünf fest installierten Kameras ist auch eine schwenk- und neigbare Kamera mit Nachtsichtfunktion installiert, womit einzelne Bereiche des Tunnels genauer betrachtet werden können.

Neben den Kamerasystemen zur Fernüberwachung und -inspizierung dient eine CCD-Kamera zur Erkennung von fest installierten Landmarken im XFEL-Tunnel in Form von QR-Codes. Die QR-Codes enthalten Informationen zum

aktuellen Standort und dienen damit der absoluten Lokalisierung des Robotersystems (siehe Abschnitte 6.1 und 6.3).

### 5.3 Odometrie

Odometriesensoren sind an jedem Aktor beziehungsweise Motor in Form von Hall-Effekt-Sensoren angebracht. Mit ihnen werden die Verfahrswege der Motoren inkrementell aufgenommen und können so für Ist-Größen unterschiedlicher Regelungen verwendet werden. Das betrifft die Regelung der Räder, der Geschwindigkeit, des Roboters sowie der Höhe des Scherenlifts.

### 5.4 Interne Sensoren

Es sind weitere interne Sensoren verbaut, die beispielsweise der Überwachung der Leistungselektronik dienen. Diese Informationen werden auch direkt an den Operateur übermittelt. Hier spielt die Software eine wesentliche Rolle, die im folgenden Kapitel beschrieben wird.

## 6 Software

Allen Rechnern (Master, Slave sowie eingesetzten Mikrocontrollern) liegt ein Linux-Betriebssystem zugrunde. Auf ihnen aufgesetzt ist das „Robot Operating System (ROS)“. ROS ist ein Software-Framework für persönliche Roboter<sup>3</sup>. Die Hauptbestandteile des Software-Frameworks von ROS sind Hardwareabstraktion, Nachrichtenaustausch, Paketverwaltung und Programmbibliotheken. Das System ist dabei aufgeteilt in das eigentliche Basissystem ROS und einer Auswahl an Zusatzpaketen, die das Basissystem um einzelne Fähigkeiten erweitern. ROS wird unter der BSD-Lizenz veröffentlicht und ist somit „open-source“.

### 6.1 Lokalisierung

Das Lokalisierungskonzept besteht aus zwei Teilen. Einer absoluten Positionsreferenzierung durch die Erkennung von Landmarken in Form von QR-Codes und einer relativen Lokalisierung durch die Auswertung der Daten der Laserscanner. Die Software für die Lokalisierung teilt sich dadurch auch in zwei Komponenten auf, die Erkennung von Landmarken (siehe Abschnitt 6.3) und einen SLAM-Algorithmus<sup>4</sup>.

Für den SLAM-Algorithmus wird das ROS-Softwarepaket „gmapping“ (s. [15]) genutzt. Diese Software erstellt aus den vorhandenen Laserdaten eine zweidimensionale „occupancy grid map“, also eine Art Flurplan. Dazu werden die einzelnen Scans regelmäßig miteinander verglichen und zu dieser Karte hinzugefügt. Wenn ein Scan zum vorherigen abweicht – zum Beispiel durch Bewegung des Roboters – rechnet Gmapping den Versatz der letzten Scans aus und zieht daraus Rückschlüsse auf die zurückgelegte Wegstrecke und der aktuellen Position.

---

<sup>3</sup>Ein Personal Robot (engl. für „persönlicher Roboter“) „ist ein mechatronisches System mit einem oder mehreren Mikrocomputern. Im Gegensatz zu einem Industrieroboter kann der Personal Robot in seiner Umwelt agieren, mit ihr und/oder mit Personen und anderen Personal Robots kommunizieren und interagieren.“ [14]

<sup>4</sup>Simultaneous Localization and Mapping (SLAM)

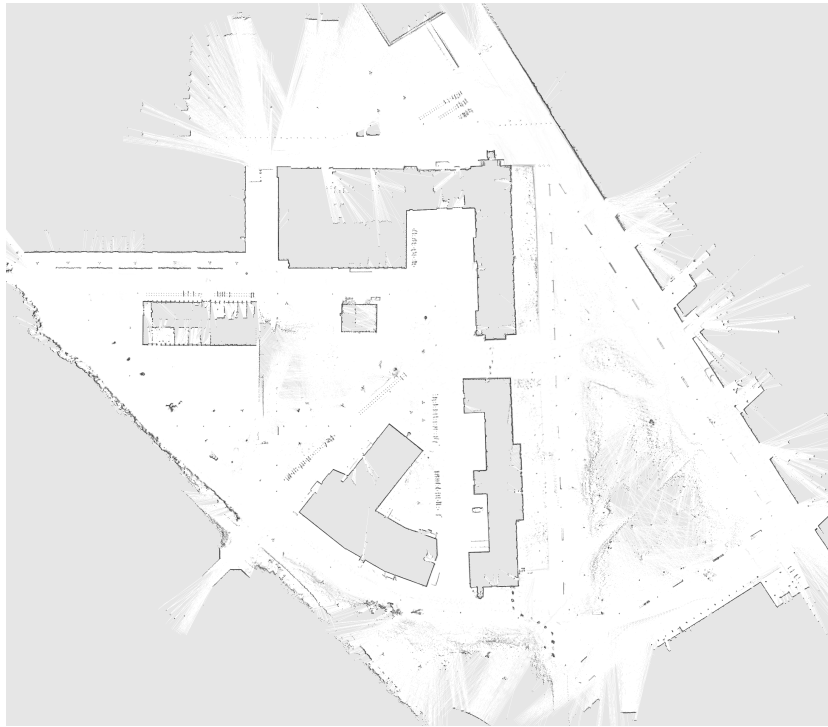


Abbildung 8: Beispielparte erzeugt mit Gmapping

Das Ergebnis von gmapping ist eine Karte der Umwelt des Robotersystems, in welcher sich MARWIN zwischen den QR-Code-Landmarken referenzieren kann (siehe Abbildung 8).

## 6.2 Antriebsregelung

Die Mecanumräder werden über eine selbst entwickelte Motorsteuerung geregelt. Die Hauptrechner können mit der Steuerung über Ethernet kommunizieren und Geschwindigkeitsvorgaben für die einzelnen Räder übermitteln. Die Erfassung der Ist-Werte für die Radgeschwindigkeiten und Regelung derselben ist damit von den Hauptrechnern getrennt. Die Motorsteuerung besteht aus folgenden Bauteilen:

- Arduino Mega + Ethernet Shield
- Teensy 3.2

- 3 Motortreiber vom Typ VNH3SP30

Alle GPIO's<sup>5</sup> des Teensy sind Interrupt-fähig und eignen sich daher für die Erfassung der Flankenimpulse der Motorencoder. Der Teensy bestimmt die Ist-Drehzahl der einzelnen Räder und übermittelt diese an den Arduino. Der Arduino hat einen PID-Regler implementiert und ermittelt aus den Soll- und Ist-Werten die entsprechenden Stellwerte für die einzelnen Motortreiber. Der Regler basiert auf folgendem Pseudocode:

```
while(1) {  
    error = desired_value - actual_value  
    integral = integral + (error*iteration_time)  
    derivative = (error - error_prior)/iteration_time  
    output = KP*error + KI*integral + KD*derivative + bias  
    error_prior = error  
    sleep(iteration_time)  
}
```

Die `iteration_time` beträgt 5 Millisekunden, die Abtastrate liegt somit bei 200 Hz und ist damit ausreichend schnell. Für die Reglerparameter haben sich folgende Werte bewährt:

- $K_p = 0.07$
- $K_i = 0.0001$
- $K_d = 0.00001$

Die Ist- und Soll-Werte werden in Encoder-Ticks pro Sekunde berechnet.

### 6.3 QR-Datenerfassung

Seitlich des Roboters befindet sich eine CCD-Kamera zur Erkennung von Landmarken in Form von QR-Codes. Die darin codierten Daten geben dem Robotersystem Informationen zu seiner absoluten Position im Tunnel.

---

<sup>5</sup>General Purpose Input Output (GPIO)

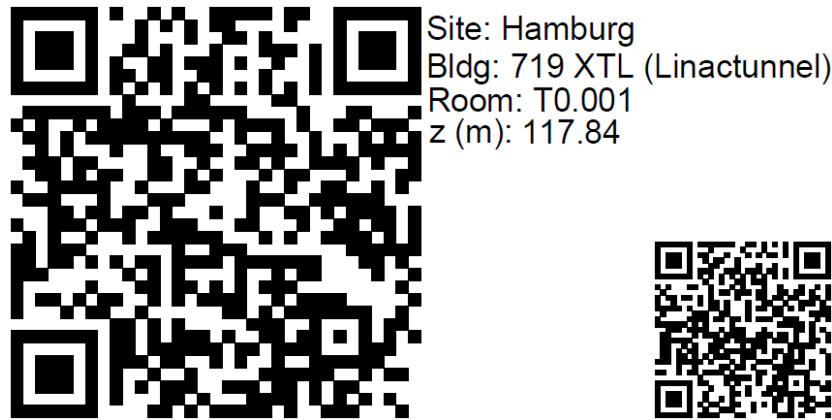


Abbildung 9: Beispiel eines im XFEL-Tunnel angebrachten QR-Codes

Abbildung 9 zeigt ein Beispiel eines Wandlabels. Die Positionsinformation ist in dem linken QR-Code kodiert, die Kantenlänge beträgt 5 cm und der mittlere Abstand zwischen QR-Code und CCD-Kamera 120 cm. Die Bilddaten der QR-Kamera werden eingelesen und in ein ROS-Format konvertiert. Anschließend wird das Bild von dem ROS-Package „zbar\_ros“ dekodiert. Das Ergebnis ist ein String, welcher die Tunnelposition enthält.

## 6.4 State-Machines und Aufgabenverteilung

Das Robotersystem wird von vier getrennten State-Machines gesteuert, wobei jede State-Machine ihre eigene spezielle Aufgabe hat.

### 6.4.1 SM: MotorUnit

Diese State-Machine steuert die drei Signallampen rot, gelb und grün, hält die Verbindung zu der Motorsteuerung aufrecht und übermittelt die Soll-Werte für die Geschwindigkeiten der einzelnen Räder. Ebenso werden die Abstände zu Hindernissen überwacht: Sollte ein Hindernis zu dicht kommen, werden Stop-Befehle an die Motorsteuerung gesendet. Der Aufbau der State-Machine MotorUnit ist in der folgenden Abbildung dargestellt:

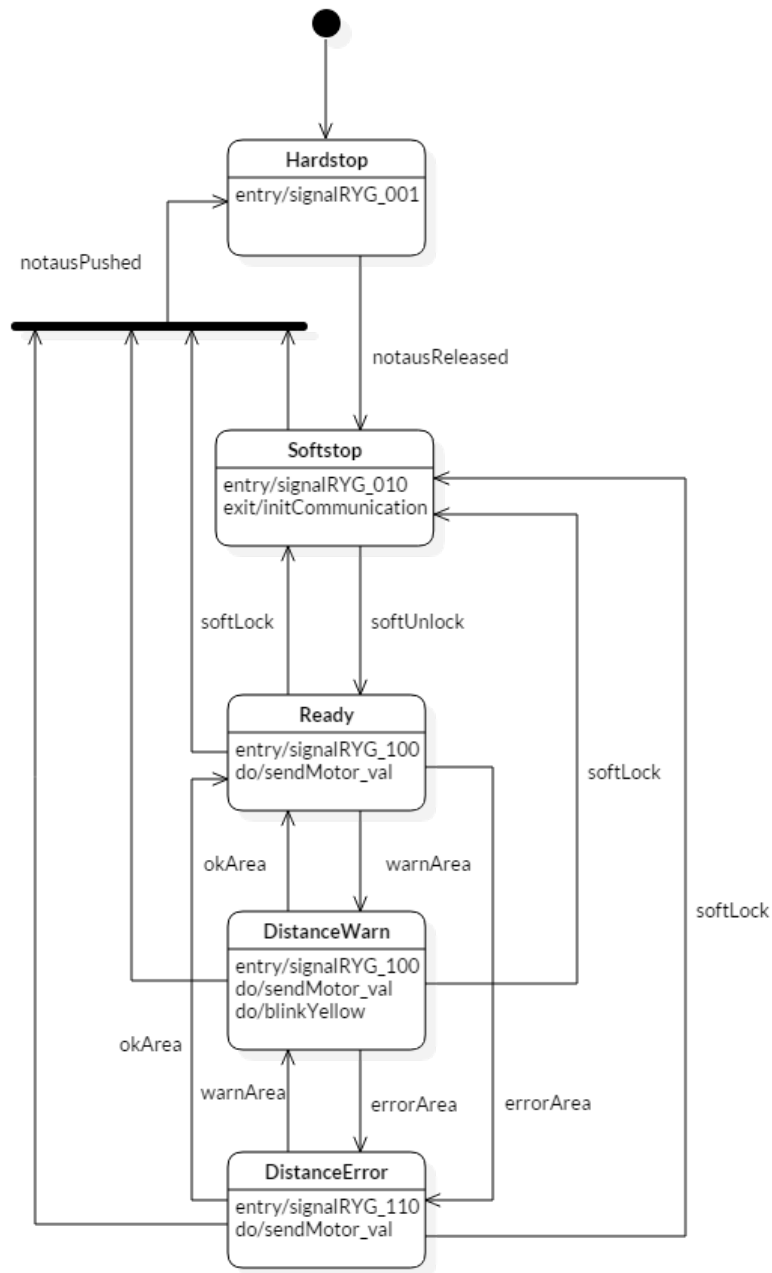


Abbildung 10: Aufbau der State-Machine MotorUnit

#### **6.4.2 SM: Lift**

Diese State-Machine sorgt für einen kalibrierten Scherenlift, nimmt Soll-Wertvorgaben an und gibt diese an die Motorsteuerung weiter. Zur Kalibrierung fährt die State-Machine den Scherenlift dauerhaft nach unten, sobald die Ist-Werte sich nicht mehr verändern ist der Scherenlift in seiner unteren Anschlagposition angekommen. Die Ist-Höhe wird auf diesen Wert initialisiert.

#### **6.4.3 SM: AutoDrive**

AutoDrive regelt die Positionierungsaufgaben des Roboters im Tunnel. Dazu werden die Soll-Anfahrposition mit der aktuellen Position verglichen und entsprechend geregelt. Zusätzlich achtet das System auf die Ausrichtung des Roboters und wirkt einem Verdrehen des Roboters bei dem Anfahren von Positionen entgegen. Damit diese Aufgaben zuverlässig übernommen werden können, überwacht AutoDrive ebenso die Lokalisierungsprogramme (gmapping und QR-Code-Erkennung) und die Daten der Laserscanner. Wenn es in diesen Programmen zu Fehlverhalten oder Abstürzen kommt, werden diese neu gestartet.

#### **6.4.4 SM: Messung**

Die State-Machine Messung betreut alle Aufgaben, die mit der eigentlichen Aufgabe des Roboters – das autonome Aufnehmen von Messdaten – einhergehen. Das Bedienpersonal kann Messtabellen laden und an diese State-Machine übergeben. Die Daten werden eingelesen und sequenziell abgearbeitet. Die State-Machine Messung ist auf der höchsten Hierarchiestufe des autonomen Robotersystems und gibt Fahr- und Aktionsbefehle an die darunterliegenden State-Machines.



## 7 Testfahrten im XFEL

Während der Entwicklung des Robotersystems und vor der Auslieferung wurden mehrere Testfahrten durchgeführt und Daten gesammelt. Die Sensorik konnte geprüft und kalibriert werden. Neben der Aufnahme von Daten aus dem realen Fahrbetrieb wurden ebenso die Parameter zu geeigneten Abständen zwischen Roboter und Messobjekt ermittelt.



Abbildung 11: Nicht korrekt eingestellte Laserdaten führen zu Krümmung des geraden Tunnels

Wie in Abbildung 11 zu sehen, konnte bei ersten Testläufen festgestellt werden, dass bei längerer Fahrt die erzeugte Karte einen kurvigen Tunnelverlauf zeigte. Die zurückgelegte Distanz in der Abbildung liegt bei etwa 250 Metern. In vorgeschalteten Tests im Labor der hochschule 21 konnte diese Problematik aufgrund der kurzen Fahrwege nicht festgestellt werden. Durch das Zusammenfügen der einzelnen Laserscans beider Laserscanner trat diese Problematik zu Tage.

In der Theorie sind beide Scanner genau um 180 Grad versetzt, in der praktischen Umsetzung sind die Scanner jedoch nicht exakt versetzt. Der Fehler konnte behoben werden, indem aus der Grafik den realen Versatz ermittelt wurde. Dieser Korrekturfaktor wurden dann anschließend in der Software übernommen.

## 8 Auslieferung und Fazit

### 8.1 Auslieferung

Seit Auslieferung des Roboters wird das System ständig weiterentwickelt und verbessert. Erste Erkenntnisse zeigen, dass die Anwendung eines autonomen Roboters für Messaufgaben generell möglich ist.

Die Ursachen der aufgetretenen Ausfälle des Robotersystems liegen in der elektrischen Versorgung der Fahrmotoren und der noch nicht einwandfrei funktionierenden autonomen Ladung des Akkus des Roboters.

### 8.2 Fazit

Die ersten Messversuche bei Strahlungsbetrieb des Tunnels stehen noch aus. Es ist jedoch davon auszugehen, dass auch diese Testfahrten bei höherer Strahlungsbelastung erfolgreich durchgeführt werden können. Das Projekt konnte erfolgreich umgesetzt werden und fand ebenso in weiteren Abteilungsbereichen bei DESY großen Anklang. So gaben erste Gespräche Anreize für weitere Ausbaustufen des Robotersystems, um mehr Funktionalitäten abbilden zu können. So könnte beispielsweise der Scherenlift durch einen oder zwei 6-Achsen-Roboterarme mit entsprechenden Werkzeugen erweitert werden, um weitere Wartungs- oder auch Brandbekämpfungsmaßnahmen durchführen zu können.

### 8.3 Ausblick

Eine Projektverlängerung konnte erreicht werden, um ein weiteres identisches Robotersystem zu entwickeln und im weiteren Verlauf des Tunnels zum Einsatz zu bringen. Der XFEL-Tunnel wird im hinteren Bereich durch eine Sicherheitstür geteilt und bedarf daher eines zweiten Roboters. Zusätzlich werden kleinere Anpassungen bezogen auf die Beweglichkeit der Messsonde erfolgen, da im hinteren Tunnelbereich komplexere Geometrien des Messobjektes vorliegen.

Längerfristig wird versucht, eine größere Kooperation mit weiteren Projekt-

partnern anzustoßen und das Projekt damit weiter voranzutreiben und eine weitere Ausbaustufe zu erreichen.

## Literatur

- [1] WILKENS, ANDREAS: *Erste Linienverkehr-Paketdrohne in Südfrankreich unterwegs*. <https://heise.de/-3572113>, 2016. Letzter Zugriff am 15. Februar 2017.
- [2] HONSEL, GREGOR: *Autonome Fahrzeuge: Führerlose Züge im Fernverkehr*. <https://heise.de/-3579391>, 2016. Letzter Zugriff am 15. Februar 2017.
- [3] ASENDORPF, DIRK: *Stur in der Spur*. <http://www.zeit.de/2017/03/selbstfahrende-autos-aus-deutschland-lkw-forschung>, 2017. Letzter Zugriff am 15. Februar 2017.
- [4] HERMES, THORSTEN und THORSTEN UELZEN: *Space-bot 21: Projektüberblick über das space-bot 21-Projekt an der hochschule 21 im Kontext des DLR SpaceBot Cup 2013*. KI - Künstliche Intelligenz, 28(2):117–122, 2014.
- [5] *Leonardo's Robot*. [https://en.wikipedia.org/wiki/Leonardo's\\_robot](https://en.wikipedia.org/wiki/Leonardo's_robot).
- [6] LANGMANN, R.: *Taschenbuch der Automatisierung*. Hanser, 2010.
- [7] NABER, HELMUT: *Aufbau und Einsatz eines mobilen Roboters mit unabhängiger Lokomotions- und Manipulationskomponente*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Deutschland, 36. Auflage, 1991. ISBN 978-3-540-54216-2.
- [8] PRALAVORIO, CORINNE: *Meet TIM, the LHC tunnel's robot*. <https://home.cern/about/updates/2016/11/meet-tim-lhc-tunnels-robot>, 2016. Letzter Zugriff am 4. April 2017.
- [9] KRUIJFF-KORBAYOV, I., L. FREDI, M. GIANNI, V. NTOUSKOS, V. HLAVAC, V. KUBELKA, E. ZIMMERMANN, E. ZIMMERMANN, H. SURMANN, DULIC, ROTTNER und E. GISSI: *Ground and Aerial Robots in Earthquake-Response in Amatrice, Italy: a Field Report*. In:

- 
- Proceedings of the 2016 IEEE International Symposium on Safety, Security and Rescue Robotics (SSSR)*, Lausanne, Switzerland, October 2016.
- [10] *Projec Pages of the TRADR-Projekt*. <http://www.tradr-project.eu>.
- [11] ERLAND, BENGT ILON: *Wheels for a course stable selfpropelling vehicle movable in any desired direction on the ground or some other base*, 1975.
- [12] LTD., DRIVE-SYSTEM EUROPE: *Planetengetriebemoter DSMP420*. Datenblatt, 2015.
- [13] B, SUPER: *SB12V100E-ZC*. Datenblatt: <http://www.super-b.com/en/aviation/utility-avionics-batteries/sb12v100e-zc>, 2017.
- [14] WIKIPEDIA: *Personal Robot*. [https://de.wikipedia.org/wiki/Personal\\_Robot](https://de.wikipedia.org/wiki/Personal_Robot), 2016.
- [15] GERKEY, BRIAN: *gmapping*. <http://wiki.ros.org/gmapping>, 2015. Letzter Zugriff am 16. Februar 2017.