

Bachelorarbeiten 2022

# Bachelor of Science in Elektrotechnik



Preisstifter für den Studiengang  
Elektrotechnik

Sensirion AG, Stäfa, ZH

Siemens Schweiz AG, Zürich

Swiss Engineering STV, Zürich



# Vorwort



**Prof. Reto Boderer**  
Fachabteilungsleiter Elektrotechnik

## Geschätzte Leserinnen und Leser

Erstmals nach der Covid-Pandemie durften die Studierenden ihre Bachelorarbeiten wieder uneingeschränkt in unseren Labors bearbeiten. Die vor allem von Angehörigen und Industrievertreterinnen und -vertretern sehr gut besuchte Ausstellung der Bachelorarbeiten im Juni 2022 zeigte, dass auch die direkte Interaktion mit den Diplomierten ein starkes Bedürfnis ist. Der Besuch der Ausstellung lohnte sich auch deshalb, weil es ausserordentlich interessante und anspruchsvolle Projekte zu entdecken gab.

Der Studiengang Elektrotechnik fordert, dass die Diplomandinnen und Diplomanden ihre Arbeitsergebnisse in Form von funktionierenden Funktionsmustern zeigen müssen. Dieser Ansatz bewährt sich weiterhin. Die Rückmeldungen aus der Industrie bestätigen, dass unsere Absolventen sehr gefragte Fachleute sind. Die Firmen wären froh, wenn wir noch mehr bestens ausgebildete Ingenieurinnen und Ingenieure auf den Arbeitsmarkt bringen könnten.

Ich durfte den Studiengang Elektrotechnik während 8 Jahren leiten. Dabei wurde ich tatkräftig von meinen Kolleginnen und Kollegen unterstützt, wofür ich mich herzlich bedanke. Künftig konzentriere ich mich wieder auf mein Fachgebiet Embedded Software Engineering und auf die Leitung der Fachabteilung Elektrotechnik, die ich im Jahr 2020

übernommen habe. Ich bin sehr froh, dass die Studiengangleitung ab 1. September 2022 nahtlos von meinem bestens ausgewiesenen Kollegen Prof. Dr. Markus Kottmann ausgeübt wird. Ich bin überzeugt, dass er den Studiengang erfolgreich weiterführen wird.

Ich gratuliere den frisch gebackenen Ingenieurinnen und Ingenieuren herzlich zu ihrem erfolgreichen Abschluss und wünsche ihnen im Namen der gesamten Fachabteilung Elektrotechnik für ihre berufliche und private Zukunft alles Gute und viel Erfolg.

Rapperswil, im September 2022

**Prof. Reto Boderer**  
Fachabteilungsleiter Elektrotechnik

# Überblick

## Referentinnen und Referenten

- 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 20 Hannes Badertscher
- 15 | 16 | 17 Prof. Dr. Andreas Breitenmoser
- 19 Dr. Turhan Demiray
- 23 | 24 Prof. Michael Hubatka
- 14 Lars Kamm
- 25 Prof. Dr. Markus Kottmann
- 28 | 29 Prof. Dr. Hans-Dieter Lang
- 26 | 27 Prof. Dr. Heinz Mathis
- 13 Prof. Dr. Michael Schueller
- 21 | 22 Prof. Dr. Paul Zbinden
- 18 Alfred Züger

# Überblick

## Korreferentinnen und Korreferenten

14 Claudio Foscan

19 Prof. Dr. Martin Geidl

13 Prof. Dr. Petr Korba

25 Dr. Markus A. Müller

21 | 22 Robert Reutemann

23 | 24 Dr. Antje Rey

18 Michael Roth

26 | 27 | 28 | 29 Mischa Sabathy

15 | 16 | 17 Theo Scheidegger

8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 20 Gabriel Sidler

# Überblick

## Themen

- Artificial Intelligence**
- 8 Automatic forecast of water demand and availability based on meteo data
- 9 Evaluation of customer reviews using Natural Language Processing
- 10 Implementation von Deep Learning Algorithmen auf einem Mikrocontroller
- 11 Training von Deep Learning Algorithmen für die Anwendung auf einem Mikrocontroller
- Digital Signal Processing**
- 12 Audio-Beamformer
- Elektrische Maschinen**
- 13 Wasserstoffantrieb für Rolling-Stock-Anwendung
- Embedded Systems**
- 14 Eurobot 2022 «AGE of BOTS»
- 15 Evaluation von Finite State Machine-Frameworks für Embedded Systems
- 16 Parachute Reefing System for Sounding Rockets
- 17 Portierung und Validierung von Simulink-Modellen für Audio-Echtzeitanwendungen
- Energiesysteme**
- 18 Kraftwerk Wägital: Studie zur Erneuerung der Konzession
- 19 Optimierung der Spitzenbelastung in Niederspannungsnetzen
- Image Processing and Computer Vision**
- 20 Volume and Weight Estimation using Monocular Vision in a Constrained Geometry
- Mikroelektronik**
- 21 Hardware-Beschleuniger zur Berechnung der FALCON Signatur
- 22 Image Rectification
- Regelungstechnik / Control Theory**
- 23 Automatische Codegenerierung für eine Drohne
- 24 Evaluation von Inertial Measurement Units
- 25 Modellierung und Regelung einer Drohne mit Mantelpropellerantrieb
- Wireless Communications**
- 26 Collaborative Indoor Localization System based on Angle of Arrival and RSSI
- 27 Multi-Channel RF Signal Testbed
- 28 Multiport Extension for Measuring N-Port Networks using a Two-Port VNA
- 29 NTAG5-Based Wireless Sensors for Body-Worn Biomedical Applications

# Überblick

## Bachelors, Diplomandinnen und Diplomanden

17	Baumann Marius	9	Rothlin Tobias
12	Baumgartner Florian	24	Savi Fabio
27	Bürgin Raphael	15	Schmidhauser Oliver
15	Carlucci Ramon Giuseppe	12	Schwaller Thierry
29	Dubacher Fabian	26	Schärer Pascal
10	Dünki Fabian	21	Senn Andreas
8	Eckert Colin	23	Stadler Juri
26	Frey Philippe	17	Steiner Michael
22	Goitom Hermon	9	Triulzi Giovanni
14	Guntli Michael	20	Tönz Tim
18	Haddouche Réda	13	Weber Remo
13	Halter Sara Cinzia	21	Wendler Jan
8	Hauser Silas	11	Wunderlin Dominic
25	Honegger Daniel		
25	Jansky Patrick		
16	Jost Luca		
29	Keller Alain		
28	Kellermann Andreas Roman		
14	Kuhn Thomas		
19	Marbach Jan		
27	Marrer Alain		
22	Memeti Gafur		
18	Mozzini Vellen Andrea		
23	Nagel Livio		
20	Pross Naoki Sean		
24	Rohner Céline		

# Automatic forecast of water demand and availability based on meteo data

## Prediction of water shortage in Switzerland

### Graduate Candidates



Colin Eckert



Silas Hauser

**Introduction:** Climate change is one of today's most polarizing topics. The consequence of this phenomenon concerns people all over planet Earth. Water demand, caused by extreme weather conditions, is becoming an increasing problem. Even in Switzerland, which is usually well known for its balanced weather conditions, the consequences are more and more noticeable. Rittmeyer AG, the industry partner of this bachelor thesis, is one of the leading companies in the field of control engineering for water supplies in cities. The final goal for this thesis was to predict water demand and availability in Switzerland's cities to early recognize if there is a risk of shortage of water supply within sight.

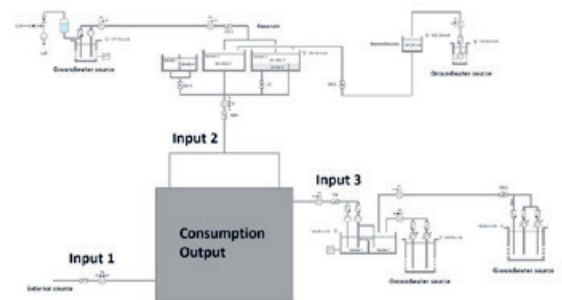
**Approach:** For this thesis, multiple situations of water supply and their corresponding data were evaluated. While water related parameters were directly provided by Rittmeyer AG, additional weather data were sourced by the federal office for meteorology and climatology. After prescinding the water supply systems, water availability and consumption were the most important parameters to forecast a water shortage. After evaluating multiple meteo and water parameters in the past two years, their behavior was clearly non-linear. Hence polynomial regression models with quadratic and cubic algorithms were implemented and used in a final prediction model.

**Result:** As a result of this thesis, multiple functionalities were implemented which can be used within a GUI. It is possible to plot historical parameter data and evaluate their correlations. With the help of forward selection, the parameters temperature, rain, and sun were defined as most valued predictors. Mul-

multiple quadratic and cubic models were implemented, trained and tested. With the final model, it is possible to predict the water availability with an accuracy of approximately 10% and the water demand with 5%. With the help of current weather forecasts, provided by an API, it is possible to predict a trend for the next seven days.

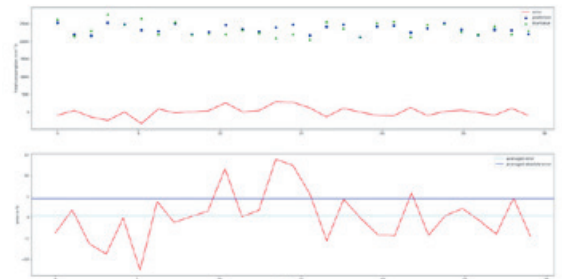
### Hydraulic situation of a water supply.

Rittmeyer AG



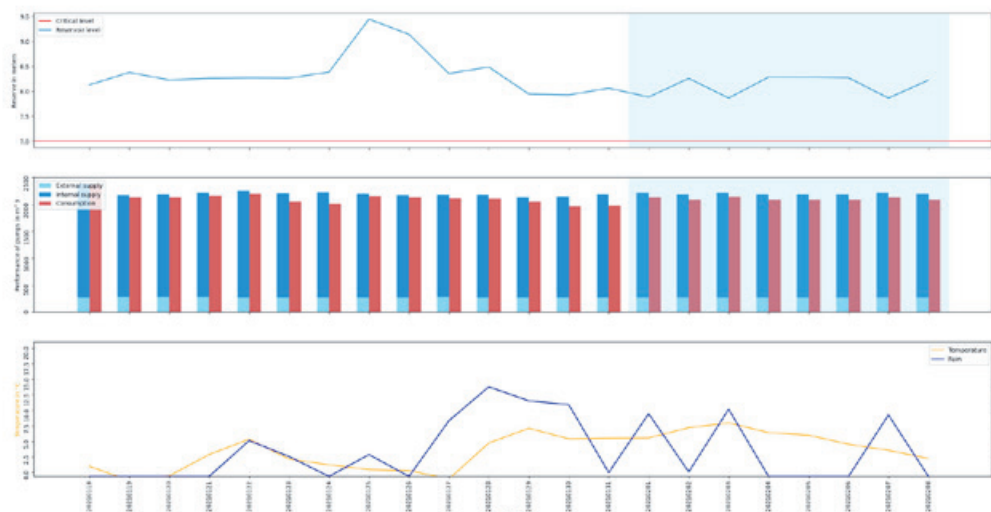
### Prediction of consumption in May 2020 with an accuracy of approximately 5%.

Own presentment



### General overview of a station. The light blue colored period represents the predictions.

Own presentment



### Advisor

Hannes Badertscher

### Co-Examiner

Gabriel Sidler, Teamup Solutions AG, Zürich, ZH

### Subject Area

Artificial Intelligence

### Project Partner

Rittmeyer AG, Baar, ZG



# Evaluation of customer reviews using Natural Language Processing

## Graduate Candidates



Tobias Rothlin



Giovanni Triulzi

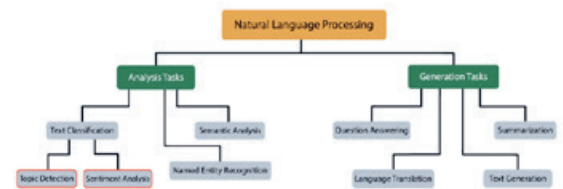
**Definition of Task:** The World Wide Web provides a tremendous amount of text data, which contains a lot of information. Especially hotel reviews contain extensive information about customer satisfaction with the hotel and its services. For a hotel employee, it is unattainable to analyze and evaluate this vast amount of data in a reasonable amount of time. In this bachelor thesis, a system will be developed which analyzes hotel reviews in both English and German. It classifies each sentence by its sentiment and category using Natural Language Processing. Statistical metrics are then collected and visualized in a dashboard. The dashboard design will be based on a dashboard concept developed by the team in St.Gallen. This team of business IT specialists will create a dashboard mock-up and define the relevant topics to classify. The team will conduct a study with two hotels and the WTT to analyze the system's requirements.

**Approach:** After researching the topic in more detail, different approaches were considered. The first step was to find a suitable hotel review dataset to train the machine learning models. After transforming the dataset and labelling, statistical machine learning models, e.g. random forest and support vector machines, were trained and evaluated. After achieving good results with statistical machine learning, the state of the art approach, based on a BERT model, was implemented and tested. BERT transforms the information in a sentence into a vector. Together with a classification head, the BERT model was then trained on the hotel review dataset.

**Result:** This thesis shows that it is possible to automatically extract information from text data using Natural Language Processing. In addition to developing the machine learning models to classify German and English reviews, an end-to-end system was designed to receive a review, split it into sentences, classify the sentences and save the results in a database. From this database, a dashboard loads the data and visualizes the results.

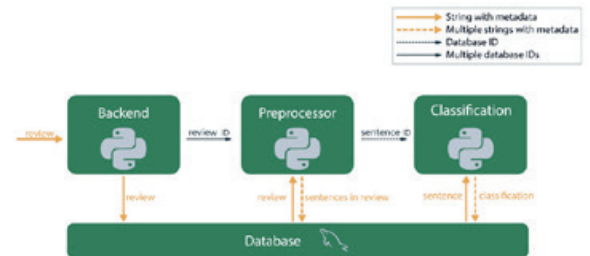
## NLP Tree

Own presentation



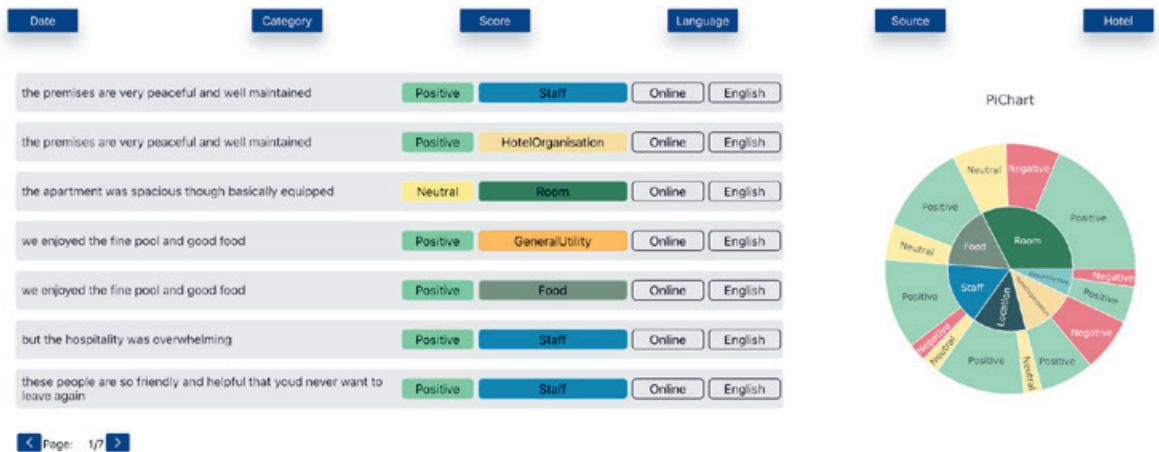
## Classification Pipeline

Own presentation



## Dashboard

Own presentation



## Advisor

Hannes Badertscher

## Co-Examiner

Gabriel Sidler, Teamup Solutions AG, Zürich, ZH

## Subject Area

Artificial Intelligence

## Project Partner

Wissenstransferstelle Wirtschaft (WTT) der OST, St. Gallen, SG

# Implementation von Deep Learning Algorithmen auf einem Mikrocontroller

## Diplomand



Fabian Dünki

**Ausgangslage:** Viele gängige neuronale Netzwerke werden heute meist auf kostspieliger Hardware, zum Beispiel mit dedizierten Servern in der Cloud oder auf speziellen Systemen wie Nvidia Jetson Boards, umgesetzt. Die Entwicklung von leistungsfähigeren Mikrocontrollern eröffnen hier neue Möglichkeiten. Ziel dieser Bachelorarbeit ist es, verschiedene Tools zur Implementation eines neuronalen Netzwerkes zu evaluieren. Dabei soll das neuronale Netzwerk Audiobefehle in Echtzeit erkennen und klassifizieren können. Dazu soll ein Versuchsaufbau mit einem Mikrofon und einem Display aufgebaut werden. Schlussendlich soll eine Variante zur Implementation gewählt und auf einem STM32-Mikrocontroller umgesetzt werden.

**Vorgehen / Technologien:** Nach umfangreichen Recherchen zu möglichen Software Tools stachen vor allem die zwei aktuellen Leader TensorFlow Lite Micro und STM32 CubeAI hervor. Da als Vorgabe ein STM32-Mikrocontroller benutzt werden musste, wurde die CubeIDE-Software-Umgebung mit der X-CUBE-AI-Erweiterung ausgewählt. Als Hardware bot sich ein STM32H7-Chip, auf einem Discovery Kit an. Diese Lösung hat am meisten Speicherplatz, ein vorhandenes Display sowie einen Audio Input.

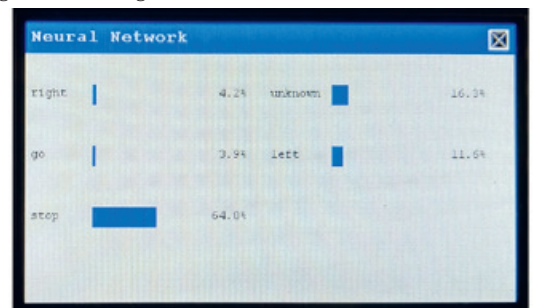
**Fazit:** Künstliche Intelligenz wird bereits seit Längerem erfolgreich auf leistungsfähigen Systemen eingesetzt. Seit einigen Jahren werden spezifische Lösungen für Mikrocontroller entwickelt. So entstanden in den letzten Jahren erfolgreiche Softwareapplikationen wie TensorFlow Lite Micro und CubeAI. Mit diesen Tools ist es möglich, kleinere Netzwerke auf klassischen Mikrocontrollern zu implementieren.

Im Rahmen dieser Arbeit ist es gelungen, ein Netzwerk zur Befehlsenerkennung auf einem Mikrocontroller umzusetzen. Es hat sich gezeigt, dass es möglich ist, kleinere Netzwerke auf klassischen Mikrocontrollern zu realisieren.

**Versuchsaufbau**  
Eigene Darstellung

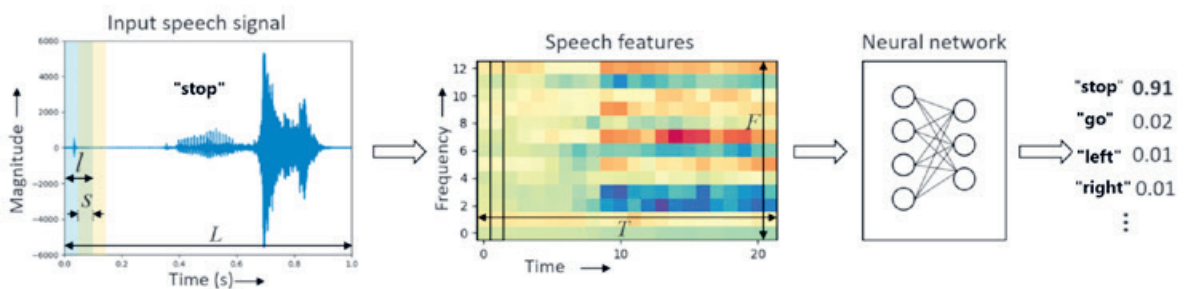


**Display Wahrscheinlichkeiten Befehle**  
Eigene Darstellung



## Funktionsprinzip

Hello Edge: Keyword Spotting on Microcontrollers



## Referent

Hannes Badertscher

## Korreferent

Gabriel Sidler, Teamup Solutions AG, Zürich, ZH

## Themengebiet

Artificial Intelligence

## Projektpartner

ICAI Interdisciplinary Center for Artificial Intelligence, Rapperswil, SG

# Training von Deep Learning Algorithmen für die Anwendung auf einem Mikrocontroller

## Diplomand



Dominic Wunderlin

**Einleitung:** Im Bereich der künstlichen Intelligenz gewinnen neuronale Netze immer mehr an Bedeutung. Daher wird es immer wichtiger, Mikrocontrollern den Zugriff auf solche Netzwerke zu ermöglichen. Mikrocontroller haben ganz offensichtliche Einschränkungen bei Speicherplatz und Performance. In dieser Arbeit wurden die Machbarkeit und mögliche Grenzen eines solchen Netzwerks ermittelt. Daher wurde ein Netzwerk zur Erkennung von Sprachbefehlen erstellt und optimiert, damit es auf einem STM-ARM-Mikrocontroller ausgeführt werden kann.

**Vorgehen / Technologien:** Für das Erstellen eines Netzwerkes ist TensorFlow als Ausgangsplattform gewählt worden (Version 2.6.0). Ein bekannter, von TensorFlow verwendeter Audio-Datensatz (von Pete Warden) wird für das Trainieren des Netzwerkes verwendet. Die Befehle stop, go, left, right sollen erkannt werden. Der Datensatz ist in drei Pakete unterteilt: einen Trainingssatz, der für das Trainieren zuständig ist, einen Validierungssatz, der für die Erkennung von Overfitting zuständig ist, und einen Testsatz, der dazu da ist, um das Netzwerk auf die Zuverlässigkeit zu testen. Für ein besseres Training wird der Datensatz einer Datenaugmentation unterzogen. Bei der Datenaufbereitung und Umwandlung sind gewisse Grenzen und Grössen vom Mikrocontroller vorgegeben. Mit diesen Vorgaben wurden die Wave-Dateien einem Mel-Spektrogramm-Algorithmus von Librosa unterzogen und als Grafik im Format eines png ausgegeben (siehe Grafik). Für die Netzwerk-Architektur stehen ein fully-connected und ein Convolutional Neuronales Netzwerk (CNN) zur Verfügung. Diese beiden Netzwerkarchitekturen wurden mit einem systematischen Ansatz ermittelt. Der Ansatz: kleinstmögliche Architektur, höchstmögliche Zuverlässigkeit.

Für eine noch kleinere Architektur stellt TensorFlow das Quantisieren zur Verfügung, das jedoch einen Zuverlässigkeitsverlust beinhaltet. Mit einer geeigneten Anpassung konnte jedoch dieser Verlust so gering wie möglich gehalten werden. Es gibt zum einen die Möglichkeit, mit der post-training quantization das Netzwerk, nach dem es trainiert wurde, zu quantisieren oder während des Trainings mit dem quantized-aware training (QAT).

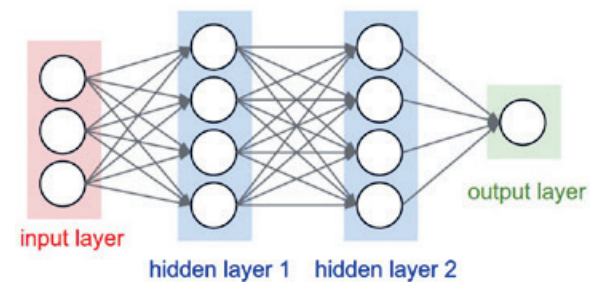
**Ergebnis:** Durch Quantisierung kann die Netzwerkgrösse um das bis zu Vierfache reduziert werden, ohne dass es zu signifikanten Verlusten an Zuverlässigkeit kommt.

In der Grafik sind die Resultate des CNN und des fully-connected Netzwerkes aufgelistet, jeweils einmal unquantisiert, einmal mit der post-training quantization und einmal mit dem QAT. Wie in der Grafik

ersichtlich, konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden.

## Struktur eines neuronalen Netzwerkes

Website: researchgate.net



## Wave-Datei zu Mel-Spektrogramm

Eigene Darstellung



## Zuverlässigkeit und Grösse der Netzwerke

Eigene Darstellung



## Referent

Hannes Badertscher

## Korreferent

Gabriel Sidler, Teamup Solutions AG, Zürich, ZH

## Themengebiet

Artificial Intelligence

## Projektpartner

ICAI Interdisciplinary Center for Artificial Intelligence, Rapperswil, SG



# Audio-Beamformer

## Highly Directional Steerable Loudspeaker Array

### Graduate Candidates



Florian Baumgartner



Thierry Schwaller

**Introduction:** Naturally, sound waves propagate in an omnidirectional pattern. However, in some cases, a directional pattern would be preferred. In comparison to light or electromagnetic waves, it turns out to be a very difficult task to focus audio waves in a specific direction. The underlying reason for this behavior is the physically long wavelength of the audible spectrum. This bachelor's thesis concentrates on how to overcome this effect by using higher frequencies in the ultrasonic spectrum and therefore being able to create a highly directional audio beam. In addition, beam-steering methods are applied to change the direction and focus point by software.

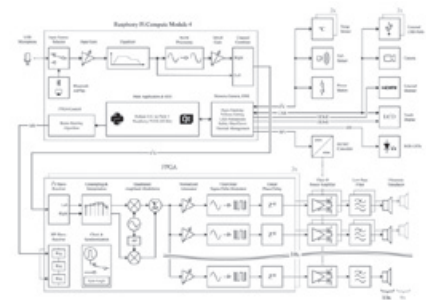
**Approach / Technology:** In order to achieve a directional sound beam, a linear phased array has been developed, consisting of 19 rows of 8 ultrasonic transducers each. For this, a single PCB, consisting of over 1300 components was specially designed. Two FPGAs modulate the baseband audio signal onto a 40 kHz ultrasonic carrier. First-order Sigma-Delta-Modulators perform the analog conversation in combination with a Class-D amplifier output stage. In addition, each channel can be delayed and attenuated individually. A Raspberry Pi Compute Module 4 is used to apply real-time digital signal processing techniques to further improve the audio quality. Advanced face-detection algorithms are used to locate a target and therefore be able to direct the sound in its direction. As input sources, Bluetooth® and AirPlay® streaming are supported, as well as other input devices, such as USB microphones.

**Result:** The directivity, beam-steering capability, and overall audio quality have been determined in a com-

prehensive human expertise test. The Audio-Beamformer performs well in all categories and satisfies the project's goals. Especially the range of up to 50 meters is awe-inspiring. The Audio-Beamformer could lead to a real alternative to conventional loudspeakers with some further improvements.

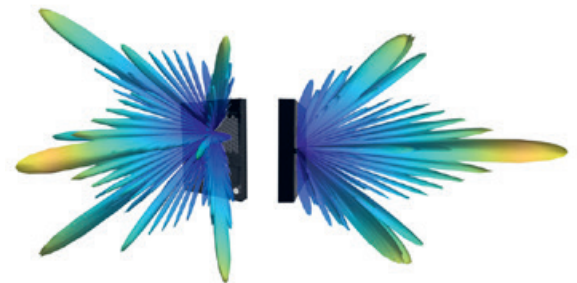
### System Block Diagram

Own presentation



### Beam Radiation Pattern

Own presentation



### 3D-Render of PCB and Case

Own presentation



### Advisor

Hannes Badertscher

### Co-Examiner

Gabriel Sidler, Teamup Solutions AG, Zürich, ZH

### Subject Area

Digital Signal Processing, Embedded Systems

### Project Partner

ICAI Interdisciplinary Center for Artificial Intelligence, Rapperswil, SG

# Wasserstoffantrieb für Rolling-Stock-Anwendung

## Optimierung der Betriebsstrategie auf ein gegebenes Lastspiel

### Diplomanden



Sara Cinzia Halter



Remo Weber

**Einleitung:** Grosse Teile des europäischen Schienennetzes sind ausschliesslich dieselbetriebenen Fahrzeugen vorbehalten. Um den Wunsch nach einem umweltfreundlichen Schienenverkehr dennoch zu erfüllen, entwickelt Stadler AG alternative Antriebskonzepte. Für die erforderliche Fahrdynamik besitzt das Fahrzeug neben der Brennstoffzelle Traktionsbatterien als schnelleren Energiespeicher. Der Gesamtwirkungsgrad des Hybridfahrzeugs hängt stark von der Aufteilung der benötigten Ausgangsleistung auf die beiden Energiequellen ab.

**Ziel der Arbeit:** Während dieser Arbeit soll eine optimale regelbasierte Betriebsstrategie für den vorgegebenen Antriebsstrang und das gegebene Fahrprofil mit minimalem Wasserstoffverbrauch ( $H_2$ ) erarbeitet werden. Neben der Antriebsleistung besitzen auch die Hilfsbetriebe (Licht, Klimatisierung etc.) einen Leistungsbedarf, der auch von den beiden Energiequellen gedeckt werden muss. Die Hilfsbetriebsleistungen von bestehenden Fahrzeugen, ähnlich dem untersuchten  $H_2$ -Fahrzeug, werden ausgemessen und ausgewertet. So können typische Kennwerte der Hilfsbetriebe identifiziert werden, was ein wichtiges Ziel der Arbeit ist. Mit diesen Werten wird eine optimale Betriebsstrategie entwickelt, die den  $H_2$ -Verbrauch des Fahrzeugs minimiert.

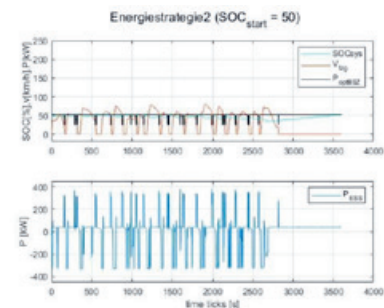
**Ergebnis:** Drei verschiedene eigene Energiestrategien wurden entwickelt und im adaptierten Modell abgebildet. Mehrere Simulationen ermöglichen einen Vergleich der eigenen Betriebsstrategien mit der Backupstrategie eines früheren Projekts. Die Simulationen zeigen: Ein konstanter Betrieb der Brennstoffzelle lohnt sich nicht nur materialtechnisch und

ökonomisch, sondern auch für einen geringen Wasserstoffverbrauch. Aus der effizientesten Strategie wurden fünf textbasierte Faustformeln abgeleitet. Sie bieten einen möglichen Lösungsansatz, welcher mit geringem Softwareaufwand in das  $H_2$ -Fahrzeug implementiert werden kann. Mit den gemessenen Hilfsbetriebsdaten wurde der Energieverbrauch für einen typischen Frühlingstag abgeschätzt. Dies hilft dem Industriepartner, die Hilfsbetriebe zu dimensionieren.

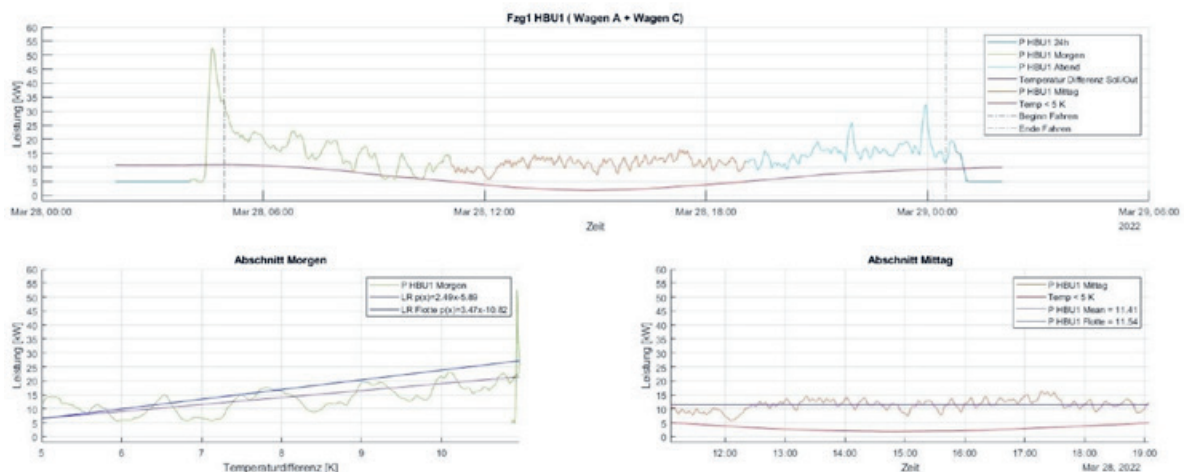
**Illustration des Fahrzeugs**  
Stadler AG



**Entwickelte Energiestrategie**  
Eigene Darstellung



**Lösungsansatz für die Hilfsbetriebs-Faustformel**  
Eigene Darstellung



**Referent**  
Prof. Dr. Michael Schueller

**Korreferent**  
Prof. Dr. Petr Korba,  
ZHAW Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften, Winterthur, ZH

**Themengebiet**  
Elektrische Maschinen

**Projektpartner**  
Stadler Rail AG,  
Bussnang, TG



# Eurobot 2022 «AGE of BOTS»

## Team Origin Scout Troop

### Diplomanden



Michael Guntli



Thomas Kuhn

**Einleitung:** Eurobot ist ein internationaler Roboterwettbewerb, an dem Teams mit ihren autonom agierenden Robotern gegeneinander antreten. Dabei haben die selbst entwickelten Roboter jeweils klar definierte Aufgaben zu lösen und so während 100 Sekunden möglichst viele Punkte zu sammeln. Das Thema von Eurobot 2022 lautet «AGE of BOTS». Auch im Frühjahr 2022 hat die OST mit einem Team aus zwei Elektrotechnik-Studierenden an den Eurobot-Wettkämpfen teilgenommen und so die lange Tradition der HSR erfolgreich weitergeführt.

**Vorgehen:** In einem ersten Schritt wurde der Aufbau der Roboter in einem CAD-Programm konstruiert und anschliessend aufgebaut. Nachfolgend konnten die verschiedenen Subkomponenten in Betrieb genommen werden, um die Funktionstüchtigkeit der einzelnen Module zu verifizieren. Parallel zur Fertigung der Roboter wurde das Konzept der Maincontrollersoftware erstellt. Aufgrund von Schwierigkeiten mit dem bisher verwendeten Softtimer wird neu ein Real Time Operating System eingesetzt, um somit Parallelitäten besser steuern zu können. Anschliessend wurde eine intelligente Wettkampfstrategie entwickelt und umgesetzt. Die letzte grosse Teilaufgabe bestand zum einen aus der Optimierung der Bewegungsabläufe des Roboters und zum anderen aus dem intensiven Testen des gesamten Spielablaufs.

**Ergebnis:** Entstanden sind die beiden funktionstüchtigen Roboter «Clappy» und «Grabby», auf welchen neu ein Real Time Operating System die Hauptsteuerung übernimmt. Während beim Roboter «Clappy» die in der Studienarbeit entwickelten Teilsysteme verwendet werden, kommt beim zweiten Robo-

ter «Grabby» ein mit der Unterstützung von CEKAtec AG entwickelter Roboterarm zum Einsatz. An der Schweizer Meisterschaft konnten sich die Roboter gut gegen die Konkurrenz behaupten und brachten so den Eurobot-Schweizer-Meister-Titel zurück nach Rapperswil.

**Roboter «Clappy»**  
Eigene Darstellung



**Roboter «Grabby»**  
Eigene Darstellung



**Roboter an der Schweizer Meisterschaft**  
Eigene Darstellung



**Referent**  
Lars Kamm

**Korreferent**  
El.-Ing. FH Claudio  
Foscan, Wattwil, SG

**Themengebiet**  
Embedded Systems

**Projektpartner**  
IMES Institut für  
Mikroelektronik und  
Embedded Systems,  
Rapperswil, SG /  
CEKAtec, Wattwil, SG

# Evaluation von Finite State Machine-Frameworks für Embedded Systems

## Grundlage für die Erarbeitung von Coding Guidelines zur FSM-Entwicklung bei Hörgeräten

### Diplomanden



Ramon Giuseppe Carlucci



Oliver Schmidhauser

**Ausgangslage:** Die Sonova AG entwickelt eingebettete Systeme mit Mikrocontrollern der Arm-Cortex-M-Familie. In der Softwareentwicklung kommen dabei häufig Finite State Machines (FSM) zur Anwendung. Eine FSM ist ein Modell mit verschiedenen Zuständen und definierten Zustandsübergängen, wobei sich das System immer nur in einem Zustand gleichzeitig befinden kann. Aktuell sind diese FSM in der Code Base von Sonova mit unterschiedlichen Ansätzen und Frameworks implementiert. Im Zuge einer Vereinheitlichung der Ansätze soll für die Zukunft eine neue Coding Guideline zur Entwicklung von FSM in Hörgeräten entstehen.

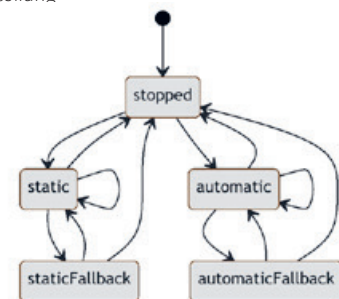
**Ziel der Arbeit:** Der Auftrag besteht darin, verschiedene Frameworks für die Implementierung von FSM zu untersuchen und basierend auf den Kriterien und Bedürfnissen von Sonova zu bewerten. Im Fokus steht die Umsetzung auf Arm-Cortex-M-Mikrocontrollern in C++, wobei ein niedriger Speicherbedarf für Sonova ein wichtiges Kriterium darstellt.

**Ergebnis:** Verschiedene Kriterien wurden in Absprache mit Sonova erarbeitet. Im weiteren Verlauf der Arbeit wurden die folgenden fünf Ansätze auf die Kriterien geprüft und auf einem Cortex-M4-Evalboard genauer untersucht:

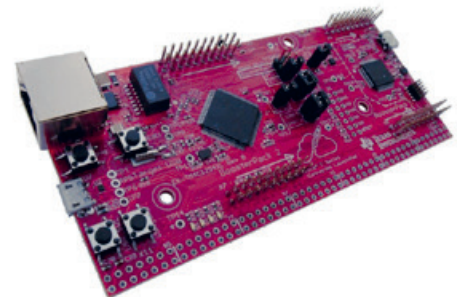
- **State Pattern:** klassisches Pattern der GoF
- **[Boost::ext],SML:** mächtiges modernes Framework
- **TinyFSM:** einfach, auf Low Performance ausgelegt
- **SMC (State Machine Compiler):** Code Generator
- **QP/C++:** echtzeitfähiges Framework für FSM

Durch die jeweilige Implementation einer Referenz-FSM, welche die wesentlichen Anforderungen an die FSM abbildet, konnten verschiedene Messungen durchgeführt und die Frameworks so schliesslich bewertet werden. [Boost::ext],SML sowie das TinyFSM schnitten dabei besonders gut ab. Als Resultat liegt nun eine Score-Tabelle vor, welche von Sonova zur Ausgestaltung der Coding Guidelines weiterverwendet werden kann.

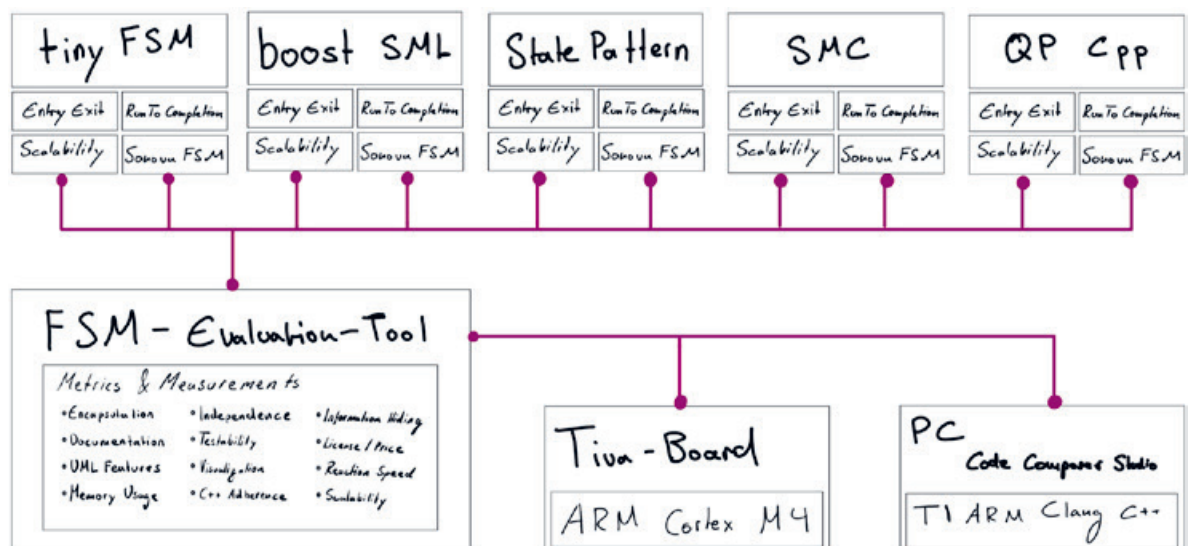
**Referenz-FSM zur Implementation mit den jeweiligen Lösungen, aufgebaut entsprechend den Bedürfnissen von Sonova**  
Eigene Darstellung



**Verwendetes Cortex-M4-Evalboard von Texas Instruments**  
<https://www.ti.com/tool/EK-TM4C1294XL>



**FSM Evaluation Setup**  
Eigene Darstellung



**Referent**  
Prof. Dr. Andreas Breitenmoser

**Korreferent**  
Theo Scheidegger,  
Swens GmbH, Schänis, SG

**Themengebiet**  
Embedded Systems

**Projektpartner**  
Sonova AG, Stäfa, ZH



# Parachute Reefing System for Sounding Rockets

## Graduate Candidate



Luca Jost

**Introduction:** The association Akademische Raumfahrt Initiative Schweiz (ARIS) brings together students from Swiss universities interested in space exploration. Several rockets have been built over the years for student competitions and research. The rockets built by ARIS are fully reusable, as they are recovered by parachute. With the rockets getting larger and heavier with each passing year, a solution to reduce the shock loads at parachute opening is needed. Consequently, the development of an active parachute reefing system was proposed.

**Approach / Technology:** After evaluating a large number of line cutting methods, it was decided that a thermal solution would provide the best results. The reefing line is guided through a ceramic heating element and gets burned through at a target altitude. Once the reefing line is cut, the parachute can fully open.

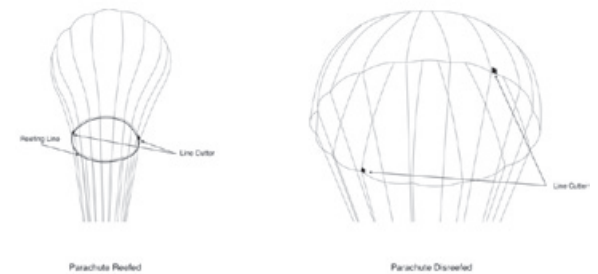
A custom hardware was developed to drive the heating element, receive data over a telemetry link and process sensor data. The system is based around a STM32 microcontroller. Through the telemetry link, the reefing computer can receive commands to initiate the cut of the reefing line. In addition, a Kalman filter was developed to estimate the velocity and altitude of the rocket, allowing the reefing computer to also work fully autonomously. All relevant system settings can be changed through the USB interface. An enclosure was designed and manufactured using a 3D printer.

**Result:** A comprehensive testing campaign was carried out to assess the system's functionality. Many cutting tests were conducted to determine the effective-

ness and repeatability. To validate the state estimation, multiple drone flights were performed. In these field tests, a FPV drone was used to accelerate upwards with up to 4 g and reach altitudes of around 100 meters. Finally, a full-scale rocket flight of the whole system was conducted. The reefing system cut the line at parachute opening, proving its effectiveness.

## Illustration of the implemented parachute skirt reefing

Own presentation



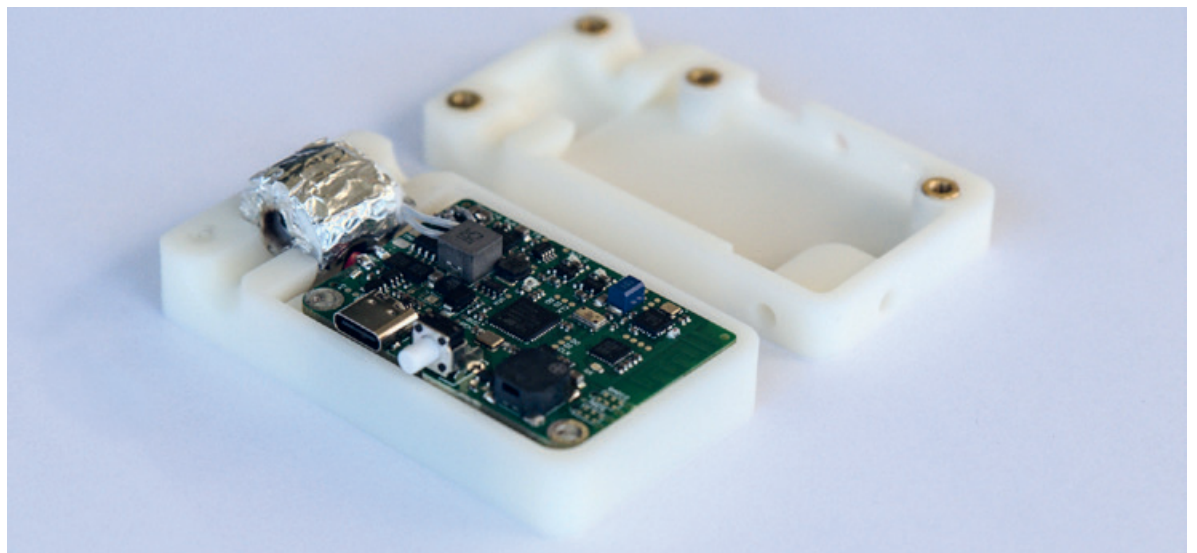
## Test flight of the Reefing System with a sounding rocket

Own presentation



## Reefing Line Cutter PCB, mounted heating element and enclosure

Own presentation



## Advisor

Prof. Dr. Andreas Breitenmoser

## Co-Examiner

Theo Scheidegger,  
Swens GmbH, Schänis, SG

## Subject Area

Embedded Systems

## Project Partner

ARIS Akademische  
Raumfahrt Initiative  
Schweiz, Dübendorf,  
ZH

# Portierung und Validierung von Simulink-Modellen für Audio-Echtzeitanwendungen

## Rapid Prototyping von Hörgerätemodellen

### Diplomanden



Marius Baumann



Michael Steiner

**Ausgangslage:** In den Hörgeräten der Firma Sonova AG sorgt das Zusammenspiel vieler verschiedener Algorithmen für ein möglichst authentisches Hörerlebnis. Aufgrund von Hardwarelimitierungen, Softwareabhängigkeiten und beschränkter Batterielaufzeit ist ihre Integration in ein Hörgerät aufwendig. Aus diesem Grund werden neue Algorithmen zuerst auf einem PC simuliert. Diese Simulink-Simulationen haben Audiolatenzen von 15 ms, was doppelt so hoch ist im Vergleich zu einem echten Hörgerät. Die Sonova sucht deshalb nach einer alternativen Simulationshardware, welche zum einen ähnlich niedrige Latenzen aufweist wie ein Hörgerät und zum anderen portabel ist.

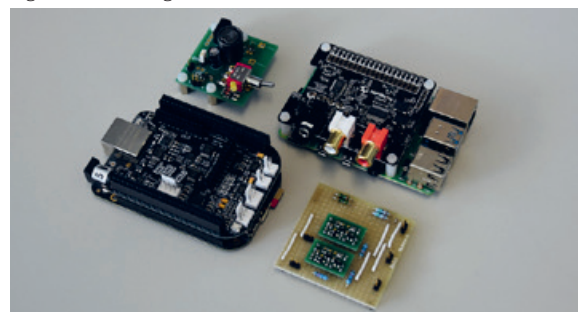
**Vorgehen:** Um die Anforderungen von Sonova zu erfüllen, wurde als Erstes eine umfangreiche Hardware-recherche betrieben. Dabei wurden das Raspberry Pi und das BeagleBone hauptsächlich aufgrund ihrer starken Performance und kleinen Ein- und Ausgangslatenz als Plattformen ausgewählt. Die Automatisierung der Implementierungsschritte wurde durch Python-Skripte realisiert, welche Informationen aus dem generierten Modellcode auslesen, Schnittstellen-Files vom Modell zur Hardware generieren sowie ein GUI für die Bedienung erstellen können.

**Ergebnis:** In dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass eine vollständig funktionierende Realisierung von einem auf dem gewählten Ansatz basierenden Rapid Prototype durchaus praktikabel ist. Die Zahl der Implementierungsschritte konnte durch die Python-Skripte deutlich reduziert werden. Die Funktionalität wurde zuerst mit einem reduzierten Hörgerätemodell auf dem Raspberry Pi sowie dem BeagleBone verifiziert. Auch das vollständige Hörgerätemodell konnte

mit dem Raspberry Pi bei maximaler CPU-Auslastung von 30% problemlos ausgeführt werden. Die Rechenleistung des BeagleBone hingegen reichte für das gesamte Modell nicht aus. Die Audiolatenzen liegen bei beiden Plattformen im Bereich von 8 bis 10 ms. Dies führt zu dem Schluss, dass vor allem das Raspberry Pi ein sinnvoller Kandidat für die zukünftige Weiterentwicklung ist.

**Verwendete Hardware:** das Raspberry Pi 4B (oben rechts) und das BeagleBone Black (unten links) mit zusätzlicher Testhardware

Eigene Darstellung



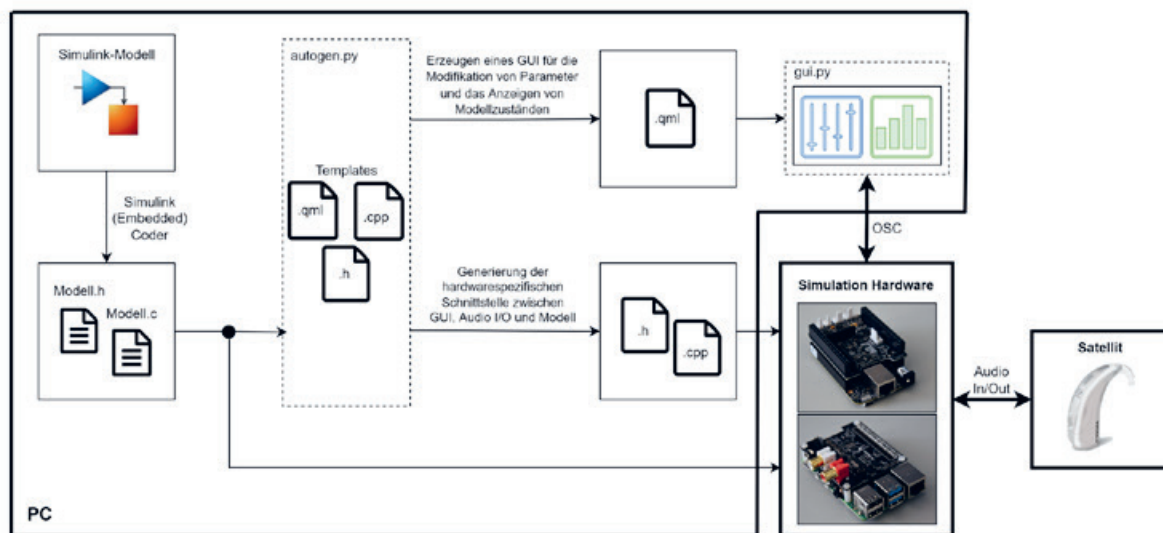
**Hörgerät-Satellit in der Testumgebung**

Eigene Darstellung



### Projektübersicht

Eigene Darstellung



### Referent

Prof. Dr. Andreas Breitenmoser

### Korreferent

Theo Scheidegger, Swens GmbH, Schänis, SG

### Themengebiet

Embedded Systems

### Projektpartner

Sonova AG, Stäfa, ZH

# Kraftwerk Wägital: Studie zur Erneuerung der Konzession

## Variantenstudium unter Einbezug neuer Konzepte und Speichertechnologien

### Diplomanden



Réda Haddouche



Andrea Mozzini Vellen

**Ausgangslage:** Das Kraftwerk Wägital ist ein zwei-stufiges Pumpspeicherkraftwerk im gleichnamigen Tal des Kantons Schwyz. Das 1921 erbaute Kraftwerk produziert rund 128 Mio. kWh pro Jahr für die Region, davon rund 100 Mio. kWh aus den natürlichen Zuflüssen. Die obere Stufe, das Kraftwerk Rempen, verfügt über vier vertikalachsige Francis-Turbinen mit einer Gesamtleistung von 60 MW. Im unteren Kraftwerk Siebnen sind vier weitere 12-MW-Turbinen des gleichen Typs installiert. Um das Wasser aus dem Rempener Ausgleichsbecken in den Wägitalersee hochzupumpen, sind in der Zentrale Rempen vier 4-MW-Hochdruckpumpen installiert. Die derzeitige Konzession für die Nutzung der Wasserkräfte der Wägitaler Aa und des Trepsenbachs läuft am 31. Dezember 2040 aus. Nach dem Wasserrechtsgesetz müssen 15 Jahre vor Ablauf der laufenden Wasserrechtsverleihung Verhandlungen über eine Erneuerung der Konzession beginnen. Das Ziel dieses Projekts ist die Erarbeitung eines Vorprojekts zur Untersuchung von Varianten für die Erneuerung der Kraftwerk-Wägital-Konzession.

**Vorgehen:** Vor Beginn der Studien wurde die Anlage besichtigt, um sich ein konkretes Bild von den zu entwickelnden Arbeiten zu machen. Dabei wurden die verschiedenen technischen, wirtschaftlichen und rechtlichen Aspekte berücksichtigt. Es war von Anfang an klar, dass die Schlüsselpunkte für die Entwicklung einer umsetzbaren Variante die öffentliche und ökologische Akzeptanz sind. In einem ersten Schritt wurden 10 Varianten in drei verschiedenen Kategorien erarbeitet, nämlich Vergrößerung des Kraftwerks, Optimierung der bestehenden Anlage und Verkleinerung des Kraftwerks. Von diesen 10 wurden zwei nach wirtschaftlichen, technischen und betrieblichen Sicherheits- und Akzeptanzkriterien ausgewählt. Bei der Entwicklung eines solchen Projekts muss die Energiestrategie 2050+ berücksichtigt werden.

**Ergebnis:** Die erste Variante, die eingehender untersucht wurde, betrifft die Optimierung der bestehenden Anlage. Um eine verbesserte Restwassermenge vom Kraftwerk Siebnen zum Obersee zu gewährleisten, sollen die heutigen Turbinen, die nur Tageszeiten abdecken, zusätzlich mit einer Dotierturbine ausgestattet werden, die mindestens einen Kubikmeter Wasser pro Sekunde turbinieren soll. Die Energie wird in einem Wasserstoffspeicher gespeichert und bei Bedarf genutzt. Die angestrebte Verbesserung der Restwassermenge kann mit dem neuen Konzept jedoch nicht zufriedenstellend erreicht werden, weil die natürlichen Zuflüsse von 44,5 Millionen Kubikmetern ins Rempener Becken nicht ausreichen. Die zweite Variante betrifft die Vergrößerung des Kraft-

werks. Es wurde ein Pumpspeicherkraftwerkskonzept entwickelt, um den Wägitalersee direkt mit dem Obersee zu verbinden. Die Druckleitungen würden von der Staumauer Schräb bis Lachen vollständig unterirdisch verlaufen. Die Maschinengruppen wären in einer Kaverne installiert. Das bestehende System würde nur dazu dienen, das Wasser in Rempen zu sammeln und zum Wägitalersee hochzupumpen. Die drei Maschinengruppen mit einer Gesamtleistung von 500 MW könnten 100 Kubikmeter pro Sekunde turbinieren und 87 Kubikmeter pro Sekunde Wasser hochpumpen. Von den beiden Varianten ist die zweite die bessere. Sie spiegelt nämlich die vom Bundesamt für Energie eingeführte Strategie zum Ausbau der Wasserkraftwerke wider.

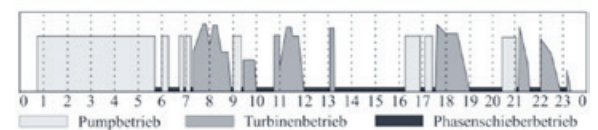
### Aktueller Stand der Anlage

Zur Verfügung gestellt von „AG Kraftwerk Wägital“



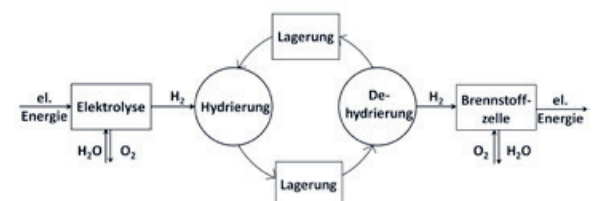
### Tagesbetriebsdiagramm eines Pumpspeicherkraftwerkes

Giesecke, Heimerl und Mosonyi, Wasserkraftanlagen, 2014



### Chemische Wasserstoffspeicher

[www.de.wikipedia.org/chemische+wasserstoffspeicher](http://www.de.wikipedia.org/chemische+wasserstoffspeicher)



**Referent**  
Alfred Züger

**Korreferent**  
Michael Roth,  
Engadiner Kraftwerke  
AG, Zernez, GR

**Themengebiet**  
Energiesysteme

**Projektpartner**  
AG Kraftwerk Wägital,  
Siebnen, SZ



# Optimierung der Spitzenbelastung in Niederspannungsnetzen

Diplomand



Jan Marbach

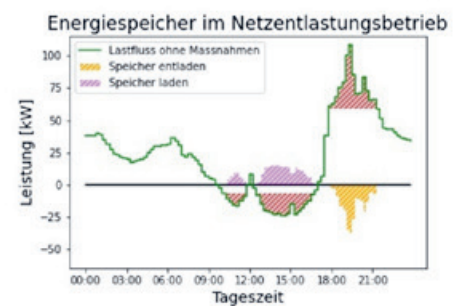
**Ausgangslage:** Die Dekarbonisierung des Verkehrssektors und der Wärmeerzeugung stellen das elektrische Verteilnetz vor neue Herausforderungen. Zusätzlich wird durch die dezentrale Energieproduktion vor allem das Niederspannungsnetz stärker beansprucht. Das Zusammenspiel zwischen Energieverbrauch und -produktion steht im Mittelpunkt dieser Arbeit. Das Ziel der Arbeit ist es, mithilfe moderner Lösungsansätze, wie Speichern und intelligenten Lastmanagements, das Netz zu entlasten.

**Vorgehen:** Um diese Lösungsansätze auf deren Einsatztauglichkeit zu überprüfen, wurden in einer Netzberechnungssoftware Niederspannungsnetze aufgebaut und Lastflusssimulationen durchgeführt. Zur Modellierung verschiedener Komponenten wurden synthetische Lastprofile generiert und in die Software implementiert. Die zeitabhängigen Lastflussberechnungen mit diskreten Lastwerten führen zu einer quasistatischen Simulation des Netzes. Zusatzkomponenten wie Batterien konnten ebenfalls modelliert und simuliert werden.

**Ergebnis:** Die Simulationsergebnisse zeigen, dass eine Überlastung der stärker beanspruchten Komponenten durch Netzentlastungsmassnahmen verhindert werden kann. Die im Allgemeinen gut ausgebauten Niederspannungsnetze kommen in den untersuchten Wohnquartieren selten und nur bei einem hohen Ausbaugrad von Photovoltaik und Ladestationen an ihre Belastungsgrenzen. Die Netze werden dabei vermehrt durch die Energieproduktion überlastet, welche jedoch auf einen spezifischen Zeitraum am Tag beschränkt ist. Entsprechend ist die reine Fokussierung auf Energiezwischenpeicher zur Netzentlastung unrentabel. Deshalb ist für längere Phasen ein eigenverbrauchoptimiertes Lastmanagement mit kleineren Speichervolumen vorteilhaft.

Es ist das Tagesprofil einer stark belasteten Leitung dargestellt, welche durch einen Speicher entlastet wird.

Eigene Darstellung



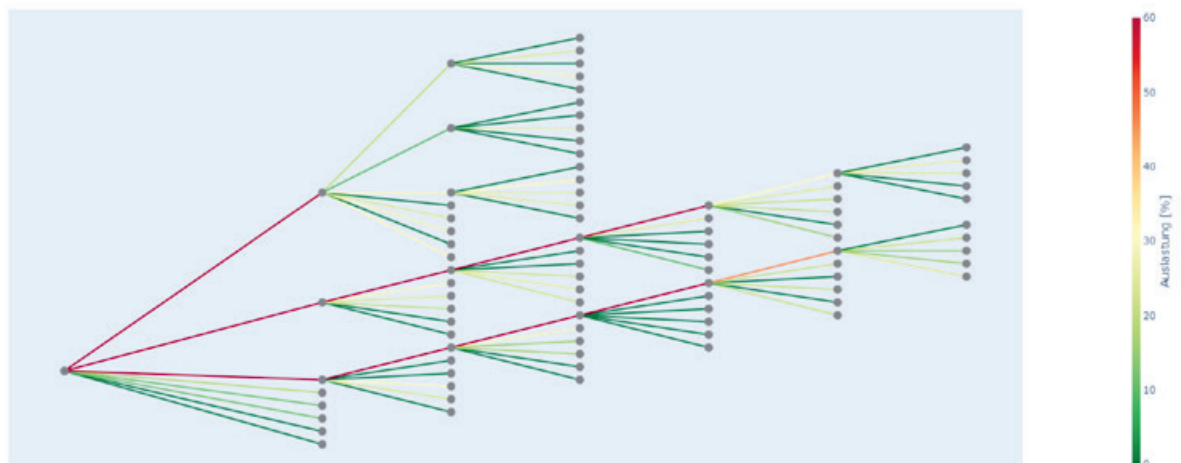
Die Leitung wird primär durch ein optimiertes Lastmanagement entlastet. Ein kleiner Speicher unterstützt den Vorgang.

Eigene Darstellung



**Wohnquartier mit 75 Hausanschlüssen, einige Bezügerleitungen sind stark ausgelastet, Massnahmen sind notwendig.**

Eigene Darstellung



Referent  
Dr. Turhan Demiray

Korreferent  
Prof. Dr. Martin Geidl,  
FHNW Fachhochschule  
Nordwestschweiz,  
Windisch, AG

Themengebiet  
Energiesysteme

Projektpartner  
Energie Thurgau EKT,  
Arbon, TG

# Volume and Weight Estimation using Monocular Vision in a Constrained Geometry

## Feasibility Study

### Graduate Candidates



Naoki Sean Pross



Tim Tönz

**Introduction:** This is a feasibility study in cooperation with an industry partner under a non-disclosure agreement, and will thus be discussed only in a conceptual manner. For optimization purposes the industry partner is interested in being able to know the weight of material that is processed in a machine. The task is to develop a system which estimates the weight based on an image taken by a single camera mounted to the machine.

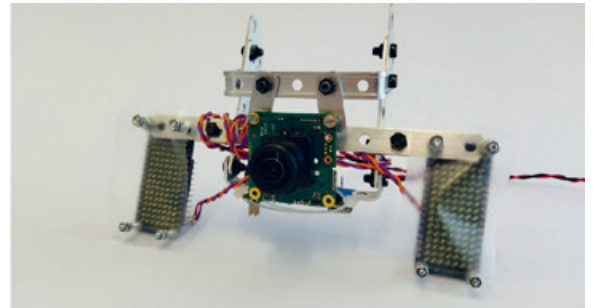
**Approach:** Evaluating various methods led to two solutions: an algorithm using only «classical» computer vision and a second method with statistical machine learning. The former can be summarized with the following steps. Given an image of a full machine, an image of the machine in the same position but empty is searched in a database. Both images are split into low resolution «tiles», and for each tile a set of statistical properties is computed. The statistical properties are stored as vectors and compared by measuring their Euclidean distance. The result is filtered, thresholded, and processed using morphological operations to obtain a binary mask. The binary mask indicates where in the machine there is material. From the area of this mask the weight of the material is estimated using an empirically determined function. The second algorithm uses statistical machine learning to remove the necessity of an image of the empty machine. Instead, a support vector machine classifies the tiles as containing material or not. The rest of the process is analogous to the classical approach.

**Result:** The performance of both algorithms was compared to measured data. The volume estimation

is within the desired level of accuracy, but because of highly reflective chromed metal components in the machine the classical approach overestimates the weight. The ML method has the converse issue. Solutions to both problems are presented and discussed. However, because the material is highly compressible, in its current state the weight estimation yields only indicative values.

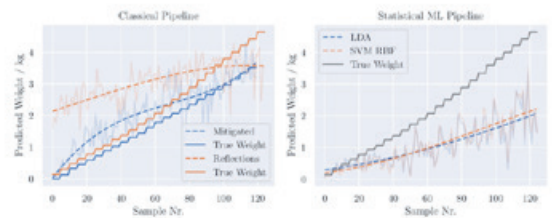
### Measurement camera

Own presentation



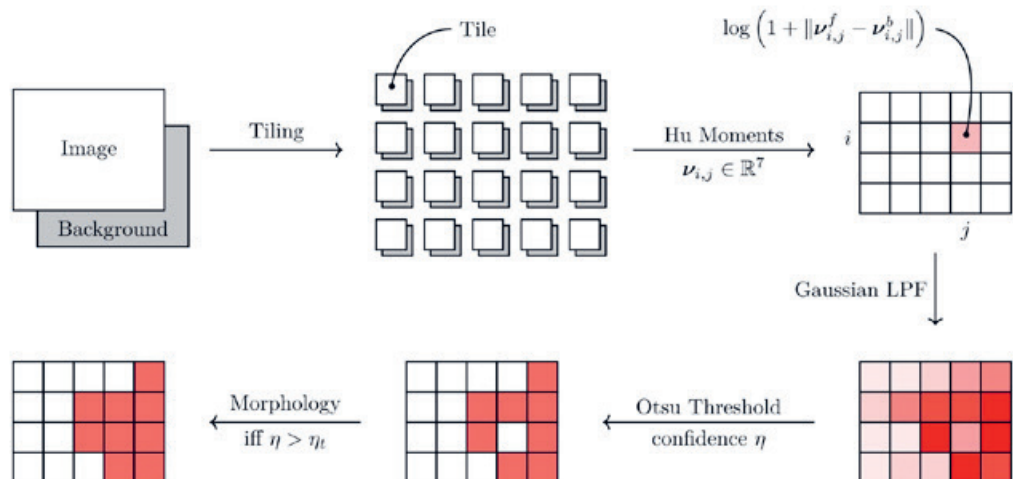
### Preliminary results

Own presentation



### Classical image processing algorithm

Own presentation



### Advisor

Hannes Badertscher

### Co-Examiner

Gabriel Sidler, Teamup Solutions AG, Zürich, ZH

### Subject Area

Image Processing and Computer Vision, Artificial Intelligence

# Hardware-Beschleuniger zur Berechnung der FALCON Signatur

## FALCON, einziger NIST-Finalist ohne publizierte Implementierung in Hardware – wirklich nicht hardwaretauglich?

### Diplomanden



Andreas Senn



Jan Wendler

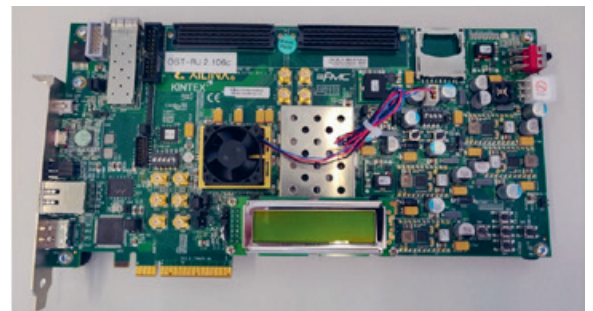
**Ausgangslage:** Die Post-Quantum-Kryptographie erfährt eine immer grösser werdende Bedeutung. Quantencomputer sind theoretisch in der Lage, bestimmte mathematische Funktionen um ein Vielfaches schneller auszuführen als herkömmliche Computer. Sollten Quantencomputer jemals zum Einsatz kommen, bestünde die Gefahr, dass viele digitale Signaturen unsicher werden. Um diesem Problem vorzubeugen, hat das National Institute of Standards and Technology (NIST) einen Wettbewerb ausgeschrieben, um neue Verfahren für digitale Signaturen zu finden, die vor Quantencomputern sicher sind. Nach zwei Runden sind noch drei verschiedene Protokolle im Rennen: Rainbow, CRYSTALS-Dilithium und FALCON. Diese Algorithmen müssen primär sicher sein. Für die Umsetzung in der Praxis, zum Beispiel in den Geräten von unserem Projektpartner Securosys, ist nicht nur die theoretische Sicherheit, sondern auch der Rechenaufwand pro Signatur relevant. Bisher gibt es bereits publizierte Hardwareimplementierungen von Rainbow und CRYSTALS-Dilithium, aber noch keine des FALCON.

**Vorgehen:** Um FALCON zu beschleunigen, werden zwei verschiedene Ansätze verfolgt. Der erste Ansatz ist die Beschleunigung einzelner häufig verwendeter Funktionen. Dies ermöglicht es, sehr effiziente Module zu schreiben, die zum Beispiel eine Multiplikation beschleunigen. Das Programm wird auf einem Mikrocontroller ausgeführt, und die beschleunigten Module werden auf einem FPGA implementiert. Der zweite Ansatz besteht darin, den FALCON-Code mit Vitis HLS nach VHDL zu konvertieren. Mit diesem Ansatz wird das Ziel verfolgt, eine VHDL-Implementierung, welche die gesamte FALCON-Signatur berechnet, zu erhalten.

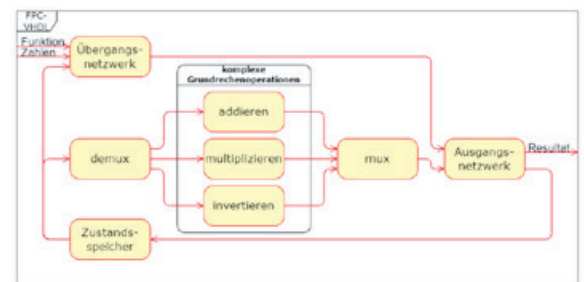
**Ergebnis:** Im ersten Ansatz wurde mit der Auslagerung der komplexen Rechenoperationen begonnen. Dies verlief problemlos. Durch einige mathematische Umformungen gelang es, ohne Geschwindigkeitseinbussen den benötigten Platz auf dem FPGA zu reduzieren. Alleine durch das Auslagern der komplexen Rechenoperationen konnte die Laufzeit der beschleunigten Funktion um 51% reduziert werden. Eine weitere Funktion wurde auf den FPGA ausgelagert, welche direkten Zugriff auf den Speicher benötigt. Bei der zeitlichen Abstimmung zwischen dem Mikrocontroller und der eigenen Hardware gibt es noch ein Problem, welches auf unklare Optimierungen innerhalb des Mikrocontrollers zurückgeführt werden konnte. Deshalb wurde die Integration dieses Moduls nicht beendet. Dieser Ansatz zeigt, dass ein deutlicher Geschwindigkeitsgewinn mit hardwarebeschleunigten Modulen erzeugt werden kann. Der zweite Ansatz erwies sich als schwieriger als

erwartet. Die Konvertierung von C nach VHDL kann nur unter ganz bestimmten Bedingungen durchgeführt werden. Deshalb mussten einige Funktionen des C-Codes umgeschrieben werden. Nach einiger Arbeit konnte so der C-Code konvertiert werden. Der generierte Block wurde zusammen mit einem Mikrocontroller in einem FPGA implementiert. Dieser zeigt aber noch ein Fehlverhalten auf, welches aus Zeitgründen nicht korrigiert werden konnte. Dadurch ist es leider nicht möglich, den Grad der Beschleunigung genau zu bestimmen. Soweit bekannt, wurde in dieser Arbeit die weltweit erste Hardwareimplementierung des Signieralgorithmus designt. Mit etwas mehr Zeit wäre es für beide Ansätze möglich, die verbleibenden Fehler zu beheben.

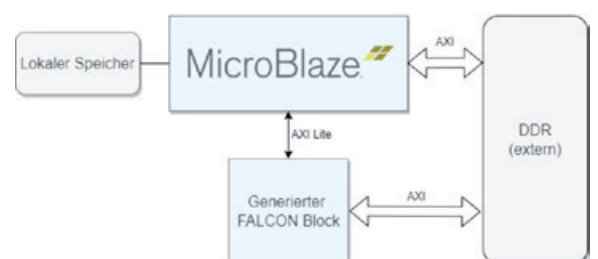
Das in dieser Arbeit verwendete FPGA Board: Kintex KC705  
Eigene Darstellung



Übersicht der mit VHDL beschleunigten Rechenoperationen  
Eigene Darstellung



Implementation des generierten FALCON-Blocks  
Eigene Darstellung



**Referent**  
Prof. Dr. Paul Zbinden,  
Dorian Amiet

**Korreferent**  
Robert Reutemann,  
Miromico AG, Zürich,  
ZH

**Themengebiet**  
Mikroelektronik

**Projektpartner**  
Securosys SA, Zürich,  
ZH



# Image Rectification

## für FPGA-basierte Stereovisionsalgorithmen

### Diplomanden



Hermon Goitom



Gafur Memeti

**Einleitung:** Image Rectification umfasst die perspektivische Transformation von Kamerabildern. Je nach Anforderung wird die Rektifizierung offline mit PC-Software oder in Echtzeit auf FPGA-Systemen durchgeführt. Die Ergebnisse von FPGA-basierten Stereovisionsalgorithmen sind durch eine unzureichende mechanische Justierung der Kameras begrenzt. Stereovisionsalgorithmen profitieren deshalb stark von Image Rectification.

In dieser Arbeit wurde ein für Stereovisionsanwendungen geeigneter Image-Rectification-Algorithmus auf einem FPGA implementiert. Der IP-Block soll für jede Kamera einzeln instanziiert werden und auch für andere Computer-Vision-Anwendungen geeignet sein. Es sollte ein Durchsatz von 200 MPixel/s erreicht werden.

**Vorgehen:** In der Literaturstudie wurden die interessantesten Arbeiten zusammengefasst. Auf der Grundlage der Ergebnisse wurde für die FPGA-Implementierung der Memory-Mapped-Ansatz gewählt. Die Unabhängigkeit der Kalibrierungsmethode von der FPGA-Implementierung kann als ein Kriterium für diese Wahl hervorgehoben werden.

Zusätzlich zu den bestehenden Open-CV-Algorithmen wurden Kalibrierungsmethoden für die Rektifizierung von einem reinen Höhen- und Drehversatz entwickelt. Um die Ergebnisse der FPGA-Implementierung zu verifizieren, wurde im Vorfeld eine goldene Referenz in Python erarbeitet. Während der FPGA-Implementierung wurden Teilmodule in VHDL beschrieben, getestet und in den IP-Block integriert. Letztlich wurden die rektifizierten Bilder aus der Hardwarebeschreibung mit der goldenen Python-Referenz verglichen.

**Ergebnis:** Mit der goldenen Referenz in Python lassen sich Bilder mit Dreh- und Höhenversatz rektifizieren. Die FPGA-Implementierung ermöglicht die Rektifizierung eines Höhenversatzes bei einem Durchsatz von 200 MP/s.

Die Latenz und der Ressourcenverbrauch sind vom Höhenversatz abhängig. Der maximal rektifizierbare Höhenversatz ist im Umkehrschluss durch die zur Verfügung stehenden Ressourcen eingeschränkt.

Bei zwei parallel eintreffenden Pixeln, einer Pixelwortbreite von 8 bit, einer Bildgröße von 2048 x 1024 Pixel, einer bilinen Interpolation mit vier Nachkommastellen und einem Höhenversatz von sieben Bildzeilen werden 3853 LUTs, 4298 Register, 15,5 BRAMS, 4 DSP und 3595 Taktzyklen benötigt.

### Referenten

Prof. Dr. Paul Zbinden,  
Lukas Leuenberger

### Korreferent

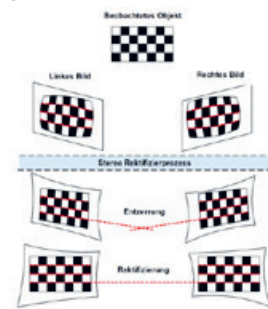
Robert Reutemann,  
Miomico AG, Zürich,  
ZH

Themengebiet  
Mikroelektronik

Projektpartner  
Photonfocus AG,  
Lachen, SZ

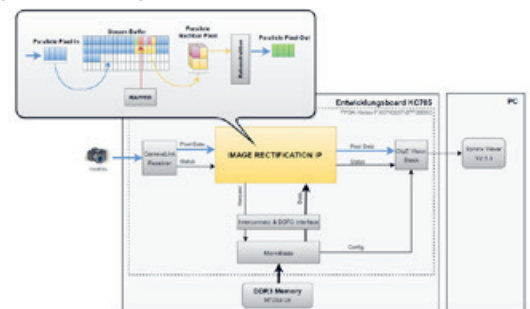
### Rektifizierung von Stereobildern

Eigene Darstellung



### Prozessübersicht und Demonstrationssystem

Eigene Darstellung



### Architektur Image-Rectification-IP-Block

Eigene Darstellung



# Automatische Codegenerierung für eine Drohne

## Diplomanden



Livio Nagel



Juri Stadler

**Problemstellung:** Auf dem Markt wird eine Vielzahl von Hardware und Software für Drohnen angeboten. Oft können die Parameter der Regler in der Software angepasst werden. Soll aber die Reglerstruktur verändert werden, so ist eine umfangreiche Einarbeitung in den Source Code notwendig. Weiter werden Regelkreise oft unter Anwendung von Entwicklungstools entworfen und simuliert. In einem weiteren Schritt müssen diese in eine hardwareabhängige Hochsprache übersetzt und auf den entsprechenden Flugcontroller geladen werden. Da der Regler auf diese Weise zweimal implementiert werden muss, ergeben sich redundante Arbeitsschritte. Deshalb wäre eine Übersetzung in die Hochsprache durch einen Codegenerator sinnvoll.

**Ziel der Arbeit:** Im Rahmen dieser Arbeit soll ein System gefunden und evaluiert werden, welches ermöglicht, Regler für Drohnen zu entwerfen und dessen Source Code automatisch zu generieren. Im Weiteren wird eine Simulation realisiert, mit welcher Regler getestet werden können, bevor diese auf der Hardware implementiert werden.

Es werden verschiedene Systeme untersucht und unter Anwendung einer Nutzwertanalyse ein entsprechendes System beschafft. Anschliessend wird ein Modell für die Drohne erstellt und darauf aufbauend eine Simulation implementiert. Ausserdem werden Regler entworfen, implementiert und auf der Drohne getestet.

**Ergebnis:** Es wurden drei Systeme untersucht. Mit dem Flugcontroller von Pixhawk und dem «Simulink Support Package for PX4» konnte ein System gefunden werden, welches den Anforderungen entspricht

und vielfältig anwendbar ist. Es konnte ein Modell der Drohne erstellt und in einer Simulation nachgebildet werden. Zudem wurden zwei unterschiedliche Regler implementiert und getestet, wodurch ein gutes Flugverhalten erreicht werden konnte. Das System wurde empirisch getestet und die Resultate dokumentiert.

**Im Rahmen der Arbeit beschaffte Drohne, welche mit einem Pixhawk 4 Flightcontroller bestückt ist.**

<http://www.holybro.com/product/pixhawk4-s500-v2-kit>



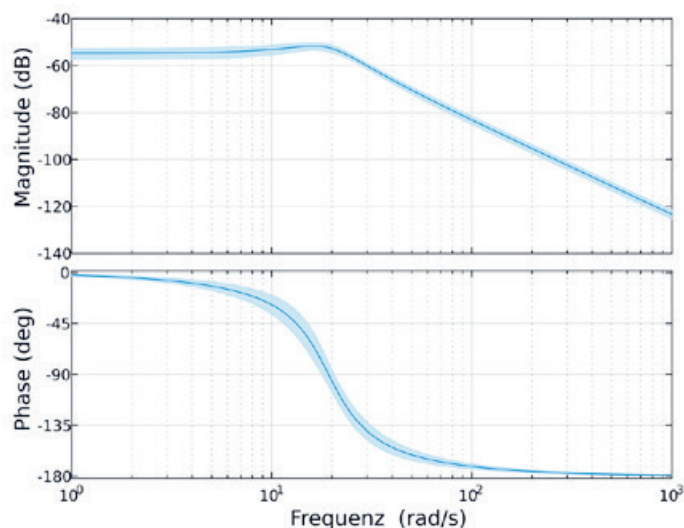
**Pixhawk 4 Flightcontroller mit Schnittstellen für Sensoren, Aktoren und Spannungsversorgung.**

<http://www.holybro.com/product/pixhawk-4/>



**Identifizierte Übertragungsfunktion der Drohne von den Motoreninputs zur Winkelrate der Rollbewegung.**

Eigene Darstellung



## Referent

Prof. Michael Hubatka

## Korreferentin

Dr. Antje Rey, E. Blum & Co. AG, Zürich, ZH

## Themengebiet

Regelungstechnik / Control Theory

## Projektpartner

ICOM Institut für Kommunikationssysteme, Rapperswil, SG



# Evaluation von Inertial Measurement Units

## Diplomanden



Céline Rohner



Fabio Savi

**Aufgabenstellung:** Der Projektpartner Tecan Schweiz AG ist ein Hersteller von Liquid-Handling-Robotern. Die Positionsbestimmung dieser Roboter wird durch Encoder und deren mechanische Beziehung zum Manipulator gelöst. Für diese Art von Positionsbestimmung muss die Anlage sehr steif und fest aufgebaut sein, da die mechanischen Beziehungen zwischen Messort und Manipulator meist stark vereinfacht sind und ein Encoder nur in eine vorgegebene Dimension misst. Um die Positionsbestimmung zu verbessern, sollen die Encoder-Messungen mit weiteren Sensoren, die in alle Dimensionen messen können, unterstützt werden. Ein geeigneter Typ Sensor für solch eine Aufgabe ist die sogenannte Inertiale Messeinheit oder auch IMU. Im Rahmen dieser Arbeit wurde untersucht, ob sich der Einsatz von Inertialen Messeinheiten für die Positionsbestimmung eignet. Dazu sollen Vergleichsmessungen erstellt werden. Um die Vergleichsmessungen zu erstellen, soll eine Testanlage in Zusammenarbeit mit Tecan aufgebaut werden.

**Vorgehen:** Es wurden verschiedene IMU miteinander verglichen. Durch den Vergleich verschiedener Kriterien, wie Offset und Rauschverhalten, konnte eine engere Auswahl an IMU besorgt werden. Durch Anforderungen an die Kommunikation mit den IMU und weitere Experimente mit den Sensoren konnte die Auswahl schliesslich auf eine IMU begrenzt werden. Um die Kommunikation zwischen IMU und Computer zu bewältigen, wurde ein Arduino Due verwendet. Um die Daten der Sensoren zu speichern, wurde ein externer FRAM benützt, da der Arduino nur begrenzte Speicherressourcen aufweist. Tecan hat für die Testanlage einen Teil einer Anlage mit Roboter und Steuerprogramm zur Verfügung gestellt. Für die Achse von Tecan wurde eine Befestigung aufgebaut, und die Sensoren wurden auf dem Roboter platziert. Die Kommunikation zwischen Arduino und Steuerprogramm erfolgt über eine serielle Schnittstelle (Serial Port) und wird auf der Arduino-Seite via Zustandsmaschine koordiniert. Während einer Bewegung des Roboters auf der Achse können Daten der IMU und der Encoder aufgezeichnet werden. In Simulink wurde ein Beobachter zur Positionsbestimmung erstellt. Mithilfe des Beobachters und der gespeicherten Daten konnte eine Geschwindigkeits- bzw. eine Positionsschätzung erstellt werden.

**Ergebnis:** Mit den Messdaten der IMU konnten eventuell vorkommende mechanische Effekte, wie eine Verkippung der Anlage, untersucht werden. Durch einen Beobachter konnte eine Positions- sowie Geschwindigkeitsschätzung erstellt werden. Wobei sich die Geschwindigkeitsschätzung als ein wertvol-

les Werkzeug zur Unterstützung einer PD-Regelung herausstellte. Zudem wurde ein Vergleich von mehreren Beobachtern erstellt. Dieser Vergleich liefert Kenntnisse über das Verhalten der Modelle und die Auswirkungen auf die Positionsschätzung. Wir empfehlen den Einsatz von IMU, denn in diesen steckt Potenzial zur Verbesserung der Positionsbestimmung. Durch ihren Einsatz kann die Beobachtbarkeit erweitert werden.

## Inertiale Messeinheit MPU9250

Eigene Darstellung



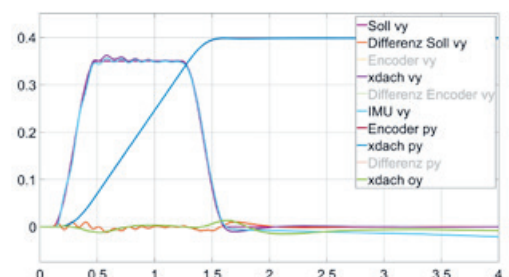
## Testanlage für die Positionsbestimmung mit IMU

Eigene Darstellung



## Geschwindigkeits- und Positionsschätzung des Beobachters

Eigene Darstellung



## Referent

Prof. Michael Hubatka

## Korreferentin

Dr. Antje Rey, E. Blum & Co. AG, Zürich, ZH

**Themengebiet**  
Regelungstechnik /  
Control Theory

**Projektpartner**  
Tecan Schweiz AG,  
Männedorf, ZH

# Modellierung und Regelung einer Drohne mit Mantelpropellerantrieb

## Weiterentwicklung einer Drohne mit innovativem Antrieb, um ihr Regelverhalten zu verbessern

### Diplomanden



Daniel Honegger



Patrick Jansky

**Ausgangslage:** Im Herbstsemester 2021 wurde als Studienarbeit eine Drohne mit Mantelpropeller entworfen und aufgebaut. Ihr Ziel war es, einen funktionierenden Prototyp herzustellen und diesen an Ort und Stelle schweben zu lassen. Die Regelung einer Drohne mit Mantelpropeller unterscheidet sich stark von derjenigen eines herkömmlichen Quadrocopters, da anstelle von vier Propellern ein einzelner Mantelpropeller den kompletten Schub der Drohne generiert. Dieser Schub wird anschliessend mittels vier Klappen umgelenkt, um eine Schubvektorsteuerung betreiben zu können. Nach der Inbetriebnahme ist nicht viel Zeit für die Entwicklung des Reglers übrig geblieben. Der entworfene Regler hat die Drohne schweben lassen können, während eines 50-Sekunden-Flugs driftete die Drohne aber in einem Bereich von 20 m<sup>2</sup> um den Startpunkt.

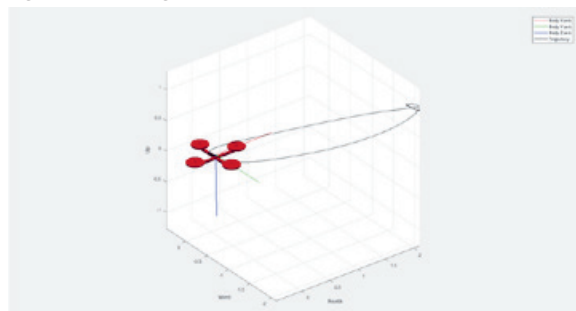
**Ziel der Arbeit:** In dieser Bachelorarbeit geht es primär darum, dieses Driften zu minimieren. Dafür soll ein neuer zustandsraumbasierter Regler entwickelt sowie ein genaueres Modell des Flugkörpers, der Sensoren und der Aktorik erstellt werden. Diese Daten sollen in einem Simulationsmodell zusammengefasst und darauf aufbauend der Regler entworfen werden. Dieser Regler soll schlussendlich auf dem Flugcomputer der Drohne implementiert und geprüft werden.

**Ergebnis:** Nach der Modellierung der Drohne und deren Komponenten konnte ein neuer linear-quadratischer Regler (LQR) entworfen werden. Zusätzlich wurde ein Beobachter für die Schätzung des Zustandes nach dem linear-quadratischen-gaussischen Verfahren (LQG) entwickelt. Mit diesen Änderungen

konnte der Drift der Drohne auf einen Bereich von unter 1 m<sup>2</sup> reduziert werden. Als limitierende Faktoren wurden die Modellierung der Aktorik sowie die Latenzzeit der Daten des GPS-Moduls identifiziert. Zukünftig könnten diese Faktoren verbessert und der Umfang der Arbeit erweitert werden, indem die Steuerung der Drohne über eine Fernsteuerung ermöglicht wird.

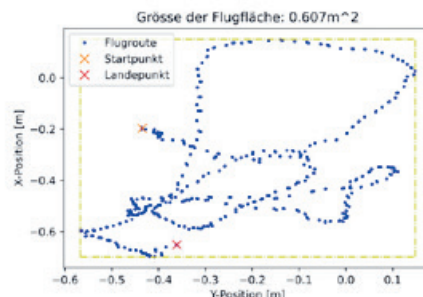
### Simulierter Flug mit Positionsänderung

Eigene Darstellung



### Position bei einem finalen Flug

Eigene Darstellung



### Drohne im Flug

Eigene Darstellung



### Referent

Prof. Dr. Markus Kottmann

### Korreferent

Dr. Markus A. Müller,  
Frei Patentanwaltsbüro  
AG, Zürich, ZH

### Themengebiet

Regelungstechnik /  
Control Theory

### Projektpartner

ICOM Institut für  
Kommunikations-  
systeme, Rapperswil,  
SG



# Collaborative Indoor Localization System based on Angle of Arrival and RSSI

## Graduate Candidates



Philippe Frey



Pascal Schärer

**Objective:** Localization in indoor environments tends to be significantly more difficult compared to its outdoor counterpart, due to factors such as multipath occurring due to complex geometries of different rooms. As an attempt to improve the position of a device, this thesis sheds a light on a Collaborative Indoor Positioning System (CIPS) based on Received Signal Strength Indicator (RSSI) and Angle of Arrival (AoA) technology which was enabled by the Bluetooth 5.1 Protocol. The goal is to improve the position estimation of a Test Node (TN) by combining these two measurement parameters.

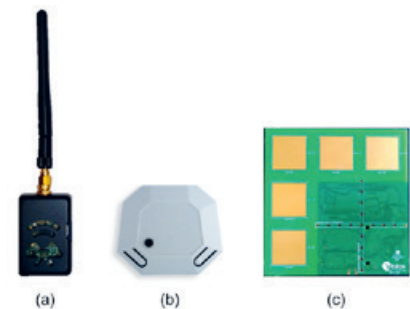
**Approach / Technology:** In a first step, the two localization methods based on RSSI and AoA are investigated separately and test environments with defined Anchor Nodes (AN) and TNs, shown in Fig. 1, are set up. For the positioning with RSSI a simple propagation model is used in combination with a trilateration algorithm to find the position of the TN geometrically. Additionally, the AoA system is used to find the angles of specific TNs by measuring the phase difference of an impinging signal on the antenna array at the ANs. As shown in Fig. 2, the two subsystems are then combined in a rectangular test environment, to form a CIPS. The peculiarity of CIPS is that it attempts to improve the position of TNs that can only use RSSI using ranging information to hybrid TNs whose positions are estimated using additional AoA information.

**Result:** As shown in Fig. 3, the accuracy of the estimated positions using only RSSI can be significantly improved by using a CIPS, based on implemented weighting algorithms and selective optimizations.

Values like the estimated distances between the nodes, the standard deviation of a set of measurements or a defined trust factor are indicators to form the weight factors, which are then used in the trilateration process, to improve the position of the nodes only capable of measuring RSSI.

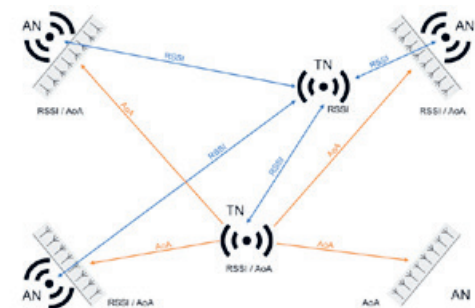
**Fig. 1: Used hardware for measurements: RSSI node (a), AoA node (b), antenna array (c).**

Own presentation



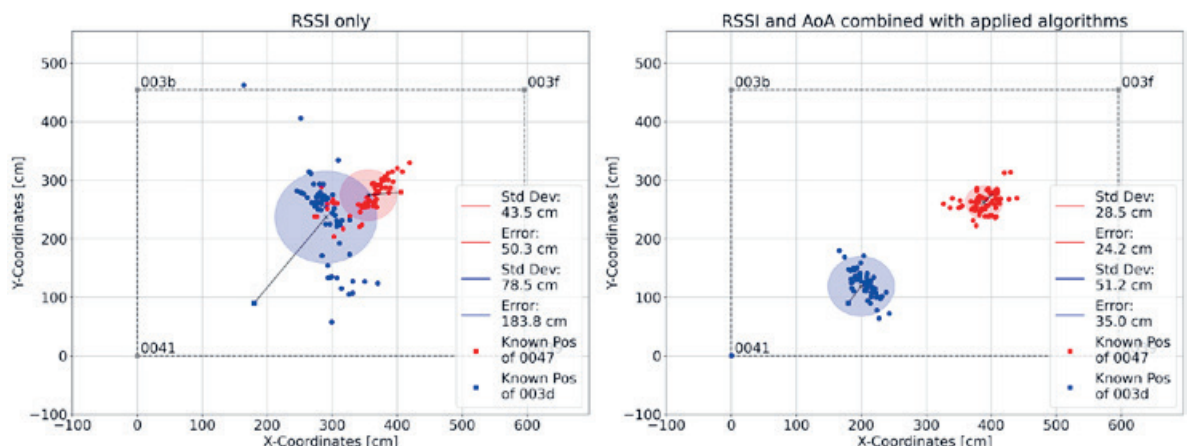
**Fig. 2: The setup of the CIPS with the two used methods AoA and RSSI.**

Own presentation



**Fig. 3: Estimated positions based on RSSI only measurements (left), and combined RSSI and AoA measurements (right).**

Own presentation



**Advisors**  
 Prof. Dr. Heinz Mathis, Michel André Nyffenegger

**Co-Examiner**  
 Mischa Sabathy, SPEAG, Zürich, ZH

**Subject Area**  
 Wireless Communications

**Project Partner**  
 ICOM Institute for Communication Systems, Rapperswil, SG

# Multi-Channel RF Signal Testbed

## Graduate Candidates



Raphael Bürgin



Alain Marrer

**Introduction:** This thesis investigates estimating the material properties of an object inserted into a radio channel based on the change of received signal strength. The electrical material characteristics of the object lead to attenuation of the signal, as it travels from the transmitter through the object to the receiver. By observing the progression of the received signal strength indicator (RSSI) on the receiver end, it may be possible to infer the material properties of the object in between the antennas.

**Approach / Technology:** A measurement setup with suitable low-cost transmitter and receiver is developed. It is operating in the 2,4 GHz ISM band and able to utilize all dedicated Bluetooth channels to send and receive signals. A Python script is handling the entire setup, including setting the transmitting power, switching channels, logging and visualizing the RSSI progression, and executing suitable post-processing algorithms in order to observe the change of the object's material parameters. To obtain sufficient data for post-processing and estimation model development, the signals are transmitted several times per minute via each channel as the material parameters of the object in the radio channel change.

**Result:** The RSSI progression can be successfully measured and logged on a computer. The resulting noisy data is filtered, and fitted via suitable curve fitting methods to model the change of the object's material properties, and finally graphically displayed as RSSI time plot or heat map. By analyzing the data obtained and processed in this way, some unique features that allow for the detection of certain material changes based on the RSSI measurements are identified.

To apply this measurement procedure to live data, a set of reference measurement data is collected, which is then used to estimate a model that links the measured RSSI data to the associated material properties. At the current stage, the desired material parameter can be estimated with an accuracy of 5%.

## Advisors

Prof. Dr. Heinz Mathis,  
Selina Rea Malacarne

## Co-Examiner

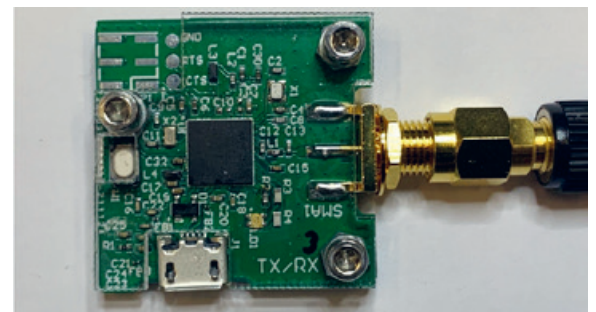
Mischa Sabathy,  
SPEAG, Zürich, ZH

## Subject Area

Wireless Communica-  
tions

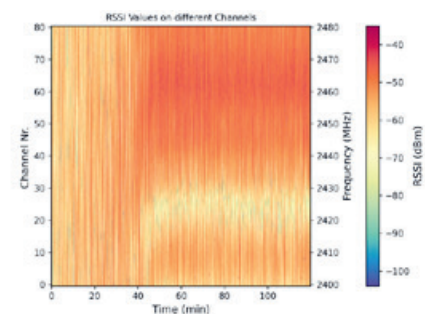
## The designed hardware

Own presentment



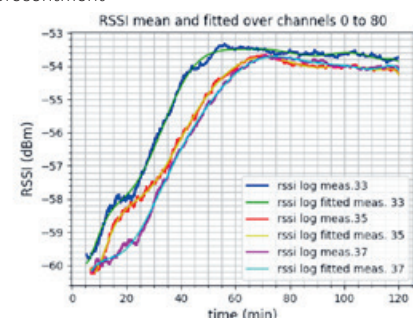
## Heat map of RSSI measurement no. 33

Own presentment



## RSSI values of three different measurements

Own presentment





# Multiport Extension for Measuring N-Port Networks using a Two-Port VNA

Graduate Candidate



Andreas Roman Kellermann

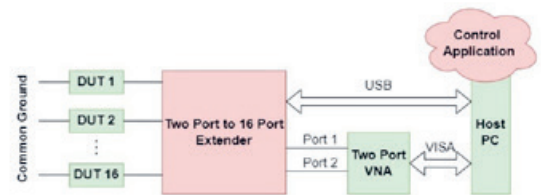
**Introduction:** Many applications require accurate measurements of multiport networks. A particular area of interest considers advanced wireless charging solutions that no longer simply consist of two magnetically coupled coils, but an entire array of coils that can localize, track and charge multiple devices simultaneously. To characterize and optimize such systems, the impedance matrix of the entire system must be known accurately. In the radio frequency range (typically starting at a few MHz and extending well into the hundreds of GHz), this task is usually performed using a vector network analyzer (VNA). These instruments feature a high dynamic range, enabling accurate measurements of very low coupling impedances. However, they typically only feature two to four measurement channels; instruments with more channels are very expensive and not readily available. Measuring multiport networks with two- or four-port VNAs becomes a (prohibitively) tedious and error-prone endeavor and may fail to achieve the required accuracy.

**Objective:** The goal of this thesis is to develop a multiport network extender for network measurements in the frequency range from 50 to 200 kHz and ideally up to 15 MHz. The extender shall provide at least 10 extended ports to a two-port VNA by means of a switching matrix. Because of the expected very low coupling coefficients (typically  $0.001 < k < 1.0$ ) between the coils, very low signal levels are to be expected. Hence, calibration, stability and isolation are key parameters for accurate measurement results. In addition to the hardware development, the evaluation of different switching matrix approaches, the development of a calibration method, an estimation of the achievable accuracy, as well as providing a software solution for handling the VNA and port extender, are part of the project.

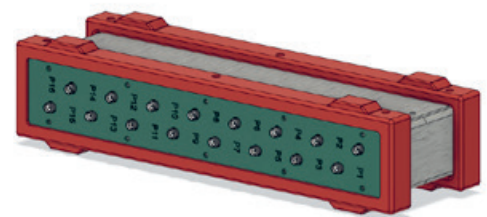
**Result:** Two 16-port extenders have been developed (Fig. 2); one is based on a solid-state matrix and the other features a more conventional relay matrix. Both technologies have been pursued, to be able to compare the off-isolation performances (Fig. 3). Both approaches work well in the desired frequency range from 50kHz to 15 MHz. However, at frequencies above 1 MHz, some limitations in the measurement range exist for weak coupling coefficients ( $k < 0.1$ ). These limitations are due to the finite isolation between the on and off channels in the two active extended ports. Various calibration and de-embedding routines have been evaluated, implemented and tested. The resulting accuracy of port-extended measurements has been evaluated via simulations and by comparison to measurements without port extension.

The two extenders have the same mechanical dimensions and interfaces, feature a galvanically decoupled USB interface with the same protocol and are housed in a custom sheet metal housing that shields against electromagnetic interference. A host PC command line interface has been developed to automatically acquire the full impedance matrix of all selected ports.

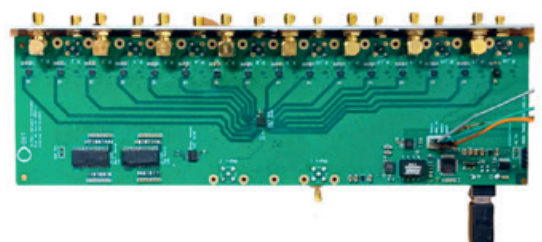
**Fig. 1:** The port extender can be used to measure up to 16 networks using a two-port vector network analyzer (VNA).  
Own presentation



**Fig. 2:** The finished product features 16 extended ports in a compact form factor and comes in a custom enclosure.  
Own presentation



**Fig. 3:** The solid state port extender board assembled with front panel during testing.  
Own presentation



**Advisors**  
Prof. Dr. Hans-Dieter Lang, Nicola Ramagnano

**Co-Examiner**  
Mischa Sabathy, SPEAG, Zürich, ZH

**Subject Area**  
Wireless Communications

**Projektpartner**  
ICOM Institute for Communication Systems, Rapperswil, SG

# NTAG5-Based Wireless Sensors for Body-Worn Biomedical Applications

## Protecting workers with near-field powered sensors

### Graduate Candidates



Fabian Dubacher



Alain Keller

**Objective:** Near-field communication (NFC) is a technology that enables wireless communication between devices in close proximity based on inductive coupling. In general, such a communication link is established between an active reader and a passive tag. Beyond communicating, NXP's NTAG 5 is able to harvest additional energy from the active reader's magnetic field to power other system components. This technology is envisioned to be a key ingredient for body-worn, textile-based sensor applications. The objective of this project is to analyze the feasibility and possibilities of such systems and to build a demonstrator for a set of defined use cases.

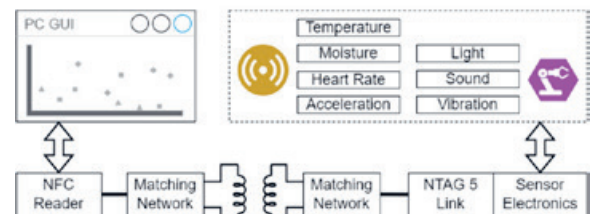
**Approach:** To determine the performance of different coil geometries, several textile-based reader and tag coils as well as suitable impedance matching networks were fabricated and evaluated. Based on these observations and analytical calculations, a model was created that shows the dependence of the available power on the orientation of the coils. This model can be used to design coils for specific applications.

Various sensor and actuator types were evaluated with respect to the power delivery limitations of the NTAG 5. For demonstrational purposes, a small multi-purpose PCB hosting the NTAG 5 chip, power supply and sensor electronics was developed and incorporated into body-worn textiles. In addition, a software was developed that allows control and data display through a graphical user interface.

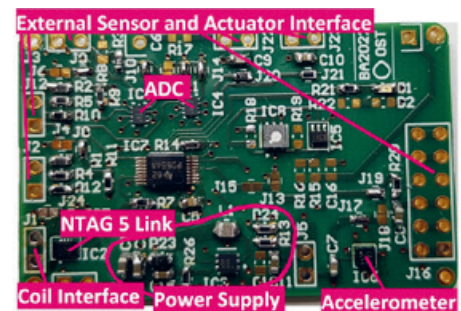
**Result:** A fully functional demonstrator was produced, consisting of two combinations of shirts and sweat-shirts equipped with various coils, sensors and actuators.

Both coil configurations allow wireless power transfer close to the 30 mW output power limit of the NTAG 5. Hence, it could be demonstrated that the wireless sensor system envisioned in the objective is indeed practically realizable and enables a variety of sensing applications, including heart rate monitoring as well as moisture, temperature, and acceleration measurement.

**Block diagram of the envisioned NTAG5-based sensor system.**  
Own presentation



**The printed circuit board hosting the NFC Tag, power supply and sensor electronics.**  
Own presentation



**Demonstration setup with software on the left and textile-based hardware used for worker protection on the right.**  
Own presentation



**Advisors**  
Prof. Dr. Hans-Dieter Lang, Nicola Ramagnano

**Co-Examiner**  
Mischa Sabathy, SPEAG, Zürich, ZH

**Subject Area**  
Wireless Communications

**Project Partner**  
Dynavision AG, Zug, ZG

## Unsere Institute am Campus Rapperswil-Jona

**IBU** INSTITUT FÜR  
BAU UND UMWELT  
IBU Institut für Bau und Umwelt  
ibu@ost.ch, www.ost.ch/ibu

**ins** INSTITUTE FOR  
NETWORKED SOLUTIONS  
INS Institut für vernetzte Systeme  
ins-support@ost.ch, www.ost.ch/ins

**ICOM** Institut für  
Kommunikationssysteme  
ICOM Institut für Kommunikationssysteme  
icom@ost.ch, www.ost.ch/icom

**IPEK** INSTITUT FÜR PRODUKTDESIGN,  
ENTWICKLUNG UND KONSTRUKTION  
IPEK Institut für Produktdesign,  
Entwicklung und Konstruktion  
rj-info-ipek@ost.ch, www.ost.ch/ipek

**IET** INSTITUTE FOR  
ENERGY TECHNOLOGY  
IET Institut für Energietechnik  
iet@ost.ch, www.ost.ch/iet

**irap** INSTITUT FÜR  
RAUMENTWICKLUNG  
IRAP Institut für Raumentwicklung  
irap@ost.ch, www.irap.ch

**IFS** INSTITUTE FOR  
SOFTWARE  
IFS Institut für Software  
stefan.keller@ost.ch, www.ost.ch/ifs

**iwk** INSTITUT FÜR WERKSTOFFTECHNIK  
UND KUNSTSTOFFVERARBEITUNG  
IWK Institut für Werkstofftechnik  
und Kunststoffverarbeitung  
rj-iwk@ost.ch, www.ost.ch/iwk

**ikik** INSTITUT FÜR KOMMUNIKATION  
UND INTERKULTURELLE KOMPETENZ  
IKIK Institut für Kommunikation und  
Interkulturelle Kompetenz  
rj-ikik@ost.ch, www.ikik.ch

**SPF** INSTITUT FÜR  
SOLARTECHNIK  
SPF Institut für Solartechnik  
info@spf.ch, www.spf.ch

**ilf** INSTITUT FÜR  
LANDSCHAFT UND FREIRAUM  
ILF Institut für Landschaft und Freiraum  
ilf@ost.ch, www.ost.ch/ilf

**UMTEC** INSTITUT FÜR UMWELT- UND  
VERFAHRENSTECHNIK  
UMTEC Institut für Umwelt- und  
Verfahrenstechnik  
umtec@ost.ch, www.umtec.ch

**ILT** INSTITUTE FOR LAB AUTOMATION  
AND MECHATRONICS  
ILT Institut für Laborautomation  
und Mechatronik  
rj-ilt@ost.ch, www.ost.ch/ilt

**werz** INSTITUT FÜR WISSEN  
ENERGIE UND ROHSTOFFE ZUG  
WERZ Institut für Wissen,  
Energie und Rohstoffe Zug  
werz@ost.ch, www.ost.ch/werz

**IMES** Institut für Mikroelektronik  
und Embedded Systems  
IMES Institut für Mikroelektronik und  
Embedded Systems  
imes@ost.ch, www.ost.ch/imes



Titelbild: Marc Weiler Photography

OST – Ostschweizer Fachhochschule  
Studiengang Elektrotechnik  
Oberseestrasse 10  
8640 Rapperswil  
Switzerland

T +41 58 257 41 11  
ost.ch/elektrotechnik



Rapperswil-Jona

