



OSTBAYERISCHE
TECHNISCHE HOCHSCHULE
REGENSBURG

FMS-BERICHTE

Hans Meier, Michael Niemetz und Andrea Reindl (Hrsg.)

Seminar zu aktuellen Themen der Elektro- und Informationstechnik

20. Mai 2021

Inhaltsverzeichnis

Vorwort

Vortragstag 1

Rechnerstrukturen Hardware/Software

- 1 The Rust Programming Language: a Comparison to C/C++ and Python
Michael Emmert
- 5 RISC-V Architecture: Features, Advantages/Disadvantages, Applications and Comparison to ARM
Sven Glück

Quantum Computing

- 10 Post-Quantum-Kryptographie: Gitterbasierte Kryptosysteme als Chance der Zukunft
Eva Freiling

Vortragstag 2

Erneuerbare Energien

- 15 Energiewende: Ziele und Erreichtes
Dominik Brandl

Energieeffizienz

- 20 Wireless Power Transfer: Applications, Technologies and Challenges
Sebastian Schindler
- 25 Technology Analysis of Multi-Storey Zero-Energy Buildings in a Two Climate Zone Comparison
Nicolas Kaul

Vortragstag 3

Kommunikation

- 30 Basics and Challenges of Raytracing for the Simulation of Wave Propagation
Franziska Rasp
- 35 Speech Recognition: Current Technology, Possibilities and Limitations
Monika Akstaller
- 39 BroadR-Reach: Analysis of the Features of an Ethernet Two-Wire Transmission
Daniel Wetzell

v Robotik und Machine Learning 44

- 1 44 Human-Robot Collaboration: The State of Development and Current Challenges
Michael Jupke
- 1 50 Unbemannte Luftfahrzeuge: Ein Überblick ziviler Anwendungen und die wichtigsten Herausforderungen für die Forschung
Michael Bodensteiner
- 55 "Deep Reinforcement Learning" für Computerspiele
Philipp Hohlfeld

10 Vortragstag 4 60

Energienetze, -verteilung und Elektronik 60

- 60 GaN und SiC in der Leistungselektronik: Chancen und Herausforderungen
Kevin Böhm
- 15 64 Cyber-Sicherheit im Smart Grid
Theresa Brem

Elektromobilität 68

- 20 68 Elektromobilität: Der Stand anderswo in der Welt
Pascal Hammer
- 73 Electric Vehicles as Power Generators and Intermediate Storage: Motivation, Current Discussion, Forecast
Thomas Singer

Vortragstag 5 78

Batterien und Energiespeicher 78

- 30 78 Battery Technologies: New Developments
Karing, Maria

Kommunikation 83

- 83 Communication in Multi-Microcontroller Systems
Viola Schneider
- 88 MQTT: Konzept, Vorteile, Einsatzbereiche, Vergleich mit XMPP
Tobias Ostermeier

Vorwort

Dieser Bericht entstand auf Initiative der Studierenden des 2020 neu gegründeten Masterstudiengangs „Elektro- und Informationstechnik (MEI)“, die an der Pflichtlehrveranstaltung „Forschungsmethoden und Seminar (FMS)“ im Wintersemester 2020/21 teilnahmen.

Diese Lehrveranstaltung hat das Ziel, systematisch an das wissenschaftliche Arbeiten, speziell die Wissenschaftskommunikation, heranzuführen. Daher war geeignete Literatur zu einem individuellen Thema zu recherchieren, Veröffentlichungen auf ihre Relevanz hin zu beurteilen und letztendlich eine eigene Ausarbeitung basierend auf der Literaturrecherche zu erarbeiten und diese in einem Vortrag zu präsentieren.

Parallel dazu erfolgte im Theorieteil die entsprechende Hinführung zu den verschiedenen Elementen der Wissenschaftskommunikation:

- Bedeutung der Wissenschaftskommunikation für die Arbeit der Ingenieure in Forschung und Entwicklung
- Literaturrecherche, Suchmaschinen, Sichtung und Analyse vorhandener Publikationen, Bewertung der Qualität aufgefundener Fachliteratur, Auswahl geeigneter Materialien für die eigene Arbeit
- Aufbereitung und Darstellung der recherchierten technischer Inhalte in Form einer seitenanzahlbegrenzten wissenschaftlichen Ausarbeitung
- Einhalten formaler Randbedingungen bzgl. Strukturierung, einschl. Bildnachweise und Zitationsstile
- Peer-review-Prozess bei wertschätzender Beurteilung der Leistung anderer
- Publikumsangepasstes Aufbereiten komplexer fachlicher Inhalte mit hochschulöffentlicher Präsentation der Ergebnisse
- Führen mündlicher wissenschaftlicher Diskurse

Nachdem die Masterstudierenden in der Regel über noch keine eigene wissenschaftliche Forschungserfahrung bzw. -inhalte verfügen, lag der wählbare Schwerpunkt der Literatursuche auf der Bearbeitung von vorgegeben aktuellen technischen oder gesellschaftspolitischen Forschungsthemen.

The Rust Programming Language: a Comparison to C/C++ and Python

Michael Emmert

Faculty of Electrical Engineering and Information Technology
Ostbayerische Technische Hochschule
Regensburg, Germany
michael.emmert@st.oth-regensburg.de

Abstract—Even though there are a lot of popular programming languages, the variety is pretty limited when it comes to system programming: The C/C++ language family is dominant in that field. With Rust, a new system language was released in 2015. Unlike in C/C++, manual memory management is not required in Rust. But other popular languages like Java, C# or Python also do not require manual memory management. The specialty of Rust is that it does not make use of a garbage collector, which would lead to a significant performance loss. With its *ownership* feature, Rust promises to provide memory safety without overhead. Besides ownership, there are other unique characteristics of the Rust language that will be covered in this paper. An untypical approach for modern languages is not fully supporting object-oriented programming. For example, Rust does not allow the use of typical inheritance, which is a basic concept of object-oriented languages.

In this paper, Rust will be compared to the most popular system language family (C and C++) and to Python, a popular high-level programming language. Therefore, the focus will be on the outstanding concepts of each language and on the different approaches the languages take to accomplish fundamental tasks like memory management.

Finally, we want to state that the Rust language provides relevant advantages over C/C++ in terms of safety and over high-level languages in terms of performance.

Index Terms—programming languages, system programming, Rust, memory management, memory safety

I. INTRODUCTION

In 2014, the so-called *Heartbleed* vulnerability was discovered. This is a bug in the OpenSSL library which allowed attackers to read parts of the memory of remote computers or web servers. It was caused by a programming mistake with buffer handling so that parts of the memory that contain data from other applications were sent as a response to a manipulated request. The reason why this was possible is that there were no checks if the length of the requested data exceeds the buffer length. With OpenSSL being widely used, a lot of systems were affected. [1], [2]

This is a prominent, but by far not the only example of such problems. Studies show that software written in C or C++ often contains bugs or security vulnerabilities that are directly related to the design of the C/C++ language [3]. Errors in memory management, for example, could be avoided by automated memory management. Programming languages like Python do not require manual memory management and could

prevent those problems. But most higher-level languages can not provide sufficient performance and low-level control to develop software like drivers, operating system components or software for embedded systems [3], [4].

A new programming language that could solve this problem is Rust. Its first stable version was released in 2015 [5]. Rust claims to provide safety *and* performance by providing abstractions and high-level language features that compile to low-level code [6], [7].

This paper provides an overview about the concepts of the Rust programming language and compares them to the C/C++ language family and to Python. Therefore, the type system, the approach to memory management and the object-oriented features of the languages will be discussed. After that, the safety features of Rust will be investigated in comparison to the other languages. Then we will take a look at how the languages can be used for embedded systems programming.

II. LANGUAGE CONCEPTS

In this section, we want to cover some programming language concepts in which the the considered languages show essential differences.

A. Compilation or Interpretation

C and C++ programs are compiled to machine code executables before the program execution [8].

The way how Python code is handled depends on the Python interpreter [9]. When the standard interpreter implementation "CPython" is used, the Python code is compiled to bytecode that is then interpreted [10]. This compilation can happen before the execution or when a Python file is loaded by the interpreter [8], [11].

Like C and C++, Rust is directly compiled to machine code before the execution [6], [7]. The fact that Rust is a compiled language gives it a significant performance advantage over interpreted languages like Python, because an interpreter introduces additional overhead when a program is executed [8].

B. Type Systems and Mutability

The type systems of programming languages can be classified in two aspects: The first one is if the language has a static or dynamic type system. In a static type system, a variable

is defined with a concrete data type and only values of this data type can be assigned to this variable. The data type of the value the variable is holding can not change. In a dynamic type system, a variable can hold values of different data types; the type of the value that is assigned to the variable can change during the runtime of the program. [12]

The C/C++ language family has a static type system, the Python type system is dynamic [8], [12].

Even though it is not necessary to explicitly declare a type for a variable in Rust, Rust is a statically typed language. If a variable is declared without providing a type, the Rust compiler determines the type from the initialization. This type is then bound to the variable and can not change. [6]

In modern C++, this behavior can also be found when using the `auto`-keyword [13].

The second category is if the type system is considered weak or strong. In a strong type system, the type of data can not be changed implicitly. In a weak type system, changing the type of data is possible even without explicit declaration. [12]

In C/C++, implicit type conversions are possible. Char values, for example, can be converted to integer values without explicit declaration. This makes C and C++ weakly typed languages [12]. Python is strongly typed. An object can not change its datatype without explicit declaration [12]. Like Python, Rust is strongly typed. Implicit conversions are not possible, even between different integer types, like Listing 1 shows. A type conversion requires explicit declaration. [6]

```
1 let mut a: i16 = 7;
2 let mut b: i8 = 12;
3 a = b; //does not compile "expected i16, found i8"
4 a = b as i16; //explicit type conversion is
   required
```

Listing 1. Strong Type System in Rust

Another aspect related to variables is in which cases values that are assigned to variables can change. In Python, the value of all variables can be changed after declaration. There is no way of making them immutable. In C/C++, variables can be declared immutable with the `const`-keyword [14], [15]. It is considered good coding style to declare variables as `const` wherever possible [13], [16].

In Rust, variables are immutable by default and have to be declared as mutable using `mut` if their value should be changeable [6]. Immutable variables avoid the accidental change of a value that is not meant to be changed. Trying to change the value would result in a compilation error.

The mentioned aspects of the Rust type system make Rust less error-prone than C/C++ and Python: The static type system of Rust enables the compiler to perform type checks because the type of a variable is always known [12], the strong type system avoids errors caused by interpretation of data with the wrong type [12] and the default immutable variables avoid accidental changes of values that should not change [16].

C. Memory Management

C and C++ mainly leave the task of memory management to the programmers. Although there has been a bit of automation

to memory management introduced in modern C++ with the smart pointer types [13], memory management is still a major task when developing software in C and C++. [8]

As the *Heartbleed* example showed, with this concept unrecognized programming mistakes can lead to major software bugs. This may be one reason why high-level languages choose automatic ways of memory management.

A widely used concept is using a garbage collector. The garbage collector is a program that runs in the background and looks for unused objects in order to remove them from memory. The disadvantages of garbage collection are the additional resources the garbage collector needs to run and the loss of deterministic behavior because with the garbage collector running from time to time it is not clear when an unused object will be deleted. Furthermore, the runtime of programs is not determined because garbage collector runs delay the execution of the program. [8]

Another approach to automatic memory management is reference counting: There is an additional counter stored with every object which tracks how many valid variables reference the object. When this counter drops to zero, the object is not needed any more and can be deleted [17], [18]. This principle is used in modern C++ with the shared pointer type [13].

But pure reference counting can not prevent memory leaks in all cases because it can not detect unused circular reference constructs [17].

Python uses a combination of reference counting and a garbage collector [19].

Rust handles memory management with its *ownership* concept. Non-primitive values have a variable that is the owner of the value. A value can only have one owner at a time. When the scope of the owner ends, the memory of the value can be freed. This ownership can be transferred from one variable to another, but then, the value can only be accessed over the variable the ownership was transferred to. The original owner then becomes invalid and can not be used any more. [6]

```
1 fn ownership1(){ // works
2   let s = String::from("Hello World");
3   println!("{}", s);
4 }
5
6 fn ownership2(){ // does not compile
7   let s = String::from("Hello World");
8   let s2 = s; // ownership transfer
9   println!("{}", s); // s is no longer the owner
10 }
```

Listing 2. Example for the Rust ownership mechanism

Listing 2 shows a simple example for the ownership mechanism in Rust. In the function `ownership1`, a string object is created and assigned to `s`. `s` is the owner and the object is automatically deleted when the scope of `s` ends. The `ownership2`-function does not compile because with the assignment in line 8 the ownership of the string object is transferred to the variable `s2` and `s` can not be used to access the object any more.

Values can also be borrowed using references. With borrowing, it is not necessary to transfer the ownership, for example

to pass a value to a function. But the compiler performs strict lifetime checks for borrowed values to ensure there are no invalid references to values that were already deleted because the owner went out of scope. [6]

Besides ownership, Rust also has smart pointers that are similar to the smart pointers in C++. The `Box<T>` pointer can be compared to the unique pointer in C++, the `Rc<T>` uses a reference counting mechanism and enables Rust to have multiple references to one object. Its equivalent in modern C++ is the shared pointer. [6]

Furthermore, it is possible to declare blocks of code as `unsafe` in Rust. In these unsafe blocks, raw pointer operations are possible. This allows raw memory access which may be required for some low-level programming tasks. [6]

D. Object Orientation

The Rust documentation addresses the question if Rust is an object-oriented programming language. It makes clear that there are multiple definitions of object-oriented programming languages and it depends on the definition whether Rust is considered object-oriented. [6]

Due to the multiple definitions of object orientation, it can be assumed that there is no key feature on which it is determined if a language is object-oriented or not. In [20], a set of key aspects of object-oriented programming languages are proposed. In the following, we will refer to these aspects and how they are implemented in the languages under consideration in this paper.

1) *Objects, Classes and Methods*: According to [20], objects are items containing data and ways to interact with their data. These ways to interact with the data of an object are called methods. A class is a description for similar objects. [20]

C++ and Python fully support these concepts. In both languages, classes with data and methods can be created and instantiated to get objects [11], [15].

C has structs as user-defined data containers, but there are no method definitions for these structs [14].

In contrast to C structs, structs in Rust can have methods that are declared in the `impl` section [6]. This feature gives the Rust structs the same behavior as objects and classes in other languages.

2) *Encapsulation*: Encapsulation is the concept of limiting the access to an object's data or methods [20].

In C++, the access to data and methods can be restricted by using access modifiers (`public`, `private` or `protected`) [15].

Although Python does not have such access modifiers, there is a convention that variables and methods should not be used from outside a class if their name starts with an underscore [11].

In Rust, the access modifiers work on a module level instead of a class level like in C++. All items (e.g. functions, variables, methods but also structs) are private when declared without an access modifier. This means that they can only be accessed from within the same module they were declared in. When an

item should be accessible from another module, it has to be declared public using the `pub` keyword. [6]

C does not have encapsulation features.

3) *Inheritance*: "The data and behavior of one class is included in or used as the basis for another class" [20].

According to this definition, C++ and Python support inheritance, because derived classes inherit the variables and methods from the base class [11], [15].

In Rust, a struct can not be derived from another struct. But there is the traits feature: A struct can implement a trait by providing the methods that were defined in the trait. [6]

Traits provide common behavior between the structs that implement the trait, but no common data. Although Rust does not have typical inheritance, traits are a feature that can be used in situations where inheritance would be used in other languages.

C does not provide inheritance features.

4) *Polymorphism*: "Different classes may respond to the same message and each implement it appropriately" [20].

In C++ and Python, polymorphism can be achieved by using inheritance and overwriting methods of the base class in the derived classes. These methods can then be called on objects of the base class as well as on objects of the derived classes in the same way, but the different classes implement their own behavior for these methods. Because the Rust trait feature provides the "inheritance" of methods, the same can be done with traits [6].

As these aspects show, Rust supports a lot of object-oriented concepts. But the lack of typical inheritance can impact the software architecture because it may for example not be possible to use object-oriented design patterns where traits are not sufficient.

III. SAFETY IN RUST

When it comes to safe programming, it is important to avoid runtime errors because they can lead to a dangerous state of the system [12]. The errors should be found at compile time instead. Because of its dynamic type system and Python not being a compiled language, it is difficult to avoid runtime errors. Apart from this, because safety-critical software often has real-time requirements or has to run on embedded hardware, it is mainly developed in C or C++ [4], [12].

As a reaction to problems caused by some unsafe features in C and C++, there are standards like the C programming guidelines created by the Motor Industry Software Reliability Association (MISRA), which provide rules for programming safety-critical systems in these languages [4], [12]. But because not following those guidelines would still result in valid code, additional review effort is necessary to ensure the implementation follows the guidelines. Pinho et al. [4] show that there are many MISRA guidelines that target problems which are eliminated in Rust because code that would violate these rules does not compile.

With the type system and memory management, two other aspects were mentioned where Rust provides better safety

features than C/C++, because of the stricter compile-time type checks and the elimination of errors in manual memory management.

Another point that can be mentioned in the context of safety is that Rust is designed to be thread-safe, which means that there will be no unwanted behavior when memory is accessed by multiple threads at the same time [4], [21].

IV. EMBEDDED SYSTEMS

All languages under consideration are relevant in the embedded field. Because embedded software is low level and has to run on devices with poor performance, most embedded software is developed in C or C++.

As embedded devices became more powerful in recent years, it is possible to run MicroPython, a Python interpreter for microcontrollers, on more powerful embedded devices [22], [23]. But due to the performance deficit compared to C/C++ and since the MicroPython libraries to interact with the hardware of the microcontroller are mainly written in C, MicroPython is more of a supplement than a replacement for C/C++ [24].

Because Rust compiles to machine code and raw memory access is possible in unsafe code, embedded development in Rust is possible. Besides the Intel and AMD x86 architecture (32 and 64 bit), a Rust compiler that targets the ARM platform is also available. So Rust supports ARM microcontrollers like Cortex-M processors. Support for other embedded platforms like RISC-V is still in development. [4], [25]

V. CONCLUSION

According to [6] and [7], Rust claims to be a system programming language that makes developing low-level software safer and easier. The aspects mentioned in this paper show that this claim is justified.

Although its ownership principle provides automated memory management, having to apply the rules may have a noticeable impact on the software design and a high-level language may be preferred because of the lower development effort. So, Rust can mainly play its strengths in low-level and performance-critical software development.

Compared to other programming languages, Rust is comparatively new. Its popularity and ecosystem are still growing. So, Rust could become a serious competitor to the C/C++ language family, where, for a long time, there was no real alternative for low-level software development.

REFERENCES

- [1] Z. Durumeric *et al.*, "The matter of heartbleed," in *Proceedings of the ACM SIGCOMM Internet Measurement Conference, IMC*. New York, New York, USA: Association for Computing Machinery, 2014, pp. 475–488. [Online]. Available: <http://dl.acm.org/citation.cfm?doid=2663716.2663755>
- [2] D. A. Wheeler, "Preventing heartbleed," *Computer*, vol. 47, no. 8, pp. 80–83, 2014.
- [3] A. Balasubramanian *et al.*, "System Programming in Rust: Beyond Safety," in *Proceedings of the Workshop on Hot Topics in Operating Systems - HOTOS*, vol. Part F1293. New York, NY, USA: IEEE Computer Society, may 2017, pp. 156–161. [Online]. Available: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3102980.3103006>
- [4] A. Pinho *et al.*, "Towards rust for critical systems," in *Proceedings - 2019 IEEE 30th International Symposium on Software Reliability Engineering Workshops, ISSREW 2019*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019, pp. 19–24.
- [5] "Announcing Rust 1.0 — Rust Blog," Accessed: Dec. 12, 2020. [Online]. Available: <https://blog.rust-lang.org/2015/05/15/Rust-1.0.html>
- [6] "The Rust Programming Language," Accessed: Nov. 15, 2020. [Online]. Available: <https://doc.rust-lang.org/book/>
- [7] "Frequently Asked Questions - The Rust Programming Language," Accessed: Dec. 1, 2020. [Online]. Available: <https://prev.rust-lang.org/en-US/faq.html>
- [8] K. D. Lee, *Foundations of Programming Languages*, ser. Undergraduate Topics in Computer Science. Cham: Springer International Publishing, 2017. [Online]. Available: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-70790-7>
- [9] "The Python Language Reference — Python 3.9.0 documentation," Accessed: Nov. 15, 2020. [Online]. Available: <https://docs.python.org/3/reference/>
- [10] "Glossary — Python 3.9.0 documentation," Accessed: Nov. 15, 2020. [Online]. Available: <https://docs.python.org/3/glossary.html>
- [11] "The Python Tutorial — Python 3.9.0 documentation," Accessed: Nov. 15, 2020. [Online]. Available: <https://docs.python.org/3/tutorial/>
- [12] D. W. Hoffmann, *Software-Qualität*, ser. eXamen.press. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013. [Online]. Available: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-35700-8>
- [13] S. Meyers, *Effektives modernes C++*, 1st ed. Beijing: O'Reilly, 2015.
- [14] G. Gonzalez-Morris and I. Horton, *Beginning C*. Apress, 2020.
- [15] Y. Dong and F. Yang, *C++ Programming*, L. Zheng, Ed. De Gruyter, 2019. [Online]. Available: <https://www.degruyter.com/view/title/518360>
- [16] J. Eyolfson and P. Lam, "How C++ Developers Use Immutability Declarations: An Empirical Study," in *Proceedings - International Conference on Software Engineering*, vol. 2019-May. IEEE Computer Society, 2019, pp. 362–372.
- [17] D. L. Detlefs *et al.*, "Lock-free reference counting," in *Proceedings of the Annual ACM Symposium on Principles of Distributed Computing*. New York, New York, USA: Association for Computing Machinery (ACM), 2001, pp. 190–199. [Online]. Available: <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=383962.384016>
- [18] S. M. Blackburn and K. S. McKinley, "Ulterior reference counting," in *Proceedings of the 18th ACM SIGPLAN conference on Object-oriented programming, systems, languages, and applications - OOPSLA '03*. New York, New York, USA: Association for Computing Machinery (ACM), 2003, p. 344. [Online]. Available: <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=949305.949336>
- [19] D. M. Beazley, *Python essential reference*, 4th ed., ser. Developer's library. Indianapolis, Ind.: Sams, 2009.
- [20] D. J. Armstrong, "The quarks of object-oriented development," pp. 123–128, 2006. [Online]. Available: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/1113034.1113040>
- [21] T. Uzlu and E. Saykol, "On utilizing rust programming language for Internet of Things," in *Proceedings - 9th International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks, CICN 2017*, vol. 2018-Janua. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018, pp. 93–96.
- [22] G. Gaspar *et al.*, "MicroPython as a Development Platform for IoT Applications," in *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 1224 AISC. Springer, 2020, pp. 388–394. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-030-51965-0_34
- [23] N. Tollervey, *Programming with MicroPython: Embedded Programming with Microcontrollers and Python*. O'Reilly Media, 2017. [Online]. Available: <https://books.google.de/books?id=Bic3DwAAQBAJ>
- [24] S. Plamauer and M. Langer, "Evaluation of micropython as application layer programming language on cubesats," in *ARCS 2017: 30th International Conference on Architecture of Computing Systems*, 2017, pp. 1–9.
- [25] "Platform Support - The rustc book," Accessed: Jan. 9, 2021. [Online]. Available: <https://doc.rust-lang.org/rustc/platform-support.html>

RISC-V: Features, Advantages/Disadvantages, Applications and Comparison to ARM

1st Sven Glueck

Dept. of Electrical Engineering and Information Technology

OTH Regensburg

Regensburg, Germany

sven2.glueck@st.oth-regensburg.de

Abstract—When taking a look at the current development of the transistors on a chip and comparing it to Moores Law, one will recognize, that this forecast does not fit anymore. The chip industry has admitted, that they reached an endpoint in their technology. In order to still increase CPU speed, it is crucial to improve other components of processors. Therefore, it is worth taking a look into the current movement of the Instruction Set Architecture (ISA) development.

During the last 10 years, the most promising approach is RISC-V, an ISA based on the Reduced Instruction Set Computer (RISC) architecture. To evaluate the current position of RISC-V in the ISA duopoly of Intel and ARM (Advanced RISC Machines), we are taking a closer look at the RISC-V ISA. In order to discuss the advantages and disadvantages of this ISA, we first need to study its features. We are considering the modular design with its extensions, the privileged architecture, and the floating-point standard. Of the mentioned features, the most outstanding one is the modular design. With this concept fully customizable ISAs are possible. Even though the development is still in its beginnings, there are already plenty of possible applications. Therefore, we are focusing on applications in sectors of the Internet-of-Things (IoT), Artificial Intelligence (AI), cryptography, and space. For evaluating the chances of the RISC-V ISA, we are comparing it to one of its hardest competitors on the market, the ARM ISA.

Index Terms—RISC-V, Open-source hardware, Instruction Set Architecture, Microprocessor chips, Central Processing Unit, Reconfigurable architectures, System-on-Chip

I. INTRODUCTION

In 1965 Gordon E. Moore stated in his paper, that the number of components in an integrated circuit (IC) doubles every two years [1]. The most widely used projection derived from his thesis is used in the semiconductor industry, with doubling the number of transistors on a chip every two years. More transistors on a chip go hand in hand with increased processing speed. For more than 50 years it looked like the semiconductor industry can stick with this forecast and decrease the dimension of a single transistor. But in the last five years, the situation changed. Some scientists already called it dead, some still call it alive. The truth might be in between the two opinions but it is fact that the chip industry is already searching for other possibilities to still increase the processing speed. [2]

One component that is worth taking a closer look at is the Instruction Set Architecture (ISA). The ISA is the interface between hardware and software and gives the developer insights into the processor. Most of the ISAs on the market

originate from ARM (Advanced RISC Machines) and Intel and are proprietary. In the last years, a new ISA, named RISC-V (Reduced Instruction Set Architecture-V), rose in popularity. RISC-V is the fifth ISA, that is developed at the University of California at Berkley. Their idea is to make ISAs accessible for everyone and make it adaptable to project-specific needs. [3]

In this paper, we are giving an overview of the RISC-V architecture considering different aspects. In chapter II, we are talking about RISC-V in general. Then we are taking a closer look at the features of the new ISA in chapter III. The RISC-V architecture has some striking features, which can not be found in other ISAs. In the following chapter IV the advantages and disadvantages, which partly are a consequence of the features, are discussed. In order to get an overview of what the RISC-V architecture is suitable for, chapter V shows some applications. Chapter VI compares the RISC-V architecture to an already established ISA - the ARM architecture.

II. WHAT IS RISC-V?

The Department of Electrical Engineering and Computer Science at the University of California (UC) Berkley has a long history of designing RISC based ISAs. RISC-V is already the fifth ISA developed in this department. Starting in 1981 with RISC-I, they followed with RISC-II, SOAR, and SPUR. When starting the project, their main goal was to build an ISA suitable for many computing devices. There were two main design decisions, on the one hand, it should not be too complex and on the other hand, it should be free to everyone. [3]

III. FEATURES

At the very beginning of the RISC-V development key features for an effective ISA were defined. Based on those, a research on already existing ISAs was done. As it can be seen in Table I all considered ISAs had a lack of at least two essential features. Therefore, a completely new ISA was developed, whose design decisions were based on those features. [3]

The most outstanding feature of the RISC-V design is the modular design. There is no other ISA on the market that offers such a flexible design. In RISC-V one can build a custom ISA with a base version and extensions if needed. There exist

	MIPS	SPARC	Alpha	ARMv7	ARMv8	OpenRISC	80x86
Free and Open		✓				✓	
64-bit Addresses	✓	✓	✓		✓	✓	✓
Compressed Instructions	✓			✓			Partial
Separate Privileged ISA			✓				
Position-Indep. Code	Partial			✓	✓		✓
IEEE 754-2008					✓		✓
Classically Virtualizable	✓	✓	✓		✓		

TABLE I
COMPARISON OF DIFFERENT ISAs. [3]

four different base ISAs. The two 32-bit versions, RV32I and RV32E, only differ in the number of available general-purpose registers. The RV32I has 32 registers, whereas the smaller RV32E only has 16 registers. If more addressable memory is needed, it is intended to use the 64-bit version, RV64I. There is also a 128-bit version RV128I, which is planned for future applications. Every base version is sufficient enough to run a modern operating system. [3]

For more complex use cases, the base versions might not be sufficient enough. Therefore there is the possibility to add extensions to the base versions. Currently, there are 11 possible standard extensions, including an instruction set for atomic instructions, division and multiplication (M-extension), and floating-point (F- or D-extension). Some are already fixed, some are still under development. For an application that needs 32-bit instructions, multiplication, and single-precision floating-point, the RV132I ISA with corresponding extensions M and F are suitable. If needed instructions are not included in the standard extensions, there is also the possibility to add custom instructions to the ISA or develop an own extension. [4]

With the F and D extension, RISC-V offers floating-point support with regards to the IEEE 754 standard. Even though floating-point units are often used in data processing processors, it is only supported by 80x86 ISA and the ARMv8 (see Table I). [3]

Additionally, there is the chance to run a high-end operating system (OS) like Linux on a RISC-V-based processor. Therefore RISC-V offers the privileged architecture, which supports a Machine Mode (M), a User Mode (U), a Supervisor Mode (S), to run the Kernel, and a Hypervisor extension (H) for virtualization. [5]

IV. ADVANTAGES AND DISADVANTAGES

Developing a new ISA based on lacking features of other ISAs brings, on the one hand, plenty of advantages. On the other hand, new disadvantages rise.

A. Advantages

One of the main reasons for developing RISC-V was the lack of an open-source ISA. The ISAs offered by ARM and

Intel are proprietary. To get the license for using an ARM ISA it could take up to 2 years of negotiation and can cost a fortune. This means that those ISA are not affordable for small companies or academic purposes. An open ISA will help the industry to progress as it did with open-source software. RISC-V will allow more companies to develop their own processor design. This will lead to better innovations constantly as there will be an open-market competition, which was not present by now. Another advantage, that results from the open-source concept, is that developers can branch an existing version of RISC-V and optimize it for their specific task. [6]

Before RISC-V has entered the market companies which needed a processor mostly had to take an already existing chip from the market, even though they did not need all the features. Most of the time this led to a waste of energy and performance. With the four different base versions and the extensions, developers can design chips for their own needs. They do not have to adapt their applications to the chip anymore. [7]

B. Disadvantages/Challenges

Due to the short history of RISC-V on the market, we should rather say challenges instead of disadvantages. The first challenge a new software or hardware faces when entering the market is to achieve trustworthiness. When buying a seventh-generation chip based on the ARM or Intel ISA developers know that this chip has a field-proven design. RISC-V has proven that chips can be built with their architecture, but there are plenty of special cases that can not be tested and are sometimes needed for applications. It will take some years to get a verified design. [9]

The open-source concept and the resulting possibility for everyone to build their own processor could cause compliance issues. Compliance in the microcontroller industry means that software, tools, and operating systems can run on different implementations. In the case of RISC-V, this means that if a customer buys a processor from a RISC-V supplier he wants to make sure that this product is compliant with the ISA standard. Furthermore, it should be guaranteed that different implementations could cooperate with each other. Before the

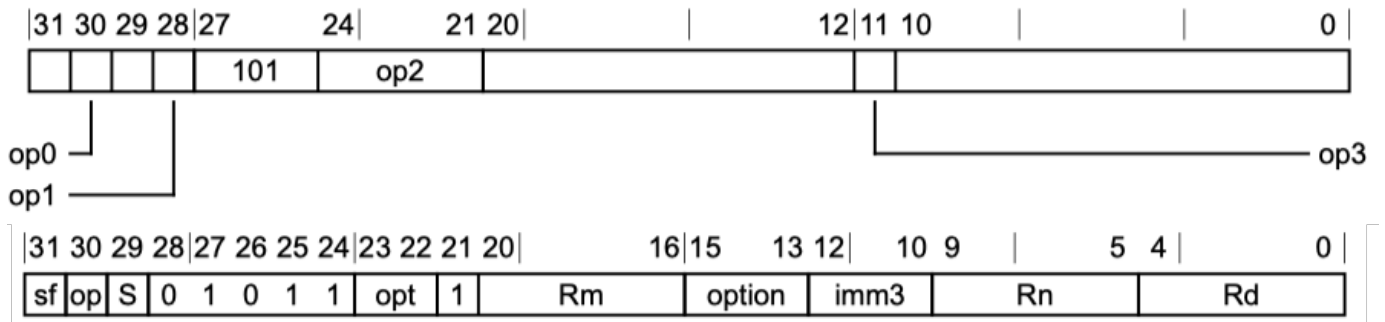


Fig. 1. ARMv8 instruction format, top: data processing for register, bottom: instruction for add group. [8]

era of RISC-V, there were no compliance checks needed as the chips were produced from the same company. Therefore there is no experience available in this testing area and has to be built from scratch. [10]

V. APPLICATIONS

Even though the RISC-V ISA is not older than ten years, there are already many applications that are using this ISA or plan to use it in the future. One main application RISC-V aimed at since the beginning is the Internet-of-Things (IoT). Based on the open-source design, processors can be built for around 1\$ and therefore enable many more IoT devices [6]. The two other requirements for future IoT processors are power efficiency and high computational power. As already mentioned earlier, RISC-V processors are designed for the application itself. Researches on already existing RISC-V branches have shown that, with the modular design, high power-efficient and computational processors can be built. [11], [12]

Another application area that is closely related to the IoT is artificial intelligence (AI). With an increasing number of IoT devices using AI, the need for small and cheap AI processors is getting more significant. The launch of RISC-V seems to be the right technology introduced at the right time to address this issue. First projects are already built on RISC-V ISAs. At the University of Nanjing, a convolutional neural network (CNN) was developed on an E203 CPU. The E203 is a 32-bit RISC-V processor with the multiplication and division, atomic instructions and 16-bit compression instruction extension packages [13]. Another project developed amongst others from scientists at Harvard University adapted TensorFlow Lite to a RISC-V processor. They took the RISC-V vector extension as a base and changed the instructions for their specific needs in order to run TensorFlow Lite [14].

For all ongoing and planned missions in space, the European Space Agency (ESA) is using processors based on the SPARC ISA, which is also a proprietary-free architecture. The ESA is using an open-source ISA as the error detection is much faster than just within the space community. In recent years, SPARC has lost its place in worldwide applications. With RISC-V bringing all needed requirements like openness, modularity, security, and fault tolerance, the ESA is considering RISC-V as

an alternative. The ESA already published a paper where they propose a roadmap for bringing RISC-V processors to space. For their used microcontrollers they suggest using a Zerisky processor which is based on RV32IMC. The RV32IMC is the 32-bit RISC-V version with the standard extension for compressed instructions (C) and the standard extension for division and multiplication (M). Instruments that need more computational power e.g. On-Board-Computers (OBC) or General-Purpose Processors (GP), should be based on RISC-V versions with more addressing space like the RV64I base version. [15]

Even though we just took a look at three possible application areas it can be seen that RISC-V is suitable for a wide variety of areas.

VI. COMPARISON TO ARM

Because of the fact that ARM's ISA is also based on the RISC concept, RISC-V is seen as ARM's hardest competitor. ARM has already published its 8th ISA version, ARMv8, in 2012. It is worth taking a look at the similarities and differences of both architectures. Arm offers as RISC-V different base versions of its ISA, a 64-bit version, the A64, a 32-bit version, the A32, and a mixed 32- and 16-bit version, the T32. The 64-bit version was introduced with ARMv8, whereas the two other versions are based on pre-ARMv8 versions. [16]

The way licensing works for most customers at ARM is, that they license a specific version of a processor e.g. the Cortex M3. There are only a handful of companies that ARM allowed to design their own processor based on their ISA. ARM also offers five different extensions to their base version, but not all are addable to every base version. The extensions cover custom instructions, digital signal processing, floating-point units, machine learning support, and data analysis support. The custom instruction extension can, for instance, just be added to the Cortex-M33 and Cortex-M55 processors. That is a difference from RISC-V, where every extension can be added to every base version. [16]

When comparing both ISAs and starting to look into the specifications, one will immediately recognize the complexity of ARM compared to RISC-V. The 32-bit base version of RISC-V has a total of 47 instructions, whereas the equivalent ARMv7 has more than 600 instructions. For the 64-bit

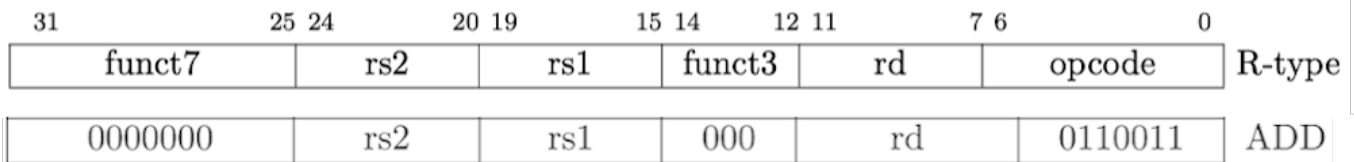


Fig. 2. RISC-V instruction format, top: R-type, bottom: ADD instruction. [3]

versions, the difference is even more. One reason for that is that ARMv8 includes division and multiplication and floating-point instructions, whereas RISC-V has an own extension for each one. Researchers at UC Berkley have shown some benefits of the less complexity of RISC-V. They compared the Rocket Core to one of the smallest ARM Cores, the ARM Cortex A5. Both cores have a processing speed over 1 GHz, but have differences in their dimensions. The Rocket Core needs 13 mm^2 less space than the Cortex A5. In order to get a basis for comparing those two cores, they did the same benchmark tests for the Rocket Core as ARM has done for the A5. The results have shown that the Rocket Core is more area-efficient, which means the Rocket Core needs less area for more processing speed. The same result was found out for the power-efficiency. [3] [17]

RISC-V defines six different types of instructions in its ISA. They are divided into the following: register-register operations (R-type), immediate operations (I-type), store operations (S-type), and upper immediate operations (U-type). The other two types are variants of the S- and U-type. ARM divided its ARMv8 ISA into five different types: data processing for immediate, data processing for registers, load and store, branches and exceptions, and floating-point. Furthermore, the types are split into subtypes. There, a first difference can be seen. RISC-V divides its instructions with the arrangement of bits, whereas ARM divides it mainly with the functionality of the instructions. In order to get a better understanding of what this means for the instruction format, we are taking a closer look at a specific example. For RISC-V we are taking the ADD instruction, which is a subtype from the R-type group. The top of Figure 2 shows the R-type in general, whereas the bottom shows the add instruction. On the ARMv8 side, we choose the equivalent add class from the data processing for register group. Figure 1 shows the data processing for register group instruction at the top. At the bottom, the add class can be seen. The add class in ARMv8 consists of several add and sub instructions. In RISC-V the operation code for the groups is always located at bits 0 to 6, whereas in ARM it is placed at bits 25 to 28. In the case of the data processing group, the opcode at bits 25 to 27 (b101) specifies the group. Bit 28 is used for further separation within the group. For both ISAs the register and immediate operands are always located at the same bits. To specify the operations within a type, RISC-V has a maximum of another 11 bits split into two fields, depending on the type. For ARM the distribution of the remaining bits is a bit more complex. For the data processing group, there are another four fields for the opcode, but not all of them

are needed in every subgroup. In the case of the add group, bits 28 (b0), bit 21 (b1), and bit 24 (b1) are needed for the opcode. The remaining bits are used for specific instructions or additional options. The status flag (S) update can be turned on, for instance, for the adds instruction. ARMv8 supports both, 32-bit and 64-bit. The general-purpose registers have a length of 64 bit, which can also be accessed as 32-bit registers. Therefore, for data processing instructions, that can work with both sizes, the last bit of the instructions (sf) gives the size to operate. The remaining two bit fields, option and imm3, can be used for extended register operations (e.g. shifting) on the second operand. The different design of the instruction formats has an impact on the design of the arithmetic unit (ALU). A detailed explanation of the ALU for both architectures would break the scope of this paper, but for instance, ARM needs an additional barrel shifter on one of the two operands to implement the shifting option. [3] [8]

VII. CONCLUSION

Considering the aspects of RISC-V shown in this paper the ISA is definitely a part of processors that should be considered when designing one. RISC-V can be considered as an alternative to ARMs and Intels ISA. For companies which plan to build their own processor, the modular design and the open-source concept could be a crucial factor for using RISC-V. Especially in the IoT segment, RISC-V could bring a huge progress, because no license and royalty fees will enable cheaper processors. In order to get in more devices, RISC-V needs to show that they can handle the shown challenges. Even if RISC-V is still in its beginnings they have shown that they can address such challenges and keep up with Intel and ARM. The community around RISC-V, which is growing daily, has shown that the industry needed an open-source ISA. If only the ISA will be able to increase the processing speed that needs to be shown in the future, but it will definitely be a part of the solution. RISC-V has already shown that a compact ISA can keep up with the processing speeds of Intel and ARM and as mentioned the same processing speed can be achieved with less chip area.

REFERENCES

- [1] G. E. Moore, "Cramming more components onto integrated circuits," *Proceedings of the IEEE*, vol. 86, no. 1, pp. 82–85, 1998.
- [2] L. Eeckhout, "Is Moore's Law Slowing Down? What's Next?" *IEEE Micro*, vol. 37, no. 4, pp. 4–5, 2017.
- [3] A. Waterman, "Design of the RISC-V Instruction Set Architecture," 2016.
- [4] A. Waterman and K. A. Asanovic, "The RISC-V Instruction Set Manual," vol. I, 2019.

- [5] A. Waterman, K. Asanovic, and SiFive Inc., “The RISC-V Privileged Architecture,” vol. II, 2019.
- [6] K. Asanović and D. Patterson, “Instruction Sets Should Be Free: The Case For RISC-V,” 2014.
- [7] S. Greengard, “Will RISC-V revolutionize computing?” *Communications of the ACM*, vol. 63, no. 5, pp. 30–32, 2020.
- [8] ARM, “ARM Architecture Reference Manual ARMv8, for ARMv8-A architecture profile,” 2015.
- [9] A. S. Mutschler, “RISC-V Pros And Cons,” 2017. [Online]. Available: <https://semiengineering.com/risc-v-pros-cons/> (Accessed: 2020-11-21)
- [10] B. Bailey, “The Challenge Of RISC-V Compliance,” 2019. [Online]. Available: <https://semiengineering.com/toward-risc-v-compliance/> (Accessed: 2020-11-22)
- [11] M. Gautschi, P. D. Schiavone, A. Traber, I. Loi, A. Pullini, D. Rossi, E. Flamand, F. K. Gürkaynak, and L. Benini, “Near-Threshold RISC-V core with DSP extensions for scalable IoT endpoint devices,” *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, vol. 25, no. 10, pp. 2700–2713, 2017.
- [12] P. D. Schiavone, F. Conti, D. Rossi, M. Gautschi, A. Pullini, E. Flamand, and L. Benini, “Slow and steady wins the race? A comparison of ultra-low-power RISC-V cores for internet-of-things applications,” *2017 27th International Symposium on Power and Timing Modeling, Optimization and Simulation, PATMOS 2017*, vol. 2017-Janua, pp. 1–8, 2017.
- [13] N. Wu, T. Jiang, L. Zhang, F. Zhou, and F. Ge, “A Reconfigurable Convolutional Neural Network-Accelerated Coprocessor Based on RISC-V Instruction Set,” *Electronics*, 2020.
- [14] P. Martinez, J. Lopez, F. J. Rodriguez, J. B. Wiggins, and K. E. Boyer, “Towards Deep Learning using TensorFlow Lite on RISC-V,” *Annual Conference on Innovation and Technology in Computer Science Education, ITiCSE*, p. 1291, 2020.
- [15] S. Di Mascio, A. Menicucci, E. Gill, G. Furano, and C. Monteleone, “Leveraging the openness and modularity of risc-v in space,” *Journal of Aerospace Information Systems*, vol. 16, no. 11, pp. 454–472, 2020.
- [16] ARM, “Instruction Sets Arm Developer.” [Online]. Available: <https://developer.arm.com/architectures/instruction-sets> (Accessed: 2020-11-25)
- [17] Y. Lee, A. Waterman, R. Avizienis, H. Cook, C. Sun, and V. Stojanovi, “RISC-V Processor with Vector Accelerators,” *Esscirc 2014*, pp. 199–202, 2014.

Post-Quantum-Kryptographie: Gitterbasierte Kryptosysteme als Chance der Zukunft

Eva Freiling
Fakultät Elektro- und Informationstechnik
Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg
Regensburg, Deutschland
eva.freiling@st.oth-regensburg.de

Zusammenfassung—Mit der erwarteten Realisierung von Quantencomputern steht die Kryptographie vor einer Herausforderung, da die Sicherheit der derzeit eingesetzten Verschlüsselungstechniken nicht mehr garantiert werden kann. Es wird nach Lösungen gesucht, die sowohl Angriffe von klassischen Computern als auch von Quantencomputern abwehren können. Während bei symmetrischen Verfahren die Verdoppelung der Schlüssellängen ausreichend ist, müssen die gängigen Verfahren in der asymmetrischen Kryptographie ersetzt werden. Eine vielversprechende Methode ist die gitterbasierte Kryptographie, die in diesem Paper genauer betrachtet wird. Sie baut auf der Schwere des „Shortest Vector Problem (SVP)“ auf, dessen Lösung selbst mit einem Quantencomputer nicht realistisch ist. Nach einer Einführung in die mathematischen Grundlagen werden die Einsatzmöglichkeiten genauer beschrieben. Diese umfassen asymmetrische Verschlüsselung, digitale Signaturen und Schlüsselaustauschmechanismen. Anschließend erfolgt ein Einblick in den Standardisierungsprozess des National Institute of Standards and Technology (NIST) mit Fokus auf der Bewertung gitterbasierter Kryptosysteme. Zum Schluss wird eine aktuelle Implementierung betrachtet, die sich derzeit in der engeren Auswahl dieses Prozesses befindet. In ihrer Gesamtheit zeigt diese Literaturarbeit, dass gitterbasierte Kryptosysteme eine Chance für die Zukunft darstellen.

Schlüsselwörter—*Postquantum-Kryptographie, gitterbasierte Kryptographie, Shortest Vector Problem, öffentliche Schlüssel, digitale Signaturen, Schlüsselaustauschmechanismen*

I. EINLEITUNG

In den vergangenen Jahren wurde die Forschung in Quantenmechanik stark gefördert. Experten gehen davon aus, dass es nur eine Frage der Zeit ist, bis die Realisierung von leistungsfähigen Quantencomputern gelingt. Diese nutzen quantenmechanische Phänomene, um mathematische Probleme zu lösen, die für herkömmliche Computer schwierig oder unlösbar sind. Auf der Schwere solcher Probleme basieren jedoch derzeit eingesetzte Verschlüsselungstechniken. [1–3]

Dabei wird zwischen symmetrischer und asymmetrischer Kryptographie unterschieden. Asymmetrische Verfahren nutzen die Eigenschaft von Einwegfunktionen, dass sie einfach zu berechnen, aber schwer zu invertieren sind [4, 5]. Ein Beispiel ist die Primfaktorzerlegung großer Zahlen auf deren Schwere unter anderem das aktuell eingesetzte RSA-Kryptosystem beruht. Bereits im Jahr 1994 zeigte Peter W. Shor mit dem „Shor-Algorithmus“, wie es unter Einsatz von Quantencomputern gelingt, Zahlen in polynomieller Zeit in Primfaktoren zu zerlegen. [6, 7]

Quantencomputer stellen folglich eine Bedrohung für die Sicherheit der digitalen Kommunikation dar. Es wird nach

geeigneten Maßnahmen gesucht, die das Versagen eingesetzter Verschlüsselungstechniken abwenden. Das Ziel der Post-Quantum-Kryptographie ist das Entwickeln neuer Verfahren, die sowohl gegenüber klassischen Computern als auch gegenüber Quantencomputern sicher sind. [1, 2]

Diese Literaturarbeit zeigt, dass gitterbasierte Kryptosysteme, die auf der Schwere des SVP beruhen, eine vielversprechende Alternative darstellen. Zur Veranschaulichung wurde das NTRU-Kryptosystem gewählt. Der Name stammt aus der Bezeichnung „N-th degree Truncated polynomial Ring Units“, woraus sich ableiten lässt, dass NTRU mit Polynomringen N-ten Grades arbeitet. Es ist eines der ältesten und bekanntesten Verfahren der gitterbasierten Kryptographie, was eine umfangreiche Suche nach potenziellen Angriffen, sowie eine daraus resultierende kontinuierliche Verbesserung des Systems ermöglichte. NTRU hat dadurch gute Chancen in Zukunft als Standard eingesetzt zu werden. [8, 9]

Zu Beginn dieser Arbeit werden in Abschnitt II Literaturvorschläge zur Vertiefung des Wissens aufgeführt. Anschließend gibt Abschnitt III eine Einführung in die mathematischen Grundlagen der Gitter und des SVP. In Abschnitt IV werden die allgemeinen Funktionsprinzipien der Einsatzgebiete der asymmetrischen Verschlüsselung, digitale Signaturen und Schlüsselaustauschmechanismen dargestellt. Abschnitt V geht auf den Standardisierungsprozess des NIST und auf die Bewertung eingereicherter, gitterbasierter Verfahren ein. Abschließend wird in Abschnitt VI das NTRU-Kryptosystem und dessen Schema zur Schlüsselerzeugung betrachtet.

II. VERWANTE ARBEITEN

Durch die umfangreiche Thematik können nicht alle komplexen Zusammenhänge vollständig behandelt werden. Das Verständnis einiger kryptographischer und mathematischer Begriffe wird vorausgesetzt. Nachfolgende Literatur soll als Hilfestellung zur Behebung von Unklarheiten oder zur Vertiefung des Wissens dienen.

[5] entspricht einer Enzyklopädie. Begriffe, die mit Kryptographie zusammenhängen, werden kurz und verständlich erklärt. Hier lässt sich die Bedeutung von Kryptosystemen, sowie symmetrischer und asymmetrischer Kryptographie nachlesen. Auch die Einsatzgebiete aus Abschnitt IV werden beschrieben.

In [8] befindet sich eine ausführliche Definition von mathematischen Gittern und dem SVP, sowie dem Nachweis der Schwere des SVP. Zusätzlich enthält es eine kurze Darstellung des NTRU-Kryptosystems.

Die Entwickler von NTRU geben in [9] und [10] eine ausführliche Beschreibung des NTRU-Kryptosystems. Sie stellen neben der Schlüsselerzeugung, die in Abschnitt VI.A betrachtet wird, auch das Schema der Ver- und Entschlüsselung mit NTRU dar. Auf die verwendeten mathematischen Operationen, wie Polynomringe, Faltung oder der Modulo-Operator, wird genauer eingegangen. [9] enthält zusätzlich Informationen zu aktuell eingesetzten Verfahren, wie das RSA-Kryptosystem.

III. MATHEMATISCHE GRUNDLAGEN

Zum besseren Verständnis gitterbasierter Kryptographie wird zunächst der Aufbau von Gittern und die Bedeutung des SVP genauer betrachtet.

A. Gitter

Gitter entsprechen diskreten Untergruppen des euklidischen Vektorraums. Wie in Abbildung 1 zu sehen ist, stellen sie anschaulich eine Menge von Punkten im n -dimensionalen Raum mit einer periodischen Struktur dar. [11]

Laut Definition ergibt sich ein n -dimensionales Gitter \mathbf{G} aus allen ganzzahligen Linearkombinationen einer Menge von linear unabhängigen Vektoren $\mathbf{b}_1, \dots, \mathbf{b}_m$ im euklidischen Vektorraum \mathbb{R}^n , mit $n \in \mathbb{N}$:

$$\mathbf{G}(\mathbf{b}_1, \dots, \mathbf{b}_m) = \{\sum_{i=1}^m x_i \mathbf{b}_i \mid x_i \in \mathbb{Z}\} \quad (1)$$

Die Vektoren \mathbf{b}_i mit $i \in \{1, \dots, m\}$ bilden eine Basis des Gitters und werden häufig in Form einer Matrix dargestellt:

$$\mathbf{B} = [\mathbf{b}_1, \dots, \mathbf{b}_m] \in \mathbb{R}^{n \times m} \quad (2)$$

Daraus ergibt sich die folgende äquivalente Schreibweise eines Gitters:

$$\mathbf{G}(\mathbf{B}) = \{\mathbf{B}\mathbf{x} \mid \mathbf{x} \in \mathbb{Z}^m\} \quad (3)$$

Wenn $n = m$ ist, wird ein Gitter als vollständig bezeichnet, wobei n der Dimension und m dem Rang des Gitters entspricht. [8, 11]

Abbildung 1 zeigt ein vollständiges zweidimensionales Gitter mit den Basisvektoren \mathbf{b}_1 und \mathbf{b}_2 . Alle Punkte des Gitters lassen sich als ganzzahlige Linearkombination dieser beiden Vektoren darstellen.

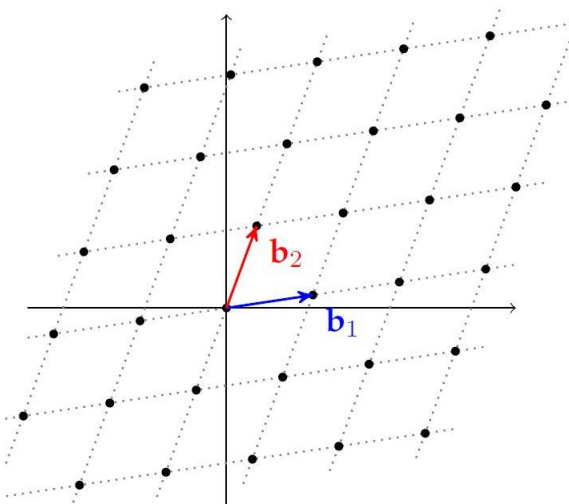


Abbildung 1: Zweidimensionales Gitter mit den Basisvektoren \mathbf{b}_1 und \mathbf{b}_2 [12]

Zu Rechenzwecken werden häufig ganzzahlige Koordinaten für die Basisvektoren $\mathbf{b}_1, \dots, \mathbf{b}_m$ gewählt. Die daraus entstehenden Gitter werden als ganzzahlige Gitter bezeichnet. Sie finden unter anderem beim SVP Verwendung, welches im nächsten Abschnitt genauer betrachtet wird. [9]

B. Shortest Vector Problem

Die Frage welcher Vektor in einem Gitter der Kürzeste ist, spielt in der gitterbasierten Kryptographie eine zentrale Rolle. Beim SVP versucht man anhand einer vorgegebenen Basis $\mathbf{B} \in \mathbb{Z}^{n \times m}$ einen Vektor $\mathbf{a} = \mathbf{B}\mathbf{x}$ (mit $\mathbf{x} \in \mathbb{Z}^m \setminus \{0\}$) zu finden, der nicht Null und gegenüber allen im Gitter möglichen Vektoren, bezüglich einer vorgegebenen Norm minimal ist. Meist wird dabei die euklidische Norm verwendet. [5, 8]

In Abbildung 2 ist ein weiteres zweidimensionales Gitter mit den Basisvektoren \mathbf{b}_1 und \mathbf{b}_2 dargestellt. Der rote Pfeil entspricht hier dem kürzesten Vektor des Gitters.

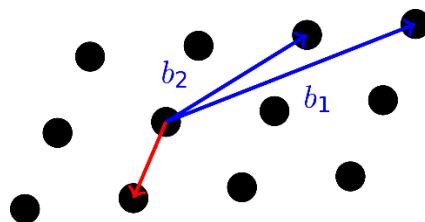


Abbildung 2: Kürzester Vektor des Gitters zur Basis $\mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2$ [13]

Was im Zweidimensionalen einfach erscheint, wird in höheren Dimensionen zu einem schweren Problem. Bis heute existiert kein Algorithmus, der den kürzesten Vektor in hochdimensionalen Gittern in polynomieller Zeit finden, oder seine Länge bestimmen kann. Gitterbasierte Kryptosysteme machen sich diese Eigenschaft zunutze. [2, 5, 14]

IV. EINSATZGEBIETE

Wie zu Beginn erwähnt wird in der Kryptographie zwischen symmetrischen und asymmetrischen Verfahren unterschieden. Symmetrische Verfahren basieren auf dem Einsatz geheimer Schlüssel. Nach aktuellem Kenntnisstand reicht die Verdopplung der Schlüssellänge aus, um diese Verfahren quantensicher zu machen. Asymmetrische Verfahren verwenden hingegen ein Paar aus öffentlichem und privatem Schlüssel, das mithilfe von Einwegfunktionen generiert wird. Da Einwegfunktionen gegenüber Quantencomputern nicht sicher sind, müssen asymmetrische Verfahren gänzlich ersetzt werden. Aktuelle Kryptosysteme entsprechen häufig einer Kombination aus symmetrischen Verfahren zur Verschlüsselung und asymmetrischen Verfahren zur Schlüsselerzeugung. Daher werden auch symmetrische Verfahren durch das Brechen asymmetrischer Verfahren beeinträchtigt. [1, 2]

Mithilfe gitterbasierter Kryptographie ist es möglich gefährdete Kryptosysteme verschiedener Einsatzgebiete zu ersetzen. Diese umfassen die asymmetrische Verschlüsselung, digitale Signaturen und Schlüsselaustauschmechanismen. Nachfolgend werden ihre grundlegenden Funktionsprinzipien beschrieben. [5, 14]

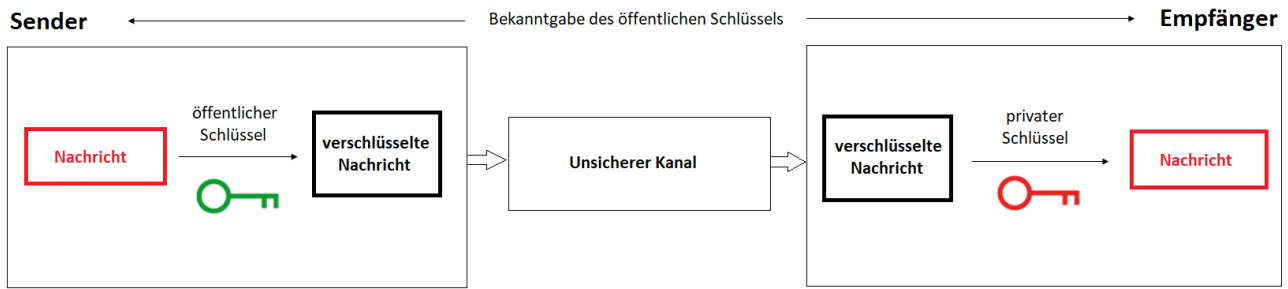


Abbildung 3: Schema der asymmetrischen Verschlüsselung

A. Asymmetrische Verschlüsselung

Die asymmetrische Verschlüsselung (siehe Abbildung 3) setzt sich aus den wesentlichen Teilaufgaben der Schlüsselerzeugung, Verschlüsselung und Entschlüsselung zusammen. Jeder Empfänger muss zu seinem privaten Schlüssel einen zugehörigen öffentlichen Schlüssel erzeugen und dem Sender zur Verfügung stellen. Der Sender verschlüsselt seine Nachricht mithilfe des öffentlichen Schlüssels und leitet diese anschließend über einen unsicheren Kanal weiter. Äquivalent zu symmetrischen Verfahren verwendet der Empfänger seinen geheimen, privaten Schlüssel zum Entschlüsseln der erhaltenen Nachricht. Ein gitterbasiertes Kryptosystem zur asymmetrischen Verschlüsselung wird in Absatz VI genauer betrachtet. [5, 15]

B. Digitale Signaturen

Digitale Signaturen werden verwendet, um die Urheberschaft einer Nachricht zu belegen. Es umfasst die Teilaufgaben Schlüsselerzeugung, Signieren und Verifizieren. Nachdem das Paar aus öffentlichem und privatem Schlüssel erzeugt wurde kann der Urheber aus den zu signierenden Daten und seinem privaten Schlüssel eine eindeutige Signatur berechnen. Die Signatur wird anschließend gemeinsam mit den Daten versendet. Der Empfänger kann die Signatur und damit die Urheberschaft der Daten mithilfe des öffentlichen Schlüssels verifizieren. [2, 5]

C. Schlüsselaustauschmechanismen

Mithilfe von Schlüsselaustauschmechanismen ist es zwei oder mehr Kommunikationspartnern möglich, sich auf einen gemeinsamen Schlüssel zu einigen, ohne diesen öffentlich preiszugeben. Dazu tauschen die Teilnehmer zu Beginn einen öffentlichen Schlüssel über einen unsicheren Kanal aus. Zusätzlich besitzen sie jeweils einen dazugehörigen privaten Schlüssel. Mithilfe des Wissens über beide Schlüssel kann jeder Teilnehmer für sich einen geheimen Sitzungsschlüssel erzeugen. [5, 15]

V. STANDARDISIERUNGSPROZESS DES NIST

Das NIST rief 2016 dazu auf Vorschläge für Kryptosysteme einzureichen, die gegenüber Quantencomputern sicher sind. Mit der Absicht für die zuvor beschriebenen Einsatzgebiete der asymmetrischen Verschlüsselung, digitalen Signaturen und Schlüsselaustauschmechanismen jeweils mindestens ein Verfahren zu standardisieren, startete der Post-Quantum-Kryptographie-Wettbewerb. [1]

Die erste Runde begann Ende 2017 durch die Einreichung der ersten Vorschläge. Es handelte sich dabei hauptsächlich um gitterbasierte, codebasierte und hashbasierte Verfahren. Innerhalb jeder Runde werden die Kryptosysteme nach Sicherheit, Performance und besonderen Merkmalen analysiert und bewertet. Anschließend erfolgt die Bekanntgabe der Verfahren, die für die nächste Runde akzeptiert wurden. Mithilfe der Analyse und Bewertung werden die Kryptosysteme kontinuierlich weiterentwickelt und verbessert. [16, 17]

Gegenüber den übrigen eingereichten Verfahren überzeugen gitterbasierte Kryptosysteme in allen Einsatzgebieten durch die einfache Umsetzbarkeit und Effizienz der Algorithmen. Sie besitzen eine gute Performance, erzielen eine hohe Geschwindigkeit bei der Ver- und Entschlüsselung und benötigen vergleichsweise wenig Speicherplatz zur Absicherung der Schlüssel. Trotz des andauernden Wettbewerbs gab das NIST bereits am Ende der zweiten Runde bekannt, dass in den Bereichen der asymmetrischen Verschlüsselung und digitalen Signaturen jeweils mindestens ein gitterbasiertes Verfahren standardisiert werden soll. [1, 11, 17]

VI. DAS KRYPTOSYSTEM NTRU

Das Kryptosystem NTRU befindet sich derzeit in der dritten Runde des Standardisierungsprozesses des NIST und zählt zu den drei Finalisten im Bereich der asymmetrischen Verschlüsselung [17]. Es wurde bereits 1996 von den Mathematikern Jeffrey E. Hoffstein, Jill C. Pipher und Joseph H. Silverman vorgestellt und zählt dadurch zu den ältesten und am meisten erforschten gitterbasierten Kryptosystemen [10].

Mit NTRU ist sowohl die Schlüsselerzeugung als auch die Ver- und Entschlüsselung möglich. Zur Erzeugung digitaler Signaturen existiert das separate Verfahren „pqNTRUSign“, welches zwar mit dem Kryptosystem NTRU verwandt ist, jedoch auf einem anderen Gitterproblem basiert. Es wurde ebenfalls im Standardisierungsprozess der NIST eingereicht, hat jedoch die zweite Runde nicht erreicht und soll im Folgenden nicht weiter betrachtet werden. [4, 8, 16]

Nachfolgend wird das Schema der Schlüsselerzeugung mit NTRU genauer betrachtet und der Zusammenhang zu Gittern dargestellt.

A. Schlüsselerzeugung mit NTRU

NTRU basiert auf Polynomen, deren Berechnungen im Polynomring $R = \mathbb{Z}[X]/(X^N - 1)$ stattfinden. Dies steigert die Effizienz des Algorithmus und hat den Vorteil, dass die Polynome automatisch durch den maximalen Grad N beschränkt sind. [5, 8] Die Verwendung der Polynomringe soll hier nur zu Vollständigkeitszwecken erwähnt werden. Die

Thematik stellt ein weiteres komplexes Thema dar, das hier nicht weiter betrachtet wird. In Abschnitt II befinden sich Literaturvorschläge zur Vertiefung des Wissens über das Kryptosystem NTRU und seiner genauen Funktionsweise. Das nachfolgende Schema ist auch ohne das Verständnis von Polynomringen nachvollziehbar.

Die Schlüsselerzeugung umfasst nichts weiter als die Wahl verschiedener Parameter und Polynome unter vorgegebenen Bedingungen, sowie mathematische Berechnungen mithilfe der Faltung und des Modulo-Operators. Dabei wird anhand des folgenden Schemas vorgegangen:

1. Die Parameter N, p, q werden so festgelegt, dass
 - $q > p$ und
 - $ggT(q, p) = 1$.
 Primzahlen sind bei der Wahl der Parameter sehr beliebt.
2. Die Polynome $f(x)$ und $g(x)$ werden so gewählt, dass ihre Koeffizienten $\in \{-1, 0, 1\}$ sind.
3. Die Inversen $f_p(x)$ und $f_q(x)$ berechnen sich aus
 - $f_p(x) = f^{-1}(x) \bmod p$ und
 - $f_q(x) = f^{-1}(x) \bmod q$.
4. Das Polynom $h(x)$ ergibt sich aus
$$h(x) \equiv f_q(x) * g(x) \bmod q.$$

Das gewählte Polynom $f(x)$ entspricht dabei dem privaten Schlüssel und das berechnete Polynom $h(x)$ dem öffentlichen Schlüssel. Für gewöhnlich wird das Polynompaar $(f(x), f_p(x))$ als privater Schlüssel gespeichert, um eine höhere Geschwindigkeit beim Entschlüsseln zu erzielen. Die Parameter p und q , sowie das Polynom $g(x)$ haben keine höhere Bedeutung und werden lediglich für die oben aufgeführten Berechnungen benötigt. [4, 9]

B. NTRU als Gitter

Das zugrundeliegende mathematische Problem von NTRU kann als SVP in einer speziellen Klasse von Gittern interpretiert werden. Mithilfe des zuvor ermittelten öffentlichen Schlüssels $h(x)$ der Form

$$h(x) = h_0 + h_1x + \dots + h_{N-1}x^{N-1}$$

lässt sich das NTRU-Gitter G_h^{NTRU} erzeugen. Es kann durch die Matrix M_h^{NTRU} beschrieben werden, die aus vier $N \times N$ -Blöcken gebildet wird. [9]

$$M_h^{NTRU} = \left(\begin{array}{cccc|cccc} 1 & 0 & \dots & 0 & h_0 & h_1 & \dots & h_{N-1} \\ 0 & 1 & \dots & 0 & h_{N-1} & h_0 & \dots & h_{N-2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & h_1 & h_2 & \dots & h_0 \\ \hline 0 & 0 & \dots & 0 & q & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & q & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & q \end{array} \right)$$

Abbildung 4: NTRU-Gitter aus $h(x)$ in Matrixdarstellung [9]

Wie in Abbildung 4 zu sehen ist, setzt sie sich aus der Einheitsmatrix (oben links), der Nullmatrix (unten links), der Einheitsmatrix multipliziert mit q (unten rechts) und zyklischen Permutationen der Koeffizienten von $h(x)$ (oben rechts) zusammen. Dazu ergibt sich folgende Kurzschreibweise:

$$M_h^{NTRU} = \begin{bmatrix} E & h \\ 0 & qE \end{bmatrix} \quad (4)$$

Der private Schlüssel $f(x)$ ist nachweislich äquivalent zum kürzesten Vektor im Gitter G_h^{NTRU} . [9]

Versucht ein Angreifer aus der Kenntnis des öffentlichen Schlüssels $h(x)$ auf den privaten Schlüssel $f(x)$ zu schließen, entspricht das dem Lösen des SVP, was bisher weder mit klassischen Computern noch mit Quantencomputern möglich ist. [2]

VII. FAZIT UND AUSBLICK

Parallel zur Forschung an Quantencomputern wird die Entwicklung von Post-Quantum-Kryptographie vorangetrieben. Der Schaden, der durch die Realisierung von Quantencomputern entsteht, kann durch neu entwickelte Verschlüsselungstechniken begrenzt werden.

Verfahren der gitterbasierten Kryptographie gelten als Chance der Zukunft, da sie eine vielversprechende Alternative zu gefährdeten Kryptosystemen darstellen. Auf der Basis des SVP ist ein Angriff nur durch dessen Lösung erfolgreich, was bis heute weder mit klassischen Computern noch mit Quantencomputern realistisch ist. Die Vielzahl an Einsatzmöglichkeiten gitterbasierter Verfahren decken die Bereiche der asymmetrischen Verschlüsselung, der digitalen Signaturen und der Schlüsselaustauschmechanismen ab. Im Verlauf des Standardisierungsprozesses des NIST grenzen sich gitterbasierte Kryptosysteme in allen Bereichen durch eine gute Performance und einen geringen Speicherverbrauch von ihren Konkurrenten ab. Resultierend aus der hinzukommenden guten Umsetzbarkeit gab das NIST bekannt, eine Auswahl an gitterbasierten Verfahren in absehbarer Zeit zu standardisieren.

Im Hinblick auf die Zukunft zeigt sich, dass gitterbasierte Kryptographie nicht nur in der Theorie, sondern auch in der Praxis Verwendung finden wird. Obwohl aktiv an neuen Kryptosystemen gearbeitet wird, sind sich Experten dennoch nicht sicher was zuerst gelingt, die Realisierung von leistungsfähigen Quantencomputern oder die Umsetzung von Post-Quantum-Kryptographie im alltäglichen Gebrauch.

LITERATUR

- [1] L. Chen *et al.*, "Report on Post-Quantum Cryptography," NIST, 2016.
- [2] D. Soni, K. Basu, M. Nabeel, and R. Karri, "A Hardware Evaluation Study of NIST Post-Quantum Cryptographic Signature schemes," *Second PQC Standardization Conference*, 2019.
- [3] H. Böck, "Sicher trotz Quantencomputern," *ZEIT ONLINE*, 05 Oct., 2014. <https://www.zeit.de/digital/datenschutz/2014-10/post-quanten-kryptographie>
- [4] B. Lenze, Ed., *Basiswissen Angewandte Mathematik – Numerik, Grafik, Kryptik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020.
- [5] H. C. A. Tilborg, *Encyclopedia of Cryptography and Security*: Springer US, 2005.
- [6] P. W. Shor, "Algorithms for quantum computation: discrete logarithms and factoring," in *Proceedings 35th Annual Symposium*

on *Foundations of Computer Science*, Santa Fe, NM, USA, Nov. 1994, pp. 124–134.

- [7] E. Gerjuoy, “Shor’s factoring algorithm and modern cryptography. An illustration of the capabilities inherent in quantum computers,” *American Journal of Physics*, vol. 73, no. 6, pp. 521–540, 2005, doi: 10.1119/1.1891170.
- [8] D. Micciancio and S. Goldwasser, *Complexity of Lattice Problems: A Cryptographic Perspective*. Boston, MA: Springer US, 2002.
- [9] J. Hoffstein, J. Pipher, and J. H. Silverman, *An Introduction to Mathematical Cryptography*. New York, NY: Springer New York, 2014.
- [10] J. Hoffstein, J. Pipher, and J. H. Silverman, “NTRU: A ring-based public key cryptosystem,” in *Lecture Notes in Computer Science, Algorithmic Number Theory*, G. Goos, J. Hartmanis, J. van Leeuwen, and J. P. Buhler, Eds., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1998, pp. 267–288.
- [11] D. Bernstein, J. Buchmann, and E. Dahmen, *Post-quantum Cryptography*. Berlin: Springer, 2009.
- [12] J. Eberhardt, “Gitterbasierte Post-Quantum-Kryptographie,” Leibniz Universität Hannover, Hannover, 2018.
- [13] S. Schmittner, *SVP*. [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/File:SVP.svg>
- [14] R. Niederhagen and M. Waidner, *Practical Post-Quantum Cryptography*.
- [15] H. Nejatollahi, N. Dutt, S. Ray, F. Regazzoni, I. Banerjee, and R. Cammarota, “Post-Quantum Lattice-Based Cryptography Implementations,” *ACM Comput. Surv.*, vol. 51, no. 6, pp. 1–41, 2019, doi: 10.1145/3292548.
- [16] G. Alagic *et al.*, “Status Report on the First Round of the NIST Post-Quantum Cryptography Standardization Process,” 2019.
- [17] D. Moody *et al.*, “Status Report on the Second Round of the NIST Post-Quantum Cryptography Standardization Process,” 2020.

Energiewende: Ziele und Erreichtes

Brandl Dominik

Fakultät Elektro- und Informationstechnik
Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg
Regensburg, Deutschland
dominik.l.brandl@st.oth-regensburg.de

Zusammenfassung—Durch den bevorstehenden Ausstieg aus der Atomenergie und Kohlekraft muss der Energiebedarf in Deutschland in Zukunft überwiegend durch erneuerbare Energien (EE) bereitgestellt werden. Dies ist auch notwendig, damit Deutschland nicht von Stromimporten aus dem Ausland abhängig ist und seine Klimaschutzziele des Pariser Abkommens einhalten kann. Daher wurde vor 20 Jahren der langfristige und stetige Umstieg auf nachhaltige CO₂-neutrale EE beschlossen.

2019 betrug der Anteil des Bruttostromverbrauchs aus EE bereits über 42 %. Dies ist eine Steigerung im Vergleich zu 6,3 % aus dem Jahr 2000, als das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) erlassen wurde, welches den Ausbau der EE fördert. Dieses Gesetz bildet die Grundlage der Energiewende Deutschlands.

Doch laut einem aktuellen Research Report des Deutschen Institut für Wirtschaftsforschung droht bei aktueller Planung das Verfehlen des Ziels einen Anteil von 65 % EE im Bruttostromverbrauch bis 2030 zu erreichen. Es wird untersucht, welche zusätzlichen Anstrengungen getroffen werden müssen, um dieses Ziel einzuhalten. Abschließend wird noch gezeigt, welchen Beitrag die integrierte Photovoltaik zur Energiewende beitragen kann, um dieses Ziel nicht zu verfehlen.

Schlüsselwörter—Energiewende, Erneuerbare-Energien-Gesetz, Erneuerbare Energien, Energieausbau, integrierte Photovoltaik

I. EINLEITUNG

Anfang des 21. Jahrhunderts wurde die Stromerzeugung in Deutschland vor allem durch Braunkohle, Steinkohle und Kernenergie dominiert, während die erneuerbaren Energien (EE) nur einen geringen Anteil dazu beitrugen [1] [2].

Als EE werden Energiequellen bezeichnet, welche von der Natur ständig erneuert werden und direkt oder indirekt von der Sonne oder von anderen natürlichen Bewegungen und Mechanismen abgeleitet werden. EE umfassen keine Energieressourcen, die aus fossilen Brennstoffen und deren Abfallprodukte gewonnen werden. [3]

Durch die Endlichkeit von fossilen Energieträgern und vor allem durch deren hohe CO₂-Belastung für die Umwelt wurde in Deutschland beschlossen, die Kohlekraftwerke schrittweise bis spätestens 2038 stillzulegen [4]. Ebenso kam es nach dem Unfall im Atomkraftwerk in Fukushima 2011 zu ein Umdenken in der Energiepolitik Deutschlands und ein Ausstieg aus der Kernenergie bis 2022 wurde beschlossen [5]. Die potenziellen Gefahren eines atomaren Unfalls und die immer noch ungeklärte Frage nach einem Endlager für atomaren Müll sprechen gegen eine nachhaltige Energieerzeugung durch Kernenergie [5]. Um nicht von Stromimporten aus dem Ausland abhängig zu sein, wurde beschlossen den Energiebedarf Deutschlands zukünftig überwiegend aus EE

zu decken. Damit will Deutschland seine Klimaziele der Pariser UN-Klimakonferenz von 2015 einhalten. Die globale Erderwärmung soll bis zum Jahr 2050 auf unter 2 °C gehalten werden [6].

In dieser Arbeit soll gezeigt werden, wie sich der Anteil der EE in Deutschland innerhalb der letzten 20 Jahre entwickelt hat und wie es möglich ist die aktuell angestrebten Ziele zu erreichen.

II. DAS ERNEUERBARE ENERGIEN GESETZ

Die Förderung EE begann bereits im Jahr 1991 mit dem Stromeinspeisungsgesetz [5]. In diesem Paper wird die Energiewende in Deutschland ab dem Jahr 2000, als das Stromeinspeisungsgesetz durch das Erneuerbare Energien Gesetz (EEG) abgelöst wurde, analysiert.

Das EEG 2000 wurde erlassen, mit dem Ziel im Interesse des Klima- und Umweltschutzes eine nachhaltige Entwicklung der Energieversorgung zu ermöglichen und den Beitrag EE an der Stromversorgung deutlich zu erhöhen. Dieser Ausbau soll stetig, kosteneffizient und netzverträglich erfolgen. Mit einer garantierten Abnahme- und Vergütungspflicht wurde dafür gesorgt, dass erzeugter Strom aus EE von den Netzbetreibern abgenommen werden muss und je nach Erzeugungsform entsprechend vergütet wird. Dadurch wurden den noch jungen Technologien eine Starthilfe gegeben, sich im deutschen Energiemarkt zu etablieren. [5]

Dieses Gesetz wurde im Laufe der Zeit mehrmals angepasst. Die wichtigsten Ziele des aktuellen EEG 2017 sind den Anteil, des aus EE erzeugten Stroms am Bruttostromverbrauch, auf 65 Prozent bis zum Jahr 2030, sowie mindestens 80 Prozent bis zum Jahr 2050 zu steigern. Zusätzlich soll sich der Anteil EE am gesamten Bruttoendenergieverbrauch bis zum Jahr 2020 auf mindestens 18 Prozent erhöhen. [7]

Ebenso ist ein Ausbaupfad vorgegeben, welcher den Ausbau der Windkraft, Photovoltaik und Biomasse regelt.

III. BISHERIGE ENTWICKLUNG DER ERNEUERBAREN ENERGIEN

Im folgenden Kapitel wird gezeigt, wie sich der Anteil EE am Bruttostromverbrauch in Deutschland in den vergangenen 20 Jahren entwickelt hat.

A. Energieeinteilung

Der Energiebedarf Deutschlands lässt sich in drei Sektoren unterteilen:

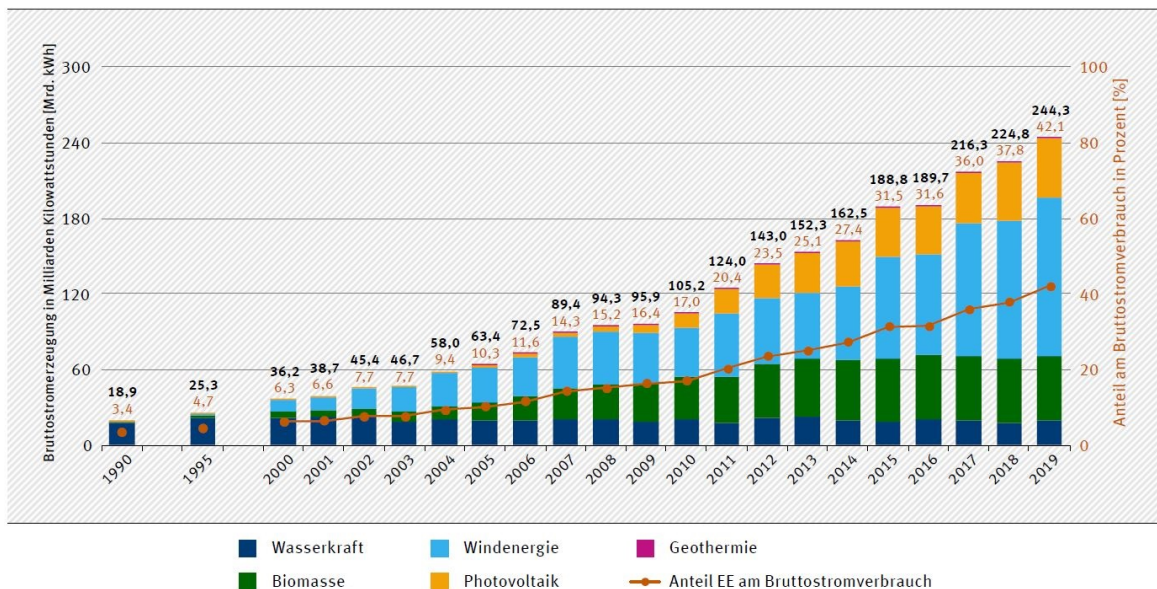


Abbildung 1. Entwicklung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien und deren Anteil am Bruttostromverbrauch in Deutschland [9]

- Bruttostromverbrauch
- Endenergieverbrauch in Wärme
- Endenergieverbrauch im Verkehr [8]

Der Bruttostromverbrauch entspricht der Summe der gesamten inländischen Bruttostromerzeugung, zuzüglich der Stromimporte aus dem Ausland und abzüglich der Stromexporte ins Ausland [9]. Der Bruttoendenergieverbrauch ist dabei ein Mittelwert über alle 3 Sektoren.

In diesem Paper wird vor allem die Energiewende im Stromsektor analysiert.

B. Ausbau der erneuerbaren Energien von 2000 - 2010

Bei Verabschiedung des EEG 2000 betrug der Anteil EE am Bruttostromverbrauch 6,3 %, beim Bruttoendenergieverbrauch 3,7 % [8]. Der Anteil EE am gesamten Energieverbrauch sollte sich bis zum Jahre 2010 mindestens verdoppeln. Wie anhand der **Tabelle I** zu sehen, gelang dies vor allem durch den Ausbau der EE im Stromsektor äußerst erfolgreich. Innerhalb der nächsten zehn Jahre konnte man die verbrauchte Energie aus EE beim Bruttostromverbrauch von 36.226 GWh auf 105.181 GWh erhöhen, was einen Anteil von 17 % EE entspricht. Anhand der **Abbildung 1** sieht man, dass dieser Anstieg vor allem durch den Ausbau der Biomasse und der Windkraft begünstigt wurde.

Aufgrund dieses raschen Wachstums der EE beim Bruttostromverbrauch wurde eine Gesetzesänderung des EEG im Jahr 2008 beschlossen. Als neues Ziel wurde ausgegeben, den Anteil EE beim Bruttostromverbrauch auf mindestens 30 % bis 2020 zu erhöhen.

C. Ausbau der erneuerbaren Energien von 2010 - 2019

Während vor allem der Ausbau der Biomasse, sowie der Wasserkraft im letzten Jahrzehnt stagnierte, konnte man durch

Tabelle I
ANTEIL EE AM ENERGIEVERBRAUCH IN DEUTSCHLAND [8]

Energiesektor	2000	2010	2019
Bruttostromverbrauch [%]	6,3	17,0	42,1
Endenergieverbrauch Wärme und Kälte [%]	4,4	12,4	14,7
Endenergieverbrauch im Verkehr [%]	0,5	5,8	5,5
Bruttoendenergieverbrauch [%]	3,7	11,7	17,1

den kontinuierlichen Ausbau der Windenergie und der Photovoltaik die verbrauchte Leistung aus EE auf 242.549 GWh steigern, was 2019 einem Anteil von 42,1 % am gesamten Stromverbrauch entspricht [8]. Die angestrebten 30 % EE beim Bruttostromverbrauch konnten bereits 5 Jahre früher erreicht werden. Dadurch wurde als nächstes Zwischenziel ausgegeben, bis 2030 einen Anteil von 65 % EE beim Bruttostromverbrauch zu erreichen.

Während der prozentuale Anteil EE im Verkehrssektor in den letzten Jahren leicht sank, stieg der Stromverbrauch an EE im Verkehrssektor von 2.054 GWh im Jahr 2010 durch die voranschreitende Elektrifizierung durch die Elektromobilität auf 5.054 GWh im Jahr 2019 an [8]. Da laut Prognosen die Elektromobilität auch in Zukunft weiter ausgebaut wird, wird auch im Verkehrssektor eine größere Nachfrage am Stromverbrauch herrschen. [10].

D. aktueller Stand der Bruttostromerzeugung in Deutschland

In der **Tabelle II** sieht man den aktuellen Stand der Bruttostromerzeugung in Deutschland, eingeteilt nach Energieträgern. Dabei wurden alle EE zusammengefasst. Man sieht hier, dass die EE den größten Anteil bei der Bruttostromerzeugung stellen. Fasst man alle fossilen Energieträger zusammen, stellen diese weiterhin den größten Anteil an der Bruttostromerzeugung in Deutschland.

Tabelle II
BRUTTOSTROMERZEUGUNG IN DEUTSCHLAND 2019 NACH
ENERGIETRÄGERN [11]

	Tsd. GWh	prozentualer Anteil [%]
Braunkohle	113,9	18,6
Kernenergie	75,1	12,3
Steinkohle	57,3	9,3
Erdgas	91,0	14,9
Mineralöl	5,1	0,8
Erneuerbare Energien	244,3	39,9
Sonstige	25,7	4,2

Ebenso löste die Windenergie, im Jahr 2019 Braunkohle als wichtigsten Energieträger im deutschen Strommix ab [8].

IV. AUSBLICK HIN ZU 100 % ERNEUERBARE ENERGIEN

Abschließend soll noch ein Blick in die Zukunft geworfen werden, ob es möglich ist, zeitnah eine Stromversorgung mit 100% EE in Deutschland bereitzustellen.

A. Verfehlung der gesetzten Ziele mit dem aktuellem Ausbaupfad des EEG 2017

Das Hauptaugenmerk der Energiewende in Deutschland lag bisher vor allem am Ausbau der EE. Dieser sollte auch in Zukunft weiter vorangetrieben werden. Ein Research Report des Deutschen Institut für Wirtschaftsforschung aus dem Jahr 2019 rechnete vor, dass zukünftig eine Stromversorgung mit 80 - 100 % EE kostengünstig bis 2030 erreicht werden kann. Mit den aktuell im EEG 2017 geplanten Ausbauraten werden jedoch nur 55 % Anteil EE in der Stromversorgung bis 2030 erreicht, was eine deutliche Verfehlung gegenüber der Zielsetzung von aktuell 65 % ist. [12]

Die aktuell vorgesehenen Ausbauraten des EEG 2017

- Photovoltaik: jährlicher Bruttozubau von 2,5 GW installierter Leistung
- Wind Onshore: jährlicher Bruttozubau von 2,9 GW installierter Leistung
- Wind Offshore: Steigerung der installierten Leistung auf 15 GW im Jahr 2030

reichen dabei nicht aus. In **Abbildung 2** sieht man dabei, dass das 65 % Ziel verfehlt wird. [12]

Mit einer Anhebung bei der Photovoltaik auf einen jährlichen Bruttozubau von 4,4 GW, sowie bei der Wind Onshore auf 4,3 GW installierter Leistung, lässt sich das Ziel, 65 % EE im Bruttostromverbrauch bis 2030, erreichen. [12]

Bei einer weiteren Steigerung der Ausbauraten in der Photovoltaik und der Windkraft Onshore, sowie einer Steigerung der installierten Leistung der Windkraft Offshore auf 20-35 GW im Jahr 2030 können 85 - 100 % EE im Stromsektor in Deutschland erreicht werden. Dadurch ist es möglich, früher als geplant, aus der Kohlekraft auszusteigen und ein internationales Zeichen für Energiewende und Klimaschutz senden. Ebenso kann man hier dann noch die Verfehlungen im Wärme- und Verkehrssektor kompensieren, da hier, wie in in Tabelle I zu sehen, der Anteil der EE nicht so stark wie im beim Bruttostromverbrauch ansteigt. [12]

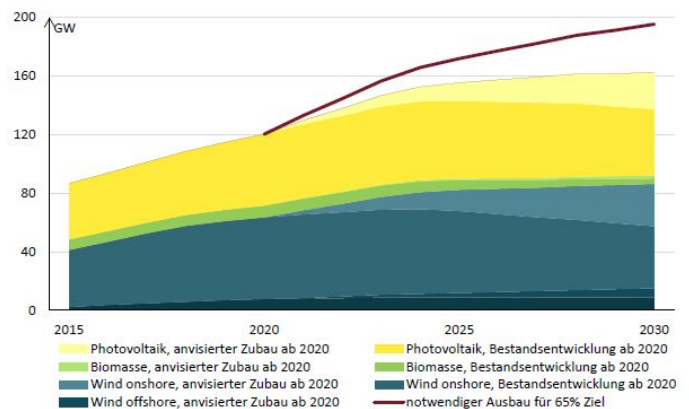


Abbildung 2. Ausbau der Erneuerbaren gemäß Referenzentwicklung des EEG 2017 [12]

Zusätzlich muss man, neben dem weiteren Ausbau der EE die Effizienzverbesserung von Anlagen und das Integrieren von Stromspeichern ins Stromnetz berücksichtigen, um in Zukunft eine Versorgungssicherheit und Bezahlbarkeit des Stromes in Deutschland zu gewährleisten [12]. Ebenso besteht eine Notwendigkeit diese dezentralen erneuerbaren Energiequellen und Stromspeicher mittels eines intelligenten Stromnetzes untereinander zu verbinden [13].

Da EE bei ihrer Einspeisung ins Energienetz natürlichen Schwankungen unterliegen, müssen diese entsprechend den Verbrauchern abgestimmt werden und überschüssig produzierte Energie wird beispielsweise in Pumpspeicherkraftwerk gespeichert. Diese gespeicherte Energie wird dann bei Bedarf abgerufen, um die Spitzenlast zu decken. [14]

B. Beitrag der integrierten Photovoltaik zur Energiewende

Wie bereits im vorherigen Kapitel beschrieben, wird in den meisten Zukunftsszenarien die Photovoltaik neben der Windkraft als tragende Säule der Energieversorgung in Deutschland, sowie weltweit, betrachtet. [15]

Um die Energiewende in Deutschland erfolgreich zu schaffen sollten ca. 400-500 GW installierte Leistung aus Photovoltaik bereit gestellt werden. Die aktuell ca. 49 GW installierte Leistung bei der Photovoltaik müssen vervielfacht werden. Für einen solchen Ausbau wird sehr viel Fläche benötigt. Eine Lösung wäre daher die Anwendung der integrierten Photovoltaiktechnologie. Dabei werden, durch die Integration von Photovoltaik in die Hüllen von Gebäuden, Fahrzeugen und Verkehrswegen und bei der Einbindung in Agrar- und Wasserflächen, die bereits für andere Zwecke genutzte Flächen, für die Solarstromerzeugung erschlossen. [16]

Das gesamte noch ausschöpfbare Ausbaupotential der integrierten Photovoltaik in Deutschland beträgt etwa 3400 GW [16]. Die Verteilung über die verschiedenen Bereiche ist in **Abbildung 3** zu sehen. Dies ist mehr als ausreichend sind um eine erfolgreiche Energiewende in Deutschland zu schaffen.

Bei dieser dezentralen und meistens verbrauchsnahe Stromerzeugung ergeben sich viele Vorteile. So kann beispielsweise eine Photovoltaikanlage auf dem Dach eines Elek-

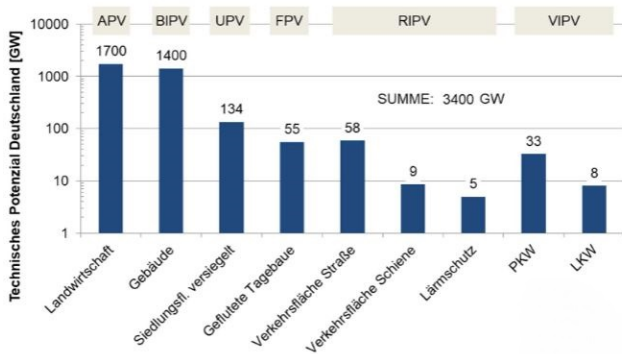


Abbildung 3. Ausbaumöglichkeit der integrierten Photovoltaik in Deutschland [16]

trofährzeugs die Reichweite bei PKWs um bis zu 3300 km, bei LKWs bis zu 5000 km pro Jahr erhöhen [16]. Auch mit der bereits erwähnten voranschreitenden Elektrifizierung des Verkehrssektors bieten sich hier weitere Möglichkeiten der Reichweitensteigerung in der Elektromobilität.

Die Nutzung von Photovoltaik in Kombination mit der Landwirtschaft bietet, wie in in Abbildung 3 zu sehen, das noch größte Ausbaupotential. Die Agro-Photovoltaik kombiniert die Erzeugung von Solarstrom und landwirtschaftlichen Produkten auf derselben Fläche. Zusätzlich kann die partielle Verschattung auch vorteilhaft für die Bodenfeuchtigkeit und damit für den landwirtschaftlichen Ertrag sein. Auf etwa 17 % der landwirtschaftlich genutzten Fläche in Deutschland werden Kulturen angebaut, die eine partielle Verschattung tolerieren oder sogar davon profitieren würden. [16]

Bei dem aktuellen Forschungsprojekt APV-RESOLA in Heggelsbach werden jährlich 244 GWh durch Photovoltaik ins Netz eingespeist. Zusätzlich werden auf dem Acker Winterweizen, Kartoffeln, Klee gras, Sellerie angebaut. Man stellte fest, dass es zu keinen signifikanten Einbusen bei den landwirtschaftlichen Erträgen kam. Ebenso geht man davon aus, dass sich in Zukunft durch die Erwärmung des Klimawandels die partielle Verschattung des Ackers sich sogar positiv auf den landwirtschaftlichen Ertrag auswirkt. [17]

Bei all diesen genannten Vorteilen und gibt es noch eine Reihe von offenen Fragen und Nachteilen bezüglich der integrierten Photovoltaik:

- Bei der Integration in Hüllen sind die Photovoltaikmodule meist inhomogener Einstrahlung der Sonne und höheren Betriebstemperaturen ausgesetzt. Diese Effekte wirken sich negativ auf den Ertrag und die Zuverlässigkeit der Energiegewinnung aus
- Der Effekt der Wechselwirkung zwischen der schwimmenden Photovoltaik und dem Gewässer ist noch nicht ganz geklärt. Dieser wird erst seit kurzem untersucht.
- Bei Fahrzeugen und Lärmschutzwänden ist die integrierte Photovoltaik dauerhaften Vibrationen ausgesetzt. Diese Belastung wird durch die Prüfung nach aktuellen Normen noch nicht ausreichend abgedeckt. [16]

Bedingt durch die internationalen Klimaschutzgesetze und einem Sinneswandel in der Energiepolitik kam es zu einem Umdenken bei der Energieversorgung in Deutschland. Es wurde vor 20 Jahren beschlossen, weg von Kohle und Kernkraft hin zu überwiegend nachhaltigen EE zu wechseln. Wichtigstes Instrument und auch rechtliche Grundlage der Energiewende Deutschlands ist das EEG. In diesem Gesetz werden die aktuellen Ziele, die Abnahme- und Vergütungspflicht, der Ausbaupfad und vieles weiteres geregelt. Das EEG wurde im Lauf der Jahre immer den aktuellen Umständen angepasst. Durch dieses Gesetz war es möglich, den Anteil an EE im Bruttostromverbrauch von 6,3 % im Jahr 2000 auf 42,1 % im Jahr 2019 zu steigern. Dies gelang vor allem durch den Ausbau der EE durch die staatliche Förderung.

Um jedoch das nächste Zwischenziel, 65 % EE beim Bruttostromverbrauch bis 2030, zu erreichen, bedarf es laut einer Studie des Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung eine deutliche Steigerung des Ausbaus EE. Der aktuelle Ausbaukorridor des EEG 2017 ist nicht ausreichend. Es ist möglich, bis 2030 85 - 100 % EE im Stromsektor kostengünstig und sicher zu erreichen. Um eine langfristige und nachhaltige Energiewende in Deutschland zu schaffen, müssen neben dem weiteren Ausbau der EE noch weitere Maßnahmen berücksichtigt werden.

Am Beispiel der integrierten Photovoltaik wird gezeigt, welche noch ungenutzten Möglichkeiten in der Nutzung der Sonnenenergie stecken und was mit integrierter Photovoltaik alles erreicht werden kann. Dabei profitiert man in vielen Bereichen, vor allem in der Agro-Photovoltaik, auch noch von Synergieeffekten.

LITERATUR

- [1] Cheung, G., Davies, P. J., and Bassen, A., "In the transition of energy systems: What lessons can be learnt from the German achievement?" *Energy Policy*, vol. 132, pp. 633–646, 2019.
- [2] Renn, O. and Marshall, J. P., "Coal, nuclear and renewable energy policies in Germany: From the 1950s to the "Energiewende"" *Energy Policy*, vol. 99, pp. 224–232, 2016.
- [3] Ellabban, O., Abu-Rub, H., and Blaabjerg, F., "Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 39, pp. 748–764, 2014.
- [4] Gesetz zur Reduzierung und zur Beendigung der Kohleverstromung und zur Änderung weiterer Gesetze (Kohleausstiegsgesetz), 2020
- [5] Hake, J.-F., Fischer, W., Venghaus, S., and Weckenbrock, C., "The German Energiewende – History and status quo," *Energy*, vol. 92, pp. 532–546, 2015.
- [6] Oberthür, S. and Groen, L., "Explaining goal achievement in international negotiations: the EU and the Paris Agreement on climate change," *Journal of European Public Policy*, vol. 25, no. 5, pp. 708–727, 2018.
- [7] Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG 2017, 2020
- [8] BMWi, "Erneuerbare Energien in Zahlen 2019: Nationale und internationale Entwicklung im Jahr 2019,"
- [9] Umweltbundesamt, "Erneuerbare Energien in Deutschland," 2020.
- [10] Gryparis, E., Papadopoulos, P., Leligou, H. C., and Psomopoulos, C. S., "Electricity demand and carbon emission in power generation under high penetration of electric vehicles. A European Union perspective," *Energy Reports*, vol. 6, pp. 475–486, 2020.
- [11] Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V., Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2019, 2019.

- [12] Oei, P.-Y., Göke, L., Kemfert, C., Kendzioriski, M., and Hirschhausen, C. R. von, Erneuerbare Energien als Schlüssel für das Erreichen der Klimaschutzziele im Stromsektor: Studie im Auftrag der Bundestagsfraktion Bündnis 90/Die Grünen. DIW Berlin: Politikberatung kompakt 133. Berlin: DIW Berlin, Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung, 2019.
- [13] Worighi, I., Maach, A., Hafid, A., Hegazy, O., and van Mierlo, J., "Integrating renewable energy in smart grid system: Architecture, virtualization and analysis," *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 18, p. 100226, 2019.
- [14] Hossain, M. S., Madlool, N. A., Rahim, N. A., Selvaraj, J., Pandey, A. K., and Khan, A. F., "Role of smart grid in renewable energy: An overview," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 60, pp. 1168–1184, 2016.
- [15] Breyer, C., Bogdanov, D., Gulagi, A., Aghahosseini, A., Barbosa, L. S., Koskinen, O., Barasa, M. et al., "On the role of solar photovoltaics in global energy transition scenarios," *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, vol. 25, no. 8, pp. 727–745, 2017.
- [16] Wirth, H., Vehse, M., Rau, B., Peibst, R., Colsmann, A., Stephan, A., and Lechner, P., "Integrierte Photovoltaik – Aktive Flächen für die Energiewende," 2019. In *Energy Research for Future - Forschung für die Herausforderungen der Energiewende: Beiträge zur FVEE-Jahrestagung 2019*, 37–41.
- [17] Weselek, A., Ehmann, A., Zikeli, S., Lewandowski, I., Schindele, S., and Högy, P., "Agrophotovoltaic systems: applications, challenges, and opportunities. A review," *Agron. Sustain. Dev.*, vol. 39, no. 4, 2019.

Wireless Power Transfer: Applications, Technologies and Challenges

Sebastian Schindler

Faculty of Electrical Engineering and Information Technology

OTH Regensburg

Regensburg, Germany

sebastian3.schindler@st.oth-regensburg.de

Abstract—Electrical energy is the driving force for the modern world. The increasing need for electricity of everyday objects, the demand for a higher portability and limitations of battery-powered solutions raise the question how devices will be powered in the future. This paper presents an overview of the current technologies and developments of wireless power transfer (WPT). By evaluating international publications of the last five years, it summarizes the different working mechanisms of WPT including the challenges with its implementation in current applications and depicts recent advances from a technical perspective. The focus of the paper is on electro-magnetic and electric fields for transmission. A distinction is made between radiative and non-radiative techniques, addressing far- and near-field applications separately. Followed by classification into inductive and capacitive coupling for near-field, the emphasis is on inductive-resonant coupling as well as into different wavelengths for far-field. Based on listed technologies, common applications are introduced. They are distinguished into continuous supply for powerless devices such as sensors and charging for battery-powered portable electronic devices and vehicles. Solution attempts to general problems like power transmission efficiency, power level and distance are discussed. These include improvements in circuit design, topologies including multiple sources and alignment issues covering optimizations of power source, transmission path and load. Considering the given information about the progress already made, it is finally estimated whether WPT has the potential to be a suitable alternative to established solutions.

Index Terms—Wireless Power Transfer, Couplings, Magnetic Resonance, Rectenna, Coils

I. INTRODUCTION

Since its uprising, electricity was tied to a conductive connection between source and load. Although there were successful efforts to distribute energy wirelessly over the last century, they failed to receive a widespread adoption due to technological shortcomings and missing use cases for that time [1]. Today, the use of portable electric devices is common while both unpowered and battery powered solutions are now facing issues with the non-existent or limited capacity of current Energy Storage Technologies (EST), whereas modern semiconductor power converters now have the ability to efficiently power devices from few milliwatt up to hundreds of kilowatt [2]. The impracticability and high initial costs for ESTs in mentioned applications lead to considerations about bypassing these problems by relocating the power supply outside the device and therefore use Wireless Power Transfer (WPT) techniques instead.

Since the general term WPT refers to a principle with different implementation possibilities used in heterogeneous domains, an in-debt analysis is deferred in favour of giving a general overview of the field. Section II portrays the fundamentals of the most common WPT technologies located in the electromagnetic domain, namely Inductive Power Transfer (IPT), Capacitive Power Transfer (CPT) and radiative technologies such as Radio wave (RPT), Microwave (MPT) and Optical Power Transfer (OPT) are discussed to a lower extend. Niche technologies from the acoustic or magneto-dynamic domain are omitted. Section III elaborates classical and emerging use cases for WPT by comparing it to the current situation in context as an alternative to wire-bound solutions. Section IV recapitulates the current technological shortcomings for the most common IPT in typical applications and shows recent solution attempts. The conclusion in section V summarizes the given information about the technologies aiming to identify the potential of WPT in the future.

II. TECHNOLOGIES

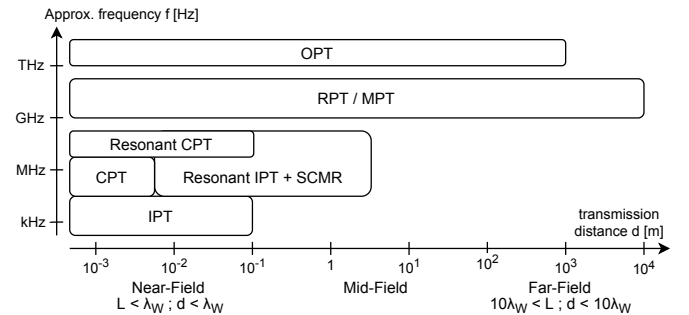


Fig. 1. Overview of WPT technologies in the electro-magnetic domain. The near- and far-field classification is determined by the ratio of transmitter or antenna size L , transmission distance d and wavelength λ_W .

The main classification (see Fig. 1) is based on the differences between near- and far-field. WPT in the far-field is dominated by radiative technologies and relies on wave propagation as a way of energy transmission, including sound and electromagnetic radiation over distances with a magnitude up to kilometres. WPT in the near-field is based on slow oscillating dipole fields accomplishing energy transfer between the systems through electromagnetic and electrostatic coupling.

Since almost no wave propagation occurs and the field strength decays proportionally with the volume, these non-radiative techniques are limited to reduced a transmission distance up to few centimetres around the transmitter. The mid-field marks an floating, intermediate area commonly associated with resonant non-radiative techniques.

A. Electromagnetic Coupling

1) *Inductive Power Transfer*: The basic circuit for IPT as shown in Fig. 2 consists of an oscillator as a power source on the left side, whereas the load encapsulates the powered device with an optional rectifier on the right side. Both sides are connected by the coupling factor (CF) k_{12} of the mutual inductance between the primary and secondary coil.

2) *Magnetic-Resonant Coupling*: The transmission power (TP) can be increased by eliminating the primary and secondary reactance through compensation networks and operation at their common resonance frequency. Therefore Fig. 2 includes the capacitors C_{Sx}, C_{Px} in a serial (S-S), parallel (P-P) or mixed form ((P-S),(S-P)). Still, the power transmission efficiency (PTE) requires a consistent and high CF hence limiting the flexibility of positioning for the receiver devices.

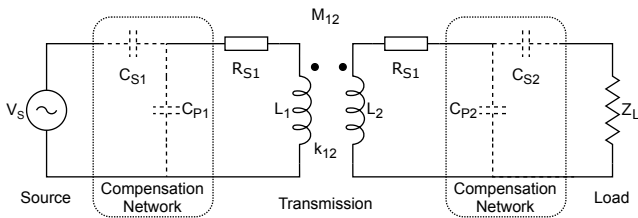


Fig. 2. The equivalent circuit model for IPT. With regard to the higher leakage flux due to increased air gap sizes, its circuit analysis can be performed almost identically to coreless transformer models.

3) *Strongly Coupled Magnetic Resonance*: The problem of an insufficient CF due to varying operating conditions can be similarly addressed with Strongly Coupled Magnetic Resonance (SCMR). The proposal of [3] as shown in Fig. 3 adds pairs of self-resonant coils to each participant thus typically achieving a transmission distance up to several meters that can be optimized for either maximum efficiency or total amount of power through the adjustment of k_{12} and k_{34} [4].

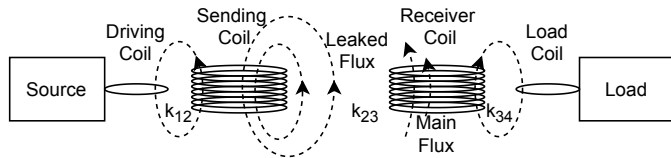


Fig. 3. Principle of the strongly coupled magnetic resonance: The transmission is efficiently achieved by sender and receiver coil whereas driving and load coil control power input and extraction from the system

B. Capacitive Coupling

CPT utilizes the electric field to transfer energy between the sender and receiver electrodes represented by the capacitor

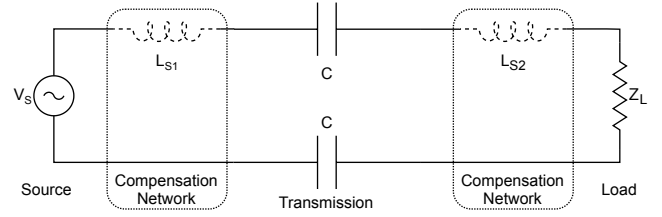


Fig. 4. The equivalent circuit model for CPT with compensation through inductances

plates in Fig. 4. While formerly only being capable to transfer a power of few Watts at short distances below a millimetre, recent approaches making use of resonant operation similar to its inductive counterpart achieve efficiencies up to 90% at a power level of 700 W in newer prototypes. Although there are advances in CPT, it remains in a subordinate role compared to inductive techniques. [5]

C. Radiative Transmission

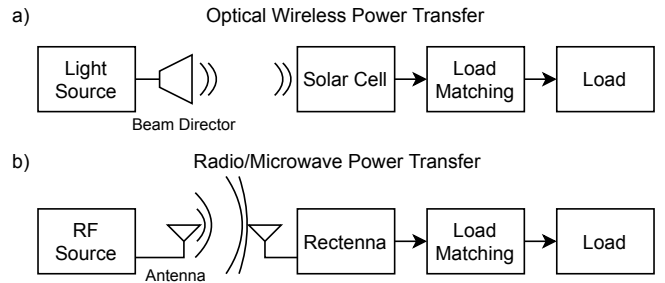


Fig. 5. Structure of generic OPT and MPT systems

1) *Radiowave and Microwave Power Transfer*: Fig. 5b shows the general system structure consisting of a source commonly built from microwave vacuum tubes or semiconductor transmitters and a rectifying antenna ("rectenna") converting radiation back into direct current signals [6]. Terrestrial and near space operation in the radio wave and microwave spectrum, typically 2.45 GHz and 5.8 GHz, allow for a long transmission distance of several kilometres. For higher frequencies (typically 35 GHz, 94 GHz 245 GHz), the increased power of radiation dissipates after shorter distances due to atmospheric attenuation limiting its effective use for long range applications. In contrast, MPT as shown in [7] offers benefits over IPT for flexibility in orientation and gap size as elaborated in section IV-D and therefore affirms efforts to realize short distance transmission in both low and high power applications from sensor devices to Electric Vehicle (EV) charging [8]. The commonness of microwave-based communication encourages the omission of active transmitters in favour of surrounding radio frequency (RF) radiation for very low power applications to realize energy harvesting. Research in new rectenna design described in [9] already aims to abolish matching networks thus contributing to an overall size reduction for independently operating integrated circuit devices.

2) *Optical Power Transfer*: OPT operates at terahertz frequencies, thus using light. Offering nearly identical characteristics to MPT, it solely relies on different technologies for transmitter (LASER, LED, solar mirrors) and receiver (photovoltaic cells). Although there are advances in source control and receiver design [10], the difficulties concerning a maximum system efficiency of less than 30% due to insufficient light source and photovoltaic cell technologies combined with safety concerns at a TP of multiple kilowatts remain. This restricted its usage to very low energy levels or powering aerial vehicles and satellites [11]. Since isotropic sources are generally avoided due to their poor PTE, all three radiative techniques share similarities due to the desire for a high directivity requiring adjustment mechanisms for non-stationary loads, often realized with beam-forming methods such as MIMO antennas and lens systems [2].

III. APPLICATIONS

A. Electric Vehicle Charging

Due to the transition from combustion to electrical engines in transportation, WPT is one of the main candidates to solve issues with long charging duration, initial cost and weight of ESTs. The predominantly used technology is the IPT, although there are successful implementations with CPT and MPT [12]. While the usual static charging is already mature, recent efforts focus on the improvement of dynamic charging systems to enable power transfer for moving vehicles and additionally serving as a link in vehicle-to-grid concepts. The enumeration in [13] for general applications in transportation depicts working prototypes already capable of achieving a TP of 20 kW for cars up to 200 kW for trains while overcoming air gaps of multiple centimetres with an efficiency of typically more than 90 % for tightly coupled systems.

B. Biomedical Implants and Sensor Devices

Existing EST and energy harvesting may not always be suitable for embedded micro sensors and medical implants due to a higher risk for complications, unreliable voltage supply and limited battery life. The comparison of RPT and IPT in [14] suggests that RF based systems can potentially provide better overall performance. Although successful implementations of cardiac, cochlear and retinal neuromedical sensors are listed, a review of WPT for medical implants retains concerns around poor efficiency, safety and regulations whose elimination is expected with advances in miniaturization and optimized transmission schemes. [15]

C. Unmanned Aerial Vehicles and Satellites

The power supply for Unmanned Aerial Vehicles (UAV) and satellites is critical. WPT can help to lower their requirements for lightweight construction and power densities of ESTs. While the sender often remains stationary, the moving receiver is tracked to ensure a continuous supply. In contrast, an opposite transfer direction and bidirectional communication is possible. The concept making use of WPT as described in [16] and [17] enables UAVs to represent the downlink for

an optimized energy distribution. Through acting as mobile base stations, they form Wireless Powered Communication Networks (WPCN).

IV. CHALLENGES

Due to its dominant role in practical implementations, most publications deal with the enhancements of IPT systems. Although a general analysis is omitted in favour of a deeper understanding of IPT, considerations about transmission efficiency, performance and distance as well as flexibility of positioning can be likewise applied to CPT and MPT/OPT.

A. Efficiency

Two dominant factors for the overall performance of IPT are the CF k_{12} and the quality factors (QF) Q_1, Q_2 of the system. Several approaches have been proposed for their optimization including compensating networks and the usage of additional coils. Capacitors are commonly used in portrayed configurations (see Fig. 2) for compensation. Exemplary from a basic (S-S) topology (Fig. 2), the optimal load impedance can be derived resulting in an expression for maximum PTE shown in Equation 1. [18]

$$\eta_{\max} = \frac{k_{12}^2 Q_1 Q_2}{(1 + \sqrt{1 + k_{12}^2 Q_1 Q_2})^2} \quad (1)$$

As a general rule, Equation 1 indicates that an varying CF, dependent on transmission distance, geometry and orientation as shown in Fig. 6, is negligible if the coils' QFs are high enough. Presuming a typical $Q \approx 10 \dots 1000$ for both coils, its influence for weakly coupled systems with CF of $k_{12} \ll 1$ determines an immanent limit [19]. However, both factors can be optimized by fitting the underlying coil parameters based on geometrical considerations precisely to their designated applications [20]. Apart from common design improvements of air-core coils such as the usage of litz wire, new proposals for ferromagnetic cores, previously avoided due to the disadvantages of higher cost and weight, show that their addition combined with the derivation of a new optimal operation frequency can lead to higher efficiencies [21].

B. Transmission Power

Likewise for the PTE, achieving the maximum output power is dependent on the CF and matching the load impedance thus contradicting the optimizations elaborated in section IV-A demanding for compromises to be made in design [19]. The analysis and summary of prototypes for high power IPT applications like EV charging including aforementioned design considerations about systems structure, power electronics, and compensation networks reveal that the technological foundations for controls to achieve sufficient TP levels are existent while solely the widespread adoption is pending. [8] [22]

C. Transmission Distance

The principles of SCMR in chapter II-A3 can be extended by using multiple resonance coils placed as relays in a ladder-arrangement to achieve a higher transmission distance [23].

D. Positioning Flexibility

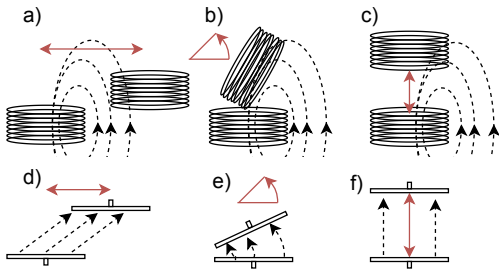


Fig. 6. Wireless power transfer does not restrict the positioning of devices. Deviations of displacement (a,d), orientation (b,e) and gap size (c,f) can alternate the coupling between sender and receiver thus affecting the system in its performance

Unlike CPT which is more tolerant to capacitance deviations due to the flat composition of its electrodes and the course direction of electric fields, the common use of planar coils for IPT creates a high dependency on misalignment. Magnetic flux leakage as shown in Fig. 6a-c causes its strong deviations of the optimal CF and frequency leading to a decreased PTE under different operating conditions.

1) *Detection*: Strategies divide into designing more flexible circuits for receivers or readjusting the transmitter to new operating conditions often requiring position detection measures in susceptible applications like sensor arrangements e.g. for implants [24] and EV charging [25] [26].

2) *Displacement*: Apart from simple methods to reduce its dependency with the use of coil arrays (see Fig 7b), radial and axial misalignment can be addressed with regular frequency fitting through source control and the transmission coils' resonance with compensation networks.

3) *Orientation*: Angular misalignment as shown Fig. 6b lowers the amount of magnetic flux in the coil. An elegant way for omnidirectional transfer is to control the magnetic fluxes direction with orthogonal coil arrangements at the cost of a devices compactness. As in [27], a cube-shaped receiver avoids additional electronics while still relying on a homogeneous magnetic field. With the addition of an identical transmitter, the system offers an improved performance and misalignment tolerance compared to single coil arrangements (see Fig. 7a). [28]

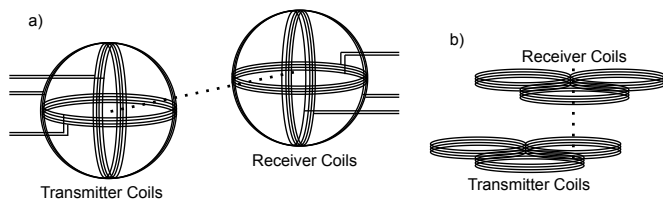


Fig. 7. Concepts for misalignment-tolerant WPT: orthogonal coils for omnidirectional flux control (a) and planar coil arrays (b). The dashed line represents the direction of the magnet field vector

A more recent approach overcomes both positioning problems maintaining its source frequency and a consistent trans-

mission by using non-linear resonant circuits auto-adjusting their resonance frequency based on the varying CF thus tolerating 75° angular misalignment while retaining nearly 85% PTE [29] [30].

E. Safety and Security

Research was done to estimate and avoid the effects of strong magnetic fields, waves or high frequency electric fields on biological matter and environment materials. Apart from mentioned technological improvements, details about operational safety is a hardly addressed issue concerning the adoption of WPT. For the security in case of public availability and dynamic vehicle charging applications in particular, rogue devices must not harness energy from foreign systems. The need for authentication and encryption during energy transmission can be realised with already existing protocols using dedicated communication hardware or through distinct switching behaviour of source and load. [31] [32]

V. CONCLUSION

This paper provides an overview of the predominant wireless power transfer domains presenting inductive and capacitive technologies for coupled non-radiative as well as microwave and optical transmission for radiative systems. It gives a brief insight into the extensive aspects of each technology displaying problems the within current research topics with an emphasis on inductive coupling. It is shown that within the last decade, research has brought forth developments in overall system design thus achieving better efficiencies, higher transmission distances and an increase in power level with new topology, operation and control concepts.

In the future, wireless power transfer will presumably continue to dominate its typical niche applications where special requirements prevent the use of alternatives. This includes near-field applications with limited space for energy storages or unfeasible connectivity such as very low power integrated sensors, smaller electronic devices and far-field domains such as aerial and space applications. EV charging in particular represents the most ambitious field with already mature prototypes increasing convenience and safety while offering a sufficient overall efficiency compared to conventional wired solutions. With ongoing technological improvements, it bears the potential to see further adoption in EV charging and as an component in smart grid concepts.

REFERENCES

- [1] X. Lu, P. Wang, D. Niyato, D. in Kim, and Z. Han, "Wireless charging technologies: Fundamentals, standards, and network applications," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 18, no. 2, pp. 1413–1452, 2016.
- [2] A. Banerji, T. Datta, G. Bandyopadhyay, S. K. Biswas, A. Banerji, and A. Banerji, "Wireless transfer of power: Status and challenges," in *2016 International Conference on Intelligent Control, Power and Instrumentation (ICICPI)*. Piscataway, NJ: IEEE, 2016, pp. 251–257.
- [3] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljacic, "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances," *Science (New York, N.Y.)*, vol. 317, no. 5834, pp. 83–86, 2007.
- [4] T. Imura, *Wireless Power Transfer*. Singapore: Springer Singapore, 2020.

- [5] S. Li, Z. Liu, H. Zhao, L. Zhu, C. Shuai, and Z. Chen, "Wireless power transfer by electric field resonance and its application in dynamic charging," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, no. 10, pp. 6602–6612, 2016.
- [6] H. Lakhali, M. Dhieb, H. Ghariani, and M. Lahiani, "Wireless power transmission technologies and applications," in *14th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control & Computer Engineering - STA'2013*. IEEE, 20.12.2013 - 22.12.2013, pp. 168–173.
- [7] X. Duan, L. Zhou, Y. Zhou, Y. Tang, and X. Chen, "Short-distance wireless power transfer based on microwave radiation via an electromagnetic rectifying surface," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, p. 1, 2020.
- [8] H. Feng, R. Tavakoli, O. C. Onar, and Z. Pantic, "Advances in high-power wireless charging systems: Overview and design considerations," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 6, no. 3, pp. 886–919, 2020.
- [9] A. Trikolikar and S. Lahudkar, "A review on design of compact rectenna for rf energy harvesting," in *2020 International Conference on Electronics and Sustainable Communication Systems (ICESC)*. IEEE, 7/2/2020 - 7/4/2020, pp. 651–654.
- [10] W. Zhou and K. Jin, "Power control method for improving efficiency of laser-based wireless power transmission system," *IET Power Electronics*, vol. 13, no. 10, pp. 2096–2105, 2020.
- [11] K. Jin and W. Zhou, "Wireless laser power transmission: A review of recent progress," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 34, no. 4, pp. 3842–3859, 2019.
- [12] T. Samanchuen, K. Jirasereeamornkul, C. Ekkaravarodome, and T. Singhavitai, "A review of wireless power transfer for electric vehicles: Technologies and standards," in *2019 4th Technology Innovation Management and Engineering Science International Conference (TIMES-iCON)*. IEEE, 11.12.2019 - 13.12.2019, pp. 1–5.
- [13] D. Patil, M. K. McDonough, J. M. Miller, B. Fahimi, and P. T. Balsara, "Wireless power transfer for vehicular applications: Overview and challenges," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 4, no. 1, pp. 3–37, 2018.
- [14] N. Xing and G. A. Rincon-Mora, "Highest wireless power: Inductively coupled or rf?" in *2020 21st International Symposium on Quality Electronic Design (ISQED)*. IEEE, 3/25/2020 - 3/26/2020, pp. 298–301.
- [15] K. Agarwal, R. Jegadeesan, Y.-X. Guo, and N. V. Thakor, "Wireless power transfer strategies for implantable bioelectronics," *IEEE reviews in biomedical engineering*, vol. 10, pp. 136–161, 2017.
- [16] S. Bi, Y. Zeng, and R. Zhang, "Wireless powered communication networks: an overview," *IEEE Wireless Communications*, vol. 23, no. 2, pp. 10–18, 2016.
- [17] T. D. Ponnimbaduge Perera, D. N. K. Jayakody, S. K. Sharma, S. Chatzinotas, and J. Li, "Simultaneous wireless information and power transfer (swipt): Recent advances and future challenges," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, no. 1, pp. 264–302, 2018.
- [18] Z. Zhang, H. Pang, A. Georgiadis, and C. Cecati, "Wireless power transfer—an overview," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 2, pp. 1044–1058, 2019.
- [19] W. Zhong, M. D. Xu, R. Hui, D. Xu, and R. S. Y. Hui, *Wireless Power Transfer: Between Distance and Efficiency*, 1st ed., ser. CPSS Power Electronics Series. Singapore: Springer Singapore, 2020.
- [20] B. H. Waters, B. J. Mahoney, G. Lee, and J. R. Smith, "Optimal coil size ratios for wireless power transfer applications," in *Circuits and Systems (ISCAS), 2014 IEEE International Symposium on*. [Piscataway, NJ]: IEEE, 2014, pp. 2045–2048.
- [21] L. Jinliang, D. Qijun, H. Wenshan, and Z. Hong, "Research on quality factor of the coils in wireless power transfer system based on magnetic coupling resonance," in *2017 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (WoW)*. IEEE, 5/20/2017 - 5/22/2017, pp. 123–127.
- [22] A. Foote and O. C. Onar, "A review of high-power wireless power transfer," in *2017 IEEE Transportation and Electrification Conference and Expo (ITEC)*. Piscataway, NJ: IEEE, 2017, pp. 234–240.
- [23] Z.-h. Ye, P.-y. Wang, L. Hu, and W.-T. Zhu, "Ladder-type mid-range wireless power transfer," in *2018 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (WoW)*. Piscataway, NJ: IEEE, 2018, pp. 1–4.
- [24] W. Han, K. T. Chau, C. Jiang, and W. Liu, "Accurate position detection in wireless power transfer using magnetoresistive sensors for implant applications," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 54, no. 11, pp. 1–5, 2018.
- [25] S. Y. Jeong, H. G. Kwak, G. C. Jang, S. Y. Choi, and C. T. Rim, "Dual-purpose nonoverlapping coil sets as metal object and vehicle position detections for wireless stationary ev chargers," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, no. 9, pp. 7387–7397, 2018.
- [26] A. N. Azad, A. Echols, V. A. Kulyukin, R. Zane, and Z. Pantic, "Analysis, optimization, and demonstration of a vehicular detection system intended for dynamic wireless charging applications," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 5, no. 1, pp. 147–161, 2019.
- [27] S. Kamotesov, P. Lombard, V. Semet, B. Allard, M. Moguedet, and M. Cabrera, "Omnidirectional inductive wireless charging of a 3d receiver cube inside a box," in *2018 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC)*. IEEE, 03.06.2018 - 07.06.2018, pp. 1–4.
- [28] P. Yao, J. Zhou, L. HAN, and K. Guo, "Basic principles of point-to-point omnidirectional wireless power transfer system," in *2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*. IEEE, 11.08.2019 - 14.08.2019, pp. 1–5.
- [29] X. Wang, O. Abdelatty, and A. Mortazawi, "A novel coupling factor independent highly efficient resonant based wireless power transfer," in *2017 47th European Microwave Conference*. Piscataway, NJ: IEEE, 2017, pp. 200–203.
- [30] O. Abdelatty, X. Wang, and A. Mortazawi, "Position-insensitive wireless power transfer based on nonlinear resonant circuits," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 67, no. 9, pp. 3844–3855, 2019.
- [31] E. Ahene, M. Ofori-Oduro, and B. Agyemang, "Secure energy encryption for wireless power transfer," in *2017 IEEE 7th International Advance Computing Conference (IACC)*. IEEE, 1/5/2017 - 1/7/2017, pp. 199–204.
- [32] Z. Zhang, K. T. Chau, C. Qiu, and C. Liu, "Energy encryption for wireless power transfer," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 9, pp. 5237–5246, 2015.

Technology analysis of multi-storey net-zero energy buildings in a two climate-zone comparison

Nicolas Kaul

Faculty Electronics and Information Technologies

OTH Regensburg

Regensburg, Germany

nicolas.kaul@st.oth-regensburg.de

Abstract—Residential and commercial buildings are among the highest energy consumers. The European Union and other countries worldwide passed individual policies stipulating a zero-energy design for the construction of future buildings. The new generation of high-rise buildings offers a huge potential in creating valuable space and saving energy through renewable technologies and energy-efficient construction. There is a need for an in-depth analysis of technologies used to cope with the challenge of designing energy-neutral buildings. This paper presents a collection of state-of-the-art technologies that are used to reach the requirement of an energy-neutral multi-storey building. Discussing the climatic conditions prevailing on-site creates a diverse overview of available technologies. Two climate zones were selected that differ both in humidity and temperature as well as seasonal extreme climates. A humid continental and a humid maritime climate region will be compared. Geographic regions that offer a variety of case-study buildings in these zones are the north of Europe and eastern China. The current state of technical development is covered by limiting the analysis to buildings constructed after 2005. We divide technological solutions into categories like isolation, space heating, water heating, energy harvesting and lighting solutions. It will be shown that there is no perfect technology achieving the goal of a neutral energy balance. The solutions must be adapted to the surrounding climate conditions since each climate zone offers different opportunities and challenges.

Index Terms—Net Zero Energy Building, NZEB, renewable energy, multi-storey building, technology analysis

I. INTRODUCTION

The German federal ministry of economics and energy published a statistic in 2016 stating that 35.3% of the total energy consumption are related to buildings. The largest share is held by private households with 22.1% [1]. The statistic indicates that zero-energy construction is an important future technology. Both the EU and other countries recognized this potential and passed laws requiring energy-efficient construction from 2021 [1]. The statement is strengthened by another statistic that predicts a 75% increase of the global market volume for energy efficient buildings [2].

Despite the economical incentives, the construction of zero-energy high-rise buildings represents an opportunity. On the one hand, climate change can be counteracted by more efficient use of energy and the use of decentralized renewable energies. On the other hand, the scarcity of living and working space in metropolitan areas is also being addressed. There is a demand for a detailed analysis of the current technologies used

to meet the challenge of building zero-energy multi-storey buildings.

The local climatic conditions also play a major role in this context. Firstly, they form the basis for the use of renewable energies. On the contrary, local climates can also pose special challenges due to extreme climates. The topic will be approached by analyzing the state-of-the-art technologies world wide and by comparing two climate zones in further detail. Besides, the term Net-Zero Energy Building (NZEB) shall be defined in the framework of this paper. The paper presents a categorization scheme, which classifies and compares different technologies. By looking at building projects constructed later than 2005, the current status is identified.

II. RELATED WORKS

Feng et al. [3] discussed in their paper 34 specific case studies in hot and humid climates, emphasizing that building systems and integrated systems must be integrated and optimized based on the local climate. They list and evaluate various design strategies. Furthermore they evaluate NZEB energy performance and summarize best practice for high-performance NZEBs.

Cao et al. [4] deal with the general buildings energy-consumption status worldwide and the state-of-the-art technologies for zero-energy buildings during the past decade. Doing this they address the current technologies for ZEBs worldwide and divide them into categories. They emphasize the role of space heating/cooling and the important role of the building envelope in the realization of an NZEB. Besides, they show which technologies are most efficient and effective in terms of location.

The research team around Hall et al. [5] are observing factors that are critical for the success of a high-rise net-zero energy building. Among other things, they conclude from their results that it is possible to build energy efficient high-rise buildings even in cold climates, if certain preconditions are met. The research team names a high insulation standard, efficient appliances and lighting, and large PV surfaces with high efficiency as important factors.

Lolli et al. [6] are comparing and analyzing the embodied and operational greenhouse gas emissions of two multi-storey case study buildings in Trondheim, Norway and Växjö Sweden. They are presenting energy systems used for both

buildings and describing measures how engineers coped with the challenge of designing a net-zero energy building.

III. LITERATURE REVIEW

The literature review had several objectives. One was to find different case studies to investigate the technologies. The search was limited to multi-storey buildings in the warmest and coldest climates possible. Furthermore, it was searched for definitions of net-zero energy buildings and special technologies like ground source heat pumps. The utilized search engines were Google Scholar, IEEE Explore, Elsevier and Science Direct. The results via Google Scholar will be highlighted. The search string "net zero energy buildings case study" retrieved 393,000 results. Indicating the topic is quite extensively covered and more limitations are needed. After reviewing the abstracts in terms of the given limitations, the paper published in 2019 by Feng et al. with 33 citations was selected. Various other relevant papers were identified via this paper. A reverse search strategy was applied to find scientific articles about the second case study building. In total, three different buildings were available. For the "Moholt Allmening Building" Google Scholar retrieved seven articles. Among them, the selected paper [6] by the research team around N. Lolli.

IV. DEFINITION OF NET-ZERO-ENERGY BUILDINGS

The definition of net-zero energy buildings is a highly discussed topic. The term was first used as early as 1976 from researchers in Denmark [7]. In modern times there are basically two key differences in the definitions. Both of them are dealing with external energy. They differ whether the plug load in the end-use or off-site renewable energy should be counted [8]. Feng et al. [3] visualized four categories of NZEB definitions. They can be observed in Figure 1. Type A and B buildings have all the renewable energy available on site. While type C and D also include renewable energy that is generated off-site. Pessl, Torcellini et al. [9] defined a "net-zero energy building [...] as building with greatly reduced energy needs through efficiency gains [...]". The definitions of type C and D could be exploited to be defined as NZEB without making an effort for energy efficiency and will not be regarded in this paper. Adding to the definition of Pessl et al. [9] the surplus of energy which is supplied to the grid should offset the annual electricity purchased from the grid [7]. So a Net-Zero Energy Building is in most cases not independent from an external power grid but supplies the same amount of energy as it consumes. In this paper, we will concentrate on NZEBs, which are defined as Type A or B Building, with an annual zero balance between the imported and exported electricity.

V. CLIMATE CLASSIFICATION

We have seen that the use of renewable energies has an impact on the definition of an NZEB. Since these energy sources are highly dependent on external influences for obvious reasons the discussion of local climate conditions deserves some interest.

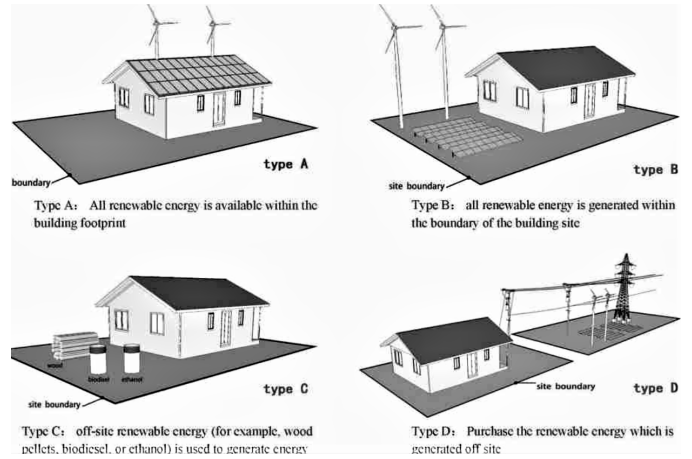


Fig. 1. Definitions of NZEB A,B: Renewable Energy on-site, C,D: Renewable Energy off-site [3]

Hall et al. [5] defined the variables heating demand, solar radiation, outdoor temperature and shading to evaluate locations. In addition, it is stated that in cold areas, insulation and recovery is important. In warmer sunny areas the use and construction of the facade has an impact on cooling buildings [4]. These points indicate that it is useful to make a technology analysis considering the prevailing climatic conditions on site. A consideration of two opposing climatic zones increases the differentiation of technologies and exhibit which technological measures are independent from climatic conditions.

Two climate zones were selected. First to mention is the humid tropical climate zone. The area is spread over the east of China, northern India and the east of Australia. The climate zone is characterized by a high number of daily sunshine hours and an average summer temperature of 24-27 °C and an average winter temperature of 8-16 °C. The precipitation occurs peak-like and mostly in the summer. Secondly, the climate zone of a humid continental climate was chosen. It is mainly found in central and eastern Europe. Besides, large parts of Russia and the north of Japan fall into this climatic region. Humid continental climate is characterized by a mean summer temperature of below 22 °C and a mean winter temperature of -3 °C and below. Due to the large coverage of the climatic zone, the daily sunshine hours are wide-ranging and tend to be low, especially in the northern countries. The selected climate zones have various case study buildings and are therefore suitable for the following technology analysis.

VI. CATEGORIES

Following the analysis of existing technologies for the implementation of an NZEB high-rise project, two case studies are discussed. To perform the comparison, a unified categorization has to be developed first. Two categorizations are commonly used in the literature. Feng et al. [3] established the following five categories:

- Architectural Design and Envelope (ADE)
- Heating, Ventilation and Air-Conditioning (HVAC)

- Lighting
- Plug load equipment
- Renewable Energy Technologies

Whereas Cao et al. [4] divides renewable energy into solar, wind, geothermal and bioenergy and differentiates between active and passive measures. The following presentation of technologies used worldwide are structured by the introduced categories in [3] and more broadly elaborated by the second categories.

A. Architectural Design and Envelope:

Passive Measures play an important role in the design of an NZEB and deserve a high interest [3]–[5]. High-Performance Materials for thermal insulation increase the energy-saving dramatical. Energy preservice has a high importance and decreases the work load for an active device [4]. Another design feature that adds to this point is the installation of solar shading devices like blinds or reflective windows [3], [4]. Through the placement on the outer shell, heat gained through sun intake is absorbed and stopped from transmitting energy into the building. The construction of a Trombe wall names the opposite approach and traps the incoming heat to transmit energy inside for heating reasons [4]. Site vegetation is a practical way to insulate walls and mitigate urban warming. Common installations are roof greening, vertical greening and hanging gardens. Sunlight converses through photosynthesis. The transpiration of water adds to the cooling effect [3]. Measures regarding the building construction and its efficiency are an optimized window-to-wall ratio and the use of phase change materials to store heat/cold [3].

B. Heating, Ventilation and Air-Conditioning:

A sufficient way of renewable heating is the combination of a ground source heat pump and a photovoltaic system. Photovoltaic (PV) panels produce the electricity that is needed to run the pumps. The heat produced by the panels is utilized as a heat source for the heat pump. [7], [10] In a cooling dominated environment the use of a chilled ceiling is an energy-efficient way of producing a comfortable climate [4]. Another possibility is the installation of a variable air volume system that varies the volume of the air despite just cooling down the preserving air [4]. Active thermal storage systems can shift energy from an on-peak to an off-peak and can help to avoid peak charges and balance energy supply and demand. Another feature that helps to gain efficiency is an air heat recovery system that warms up the incoming fresh air with used air. [4], [6]

C. Lighting:

Lighting in a building is an underrated energy consumer. The reduction of artificial lighting through natural daylight harvesting can have a huge impact on general building efficiency. There are several smart blind controls available to allow daylight to enter the building without gaining too much heat [3], [4]. Solar Tubes and Skylights can be used in a similar

way [3]. The use of energy-efficient appliances like led lighting is also advised in the design of an NZEB [4].

D. Plug load equipment:

The plug load equipment deals with the appliances the occupant is using e.g. Laptops, Dishwasher, Washing machine and other devices. The use of energy-efficient devices helps to reduce overall energy usage. [4]

E. Solar-, Wind-, Geothermal- and Bioenergy:

Renewable Energies as sources and the underlying principles are well known and will not be discussed in detail. The most common technologies to gain energy in the realization of NZEBs are photovoltaic systems or solar thermal systems for using solar energy, wind turbines for harvesting wind energy and ground source heat pumps to use geothermal energy. Less common is the use of bioenergy like agricultural waste products or forestry activity. [4]

VII. CASE STUDY I: PEARL RIVER TOWER, GUANGZHOU

Followed by the literature research of available technologies, there will be the analysis of our first case study building. The Pearl River Tower located in Guangzhou, China. The 310 m high office tower has a total of 71 floors. It is considered one of the most energy-efficient office towers in the world at this height [11]. The first passive measures to mention are the architectural, design and envelope strategies of a double-wall facade. Through adding a second layer of glass a double envelope can accommodate venting and solar shading devices. Benefits are: “thermal comfort and air quality, greater opportunity to bring useful daylight into the space and reduced noise transmission from tower surroundings” [11]. Another measure is the integrated mechanized blinds for ideal shading. The smart control determines the suns position and adapts the blinds angle in a way that the right amount of light can transmit into the building without having a high-temperature gain. Another measure counteracting temperature gain is the triple glazing of the buildings facade to reflect sunlight. [11]

Regarding the heating, ventilation and air-conditioning features the Pearl River Tower uses a combined system of a chilled radiant ceiling and an underflow ventilation system for ideal temperature control. A recirculation system is used to reuse cooled/heated air supplied in the building. [11]

The building integrated photovoltaic system deserves some special interest. As a high-rise net-zero-energy building, the PV is integrated into the buildings’ south facade, since the roof space is limited. Each PV system has a ventilation window at the back. During the summer months, the window is closed and the building is operated in air-conditioning mode. During wintertime, the natural ventilation window is open, and the outdoor air can flow through the back of the PV, take the heat from the PV panel, and bring it to the building. This design intelligently integrates the renewable energy system with the building envelope and natural ventilation, thus greatly improving the NZEBs performance. [3], [11] Next to the generation of electricity through solar energy, the Pearl River

Tower uses wind energy to generate power. The design of the building has four large openings with vertical axial turbines in it. The outer shell is designed in a way that oncoming wind is guided into the openings and works like a funnel to increase the air pressure and increase efficiency. [11]

Lighting plays an important role when it comes to building efficiency. The engineers for the Pearl River Tower installed a lighting system with a radial panel geometry to assist in the distribution of light. Furthermore, there is a daylight responsive control of the blinds. [11]

VIII. CASE STUDY II: MOHOLT ALLMENNING TOWER B, TRONDHEIM

Moholt Allmenning Tower B serves as the second case study. It is a 28m high building with nine floors and is located in Trondheim, Norway. The building is used as a student dormitory and is part of a building complex with a total of five buildings and 632 residential units. It is considered a showcase project for energy-efficient construction in the Scandinavian countries. [6]

Advanced envelope materials were used for the implementation of the NZEB. The exterior envelope consists of wood cladding, timber frames, wool insulation and gypsum boards. The heating and cooling supply loop are connected to the other four buildings and kindergarten by a ground-source heat pump. The system can store thermal energy during periods of surplus heat production in water tanks. Regarding the ventilation, a mechanical balanced ventilation system is used, which supplies air into students rooms and living area and extracts it through the outlets in the kitchens and bathrooms. An air heat recovery systems with 85 % efficiency counteract the losses to the environment. Despite having fewer sunlight hours/day than most southern countries, the building has a 70m² photovoltaic system on its roof to generate electricity. In combination with the central ground source heat pump, it covers most of the heating, cooling, ventilation, domestic hot water, snow melting plant and student laundry. [6]

IX. DISCUSSION

The case study examples presented different technologies to achieve the construction of a net-zero energy building in their specific climate. In this discussion paragraph we will conduct a comparison to specifically illuminate the influence of the climate conditions.

As can be observed from Table I the architectural design and envelope mainly follows the same task in both climates. The insulation of the building to its environment. In the case of a hot and humid climate the focus lies on the preservation of coolness in the building and the reduction of solar heat gain through sunlight intake. On the contrary, the case study building in Norway concentrates on the preservation of warmth in the building. Regarding heating, ventilation and air-conditioning the engineers for the business tower implemented special ventilation system to maintain a comfortable indoor climate. The use of a ground source heat pump and special heating systems was sufficient for the installation in

TABLE I
SUMMARY CASE STUDIES

	Case Study I Pearl River Tower	Case Study II Moholt Allmenning
ADE	double wall facade triple glazed facade	advanced materials
HVAC	chilled ceiling underfloor venting recirculate cooled air	heat pump air heat recovery underfloor heating
Lighting	radiant panel geometry daylight responsive blinds	LED lighting
Renewable Energie Systems	wind turbines facade photovoltaic	photovoltaic system

the norwegian student dormitory. Lighting follows different approaches in the specific regions. Northern European states have the disadvantage to have less daily sunlight hours, due to its geographical position close to the north pole. The use of daylight as an alternative for artificial lighting is therefore insufficient. For regions that have lots of sunlight this must be of great importance. As can be seen in the various daylight concepts in the Pearl River Tower. As a last point and the most important factor regarding local climates and the generation of energy. The use of renewable energy technologies. The regional differences are highly dependent on the location that go beyond the climate alone and can not be discussed in detail in the scope of this paper. For case study I wind and solar energy are used to generate energy. Case study II is focusing on the use of solar energy and the preservation of energy.

X. CONCLUSION

The results have shown that there are technologies that can be used to build an NZEB in both cold and warm climates. For the humid subtropical climate, passive measures such as the installation of blinds or mirroring and the use of double-layer facades have proven to be successful. Besides, energy generation with PV systems plays a major role and offers particular advantages as a building-integrated system. In contrast, for cold-dominated areas, it is important to install a high-performance HVAC, with most of the papers studied mentioning the use of a ground source heat pump. Also, insulation of the outer shell is of particular importance, as it prevents valuable energy from being lost in the first place. The use of energy-efficient equipment is independent of the outdoor conditions and therefore of equal importance in both climates. The application of the results can be applied to climatic zones that are between the considered ones. It is necessary to consider the extent to which technologies are installed in each case.

XI. REFERENCES

- [1] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Sechster monitoring bericht zur energiewende - die energie der zukunft: Berichtsjahr 2016, Juni 2018.

- [2] Roland Berger. Globales marktvolumen energieeffizienter gebäude im jahr 2016 sowie eine prognose für das jahr 2025, 2020.
- [3] Wei Feng, Qianning Zhang, Hui Ji, Ran Wang, Nan Zhou, Qing Ye, Bin Hao, Yutong Li, Duo Luo, and Stephen Siu Yu Lau. A review of net zero energy buildings in hot and humid climates: Experience learned from 34 case study buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 114:109303, 2019.
- [4] Xiaodong Cao, Xilei Dai, and Junjie Liu. Building energy-consumption status worldwide and the state-of-the-art technologies for zero-energy buildings during the past decade. *Energy and Buildings*, 128:198–213, 2016.
- [5] Monika Hall and Achim Geissler. *Hochhäuser als Nullenergiegebäude - ist das möglich?* brenet-Geschäftsstelle, 2016.
- [6] Nicola Lolli, Selamawit Mamo Fufa, and Marianne Kjendseth Wiik. An assessment of greenhouse gas emissions from clt and glulam in two residential nearly zero energy buildings. *Wood Material Science and Engineering*, 14(5):342–354, 2019.
- [7] Anna Joanna Marszal and Per Heiselberg. Life cycle cost analysis of a multi-storey residential net zero energy building in denmark. *Energy*, 36(9):5600–5609, 2011.
- [8] P. Torcellini, S. Pless, M. Deru, and D. Crawley. Zero energy buildings: A critical look at the definition; preprint. *National Renewable Energy Laboratory*, (NREL/CP-550-39833), 2006.
- [9] S. Pless and P. Torcellini. Net-zero energy buildings: A classification system based on renewable energy supply options. *National Renewable Energy Laboratory*, (NREL/TP-550-44586), 2010.
- [10] Giuseppe Emmi, Angelo Zarrella, Michele de Carli, and Antonio Galgaro. An analysis of solar assisted ground source heat pumps in cold climates. *Energy Conversion and Management*, 106:660–675, 2015.
- [11] Russell Gilchrist Roger Frechette. Case study: Pearl river tower, guangzhou, china: Towards zero energy. *Council on Tall Buildings and Urban Habitat*, 2008.

Basics and Challenges of Ray Tracing for the Simulation of Wave Propagation

Franziska Rasp

Department of Electrical Engineering and Information Technologies
Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg
Regensburg, Germany
franziska.rasp@st.oth-regensburg.de

Abstract—The demand for area-wide radio coverage in cities is growing. Reasons for this are modern radio standards such as 5G, RADAR or car2x applications. Radio dead spots caused by incorrectly positioned base stations should be avoided. Simulations based on ray tracing can be used to analyse and improve radio propagation in cities.

Ray tracing aims to model wave propagation with realistic accuracy. In this paper we examine the development of ray tracing. The main focus lays on the method of Shooting and Bouncing Rays (SBR) and its extensions. Current and already solved challenges of ray tracing are presented together with possible solutions. Despite the parallels to optical ray tracing in computational science this topic is not covered.

We describe how the calculation method of ray tracing has progressed. As a basis we use the principles of Geometric Optics (GO) and Physical Optics (PO). From this the SBR method is developed. It is characterized by an efficient handling of environments with many reflections. By adding the Physical Theory of Diffraction (PTD), Uniform Theory of Diffraction (UTD) and the analysis of Creeping Wave (CW) rays, the model is adapted to diffraction, scattering, and refraction effects. Hence, a realistic simulation of wedges and convex geometries is possible.

Index Terms—Ray Tracing, Radiowave Propagation, wireless communication, reflection, physical theory of diffraction

I. INTRODUCTION

The demand for wireless technologies such as Car2x, RADAR and mobile communication applications as LTE and 5G is constantly increasing.

Communication with mobile networks is hampered by radio dead spots. These are areas in which signal reception is very low or not possible. Such regions can be reduced by placing base stations correctly taking into account the geographical conditions. To plan the position of base stations field simulations must be carried out in advance to reproduce the propagation of waves as realistically as possible. [1] [2]

Ray tracing based on the Shooting and Bouncing Ray (SBR) method has become widely accepted in recent decades for predicting the propagation paths of high-frequency waves [3]. In contrast to empirical models of coverage prediction ray tracing methods are much more accurate. Although ray tracing is less accurate than the numerically exact method of moments it is more suitable for calculating the propagation of high-frequency rays in large geometries due to the much shorter calculation times and less memory requirements. [4]

This paper is structured as follows. In Section II our motivation and choice of literature used are presented. In

Section III a general ray tracing definition as well as equations for ray trajectories and possible representations of rays are given.

The functioning of the Image method and the SBR method is explained in Section IV. The history, the algorithm as well as their acceleration possibilities and shortcomings of the latter method are discussed. In Section V it is explained how the SBR method can be extended to correctly calculating effects of wedge diffraction by using the Physical Theory of Diffraction (PTD) and the Uniform Theory of Diffraction (UTD). The propagation of waves into shadow regions is given by calculating Creeping Waves (CW).

II. RELATED WORKS AND LITERATURE SELECTION

With more than 500 citations the most relevant paper in the field of ray tracing for the simulation of wave propagation is the paper published in 1989 by Ling et al. [5]. It explains a ray tracing algorithm named the SBR method which can calculate the propagation of electromagnetic waves in electrically large environments. Most of the current literature on ray tracing refers to this basic paper. Therefore, we lay a certain focus on publications that use and explain SBR related ray tracing algorithms. The selected papers extend SBR in a way that compensates for its deficits. Publications that deal with ray tracing algorithms for specific application cases, as e.g. simulation of wave propagation in cities [6], are not examined.

Yun et al. [7] gives a general overview on ray tracing principles. The publication focuses on the Image method, SBR method, hybrid methods and acceleration possibilities of those. They define also different ray shapes and explain how diffraction effects can be calculated. The paper was updated in 2015 [8] regarding new acceleration methods. Since both papers are among the most cited ones, [7] was cited 262 times and [8] 110 times, they are of great interest for current ray tracing developments.

Particular focus is placed on the publications of Weinmann et al. [4] [9] Kipp et al. [10] [11] and Motamad et al. [12]. Reference [4], [9] and [10] explain how the PTD and UTD can be used to simulate diffraction effects on wedges and their contribution to an scattering field. Reference [11] and [12] deal with the effects of CW rays. Reference [11] extends the SBR method based on the asymptotic CW theory to simulate

smooth transition for surface fields at shadow boundaries of a curved object based on Pathak et al. [13].

The reference papers are considered relevant as they extend the SBR method by physical aspects that are used in simulation programmes such as HFSS [14] and REMCOM [15].

III. DEFINITION AND TERMS

The following chapter deals with the basic definitions of ray tracing, the calculation of the ray trajectories and different ways of visualising rays.

A. Ray Tracing Definition

The IEEE Standard Definitions of Terms for Radio Wave Propagation [16] describes ray tracing as an algorithm which determines the propagation paths of waves using high-frequency approximations of Geometric Optics (GO).

B. Ray Trajectory Equation

A propagating wave shall be described by its electric field $\vec{E}(\vec{r})$ and its magnetic field $\vec{H}(\vec{r})$.

$$\begin{aligned}\vec{E}(\vec{r}) &= \vec{e}(\vec{r})e^{-j\beta_0 S(\vec{r})} \\ \vec{H}(\vec{r}) &= \vec{h}(\vec{r})e^{-j\beta_0 S(\vec{r})}\end{aligned}\quad (1)$$

The amplitude vectors are represented by $\vec{e}(\vec{r})$ and $\vec{h}(\vec{r})$. $S(\vec{r})$ is the optical path length. Time dependencies are neglected since they are regarded as harmonic. The waves propagate orthogonal to their magnetic field and orthogonal to the electric field along the poynting vector. It corresponds to the power propagation direction. These power lines can also be called rays. [8]

The propagation along a path segment $\frac{d}{ds}$ of the ray is described by Equation (2). The derivation of this differential equation is done in [8].

$$\frac{d}{ds} \left(n \frac{d\vec{r}}{ds} \right) = \nabla n \quad (2)$$

The refractive index is given by Equation (3).

$$n = \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \quad (3)$$

Assuming a wave in a homogeneous medium a constant refractive index, i.e. $\nabla n = 0$, can be inserted into Equation (2). This results in Equation (4).

$$\frac{d^2 \vec{r}}{ds^2} = 0 \quad (4)$$

Equation (4) can be solved by a straight line of the expression $\vec{r} = \vec{a}s + \vec{b}$ with the constant vectors \vec{a} and \vec{b} . Thus rays propagate in homogeneous medium on a straight line. [8]

C. Different Ray Shapes

Rays can be displayed in different ways as shown in Figure 1. A direct ray (see Figure 1 left) is the simplest form. Rays are mostly implemented as diverging ray-cones, ray-tubes or astigmatic rays in general (see Figure 1 right and middle). [7] [8] [17]

If diverging ray shapes are used the collision with an object can be determined easily. A hit can be recorded if the receiving point is located within the ray-cones or ray-tubes. [8]

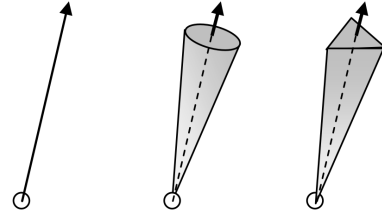


Fig. 1. Different ray-geometries emitted by a point source: direct ray (left), ray-tube (middle) and ray-cone (right) [7].

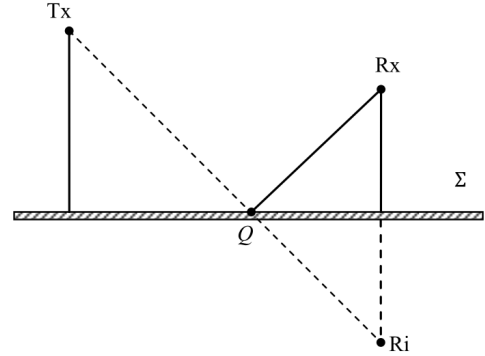


Fig. 2. Basic concept of the Image method. Construction of the propagation path between the Transmitter (Tx), a reflection point (Q) and the Receiver (Rx). The Receiver image (Ri) results from the reflection of Rx at the surface Σ . The intersection of the line connecting Tx and Ri with Σ gives Q. [8]

IV. BASIC RAY TRACING CONCEPTS

The Image method and the Shooting and Bouncing Rays method are the most commonly used basic concepts on which advanced ray tracers are built. [8] Their basic principle and limitations are presented in this section.

A. Image Method

The Image method can be described as the easiest of all ray tracing methods. Figure 2 demonstrates the Image method. It examines the propagation path of a ray that is sourced from a Transmitter (Tx), reflected from a planar surface (Σ) and received by a Receiver (Rx). First, the Receiver image (Ri) is calculated. It results from the reflection of Rx in respect to the surface Σ . Then a connecting line is drawn between Ri and Tx. The intersection of the link line with the plane surface gives the third determination point (Q) of the propagation path.

In the case of a large number of reflecting surfaces the Image method requires long calculation times. It is therefore rarely used in practice. [4] [7] [8]

B. Shooting and Bouncing Rays Method

1) *History:* The SBR method was developed in 1989 by Ling et al. [5] to calculate the scattered fields in arbitrarily shaped cavities. It can be used to simulate the scattered fields of electrically large environments [5] [18]. SBR is a hybrid method based on principles of Physical Optics (PO) and GO.

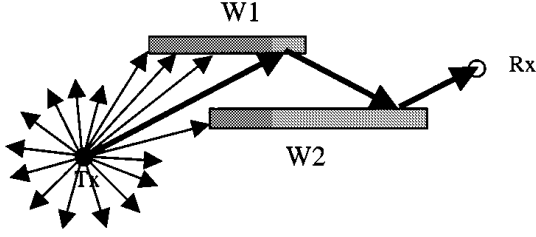


Fig. 3. Shooting and Bouncing Ray principle. Spherical ray launch at the Transmitter (Tx), ray tracing in scattering geometry and ray reception at a Receiver (Rx). [7]

By approaching the wavelength towards zero GO or ray optics can observe and calculate wavefronts and rays. GO is particularly well suited for geometric calculations such as the reflection of rays. [19] PO is also called wave optics. It studies interferences, diffraction and polarization of waves. In case of ray tracing PO is used to calculate the scattering field at an observation by integration of the equivalent surface currents. [4]

2) *Algorithm*: The ray tracing method involves three steps: ray launching, ray tracing and ray reception as illustrated in Figure 3. First GO-rays are sent from the antenna to the scattering geometry [17]. Originally, parallel GO rays are emitted at the start [5] [20]. Alternatively, the GO-rays can be launched from the Tx spherically (see Figure 3 left). A division of the spherical surface into a regular icosahedron proves to be optimal as this geometry prevents non-uniform cross-sections of the ray-tubes. [8] Due to the collision of a ray with an object of the CAD model reflections occur. First reflections are called first-bounce correspondingly second reflections are called second-bounce. The resulting vector fields are determined using GO based on the material properties of the surfaces. The reflected ray either escapes or is reflected again. By using PO the equivalent surface currents of the incoming ray are calculated. By integrating the surface currents the scattering field at every observation point is calculated. The total field is obtained by adding the scattered field to the direct line of sight radiation of the antenna. [4] [8] [10] [11] [17] [18] [20]

3) *Acceleration Possibilities*: The integration of all field components in the last step of the SBR algorithm can be very time-consuming if there are a large number of observation points. For each ray it is checked whether it collides with a facet of the object and thus contributes to the total scattered field. This problem is circumvented by Eibert et al. [3] by using deterministic ray tracing methods. Other acceleration methods use space division. This approach reduces the number of possible hit objects by dividing the geometry into cells. Two-dimensional simplifications and the use of Graphics Processing Unit (GPU) optimised algorithms are also suitable to increase the efficiency of the SBR method. [8] By using the machine learning algorithms acceleration methods can be made more accurate in terms of path loss calculations [22].

4) *Deficits of the SBR Method*: The SBR method demonstrates inadequacies in the tracking of rays that were diffracted at wedges. This is significant as rays are diffracted, reflected and diffracted again having a significant impact on the final result. [9] Furthermore, the SBR method does not include calculation methods for convex surfaces. CW propagating on such geometries can therefore not be simulated and the proportion of the scattered field caused by them cannot be calculated. [11]

V. SBR EXTENSIONS

With the help of the PTD, UTD and CW theory, the biggest deficits of the SBR method are compensated. In the following section the utility and the concept of each extension is explained.

A. SBR + PTD/UTD

A combination of PTD and UTD can calculate rays diffracted at wedges with great accuracy [8] [9].

1) *PTD Concept*: The PTD extends PO in a way that currents at wedges are calculated. Thus, the scattered fields caused by currents at wedges can be modelled [4]. Using Equation 5 the vector of the diffracted electric field \vec{E}_d generated by PTD can be calculated.

$$\begin{aligned} \vec{E}_d = & \frac{e^{-jks}}{2\pi s} dl \left[(D_m - D'_\perp)(\vec{E}_i \vec{e}_{\perp,i}) \vec{e}_{\perp,s} \right. \\ & - (D_e - D'_\parallel) \frac{\sin(\beta)}{\sin(\beta')} (\vec{E}_i \vec{e}_{\parallel,i}) \vec{e}_{\parallel,s} \\ & \left. - (D_{em} \sin \beta' - D'_x) \frac{\sin \beta}{\sin \beta'} (\vec{E}_i \vec{e}_{\perp,i}) \vec{e}_{\parallel,x} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

This requires the vector of the incident electric field \vec{E}_i , the unit vectors \vec{e} of the local coordinate system, the diffraction coefficients D and the angles β and β' of the incident ray and scattered rays. [4] [21]

2) *UTD Concept*: UTD is well suited for the calculation and tracking of rays diffracted at wedges. [8] [9]

The edge of the object is assumed to be infinitely long. A ray hitting the edge of an object is diffracted and emitted as a Keller cone, as seen in Figure 4. There are N_{UTD} rays in total, which are assigned the angles $\phi_k = (k - 0.5)n\pi/N_{UTD}$. The outer wedge angle is represented by $n\pi$. The angle β between the diffracted ray and the edge is identical to the angle β' of the incident ray and the edge.

The propagation paths are described by $\varphi, 0^\circ < \varphi < n\pi$. The newly generated rays are reflected by the object according to the rules of GO, as described in the SBR method above.

At the time of diffraction, it is not yet known which of the diffracted rays will contribute to the final result. Therefore all rays are tracked equally. The angles of the rays are stochastically distributed between $(k - 1)n\pi/N_{UTD} < \phi_k < kn\pi/N_{UTD}$ to reduce aliasing effects at the wedges. [4] [9]

Equation (6) describes how the diffracted field strength at distance s can be calculated using the input field strength E^i

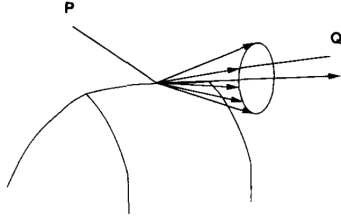


Fig. 4. Wedge diffraction of a ray as a Keller cone [23].

and the diffraction coefficients for hard and soft polarisation $D_{s,h}$ as well as the spread factor which indicates the divergence of the diffracted wave [9].

$$E^d(s) = D_{s,h}A(s)E^i \quad (6)$$

The calculation of the diffracted electric field strength is done in [9]. The main focus lies on the calculation of perfectly conducting wedges based on [24]. Reference is made to [25] for the much more complex calculations of impedance affected wedges.

B. SBR+CW

1) *Usage of the CW Method:* The SBR method does not manage to draw surface currents in areas that are not illuminated directly or by reflection. These areas are called shadow regions. As a result significant areas are not simulated correctly especially with convex objects. Using a CW concept based on UTD the wave behaviour in the shadow regions can be predicted. The approach provides calculation methods for surface-dependent field and polarisation effects of a convex surface. [11] [13] [14]

2) *CW Concept:* To simulate CW on a convex surface the surface is first divided into two regions. The illuminated region and the shadow region. The SBR method can only draw and calculate surface currents in the illuminated part. In the shadow region the PO surface currents and the scattered field calculated from them are assumed to be non-existent. [11] [13] [14] With the help of correction rays based on Fock integrals used in [13] it is possible to calculate a smooth transition between the illuminated and the shadow regions.

The concept of CW, as seen in Figure 5, adjusts the ray path of the GO and PO rays asymptotically. With increasing proximity to the shadow boundary the rays are corrected according to the Fock integrals as described in [13]. Thus they are also guided along the shadow side. During propagation the surface currents become weaker due to emitting energy. The energy radiating in the direction of propagation contributes to the scattering field of the entire geometry.

VI. CONCLUSION

This paper focused on the basics of ray tracing. On the basis of the presented principles advanced ray tracing algorithms

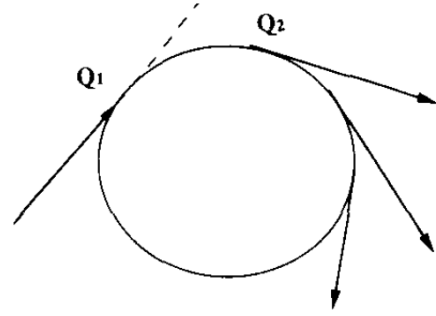


Fig. 5. Diffraction by a smooth surface and propagation of Creeping Wave rays [23].

can be built. A decision for either the Image method or the SBR method depends on the geometry to be investigated, the required simulation accuracy and the available computing power.

The Image method is particularly suitable for simple geometries with few facets and correspondingly few reflections. Large and reflective environments can be simulated using the SBR method and its extensions.

An examination of the geometry is necessary to decide whether edge diffraction effects and Creeping Waves must be taken into account. Accordingly, PTD, UTD and CW theory can be incorporated into the ray tracing algorithm.

VII. FUTURE OUTLOOKS

Whether ray tracing simulation will continue to be based on the SBR method or the Image method is not yet clear. Other ray tracing algorithms based on deterministic rays are likely to take over the research field. However, it is very conceivable that more machine learning approaches, such as [22], will enter the field and improve the existing algorithms. The research for intelligent ray tracing algorithms has not yet come to an end and with the increasing number of radio applications their importance is growing all the more.

REFERENCES

- [1] Y. Lmoumen, Y. Ruichek and R. Touahni, "Experimental evaluation of LTE throughput using D2D multi-hop communications," 2019 International Conference on Wireless Technologies, Embedded and Intelligent Systems (WITS), Fez, Morocco, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/WITS.2019.8723674.
- [2] A. Hsiao, C. Yang, T. Wang, I. Lin and W. Liao, "Ray tracing simulations for millimeter wave propagation in 5G wireless communications," 2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, San Diego, CA, 2017, pp. 1901-1902, doi: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2017.8072993.
- [3] H. Azodi, U. Siart and T. F. Eibert, "A Fast 3-D Deterministic Ray Tracing Coverage Simulator Including Creeping Rays Based On Geometry Voxelization Technique," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 63, no. 1, pp. 210-220, Jan. 2015, doi: 10.1109/TAP.2014.2365572.
- [4] F. Weinmann, "Ray tracing with PO/PTD for RCS modeling of large complex objects," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 54, no. 6, pp. 1797-1806, June 2006, doi: 10.1109/TAP.2006.875910.

- [5] H. Ling, R. Chou and S. Lee, "Shooting and bouncing rays: calculating the RCS of an arbitrarily shaped cavity," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 37, no. 2, pp. 194-205, Feb. 1989, doi: 10.1109/8.18706.
- [6] G. Liang and H. L. Bertoni, "A new approach to 3-D ray tracing for propagation prediction in cities," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 46, no. 6, pp. 853-863, June 1998, doi: 10.1109/8.686774.
- [7] M. F. Iskander and Z. Yun, "Propagation prediction models for wireless communication systems," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 50, no. 3, pp. 662-673, March 2002, doi: 10.1109/22.989951.
- [8] Z. Yun and M. F. Iskander, "Ray Tracing for Radio Propagation Modeling: Principles and Applications," in *IEEE Access*, vol. 3, pp. 1089-1100, 2015, doi: 10.1109/ACCESS.2015.2453991.
- [9] F. Weinmann, "UTD Shooting-and-Bouncing Extension to a PO/PTD Ray Tracing Algorithm," in *IACES JOURNAL*, vol. 24, NO. 3, Jun. 2009.
- [10] R. A. Kipp and I. Capoglu, "Extending shooting-and-bouncing rays method with uniform theory of diffraction for installed antennas," 2014 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI), Memphis, TN, 2014, pp. 2198-2199, doi: 10.1109/APS.2014.6905426.
- [11] R. A. Kipp, S. M. Canta, T. A. Courtney and D. L. Setterdahl, "Extending shooting-and-bouncing rays method with creeping waves for radar signature prediction," 2015 IEEE Radar Conference (RadarCon), Arlington, VA, 2015, pp. 0704-0707, doi: 10.1109/RADAR.2015.7131087.
- [12] M. Motamed and O. Runborg, "A fast phase space method for computing creeping rays," *Journal of Computational Physics*, vol. 219, pp. 276-295, 2006, doi: 10.1016/j.jcp.2006.03.024.
- [13] P. Pathak, Nan Wang, W. Burnside and R. Kouyoumjian, "A uniform GTD solution for the radiation from sources on a convex surface," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 29, no. 4, pp. 609-622, July 1981, doi: 10.1109/TAP.1981.1142636.
- [14] S. Ahmed, "Simulation of Creeping Wave Propagation in Electrically Large Curved Surface Using HFSS," 2020 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (ACES), Monterey, CA, USA, 2020, pp. 1-2, doi: 10.23919/ACES49320.2020.9196169.
- [15] <https://www.remcom.com/high-frequency-em-analysis-software-xgtd>, Accessed: 2020-12-10
- [16] "IEEE Standard Definitions of Terms for Radio Wave Propagation," in *IEEE Std 211-2018 (Revision of IEEE Std 211-1997)*, pp. 1-57, 1 Feb. 2019, doi: 10.1109/IEEESTD.2019.8657413.
- [17] R. A. Kipp, "Curved surface scattering geometry in the shooting and bouncing rays method," 2010 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, Toronto, ON, 2010, pp. 1-4, doi: 10.1109/APS.2010.5562313.
- [18] Jian-Ming Jin et al., "A hybrid SBR/MoM technique for analysis of scattering from small protrusions on a large conducting body," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 46, no. 9, pp. 1349-1357, Sept. 1998, doi: 10.1109/8.719979.
- [19] M. Born, E. Wolf, "Principles of Optics – Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light", Cambridge University Press, 1999, ISBN:9781139644181, doi: <https://doi.org/10.1017/CBO9781139644181>.
- [20] C. L. Yu and S. W. Lee, "Radar cross section computation and visualization by shooting-and-bouncing ray (SBR) technique," *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium 1992 Digest*, Chicago, IL, USA, 1992, pp. 1323-1326 vol.3, doi: 10.1109/APS.1992.221753.
- [21] F. Weinmann, "Errata to "Ray Tracing With PO/PTD for RCS Modeling of Large Complex Objects"," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 54, no. 8, pp. 2442-2442, Aug. 2006, doi: 10.1109/TAP.2006.880563.
- [22] S. K. Goudos, G. Athanasiadou, G. V. Tsoulos and V. Rekkas, "Modelling Ray Tracing Propagation Data Using Different Machine Learning Algorithms," 2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Copenhagen, Denmark, 2020, pp. 1-4, doi: 10.23919/EuCAP48036.2020.9135639.
- [23] D. P. Bouche, F. A. Molinet and R. Mittra, "Asymptotic and hybrid techniques for electromagnetic scattering," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 81, no. 12, pp. 1658-1684, Dec. 1993, doi: 10.1109/5.248956.
- [24] R. G. Kouyoumjian and P. H. Pathak, "A uniform geometrical theory of diffraction for an edge in a perfectly conducting surface," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 62, no. 11, pp. 1448-1461, Nov. 1974, doi: 10.1109/PROC.1974.9651.
- [25] J. Volakis, "A uniform geometrical theory of diffraction for an imperfectly conducting half-plane," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 34, no. 2, pp. 172-180, February 1986, doi: 10.1109/TAP.1986.1143808.

Speech Recognition: Current Technologies, Possibilities and Limitations

1st Monika Akstaller
Dept. Electrical Engineering
OTH Regensburg
Regensburg, Germany
monika.l.akstaller@st.oth-regensburg.de

Abstract—Since the possibility of integrating speech control into smart systems Automated Speech Recognition is becoming increasingly important in modern life.

With services as Alexa or Google Home companies brought speech control to the mainstream market. This required key developments to implement Automated Speech Recognition on devices with low computing power. The most popular system for a long time was the Hidden-Markov Model. The integration of a Neural Network made higher recognition rates possible. Since Neural Networks improved they become increasingly important for Automated Speech Recognition but the Hidden-Markov Model is still important.

In this paper the modern Automated Speech Recognition systems are discussed. Therefore the idea of the Hidden-Markov Model is presented. The paper will also show the use of Neural Networks for Automated Speech Recognition as a hybrid system as well as a separate system and the resulting improvements.

In addition, this paper focuses on the possibilities offered by Automated Speech Recognition. Especially, the possibilities of speech control, Speech-to-Text systems, person identification and assistance systems particularly for disabled people. But it also considers the limits in recognition rates, individual speech differences and difficulties with background noises.

Since Automated Speech Recognition is a subject that has been developed for many years it covers many topics. This paper will not cover historical backgrounds and developments, nor will there be a detailed explanation of frequency analysis or hardware requirements.

Index Terms—Automated Speech Recognition, Hidden-Markov-Model, Neural Network, Deep Learning, Speech Control

I. INTRODUCTION

Integration of Automated Speech Recognition (ASR) on devices with low processing power was made possible by the development of Neural Networks (NNs). Before that, Hidden-Markov Model (HMM) was the only system on the market. HMM was first mentioned in the paper from Frederick Jelinek from 1976 [1].

Because of the fast development of ASR this paper gives an overview of the development in NNs over the last two years, but also over HMM which is still relevant. ASR is a widespread and multifaceted topic and many companies do not publish their newest research. Therefore, this paper will not cover every currently used technology. Especially, the fine differences between the different variants of the NNs will not be described in detail.

Furthermore, the most important fields of applications will be depicted as they are getting more and more integrated into our everyday life. Whether these applications are used for more comfort, person identification or increasing accessibility for people with disabilities.

Although there is a lot of research on it there are still limits for each application. These limits are given by training effort, the recognition rate and individuality of language. Languages which are not spoken by many people are difficult for recognition systems because of the limited databases.

Collecting speech databases is criticised by data protectionists since it is necessary to label many records of conversations in a normal environment. For that, companies have their own employees for listening and labeling. [3]

First of all, the paper gives an overview of the most common technologies as HMM and some of the most used architecture of NNs. After that, it describes three of the applications speech recognition is used for.

II. OVERVIEW

The requirements on the ASR differ depending on the field of application. Due to this, it is important to adapt the ASR system on the field of application. Depending on the location the scope of the spoken vocabulary varies greatly and so does the amount of data required. Also, it is easier to detect the words, if they are spoken rather chopped off than fluently. The less background noise there is the easier it is to extract the speech. Moreover, every individual speaks slightly different because of a dialect or pronunciation.

It is possible to part language in units. First, the sentence forms a unit. Sentences can be parted in words and this in phone. The smallest unit which still makes a difference in the meaning is called a phoneme. Phones in phonemes are interchangeable. So phonemes can be built out of different phones but still have the same meaning.

There are different methods to analyse the quality of an ASR system. In this paper the Word Error Rate (WER) is used to benchmark the quality of the system. The WER describes the percentage of the wrongly detected words of National Institute of Standards and Technology (NIST) standardized test texts. The test texts are available for many languages.

The general functionality of an ASR is the same in every system. The ASR is parted in Digital Signal Processing (DSP)

and Natural Language Processing (NLP). The DSP digitalizes the sound waves. It further parts the sound wave at the pauses. A window of fixed length is placed over these parts. Typically, the window length lies in the range of 5ms to 25ms. The DSP also prepares the signal by extracting numeric characteristics. To analyse the signal it is transformed with a Fourier Transformation (FT) to the frequency space. Then the signal is filtered to get the Mel of each frequency band. A Mel is a unit that gives the same tonal unit value to two tones which sounds equally distant. For a better result the Cepstrum is generated. A Cepstrum is the inverse FT of the FT with a logarithmic scale. Further, it is considered that there is no constant voice signal.

From the analysis, about 39 different characteristics for one window are extracted. These can be combined into a vector. It is called the Mel Frequency Cepstral Coefficient (MFCC). The characteristics also contains the differences to the next window. The two most common methods to work with these characteristics are described in the following sections. [2]

A. Hidden-Markov Model

The HMM is a stochastic model that gives the probability that observations are associated with states. These states are not visible. By this, it represents the probability distribution over a series of observations. There is a hidden layer which represents the possible states which are not visible and the observation layer. This layer shows all possible observations. The state transition probability distribution is the probability that one state follows another. The observation symbol probability distribution gives the probability that the observation follows a specific state. [4]

The aim of the HMM is to get out of a sequence of observations the sequence of states. For this, parameters are calculated which defines the probability of the connection between state and observation.

The calculation is done by the Baum-Welch-Algorithm. The algorithm is an iterative algorithm for optimizing the parameters. It is based on expectation maximization and therefore searches for a solution to this problem that guarantees that the re-estimation HMM is better than the initial HMM. The estimation of the parameters is based on the forward-backwards-algorithm but it is not the same. [5]

The search for the states happens with dynamic programming and the Viterbi algorithm. With the Breadth-first search the program moves through the search trees for every state. To increase the efficiency the search tree is dynamically expanding over the search or the algorithm search in parallel more path sequences.

In ASR the requirement for HMM is to model the variability of the speech signals and the structure of spoken speech. The observations in the HMM are the feature vectors and the hidden states represent the speech content. It is important to consider the sequence of the observations.

HMMs are mostly used as a hybrid system in combination with different NNs. NNs are described in the following section.

B. Neural Networks

NNs are complex systems consisting of neurons which are arranged in layers. Neurons of one layer are connected with one or more neurons of the surrounding layers. The signal is forwarded to the next layer by applying the activation function. The activation function is adapted to the solution space. A more complex model system requires more hidden layers. This improves the classification efficiency and the network can be adapted better to the problem. [6]

Since the emergence of Deep Neural Network (DNN) ASR based on NNs is more efficient and has a higher recognition rate than the systems based on HMMs. The training of DNNs is done by backpropagation. Deep Belief Networks are improving the training time by training every layer separated. [2]

For languages with low resources on data it is important to have a NN which can be trained with a low amount of data. Recurrent Neural Networks (RNNs) and Convolutional Neural Networks (CNNs) are established since they are the best option for effectively using variable-length contextual information. Furthermore, CNNs are better in understanding complex speech features. RNN has the difference to the standard DNN that it uses the characteristics of time series relationships better to establish context-dependent models. [7]

In the development of RNNs the Long Short-Term Memory (LSTM) method based on RNN has been established. The LSTM method has a memory function to store selective information. But it is difficult to train this network in low-resource languages because of the saturation and decline in depth. A Shared Hidden Layer LSTM with residual learning for multilingual low-resource ASR reduce the problem degradation without additional parameters and computational complexity. [7]

Another approach is Gated Recurrent Unit (GRU). It is based on the LSTM but the input, forget and output gate of LSTM are replaced with the update and reset gate. The main advantage is that it needs fewer parameters and is, therefore, more suitable for low-resource languages. [7]

Speech can be visualized as an image of the frequency spectrum over time. Therefore, using the experience in image processing with CNNs is a big advantage for ASR. The CNN architecture is good in removing frequency band differences and pronunciation differences in the spectrogram. That is very suitable for low-resource language ASR as less data is needed. [7]

CNN is dividable in two parts. First, there is the convolutional filter which captures the local structural characteristics. One layer is connected to a specified amount of nodes of the local frequency band of the previous layer. By filtering noise the performance of calculating the speech characteristics is good and only little of the speech information is affected by noise. Higher layers of the network combine calculated values of each frequency band and the information of neighbouring frequency bands are balanced. After the convolutional filter, there is the max pooling which provides additional translation and rotation invariances. [7]

Due to the problems with gradient disappearance and overfitting in the optimization process of CNN an extension is developed. The Time Delay NN uses efficiently build long term time dependency relationships in small and large data scenarios. It also learns effectively temporal dynamics information of signals even from short term feature representation. [7]

During the development of CNN it was initially only used in combination with other NNs or HMMs for the first layer. With the two-layer CNN high dimensional speech feature extraction was guaranteed. This architecture works better than MFCCs. [7]

Further development of CNN made it possible to apply CNNs with 14 layers on low-resource languages. In addition, Gated Convolutional Network were established. These are better in learning acoustic feature representation. The gates are used to control the information passed in the hierarchy. Therefore, it is a combination of RNN and CNNs. [7]

Since CNN deliver good results it is better than fully connected DNNs and spectral convolution is less important nowadays. [7]

C. Audio Visual Speech Recognition

Audio-Visual Speech Recognition (AVSR) is a system which uses video information to support the ASR especially in a noisy environment. Further, it is used to assign the voice to a specific person. [8]

AVSR is more complex than normal ASR due to the audio and video feature extraction. There are two main options for feature integration. For Early Integration, the audio and visual modalities are stacked up form a single feature vector. In the Late Integration method the final conditional log-likelihoods outputs are merged using suitable stream weights. [8]

AVSR with Late Integration can improve the Word Error Rate (WER) significant in a noisy environment. [8]

III. AUTOMATED SPEECH RECOGNITION SYSTEMS IN APPLICATIONS

The long development of speech recognition systems revealed a number of application areas. As an example, the most important smart home applications employ speech control systems. But it is also used for voice recognition as an identification system for security applications and as Speech-to-Text (StT) or Speech-to-Speech (StS) or supporting systems for disabled people.

A. Speech Control

Speech control is the most common use case of ASR. In many modern devices controlling over speech is possible. For example, it is used in cars, in smartphones or in devices for home automation. The technology behind these devices is relatively similar and based on NNs. [9]

The home automation device Alexa from Amazon, for example, works with an HMM-LSTM hybrid system. The HMM in [10] has 3183 states and the acoustic features Mel warped energies. The causal mean estimate is computed and

subtracted and the global mean and variance are normalized. To compensate subsampling the features are created at three different offsets for each utterance. The LSTM has 5 layers with every 768 units and 24 million parameters. It is trained with the cross-entropy criterion and uses alignments computed on labelled data. It is trained with the student/teacher paradigm. For the teacher system, 7000 labelled data samples are used. For the student, over 1 million unlabeled data samples are used. These data are not filtered for background noise. This model has the advantage that it speeds up the training with a lot of data and therefore improve the WER by about 13%. The teacher network outputs for each feature vector a probability distribution over senones. The student network also estimates the probabilities over the senones given the same feature vector. [10]

In the paper about Siri of Apple [11] the author introduces a NN based on self-normalizing deep CNNs by removing the SC/BN. The typical Rectified Linear Unit (ReLU) activation is replaced with a Scaled Exponential Linear Unit (SELU). This activation makes a network self-normalizing and removes the need for both shortcut connection and batch normalization. The system keeps the same WER or slightly better WER but it speeds up the training and inference speed by 60% to 80%. [11]

The proposed method in this paper of the google research blog [9] is a complex evolution Recurrent Neural Network (ceRNN). This describes a family of models that are constructed by chaining a cascade of the efficient complex-valued linear operators and non-unitary diagonal matrices. However, the WER is quite high. [9] [12]

The idea behind cloud data-based technology is to use Artificial Intelligence (AI) and Deep Learning (DL) to reduce the voice command database by using already existing commands in the database for natural language ASR. This reduces the time which is needed for training the system because by combining already existing commands with new ones less training is needed. There are a lot of already existing speech databases of the big companies which can be used. Using these also brings more accuracy and reduce the time the system needs for recognition. [13]

The collecting of these databases by the big companies is disputed. As the article "Amazon has Alexa recordings analysed in the home office" [Title translated] of the online magazine ZEIT ONLINE [3] points out the smart home devices are always recording and analysing the noise in the room to recognize their activation word. The article indicates that the companies have employees for the evaluation of these recordings. According to Google about 0.2% of the speech records are analysed. [3]

A part of these databases is also available to the public. There is a big dataset accessible at [14] from Google which extracted mass of speech data out of videos of the website YouTube.

B. Voice Recognition

The voice of a human is as individual as the fingerprint or the eyes. Therefore, there are systems which identify the user by its voice characteristics.

Voice recognition only differs to ASR in that it is not important what the person says. The technology proposed in [15] to get the characteristic of the voice is the same technique as in ASR. The voice samples are taken in a noisy environment to train a filter for these. To find the key points in the voice sample the heuristic detection uses aggregated spectrograms. These key points create a mask for the input signal. The features of the input signal are represented in numerical vectors. These vectors only save the necessary information to speed up the comparison with the saved character of the speaker's voice in the NN. This method has a recognition rate up to 75% with 25 samples of the speaker. [15]

C. Speech-to-Text

StT technology is converting spoken speech to computer written text. The biggest advantage of this technology is probably that it makes a lot of devices more accessibly for people with different disabilities.

Using StT in a pipeline with Text-to-Speech makes it possible to translate a spoken text in real-time to audio. So it is often used on mobile devices. It first converts the speech to text and then in the speech synthesis phase it converts text to speech with a computer-generated voice.

Many systems use cloud-based solutions which produce a lot of internet data traffic. To minimize this traffic modern mobile devices have a big enough processor to run offline speech recognition. For example, for android, there is Mozilla's deep speech implementation of Baidu's deep speech architecture. The approaches in this paper [16] reaches WERs down to 9.00%.

IV. CONCLUSION

The basics of current technologies of Automated Speech Recognition (ASR) were discussed in this paper. Big companies put much effort in research in speech control as this is a big market for smart devices like smartphones or smart homes. Therefore, it is a widespread topic.

In general, the current speech recognition systems is very robust and works well for commercial use of intelligent devices. It is therefore a promising way to control devices in the future. However, it is still not applicable for safety relevant tasks as the recognition rate is currently not reliable enough.

For future research, it is important to improve the Word Error Rate (WER). It is also necessary to develop a better filter for background noise and to train the NNs to be able to recognize the owner of the device from many speech sources or sounds. Useful research would also be to build a NN that requires less training to do so.

For improving existing systems, it is essential to collect more data from people in their familiar environment and analyze it in more ways. However, a major problem here is the protection of personal data.

Furthermore, a large part of future research will be to integrate more languages to preserve the diversity of human languages since most systems only work in languages with much database such as English or German. Furthermore, research in the correction of language disorders such as stuttering is also relevant.

Some smart devices take the approach of recognizing the emotions of the speaker to better adapt the system to the speaker. Also the support with ASR of people with different disabilities is important to be improved.

REFERENCES

- [1] FREDERICK JELINEK, "Continuous Speech Recognition by Statistical Methods", PROCEEDINGS OF THE IEEE, VOL. 64, NO. 4, APRIL 1976
- [2] Peter Flock, Helge Spieker, "Spracherkennung" Hochschule Bonn-Rhein-Sieg, Dec 2017.
- [3] "Amazon lässt Alexa-Mitschnitte im Homeoffice auswerten", 4. August 2019, ZEIT ONLINE, dpa, khe
- [4] L. R. Rabiner, "A tutorial on hidden Markov models and selected applications in speech recognition," in Proceedings of the IEEE, vol. 77, no. 2, pp. 257-286, Feb. 1989, doi: 10.1109/5.18626.
- [5] S. Cheshomi, R. Saeed and Mohammad-R Akbarzadeh-T, "HMM training by a hybrid of Chaos Optimization and Baum-Welch algorithms for discrete speech recognition," 6th International Conference on Digital Content, Multimedia Technology and its Applications, Seoul, 2010, pp. 337-341..
- [6] D. Połap and M. Woźniak, "Voice recognition by neuro-heuristic method," in Tsinghua Science and Technology, vol. 24, no. 1, pp. 9-17, Feb. 2019, doi: 10.26599/TST.2018.9010066.
- [7] C. Yu, M. Kang, Y. Chen, J. Wu and X. Zhao, "Acoustic Modeling Based on Deep Learning for Low-Resource Speech Recognition: An Overview," in IEEE Access, vol. 8, pp. 163829-163843, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3020421.
- [8] A. Saudi, M. I. Khalil and H. Abbas, "Robust Audio-Visual Speech Recognition System based on Gabor Features and Dynamic Stream Weight Adaption," 2018 13th International Conference on Computer Engineering and Systems (ICCES), Cairo, Egypt, 2018, pp. 399-403, doi: 10.1109/ICCES.2018.8639475.
- [9] Françoise Beaufays, Research Scientist, 2015, The neural networks behind Google Voice transcription. Google AI Blog <https://ai.googleblog.com/2015/08/the-neural-networks-behind-google-voice.html>
- [10] Sree Hari Krishnan Parthasarathi, Nikko Ström 2019, LESSONS FROM BUILDING ACOUSTIC MODELS WITH A MILLION HOURS OF SPEECH. Amazon.com, USA.
- [11] Zhen Huang and Tim Ng and Leo Liu and Henry Mason and Xiaodan Zhuang and Daben Liu 2020, SNDCNN: Self-Normalizing Deep CNNs With Scaled Exponential Linear Units For Speech Recognition. Apple Inc., USA
- [12] I. Shafran, T. Bagby and R. J. Skerry-Ryan, "Complex Evolution Recurrent Neural Networks (ceRNNs)," 2018 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Calgary, AB, 2018, pp. 5854-5858, doi: 10.1109/ICASSP.2018.8462556.
- [13] S. PLESHKOVA, A. BEKYARSKI and Z. ZAHARIEV, "Reduced Database for Voice Commands Recognition Using Cloud Technologies, Artificial Intelligence and Deep Learning," 2019 16th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), Varna, Bulgaria, 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/ELMA.2019.8771526.
- [14] <https://research.google.com/audioset/>
- [15] D. Połap and M. Woźniak, "Voice recognition by neuro-heuristic method," in Tsinghua Science and Technology, vol. 24, no. 1, pp. 9-17, Feb. 2019, doi: 10.26599/TST.2018.9010066.
- [16] R. D. Lero, C. Exton and A. Le Gear, "Communications using a speech-to-text-to-speech pipeline," 2019 International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob), Barcelona, Spain, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/WiMOB.2019.8923157.

BroadR-Reach: Analysis of the Features of an Ethernet Two-Wire Transmission

Daniel Wetzel
OTH Regensburg
Regensburg, Germany
daniel.wetzel@st.oth-regensburg.de

Abstract—The steady increase of modules in a car led to an increased data traffic in automotive network systems. This increase of data traffic requires a change of the communication, since the currently mainly used Controller Area Network (CAN) might reach its limits.

Ethernet would be able to handle the increasing amount of data traffic at the price of a higher complexity and increased implementation costs. One step further is a recently developed extension of Ethernet called BroadR-Reach. This extension decreases the costs of implementation by allowing the usage of only one twisted pair cable instead of two for 100Base. But it also comes with a disadvantage because the full-duplex communication like in 100Base-TX is no longer possible. Since BroadR-Reach is still in the development stage it remains to be seen if the communication of Ethernet can be fully adapted for only one Twisted-Pair cable without negative impact.

This paper gives an overview of the current state of BroadR-Reach and how it was developed from the 100Base-TX standard. The goal is to find out if BroadR-Reach really is an improvement to the Ethernet standard and enables the Ethernet technology to compete even more with CAN and FlexRay.

Therefore, the functionality of BroadR-Reach will be explained in contrast to the origin-technology 100Base-TX. After that the advantages and disadvantages of the use of BroadR-Reach in an automotive network will be discussed. We will also consider the use of BroadR-Reach in other fields than the automotive field. Lastly it will be considered, if BroadR-Reach is able to replace CAN in its current state and become the next generation communication for in-vehicle networking.

Index Terms—BroadR-Reach, Vehicles, Ethernet, Standards, Local area networks, Automotive networks

I. INTRODUCTION

In recent years Ethernet was introduced into many different areas. It is also widely used in the industry. A statistic from Statista shows that the Ethernet technology accounted for 62% of industrial networks in the year 2020 [1]. Bus systems like CAN or PROFIBUS were contributing 30%. The Ethernet part can be further divided into EtherNet (17%), PROFINET (17%), Ethercat (7%) and others. This shows that Ethernet is only a generic term. In the industry various specializations of Ethernet are used to adapt to different situations. However, Ethernet did not have a big success in the automotive industry yet. Until now the automotive industry mainly relies on bus systems like CAN or FlexRay for communication networks in vehicles. A new specialization wants to solve this problem and make Ethernet more useful for the automotive industry. This specialization is called BroadR-Reach or 100Base-T1.

BroadR-Reach was developed by the company Broadcom. It was at first supposed to be a closed licensed product but got publicly standardized as IEEE 802.3bw in the year 2016 [8]. The automobile industry played a huge role in standardizing BroadR-Reach. The main reason for that is the use of only one twisted pair cable. This is also the main advantage of BroadR-Reach. Normally Ethernet standards like 100Base-TX use two twisted pair cables as transmission medium. Therefore, the usage of one twisted pair cable leads to a reduction in implementation costs and spatial needs.

The sudden interest of the automotive industry towards the Ethernet technology is not surprising. A decade ago, car systems mainly consisted of a few basic components. Nowadays a lot of new components have been added. Some of them generate a huge amount of data. Examples would be sensors, lasers, or cameras. This is a problem for traditional bus systems like CAN. Mainly due to the small size of the data field in the frame (8 Byte for CAN) and the restricted data rate (for CAN up to 1 MBit/s). Connecting modules with a high data output to a bus system like CAN brings it to its limits very fast. Ethernet however is used to handle a big part of the global internet traffic and therefore has proved to be suitable to deal with big amounts of data. Because of that BroadR-Reach was developed. The intention is to solve the current problem concerning big amounts of data in automotive networks by implementing Ethernet.

This paper starts with a closer look at the development of Broad-Reach, how it originated from the 100Base-TX standard and what is made different. In the following the disadvantages and advantages of this technology are pointed out. This will be done by comparing it at first to 100Base-TX and then to the CAN bus. Furthermore, chapter IV provides an overview of the possible applications.

II. THE STANDARDS

This section covers the basics of BroadR-Reach. At first an overview about the 100Base-TX standard is given as comparison. After that the functionality of BroadR-Reach is explained in detail.

A. The Ethernet 100Base-TX standard

The 100Base standard was developed in the year 2006. The most used standard of 100Base is the 100Base-TX.

The TX stands for the usage of two Twisted Pair cables as transmission medium. The data rate of 100Base-TX is 100 MBit/s. Furthermore, it has an average reach of 100 m and the preferred topology is a star. [2] [4] [11]

On the upper half of figure 1 the simplified structure of the 100Base-TX physical layer (PHY) is shown. The PHY for BroadR-Reach, also known as 100Base-T1, is located on the bottom side. They can be divided in five segments [4] [5]:

- **The Medium Independent Interface (MII)** connects the physical layer with the next upper layer, which is usually the MAC/LLC layer.
- **The Physical Coding Sublayers (PCS)** main task is the coding and decoding of the data.
- **The Physical Medium Attachment(PMA)** is responsible for the time synchronization of the clock and the transmission timing.
- **The Physical Medium Dependent Sublayer (PMD)** provides further coding and modulation to prepare the data for the transmission over the given medium.
- **The Medium Independent Interface (MDI)** is the physical connection between the PHY and the transmission medium.

The 100Base-TX has 4B5B as coding protocol in the PCS. 4B5B essentially takes four input bits and converts them into five output symbols. For 100Base a symbol is almost equal to a bit. But since four bits are converted into five symbols one symbol has slightly less information than a bit. This five symbols are then transported to the Scrambler. The transport is done parallel over five different connections. Each connection has a symbol rate of 25 Msps resulting in a total rate of 125 Msps. [5]

The Scrambler helps to prepare the data to fit the upcoming modulation for the transmission medium. It shifts the bits inside the data by using linear feedback shift registers. [5]

After the Scrambler the data is modulated. 100Base-TX uses Multilevel Transmission Encoding with 3 levels (MLT-3) for that. MLT-3 creates the transmission signal by switching between three states (+, - and 0) each time a bit value is one. If the bit value is zero the signal value does not change. [5]

$$B = \frac{\text{symbolrate}}{\log_2(1 + SNR)} \quad (1)$$

The bandwidth can be calculated with (1), where SNR is the signal to noise ratio. In case of 100Base SNR is defined at 3 dB. The symbol rate is 125 MBit/s which results in a bandwidth of about 62.5 MHz. Mostly the value of the bandwidth is defined to be between 60 and 80 MHz. [3] [6]

B. BroadR-Reach

BroadR-Reach, like 100Base-TX, has a data rate of 100 MBit/s. But it only has an average range of 15 m when using an unshielded twisted pair cable (UTP). [8]

100Base-T1 uses 4B3B as coding protocol in the PCS layer. So instead of transforming 4 input bits into 5 output symbols the amount is reduced from four bits to three symbols. This is done to reduce the symbol rate from 125 Msps to 66.66 Msps.

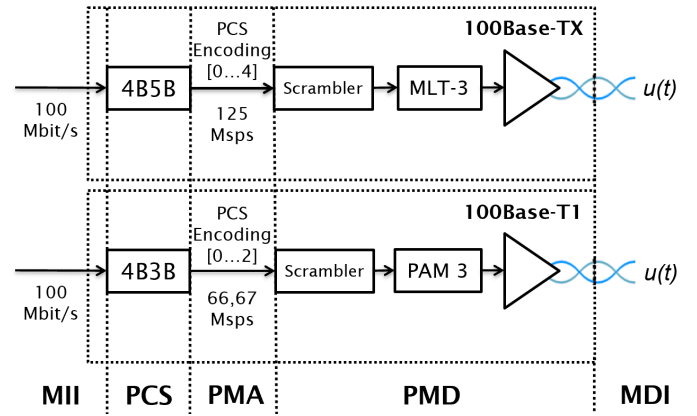


Fig. 1. Structure of the 100Base-TX and 100Base-T1 PHY

The advantage of that is a reduced interference sensitivity and an increased stability. The overall transmission rate however is kept at 100 Mbit/s by transmitting 3 symbols parallel at a period of 33.5 MHz. [2] [3] [8]

With this setting the data is transported to the Scrambler, which has a similar task as the Scrambler from 100Base-TX.

BroadR-Reach uses pulse amplitude modulation with 3 levels (PAM3) for the modulation. At first, the 3 incoming symbols are translated into two ternary symbols. For each combination of the 3 symbols a pair of ternary symbols is predefined. The ternary symbol can either be -1, 0 or +1. Then PAM3 creates the signal by using the two ternary symbols as amplitudes. For example, a combination of -1 and 1 results in a signal with a negative amplitude followed by a positive amplitude within one period. A more detailed explanation to PAM can be found in the book from Frohberg [7]. With the use of PAM3, the transmission frequency is around 33 MHz. [2] [3]

Because the symbol rate of BroadR-Reach is halved compared to 100Base-TX the bandwidth is also smaller. It can also be calculated with (1). The result is a bandwidth of about 33.33 MHz. [3]

C. Additional changes

The in point B discussed changes only affected the processing of data. But there are other changes that need to be made for BroadR-Reach to work. One change from 100Base-TX to BroadR-Reach is the reduction from two twisted-pair cables to one. Therefore, traditional full-duplex mode with two different cables for transmission and receive is not possible. Instead, the PHY of BroadR-Reach has only one connecting gate which sends and receives signals from the twisted-pair cable [8]. This gate is called Hybrid.

Furthermore, an echo canceler inspired by 1000Base-TX is implemented to filter self-produced noises out of the received signal [2] [8].

In this setup a collision of signals is possible. Therefore, the communication must be coordinated. BroadR-Reach coordinates it by using the Master/Slave system. One PHY is assigned as the Master and the other ones as slaves. The master

PHY coordinates the communication and provides the clock for the slave PHYs. [3] [8]

III. ADVANTAGES AND DISADVANTAGES

In chapter II the overall functionality of BroadR-Reach was explained. But the question remains what the gains and losses of BroadR-Reach are compared to 100Base-TX or other bus systems.

A. Disadvantages

We start off with the disadvantages. These are divided into further subsections to highlight the disadvantages of BroadR-Reach against certain communications.

1) BroadR-Reach compared to 100Base-TX

The first point against Broad Reach is the strongly reduced distance. While 100Base-TX is able to cover about 100 m, BroadR Reach only covers about 15 m [2] [11]. This lower range is due to the usage of only one cable as transmission medium and the high EMV expectations of the automotive industry. [8]

Another disadvantage is crosstalk. To keep it simple only two categories of crosstalk will be looked at. The self-made crosstalk and the alien crosstalk. The self-made crosstalk is generated by using only one link for receive and transmit. It appears when a received signal is overlaid with a transmitted signal. This overlay corrupts the original signals and can make them unrecognizable. BroadR-Reach addresses this problem by including the in chapter II discussed echo canceler. This mostly solved self-made crosstalk at the cost of having to implement additionally parts into the PHY. [8] [9]

Alien crosstalk occurs when several UTP cables are close to each other. In an automotive environment this is a likely case since space is limited. Because the cables are unshielded the signal from one cable can interfere the signal of other cables. As a result, the signals get overlaid and alien crosstalk is created. This can make multiple signals unrecognizable. Echo cancellation cannot be used here since the source of the alien crosstalk is not clear for the receiving PHY. Experiments have shown that within a 15 m radius the alien crosstalk noise is below the standard limit [9]. The standard limit is described in [3]. However, this only applies if the cable is twisted throughout. When a part of the cable is not twisted for more than 7 cm, the standard limit is exceeded [9]. This is the case, for example, when a plastic connector is implemented into the cable. This plastic connector is also widely used in the automotive industry. But as stated in [9] this connector should not be used in combination with BroadR-Reach. This limits the usage range of BroadR-Reach in cars. Alternative options for this plastic connector have yet to be researched. [9]

2) BroadR-Reach compared to CAN

Compared to CAN we will highlight two main disadvantages of BroadR-Reach. These also apply to the specializations of CAN, such as CANFD and CANXL. The first disadvantage is the lack of flexibility. The bus structure of CAN allows

the addition and removal of nodes in the network without any complications. Ethernet, however, has a star topology. Therefore, it needs an interconnection device, mostly a switch, in the center. This is a possible single point of failure. Moreover, every Ethernet device requires a port at the switch. This leads to the problem that it is not possible to add a new Ethernet device to a switch when all ports are occupied. An additional switch is required for a new device, which can lead to spatial problems in a vehicle network. In the worst case, the whole architecture needs to be redesigned to add a single new device. All in all, this makes Ethernet less flexible. [10] Second, CAN is less expensive than Ethernet. Even the improvements of the BroadR-Reach PHY do not change that. CAN has dominated the automotive industry for so long that a solid supply chain was established which lowers the price. Ethernet, however, is a newcomer in this sector. Additionally, Ethernet is more complex, which also increases the costs. This argument is not quite as significant for CANXL, since CANXL is more expensive than CAN or CANFD. But it is still cheaper than BroadR-Reach [12]. [10]

B. Advantages

After having a look at the disadvantages, the advantages of BroadR-Reach will now be discussed.

1) BroadR-Reach compared to 100Base-TX

One clear advantage is the reduction of implementation costs. Since only one twisted pair cable is needed, the costs for the cables are halved compared to 100Base-TX. This also brings the advantage that BroadR-Reach fits better into the architecture of cable trees where space is limited. [8] [11] Furthermore, BroadR-Reach has a lower bandwidth than 100Base-TX, as shown in chapter II. Normally the decrease of bandwidth is negative. But in this case a lower bandwidth offers several positive aspects. It allows the use of lower quality cables in case the user wants to reduce the implementation costs even further. Additionally, the communication is less vulnerable to electromagnetic interference (EMI) due to the smaller bandwidth. Also, the filtering of the signal becomes easier and can be done more aggressive. The better filtering also increases immunity against EMI while reducing the emission of electromagnetic radiation. This reduction in emission is so effective that it lowers the emission value below the strict limit given by the International electrotechnical commission (CISPR) [14]. Other Ethernet standards do not pass this limitation and therefore cannot be used actively in vehicles. [8]

2) BroadR-Reach compared to CAN

Compared to CAN, the two main advantages of BroadR-Reach are the data speed and the payload efficiency. While BroadR-Reach has a data rate of 100 MBit/s, CAN has a data rate of only 1 Mbit/s and is therefore 100 times slower. Regarding the payload, Ethernet can store up to 1500 data bytes inside a single frame, while the frame of CAN can only hold 8 data bytes. In other words, the amount of data Ethernet

can send in one frame requires CAN to send 188 separate frames. [10]

These two main advantages also apply against CANFD. CANFD is a more advanced version of CAN with a data rate up to 8 MBit/s and a payload size of 64 byte. However, this does not provide enough bandwidth to deal with the data-heavy components.

3) BroadR-Reach compared to CANXL

CANXL is an improved version of CANFD. It has a payload size of 2048 byte and a data rate up to 10 MBit/s. This is still not good enough for the applications that have the most data output. For example, infotainment, ADAS and telematics. BroadR-Reach is better in handling these applications. But CANXL can compete with BroadR-Reach in other areas. Applications like audio, radar, sensors, and the chassis control prefer a communication with a data rate of 10 MBit/s. For these cases CANXL has an advantage because the possible payload size is bigger. To sum it up, when comparing BroadR-Reach with CANXL, BroadR-Reach only has an advantage for applications with very high data output. [13]

But comparing CANXL with BroadR-Reach is not quite optimal, since BroadR-Reach has also been further developed. It would be better to compare CANXL with 10Base-T1S. 10Base-T1S is a specialization of BroadR-Reach with a lower data rate of 10 MBit/s. However, this will not be covered in this paper since it would go beyond the scope.

IV. POSSIBLE APPLICATIONS

Currently, BroadR-Reach is not used in published products yet. In the following two cases are considered to show possible application fields of BroadR-Reach.

First off, the automotive sector is considered. In the paper of Steinbach, BroadR-Reach is used in a vehicle [15]. They implemented real-time Ethernet (RTE) with a BroadR-Reach PHY into the backbone of a prototype car. An overview of the architecture can be seen in figure 2. The architecture is a mix of RTE with BroadR-Reach, RTE without BroadR-Reach and CAN. RTE is used in combination with the BroadR-Reach PHY to address applications with high data output. For example, cameras and sensors. The other components of the car are communicating over the CAN network. CAN and Ethernet are connected via a gateway. The gateway can convert Ethernet frames into CAN frames as well as CAN frames into Ethernet frames. Overall, the paper states that the tests with the prototype were successful and the RTE in combination with BroadR-Reach worked as intended. [15]

Neumann's paper brings an addition to this topic [11]. It points out that there are some problems for BroadR-Reach in the commercial vehicle sector. Because of the short range of 15 m and the big size of commercial vehicles signal refreshing is necessary. This would increase the implementation costs and therefore make Ethernet less attractive for this sector. [11]

Another possible application area for BroadR-Reach is aerospace. Thain et. al researched this topic in a paper [16]. They compared the emission of BroadR-Reach with

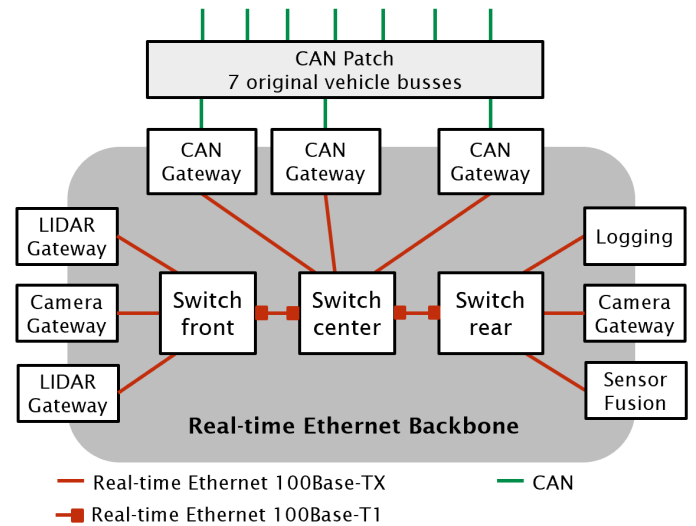


Fig. 2. Simplified architecture of a prototype car with BroadR-Reach [15]

the EMC-Criteria of the aerospace sector. The result was that BroadR-Reach does fulfill the EMC-Criteria. So, the research concluded the usage of BroadR-Reach in aerospace is possible. However, it would need some adjustments like the addition of a lightning strike protection. [16]

To sum it up, BroadR-Reach does have potential for the automotive and the aerospace sector. Especially the automotive sector is the reason while BroadR-Reach was developed. But since it was standardized only 4 years ago the full potential of BroadR-Reach is not clear yet. Therefore, additional application areas are possible. For example, BroadR-Reach could see usage in the industrial automation since it is more cost efficient than regular 100Base-TX.

V. CONCLUSION

BroadR-Reach is a new specialization of Ethernet. The open star alliance has put a lot of faith into it and right now they have not been disappointed. The overall opinion about BroadR-Reach was positive throughout the literature. It seems to be certain that BroadR-Reach will find its way into the automotive environment and into public products. But will it replace the traditional bus systems? For now, this will not be the case. Bus systems like CAN have been too dominant and successful in the last decade to be simply replaced. It is more likely to have a hybrid architecture like showcased in the prototype car [15]. A hybrid architecture, in which bus systems are still the reliable core structure in the automotive network while Ethernet takes over the data-heavy communication.

REFERENCES

- [1] A. Breitkopf, "Marktanteile industrieller Netzwerke weltweit im Jahr 2020". Statista, Juli 2020.
- [2] T. Steinbach, "Ethernet-basierte Fahrzeugnetzwerkarchitekturen für zukünftige Echtzeitsysteme im Automobil," Springer Verlag, Wiesbaden, Germany, 2018. -ISBN 978-3-658-23499-7

- [3] Broadcom Corporation, "BroadR-Reach Physical Layer Transceiver Specification for Automotive Applications," Broadcom Corporation, San Jose, Kalifornien, USA, 2014.
- [4] C.E. Spurgeon, J. Zimmerman, "Ethernet The Definitive Guide: Designing and Managing Local Area Networks," vol. 2, O'Reilly and Associates, Sebastopol, Kalifornien, USA, 2014. -ISBN: 978-1449361846
- [5] B.Fiegler, "VHDL-Design eines Rahmengenerators für die Implementierung der Ethernet MAC Protokollschicht," Bachelor Thesis, FHS Dortmund, Dortmund, Germany, 2017.
- [6] T.W. Kim, J.H. Kim, D.E. Lee, J.y. Moon, J.W. Jeon, "Development of Gateway based on BroadR-Reach for Application in Automation Network," International Conference on Computing, Communication and Automation (ICCCA2016), Greater Noida, India, April 2016.
- [7] W. Frohberg, H. Kolloschie, Helmut Löffler "Taschenbuch der Nachrichtentechnik," Hanser Verlag, Leipzig, Germany, 2008. -ISBN 978-3-446-41602-4
- [8] D. Porter, "100Base-T1 Ethernet: the evolution of automotive networking," Texas Instruments, Dallas, Texas, USA, April 2018.
- [9] T. Makharashvili, B. Booth, K. Martin, J. Drewniak, D.G. Beetner, "Study of Alien Crosstalk to a BroadR-Reach Protocol Based System," IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC), Ottawa, Canada, July 2016.
- [10] C. M. Kozierek, C. Correa, R. B. Boatright, J. Quesnelle, "Automotive Ethernet: The Definitive Guide," vol. 1, Intrepid Control Systems, Troy, Michigan, USA, 2014. -ISBN: 978-0-9905388-0-6
- [11] A. Neumann, M.J. Mytych, D. Wesemann, L. Wisniewski, J. Jasperneite, "Approaches for In-vehicle Communication - An Analysis and Outlook," Computer Networks 24th International Conference, Ladek Zdrój, Poland, 2017, pp. 395-411.
- [12] Bosch, "CAN XL Next step in CAN evolution," 2020 [Online]. Available at: <https://www.bosch-semiconductors.com/news/t-newsdetailpage-4.html>
- [13] P. Decker, O. Garnatz, "CAN XL für zukünftige Fahrzeugarchitekturen," Hanser automotive 4-5/2020, Carl Hanser Verlag, Munich, Germany, 2020.
- [14] International Electrotechnical Commission, "Limits and methods of measurement of radio disturbance characteristics for the protection of receivers used on board vehicles," CISPR 25, IEC, Geneva, Schweiz, 1995.
- [15] T. Steinbach, K. Müller, F. Korf, R. Röllig, "Demo: Real-time Ethernet In-Car Backbones: First Insights into an Automotive Prototype," IEEE Vehicular Networking Conference (VNC), Paderborn, Germany, 2014.
- [16] A. Thain, F. Le Sergent, C. Marot, B. Pasquier, "Suitability of 2-wire Ethernet solutions for aerospace applications," ESA Workshop on Aerospace EMC, Valencia, Spain, 2016.

Mensch-Roboter-Kollaboration: Der Stand der Entwicklung und aktuelle Herausforderungen

Michael Jupke

Fakultät für Elektro- und Informationstechnik

OTH Regensburg

Regensburg, Deutschland

michael.jupke@st.oth-regensburg.de

Zusammenfassung—Es gibt viele Aspekte, inwieweit die Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK) unsere Privat- und Arbeitswelt in den nächsten Jahren verändern wird. Ziel ist es dabei, körperlich schwere Arbeiten und wiederholende Tätigkeiten in Zukunft auf Roboter zu übertragen. Gerade in Bereichen der Einzelfertigung ist die menschliche Präsenz nicht zu ersetzen. Um dennoch eine Produktivitätssteigerung bei verbesserter Ergonomie zu erreichen, muss die Interaktion zwischen Mensch und Roboter eine hohe Flexibilität ohne eine mechanische Trennung aufweisen. Derzeit sind MRK-Anwendungen in der Industrie aufgrund des erhöhten Risikos für den Menschen in den meisten Fällen nicht umsetzbar. Daher ist es essentiell den aktuellen Stand der Forschung einhergehend mit der sicherheitstechnischen Auslegung in Bezug auf MRK-Anwendungen zu berücksichtigen.

Die deutsche Norm ISO/TS 15066 stellt eine der wichtigsten Normen für den Einsatz von Robotern in kollaborativen Prozessen dar. Darin werden vier Arten von kollaborativen Prozessen unterschieden: der sicherheitsbewertete überwachte Halt, die Handführung, die Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung und die Leistungs- und Kraftbegrenzung. Im Gegensatz zu dem sicherheitsbewerteten überwachten Halt sowie der Handführung, die meist eine Koexistenz oder Kooperation darstellen, werden in diesem Beitrag ausschließlich kollaborative Konzepte betrachtet. In den Bereichen der Leistungs- und Kraftbegrenzung sowie der dynamischen Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung wird aktuell Forschung betrieben, jedoch findet die Leistungs- und Kraftbegrenzung im Gegensatz zur dynamischen Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung bereits Anwendung in der Industrie. In Bezug auf die Leistungs- und Kraftbegrenzung wird jedoch eine höhere Flexibilität und Geschwindigkeit bei geringerer Kraftbegrenzung gefordert, weshalb in diesem Bereich weitere Nachforschungen notwendig sind. Darüber hinaus wird in diesem Beitrag eine Vielzahl weiterer Forschungsthemen im Bereich der MRK vorgestellt und diskutiert.

Index Terms—Intelligente Roboter, Automatisierung, Mensch-Roboter-Interaktion, Zusammenarbeit, Industrietechnik, Sicherheit, Robotersensorik, Optimierte Produktionstechnik, Roboter-*montage*

I. EINLEITUNG

Herkömmliche Industrierobotersysteme benötigen regulär einen massiven Schutzzaun oder eine Vielzahl zusätzlicher Sicherheitskomponenten, die zu einer Einschränkung der Flexibilität bei gleichzeitiger Erhöhung der Kosten und des benötigten Arbeitsraums führen. Jedoch erfordert der Wandel von der automatisierten Fertigung zu Industrie 4.0 eine Steigerung der Effizienz und Flexibilität in der Fertigung. Zudem gewinnen ergonomische Aspekte an Bedeutung und

müssen berücksichtigt werden. Eine Möglichkeit für die Umsetzung dieser Transformation sind moderne Ansätze in der Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK), die darauf abzielen, die besonderen Fähigkeiten des Menschen beim Reagieren, Planen oder Auswerten mit der Kraft und Ausdauer des Roboters zu kombinieren.

Daher ist es unerlässlich, dass sich Mensch und Roboter einen gemeinsamen Arbeitsbereich teilen und miteinander interagieren. Da dies nicht in der bereits bestehenden Norm für die Sicherheit im Umgang mit Industrierobotern (ISO 10218-1/2) berücksichtigt ist, wurde 2016 die Norm ISO 15066 als Ergänzung geschaffen, die derzeit die regulatorischen Anforderungen für kollaborierende Roboter in der Industrie festlegt [1]. Seit der Einführung von kollaborierenden Robotern gewinnt dieses Thema in der Forschung zunehmend an Aufmerksamkeit. Diese Literaturübersicht soll einen Überblick über den aktuellen Stand der Forschung geben, um den vielseitigen Einsatz kollaborierender Systeme aufzuzeigen. Dabei beschränkt sich die Arbeit auf die Methoden der Leistungs- und Kraftbegrenzung, sowie der Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung, da nur mit diesen Methoden eine Kollaboration per Definition erreicht werden kann.

Nach der Einführung in die MRK werden in dieser Literaturrecherche der Stand der Technik in der Industrie dargestellt und aktuelle Herausforderungen aufgezeigt. Es folgt die Vorstellung neuer Forschungsergebnisse und verschiedener Ansätze zur Verbesserung bestehender MRK-Systeme, welche im Anschluss auf ihre Umsetzbarkeit diskutiert werden. Abschließend wird auf Probleme, die bei der Integration in den industriellen Ablauf auftreten können, hingewiesen.

II. STAND DER TECHNIK

Um eine MRK-Anwendung in der Industrie zu implementieren, muss die geltende technische Spezifikation ISO 15066 eingehalten werden. Die Norm beinhaltet eine Vorgabe für eine umfassende Risikobeurteilung bezüglich des Robotersystems und seiner Umgebung. In der Spezifikation ISO 15066 werden folgende Maßnahmen für kollaborative Vorgänge unterschieden [1]:

- Sicherheitsbewerteter überwachter Halt (SMS): Der Roboter unterbricht seine Tätigkeit, sobald der Arbeitsbereich betreten wird.

- Handführung (HG): Der Werker verwendet ein Handsteuergerät, das in der Nähe des Roboters oder Endeffektors angebracht ist, um die Bewegung des Roboters zu steuern.
- Kraft- und Leistungsbegrenzung (PFL): Das Robotersystem ist derart konstruiert, dass die Applikation festgelegte Grenzen für quasistationären oder transienten Kontakt mit Menschen nicht überschreitet.
- Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung (SSM): Sowohl Roboter als auch Werker bewegen sich kontinuierlich innerhalb des kollaborierenden Arbeitsraums. Die Geschwindigkeit und Bewegung des Roboters wird kontinuierlich an die aktuelle Arbeitsumgebung angepasst, sodass keine Gefahr für den Menschen entsteht.

Während die Methoden SMS, HG und PFL bereits in die Industrie integriert werden, befindet sich SSM derzeit noch in der Forschung. Grundsätzlich können diese Methoden einzeln oder in beliebiger Kombination eingesetzt werden [1]. Auch herkömmliche Industrieroboter können mit zusätzlichen Sicherheitskomponenten ausgestattet werden, um die Anforderungen zu erfüllen. Dennoch sind kommerzielle Roboter aufgrund der nicht vorhandenen zusätzlichen Hardwarekosten sowie einer einfacheren Einrichtung [2] für die Industrie attraktiv. Einige Roboter auf dem Markt verfügen bereits über zusätzliche Funktionen wie Kraft- und Drehmomentsensoren, Kamerasysteme oder Sprachsteuerung. Sie werden oft als Cobots bezeichnet. Eine genaue Definition von Cobots geben Michalos et al. [3].

Tabelle 1 verschafft einen Überblick über aktuelle Systeme.

Tabelle 1: Auf dem Markt vorhandene Cobots
Quelle: [2], vom Autor bearbeitet

Marke	Produkt	Traglast [kg]	Reichweite [mm]	DOF ^a
Universal Robots	UR3, UR3e, UR5, UR5e, UR10, UR10e, UR16e	3–16	500–1300	6
Fanuc	CR-4iA, CR-7iA, CR-15iA, CR-35iA, ...	4–35	550–1813	6
Kuka	iiwa 7 R800, iiwa 14 R820, ...	7–14	600–820	7
ABB	YuMi (dual arm, single arm)	0.5	500–559	7
Yaskawa	HC10, HC10DT	10	1200	6
Kawasaki	duAro1, duAro2	2–3	760–785	4

^a Freiheitsgrade

III. HERAUSFORDERUNGEN

Wie Tabelle 1 zeigt, sind bereits eine Vielzahl von MRK-fähigen Robotern auf dem Markt erhältlich. Allerdings sind diese Roboter meist klein, haben eine geringe Reichweite und eine geringe Traglast im Vergleich zu herkömmlichen Robotern. Dieser Markttrend spiegelt auch die Forschungsergebnisse der letzten Jahre wider, wie kürzlich veröffentlichte Literaturrecherchen zeigen [2, 4–6]. Sziebig und Dianatfar et al. weisen

darauf hin, dass große kollaborierende Roboter sowie MRK-Anwendungen mit schweren Lasten selten untersucht werden. [7, 8]

Selbst wenn ein Roboter für MRK geeignet ist, beispielsweise durch eine integrierte Leistungs- und Kraftbegrenzung, würde in den meisten Fällen das Werkzeug nicht den gültigen Normen für die MRK entsprechen. Im Gebrauch eines MRK-fähigen Roboters mit z. B. einem Greifer muss sichergestellt werden, dass durch den Endeffektor oder sein Werkstück keine Verletzungen entstehen können [9]. Dabei müssen auch eventuelle scharfe und kantige Geometrien des bewegten Werkstücks berücksichtigt werden. Folglich wird nicht nur die Sicherheit des Roboters vorausgesetzt, sondern auch die der gesamten Applikation einschließlich der Arbeitsumgebung [1]. Viele Anwendungen scheitern in der Regel an einer übermäßigen Reduktion der Leistung, woraus folgt, dass das Projekt nicht mehr wirtschaftlich ist [10]. Darüber hinaus ist eine Gefahrenanalyse und Risikobewertung eine Herausforderung für den Integrator. Dies wird von Chemweno et al. in deren Review zur ISO 15066 dargestellt. Zudem muss eine Risikobewertung bei jeder Änderung der Anwendung wiederholt werden. Dies schränkt die gewünschte Flexibilität stark ein. Auch müssen Sicherheitstechnologien, die in der Industrie eingesetzt werden, auf der Grundlage technischer Normen zertifiziert werden. [1, 11, 12]

IV. STAND DER FORSCHUNG

Um diese Herausforderungen zu bewältigen, werden im Folgenden Lösungen in den Bereichen PFL und SSM beleuchtet. Zusätzlich werden weitere Forschungsthemen behandelt.

A. Kraft- und Leistungsbegrenzung

Bei dieser kollaborativen Arbeitsweise kann ein willkürlicher oder unwillkürlicher Körperkontakt zwischen dem Roboter inklusive Werkstück und einem Mitarbeiter erfolgen. Daher muss das System so ausgelegt sein, dass eventuelle Risiken für den Menschen angemessen minimiert werden. Für eine Risikobeurteilung werden Grenzwerte für quasistatische und transiente Kontakte unter Verwendung der in ISO15066 spezifizierten zulässigen biomechanischen Grenzwerte definiert. [1]

Um die Kollisionsenergie zu reduzieren, können sichere Aktoren, viskoelastische Abdeckungen, elastische Systeme mit mechanischer Absorption oder Leichtbauroboter separat oder in Kombination eingesetzt werden [4]. Einen Überblick über bestehende Roboter und deren Sicherheitssysteme verschaffen Matheson et al. [2]. Auch wenn Roboter selbst sicher sind, bleibt das grundsätzliche Hauptproblem, dass der Endeffektor einschließlich des Werkstücks ebenso sicher sein muss, um die zulässigen biomechanischen Grenzwerte einzuhalten, bestehen. Dies ist besonders kritisch bei kleinen, spitzen oder scharfkantigen Objekten, da dort der zulässige Druck sehr leicht überschritten werden kann [13, 14]. Durch eine Umgestaltung des Endeffektors und des Werkstücks kann das Problem behoben werden. Konkret bedeutet dies, die Greifkraft zu begrenzen, scharfe Kanten abzurunden oder das Werkstück zu umschließen,

um die Kontaktfläche zu vergrößern. In manchen Fällen kann ein 6D-Kraft-/Drehmomentsensor zwischen Endeffektor und Roboter dazu beitragen, das Risiko zu minimieren. Um zusätzliche Kosten für diese Sensoren zu vermeiden, verfolgen Zeng et al. den Ansatz, die Kräfte auf den Endeffektor mit Hilfe der bereits installierten Gelenksensoren des Roboters zu berechnen [15]. Je nach Konstruktion der Roboter können weitere Probleme bei der Kraftmessung auftreten. In manchen Fällen kann die Kraft in einer bestimmten Richtung in der Nähe von Singularitätspositionen nicht gemessen werden, da kein Drehmoment aufgebracht wird.

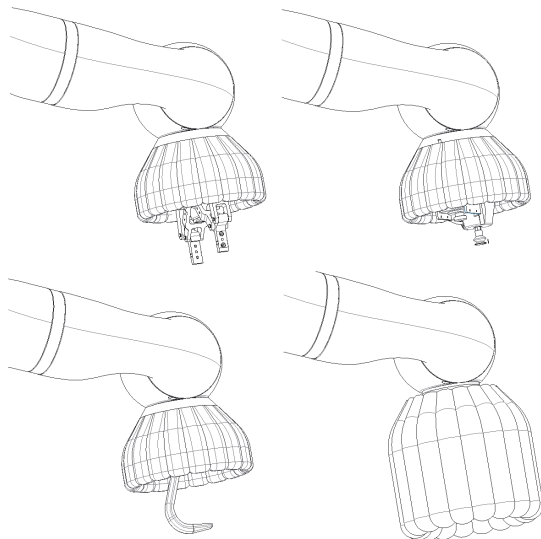


Abbildung 1: *End-Effector Airbag*
Quelle: [16], vom Autor bearbeitet

Manche Objekte sind jedoch zu spitz oder scharfkantig, wodurch zusätzliche Sicherheitsmechanismen, wie Kamerasysteme oder Abstandssensoren, notwendig sind. Weitschat et al. entwickelten eine mögliche Lösung für dieses Problem. Ihre Erfindung, der *End-Effector Airbag* (siehe Abbildung 1), ist ein ausfahrbarer Airbag, der das gefährliche Objekt bei schnellen Bewegungen umschließt. Zudem kann eine Kollision zwischen einer Person und der deformierten Airbaghülle erkannt werden. [16]

B. Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung

Beim Einsatz von Robotern zur Unterstützung und Hilfe für den Menschen folgt der Roboter keinen festen Abläufen oder Pfaden [17]. Bei einer intuitiven Mensch-Roboter-Kollaboration muss der Roboter kontinuierlich seine Umgebung überprüfen und entsprechend reagieren. Dies erfordert Sensoren und Algorithmen zur aktiven Kollisionsvermeidung und Planung der Bewegungen [18]. Inzwischen können menschliche Bewegungen sogar durch maschinelle Lernverfahren vorhergesagt werden, wie Zanchettin et al. in ihrer Arbeit [19] belegen. Außerdem stellen Chen et al. sowie Rosenstrauch und Krüger Algorithmen zur Verfügung, die eine sichere Kollisionsvermeidung durch dynamische Anpassung des Sicherheitsabstands und der Geschwindigkeit des Roboters implementieren [20,21].

Ein mathematisches Modell zur Berechnung des Gefahrengrads einer Kollision in Echtzeit wird ebenfalls entwickelt [22].

Bei der Betrachtung aktueller Forschungsergebnisse werden zwei grundlegende Entwicklungsrichtungen in der Menschenerkennung deutlich: durch Radarsensorik und durch Kamerasysteme. Letztere bestehen meist aus Kamerasensoren, die neben dem 2-dimensionalen RGB-Bild auch Tiefeninformationen bereitstellen. Diese speziellen Kameras werden auch als RGB-D-Kameras bezeichnet. Kang et al. haben mit ihren Forschungsergebnissen bereits bewiesen, dass RGB-D-Kameras zur aktiven Kollisionsvermeidung bei Robotersystemen eingesetzt werden können [23]. Allerdings gibt es nur eine begrenzte Anzahl von Kamerasystemen, die den Anforderungen der Industrie entsprechen. Zudem sind nur 4 Demonstratoren für eine reale industrielle Anwendung geeignet. Die häufigsten Herausforderungen sind schlechte und wechselnde Lichtverhältnisse, spiegelnde Oberflächen, unzureichende Auflösung der Tiefeninformation oder schlechte Echtzeitleistung. [6, 24] Darüber hinaus müssen die Systeme ein angemessenes Safety Integrity Level (SIL - nach IEC 62061) und ein bestimmtes Performance Level (PL - nach ISO 16849) für den industriellen Einsatz aufweisen [25, 26].

Eine Alternative stellt die Radartechnik dar. Die Vorteile sind mechanische Robustheit und Unabhängigkeit von Umwelteinflüssen. Außerdem sind Mikrodopplersignaturen ein inhärenter Bestandteil der Radarechosignale eines frequenzmodulierten Dauerstrichradars, was maschinelle Lernverfahren überflüssig macht. [27] Die Radarsensoren werden vorzugsweise am Roboterarm angebracht, da dadurch eine bewegliche Radarhülle entsteht [28]. In Abbildung 2 sind Radarsensoren (rot markiert) am Endeffektor angebracht und ermöglichen dem Roboter somit eine sichere Bewegung mit dem Werkstück. Zur Bestimmung von Abstand, Geschwindigkeit und Raumwinkel verwenden Zlantanski et al. und Abdelawwad et al. ein Mehrkanal-Radar mit einer Betriebsfrequenz von etwa 77 GHz. Außerdem untersuchen Abdelawwad et al., ob ein einkanaliges 140 GHz-Radar aufgrund seiner höheren Tiefenauflösung von etwa 1 cm für MRK-Anwendungen besser geeignet ist. [27–29] Mit einer Softwareerweiterung können diese Radare auch zur Gesteuerung des Roboters verwendet werden [30].

Zur Verbesserung der Sicherheit in rauen Industrieumgebungen, insbesondere bei Schwerlastanwendungen, ist es sinnvoll, mehrere unterschiedliche Sensorsysteme mit verschiedenen Kommunikationswegen zu nutzen. Kianoush et al. und Sziebig entwickelten verschiedene Ansätze, um die Daten der Sensorsysteme zusammenzuführen. [7, 18, 31]

C. Weitere Forschungsbereiche

Bisher wurden in dieser Literaturübersicht ausschließlich sicherheitsrelevante Aspekte im technischen Sinne der MRK betrachtet. Eine Vielzahl aktueller Forschungsthemen zeigt jedoch, dass die MRK sehr viel weitreichender ist.

Eine wichtige Rolle stellt die Überarbeitung des Produktionsprozesses dar, angefangen bei der robotergerechten Produktplanung, wie z. B. das Vermeiden von scharfen Kanten sowie das Hinzufügen von Referenzpunkten zur besseren Erkennung und

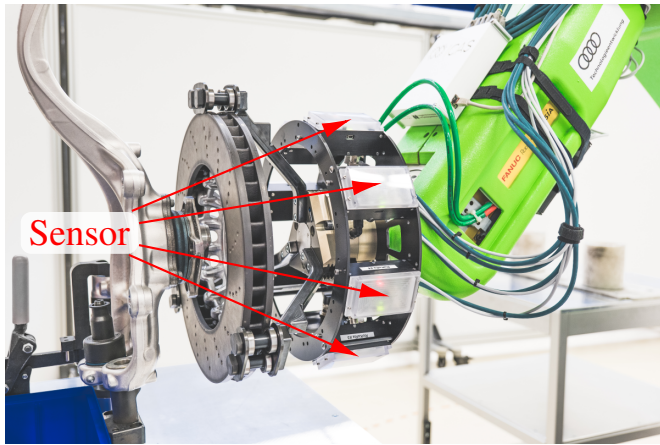


Abbildung 2: Radarsensoren angebracht an einem Roboterarm
Quelle: [28], vom Autor bearbeitet

Positionierung. Zusätzlich beinhaltet die Planungsphase einer neuen Produktionslinie eine Simulation der gesamten Anlage inklusive der einzelnen MRK-Applikationen. Somit können die beste anwendungsspezifische Variante der MRK ermittelt und die Vorteile der kollaborierenden Roboter vollständig ausgenutzt werden. [3,32] Die Wirtschaftlichkeit stellt meist ein entscheidendes Kriterium für die reale Umsetzung von MRK-Anwendungen in der Industrie dar. Ein Modell zur genauen Berechnung des Kosten-Nutzen-Faktors wird derzeit von Weckenborg et al. entwickelt. [33]

Für die deutsche Industrie ist der wichtigste Aspekt bei der MRK die Sicherheit der Menschen. Aus diesem Grund sind Gefahrenanalyse und Risikobeurteilung für MRK-Anwendungen essentiell. Diese Prüfungen sind sehr umfangreich, kompliziert und zeitaufwendig, insbesondere bei einem kraft- und leistungsbegrenzten kollaborativen Betrieb. [1,34] Chemweno et al. stellen ein auf der ISO 31000-Norm basierendes Framework zur Verfügung, das die Gefahrenanalyse und Risikobewertung vereinfacht und damit den Integrationsprozess beschleunigt [11].

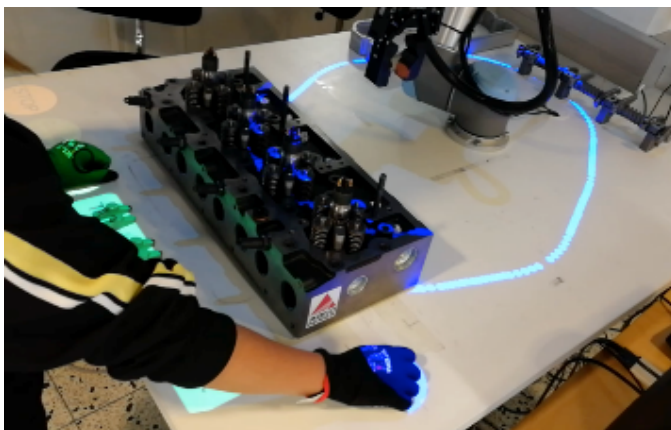


Abbildung 3: Projektionsbasiertes Sicherheitssystem
Quelle: [35], vom Autor bearbeitet

Neben der Sicherheit werden auch die Auswirkungen auf den menschlichen Organismus untersucht. Zu diesem Zweck führten Welfare et al. eine Studie mit 50 Probanden von MRK-Arbeitsplätzen durch. Die am häufigsten genannten negativen Aspekte waren Gesundheitsprobleme, Sicherheitsbedenken, das Gefühl, gehetzt zu werden, und repetitive Arbeit. Neue Technologien der Mensch-Roboter-Kommunikation können mögliche Lösungen bieten. [36] Zum Beispiel demonstrieren Hientanen et al. mit ihrem projektionsbasierten System die Zwei-Wege-Kommunikation zwischen Mensch und Roboter (siehe Abbildung 3). Das System visualisiert den Arbeitsbereich des Roboters und trägt somit dazu bei, die Sicherheitsbedenken des Mitarbeiters zu reduzieren. [35] Darüber hinaus können akustische Signale die Effektivität und den Arbeitsablauf verbessern, ohne die psychische Belastung des Anwenders zu erhöhen [37]. Ergänzend dazu kann ein Fertigungsmitarbeiter mit einem tragbaren Sensorsystem in Form eines Armbands ausgestattet werden, das den Handover-Prozess zwischen Menschen und Robotern effektiver und natürlicher gestaltet [38].

V. DISKUSSION

Wie dieser Artikel verdeutlicht, ist MRK ein sich weiterentwickelndes Thema in der Robotik. Die Synergie zwischen Menschen und Robotern ist ein relevanter Faktor für die Industrie, um Produktionslinien in Bezug auf Leistung und Flexibilität zu verbessern. Die Veränderung einer etablierten Arbeits- und Denkweise in großen Unternehmen ist jedoch eine anspruchsvolle Herausforderung in Bezug auf die Einführung neuer Technologien. [2] Es zeigt sich, dass Anwendungsfälle, in denen Mensch und Roboter eng Hand in Hand zusammenarbeiten, nur in den seltensten Fällen eine sinnvolle Anwendung finden. Die Ursachen dafür liegen in der Ineffizienz, bestehende Systeme zu ersetzen, aber auch in der fehlenden menschenähnlichen Feinfühligkeit, die derzeit durch keinen Endeffektor ersetzt werden kann. [39]

Des Weiteren sind kraft- und leistungsbegrenzte Systeme aus Sicherheitsgründen nicht annähernd so effektiv wie andere Automatisierungssysteme. Ein Widerspruch ist auch in dem oft genannten Vorteil der verbesserten Ergonomie zu sehen, da gerade bei der Platzierung von schweren Bauteilen die in Tabelle 1 aufgelisteten MRK-fähigen Roboter meist nicht eingesetzt werden können. Zusammen mit dem Greifersystem, das in der Regel mehrere Kilogramm wiegt, würde die zulässige Gesamtlast überschritten werden. Folglich kann die Ergonomie mit den derzeit am Markt verfügbaren Robotersystemen kaum verbessert werden.

Dementsprechend sollte die Entwicklung von Schwerlast-MRK-Systemen gefördert werden. Da diese Systeme jedoch ein wesentlich höheres Sicherheitsrisiko darstellen, ist die Entwicklung neuer sicherer Sensortechnologien zur Vermeidung von Kollisionen mit Menschen erforderlich. [40] Aufgrund der in der ISO 15066 definierten biomechanischen Grenzwerte, die nicht auf kranke oder alte Menschen anwendbar sind, können diese Sensortechnologien auch für Anwendungen in der Servicerobotik eingesetzt werden. Die Grenzwerte nach ISO 15066 basieren auf Experimenten von Melia et al., welche

nur gesunde Teilnehmer im Alter zwischen 23 und 67 Jahren berücksichtigen [41]. Folglich liegen die biomechanischen Grenzwerte für die Nutzergruppe der Servicerobotik deutlich niedriger, wodurch eine Kollisionsvermeidung unumgänglich ist.

In der Zwischenzeit sollte jeder Integrator in der Industrie reflektieren, ob eine Kollaboration für die jeweilige Anwendung notwendig ist oder ob eine Kooperation zwischen Mensch und Roboter ausreicht. Dies lässt sich mit einem sicherheitsbewerten überwachten Halt kostengünstig realisieren und ist nicht auf kraft- und leistungsbegrenzte Roboter beschränkt. [42]

VI. FAZIT

In diesem Beitrag wird ein Überblick über den aktuellen Stand der Forschung im Bereich der MRK gegeben. Dabei wird der Fokus auf kraft- und leistungsbegrenzte sowie geschwindigkeits- und abstandsüberwachte Systeme gesetzt, da nur mit diesen Systemen eine echte Kollaboration zwischen Mensch und Roboter erreicht werden kann. Darüber hinaus zeigen Anforderungen und Probleme aus der Industrie, dass eine effektive, wirtschaftliche und sichere Kollaboration nur dann stattfinden kann, wenn eine Kollision während der Bewegung des Roboters verhindert werden kann. Aus diesem Grund konzentriert sich die Forschung auf neue Technologien zur Kollisionsvermeidung. Da aber noch keine kommerziell geeignete Lösung existiert, wurden zusätzlich Verbesserungen für bestehende kraft- und leistungsbegrenzte Systeme identifiziert. Der Überblick über verwandte Themen zeigt zudem die Vielfalt der Forschung im Bereich MRK. Es ist jedoch zu erwarten, dass viele Fortschritte aus der Forschung eine Herausforderung für die Integration in industrielle Umgebungen darstellen werden.

LITERATUR

- [1] "DIN ISO/TS 15066:2017-04, Roboter und Robotikgeräte - Kollaborierende Roboter (ISO/TS 15066:2016)".
- [2] E. Matheson, R. Minto, E. G. G. Zampieri, M. Faccio, and G. Rosati, "Human-Robot Collaboration in Manufacturing Applications: A Review", *Robotics*, vol. 8, p. 100, dec 2019.
- [3] G. Michalos, S. Makris, P. Tsarouchi, T. Guasch, D. Kontovrakis, and G. Chryssolouris, "Design Considerations for Safe Human-robot Collaborative Workplaces", vol. 37, pp. 248–253.
- [4] S. Robla-Gomez, V. M. Becerra, J. R. Llata, E. Gonzalez-Sarabia, C. Torre-Ferrero, and J. Perez-Oria, "Working Together: A Review on Safe Human-Robot Collaboration in Industrial Environments", *IEEE Access*, vol. 5, pp. 26754–26773, 2017.
- [5] L. D. Evjemo, T. Gjerstad, E. I. Grøtli, and G. Sziebig, "Trends in Smart Manufacturing: Role of Humans and Industrial Robots in Smart Factories", *Current Robotics Reports*, vol. 1, pp. 35–41, apr 2020.
- [6] R.-J. Halme, M. Lanz, J. Kämäräinen, R. Pieters, J. Latokartano, and A. Hietanen, "Review of vision-based safety systems for human-robot collaboration", *Procedia CIRP*, vol. 72, pp. 111–116, 2018.
- [7] G. Sziebig, "Survey and Planning of High-Payload Human-Robot Collaboration: Multi-modal Communication Based on Sensor Fusion", in *Lecture Notes in Electrical Engineering*, pp. 545–551, Springer Singapore, 2020.
- [8] M. Dianatfar, J. Latokartano, and M. Lanz, "Task Balancing Between Human and Robot in Mid-Heavy Assembly Tasks", *Procedia CIRP*, vol. 81, pp. 157–161, 2019.
- [9] C. S. Franklin, E. G. Dominguez, J. D. Fryman, and M. L. Lewandowski, "Collaborative robotics: New era of human-robot cooperation in the workplace", vol. 74, pp. 153–160.
- [10] R. R. Galin and R. V. Meshcheryakov, "Human-Robot Interaction Efficiency and Human-Robot Collaboration", in *Studies in Systems, Decision and Control*, pp. 55–63, Springer International Publishing.
- [11] P. Chemweno, L. Pintelon, and W. Decre, "Orienting safety assurance with outcomes of hazard analysis and risk assessment: A review of the ISO 15066 standard for collaborative robot systems", vol. 129, p. 104832.
- [12] L. Gualtieri, I. Palomba, E. J. Wehrle, and R. Vidoni, "The Opportunities and Challenges of SME Manufacturing Automation: Safety and Ergonomics in Human-Robot Collaboration", in *Industry 4.0 for SMEs*, pp. 105–144, Springer International Publishing.
- [13] B. Povse, D. Koritnik, R. Kamnik, T. Bajd, and M. Munih, "Emulation system for assessment of human-robot collision", vol. 46, no. 6, pp. 1363–1371.
- [14] S. Haddadin, S. Haddadin, A. Khoury, T. Rokahr, S. Parusel, R. Burgkart, A. Bicchi, and A. Albu-Schäffer, "On making robots understand safety: Embedding injury knowledge into control", vol. 31, no. 13, pp. 1578–1602.
- [15] F. Zeng, J. Xiao, and H. Liu, "Force/Torque Sensorless Compliant Control Strategy for Assembly Tasks Using a 6-DOF Collaborative Robot", vol. 7, pp. 108795–108805.
- [16] R. Weitschat, J. Vogel, S. Lantermann, and H. Hoppner, "End-effector airbags to accelerate human-robot collaboration", in *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, IEEE, may 2017.
- [17] F. Sherwani, M. M. Asad, and B. Ibrahim, "Collaborative Robots and Industrial Revolution 4.0 (IR 4.0)", in *2020 International Conference on Emerging Trends in Smart Technologies (ICETST)*, IEEE.
- [18] S. Kianoush, S. Savazzi, M. Beschi, S. Sigg, and V. Rampa, "A Multisensory Edge-Cloud Platform for Opportunistic Radio Sensing in Cobot Environments", pp. 1–1.
- [19] A. M. Zanchettin, A. Casalino, L. Piroddi, and P. Rocco, "Prediction of Human Activity Patterns for Human-Robot Collaborative Assembly Tasks", vol. 15, no. 7, pp. 3934–3942.
- [20] M. J. Rosenstrauch and J. Kruger, "Safe human robot collaboration - operation area segmentation for dynamic adjustable distance monitoring", in *2018 4th International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR)*, IEEE, apr 2018.
- [21] J. Chen, S. Bi, L. Chen, and N. Xi, "Event-based planning and control for active collision avoidance in human-robot collaboration", in *2019 IEEE 9th Annual International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER)*, IEEE, jul 2019.
- [22] H. Shin, S. Kim, K. Seo, and S. Rhim, "A Real-Time Human-Robot Collision Safety Evaluation Method for Collaborative Robot", in *2019 Third IEEE International Conference on Robotic Computing (IRC)*, IEEE, feb 2019.
- [23] S. Kang, M. Kim, and K. Kim, "Safety Monitoring for Human Robot Collaborative Workspaces", in *2019 19th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*, IEEE.
- [24] U. B. Himmelsbach, T. M. Wendt, and M. Lai, "Towards Safe Speed and Separation Monitoring in Human-Robot Collaboration with 3D-Time-of-Flight Cameras", in *2018 Second IEEE International Conference on Robotic Computing (IRC)*, IEEE, jan 2018.
- [25] "DIN ISO/TS 10218-1:2012-01, Industrieroboter - Sicherheitsanforderungen - Teil 1: Roboter (ISO 10218-1:2011)".
- [26] "DIN ISO/TS 10218-2:2012-06, Industrieroboter - Sicherheitsanforderungen - Teil 2: Robotersysteme und Integration (ISO 10218-2:2011)".
- [27] M. Zlatanski, P. Sommer, F. Zurfluh, S. G. Zadeh, A. Faraone, and N. Perera, "Machine Perception Platform for Safe Human-Robot Collaboration", in *2019 IEEE SENSORS*, IEEE, oct 2019.
- [28] M. Abdelawwad, J. Börcsök, T. Borowski, M. Drabesch, M. Hägelen, T. Schraml, M. H. Schwarz, C. Voß, and C. Zech, "RoKoRa - Sichere Mensch-Roboter-Kollaboration mit Hilfe hochauflösender Radare", in *Autonome Roboter für Assistenzfunktionen: Interaktive Grundfertigkeiten - Ergebnisse und Forschungsperspektiven*, ch. 10, p. 159, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA).
- [29] M. Zlatanski, P. Sommer, F. Zurfluh, and G. L. Madonna, "Radar Sensor for Fenceless Machine Guarding and Collaborative Robotics", in *2018 IEEE International Conference on Intelligence and Safety for Robotics (ISR)*, IEEE, aug 2018.
- [30] K. Zhang, Z. Yu, D. Zhang, Z. Wang, and B. Guo, "RaCon: A gesture recognition approach via Doppler radar for intelligent human-robot interaction", in *2020 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops)*, 2020.

- [31] S. Pieska, T. Pitkaaho, and T. Kaarlela, "Multilayered Dynamic Safety for High-Payload Collaborative Robotic Applications", in *2020 3rd International Symposium on Small-scale Intelligent Manufacturing Systems (SIMS)*, IEEE.
- [32] A. Hanna, K. Bengtsson, M. Dahl, E. Eros, P.-L. Gotvall, and M. Ekstrom, "Industrial Challenges when Planning and Preparing Collaborative and Intelligent Automation Systems for Final Assembly Stations", in *2019 24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, IEEE.
- [33] C. Weckenborg and T. S. Spengler, "Assembly Line Balancing with Collaborative Robots under consideration of Ergonomics: a cost-oriented approach", vol. 52, no. 13, pp. 1860–1865.
- [34] "Kollaborierende Robotersysteme - Planung von Anlagen mit der Funktion Leistungs-und Kraftbegrenzung".
- [35] A. Hietanen, A. Changizi, M. Lanz, J. Kamarainen, P. Ganguly, R. Pieters, and J. Latokartano, "Proof of concept of a projection-based safety system for human-robot collaborative engine assembly", in *2019 28th IEEE International Conference on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)*, IEEE, oct 2019.
- [36] K. S. Welfare, M. R. Hallowell, J. A. Shah, and L. D. Riek, "Consider the Human Work Experience When Integrating Robotics in the Workplace", in *2019 14th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI)*, IEEE.
- [37] J. Okimoto and M. Niitsuma, "Effects of Auditory Cues on Human-Robot Collaboration", in *2020 IEEE 29th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, IEEE, jun 2020.
- [38] W. Wang, R. Li, Z. M. Diekel, Y. Chen, Z. Zhang, and Y. Jia, "Controlling Object Hand-Over in Human-Robot Collaboration Via Natural Wearable Sensing", *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, vol. 49, pp. 59–71, feb 2019.
- [39] H. Weiss, "Weniger Händchenhalten", vol. 02/03-2020, pp. 28–29, Automobil Produktion.
- [40] E. M. E. Alegue, "Human-Robot Collaboration with High-Payload Robots in Industrial Settings", in *IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, IEEE, oct 2018.
- [41] M. Melia, M. Schmidt, B. Geissler, J. König, U. Krahn, H. J. Ottersbach, S. Letzel, and A. Muttray, "Measuring mechanical pain: The refinement and standardization of pressure pain threshold measurements", vol. 47, no. 1, pp. 216–227.
- [42] A. Barnitzke, "Cobots: Das Warten auf den großen Durchbruch", vol. 10-2020, pp. 26–30, Automationspraxis.

Unbemannte Luftfahrzeuge: Ein Überblick ziviler Anwendungen und die wichtigsten Herausforderungen für die Forschung

Michael Bodensteiner
OTH Regensburg
Fakultät Elektro- und Informationstechnik
Regensburg, Deutschland
michael.bodensteiner@st.oth-regensburg.de

Zusammenfassung—Im Zuge der Digitalisierung, Optimierung und Automatisierung haben unbemannte Luftfahrzeuge (Englisch: unmanned aerial vehicle, UAV) im Bereich der zivilen Anwendungen einen neuen aufstrebenden Sektor geschaffen. Aufgrund ihrer kompakten und leichten Bauweise sowie der flexiblen Verwendungszwecke, bekommen diese einen immer höher werdenden Stellenwert zugeschrieben.

UAVs sind somit in zahlreichen Forschungsfeldern anzutreffen. Beginnend im Bereich der Überwachung und Beobachtung (Monitoring), über die Kartografie unterschiedlichster Umgebungen, bis hin zu Katastropheneinsätzen, decken diese vielfältige Einsatzgebiete ab. Dabei werden die UAVs je nach Anwendungsgebiet zum Beispiel mit hochauflösenden Kameras, Sensoren für die Messung der Luftqualität, Lidar und Langstrecken-Technologien (Englisch: Long-Range, LoRa) bestückt. Alle Systeme unterliegen jedoch demselben Grundprinzip: Zu dem jeweiligen UAV existiert eine feste Basisstation als Steuerung. Die einzelnen Einheiten kommunizieren über Funk miteinander und die Ansteuerung der UAVs geschieht entweder autonom oder über einen Piloten am Boden.

Die Arbeit gibt einen Überblick über die zivilen Anwendungen von UAVs und zeigt die wichtigsten Herausforderungen der Forschung auf. Da dieses Forschungsfeld sehr vielfältig gestaltet ist, beschränkt sich das Paper auf Drohnen in Form von Quadrocoptern im Bereich des Monitoring, der Kartografie und der Vernetzung. Gemeinsamkeiten sowie Unterschiede der einzelnen Anwendungsgebiete werden dabei genauer beleuchtet und generelle Schlüsselprobleme betrachtet. Es zeigt sich, dass die Forschung trotz der Vielzahl ziviler Anwendungen noch einige Herausforderungen zu meistern hat, die sowohl rein technischer Natur als auch durch die Forschung selbst erzeugt sind.

Schlüsselwörter—Unbemannte Luftfahrzeuge, Drohnen, Literaturüberblick

I. EINLEITUNG

Pakete, welche wie von Zauberhand aus dem Nichts angefliegen kommen, Lieferdienste, die ihr Essen einer kleinen Drohne geben, statt einen Fahrer loszuschicken und Förster, die bequem vom Boden aus die Gesundheit ihrer Bäume überprüfen. All das sind Zukunftsgedanken, die schon jetzt - wenn auch teilweise noch nicht ersichtlich - beginnen, unser alltägliches Leben zu beeinflussen. Die rasant fortschreitende Digitalisierung und Optimierung gehen dabei Hand in Hand mit dem allgemeinen Wunsch der Automatisierung. Diese Annahme wird durch die Arbeit von Kotsemir gestützt. Sie

zeigt den starken Anstieg an Publikationen - hier aus der Scopus Datenbank - auf [1].

Dabei stellen sich die Fragen, wie sehr diese neuen Techniken schon im zivilen Bereich Einzug gehalten haben und was die größten Hürden für die Forschung sind.

Dieses Paper gibt demnach einen Überblick ziviler Anwendungen unbemannter Luftfahrzeuge und erläutert die wichtigsten Herausforderungen für die Forschung. Aufgrund der großen Anzahl und Vielfältigkeit der verfügbaren Literatur wurde die Literatursuche auf das Monitoring, die Kartografie und die Vernetzung im Zusammenhang mit unbemannten Luftfahrzeugen eingeschränkt. Hierbei ist die Anzahl der Arbeiten nochmals auf diejenigen, welche Drohnen in Form von Quadrocoptern verwenden, beschränkt worden.

Die Arbeit ist folgendermaßen strukturiert: In Sektion II wird nach einer allgemeinen Beschreibung von UAVs auf Applikationen der drei konkreten Anwendungsgebiete des Monitorings, der Kartografie und der Vernetzung eingegangen, um einen Überblick des Standes der Technik zu vermitteln. Diese erstrecken sich vom Aufbau von Kommunikationsnetzen, über Geowissenschaften und Biodiversität, bis hin zu Messungen der Luftqualität. Die Herausforderungen der Forschung werden nachfolgend in Abschnitt III beschrieben, um im abschließenden Kapitel IV eine Zusammenfassung der Ergebnisse darzubringen.

II. ÜBERBLICK ZIVILER ANWENDUNGEN

Das Grundprinzip von unbemannten Luftfahrzeugen ist stets das Gleiche: Es existiert ein oder mehrere UAVs, welche die mobile, mit Sensorik ausgestattete Flugeinheit - hierzu gehören zum Beispiel hochauflösende Kamerasysteme - darstellen. Zusammen mit einer Bodenstation bilden sie ein unbemanntes Luftfahrssystem (Englisch: unmanned aerial system, UAS). Die Bodenstation ist für die Steuerung der UAVs zuständig [2]. Dies geschieht entweder auf Sicht bzw. über integrierte Kameras an Bord mit Hilfe eines Piloten am Boden oder automatisiert über autonome Systeme. Über eine Funkverbindung kommunizieren die Einheiten des UAS miteinander [3].

Die nachfolgenden Kapitel geben einen beschränkten Überblick ziviler Anwendungen. Die Anwendungen sind in

drei Subkategorien untergliedert: das Monitoring, die Kartografie und die Vernetzung.

A. Monitoring

Das erste betrachtete Feld der Forschung ist das Monitoring. Zu diesem gehören überwachende und beobachtende Aufgaben. UAVs sind hier aufgrund ihrer kompakten Bauweise und flexiblen Einsatzmöglichkeiten häufig anzutreffen.

Bertacchi et al. und Mattiza et al. forschen im Bereich von Flora und Fauna. Bertacchi et al. identifiziert in [4] Pflanzenarten in schwer zugänglichen Feuchtgebieten, die nicht betreten werden können. Hierfür werden hochauflösende Bildverarbeitungssysteme mit einer Auflösung von bis zu 3,5126 mm/Pixel bei einer Flughöhe von 5 m eingesetzt. [4]

In [5] wird mittels Bildsensoren und Multispektralkameras die Biodiversität in gefährdeten Bereichen - dabei handelt es sich um Agrar- und stadtnahe Gebiete - überwacht. Lebensräume sollen erkannt sowie betroffene Vogelarten lokalisiert und identifiziert werden. Vorteil dieses Ansatzes ist das mögliche Beobachten empfindlicher Arten ohne in ihren Lebensraum eingreifen zu müssen. [5]

Ein weiteres Themenfeld des Monitorings ist die Analyse der Luftqualität. McKinney et al. und Rossi et al. haben jeweils Arbeiten in diesem Bereich veröffentlicht. Während sich [6] mit der Messung von flüchtigen organischen Verbindungen in unterschiedlichen Flughöhen beschäftigt, werden in [7] speziell Konzentrationen umweltschädlicher Gase um kritische Gebäude - das sind zum Beispiel Kraftwerke oder Fabriken - gemessen.

Pasler, Komarkova und Sedlak stellen in ihrer Arbeit ein System vor, welches die Entwicklung der Wasserqualität von Binnengewässern beobachtet. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf dem Anteil von Chlorophyll in den Gewässern, der über Bilddaten bestimmt werden kann. UAVs sollen dabei ergänzend zu dem bestehenden Satelliten-System Landsat arbeiten und dessen Nachteile ausgleichen. Als die größten Nachteile der Landsat-Satelliten gegenüber UAVs werden Datenausfälle durch Bewölkungen und der damit verbundenen verdeckten Sicht, geringe Flexibilität und eine schlechte räumliche Auflösung genannt. Es zeigt sich, dass UAVs vor allem aufgrund der niedrigeren Flughöhe unterhalb der Wolkendecke einen ausschlaggebenden Vorteil gegenüber den Landsat-Satelliten mit sich bringen. [8]

B. Kartografie

Neben dem Monitoring stellt auch die Kartografie ein umfangreiches Forschungsfeld dar. Sie wird einerseits für die räumliche Darstellung von Daten aus dem Monitoring, aber auch zur Erzeugung von Karten und 3D-Modellen von schwer bzw. nicht zugänglichen Gebieten angewandt.

In den Arbeiten [4] und [7] finden zum Beispiel Kartierungen aus zuvor durchgeführten Beobachtung des Monitorings statt. Hierfür werden die gesammelten Daten zu einer vollwertigen Karte rekonstruiert. Das kann über mehrere Techniken geschehen. Zum einen ist die Rekonstruktion über ein Zusammensetzen von sich überlappenden Bildaufnahmen,

der sogenannten Fotogrammetrie, möglich [4]. Zum anderen sind auch GPS/GSM Module für die Rekonstruktion der Daten in Verwendung. In [7] werden die Messwerte mit den GPS-Koordinaten des UAV verknüpft, um eine Karte zu generieren.

Schultz-Fellenz et al. stellen eine Anwendung der Kartierung vor, bei der Oberflächenveränderungen - durch Arbeiten und Erschütterungen im Untergrund ausgelöst - erkannt werden. Dafür nimmt das System hochauflösende Aufnahmen auf und generiert über fotogrammetrische Verfahren ein 3D-Modell der Umgebung. Veränderungen der Umgebung werden durch den Vergleich mit vergangenen Aufnahmen erkannt. [9]

Abschließend kann nach Harder, Pomeroy und Helgason ein UAV auch für die Kartografie der Schneedecke eingesetzt werden, um Dynamiken dieser erkennen zu können. Vor allem hier fällt häufig der Begriff Structure from Motion (SfM). SfM bezeichnet eine bewährte Technik, um aus 2D-Bildaufnahmen 3D-Modelle erstellen zu können. Abweichend zu [9] werden in dieser Arbeit auch Versuche mit Lidar Sensoren durchgeführt. Diese sollen als Alternative zur SfM-Methode Anwendung finden. Ein Vergleich der beiden Systeme zeigt eine höherer Genauigkeit der Lidar-Technik gegenüber SfM. Lidar bildet somit eine potentielle Alternative zur Kartografie aus Bilddaten. [10]

C. Vernetzung

Der letzte beleuchtete Bereich ziviler Anwendungen von UAVs ist die Vernetzung. Hier werden häufig Schwärme von UAVs verwendet, die ein Kommunikationsnetz aufspannen oder als Daten-Brücke fungieren. Eingesetzt wird das Konzept zum Katastrophenmanagement in von Menschen bzw. Natur provozierten Katastrophengebieten, zum generellen Aufbau von temporären Netzwerken sowie im Zuge des Internet der Dinge (Englisch: Internet of Things, IoT). [11]–[13]

Im Bereich des Katastrophenmanagements aus der Arbeit von Reynaud, Rasheed und Kandeepan steht vor allem der Aufbau eines stabilen Kommunikationssystems für Rettungskräfte im Fokus. In Krisengebieten ist das von großer Bedeutung, wenn dort das Kommunikationsnetz aufgrund einer Katastrophe selbst oder einer Netzüberlastung in Folge der Katastrophe ausgefallen ist. [11]

Im Gegensatz hierzu wird im Bereich des IoT nach [13] der Ansatz, UAVs als Medium der Vernetzung zu nutzen, untersucht. Das UAS baut dabei - bestehend aus mehreren UAVs - ein lokales LoRa Netzwerk auf und jedes UAV stellt einen LoRa-Knoten dar. [13]

Zusätzlich zu den vorangehenden Arbeiten analysieren Guo, Devine und Wang die Entwicklung von mobilen Sendeeinheiten zur dynamischen und intelligenten Netzabdeckung in Ballungsgebieten. Das ist aufgrund der immer weiter fortschreitenden Urbanisierung sowie der sich lokal und zeitlich ändernden Anforderungen notwendig. [12]

III. HERAUSFORDERUNGEN AN DIE FORSCHUNG

Aus den zuvor beschriebenen Anwendungsbereichen lassen sich unterschiedliche, auf alle Bereiche zutreffende, Schlüssel-

probleme erkennen und definieren. Dabei kann zwischen technisch bedingten, direkten sowie indirekt durch die Einflüsse der Forschung erzeugte Herausforderungen unterschieden werden. Einen direkten Einfluss haben zum Beispiel mögliche Kapazitäten und die Genauigkeit von UAVs. Indirekt wirken die Aspekte der notwendigen IT-Sicherheit und Regularisierungen auf die Forschung ein.

A. Kapazitäten

In Bezug auf die Kapazitäten stellen die limitierende Faktoren des Energieverbrauchs und der maximal möglichen Traglast eine große Herausforderung dar. So muss oftmals auf energieintensive Systeme verzichtet werden, da das UAV selbst bereits einen Großteil der Energie für seine Flugmanöver benötigt.

In der Arbeit von Rossi et al. wird aufgrund dessen für die Entwicklung des UAVs von kommerziellen Systemen abgewichen und ein eigener Gassensor entwickelt. Dieser benötigt lediglich eine Leistung von unter 0,13 W. [7]

McKinney et al. verwenden in ihrer Arbeit zur Reduzierung des Eigenenergieverbrauchs ein kompaktes UAV mit einer Masse von 0,90 kg und einer Abmessung von 19 cm x 20 cm x 5 cm. Dadurch konnte der Energieverbrauch auf unter 5,56 W reduziert werden. Das entspricht weniger als 3% der vorhandenen Batterie-Kapazität bei einem Flug von 30 min und ermöglicht den Anbau diverser Sensorik. [6]

Choudhary et al. zeigen den hohen Implementierungsaufwand von Sicherheitssystemen wie einem Angriffserkennungssystem (Englisch: Intrusion Detection System, IDS) und dem damit verbundenen hohen Energieverbrauch als Problem auf. Die Forderung nach schlanken, für UAVs geeigneten, Lösungen stellt sich hier abschließend. [14]

B. Genauigkeit

Des Weiteren wird, im Sinne der Rentabilität und Nutzbarkeit, auch der Punkt der Genauigkeit von UAVs groß geschrieben. Das ist in vielen Arbeiten als limitierender Faktor beschrieben.

Bertacchi et al. erwähnen in ihrer Arbeit den Faktor Genauigkeit in Abhängigkeit der in III-A beschriebenen Kapazitäten. Die Genauigkeit ist aufgrund der verwendeten Technik - hochauflösende/ genaue Systeme sind schwerer als einfache und kompakte - wiederum beschränkt. Dadurch ergeben sich in Abhängigkeit der Flughöhe unterschiedliche Auflösungen von 17,5630 mm/Pixel bei 25 m bis hin zu 3,5126 mm/Pixel bei 5 m. Die Variationen führen wiederum zu unterschiedlichen Ergebnissen. So muss für hochauflösende Aufnahmen eine niedrige Flughöhe gewählt werden, was jedoch eine Vielzahl von Aufnahmen ergibt. Im Prozess der Kartierung resultiert aus der großen Anzahl an Bildern ein hoher Rechenaufwand und Ungenauigkeiten. Somit ergeben sich in dieser Arbeit infolge der mangelnden Auflösung unterschiedliche optimale Flughöhen. Das erschwert eine flexible Nutzung solcher Systeme. [4]

Mattiza et al. und Pasler, Komarkova und Sedlak führen ergänzend noch auftretende Ungenauigkeiten durch Wind und

schlechte Sicht auf. Vor allem gegenüber dem Einfluss des Windes sind UAVs aufgrund ihrer leichten Bauweise anfällig, was die Erzeugung der Kartografie- bzw. Monitoring-Daten erschwert [5]. Nach [8] können Wind und Regen die Nutzung von UAVs signifikant beeinflussen und deren Vorteile wett machen. Sie erwähnen aber auch die generelle Flexibilität von UAVs und die Resistenz heutiger Systeme. So sind Wettereinflüsse vorhersehbar und Einsätze von UAVs planbar. Zudem schreitet die Forschung stetig voran, sodass in dieser Arbeit eine Drohne verwendet wurde, die bei Windgeschwindigkeiten von bis zu 15 m/s arbeiten kann. Solche UAVs können schon einen Großteil der vorherrschenden Bedingungen abdecken. Es besteht jedoch weiter Entwicklungsbedarf um die Resistenz gegenüber Wettereinflüssen weiter zu verbessern. [8]

C. IT-Sicherheit

Ein wichtiges Thema im zivilen Bereich unbemannter Luftfahrzeuge ist anlässlich der Funktechnik der Faktor IT-Sicherheit. Diese Herausforderung ist durch die fortschreitende Entwicklung von UAVs und der damit verbundenen steigenden Aufmerksamkeit zusätzlich entstanden.

Der Sicherheitsaspekt wird vor allem im Bereich der Vernetzung relevant, da hier viele kleine Einheiten miteinander und der Basisstation kommunizieren und somit eine breite Angriffsfläche bieten. Choudhary et al. präsentieren in ihrer Arbeit den Stand der Technik von IDSs. Dabei gibt es mehrere unterschiedliche Ansätze. Aufgabe all dieser ist es jedoch, dass ein unnatürliches/undefiniertes Verhalten erkannt und entsprechend darauf reagiert wird, um entstehende Schäden gering zu halten.

Die größte Herausforderung stellt dabei der Umfang der nötigen Sicherheitsmaßnahmen dar, da die Ausführung solcher Algorithmen sehr rechenintensiv ist und den Vorteil der erlangten Sicherheit wett machen können.

Ziel ist es, die Fehler in der Erkennung trotz geringer Überwachung zu minimieren sowie die benötigte Rechenleistung zu reduzieren. Dafür nennen die Autoren mehrere Punkte, die eine rentable Nutzung von IDSs aktuell noch erschweren. Dazu gehören unter anderem die Abschätzung der eingesetzten Rechenleistung, die ein besonderes Feingefühl benötigt um das richtige Maß zwischen erreichter Sicherheit durch das IDS und dabei erzeugten Rechenaufwand zu erreichen sowie eine effektive Überwachung und schnelle Angriffsreaktion, was die Agilität des IDS widerspiegelt. Die Agilität des IDS ist in Bezug auf die Schadensminimierung ein wichtiger Faktor und bei ressourcenbeschränkten UAVs schwierig zu verbessern.

Erst nach Beseitigung dieser und weiterer Probleme und der damit verbundenen Anpassung von IDSs an die Systeme der UAVs sehen Choudhary et al. einen Mehrwert. [14]

D. Regularisierung

Im politischen Sektor stellt abschließend der Faktor der Regularisierung noch einen signifikanten Punkt dar. Nakamura und Kajikawa gehen in ihrer Arbeit auf eine sicherheitsbezogene Regularisierung zum Schutz von Personen, Gebäuden, Fahrzeugen und bemannten Luftfahrzeugen, am Beispiel von

Japan, ein. Hier steht der schnellen und unkomplizierten Entwicklung von UAVs in zivilen Anwendungen eine Reihe von Anforderungen und Vorschriften entgegen.

So werden vier übergreifende Sicherheits-Klassen aufgeführt:

- 1) Flüge sind nicht gestattet: entspricht der höchsten Sicherheitsklasse und verbietet jegliche Anwendungen von UAVs.
- 2) UAVs müssen Abstand zu Personen, Gebäuden und Fahrzeugen einhalten.
- 3) Wenn es nicht möglich ist die Sicherheitsabstände einzuhalten, muss Sorge getragen werden, dass Kollisionen auch im schlimmsten Fall zu verhindern sind.
- 4) Im Falle einer Kollision muss der auftretende Schaden so gering wie möglich gehalten werden.

Diese vier Sicherheits-Klassen definieren die Regularien, ob und unter welchen Voraussetzungen Drohnen in bestimmten Gebieten agieren dürfen.

Um die jeweiligen Anforderungen erfüllen zu können, müssen z.B. nach dem Systemtheoretischen Unfallmodell und Prozess (Englisch: Systems-Theoretic Accident Model and Process, STAMP) UAVs mit zusätzlichen Software-Routinen abgesichert werden oder über Zusatzkomponenten wie Fallschirme und Air Bags verfügen. STAMP ist ein Sicherheitsanalyse-Ansatz, welcher dynamische Systemverhalten sowie Interaktionen komplexer Systeme analysiert. Auch die Schulung von Fach- sowie Rettungspersonal ist von Nöten. All diese Anforderungen stellen die Forschung vor zusätzliche Hürden bei der Entwicklung ziviler Anwendungen, wenngleich sie den nachhaltigen und geregelten Einzug in den Alltag ermöglichen. [15]

IV. ZUSAMMENFASSUNG

Diese Arbeit stellt einen Überblick ziviler Anwendungen von unbemannten Luftfahrzeugen dar und zeigt die wichtigsten Herausforderungen für die Forschung auf. Dabei wurden mehrere Anwendungen aus den Themenbereichen des Monitorings, der Kartografie und der Vernetzung, bei denen UAVs in Form von Quadrocoptern verwendet werden, präsentiert.

Der hier vorgestellte Überblick lässt erkennen, dass trotz der unterschiedlichen Anwendungsgebiete die meisten UAVs ihre Daten über Bildverarbeitungssysteme generieren. Auffällig ist dabei, dass sich Forschungen aus den Sachgebieten des Monitorings meist mit denen der Kartografie überschneiden. Im Bereich der Vernetzung findet dagegen kein einzelnes UAV Verwendung, sondern eine Vielzahl von Drohnen, die ein großflächiges UAS aufspannen.

So vielfältig die Einsatzzwecke von UAVs sind, so zahlreich sind auch die Herausforderungen für die Forschung. Hierbei wurden nur die technischen Herausforderungen betrachtet. Diese treten meist direkt, aber auch indirekt durch Einflüsse von außen, auf.

Technisch stellen einerseits die limitierten Kapazitäten sowie mangelnde Genauigkeiten der UAVs die Forscher vor Herausforderungen. Beide Punkte gehen einher, da die begrenzten Kapazitäten von UAVs in Bezug auf der maximalen Traglast

und der vorhandenen Akku-Kapazität den Pool an möglichen Anbaugeräten stark eingrenzen. Die Akku-Kapazität wird wiederum von der maximalen Traglast beeinflusst, was die Forscher in Summe zu eigenen Entwicklungen zwingt. Auch bieten UAVs aufgrund ihrer Bauweise eine große Angriffsfläche für etwaige Wettereinflüsse, was die Genauigkeit der System weiter negativ beeinflusst.

Andererseits sind jedoch auch noch schwer kalkulierbare äußere Einflüsse wie die Aspekte der IT-Sicherheit und der Regularisierung zum Schutz Dritter zu berücksichtigen. Mit Blick auf die Sicherheit vor Angriffen von außerhalb lässt sich auf Ansätze verweisen, die für UAVs genutzt werden können. Diese sind jedoch noch an die begrenzt vorhandenen Kapazitäten der UAVs anzupassen. Auch staatliche Regularisierungen haben einen Einfluss auf die Forschung, da UAVs stets so auszulegen sind, dass sie den aktuellen Richtlinien zum Schutz Dritter entsprechen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Forschung vielfältige Anwendungen entwickelt, die einen Mehrwert im zivilen Bereich darstellen. Allerdings gilt es, eine Vielzahl von Herausforderungen zu meistern, bis sich zivile Anwendungen vollends durchsetzen und auch den technischen und regulatorischen Anforderungen gerecht werden können.

LITERATUR

- [1] M. Kotsemir, "Unmanned aerial vehicles research in scopus: An analysis and visualization of publication activity and research collaboration at the country level", *Quality & quantity*, S. 1–31, 2019.
- [2] T. F. Villa, F. Gonzalez, B. Miljjevic, Z. D. Ristovski und L. Morawska, "An overview of small unmanned aerial vehicles for air quality measurements: Present applications and future perspectives", *Sensors (Basel, Switzerland)*, Jg. 16, Nr. 7, 2016.
- [3] H. Hildmann und E. Kovacs, "Review: Using unmanned aerial vehicles (uavs) as mobile sensing platforms (mmps) for disaster response, civil security and public safety", *Drones*, Jg. 3, Nr. 3, S. 59, 2019.
- [4] A. Bertacchi, V. Giannini, C. Di Franco und N. Silvestri, "Using unmanned aerial vehicles for vegetation mapping and identification of botanical species in wetlands", *Landscape and ecological engineering*, S. 1–10, 2019.
- [5] M. Mattiza, M. Henning, D. Mader, P. Westfeld und F. Etterer, "Using unmanned aerial vehicles (uav) for monitoring biodiversity measures in periurban and agrarian landscapes", in *Journal of Digital Landscape Architecture*, Bd. 3, S. 273–282.
- [6] K. A. McKinney, D. Wang, J. Ye et al., "A sampler for atmospheric volatile organic compounds by copter unmanned aerial vehicles", *Atmospheric measurement techniques*, Jg. 12, Nr. 6, S. 3123–3135, 2019.
- [7] M. Rossi, D. Brunelli, A. Adami, L. Lorenzelli, F. Menna und F. Remondino, "Gas-drone: Portable gas sensing system on uavs for gas leakage localization", in *2014 IEEE SENSORS, Valencia, Spain, 2 - 5 November 2014*, S. 1431–1434.

- [8] M. Pasler, J. Komarkova und P. Sedlak, “Comparison of possibilities of uav and landsat in observation of small inland water bodies”, in *2015 International Conference on Information Society (i-Society)*, IEEE, 9.11.2015 - 11.11.2015, S. 45–49, ISBN: 978-1-9083-2048-3.
- [9] E. S. Schultz-Fellenz, R. T. Coppersmith, A. J. Sussman, E. M. Swanson und J. A. Cooley, “Detecting surface changes from an underground explosion in granite using unmanned aerial system photogrammetry”, *Pure and Applied Geophysics*, Jg. 175, Nr. 9, S. 3159–3177, 2018.
- [10] P. Harder, J. W. Pomeroy und W. D. Helgason, “Improving sub-canopy snow depth mapping with unmanned aerial vehicles: Lidar versus structure-from-motion techniques”, *The Cryosphere*, Jg. 14, Nr. 6, S. 1919–1935, 2020.
- [11] L. Reynaud, T. Rasheed und S. Kandeepan, “An integrated aerial telecommunications network that supports emergency traffic”, 2012.
- [12] W. Guo, C. Devine und S. Wang, “Performance analysis of micro unmanned airborne communication relays for cellular networks”, in *2014 9th International Symposium on Communication Systems, Networks & Digital Sign (CSNDSP)*, IEEE, 23.07.2014 - 25.07.2014, S. 658–663, ISBN: 978-1-4799-2581-0.
- [13] J.-M. Martinez-Caro und M.-D. Cano, “Iot system integrating unmanned aerial vehicles and lora technology: A performance evaluation study”, *Wireless Communications and Mobile Computing*, Jg. 2019, S. 1–12, 2019.
- [14] G. Choudhary, V. Sharma, I. You, K. Yim, I.-R. Chen und J.-H. Cho, “Intrusion detection systems for networked unmanned aerial vehicles: A survey”, in *2018 14th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC)*, IEEE, 25.06.2018 - 29.06.2018, S. 560–565, ISBN: 978-1-5386-2070-0.
- [15] H. Nakamura und Y. Kajikawa, “Regulation and innovation: How should small unmanned aerial vehicles be regulated?”, *Technological forecasting & social change : an international journal*, Jg. 128 (2018), S. 262–274, 2018.

Deep Reinforcement Learning für Computerspiele

1st Philipp Hohlfeld
Elektro- und Informationstechnik
OTH Regensburg
Regensburg, Deutschland
philipp.hohlfeld@st.oth-regensburg.de

Zusammenfassung—In den letzten Jahren hat Deep Reinforcement Learning (DRL), eine Kombination aus Deep Learning (DL) und Reinforcement Learning (RL), große Fortschritte gemacht. Neben den klassischen Gebieten der Bildverarbeitung und Spracherkennung findet es auch immer häufiger in Videospielen Verwendung. Dabei erreichen die DRL Algorithmen in ausgewählten Computerspielen bereits heute übermenschliches Spielniveau. In diesem Paper wird auf die Unterschiede von DL und RL eingegangen und die Fusion zu DRL dargelegt. Dabei wird sowohl die Entwicklung der Werte-orientierten als auch der Policy Gradient basierten Methoden aufgezeigt. Außerdem wird auf die Anwendung von DRL auf klassische Arcade-Spiele, Ego-Shooter und komplexe Echtzeit-Strategiespiele eingegangen. Also von simplen 2D- zu komplexen 3D-Spielen und von Singleplayer- zu Multiplayer-Spielen. Des Weiteren werden bestehende Herausforderungen aufgezeigt.

Index Terms—Reinforcement Learning, Deep Learning, Deep Reinforcement Learning, Künstliche Spielintelligenz, Computerspiele

I. EINLEITUNG

Zur Forschung an künstlicher Intelligenz bieten Computerspiele eine ideale Basis. Sie bieten mit klassischen Arcade-Spielen über Ego-Shooter bis hin zu Multiplayer-Spielen unterschiedlich komplexe Problemstellungen. Dabei ist die Umgebung, im Vergleich beispielsweise zur Forschung am autonomen Fahren, sicher und kontrollierbar. Außerdem lassen sich die Umgebungsbedingungen exakt duplizieren und es ist möglich die Algorithmen schneller als in Echtzeit lernen zu lassen. [1] Besonders Reinforcement Learning (RL) wird seit langer Zeit für die Entwicklung künstlicher Spielintelligenz verwendet. Die dabei verwendeten Eingangsparameter und Strategien sind aber häufig auf eine Spielumgebung spezialisiert und können nicht einfach auf andere übertragen werden. Fortschritte im Deep Learning (DL) im Bereich der Bildverarbeitung haben dazu geführt, dass nun Spielparameter direkt aus dem Bild extrahiert werden können [2], [3]. Die Kombination aus DL und RL, Deep Reinforcement Learning (DRL), schafft nun die Möglichkeit dem RL Algorithmus die selben Informationen zur Verfügung zu stellen, die ein Mensch bei Betrachtung des Computerbilds hat. Eine bekannte Anwendung von DRL ist die von DeepMind entwickelte künstliche Intelligenz AlphaGo [4], die bereits 2016 den besten menschlichen Go Spieler besiegte. Eine bekannte Anwendung in einem Computerspiel ist die Software Alpha-Star für das Spiel StarCraft2 [5], die im Jahr 2019 einen der besten menschlichen Spieler besiegen konnte. Dieses Paper stellt eine Literaturarbeit dar und soll einen Überblick über die Verwendung von Deep

Reinforcement Learning in Computerspielen liefern. Nach einer Einordnung der verwendeten Literatur in Abschnitt II werden die Ansätze des Deep Learning und Reinforcement Learning in Abschnitt III erläutert. Anschließend wird auf die Kombination zu Deep Reinforcement Learning in Abschnitt IV eingegangen und verschiedene Methoden vorgestellt. Danach wird in Abschnitt V auf die Verwendung von DRL in verschiedenen Computerspielen eingegangen. Abschließend werden in Abschnitt VI bestehende Herausforderungen aufgezeigt und das Paper in Abschnitt VII zusammengefasst.

II. LITERATURARBEIT

Für die Suche nach geeigneter Literatur wurden die Suchmaschinen Google Scholar, arXiv und IEEE Xplore verwendet. Es wurde eine Keywordsuche nach DL, RL und DRL durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass DL und RL ihren Ursprung bereits im 20. Jahrhundert haben. Die stabile Kombination zu Deep Reinforcement Learning wird allerdings erstmalig im Jahr 2013 im Paper von Mnih et. al. (2013) für sich beansprucht. In den nachfolgenden Jahren steigt die Anzahl an Veröffentlichungen über DRL, insbesondere auch speziell für das Gebiet der Computerspiele, stark an. Daher wird in dieser Arbeit hauptsächlich Literatur verwendet, die in den letzten 8 Jahren veröffentlicht worden ist.

III. HINTERGRUND

Im folgenden wird kurz auf die Unterschiede zwischen Deep Learning und Reinforcement Learning eingegangen.

A. Deep Learning

Deep Learning (tiefes Lernen) ist eine Methode des maschinellen Lernens (ML), bei der über künstliche neuronale Netze versucht wird, die Gehirnstruktur eines Menschen nachzubilden. Damit sollen Probleme die ein Mensch intuitiv lösen kann, sich aber nicht in feste mathematische Regeln fassen lassen, vom Computer gelöst werden können. Aktuelle Fortschritte im DL haben zu großen Verbesserungen in der computerbasierten Spracherkennung und Bildverarbeitung, insbesondere in den Bereichen der Bildklassifikation und Objekterkennung, geführt. Diese Fortschritte wurden hauptsächlich durch Supervised Learning (Überwachtes Lernen) mit Convolutional Neural Networks (CNNs, gefaltete neuronale Netzwerke) erreicht. [2], [3]

Während bei klassischen ML Ansätzen die zu untersuchenden Merkmale zuvor manuell festgelegt werden müssen,

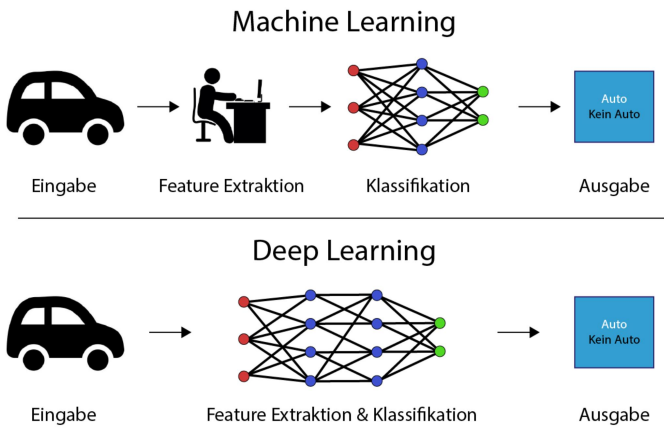


Abbildung 1. Unterschiede zwischen ML und DL in der Bildverarbeitung [6]

werden diese beim DL vom Algorithmus selbst herausgefunden (vgl. Abbildung 1). Dafür werden die Bild Rohdaten an eine Eingangsschicht des CNNs gegeben, die wichtigsten Merkmale über mehrere versteckte Zwischenschichten durch verschiedene Faltungsoperationen bestimmt und das Ergebnis in einer Ausgangsschicht ausgegeben. Die Verarbeitung der Daten in den versteckten Zwischenschichten stellt dabei eine Blackbox dar. Während die Ein- und Ausgangsdaten für den Menschen noch verständlich sind, können die Daten in der Blackbox nicht mehr interpretiert werden. Bei der Methode des überwachten Lernens wird das Ergebnis anschließend mit bereits bekannten Mustern verglichen, zugeordnet und benannt. Somit lassen sich alle wichtigen Bildinhalte identifizieren und klassifizieren. Sollte das Lernen unüberwacht ausgeführt werden, können ähnliche Ergebnisse lediglich gruppiert, aber nicht benannt werden. [3]

B. Reinforcement Learning

Beim Reinforcement Learning (Bestärkendes Lernen) lernt ein Agent die beste Strategie über Trial-and-Error. Durch die Interaktion mit der Umgebung kann RL dabei sehr gut für sequentielle Aufgaben eingesetzt werden. Der Agent wählt dafür eine bestimmte Aktion abhängig von einer Policy (Strategie) und dem Zustand in dem er sich gerade befindet. Die Umgebung führt die Aktion aus und gibt dem Agenten eine Belohnung zurück (vgl. Abbildung 2). Diese ist je nach Ergebnis der Aktion eine willkürlich gewählte positive oder negative Zahl. Falls das Ergebnis neutral war beträgt die Belohnung 0. Daraufhin wechselt die Umgebung in den nächsten Zustand und der Ablauf beginnt erneut bis das Spiel beendet ist. Ziel ist es eine maximale kumulierte Belohnung zu erreichen. [7]

Die mathematische Modellierung des Agenten geht dabei auf den Markov-Entscheidungsprozess zurück. Dabei sind der Folgezustand und die Belohnung nur vom aktuellen Zustand und der gewählten Aktion abhängig. Der Folgezustand und die Belohnung müssen dabei allerdings nicht eindeutig determiniert sein. Es wird also für jeden Zustand die Belohnung nach Ausführung einer bestimmten Aktion gespeichert. Dies

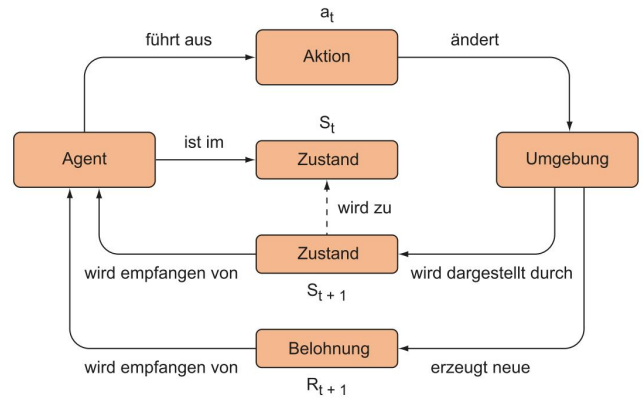


Abbildung 2. Reinforcement Learning Struktur [10]

entspricht einer Wahrscheinlichkeitsverteilung der Belohnung abhängig von der Aktion für alle Zustände. Die Strategie ordnet jeden Zustand eine bestimmte Aktion zu und bestimmt damit das Verhalten des Agenten. Bei deterministischen Strategien wird dabei die bestmögliche Aktion zugeordnet, während bei stochastischen Strategien versucht wird eine optimale Wahrscheinlichkeitsverteilung über allen möglichen Aktionen zu finden. [8]

Reinforcement Learning lässt sich dabei in off- und on-Policy Methoden unterscheiden. Beim off-Policy RL werden für die Auswahl der Aktion und das anschließende Lernen unterschiedliche Strategien verwendet. Beim on-Policy RL sind diese gleich. [9]

Weiterhin lässt sich RL in modellbasierte und modellfreie Methoden unterteilen. Das Modell bildet dabei die Darstellung des Agenten in der Umgebung ab. Modellbasierte Methoden haben den Vorteil einer kürzeren Trainingszeit. Der Nachteil ist allerdings, dass das Modell hinreichend genau sein muss und dies je nach Aufgabe sehr aufwändig ist. Sollte das Modell nicht genau genug sein wird die erreichbare Gesamtperformance entsprechend limitiert. Modellfreie Methoden dagegen können komplexe unbekannte Zusammenhänge selbst erlernen, benötigen allerdings eine höhere Trainingszeit. [9]

IV. DEEP REINFORCEMENT LEARNING

Die bisher verwendeten RL Ansätze verwenden zuvor festgelegte Signale, wie beispielsweise die Positionen der Spieler in einem Computerspiel, als Eingangsparameter. Diese können mittels Programmschnittstellen oder mittels manueller Feature Extraktion, wie beim klassischen ML, aus dem Spielbild erhalten werden. Dies funktioniert für einfache Spiele mit einer festen Anzahl möglicher Signale sehr gut. Wenn die Spiele allerdings komplexer werden und sich die Anzahl und Art der Signale dynamisch verändern können hängt die Performance des Systems stark von der Qualität der manuellen Feature Aufbereitung ab. Eine andere Möglichkeit wäre die Bildrohdaten direkt als Eingang des RL Algorithmus zu nutzen. Betrachtet man ein einfaches Atari 2600 Spiel mit einer reduzierten Auflösung von 84×84 Pixel und mit 256

Graustufen pro Pixel ergeben sich somit allerdings $256^{84 \times 84}$ mögliche Spielzustände. Dies übersteigt bereits die Anzahl der Atome im Universum und lässt sich somit nicht einmal für relativ einfache Spiele umsetzen. Verwendet man nun aber ein CNN mit einem DL Algorithmus um die Bilder zu klassifizieren und High-Level-Features, wie die Positionen der Spieler, zu erkennen, dann lassen sich die Ausgangsdaten des CNN als Eingangsparameter für den RL Algorithmus verwenden. Dadurch können auch unbekannte komplexe Probleme gelöst werden. [10]

Obwohl früher angenommen wurde [11], dass die Kombination aus RL und nichtlinearer Funktionsapproximation, wie bei CNNs, prinzipbedingt ein instabiles System ergeben, wurde 2013 gezeigt, dass das Problem dieser Kombination mit der Deep Q-Network (DQN, tiefes Q-Netzwerk) Architektur gelöst werden kann. Die Anwendung des DQN auf Atari 2600 Spiele hat die Funktionalität dieses Ansatzes bestätigt. [11]

Im folgenden werden die Grundideen ausgewählter DRL Methoden kurz dargelegt.

A. Werte-orientiertes DRL

Beim Werte-orientierten DRL mit der tiefen Q-Netzwerk Architektur wird eine Werte- oder Q-Funktion verwendet, um die möglichen Aktionen abhängig vom aktuellen Zustand zu bewerten. Diese Q-Funktion stellt die letzte Ebene des CNNs dar. Nach Ausführung einer Aktion kann im Folgezustand sofort und direkt die Bewertung der vorher gewählten Aktion angepasst werden, etwa weil die erhaltene Belohnung positiv war. Dabei werden alle vorangegangenen Aktionen und deren Bewertungen berücksichtigt. [11]

Die dadurch mögliche Überschätzung einzelner Aktionen wurde mit der Weiterentwicklung von DQN zu Double-DQN (DDQN) um 50% reduziert und die Performance im Mittel um 37% erhöht. [12]

Eine andere Weiterentwicklung ist das Least-Squares-DQN (LS-DQN), welches die Vorteile eines tiefen Q-Netzwerks mit der Stabilität der linearen Least-Squares-Methode (Kleinste-Quadrate-Schätzung) vereint. Unter der Annahme, dass die Q-Funktion als Kombination linearer Operationen beschrieben werden kann wird versucht die optimale Gewichtung der Parameter der letzten CNN Ebene mit der Kleinste-Quadrate-Schätzung zu optimieren. [13]

Der Ansatz des Deep Q-Learning from Demonstrations (DQfD), bei dem das DQN zuerst durch Beobachten des menschlichen Verhaltens trainiert wird, konnte die Anzahl benötigter Trainingsschritte enorm reduzieren. Um dieselbe Leistungsfähigkeit wie die DQfD Architektur zu erreichen muss eine Variante des Double-DQN im Durchschnitt zuerst 83 Millionen Trainingsschritte durchlaufen. [14]

Die Ape-X DQfD Methode wendet eine Bellman-Optimierung auf das DQfD an. Das Optimalitätsprinzip von Bellman besagt, dass sich jede Optimallösung aus optimalen Teillösungen zusammensetzt. Dies brachte die 6,4-fache Performance gegenüber dem DQfD. [15]

B. Policy Gradient basiertes DRL

Policy Gradient basierte Methoden versuchen die Parameter einer bereits vorhandenen (willkürlichen) Strategie durch Bildung des Gradienten so zu optimieren, dass das Ergebnis maximiert wird. Das bedeutet, dass die Auswahlwahrscheinlichkeit von den Aktionen, die eine große Belohnung versprechen, erhöht werden muss. Man spricht von einer weichen Anpassung der Parameter und kann damit stochastische Strategien mit dem Ziel der optimalen Wahrscheinlichkeitsverteilung finden. [8]

Die Actor-Critic (Akteur-Kritiker) Architektur basiert auf diesem Prinzip. Sie enthält zwei Komponenten. Eine die das Verhalten des Agenten steuert (Akteur) und eine welche die gewählte Aktion bewertet (Kritiker). Der Akteur erlernt somit die Strategie und der Kritiker lernt eine Werte-Funktion über die Strategie. Der Kritiker bewertet die Aktion als gut, wenn eine höhere als die erwartete Belohnung eingetreten ist und als schlecht, wenn diese niedriger war. Aufgrund dieser Bewertung passt der Akteur die Parameter seiner Strategie mit dem Policy Gradienten an. Das entscheidende Merkmal dieser Architektur ist, dass der Akteur keinen direkten Zugriff auf die Belohnung und der Kritiker keinen direkten Zugriff auf die Aktion hat. [8]

Während die Actor-Critic Architektur je ein neuronales Netzwerk für den Akteur und eines für den Kritiker mit einzelnen Ausgangsvektoren besitzt, verwendet die Advantage Actor-Critic (A2C) Architektur [16] ein gemeinsames neuronales Netzwerk mit zwei getrennten Ausgangsvektoren. [10]

Die Weiterentwicklung davon, Asynchronous A2C (A3C), ermöglicht es mehrere Agenten asynchron in ihrer eigenen Umgebung zu trainieren und damit die Trainingszeit bedeutend zu reduzieren. UNsupervised REinforcement and Auxiliary Learning (UNREAL) verwendet den Ansatz von A3C weiter, fügt aber eine Überwachung weiterer sekundärer Spielmerkmale hinzu, mit dem Ziel diese ebenfalls zu optimieren. Unter der Annahme, dass Änderungen im Bild oft mit bedeutenden Spielereignissen korreliert sind wurde dabei unter anderem "pixel control" [17] eingeführt. Dabei wird in einer separaten Strategie versucht die Aktion so zu wählen, dass bestimmte Pixelblöcke des Spielbildes maximal verändert werden. [17]

Eine weitere Actor-Critic Methode verwendet die Kronecker Approximation und das Trust Region Verfahren (ACKTR) zur Optimierung des Akteurs und Kritikers. [18]

V. EINSATZ IN COMPUTERSPIELEN

A. Atari-Spiele



Abbildung 3. Screenshots dreier Atari 2600 Spiele: v.l.n.r. Pong, Breakout, Space Invaders [19]

Um die Möglichkeit zu haben verschiedene allgemeine künstliche Intelligenz Ansätze zu vergleichen wurde die Arcade Learning Environment (ALE) entwickelt. Diese stellt hunderte von Atari 2600 Spielen bereit und erlaubt den direkten Zugriff auf das Bild und verschiedene Spielparameter, wie den aktuellen Spielstand. [20]

Die Performance von DQN auf Atari 2600 Spielen hat gezeigt, dass DRL der richtige Ansatz ist. Die Methode konnte die Ergebnisse aller vorherigen klassischen RL Ansätze übertreffen und erreichte je nach Spiel bereits übermenschliches Spielniveau [11]. Tabelle I zeigt die Performance von DQN und weiterentwickelten DRL Methoden im Vergleich zum menschlichen Durchschnittsspieler.

Tabelle I
MITTELWERT DER SPIELERGESBISSE VERSCHIEDENER DRL METHODEN
IN 42 ATARI-SPIELEN IM VERGLEICH ZUM MENSCHLICHEN
DURCHSCHNITT (100%)

Methode	Mittelwert	Jahr
DQN [11]	228%	2015
DQfD [15]	364%	2017
UNREAL [17]	915%	2016
Ape-X DQN [15]	1770%	2018
Ape-X DQfD [15]	2346%	2018

B. Ego-Shooter



Abbildung 4. Screenshot einer Spielszene in Doom [21]

Im Gegensatz zu Atari-Spielen ist bei Ego-Shootern nicht immer die ganze Umgebung bekannt, sondern nur der Bereich der eigenen Perspektive. Daher müssen Informationen die für das Spiel wichtig sind, aber aus der eigenen Perspektive verschwinden können, parallel gespeichert werden, um bei Bedarf wieder abgefragt werden zu können. Eine Methode ist dabei die von Parisotto et al. (2017) entwickelte Neural Map, mit derer ein 2D Abbild der Umgebung geschaffen und im Speicher bereitgehalten wird. Das Abbild passt seine Informationen dabei kontinuierlich an die Umgebung an. Für den Ego-Shooter Doom wurde die Testumgebung ViZDoom erstellt. Diese gibt dem DRL Agenten die selbe Egoperspektive wie sie ein Mensch haben würde. Der Agent muss sich dabei selbst durch ein Labyrinth bewegen und Gegner töten. Die ACKTR Methode wurde dabei erfolgreich von Shao et al. (2018) auf

das Spiel angewandt und übertrifft dabei die Tötungsrate der A2C Methode um 20%.

C. Echtzeit-Strategiespiele



Abbildung 5. Screenshot einer Spielszene aus StarCraft2 [22]

Die größte Herausforderung für DRL Methoden sind Echtzeit-Strategiespiele wie StarCraft2. Der Agent muss dabei nicht nur Feinde ausschalten, sondern auch lernen mit anderen zusammenzuarbeiten und eine langfristige Spielstrategie entwickeln. Erste Erfolge auf einfachem Spiellevel wurden von Vinyals et al. (2017) mit einer Erweiterung der A2C Architektur erreicht. Bessere Ergebnisse erreichten Sun et al. (2018) mit Ihrem TStarBot2. Dieser schafft es den integrierten Gegner auf allen Spielleveln und menschliche Spieler auf mittlerem (Platinum 1) Level zu besiegen. Die aktuell beste Methode entwickelte DeepMind mit AlphaStar, ein off-Policy Actor-Critic Algorithmus. Dieser besiegt selbst die besten menschlichen Spieler auf dem höchsten (Grandmaster) Level [5].

VI. BESTEHENDE HERAUSFORDERUNGEN

Trotz großer Fortschritte in den letzten Jahren bestehen noch immer einige Herausforderungen beim DRL. Dazu gehören:

- Nutzung bereits in Spiel A erlernter, allgemeiner, Verhaltensweisen für Spiel B
 - Speichereffizientes Erlernen der gesamten Umgebung aus der Egoperspektive
 - Verzögerte Belohnung des RL Agenten
- [1]

VII. ZUSAMMENFASSUNG UND DISKUSSION

Die Verwendung von Deep Reinforcement Learning für künstliche Spielintelligenz ist ein herausforderndes Forschungsfeld und scheint der richtige Ansatz zu sein, um menschliches Lernen und Handeln nachzubilden. In diesem Paper wurden die Unterschiede zwischen RL und DL dargestellt und die Fusion zu DRL beschrieben. Außerdem wurden verschiedene DRL Methoden vorgestellt und deren Einsatz in verschiedenen Computerspielen aufgezeigt. Um künstliche Spielintelligenz noch näher an das menschliche Handeln heranzuführen müssen die bestehenden DRL Ansätze weiter erforscht werden.

LITERATUR

- [1] G. N. Yannakakis and J. Togelius, *Artificial intelligence and games*. Cham, Switzerland: Springer, 2018. [Online]. Available: <http://www.springer.com/>
- [2] D. Ciresan, U. Meier, and J. Schmidhuber, "Multi-column deep neural networks for image classification," in *2012 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2012)*. Piscataway, NJ: IEEE, 2012, pp. 3642–3649.
- [3] A. Krizhevsky, I. Sutskever, and G. E. Hinton, "Imagenet classification with deep convolutional neural networks," *Communications of the ACM*, vol. 60, no. 6, pp. 84–90, 2017.
- [4] D. Silver, J. Schrittwieser, K. Simonyan, I. Antonoglou, A. Huang, A. Guez, T. Hubert, L. Baker, M. Lai, A. Bolton, Y. Chen, T. Lillicrap, F. Hui, L. Sifre, G. van den Driessche, T. Graepel, and D. Hassabis, "Mastering the game of go without human knowledge," *Nature*, vol. 550, no. 7676, pp. 354–359, 2017.
- [5] O. Vinyals, I. Babuschkin, W. M. Czarnecki, M. Mathieu, A. Dudzik, J. Chung, D. H. Choi, R. Powell, T. Ewalds, P. Georgiev, J. Oh, D. Horgan, M. Kroiss, I. Danihelka, A. Huang, L. Sifre, T. Cai, J. P. Agapiou, M. Jaderberg, A. S. Vezhnevets, R. Leblond, T. Pohlen, V. Dalibard, D. Budden, Y. Sulsky, J. Molloy, T. L. Paine, C. Gulcehre, Z. Wang, T. Pfaff, Y. Wu, R. Ring, D. Yogatama, D. Wünsch, K. McKinney, O. Smith, T. Schaul, T. Lillicrap, K. Kavukcuoglu, D. Hassabis, C. Apps, and D. Silver, "Grandmaster level in starcraft ii using multi-agent reinforcement learning," *Nature*, vol. 575, no. 7782, pp. 350–354, 2019.
- [6] L. Wuttke, "Deep learning: Einführung, Beispiele & Frameworks," 2020. [Online]. Available: <https://datasolut.com/was-ist-deep-learning/>
- [7] R. S. Sutton and A. Barto, *Reinforcement learning: An introduction*, second edition ed., ser. Adaptive computation and machine learning. Cambridge, MA and London: The MIT Press, 2018.
- [8] U. Lorenz, *Reinforcement Learning: Aktuelle Ansätze verstehen - mit Beispielen in Java und Greenfoot*, 1st ed. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2020.
- [9] Y. Li, "Deep reinforcement learning: An overview," 2017. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1701.07274>
- [10] A. Zai and B. Brown, *Einstieg in Deep Reinforcement Learning: KI-Agenten mit Python und PyTorch programmieren*, 2020.
- [11] V. Mnih, K. Kavukcuoglu, D. Silver, A. A. Rusu, J. Veness, M. G. Bellemare, A. Graves, M. Riedmiller, A. K. Fidjeland, G. Ostrovski, S. Petersen, C. Beattie, A. Sadik, I. Antonoglou, H. King, D. Kumaran, D. Wierstra, S. Legg, and D. Hassabis, "Human-level control through deep reinforcement learning," *Nature*, vol. 518, no. 7540, pp. 529–533, 2015.
- [12] H. van Hasselt, A. Guez, and D. Silver, "Deep reinforcement learning with double q-learning," in *Proceedings of the Thirtieth AAAI Conference on Artificial Intelligence*, AAAI Press, Ed., 2016, pp. 2094–2100. [Online]. Available: <https://arxiv.org/pdf/1509.06461>
- [13] N. Levine, T. Zahavy, D. Mankowitz, A. Tamar, and S. Mannor, "Shallow updates for deep reinforcement learning," in *Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems*, ser. NIPS'17, Curran Associates Inc, Ed., 2017, pp. 3138–3148.
- [14] T. Hester, M. Vecerik, O. Pietquin, M. Lanctot, T. Schaul, B. Piot, D. Horgan, J. Quan, A. Sendonaris, G. Dulac-Arnold, I. Osband, J. Agapiou, J. Z. Leibo, and A. Gruslys, "Deep q-learning from demonstrations," in *Thirty-Second AAAI Conference on Artificial Intelligence*, Association for the Advancement of Artificial, Ed., 2018, pp. 3223–3230. [Online]. Available: <https://arxiv.org/pdf/1704.03732>
- [15] T. Pohlen, B. Piot, T. Hester, M. G. Azar, D. Horgan, D. Budden, G. Barth-Maron, H. van Hasselt, J. Quan, M. Večerik, M. Hessel, R. Munos, and O. Pietquin, "Observe and look further: Achieving consistent performance on atari," 2018. [Online]. Available: <https://arxiv.org/pdf/1805.11593>
- [16] V. Mnih, A. P. Badia, M. Mirza, A. Graves, T. P. Lillicrap, T. Harley, D. Silver, and K. Kavukcuoglu, "Asynchronous methods for deep reinforcement learning," in *Proceedings of the 33rd International Conference on Machine Learning - Volume 48*, JMLR.org, Ed., 2016, pp. 1928–1937. [Online]. Available: <https://arxiv.org/pdf/1602.01783>
- [17] M. Jaderberg, V. Mnih, W. M. Czarnecki, T. Schaul, J. Z. Leibo, D. Silver, and K. Kavukcuoglu, "Reinforcement learning with unsupervised auxiliary tasks," 2016. [Online]. Available: <https://arxiv.org/pdf/1611.05397>
- [18] Y. Wu, E. Mansimov, S. Liao, R. Grosse, and J. Ba, "Scalable trust-region method for deep reinforcement learning using kronecker-factored approximation," in *Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems*, ser. NIPS'17, Curran Associates Inc, Ed., 2017, pp. 5285–5294. [Online]. Available: <https://arxiv.org/pdf/1708.05144>
- [19] V. Mnih, K. Kavukcuoglu, D. Silver, A. Graves, I. Antonoglou, D. Wierstra, and M. Riedmiller, "Playing atari with deep reinforcement learning," 2013. [Online]. Available: <http://arxiv.org/pdf/1312.5602v1>
- [20] M. G. Bellemare, Y. Naddaf, J. Veness, and M. Bowling, "The arcade learning environment: An evaluation platform for general agents," *Journal of Artificial Intelligence Research*, vol. 47, pp. 253–279, 2013. [Online]. Available: <https://jair.org/index.php/jair/article/view/10819>
- [21] K. Shao, D. Zhao, N. Li, and Y. Zhu, "Learning battles in vizdoom via deep reinforcement learning," in *Proceedings of the 2018 IEEE Conference on Computational Intelligence and Games (CIG'18)*, C. Browne, Ed. Piscataway, NJ: IEEE, 2018, pp. 1–4.
- [22] P. Sun, X. Sun, L. Han, J. Xiong, Q. Wang, B. Li, Y. Zheng, J. Liu, Y. Liu, H. Liu, and T. Zhang, "Tstarbots: Defeating the cheating level builtin ai in starcraft ii in the full game," 2018. [Online]. Available: <https://arxiv.org/pdf/1809.07193>

GaN und SiC in der Leistungselektronik: Chancen und Herausforderungen

Kevin Böhm
Master Elektro- und Informationstechnik
OTH Regensburg
Regensburg, Deutschland
kevin1.boehm@st.oth-regensburg.de

Abstract— Die in der aktuellen Leistungselektronik verwendeten Leistungshalbleiter aus Silizium stoßen auf Grund der physikalischen Eigenschaften an ihre Grenzen der elektrischen und thermischen Belastbarkeit. Daher werden neue Halbleiter benötigt, welche für die gestiegenen Anforderungen ausgelegt sind. Diese sind die sogenannten „Wide band gap“ (WBG) Halbleiter, wie Siliziumcarbid (SiC) und Galliumnitrid (GaN).

Ihre Vorteile gegenüber herkömmlichen Halbleitern aus Silizium (Si) bestehen in ihrer größeren Bandlücke, ihrer besseren thermischen Leitfähigkeit und der besseren Elektronenbeweglichkeit. Diese Vorteile ermöglichen schnellere Schaltgeschwindigkeiten und eine Reduktion der Verluste in modernen Leistungselektroniken. SiC und GaN weisen unterschiedliche Eigenschaften auf. Aufgrund dessen werden Halbleiter aus SiC vorrangig für Anwendungen mit hohen Leistungen verwendet. Halbleiter aus GaN kommen hingegen in der Hochfrequenztechnik zum Einsatz. Die verbesserten Eigenschaften dieser WBG-Halbleiter im Vergleich zu herkömmlichen Si-Bauelementen ermöglichen eine Verbesserung des Wirkungsgrades, der thermischen Anbindung und aufgrund der höheren Leistungsdichte eine Einsparung des Bauraumes. Hierdurch kann es zukünftig zu Kosteneinsparung kommen. Dies kann aber nur funktionieren, wenn die Kosten für den Herstellungsprozess von Bauelementen aus SiC und GaN gesenkt werden können, da dieser sehr aufwendig und weniger ergiebig ist als der vergleichbare Herstellungsprozess von Si-Bauelementen.

Ein Nachteil der WBG-Halbleiter besteht darin, dass es aufgrund der schnellen Schaltgeschwindigkeiten zu erhöhter Ausendung von elektromagnetischen Wellen, Strom- und Spannungsüberschwingern beim Schalten der Bauelemente kommt. Hierdurch können Fehler auftreten, die bis hin zur Zerstörung der Bauelemente oder angeschlossener Lasten führen. Diese Arbeit soll die Vorteile, aber auch die Herausforderungen durch den Einsatz von SiC und GaN in moderner Leistungselektronik aufzeigen.

Keywords—*Leistungselektronik, power electronic, Siliziumcarbid, silicon carbide, SiC, Galliumnitrid, gallium nitride, GaN*

I. EINLEITUNG

Wenn von Leistungselektronik die Rede ist, zieht man meist zuerst den Bereich der Elektromobilität in Betracht. Jedoch ist Leistungselektronik nur ein Oberbegriff für die Umformung von elektrischer Energie mit Hilfe schaltender Bauelemente. Sei es in Form eines DC/DC-Wandlers, welcher Gleichspannungen auf verschiedene Spannungsniveaus transformieren kann, DC/AC-Wandlers, welcher aus einer Gleichspannung eine Wechselspannung generiert oder in Verstärkerschaltungen. Daher ist der Einsatzbereich von Leistungselektronik auch so vielfältig, von Spannungswandlern mit wenigen

Watt an Leistung, in Handys beispielsweise, bis hin zu mehreren Kilowatt, in Netzwechselrichtern für die Stromnetze. [1,2]

Um die Effizienz der Leistungselektronik weiter steigern zu können, werden neue Halbleitermaterialien benötigt, denn Halbleiter aus Silizium (Si) stoßen an die Grenzen ihrer elektrischen Eigenschaften, weshalb eine Optimierung von Leistungselektronik mit Si kaum noch möglich ist. Bei diesen neuen Halbleitermaterialien handelt es sich um die sogenannten WBG-Halbleiter (Wide band gap) aus Siliziumcarbid (SiC) und Galliumnitrid (GaN). Diese WBG-Halbleiter haben eine größere Bandlücke wodurch höhere Betriebstemperaturen möglich sind. Denn je größer die Bandlücke, desto mehr thermische Energie ist notwendig, damit Elektronen aus dem Valenzband in das Leitungsband springen können. Weiterhin besitzen WBG-Halbleiter eine höhere kritische elektrische Feldstärke, was für eine höhere Spannungsfestigkeit sorgt [3,4]. Durch diese Eigenschaften ist es möglich, die Baugröße der Halbleiter deutlich zu verkleinern, wodurch die Bauteile eine geringere Kapazität aufweisen und somit eine Erhöhung der Schaltgeschwindigkeit ermöglicht wird. Durch schnelleres Schalten können externen Bauteile wie Kondensatoren und Spulen deutlich verkleinert und Verluste um bis zu 70 % reduziert werden [5]. Weiterhin besitzen WBG-Halbleiter einen deutlich geringeren thermischen Widerstand, was ein besseres Abführen der Wärme zur Folge hat. Hierdurch kann die Anforderungen an die Kühlung deutlich verringert werden [6]. Tabelle 1 und Abbildung 1 zeigen eine Übersicht mit den Materialeigenschaften der verschiedenen Halbleitermaterialien.

Tabelle 1 Vergleich der Halbleiterparameter [7]

Parameter	Einheit	Si	SiC	GaN
Bandlücke	eV	1.1	3.27	3.4
Elektronenbeweglichkeit	cm ² /Vs	1400	900	2000
Durchbruchspannung	MV/cm	0.3	3.0	2.5
Thermische Leitfähigkeit	W/(cm * K)	1.3	4.9	1.5

Bei der Untersuchung der WBG-Halbleiter muss ein besonderes Augenmerk auf die auftretenden Probleme gelegt werden. Eines dieser sind die parasitären Elemente bei erhöhter Schaltgeschwindigkeit, wie Induktivitäten und Kapazitäten. Dabei handelt es sich zum einen um die Streuinduktivität, welche durch die, von der Schaltung aufgespannte Leerschleife hervorgerufen wird. Zum anderen um die Bauteilkapazität des Transistors, wie beispielsweise die Sperrschichtkapazität. Diese parasitären Elemente verursachen Oszillationen beim Schalten der Halbleiter und führen zu erhöhter Aussen-

derung von elektromagnetischen Störungen (EMV) [8]. Weiterhin verursachen diese ein Überschwingen des Laststromes beim Einschalten und ein Überschwingen der Spannung beim Ausschalten [5].

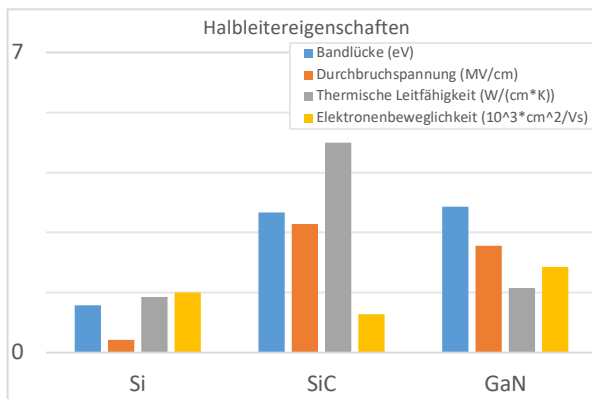


Abbildung 1 Halbleitereigenschaften von Si, SiC und GaN [3].

Die hier vorliegende Arbeit stellt eine Zusammenfassung aktueller Literatur dar und soll einen Überblick über die Vorteile der neuen WBG-Halbleiter im Vergleich mit Halbleitern aus Si geben, aber auch die Probleme aufzeigen, welche den Einsatz aktuell noch erschweren. Kapitel II beschreibt die Einsatzgebiete von SiC-Halbleitern, ihre Vorteile gegenüber Si-Halbleitern und die noch zu meistern Probleme. In Kapitel III wird dies ebenfalls für GaN-Halbleiter dargestellt. Das letzte Kapitel IV beinhaltet die Schlussfolgerung dieser Arbeit.

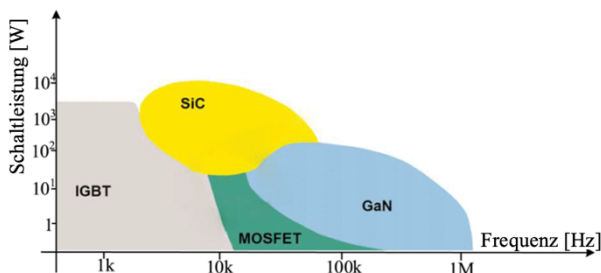


Abbildung 2 Darstellung der frequenzabhängigen Leistung [9].

II. LEISTUNGSELEKTRONIK MIT SiC

SiC als Halbleitermaterial ist bereits seit den 1980ern bekannt, jedoch ist der Herstellungsprozess erst seit wenigen Jahren wirtschaftlich rentabel [3]. Unter [2] wird exemplarisch auf die Herstellung eines SiC-IGBT (Insulated-Gate Bipolar Transistor) eingegangen. Es zeigt einige Herausforderungen in der Herstellung von SiC-Halbleitern auf.

A. Einsatzgebiete von SiC in der Leistungselektronik

SiC-Halbleiter werden in der Leistungselektronik als Dioden, Bipolar-Transistoren (BJT), Metall-Oxid-Feldeffekt-Transistoren (MOSFET) und als IGBT eingesetzt. Durch diese große Bandbreite an Bauteilen besteht eine Vielzahl von Einsatzmöglichkeiten. Die in [6] aufgeführten Beispiele zeigen die Einsatzmöglichkeiten als Buck-Converter, Boost-Converter, Halb- und Vollbrückenschaltung. Vor allem finden SiC-Halbleiter ihren Einsatz in Anwendungen für Elektromotoren für industrielle Anwendungen und in der Elektromobilität. [4,6,7,10]

In Abbildung 2 ist die frequenzabhängige Leistung verschiedener Halbleitermaterialien dargestellt. Der Vergleich zeigt, dass SiC-Halbleiter eine höhere Schaltleistung besitzen

als die vergleichbaren Si-IGBTs, Si-MOSFETs und GaN-Halbleiter. Dadurch sind Halbleiter aus SiC für den Einsatz bei hohen Schaltleistungen prädestiniert.

B. Vorteile von Leistungselektronik mit SiC gegenüber Si

Unter [7] werden die Vorteile von SiC-MOSFETs gegenüber Si-IGBTs, bei gleicher Leistungsklasse, sehr gut herausgearbeitet. Diese Vorteile sind:

- SiC-MOSFETs können aufgrund des fehlenden Tailstromes schneller schalten als vergleichbare Si-IGBTs. Der Tailstrom ist in Abbildung 4 (b) eingezeichnet. Ein Tailstrom entsteht nur bei IGBTs, hierdurch werden beim Abschalten die restlichen Ladungen ausgeräumt.
- Die höhere Schaltfrequenz von SiC-MOSFETs von bis zu 100 kHz im Vergleich zu 20 kHz bei Si-IGBTs ermöglicht eine Reduktion der passiven Filterkomponenten. Dies führt zu einer Größen- und Gewichtsreduktion der Gesamtschaltung.
- SiC-MOSFETs weisen deutlich geringere Schaltverluste auf als Si-IGBTs.
- SiC-Halbleiter weisen eine größere Bandlücke, höhere elektrische Durchbruchfeldstärke und thermische Leitfähigkeit auf als Si-Halbleiter.
- Die Sperrschichttemperatur von SiC-MOSFETs kann bis zu 300°C betragen, wohingegen Si-IGBTs bei 150°C limitiert sind. Das führt zu einer Verringerung der benötigten Kühlung der Bauteile.

Ein Beispiel für den Vorteil von SiC liefert [10], hierbei werden die Si-IGBTs einer Leistungselektronik für ein Elektrofahrzeug lediglich durch SiC-MOSFETs ersetzt, ohne weitere Änderungen. Alleine diese Änderung führt bereits zu einer Reduktion der verbrauchten Leistung von 3 % bei Überlandfahrten und von 6 % bei Stadtfahrten.

C. Herausforderung im Einsatz von SiC

Beim Einsatz von SiC-Halbleitern treten jedoch einige Probleme auf, welchen besondere Beachtung geschenkt werden muss. Diese sind:

- Bei hohen Schaltgeschwindigkeiten werden durch die parasitären Elemente EMV-Probleme hervorgerufen. [7]
- Starker Einfluss des Gate-Widerstandes auf die Verluste. Je höher der Gate-Widerstand, desto langsamer kann abgeschaltet werden, was zu einer Erhöhung der Schaltverluste führt. [7,11]
- Deutlich höhere Kosten als vergleichbare Bauelemente aus Si. [7]

Die durch die parasitären Elemente auftretenden Störungen sind eines der Hauptprobleme beim Einsatz von SiC. Die dadurch entstehenden Oszillationen können zu einem ungewollten Wiedereinschalten des Bauelements führen. Weiterhin kann es durch die Oszillationen beim Ein- und Ausschalten zu Überschwingern des Stromes und der Spannung kommen, welche bis über den erlaubten Bereich gehen und so Schädigungen bis hin zur Zerstörung des Bauteils hervorrufen. Abbildung 3 zeigt das Schaltverhalten eines SiC-MOSFETs. Es ist deutlich das Schwingverhalten zu erkennen, sowie der Stromüberschwinger beim Einschalten und der Spannungsüberschwinger beim Ausschalten. Im Vergleich dazu ist

in Abbildung 4 das Schaltverhalten eines Si-IGBTs dargestellt. Daher ist es besonders wichtig die parasitären Elemente der gesamten Schaltung zu kennen und nach Möglichkeit so klein wie möglich zu halten. Weiterhin entstehen durch die erhöhte Schaltfrequenz zusätzliche Verluste in den angeschlossenen Induktivitäten. [3,5]

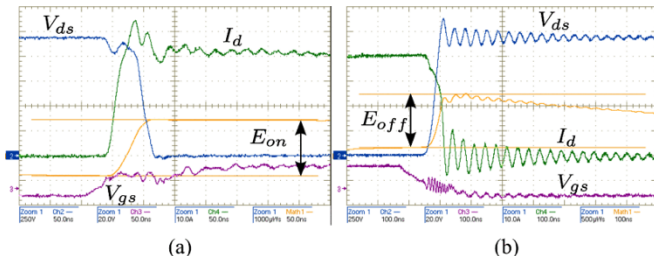


Abbildung 3 Schaltverhalten eines SiC-MOSFETs: (a) Einschalten; (b) Ausschalten. Drain-Source-Spannung V_{ds} , Gate-Source-Spannung V_{gs} , Drainstrom I_d , Einschaltenergie E_{on} , Ausschaltenergie E_{off} . [12]

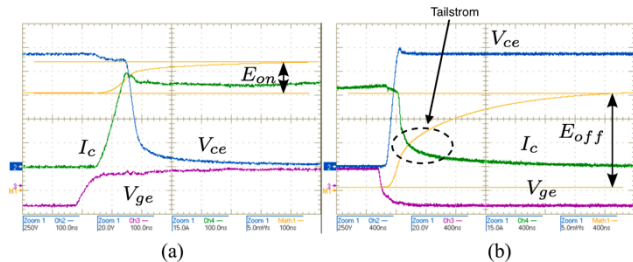


Abbildung 4 Schaltverhalten eines Si-IGBT: (a) Einschalten; (b) Ausschalten. Kollektor-Emitter-Spannung V_{ce} , Gate-Emitter-Spannung V_{ge} , Kollektorstrom I_c , Einschaltenergie E_{on} , Ausschaltenergie E_{off} . [12]

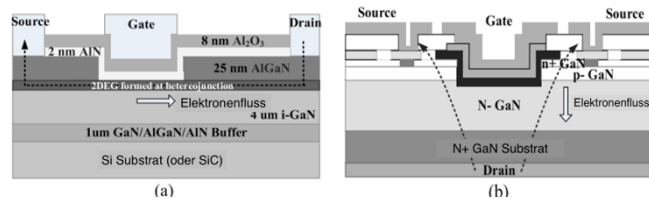


Abbildung 5 Aufbau von GaN-Bauelementen: (a) laterales GaN auf Si-Trägermaterial; (b) vertikaler Aufbau GaN-Trägermaterial [13].

III. LEISTUNGSELEKTRONIK MIT GAN

Halbleiter aus GaN sind einer der neusten Werkstoffe in der Halbleitertechnik. Erst im Jahre 2000 wurden erste Halbleiter unter der Verwendung von GaN hergestellt. GaN-Halbleiter werden meistens als laterale Bauelemente auf einem Trägermaterial, meist Si, hergestellt, wie in Abbildung 5 (a) zu sehen. Die Herstellung mit einem reinen GaN-Substrat ist auch möglich und in Abbildung 5 (b) dargestellt. Die Herstellung ist jedoch noch sehr teuer und aufgrund der nötigen Materialbearbeitung schwierig. Wie bereits in Abbildung 2 zu sehen ist, sind Halbleiter aus GaN besonders für Hochfrequenzanwendungen geeignet. Dies liegt vor allem an der sehr kleinen Sperrschichtkapazität. [13]

Im Vergleich mit SiC besitzen Halbleiter aus GaN eine deutlich höhere Elektronenbeweglichkeit, was diese zusätzlich für Hochfrequenzanwendungen prädestiniert. Weiterhin sind die Schaltverluste von GaN ca. dreimal niedriger als bei SiC, für Anwendungen unterhalb von 1200 V. Ein weiteres Beispiel für den Vergleich eines GaN JFETs (junction field effect transistor) und eines SiC JFETs ist in [14] zu finden. Jedoch ist die thermische Leitfähigkeit von GaN niedriger als von SiC,

weshalb SiC bei Anwendungen mit großen Leistungen den Vorzug erhält. [7,9]

A. Einsatzgebiete von GaN in der Leistungselektronik

Halbleiter aus GaN werden als Dioden, HEMT (high electron mobility transistor) und MOSFET hergestellt. HEMTs ermöglichen eine gute Stromtragfähigkeit. MOSFETs hingegen werden, aufgrund des anderen Aufbaus der Gate-Elektrode, für Anwendungen mit hohen Spannungen eingesetzt. [13]

Hauptsächlich kommen Halbleiter aus GaN in Hochfrequenzanwendungen zum Einsatz. In [1] und [13] werden Verstärkerschaltungen für den Frequenzbereich von 15 – 34 GHz bzw. 26 – 40 GHz beschrieben. Weiterhin kommen GaN-Halbleiter für Anwendungen im mittleren Strom- und Spannungsbereich zum Einsatz, z.B. für LED-Treiber, DC-DC-Wandler für Datenzentren, DC-AC-Wandler in der Photovoltaik und auch in Motoranwendungen [16]. Weitere Einsatzbereiche sind die Telekommunikation, militärische Anwendungen und Satellitenkommunikation [9].

B. Vorteile von Leistungselektronik mit GaN gegenüber Si

Vergleicht man Halbleiter aus GaN mit Halbleitern aus Si so ergeben sich einige Vorteile aufgrund der Materialeigenschaften. Diese werden in [13] und [17] beschrieben und lassen sich zusammenfassen:

- Eine um ca. 3,1-mal größere Bandlücke von GaN gegenüber Si. Dies hat eine um ca. 10-mal höhere kritische elektrische Feldstärke, von bis zu 3,3 MV/cm im Gegensatz zu 0,4 MV/cm bei Si, zur Folge. Dies ermöglicht eine Verkleinerung der Bauteile.
- Eine um ca. 2,7-mal höhere Elektronensättigungsgeschwindigkeit, was zu einer Reduktion der Durchlasswiderstandes und geringen Durchlassverlusten führt.
- Eine kleine Sperrschichtkapazität, was eine Erhöhung der Schaltfrequenz ermöglicht.

In [9] wird mit Hilfe eines 300 W, 1 MHz Schaltwandler auf den Vorteil in der Verwendung von GaN eingegangen. Hierbei ist eine Reduktion der Verluste um 24,8 % möglich. Ein weiteres Beispiel ist in [17] aufgeführt, hier wird ein 12 – 1,8 V DC-DC-Wandler untersucht. Hierbei kann die Schaltfrequenz auf 3 MHz erhöht werden, was weit außerhalb der maximalen Schaltfrequenz von Si liegt, dies führt zu einer Reduktion der Bauteilgröße von bis zu 60 %.

C. Herausforderung im Einsatz von GaN

Da es sich bei GaN um einen noch relativ neuen Werkstoff handelt, gibt es noch einige Bereiche denen noch besondere Beachtung geschenkt werden muss:

- Für laterale Transistoren wird immer ein Substratmaterial benötigt. Dieses Trägermaterial beeinflusst die elektrischen Eigenschaften des Bauteils. [4,12]
- Die Herstellung vertikaler Transistoren ist sehr teuer und aufgrund der Materialeigenschaften von GaN schwierig. [13]
- GaN HEMTs benötigen einen zusätzlichen Si-MOSFET, da GaN-HEMTs nur als „normally-on“ Transistoren gefertigt werden können. [13]
- Bei GaN HEMTs kann es zu einem sog. „current collapse“ kommen. Hierbei geht die statische Stromkennlinie in eine dynamische Kennlinie über. Dies führt zu

einer Erhöhung des Durchlasswiderstandes. Es gibt mehrere Gründe für den „current collapse“, diese können [13] entnommen werden.

- GaN-MOSFETs weisen eine geringe Kanalbeweglichkeit auf. Was einen höheren Durchlasswiderstand zur Folge hat.[4,13]
- Durch den als vertikalen Transistor bedingten Aufbau und das Trägermaterial ist die Durchbruchsspannung limitiert. Für zukünftige Anwendungen muss diese jedoch erhöht werden, um die Einsatzmöglichkeiten zu erweitern. [4]
- Aufgrund der höheren Schaltgeschwindigkeit ist der Einfluss parasitärer Elemente sehr groß. Dieser erhöht die Verluste oder führt zu einer Reduktion der Schaltfrequenz. [9,15]
- 2-3-fach höhere Kosten im Vergleich zu Si-Bauelementen. [16]

IV. SCHLUSSFOLGERUNG

WBG-Halbleiter bieten viele Vorteile gegenüber Si-Halbleitern, daher wird es zu einem vermehrten Einsatz von WBG-Halbleitern kommen. Vorausgesetzt, die Kosten-Nutzenrechnung für die jeweilige Anwendung verbessert sich und die auftretenden negativen Effekte werden auf ein akzeptables Niveau reduziert. Auf lange Sicht kann GaN auch SiC aus dem Bereich der Motoranwendungen mit mittleren Leistungen verdrängen, wenn die Kühlung nicht das ausschlaggebende Kriterium ist und die Entwicklung von vertikalen GaN-Halbleitern verbessert wird. Aufgrund der deutlich besseren thermischen Leitfähigkeit werden SiC-Halbleiter zukünftig vorrangig in Anwendungen mit sehr hohen Leistungen oder in Anwendungen mit hoher Leistungsdichte zum Einsatz kommen.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] S. Zhang, P. Zheng, J. Xu, R. Wang, Y. Huang, and X. Tong, "A 15 - 34 GHz Robust GaN based Low-Noise Amplifier with 0.8dB Minimum Noise Figure," *17th IEEE Int. New Circuits Syst. Conf. NEWCAS 2019*, pp. 6–9, 2019, doi: 10.1109/NEWCAS44328.2019.8961287.
- [2] L. Han, L. Liang, Y. Kang, and Y. Qiu, "A Review of SiC IGBT: Models, Fabrications, Characteristics, and Applications," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 36, no. 2, pp. 2080–2093, 2021, doi: 10.1109/TPEL.2020.3005940.
- [3] X. Yuan, I. D. Laird, and S. Walder, "Opportunities, Challenges and Potential Solutions in the Application of Fast-Switching Silicon Carbide (SiC) Power Devices and Converters," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 8993, no. c, pp. 1–1, 2020, doi: 10.1109/tpel.2020.3024862.
- [4] I. C. Kizilyalli, Y. Xu, E. Carlson, J. Manser, and D. W. Cunningham, "Current and future directions in power electronic devices and circuits based on wide band-gap semiconductors," *2017 IEEE 5th Work. Wide Bandgap Power Devices Appl. WiPDA 2017*, vol. 2017-Decem, pp. 417–425, 2017, doi: 10.1109/WiPDA.2017.8170583.
- [5] I. Aretxabaleta, I. M. De Alegria, J. I. Garate, A. Matallana, and J. Andreu, "Wide-Bandgap Semiconductor HF-Oscillation Attenuation Method with Tuned Gate RLC Filter," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 35, no. 8, pp. 8025–8033, 2020, doi: 10.1109/TPEL.2020.2964272.
- [6] R. Adappa, K. Suryanarayana, H. Swathi Hatwar, and M. Ravikiran Rao, "Review of SiC based Power Semiconductor Devices and their Applications," *2019 2nd Int. Conf. Intell. Comput. Instrum. Control Technol. ICICICT 2019*, pp. 1197–1202, 2019, doi: 10.1109/ICICICT46008.2019.8993255.
- [7] A. Ghazanfari, C. Perreault, and K. Zaghbi, "EV/HEV Industry Trends of Wide-bandgap Power Semiconductor Devices for Power Electronics Converters," *IEEE Int. Symp. Ind. Electron.*, vol. 2019-June, pp. 1917–1923, 2019, doi: 10.1109/ISIE.2019.8781528.
- [8] A. N. Lemmon, A. D. Brovont, C. D. New, B. W. Nelson, and B. T. Deboi, "Modeling and Validation of Common-Mode Emissions in Wide Bandgap-Based Converter Structures," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 35, no. 8, pp. 8034–8049, 2020, doi: 10.1109/TPEL.2019.2963883.
- [9] Y. Wang, O. Lucia, Z. Zhang, S. Gao, Y. Guan, and D. Xu, "A Review of High Frequency Power Converters and Related Technologies," *IEEE Open J. Ind. Electron. Soc.*, vol. 1, no. October, pp. 247–260, 2020, doi: 10.1109/ojies.2020.3023691.
- [10] A. Nisch *et al.*, "Simulation and Measurement-Based Analysis of Efficiency Improvement of SiC MOSFETs in a Series-Production Ready 300 kW / 400 V Automotive Traction Inverter," p. P.1-P.10, 2020, doi: 10.23919/epe20ecceurope43536.2020.9215765.
- [11] D. Johannesson, M. Nawaz, S. Norrga, A. Hallen, and H.-P. Nee, "Static and Dynamic Performance Prediction of Ultra-High-Voltage Silicon Carbide Insulated-Gate Bipolar Transistors," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 8993, no. c, pp. 1–1, 2020, doi: 10.1109/tpel.2020.3027370.
- [12] S. Hazra *et al.*, "High Switching Performance of 1700-V, 50-A SiC Power MOSFET over Si IGBT/BiMOSFET for Advanced Power Conversion Applications," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 31, no. 7, pp. 4742–4754, 2016, doi: 10.1109/TPEL.2015.2432012.
- [13] X. Ding, Y. Zhou, and J. Cheng, "A review of gallium nitride power device and its applications in motor drive," *CES Trans. Electr. Mach. Syst.*, vol. 3, no. 1, pp. 54–64, 2019, doi: 10.30941/cestems.2019.00008.
- [14] D. Ji, W. Li, and S. Chowdhury, "Potential of GaN vertical JFETs presented through a comprehensive discussion of dynamic performance compared to SiC JFETs," *WiPDA 2016 - 4th IEEE Work. Wide Bandgap Power Devices Appl.*, pp. 114–117, 2016, doi: 10.1109/WiPDA.2016.7799920.
- [15] H. Q. Tao, B. Zhang, Q. Zhou, and J. Da Yan, "Design of 26-40 GHz 17 W GaN-based Balanced Power Amplifier MMIC," *2019 Int. Conf. Microw. Millim. Wave Technol. ICMMT 2019 - Proc.*, pp. 2019–2021, 2019, doi: 10.1109/ICMMT45702.2019.8992483.
- [16] G. E. Town, "Gallium nitride power electronic devices and circuits: A review," *Proc. Int. Conf. Power Electron. Drive Syst.*, vol. 2015-Augus, no. June, pp. 1–3, 2015, doi: 10.1109/PEDS.2015.7203483.
- [17] R. Sun, J. Lai, W. Chen, and B. Zhang, "GaN Power Integration for High Frequency and High Efficiency Power applications: a Review," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 15529–15542, 2020, doi: 10.1109/aACCESS.2020.2967027.

Cybersicherheit im Smart Grid

Theresa Brem

Elektro- und Informationstechnik
Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg
Regensburg, Deutschland
theresa.brem@st.oth-regensburg.de

Zusammenfassung—Durch den Umstieg auf erneuerbare Energien, deren Verfügbarkeit je nach Wetterbedingungen und Tageszeit variieren, muss das bereits vorhandene Stromnetz zu einem intelligenten Stromnetz, dem sogenannten „Smart Grid“, ausgebaut werden. Das bestehende Stromnetz wird dabei um ein Kommunikationsnetzwerk erweitert, welches den Austausch von Informationen zu Betriebszustand, Energieverbrauch und Energiebedarf zwischen Stromerzeugern, Stromverbrauchern und Komponenten zur Energiespeicherung innerhalb des Netzes ermöglicht. Durch die digitale Vernetzung des Stromnetzes entsteht eine besonders schützenswerte, sicherheitskritische Infrastruktur, die Gefahren und Risiken in den Bereichen Cybersicherheit und Datenschutz ausgesetzt ist. Die vorliegende Recherchearbeit bietet eine Einführung in das Thema Smart Grid. Dabei werden der Aufbau des Netzes und die entscheidenden Komponenten erläutert. Des Weiteren wird der Begriff Sicherheit für diesen Anwendungsfall definiert, sowie die IT-Sicherheitsziele und Sicherheitsanforderungen diskutiert. Anschließend werden Angriffe auf das Stromnetz, welche in die Kategorien Angriffsklassen und Angriffsszenarien unterteilt sind, beschrieben. Zuletzt werden verschiedene Forschungsthemen genannt.

Schlüsselwörter—Smart Grid, Cybersicherheit, Stromnetz, IT-Sicherheitsziele, Cyberangriffe, Vernetzung

I. EINLEITUNG

Die Energieversorgung in Deutschland befindet sich seit Jahren im Umbruch, da im Zuge der Energiewende die Abschaltung der Kernkraftwerke und die Reduzierung der ausgestoßenen Treibhausmissionen genauso wie der Umstieg auf erneuerbare Energien beschlossen wurden [1]. Zukünftig soll der Großteil des Stroms in Deutschland dezentral durch Wind, Sonne und Wasserkraft erzeugt werden, obwohl deren Verfügbarkeit aufgrund der Abhängigkeit von Wetter und Tageszeit zeitlich variiert. Um trotz dieser Schwankungen und möglicher Lastspitzen die Versorgungssicherheit, welche oberste Priorität hat, gewährleisten zu können, muss eine dezentrale intelligente Energiesteuerung zum Einsatz kommen. Aus diesem Grund wird das bestehende Stromnetz um eine Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) erweitert, welche die Kommunikation zwischen Stromerzeugern, Stromverbrauchern und Komponenten zur Energiespeicherung und somit den Austausch von Informationen zu Betriebszustand, Energieverbrauch und Energiebedarf ermöglicht. Dabei entsteht ein Energieinformationsnetz, welches auch als Smart Grid bezeichnet wird. [2]

Durch die Neuauslegung des Stromnetzes hin zu einem Energieinformationsnetz ergibt sich eine besonders schützenswerte, sicherheitskritische Infrastruktur. Ein Ausfall

oder eine Störung der Stromversorgung, wenn auch nur zeitlich oder lokal begrenzt, hat weitreichende Folgen für Wirtschaft und Gesellschaft. Aus diesem Grund birgt die neue IKT Risiken im Bereich der Cybersicherheit und kann zum Angriffspunkt für Manipulationen, Hacker und Terrorangriffe werden. Das Smart Grid kann sowohl Ziel als auch Medium der Angriffe sein. [2, 3]

Die vorliegende Recherchearbeit beginnt mit dem konzeptionellen Aufbau und der Netzwerkarchitektur des Smart Grids. Anschließend wird die Bedeutung des Smart Meters, sowie von intelligenten Haushaltsgeräten und batteriebetriebenen Kraftfahrzeugen erläutert. Des Weiteren werden die IT-Schutzziele und die Sicherheitsanforderungen des Smart Grids, sowie Cyber-Angriffe mit Hilfe von Angreifergruppen und Angriffsszenarien beschrieben. Mögliche Forschungsthemen schließen diese Ausarbeitung ab.

II. SMART GRID

Der Begriff Smart Grid beschreibt ein intelligentes Stromnetz, das sowohl Strom als auch Daten überträgt.

A. Aufbau des Netzes

Gemäß dem konzeptionellen Modell des National Institute of Standards and Technology (NIST), welches in Abbildung 1 dargestellt ist, besteht ein Smart Grid aus sieben Bereichen. Der Datenaustausch zwischen den Bereichen ist durch blaue Linien und die Übertragung von elektrischem Strom durch rot, gestrichelte Linien gekennzeichnet. Die Bereiche Verbraucher, Stromerzeugung, -übertragung und -verteilung im unteren Teil des Bildes erzeugen, speichern und liefern Strom. Die Stromerzeugung erfolgt derzeit sowohl in Atom- und Kohlekraftwerken, als auch durch regenerative Energiequellen wie Windräder, Wasserkraftwerke, Solar- und Photovoltaikanlagen. Die Bereiche Stromanbieter, Handel und Prozesstechnik verwalten den Stromtransport und stellen Informationen und Dienstleistungen für Verbraucher und Versorgungsunternehmen bereit. [4, 5]

Im Smart Grid werden die Netzwerkarchitekturen Wide Area Network (WAN), Neighborhood Area Network (NAN) und Home Area Network (HAN) (siehe Abbildung 1) verwendet. Die Netze werden über Gateways miteinander verbunden. Das HAN umfasst Haushalte und Unternehmen und nutzt die Protokolle ZigBee, Bluetooth oder Wi-Fi. Bei Umspannwerke und Verteilungsstationen kommt das NAN zum Einsatz. Das WAN nutzt unter anderem Glasfaser- und Mobilfunknetze.

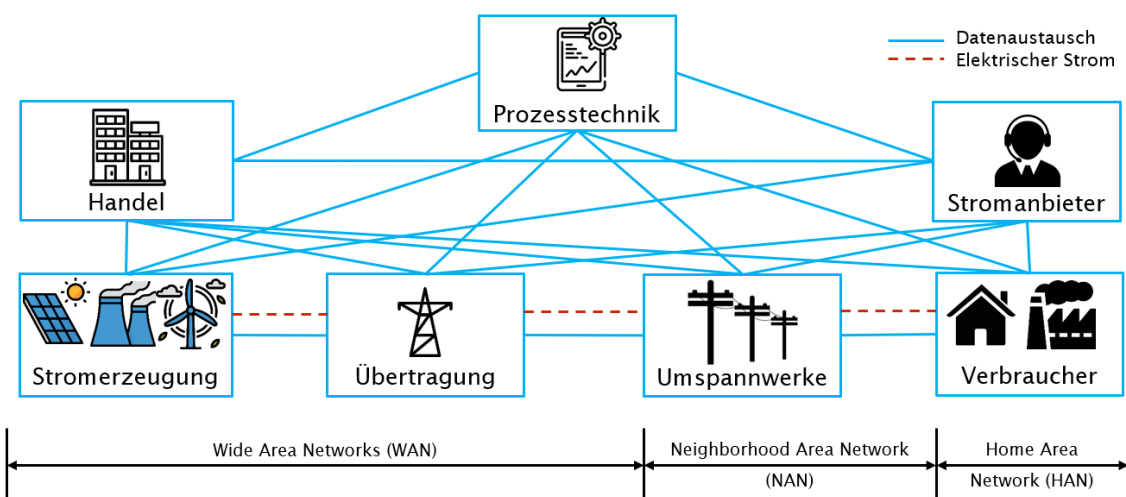


Abbildung 1. Konzeptuelles Modell des Smart Grid inklusive der Netzwerkarchitekturen, vgl. [4, 6]

B. Smart Meter

Das Smart Meter beschreibt einen intelligenten Stromzähler. Dieser muss nach dem Energiewirtschaftsgesetz (EnWG) in Neubauten und bei Totalsanierungen deutschlandweit seit Anfang 2010 verpflichtend eingebaut werden. Mit Hilfe eines Smart Meters lässt sich der Energieverbrauch digital und in kurzen Zeitintervallen erfassen und nach der Aufbereitung der Daten an den Energieversorger übermitteln. Zudem kann das Smart Meter vom Energieversorger als Aktor genutzt werden, um die Stromversorgung aus der Ferne abzuschalten. Das kann notwendig sein, wenn die Stromrechnung nicht bezahlt wurde oder die Leistungsaufnahme begrenzt werden muss. [7]

C. Intelligente Haushaltsgeräte, Hybrid- und Elektroautos

Ständig erweitert sich das Angebot an intelligenten Haushaltsgeräten, die Informationen zu Strombedarf und Verbrauchsmustern in Echtzeit übermitteln. Dadurch ergibt sich die Möglichkeit Geräte, die nicht überlebenswichtig sind, bei geringer Energieverfügbarkeit abzuschalten. [7]

Die Ladestrategie von Plug-in-Hybrid- (PHEV) oder reinen Elektrofahrzeugen könnte dahingehend angepasst werden, dass der Ladevorgang vorwiegend bei günstigen Tarifen und ausreichender Verfügbarkeit angestoßen wird. Außerdem können geparkte PHEVs bei geringer Verfügbarkeit Energie in das Netz rückspeisen. Für das Smart Grid ergeben sich dadurch Stellschrauben um Lastspitzen auszugleichen und die Netzstabilität sicherzustellen. [5]

III. CYBER-SICHERHEIT IM SMART GRID

Die Sicherheit im Smart Grid kann nur unter Einhaltung von geltenden Gesetzen, IT-Schutzziele und Sicherheitsanforderungen erreicht werden.

A. IT-Schutzziele

Die IT-Schutzziele Vertraulichkeit (engl. Confidentiality), Integrität (engl. Integrity) und Verfügbarkeit (engl. Availability) sind im CIA-Sicherheitsmodell (siehe Abbildung 2),

das als Leitfaden für Richtlinien zur Informationssicherheit in Smart-Grid-Systemen dient, zusammengefasst. Das Dreieck verdeutlicht, dass Änderungen einer Größe Auswirkungen auf die anderen Beiden haben können. [8, 9]

Die *Vertraulichkeit* gewährleistet, dass nur autorisierte Personen Zugriff zu personenbezogenen Daten haben, denn anhand der aufgezeichneten Daten eines Smart Meters können Rückschlüsse auf den Tagesablauf oder das Nutzungsverhalten des Endverbrauchers gezogen werden und diese für Manipulationen oder Einbrüche genutzt werden. Werden Informationen an Unbefugte weitergegeben bedeutet dies den Verlust der Vertraulichkeit. [8, 9]

Die *Integrität* ist notwendig, um die Echtheit der Daten zu gewährleisten, denn unautorisierte und unbemerkte Manipulationen oder Zerstörungen dürfen nicht möglich sein. Im Smart Grid spielt die Integrität bei der Echtzeitanalyse von Energiebedarf und -angebot und der Abrechnung mit dem Energieversorger eine große Rolle. [10, 9]

Die *Verfügbarkeit* bezeichnet die Versorgungssicherheit, denn der Zugang zu elektrischer Energie und die Nutzung des Smart Grids soll zu jeder Zeit gewährleistet sein. Eine Unterbrechung der Datenkommunikation führt auch bei ausreichender Stromversorgung zum Ausfall der Steuerung des Smart Grids und stört folglich den Betrieb von kommunikationsfähigen Geräten. [7, 11]

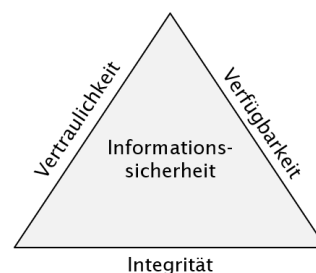


Abbildung 2. Sicherheitsmodell CIA-Triade, vgl. [9]

Ein weiteres Schutzziel, welches nicht im CIA-Sicherheitsmodell enthalten ist, ist die *Authentizität*, dabei soll die Echtheit und Glaubwürdigkeit der einzelnen Kommunikationspartner eindeutig zu bestimmen sein. Die eindeutige Identifikation der einzelnen Parteien kann durch digitale Signaturen oder charakteristische Eigenschaften, wie Passwörter oder biometrische Merkmale nachgewiesen werden. [10]

B. Sicherheitsanforderungen

Das NIST beschreibt in seinem Leitfaden zur Cybersicherheit im Smart Grid [8] Anforderungen an das Smart Grid im Bereich der Cyber-Sicherheit.

1) *Identifizierung, Authentifizierung und Zugriffskontrolle*: Da es sich beim Smart Grid um ein System mit Millionen Zugriffspunkten handelt ist die Zugriffskontrolle mit dem dazugehörigen Verifikationsprozess notwendig. Durch die Identifizierung und Authentifizierung wird die Identität eines Benutzers, Gerätes oder Prozesses eindeutig nachgewiesen und der Zugriff auf sensible Daten gewährt. Zudem müssen Überwachungsmechanismen integriert sein. [8, 11]

2) *Angriffserkennung und Selbstheilung*: Da das Smart Grid ein vergleichsweise offenes Kommunikationsnetz über geografisch große Entfernungen ist, ist es kaum möglich jeden Teil des Smart Grids gegen Cyber-Angriffe zu schützen. Um den Datenverkehr im Netzwerk zu überwachen und anormale Vorkommnisse aufgrund von Angriffen zu erkennen, muss das Kommunikationsnetzwerk in kurzen, regelmäßigen Abständen Tests und Istwertabgleiche durchführen. Darüber hinaus muss das Netzwerk die Fähigkeit zur Selbstheilung besitzen, um den Netzwerkbetrieb auch bei Angriffen fortzusetzen. Aufgrund der kritischen Bedeutung von Energieinfrastrukturen ist der widerstandsfähige Betrieb in Kommunikationsnetzen für die Aufrechterhaltung der Netzverfügbarkeit im Smart Grid von entscheidender Bedeutung. [8, 11, 9]

3) *Sichere und wirksame Kommunikationsprotokolle*: Die Datenübertragung im Smart Grid verfolgt im Gegensatz zu konventionellen Stromnetzen das Ziel sicher und in Echtzeit Daten zu übertragen. Besonders wichtig ist die Kommunikation der Verteilungs- und Übertragungskomponenten. Da es im Smart Grid nicht immer möglich ist, sichere, physikalisch geschützte und breitbandstarke Kommunikationskanäle zu nutzen, müssen Kommunikationsprotokolle und -architekturen so ausgelegt werden, dass ein Gleichgewicht zwischen Kommunikationseffizienz und Informationssicherheit hergestellt wird. [8, 11]

IV. CYBER-ANGRIFFE UND BEDROHUNGEN

A. Angreiferklassen

Laut [2] können Angriffe in vier mögliche Angreiferklassen mit unterschiedlichen Zielen eingeteilt werden.

- Der *Cyber-Terrorist* versucht gefälschte Daten in das Kommunikationsnetz einzubringen oder die Datenweitergabe zu verzögern, um die Energieversorgung zu unterbrechen oder das Abschalten bzw. Herunterfahren von Anlagen herbeizuführen. Zudem kann durch sogenannte

Denial-of-Service Attacken die Verfügbarkeit von Diensten beeinträchtigt werden. Das Ziel ist, wirtschaftlichen Schaden anzurichten.

- Der *Endkunde* bzw. Bürger als Täter kann die leichte Erreichbarkeit von Smart Grid Komponenten im Privathaushalt für physische Angriffe nutzen, indem Verbrauchsdaten zum eigenen Vorteil geändert oder die Verbrauchsdaten und Lastprofile von Mietern oder Nachbarn ausspioniert werden. Außerdem könnten Abrechnungen des Verbrauchs auf fremde Konten umgeleitet werden.
- *Mitarbeiter* oder *Dienstleister* sind durch sogenannte Social-Engineering-Angriffe, bei denen der Angreifer sein Opfer dazu bringt Informationen preiszugeben, ohne es zu merken [10], besonders gefährdet. Der Angreifer überträgt Schadsoftware über E-Mails, manipulierte Internetseiten oder Speichermedien auf den Computer des Mitarbeiters und erlangt Zugriff auf Passwörter und wichtige Informationen. Daraufhin kann der Angreifer auf sicherheitsrelevante Programme zugreifen oder per Fernwartung die Daten von Smart Metern verändern.
- Das Ziel bei *Organisierter Kriminalität* ist finanzieller Gewinn. Die Angreifer verdienen am Verkauf von sensiblen, illegal beschafften Nutzer- und Verbrauchsdaten oder durch den Diebstahl von Leistungen.

B. Angriffsszenarien

Die Angriffe im Smart Grid lassen sich nach [12] in die drei Szenarien Manipulation, Sabotage und Spionage unterteilen.

- Die *Manipulation* wird auf Systemebene durchgeführt und hat das Ziel Messung und Abrechnung des Stromverbrauchs über Hardware oder Software zu verfälschen. Dabei muss der Angreifer direkten Zugang auf das System haben. Ein mögliches Szenario besteht darin, eine Software, die zum freien Download im Internet angeboten wird, zu installieren, die die bestehende Software im Smart Meter Gateway, welches die Kommunikationseinheit des intelligenten Stromzählers darstellt, ersetzt. Dadurch könnte der tatsächliche Stromverbrauch verändert oder ein günstiger Tarif ausgewählt werden.
- Die *Sabotage*, welche auch als Hacking von cyberphysikalischen Systemen bekannt ist, sucht nach Schwachstellen im System und erlangt die Kontrolle über einzelne steuerbare Komponenten, wie Photovoltaikanlagen, Windgeneratoren oder Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen. Werden diese Komponenten gleichzeitig ein- oder ausgeschaltet können instabile Zustände im Netz oder Störungen bei elektrischen Anlagen und Geräten entstehen.
- Durch *Spionage* werden sensible, persönliche Daten, wie Adresse, Bankkontodaten, Informationen zum Lebensstil, wiederkehrender Aktivitäten und Abwesenheiten oder verwendete Haushaltsgeräte in Erfahrung gebracht. Diese Daten können auf vielfältige Weise genutzt werden, um das Kauf- und Nutzungsverhalten des Endverbrauchers zu beeinflussen.

V. FORSCHUNGSTHEMEN

Im Bereich der Cybersicherheit im Smart Grid gibt es eine Vielzahl an Forschungsthemen und -projekten. Das Ziel der Forschung ist es, den Austausch von sensiblen Daten abzusichern, Angriffe zu verhindern oder deren Folgen möglichst gering zu halten. Darum sollten in Zukunft Systeme entwickelt werden, die unerwartete Änderungen in der Kommunikationsinfrastruktur des Smart Grids erkennen, verhindern und melden, sowie die gewonnenen Daten für forensische Analysen aufzeichnen [6].

Ein Forschungsprojekt beschäftigt sich mit der Entwicklung eines Sicherheitsmoduls, das zwischen den Kommunikationspartnern eingebaut werden und die sichere Datenübertragung mittels Verschlüsselung gewährleisten soll. Denn der Datenaustausch zwischen der Leitstelle des Energieversorgers und den Umspannwerken erfolgt noch ohne kryptografische Absicherung und ist damit ein potentieller Angriffspunkt für Cyberattacken, die das Stromnetz lahmlegen wollen. [13]

Ein weiterer Bereich, in dem Forschungsarbeit betrieben werden muss, sind die Kommunikationsprotokolle. Da die Kommunikation zu meist über Netzwerkprotokolle erfolgt, die für industrielle Anwendungen und nicht für sicherheitskritische Zwecke angelegt wurden, müssen neue Protokolle entwickelt oder bestehende Protokolle weiterentwickelt werden, um die Anforderungen des Smart Grids zu erfüllen. [14]

VI. SCHLUSSFOLGERUNG

Das zusätzliche Kommunikationsnetzwerk im Smart Grid erhöht die Vernetzung im Stromnetz, um den Umstieg hin zu erneuerbaren Energien zu ermöglichen und gleichzeitig die erzeugte Energie effizient zu nutzen. Darüber hinaus ist das neue intelligente Stromnetz, das sich zu einer schützenswerten, sicherheitskritischen Infrastruktur entwickelt hat, ein Ziel für Cyberangriffe geworden, die sowohl den Endverbraucher als auch die Energieversorger schädigen können. In dieser Ausarbeitung wurden die Sicherheitsanforderungen und verschiedene Angriffsszenarien analysiert. Für die Zukunft gilt es, die Sicherheitsmaßnahmen weiter zu verbessern und die genannten Forschungsthemen zu bearbeiten, um Angriffe zu verhindern und deren Auswirkungen möglichst gering zu halten.

LITERATUR

- [1] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, "Unsere energiewende: sicher, sauber, bezahlbar," 2018.
- [2] C. Eckert, *Sicherheit im Smart Grid: Eckpunkte für ein Energieinformationsnetz*. Stuttgart: Alcatel-Lucent Stiftung für Kommunikationsforschung, 2011.
- [3] C. Eckert and C. Krauß, "Sicherheit im smart grid," *Datenschutz und Datensicherheit - DuD*, vol. 35, no. 8, 2011.
- [4] A. Gopstein, C. Nguyen, C. O'Fallon, N. Hastings, and D. Wollmann, "Nist framework and roadmap for smart grid interoperability standards, release 4.0," 2020.
- [5] J. Liu, Y. Xiao, S. Li, W. Liang, and C. L. P. Chen, "Cyber security and privacy issues in smart grids," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 14, no. 4, pp. 981–997, 2012.
- [6] M. Z. Gunduz and R. Das, "Cyber-security on smart grid: Threats and potential solutions," *Computer Networks*, vol. 169, p. 107094, 2020.
- [7] K. J. Müller, *Sicherheit im Smart Grid*. Karlsruhe: Secorvo Security Consulting GmbH, 2011.

- [8] "Guidelines for smart grid cybersecurity: The smart grid interoperability panel – smart grid cybersecurity committee."
- [9] D. B. Rawat and C. Bajracharya, "Cyber security for smart grid systems: Status, challenges and perspectives," in *SoutheastCon 2015*, pp. 1–6, IEEE, 2015.
- [10] C. Eckert, *IT-Sicherheit: Konzepte - Verfahren - Protokolle*. De Gruyter Studium, Berlin and Boston: De Gruyter Oldenbourg, 10. auflage ed., 2018.
- [11] W. Wang and Z. Lu, "Cyber security in the smart grid: Survey and challenges," *Computer Networks*, vol. 57, no. 5, pp. 1344–1371, 2013.
- [12] M. Wagner, M. Kuba, and A. Oeder, "Smart grid cyber security: A german perspective," in *2012 International Conference on Smart Grid Technology, Economics and Policies (SG-TEP)*, pp. 1–4, IEEE, 2012.
- [13] T. Frauenschläger, M. Dentgen, and J. Mottok, *Systemarchitektur eines Sicherheitsmoduls im Energiesektor*. Landshut: Hochschule für Angewandte Wissenschaften Landshut, 2020.
- [14] Z. E. Mrabet, N. Kaabouch, H. E. Ghazi, and H. E. Ghazi, "Cyber-security in smart grid: Survey and challenges," *Computers & Electrical Engineering*, vol. 67, pp. 469–482, 2018.

Elektromobilität: Der Stand anderswo in der Welt

Pascal Hammer

Fakultät Elektro- und Informationstechnik
Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg
Regensburg, Deutschland
pascal.hammer@st.oth-regensburg.de

Abstract—Seit Mitte des Jahres 2020 werden PlugIn-Hybrid- und Elektrofahrzeuge verstärkt durch die Bundesregierung gefördert, um den Absatz dieser Fahrzeuge zu erhöhen. Eine solche Förderung existiert in Norwegen schon seit 1997. Aus diesem Grund ist das Land aktuell weltweit führend bei der Neuzulassung von Elektrofahrzeugen, bezogen auf den prozentualen Anteil an E-Fahrzeugen von allen Neufahrzeugen. Dafür sind auch die Vorgaben der Politik entscheidend, welche einen schnellen Wechsel zu PlugIn-Hybridfahrzeugen beziehungsweise reinen Elektrofahrzeugen vorsehen, um spätestens 2025 keine neuen Fahrzeuge mehr zuzulassen, die ausschließlich mit Verbrennungsmotor betrieben werden.

Ziel des Papers ist es, einen Überblick über den aktuellen Stand der Elektromobilität im Jahr 2021 in der Welt darzustellen und dabei den Fortschritt verschiedener Länder zu vergleichen. Außerdem soll die Frage geklärt werden, weshalb mancherorts die Entwicklung deutlich schneller voranschreitet. Hier spielt vor allem die Anstrengung der jeweiligen Regierung bei der Elektrifizierung der Fahrzeugflotte eine entscheidende Rolle.

Bei der Klärung dieser Frage wird insbesondere auf die Klimaziele des entsprechenden Landes, die Anreize zum Kauf eines Elektrofahrzeugs, den aktuellen Bestand an E-Fahrzeugen und die Ladeinfrastruktur eingegangen.

Der Fokus liegt dabei auf den Entwicklungen der letzten sieben Jahre. Dafür werden Publikationen und Studien aus diesem Zeitraum zur genaueren Betrachtung herangezogen.

Index Terms—Elektrische Fahrzeuge (Electric vehicles), Ladestationen (Charging stations), Fahrzeuge (Vehicles), Automobilelektronik (Automotive electronics), Erneuerbare Energien (Renewable energy sources)

I. EINLEITUNG

In den letzten Jahren ist weltweit ein verstärkter Anstieg beim Absatz von elektrifizierten Fahrzeugen zu beobachten. Auf diesen Fahrzeugen ruht eine große Hoffnung, wenn es darum geht, die Emissionen von Treibhausgasen im Transportsektor zu reduzieren. Dies spielt vor allem in Städten und Ballungsgebieten eine bedeutende Rolle.

Bei elektrifizierten Fahrzeugen unterscheidet man in der Regel zwischen reinen Elektrofahrzeugen (battery electrical vehicle, BEV), PlugIn-Hybridfahrzeugen (plugin-hybrid electrical vehicle, PHEV), Mild-Hybridfahrzeugen (mild-hybrid electrical vehicle, MHEV) und Mikro-Hybridfahrzeugen. [1]

Während BEVs ausschließlich mit Elektromotor betrieben werden, ist bei den PHEVs zusätzlich zum Elektromotor noch ein konventioneller Verbrennungsmotor für Langstreckenfahrten verbaut. Damit können PlugIn-Hybridfahrzeuge aber zumindest im Stadtbereich emissionsfrei fahren und tragen somit, wenn auch nur lokal, zu einer besseren Luftqualität

bei. MHEVs können mit Hilfe eines elektrischen Startergenerators Energie beim Bremsen rekuperieren und damit eine sogenannte Segelfunktion ermöglichen. Dabei wird der Verbrennungsmotor während der Ausrollphasen abgeschaltet und erst beim erneuten Beschleunigen wieder gestartet. Damit kann der Verbrauch des Verbrennungsmotors gesenkt werden. Mikro-Hybridfahrzeugen verfügen in der Regel nur über eine Start-Stopp-Funktionalität, die den Motor im Stand abschaltet und beim anschließenden Anfahren wieder startet. Rein elektrisches Fahren ist allerdings weder mit MHEVs noch mit Mikro-Hybridfahrzeugen möglich. [1]

Aus den bereits aufgezeigten Gründen versuchen aktuell viele Länder den Anteil an Elektrofahrzeugen beziehungsweise elektrifizierten Fahrzeugen an der Fahrzeugflotte des Landes zu erhöhen. Um die Verbreitung dieser Fahrzeuge zu beschleunigen, werden gezielt Fördermaßnahmen eingesetzt. Elektroautos werden in der Regel stärker gefördert als Hybridfahrzeuge, da diese während des Betriebs keine Emissionen durch Verbrennung von fossilen Brennstoffen erzeugen. Ziel dieser Maßnahmen ist es, die bei Elektrofahrzeugen höheren Anschaffungskosten für den Käufer zu reduzieren und auf ein ähnliches Niveau wie bei konventionellen Fahrzeugen zu senken. Damit soll der Umstieg auf ein elektrifiziertes Fahrzeug der Bevölkerung näher gebracht werden. [2]

Ziel des Papers ist es, einen Überblick über den aktuellen Stand der Elektromobilität in der Welt darzustellen und dabei den Fortschritt verschiedener Länder zu vergleichen. Dies soll exemplarisch am Beispiel von Europa, den USA und China geschehen, da diese weltweit verstärkt auf die Umstellung auf Elektromobilität setzen. Die Beweggründe dafür liegen auf der Hand, schließlich sind die USA in den letzten Jahren zunehmend den Folgen des Klimawandels in Form von beispielsweise Hurricanes oder Waldbränden ausgesetzt. China dagegen muss sich mit der steigenden Zahl an Fahrzeugen in den Städten und der damit einhergehenden Luftverschmutzung auseinandersetzen. In Europa versucht man einen generellen Wandel von fossilen zu erneuerbaren Energien zu vollziehen. [2, 3, 4]

Dieses Paper ist wie folgt aufgebaut: In Abschnitt II werden die europäischen, amerikanischen und chinesischen Klimaziele erläutert. Abschnitt III beschreibt die jeweiligen staatlichen Fördermaßnahmen zur Verbreitung der elektrifizierten Fahrzeuge. Abschnitt IV stellt den aktuellen Bestand an elektrifizierten Fahrzeugen dar und Abschnitt V beschäftigt sich mit der Ladeinfrastruktur in den drei genannten Regionen.

II. KLIMAZIELE

Im folgenden Abschnitt werden die Klimaziele der Europäischen Union, der USA und China dargestellt. Im Wesentlichen zielen diese darauf ab, die Emissionen von Treibhausgasen zu reduzieren und den Anteil der erneuerbaren Energie am Gesamtenergiebedarf zu steigern.

A. Klimaziele in der Europäischen Union

Im Oktober 2014 hat die Europäische Union (EU) die drei, im folgenden Abschnitt beschriebenen, Klimaziele für 2030 festgelegt. Diese müssen von 2030 an verpflichtend von allen Mitgliedsstaaten eingehalten werden. [5]

Der Abschlusserklärung des Europäischen Rats zufolge sollen die EU-internen Treibhausgasemissionen bis 2030 um mindestens 40 % im Vergleich zum Jahr 1990 reduziert werden. Des Weiteren wurde für den zu erreichenden Anteil der erneuerbaren Energien am Energieverbrauch ein Ziel von mindestens 32 % festgelegt. Außerdem soll die Energieeffizienz im europäischen Raum um mindestens 32,5 % gesteigert werden. Dafür soll die Energieeffizienz beispielsweise von Wohnhäusern und Industrieanlagen verbessert werden. [5, 6]

B. Klimaziele in den USA

Auch die Vereinigten Staaten von Amerika haben unter der Führung vom ehemaligen Präsidenten Barack Obama Klimaziele definiert. Im November 2014 legte der US-Präsident eine Reduzierung der Treibhausgasemissionen um 26 bis 28 % im Vergleich zum Jahr 2005 als Ziel fest. Diese Reduzierung sollte spätestens im Jahr 2030 erfolgt sein. Das wichtigste Element der Klimastrategie der Obama Administration war der sogenannte "Clean Power Plan". In diesem wurde festgelegt, dass die Emissionen von Kraftwerken bis 2030 um mindestens 32 % reduziert werden sollen. [7]

C. Klimaziele in China

Auch in China, wo lange Zeit das Wirtschaftswachstum Vorrang vor dem Umweltschutz hatte, hat mittlerweile ein Umdenken stattgefunden. Gemeinsam mit den USA erklärte China im November 2014, spätestens 2030 einen Anteil von 20 % an regenerativen Energien am Gesamtenergiebedarf erreichen zu wollen. Außerdem soll bis 2030 die CO₂-Intensität der Wirtschaft um 60 bis 65 % im Vergleich zum Jahr 2005 gesenkt werden. Darüber hinaus ist eine Erweiterung der Waldfläche im Land um 40 Millionen Hektar durch Aufforstung geplant. [7]

III. FÖRDERMASSNAHMEN

Bei den Fördermaßnahmen unterscheidet man in der Regel zwei Hauptkategorien: Kaufprämien und Steuervergünstigungen. Zusätzliche Fördermaßnahmen sind beispielsweise Zuschüsse zur Anschaffung und Installation von Ladestationen für Privathaushalte oder die Erlaubnis Bus- oder Straßenbahnpuren nutzen zu dürfen. [8]

Kaufprämien haben den Zweck, den Preis eines Elektrofahrzeugs zu senken und die aktuelle Preisdifferenz zu konventionellen Fahrzeugen zu verkleinern. Die Steuererleichterungen für Elektro- und Hybridfahrzeuge zielen darauf ab, die

Unterhaltskosten zu senken und somit die Fahrzeuge bei der Bevölkerung attraktiver zu machen. [8]

	Bundesanteil (Netto- Listenpreis unter 40.000 €	Bundesanteil (Netto- Listenpreis über 40.000 €	Mindest- haltedauer
Kauf	6.000 €	5.000 €	6 Monate
Leasinglaufzeit 6-11 Monate	1.500 €	1.250 €	6 Monate
Leasinglaufzeit 12-23 Monate	3.000 €	2.500 €	12 Monate
Leasinglaufzeit über 23 Monate	6.000 €	5.000 €	24 Monate

Tab. I
KAUFPRÄMIE FÜR BEVs IN DEUTSCHLAND OHNE INNOVATIONSPRÄMIE
[10]

	Bundesanteil (Netto- Listenpreis unter 40.000 €	Bundesanteil (Netto- Listenpreis über 40.000 €	Mindest- haltedauer
Kauf	4.500 €	3.750 €	6 Monate
Leasinglaufzeit 6-11 Monate	1.125 €	937,50 €	6 Monate
Leasinglaufzeit 12-23 Monate	2.250 €	1.875 €	12 Monate
Leasinglaufzeit über 23 Monate	4.500 €	3.750 €	24 Monate

Tab. II
KAUFPRÄMIE FÜR PHEVs IN DEUTSCHLAND OHNE INNOVATIONSPRÄMIE
[10]

A. Fördermaßnahmen in Europa

Seit 2016 werden in Deutschland Elektroautos staatlich gefördert. Die Fördermaßnahmen wurden 2020 noch einmal erhöht und auf Hybridfahrzeuge ausgeweitet. In Deutschland liegt die maximale Förderprämie beim Kauf eines Elektroautos derzeit bei 6000 €, bei Hybridfahrzeugen bei 4500 €. Diese Prämie ist nach aktuellem Stand bis Ende 2025 wirksam. Zusätzlich dazu gilt seit Juli 2020 bis Ende 2021 die sogenannte Innovationsprämie, die von der Industrie getragen wird. Damit erhöht sich die Kaufprämie für Elektrofahrzeug auf 9000 € und die für Hybridfahrzeuge auf 6750 €. Diese Zahlen gelten für Neufahrzeuge mit einem Listenpreis von maximal 40.000 €, die Prämienverteilung für höhere Listenpreise und Leasingvarianten sind in Tabelle I und Tabelle II dargestellt. [9]

Norwegen setzt auf ähnliche Anreize zum Kauf von Elektrofahrzeugen. Diese sind dort von der CO₂-Steuer ausgenommen und die Mehrwertsteuer von 25 % entfällt für reine Elektrofahrzeuge komplett. Elektrische Firmenfahrzeuge erhalten eine Ermäßigung der Dienstwagensteuer von 50 %. Außerdem

dürfen Elektrofahrzeuge in Norwegen Straßenspuren benutzen, die eigentlich Bussen und Straßenbahnen vorbehalten sind. Darüber hinaus ist die Nutzung von Fähren, Mautstraßen, Parkplätzen und öffentlichen Ladestationen für Besitzer eines Elektrofahrzeugs kostenlos. [8, 11]

Auch Italien setzt auf staatliche Fördermaßnahmen zur Verbreitung von Elektrofahrzeugen. Dafür wird die Mehrwertsteuer von 22 % auf 4 % gesenkt. Elektrofahrzeuge sind zudem im ersten Jahr nach der Zulassung von 100 % der KFZ-Steuer befreit. Dieser Prozentsatz sinkt in den ersten fünf Jahre nach der Zulassung des Fahrzeugs jedes Jahr um 10 % und bleibt anschließend konstant. Darüber hinaus erhalten emissionsfreie Fahrzeuge, die im öffentlichen Dienst (Taxi etc.) eingesetzt werden, eine Steuergutschrift von 50 % verteilt auf 5 oder 10 Jahre. Außerdem subventioniert die Regierung den Aufbau der Schnellladeinfrastruktur. Dafür erhält man eine Steuergutschrift von 41 % des Preises für den Aufbau einer Schnellladestation, allerdings nur bis zu 75.000 € Gesamtkosten der Ladestation. [8]

B. Fördermaßnahmen in den USA

Auch in den USA werden elektrisierte Fahrzeuge bezuschusst. Allerdings unterscheiden sich die Fördermaßnahmen zwischen den einzelnen Bundesstaaten zum Teil erheblich. [12]

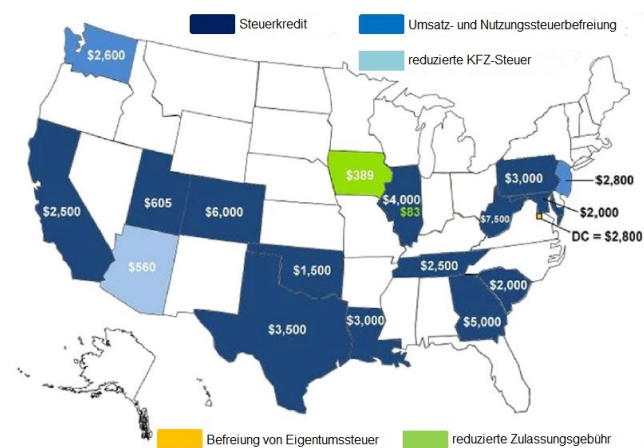


Fig. 1. Überblick über die Fördermaßnahmen in den Staaten der USA [12]

Steuerzahler, die 2010 oder später ein elektrifiziertes Fahrzeug gekauft haben, können beim Staat einen Steuerkredit beantragen. Abhängig von der Batteriegröße des Fahrzeugs, zwischen 4 und 16 Kilowattstunden (kWh), beträgt dieser zwischen 2500 und 7500 Dollar (2050 bis 6160 Euro). Diese Regelung gilt allerdings nur so lange für die Fahrzeuge eines Herstellers, bis dieser 200.000 förderungsfähige Fahrzeuge in den USA verkauft hat. Wird diese Grenze überschritten, fallen die Förderungen für Fahrzeugkäufe beim entsprechenden Hersteller weg. Der US-Autobauer General Motors hatte 2013 bereits 27 % dieser 200.000 genutzt, Nissan etwa 21 %. [12]

Unter den einzelnen Staaten gilt Kalifornien als Vorreiter. Dort dürfen elektrisierte Fahrzeuge bestimmte Fahrspuren

auf mehrspurigen Straßen, die sogenannten "high occupancy vehicle lanes" (HOV lanes), nutzen. Diese sind ansonsten Fahrzeugen von Fahrgemeinschaften vorbehalten. Außerdem wird der Kauf von Ladestationen gefördert. Durch die Mischung von finanziellen und nicht finanziellen Anreizen hat Kalifornien einen Anteil von 40 % an den insgesamt in den USA verkauften PHEVs. [12, 13]

Viele Staaten bieten den Autofahrern außerdem eigene Anreize beziehungsweise Zuschüsse an. Dazu zählen zum Beispiel vergünstigte Parktickets oder auch Vergünstigungen bei der regelmäßigen Inspektion der Fahrzeuge. In manchen Regionen bieten Energieversorger außerdem niedrigere Strompreise für Kunden an, die einen separaten Stromzähler für ihre Ladestation nutzen. Abbildung 1 zeigt die steuerlichen Fördermaßnahmen in den einzelnen Staaten. [12, 13]

C. Fördermaßnahmen in China

In China wird seit 2009 der Kauf von elektrisierten Fahrzeugen im öffentlichen Bereich, also beispielsweise Taxis und Busse, vom Staat gefördert. Das Förderprogramm galt zunächst nur für die 13 größten Städte, wurde anschließend Schritt für Schritt auf insgesamt 25 Städte ausgeweitet. Seit 2012 werden hybrid-elektrische Busse im ganzen Land subventioniert. [12]

Im Jahr 2010 wurde ein Pilot Programm zur Förderung von privaten Fahrzeugkäufen vom Staat in 6 Städten initiiert und schrittweise erweitert. Die Höhe der Subventionen basiert dabei auf der Batteriekapazität und beträgt 3000 Yuan (380 €) pro kWh. Die maximal mögliche Förderung pro PHEV beträgt 50.000 Yuan oder 6300 €. Bei BEVs dagegen beläuft sie sich auf 60.000 Yuan (7600 €). Zugelassen zur Förderung werden nur BEVs mit einer Batteriekapazität von mindestens 15 kWh beziehungsweise PHEVs mit nicht weniger als 10 kWh. Von der Förderung ausgeschlossen sind Fahrzeuge mit verbauten Blei-Säure-Batterien, da diese nicht als zukunftsfrüchtige Technologie gelten. [12]

Das Förderprogramm wurde 2013 auf weitere Metropolregionen erweitert. Zugelassene Fahrzeuge sind PlugIn-Hybride, Elektrofahrzeuge und wasserstoff-betriebene Fahrzeuge. Als Grundlage für die Zulassung zum Förderprogramm dient aber nun die elektrische Reichweite der Fahrzeuge, nicht mehr die Batteriekapazität. Allerdings wurden die Zuschüsse für private Fahrzeuge schrittweise reduziert, die Förderungen von Fahrzeugen mit gewerblicher Nutzung bleibt bestehen. [12]

IV. AKTUELLER BESTAND AN ELEKTRIFIZIERTEN FAHRZEUGEN

Im folgenden Abschnitt werden die Fahrzeugbestände in Europa, den USA und China gelistet. Aus den Daten der Verkehrsministerien geht nicht eindeutig hervor, ob bei der Anzahl der Hybridfahrzeuge auch die Mild- und Mikro-Hybridfahrzeuge mit eingeschlossen sind oder nicht. Diese verfügen, wie in der Einleitung beschrieben, über keinerlei elektrische Antriebskomponenten. Aus diesem Grund müssen die in den Quellen angegebenen Zahlen der Hybridfahrzeuge mit einer gewissen Skepsis betrachtet werden.

A. Aktueller Bestand in Europa

Der Fahrzeugbestand in Deutschland beläuft sich aktuell auf etwa 47 Millionen PKWs. Davon waren im Januar 2020 circa 136.000 Fahrzeuge Elektroautos und 642.000 Hybridfahrzeuge (HEV und PHEV). Das bedeutet einen Anteil von elektrifizierten Fahrzeugen von etwa 1,66 %. [14, 15]

In Norwegen sind etwa 3 Millionen Fahrzeuge registriert. 260.000 davon sind BEVs, 235.000 PHEVs. Damit ergibt sich ein Anteil von 16,5 % der elektrifizierten PKWs an der gesamten Fahrzeugflotte. Dieser Wert ist der höchste weltweit und macht Norwegen somit zum globalen Vorreiter in der Elektromobilität. [16]

Italien hat mit 39 Millionen Fahrzeugen eine der größten Fahrzeugflotten in der Europäischen Union. Die Anzahl an Elektrofahrzeugen ist mit gerade einmal 40.000 dagegen durchaus überschaubar. Zusätzliche 29.000 Hybridfahrzeuge erhöhen den Anteil an der Gesamtflotte auf gerade einmal 0,17 %. [17]

B. Aktueller Bestand in den USA

In den USA unterscheidet man in der Regel noch die nicht extern aufladbaren Hybridfahrzeuge (hybrid electric vehicle, HEV) von den PHEVs. HEVs sind in Europa kaum verbreitet, weshalb dort nicht zwischen HEV und PHEV unterschieden wird. Die Gesamtanzahl an PKW beläuft sich in den USA auf 273 Millionen Fahrzeuge. Davon sind 400.000 HEVs, 80.000 PHEVs und 242.000 rein elektrisch betriebene Fahrzeuge. Das entspricht einem Anteil an elektrisierten Fahrzeugen von 0,12 %. [18, 19]

C. Aktueller Bestand in China

In China gibt es über 300 Millionen motorisierte Fahrzeuge, 250 Millionen davon sind PKWs. 3,4 Millionen von diesen werden unter den sogenannten new energy vehicles geführt. Dazu gehören neben HEVs, PHEVs und BEVs auch die Wasserstofffahrzeuge (fuel cell electrical vehicle, FCEV). Die Anzahl der reinen Elektrofahrzeuge beläuft sich auf 2,8 Millionen. Damit erreicht China einen Anteil an elektrisierten Fahrzeugen von 1,4 %. [20]

V. LADEINFRASTRUKTUR

Der folgende Abschnitt beschreibt den aktuellen Stand der Ladeinfrastruktur in Europa, am Beispiel von Deutschland, Norwegen und Italien, in den USA und in China.

A. Ladeinfrastruktur in Europa

Die Anzahl der öffentlichen Ladesäulen in Deutschland beläuft sich aktuell auf 17.000, die über das ganze Bundesgebiet verteilt sind. Dabei unterscheidet die Bundesnetzagentur in ihrer Auflistung zwischen normalen Ladesäulen (< 50kW Ladeleistung) und Schnellladestationen (> 50kW Ladeleistung). Diese sind alle auf einer für den Verbraucher zugänglichen Website der Bundesnetzagentur mit Angaben zu Betreiber und Ladeleistung verzeichnet. Das Straßennetz in Deutschland hat eine Gesamtlänge von 830.000 Kilometern.

Damit ist im Mittel alle 49 Kilometer eine Ladestation installiert. [21, 22]

Norwegen betreibt derzeit 7065 Ladestationen. Damit wird eine gute Abdeckung realisiert, obwohl das Land, aufgrund der großen Distanzen zwischen den Städten, eigentlich eher ungeeignet für die Elektromobilität ist. Das Straßennetz Norwegens wird mit einer Gesamtlänge von 92.000 Kilometer beziffert. Bezogen auf die Ladesäulen bedeutet das im Schnitt eine Ladestation pro 13 Kilometer Straße. [8, 23, 24]

In Italien existieren aktuell 8200 öffentliche und private, aber öffentlich zugängliche, Ladestationen. Deren Konzentration ist in Nord- und Mittelitalien am höchsten. Dort befinden sich auch die meisten Schnellladestationen. Bei einer Gesamtlänge des Straßennetzes von 487.000 Kilometer bedeutet das im Mittel eine Ladestelle pro 59 Kilometer. [25, 26]

B. Ladeinfrastruktur in den USA

In den USA stehen 28.500 öffentliche Ladestationen zur Verfügung, die verstärkt an der Ost- und Westküste verteilt liegen. In der Mitte des Landes existiert nur eine schwache Abdeckung. Das Straßennetz in den USA erstreckt sich über 4,3 Millionen Kilometer. Damit ist im Schnitt alle 151 Kilometer eine Ladestation installiert. Allerdings findet in den USA ein Großteil der Ladevorgänge zuhause statt, weswegen es deutlich mehr private als öffentlichen Ladestellen gibt. [27, 28, 29]

C. Ladeinfrastruktur in China

China betreibt aktuell 810.000 Ladestationen im eigenen Land. Davon sind 330.000 öffentlich zugänglich, die restlichen 480.000 Ladepunkte sind im privaten Raum. Bei einer Länge des Straßennetzes von 4,24 Millionen Kilometer ist im Durchschnitt alle 5 Kilometer eine Ladestelle installiert. [28, 29]

VI. FAZIT

Die Klimaziele sind in den betrachteten Ländern durchaus vergleichbar. Diese zielen im Wesentlichen bei allen Ländern darauf ab, die Emissionen von Treibhausgasen zu reduzieren und den Anteil der erneuerbaren Energien am Gesamtenergiebedarf zu erhöhen.

Vergleicht man die prozentualen Anteile der Elektro- und Hybridfahrzeuge am gesamten Fahrzeugbestand, so wird deutlich, dass Norwegen nicht nur in Europa, sondern auch weltweit führend ist. Deutschland liegt deutlich abgeschlagen hinter Norwegen, dicht gefolgt von China. Der Anteil in Italien liegt noch einmal deutlich darunter, ebenso der in den USA.

Bei der Ladeinfrastruktur bezogen auf das gesamte Straßennetz führt China den Vergleich an, wenn auch nur knapp vor Norwegen. Deutschland und Italien liegen deutlich dahinter und sind, was den Ausbau der Ladestationen betrifft, derzeit nur Mittelmaß. Die USA sind von allen anderen weit abgeschlagen, was allerdings auch daran liegt, dass dort der Großteil der Ladevorgänge an privaten Ladestationen stattfindet.

Grundsätzlich sind die genannten Fördermaßnahmen eine gute Möglichkeit für eine Regierung, die Elektromobilität

voranzutreiben. Auch weil sich die Automobilindustrie inzwischen darauf eingestellt hat und elektrische und hybride Fahrzeugmodelle in größerem Umfang und zu attraktiveren Preisen anbietet.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Fördermaßnahmen der Regierungen durchaus Wirkung zeigen. Da diese aber oft nur für eine begrenzte Zeit festgelegt sind, bleibt abzuwarten, wie sich das auf die Entwicklung der Elektromobilität auswirkt.

REFERENCES

- [1] Das WeltAuto, "HEV, PHEV, FCEV oder BEV: Kennen Sie die Abkürzungen? ;", 2021, Verfügbar: <https://www.dasweltauto.ch/de/aktuelles/elektrofahrzeuge-kennen-sie-alle-typen.html>, [Abgerufen am 25.01.2021].
- [2] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, "Förderung der Elektromobilität ;", 17. Juli 2020, Verfügbar: <https://www.bmu.de/themen/luft-laerm-verkehr/verkehr/elektromobilitaet/foerderung/>, [Abgerufen am 25.01.2021].
- [3] Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, "Electric Vehicle Benefits," 2019, Verfügbar: <https://www.energy.gov/eere/electricvehicles/electric-vehicle-benefits>, [Abgerufen am 25.01.2021].
- [4] Columbia University in the City of New York, "Guide to Chinese Climate Policy," 2019, Verfügbar: <https://chineseclimatepolicy.energypolicy.columbia.edu/en/electric-vehicles>, [Abgerufen am 25.01.2021].
- [5] Europäische Kommission, "Klima- und energiepolitischer Rahmen bis 2030," EUCO 169/14, Brüssel, 24. Oktober 2014, Verfügbar: <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-169-2014-INIT/de/pdf>, [Abgerufen am 25.01.2021].
- [6] Europäische Kommission, "Klima- und energiepolitischer Rahmen bis 2030," Brüssel, Verfügbar: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_de, [Abgerufen am 25.01.2021].
- [7] M. Schreurs, "The Paris Climate Agreement and the Three Largest Emitters: China, the United States, and the European Union," Politics and Governance, München, 08. September 2016.
- [8] M. Brenna, M. Longo, D. Zaninelli, F. Viola, R. Miceli, P. Romano, "The Strategies for the Diffusion of EVs: Focus on Norway and Italy," Twelfth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), 2017.
- [9] Bundesregierung, "Kaufprämie für Elektroautos," Verfügbar: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/energie/wende/kaufpraemie-fuer-elektroautos-erhoeht-369482>, [Abgerufen am 25.01.2021].
- [10] Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle, "Aktuelle Fördersätze für BEVs und PHEVs," Berlin, Verfügbar: https://www.bafa.de/DE/Energie/Energieeffizienz/Elektromobilitaet/Neuen_Antrag_stellen/neuen_antrag_stellen.html, [Abgerufen am 25.01.2021].
- [11] F. Carranza, O. Paturet, S. Salera, "Norway, the most successful market for Electric Vehicles," World Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27), 2013.
- [12] Y. Zhou, M. Wang, H. Hao, L. Johnson, H. Wang, H. Hao, "Plug-in electric vehicle market penetration and incentives: a global review," Mitig Adapt Strateg Glob Change, 15. Oktober 2014.
- [13] E. Narassimhan, C. Johnson, "The role of demand-side incentives and charging infrastructure on plug-in electric vehicle adoption: analysis of US States," Environ. Res. Lett. 13 (2018), 13. Juli 2018, Verfügbar: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aad0f8>, [Abgerufen am 25.01.2021].
- [14] Kraftfahrtbundesamt, "Jahresbilanz Fahrzeugbestand," 01. Januar 2020, Verfügbar: https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Jahresbilanz/b_jahresbilanz_inhalt.html?nn=2598042, [Abgerufen am 25.01.2021].
- [15] Umweltbundesamt, "Verkehrsinfrastruktur und Fahrzeugbestand," 01. Januar 2020, Verfügbar: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/verkehrsinfrastruktur-fahrzeugbestand>, [Abgerufen am 25.01.2021].
- [16] Statistisches Institut Norwegen, "Registered vehicles," 31. März 2020, Verfügbar: <https://www.ssb.no/en/bilreg>, [Abgerufen am 25.01.2021].
- [17] European Alternative Fuels Observatory, "Registered vehicles," 2020, Verfügbar: <https://www.eafo.eu/countries/italy/1739/summary>, [Abgerufen am 25.01.2021].
- [18] Bureau of Transportation Statistics, "Number of U.S. Aircraft, Vehicles, Vessels, and Other Conveyances," 2018, Verfügbar: <https://www.bts.gov/content/number-us-aircraft-vehicles-vessels-and-other-conveyances>, [Abgerufen am 25.01.2021].
- [19] Bureau of Transportation Statistics, "Hybrid-Electric, Plug-in Hybrid-Electric and Electric Vehicle Sales," 2018, Verfügbar: <https://www.bts.gov/content/gasoline-hybrid-and-electric-vehicle-sales>, [Abgerufen am 25.01.2021].
- [20] China Automotive News, "China's automobile population totals 250 million units," 2019, Verfügbar: http://autonews.gasgoo.com/china_news/70016117.html, [Abgerufen am 25.01.2021].
- [21] Bundesnetzagentur, "Ladesäulenkarte," 2020, Verfügbar: https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/HandelundVertrieb/Ladesaekulenkarte/Ladesaekulenkarte_node.html, [Abgerufen am 25.01.2021].
- [22] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, "Straßennetz," 2020, Verfügbar: <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/infrastruktur-statistik.html>, [Abgerufen am 25.01.2021].
- [23] Fuelsave GmbH, "Norway's EV Charger Rollout Shifts Up a Gear," 2020, Verfügbar: <https://fuelsave.de/norways-ev-charger-rollout-shifts-up-a-gear/>, [Abgerufen am 25.01.2021].
- [24] M. Schmidt, "Norwegische Straßen – Eine Analyse," 27. Februar 2018, Verfügbar: <https://www.norwegenservice.net/norwegische-strassen-eine-analyse>, [Abgerufen am 25.01.2021].
- [25] Watson Falrey & Williams, "The future of E-charging infrastructure: Italy," 22. April 2020, Verfügbar: <https://www.wfw.com/articles/the-future-of-e-charging-infrastructure-italy/>, [Abgerufen am 25.01.2021].
- [26] Trading Economics, "Italy - Roads, Total Network," 2005, Verfügbar: <https://tradingeconomics.com/italy/roads-total-network-km-wb-data.html>, [Abgerufen am 25.01.2021].
- [27] U.S. Department of Energy, "Electric Vehicle Charging Station Locations," 2020, Verfügbar: https://afdc.energy.gov/fuels/electricity_locations.html#/find/nearest?fuel=ELEC, [Abgerufen am 25.01.2021].
- [28] A. Hove, D. Sandalow, "Electric Vehicle Charging in China and the United States," Februar 2019, Verfügbar: https://energypolicy.columbia.edu/sites/default/files/file-uploads/EV_ChargingChina-CGEP_Report_Final.pdf, [Abgerufen am 25.01.2021].
- [29] Road Traffic Technology, "The world's biggest road networks," 12. Januar 2014, Verfügbar: <https://www.roadtraffic-technology.com/features/featurethe-worlds-biggest-road-networks-4159235/>, [Abgerufen am 25.01.2021].

Electric Vehicles as Power Generators and Intermediate Storage: Motivation, Current Discussion, Forecast

Thomas Singer

Faculty of Electrical Engineering and Information Technology
Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg
Regensburg, Germany
0000-0003-2166-2065

Abstract—The current market for electric cars is growing. In order to name these vehicles climate-friendly, the electricity grid must have the highest possible share of renewable energies. The increasing share of renewable energy in the power grid also leads to growing fluctuations in supply. For wind and solar energy, this is primarily caused by the weather. The Vehicle-to-Grid (V2G) concept was developed to counteract these fluctuations. This enables to create a large dynamic intermediate storage with the electric cars connected to the grid. This idea is based on the fact that cars are not moved most of the time, for example when the user is at work.

This paper shows the benefits and types of V2G. This includes the supporting services for the electric grid and the implementation of the control of these services. In addition, the current discussions and developments on V2G are summarised. The impact on the battery of the vehicle performing V2G plays a major role. Depending on the degradation of the battery, there are economic consequences for the owner. Various studies are analysed with regard to the impact on the battery and economic profit. Furthermore, sustainable concepts involves renewable energy are presented. With these concepts, it is possible reach the goal of a CO₂ neutral energy production until year 2050. A concept for increasing comfort during the use of V2G is also presented. Finally, the future viability of V2G is rated.

Index Terms—Electric Vehicles, Batteries, Bidirectional power flow, Renewable energy sources, Energy management, Energy storage, Energy exchange, Power system stability

I. INTRODUCTION

To reach the targets of the Paris Climate Agreement, CO₂ emissions must be reduced. In order to achieve this goal electric vehicles (EV) and renewable energy sources (RE) are essential. RE enables an operation of the EV in a CO₂-neutral way. However, the fluctuations caused by the solar and wind energy are problematic. Due to unpredictable weather conditions, the amount of energy generated by RE cannot be determined.

In addition, the increasing number of electric cars is a challenge for the power grid, because the charging time and power are random. Therefore, the load on the power grid is unpredictable and increases with each new EV. Furthermore, the location of charging can put a strain on regional power grids. If the local power supply is tight, the uncoordinated charging will cause local loads to increase rapidly during peak

demand. This leads to additional power losses at overloaded distribution transformers and cables. [1]

To counteract the mentioned problems, a storage system is essential that stores the excess energy generated from RE and releases it back to the grid in bad weather conditions or at peak times. This storage and implementation based on EV batteries is called Vehicle-to-Grid (V2G). Cars in Germany are parked 96 % of the day and driven only one hour for an average distance of 50 to 60 km per day [2–4]. For this reason, it is interesting identify the advantages and disadvantages of V2G as well as the sustainability of this technology.

This paper describes the advantages of V2G in Section II. In Section III, different evaluation methods for battery degradation when using V2G are evaluated. Economic calculations and studies are presented in Section IV and aspects for future development are given in Section V.

II. ADVANTAGES OF V2G

The basic idea behind this is that a large number of electric vehicles reaches a certain amount which can influence the power grid. To affect it positively, EVs are used to feed the power back into the grid. In this way, they can reduce the pressure on the power grid and ensure safe and efficient operation. [5]

There are two types of V2G mentioned in the literature. Unidirectional V2G and bidirectional V2G, both of which are presented in the next sections.

A. unidirectional V2G

To reduce the stress on the grid, unidirectional V2G controls the charging times of the EVs [6]. The EVs are charged at moments of low demand or high electricity productivity on the grid [6,7]. To motivate EV users, an attractive energy pricing policy of the electricity supplier is required [8]. The only effort to realise this system is to connect the charging stations with a communication interface to the electricity supplier.

B. bidirectional V2G

The bidirectional V2G is able to transmit power in both directions. A bidirectional charger is required for this mode

of operation. [9]

The bidirectional power flow provides several advantages for the power grid, which are explained below:

Peak Shaving

Peak Shaving means feeding in local active power to reduce the peak power demand of the electricity grid [7]. In order to realise this, the EV must be charged outside the peak load times and feed energy into the power grid at the peak load times [9].

Active power regulation

Active power control can be used to keep the frequency of the grid at 50 or 60 Hz. The fast response time and high ramp rate that EVs can provide in combination with the charging station make them suitable for frequency control. If the battery and AC/DC converter are properly dimensioned, the state of charge only fluctuates around its initial level. [7]

Spin Reserve

Spin Reserve means providing energy for two hours with a fast response time within 10 min. This service is typically required about 25 - 50 times a year. Due to the small amount of energy and the synchronised charging stations in consequence of the required phase-locked loop, this application is well suited for batteries. [7]

Reactive Regulation

Reactive power control is used to reduce the reactive power share in the energy mix. For this type of control, the current ripple of the DC link capacitor of a charging station is sufficient to provide this power. Therefore the EV battery and the current of the input inductor are not affected by this process. [10]

During the charging process of an EV, the amount of reactive power is limited by the charger's power limit and the amount of active power drawn from the grid. If the EV is charged with the maximum power of the charger, the charger cannot generate reactive power. [7,9]

To achieve all these benefits, the EV and the chargers need to respond to information or instructions from the power grid. There are two approaches to solve this problem in realisation.

C. centralised V2G

Centralised V2G means that the EVs are charged or discharged evenly according to the instructions of the power grid [11]. The EVs are parked in a certain area at charging stations which are connected to the control centre. This can be realised e.g. in multi-storey car parks or large company car parks.

D. distributed V2G

Distributed V2G uses decentralised charging stations where EVs are charged and discharged independently [11]. The

control of these vehicles has to be realised with an incentive policy of the power grid [12]. Each EV decides independently whether to charge or discharge depending on what the electricity provider offers. For this reason it is difficult to achieve the best effect for the grid.

III. DEGRADATION BY USE OF BIDIRECTIONAL V2G

Usually, the degradation of a battery is visualised in calendar life and cycle life. Calendar life describes the remaining time without using the battery and cycle life represents the number of complete charges and discharges of the battery until its rated capacity falls below a certain value. In both cases, the power delivered and the capacity of the battery compared to its initial state are taken to describe the degree of degradation. [13]

The battery in an EV can be used until the capacity has fallen below 70 - 80 % of the original value [13]. This is called End of Life (EOL). In some papers, degradation is described as a function of the capacity of the battery divided by the maximum number of discharges [14, 15]. This results in a value showing the costs per kWh. This means that each kWh of battery capacity charged and discharged costs, which is correct in principle, but cannot be simplified this way. The problem is that many factors have an influence on the cycle life of a battery. These include depth of discharge (DOD), charge/discharge rate, temperature, charging regime, and more. The DOD and the operating temperature have a particularly large influence on degradation.

In addition, cycle life varies greatly depending on the chemical structure and manufacturing process of the battery cells, such as electrode materials and additives, or the shape of the cell. In summary, it is not possible to describe all EVs with a single mathematical model.

The authors of [18] calculated battery degradation based on the criteria of the U. S. Advanced Battery Consortium (USABC). The USABC has established various criteria regarding the performance and lifetime of energy storage devices. With different charge and discharge profiles, the organisation sets cycle life targets for different EV batteries. These targets are to be met by the industry in the future. The solutions are given as cost per kWh, three battery types were investigated. The results are shown in Section IV.

In [19], the authors studied a Nissan Leaf with a battery capacity of 40 kWh. They calculated a calendar lifetime of the EV battery at 100 % state of charge (SOC) of about 1483 days. Based on this, they simulated a frequency control with different SOC and power. With a SOC of 90 %, the battery life increases in two scenarios. In scenario 1, the battery life increases by 79 days when operating at 0.5 kW and in scenario 2, the life increases by 23 days when operating at 1 kW. If the SOC is at 50 %, the results improve. In this case, scenario 1 results in an extension of the service life by 539 days and scenario 2 by 272 days.

The study of [20] simulated the battery degradation of a Nissan Leaf with a battery capacity of 24 kWh. The results can be seen in Fig. 1. V2G HP @W means that V2G operation was

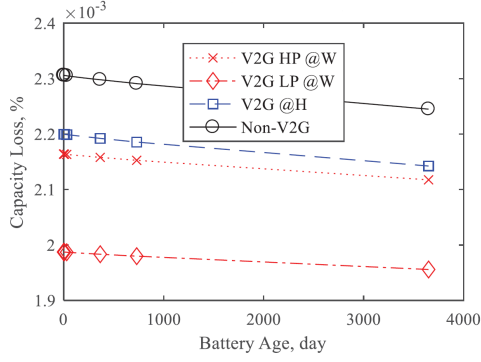


Fig. 1. Capacity loss in different scenarios, taken from [20]

performed with a 10kW charger at the workplace and V2G LP @W with a 3 kW charger. The plot of V2G @H describes performing V2G at home at night with a 3 kW charger and Non-V2G means degradation of a car that does not use V2G service. The authors concluded that the reduction in capacity loss in the idle state is higher than the increasing capacity loss in the run state. The capacity loss can be reduced up to 13.51 %.

IV. BIDIRECTIONAL V2G ECONOMICAL ASPECTS

Two major cost items have an influence on the V2G balance. These are the battery and the charger. The additional hardware needed for the implementation of a bidirectional charging station increases the price [9]. More important are the costs for the battery. These depend on the degradation of the batteries when V2G is deployed. Initial studies show that lead-acid and NiMH batteries are not profitable when V2G is performed [21]. But lithium-ion batteries have the potential to be cost-effective [7]. Various studies calculated the economic gain in different application modes of V2G.

Based on the battery degradation simulation in [19], frequency control is profitable. Increasing the battery life does not generate any losses. In the best case, i.e. frequency control for 10 hours per day in Japan with a continuous power of 0.5 kW, 900 ¥/kWh (~8.66 \$/kWh) can be earned. The results for different SOC and continuous power used as a function of time are visualised in Fig. 2. A similar result is described in [22]. With correct dimensioning of the battery capacity and V2G contract, the battery wear is lower than the value of the frequency control power.

Based on fixed degradation costs expressed in \$/kWh, the economic value of three V2G applications was investigated. Fig. 3 shows the results. The time frame for this study is one year. Base load means performing peak shaving at normal load on the electricity grid. The profit per kWh is one third of peak load times. Spin reserve operation is calculated for 20 times a year. [23]

The authors of [14] calculated the degradation cost (D_c) of the battery with this equation:

$$D_c = \frac{B_c}{Cap \cdot N_d} \quad (1)$$

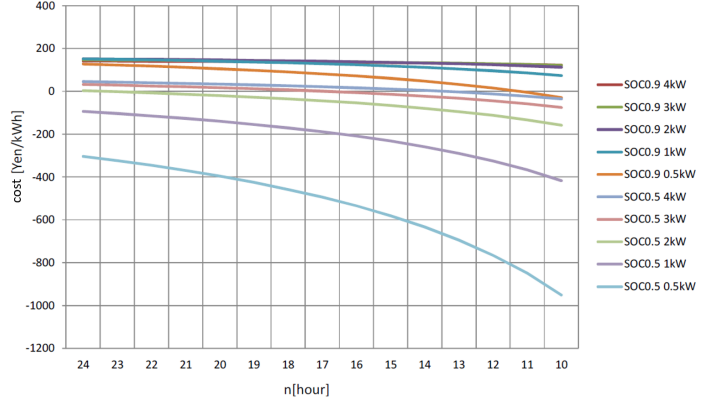


Fig. 2. Costs at performing frequency regulation, taken from [19]

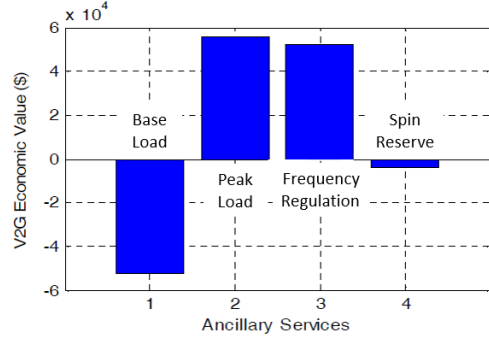


Fig. 3. V2G annual profit for different services, taken from [23]

With B_C as the battery cost in \$/kWh, Cap as the capacity factor until EOL of the battery and N_d the maximum numbers of discharges. Using a battery price of 250 \$/kWh, an average maximum number of discharges of 3000 and a capacity factor of 0.8, the degradation factor is calculated to 0.1042 \$/kWh. The calculation was made using real-time market and network demand data for 2011 and 2012. The EV conducts V2G between 8 am and 5 pm at 8 kW charging stations. This results in a profit per car of \$338.56 in 2011 and \$39.24 for 2012. 2011 represents a peak grid stress year, which maximizes the V2G profit. [14]

Based on the battery degradation shown in section III, the authors of [18] calculated a V2G income for a life cycle of three battery types. Two batteries from plug-in hybrid electric vehicles (PHEV) and one from an EV were investigated. The results can be seen in TABLE I.

TABLE I
V2G INCOME COMPARED TO BATTERY PRICE, TAKEN FROM [18]

	PHEV 1	PHEV 2	EV
Battery Size(kWh)	3.4	11.6	40
Cycle Life	5000	5000	1000
Price 2012(\$)	3,400	11,600	12,000-20,000
Goal Price(\$)	1,700	3,400	4,000-6,000
V2G Income(\$)	12,800	29,200	15,800

V. FUTURE DEVELOPMENT

The ISO 15118-”Road vehicles - Vehicle to grid communication interface”, defines a standard for communication between EVs and charging stations for V2G use. V2G support based on ISO 15118 is expected to be available in the next generation of EVs within the next five years. [24]

To increase comfort and simplify use, wireless V2G is an option. There are already studies conducted looking at wireless bidirectional charging. In [25], a concept for bidirectional wireless charger with an efficiency of more than 90% at a power transfer of 7kW is presented, considering the impact on health. The authors of [26] built a prototype with a self-resonance PWM based controller that achieves a power transfer of 6.6kW with an air gap of 12-20 cm.

In order to reduce the price of bidirectional chargers, studies have already developed a bidirectional charger with an output power of up to 50kW that eliminates one of the power stages and consists of only two stages [27].

To achieve low CO₂ emissions, the integration of renewable energies is necessary. Scientists have studied the application scenarios of EVs with renewable energy generators, peak load reduction and valley filling of the distribution grid, shared dispatch with generator units, frequency modulation, etc. The highest degree of utilisation of the renewable energy [28], load smoothing [29], lowest generation cost of power grid [30], lowest CO₂ emissions [31] and highest main revenue of EV [28] are investigated.

With the increasing number of photovoltaic systems (PVs), their interface converters and dynamic behaviour are critical to the stability of the power grid. Grid and system rules also require reactive power injection during a fault in the system to support grid stability [32]. Until now, grid codes enforced that PV generators connected to the grid had to be disconnected during a fault in the grid. This can be remedied by the EV chargers by feeding in reactive power during grid faults. Thus, the PV systems can be operated even during faults. In addition, the EVs can compensate the low active power production of the PV plants. [7,9]

To become even less dependent on fossil fuels, the surplus of renewable energy that is not consumed by the base load and charging EV can be converted into hydrogen. The hydrogen produced can be used to tank fuel cell vehicles (FCV), which can completely replace all operational gas turbine-based power plants with a total capacity of 217GW. To achieve this, 2.5 million FCVs are required to generate energy for the grid, which corresponds to 3.7% of the cars registered in Germany on 01.01.2020. It is therefore possible to reach a CO₂ neutral energy supply until 2050 by storing hydrogen and using V2G with EVs and FCVs. [33,34]

VI. CONCLUSIONS

In this paper, the advantages and possibilities of V2G were shown. Furthermore, the effects of V2G on batteries were investigated and economic aspects were analysed. Finally, perspectives for future development were pointed out.

The results of battery degradation show a reduction of battery wear. However, it is critical to see that in [19] the battery degradation without V2G is calculated for a SOC of 100%, which is not realistic as it is known that a high SOC (above 80-90%) leads to wearing out the battery. For this reason, it is not predictable that battery degradation will decrease in this scenario due to V2G. Knowing that the battery shows few to no degradation at a SOC around 50% at low power, it is realistic that performing V2G with power adjusted to the battery size, the degradation is not significant. This is confirmed by the results in [20], but further research is necessary.

From an economic point of view, there are profitable and loss-making applications. Frequency control and peak load shaving during high peaks in the power grid show profitable applications. For reactive power control, the impact on the EV is zero, as the charging stations can take over this application. The only unprofitable application is spinning reserve. As shown in Fig. 3, the cost factor is not markable high and can be compensated by the other profitable applications. Another way to make this or the other services more attractive is using second life batteries. This means collecting the batteries that have already reached EOL status for EVs in a large battery storage to reduce the required EV power. These batteries can still be operated as stationary energy storage with their 70-80% remaining capacity.

In summary, V2G is a promising technology for the future. With the inclusion of EVs, massive investments in intermediate storage to stabilise the grid can be avoided. With further research and development of bidirectional charging stations, their cost can be reduced. Due to the price reduction and readiness for series production in the next few years, bidirectional charging stations can already be installed in the planned expansion of charging stations in Germany.

In addition, the grid operators and politicians are requested to create attractive offers and present them to EV owners. Either with a dynamic pricing policy as in the studies of section IV or by monthly free charging for a certain amount of kWh if the car is connected to a bidirectional charger. Subsidies for the installation of bidirectional chargers at home are also possible.

REFERENCES

- [1] V. T. Tran, D. Sutanto, and K. M. Muttaqi, “The state of the art of battery charging infrastructure for electrical vehicles: Topologies, power control strategies, and future trend”, in *2017 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, Nov. 2017, pp. 1–6, iSSN: 2474-1507.
- [2] A. Y. Saber and G. K. Venayagamoorthy, “Plug-in Vehicles and Renewable Energy Sources for Cost and Emission Reductions”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 4, pp. 1229–1238, Apr. 2011, conference Name: IEEE Transactions on Industrial Electronics.
- [3] Kraftfahrt-Bundesamt, “Verkehr in Kilometern - Inländerfahrleistung (VK), Entwicklung der Fahrleistungen nach Fahrzeugarten seit 2015”, p. 9, 2015.
- [4] A. Alemanno, D. Fiorello, A. Martino, G. Pasaoglu, G. Scarcella, C. Thiel, C. Zubaryeva, European Commission, Joint Research Centre, and Institute for Energy and Transport, “Driving and parking patterns of European car drivers a mobility survey.”, 2012, oCLC: 1111229299. [Online]. Available: <http://bookshop.europa.eu/uri?target=EUB:NOTICE:LDNA25627:EN:HTML>

- [5] S. Han, S. Han, and K. Sezaki, "Development of an Optimal Vehicle-to-Grid Aggregator for Frequency Regulation", *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 1, no. 1, pp. 65–72, Jun. 2010, conference Name: IEEE Transactions on Smart Grid.
- [6] I. Sami, Z. Ullah, K. Salman, I. Hussain, S. M. Ali, B. Khan, C. A. Mehmood, and U. Farid, "A Bidirectional Interactive Electric Vehicles Operation Modes: Vehicle-to-Grid (V2G) and Grid-to-Vehicle (G2V) Variations Within Smart Grid", in *2019 International Conference on Engineering and Emerging Technologies (ICEET)*, Feb. 2019, pp. 1–6, iSSN: 2409-2983.
- [7] M. Ehsani, M. Falahi, and S. Lottifard, "Vehicle to Grid Services: Potential and Applications", *Energies*, vol. 5, pp. 4076–4090, Dec. 2012.
- [8] T. Sousa, H. Morais, J. Soares, and Z. Vale, "Day-ahead resource scheduling in smart grids considering Vehicle-to-Grid and network constraints", *Applied Energy*, vol. 96, pp. 183–193, Aug. 2012. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261912000591>
- [9] K. M. Tan, V. K. Ramachandaramurthy, and J. Y. Yong, "Integration of electric vehicles in smart grid: A review on vehicle to grid technologies and optimization techniques", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 53, pp. 720–732, Jan. 2016. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211500982X>
- [10] M. C. Kisacikoglu, B. Ozpineci, and L. M. Tolbert, "Examination of a PHEV bidirectional charger system for V2G reactive power compensation", in *2010 Twenty-Fifth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, Feb. 2010, pp. 458–465, iSSN: 1048-2334.
- [11] L. Shuguang and Y. Zhenxing, "Progress and Prospect of Electric Vehicle's V2G Technology", in *2019 6th International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE)*, Dec. 2019, pp. 412–416.
- [12] S. Shafiq and A. T. Al-Awami, "Reliability and economic assessment of renewable micro-grid with V2G electric vehicles coordination", in *2015 IEEE Jordan Conference on Applied Electrical Engineering and Computing Technologies (AEECT)*, Nov. 2015, pp. 1–6.
- [13] S. Han, S. Han, and K. Sezaki, "Economic assessment on V2G frequency regulation regarding the battery degradation", in *2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)*, Jan. 2012, pp. 1–6.
- [14] A. A. Almhizia and J. M. Snodgrass, "Investigation of V2G economical viability", in *2018 IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC)*, Feb. 2018, pp. 1–6.
- [15] B. Dietz, K. Ahlert, A. Schuller, and C. Weinhardt, "Economic benchmark of charging strategies for battery electric vehicles", in *2011 IEEE Trondheim PowerTech*, Jun. 2011, pp. 1–8.
- [16] C. Zhou, K. Qian, M. Allan, and W. Zhou, "Modeling of the Cost of EV Battery Wear Due to V2G Application in Power Systems", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 26, no. 4, pp. 1041–1050, Dec. 2011, conference Name: IEEE Transactions on Energy Conversion.
- [17] S. Drouilhet, B. Johnson, S. Drouilhet, and B. Johnson, "A battery life prediction method for hybrid power applications", in *35th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, ser. Aerospace Sciences Meetings. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Jan. 1997. [Online]. Available: <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.1997-948>
- [18] S. Han and S. Han, "Economics of V2G frequency regulation in consideration of the battery wear", in *2012 3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe)*, Oct. 2012, pp. 1–8, iSSN: 2165-4824.
- [19] S. Tamura and T. Kikuchi, "V2G Strategy for Frequency Regulation Based on Economic Evaluation Considering EV Battery Longevity", in *2018 IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*, Oct. 2018, pp. 1–6, iSSN: 0275-0473.
- [20] J. Guo, J. Yang, W. Cao, and C. Serrano, "Evaluation of EV battery degradation under different charging strategies and V2G schemes", in *8th Renewable Power Generation Conference (RPG 2019)*, Oct. 2019, pp. 1–7.
- [21] S. B. Peterson, J. Apt, and J. F. Whitacre, "Lithium-ion battery cell degradation resulting from realistic vehicle and vehicle-to-grid utilization", *Journal of Power Sources*, vol. 195, no. 8, pp. 2385–2392, Apr. 2010. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775309017443>
- [22] U. Kempton, K. Huber, B. Letendre, and P. Brunner, "A Test of Vehicle-to-Grid (V2G) for Energy Storage and Frequency Regulation in the PJM System", *University of Delaware: MD, USA; Pepco Holdings Inc.: Washington, DC, USA; PJM Interconnect: Norristown, PA, USA; Green Mountain College: Poultney, VT, USA*, p. 32, Nov. 2008.
- [23] O. A. Nworgu, U. C. Chukwu, C. G. Okezie, and N. B. Chukwu, "Economic prospects and market operations of V2G in electric distribution network", in *2016 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (TD)*, May 2016, pp. 1–5, iSSN: 2160-8563.
- [24] M. Mültin, "ISO 15118 as the Enabler of Vehicle-to-Grid Applications", in *2018 International Conference of Electrical and Electronic Technologies for Automotive*, Jul. 2018, pp. 1–6.
- [25] K. Tachikawa, M. Kesler, and O. Atasoy, "Feasibility Study of Bidirectional Wireless Charging for Vehicle-to-Grid", Apr. 2018.
- [26] J. Lee and B. Han, "A Bidirectional Wireless Power Transfer EV Charger Using Self-Resonant PWM", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 4, pp. 1784–1787, Apr. 2015, conference Name: IEEE Transactions on Power Electronics.
- [27] J. Niessen, P. Deck, M. Conrad, and C. P. Dick, "Two-Stage 50kW DC-Charger with Output Voltage Range from 200V to 940V", in *PCIM Europe digital days 2020; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*, Jul. 2020, pp. 1–8.
- [28] B. Sun, J. Sun, and H. Dong, "Unit dispatching optimization model for wind power absorption of electric vehicle based on timesharing charging price", *Renewable energy*, no. 1, pp. 110–118, 2017.
- [29] J. Hou, Q. Hu, and Z. Tan, "Multi-objective optimization model of collaborative WP-EV dispatch considering demand response", *Electric power automation equipment*, vol. 36, no. 7, pp. 22–27, Jul. 2016.
- [30] D. Liu, Y. Wang, and X. Yuan, "Collaborative optimization of charging and discharging of electric vehicles and wind/thermal power generation systems", *Journal of Electrical Technology*, vol. 32, no. 3, pp. 18–26, 2017.
- [31] Z. Lu, C. Jiang, X. Li, H. Zhao, and H. Wang, "Low-carbon benefit analysis on coordinating investment for clean energy and electric vehicle charging stations", vol. 31, no. 19, pp. 163–171, Oct. 2016.
- [32] C. Lee, C. Hsu, and P. Cheng, "A Low-Voltage Ride-Through Technique for Grid-Connected Converters of Distributed Energy Resources", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 47, no. 4, pp. 1821–1832, Jul. 2011, conference Name: IEEE Transactions on Industry Applications.
- [33] V. Oldenbroek, S. Wijtzes, A. v. Wijk, and K. Blok, "Fuel cell electric vehicle to grid H2: Balancing national electricity, heating transport systems a scenario analysis for Germany in the year 2050", in *2017 IEEE Green Energy and Smart Systems Conference (IGESSC)*, Nov. 2017, pp. 1–6.
- [34] "Kraftfahrt-Bundesamt - Bestand - Jahresbilanz - Bestand." [Online]. Available: https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Jahresbilanz/b_jahresbilanz_inhalt.html?nn=2598042

Battery Technology: New Developments

Maria Karing

Faculty of Electrical Engineering and Information Technology

OTH Regensburg

Regensburg, Germany

maria.karing@st.oth-regensburg.de

Abstract—The lithium-ion battery technology is a well-established, widely used high energy density electrochemical energy storage technology. Li-ion batteries are currently dominating the market of portable electronic devices and have been successfully implemented for the electric vehicle market as well as stationary energy storage. Ongoing research in this area has assured a decrease in cost while improving energy and power density. The technology, however, reaches its limits, due to the continuous growth of the electromobility market and the need for large scale energy storage for renewable energy production. In the past decades, the variety of battery technologies has evolved and is currently intensively studied. New concepts include batteries based on alternative charge carrier ions (single (Na^+ , K^+) or multivalent (Mg^{2+} , Ca^{2+}), metal-sulfur, metal-air (or metal-oxygen) as well as “all-solid-state battery” and redox flow batteries and might be suitable for diverse applications. This review paper covers the main technological developments and scientific challenges in the field of battery technology. First, state-of-the-art electrochemical energy storage technology – lithium-ion batteries – will be discussed, including its advantages and topics of concern, that are being investigated lately. Further insights into the so-called “post lithium-ion batteries”, with a concentration on the technologies with the highest potential, i.e. sodium-ion, and lithium-sulfur battery technologies, will be given. To conclude, a summary of the recent achievements in battery technology and future trends will be presented.

Index Terms—battery technology, lithium-ion, sodium-ion, lithium-sulfur, redox flow, battery

I. INTRODUCTION

A frequently growing energy demand and the dependence on fossil fuel, as well as increased amount of greenhouse gases, has given a direction in the utilization of renewable, sustainable energy sources, such as wind or solar energy, as well as emission-free transportation.

Since the introduction of the lithium-ion technology it has not only become a dominant technology for the market for portable electronic devices (PED), but also has been successfully implemented for all types of electromobility, as well as for stationary energy storage [1]. Lithium-ion batteries (LIBs) have a number of advantages in comparison to other types of batteries: high efficiency, relatively high energy density ($>200 \text{ Wh kg}^{-1}$), and high working voltage (3.7 V) reliable performance characteristics, and a good cycle life [2], [3].

The shift towards electrical vehicles (EVs) continuously increases the demand for high energy density LIBs, leading to the depletion of lithium resources and, thus, to a price increase [4]. Moreover, there is an urge for large-scale energy storage devices, that can assure even distribution and better regulation

of electrical energy from the intermittent renewable energy sources in a cost-effective way [5], [6].

The next-generation technologies, suitable either for stationary application or automotive purposes, include systems based on alternative ions; metal-sulfur, metal-air technology, as well as “all-solid-state” (ASSBs) and redox flow (RFBs) batteries. The new technologies are often referred in the papers as post lithium-ion batteries (PLIBs) [5], [7] or “side-by-side” technologies [8]. RFBs have high scalability and offer separate control over energy and power [9]. Li-air batteries are characterized by the lowest technology readiness level (TRL) so far; ASSBs are remaining in the laboratory scale in a form of small pouch cells; Panasonic, however, claims the availability of the technology in a full scale in the next decade [10]. Sodium-ion (SIBs) and lithium-sulfur (Li-S) batteries are considered to have the highest potential for commercialization in the near future [5]. Li-S is attractive for its high energy density, whereas attention to SIBs technology has been driven due to its low-cost and natural abundance of raw material [7].

II. LITHIUM-ION BATTERIES

LIBs consist of cathode, anode, electrolyte, and separator (see Fig. 1). Each part of the batteries has been developed in the last decades, using synthesis/modification of materials. The development of new material is focused on high working voltage and volumetric capacity, low self-discharging properties, and cycle stability [3], [11].

A. Cathode Materials

Layered lithium transition metal oxides currently dominate LIBs market. The first introduced lithium-ion cathode material was LCO - lithium cobalt oxide, followed by LMO - lithium

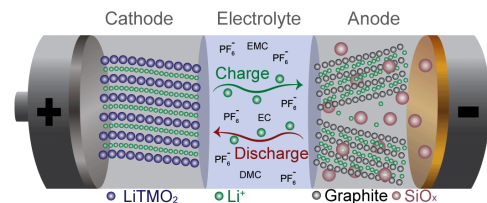


Fig. 1. State-of-the-art lithium-ion battery. Composite of graphite and SiO_x (is not presented in all commercial cells) as an active anode material, a lithium transition metal oxide (TM = Co, Ni, Mn or other metals) as an active cathode material, and a liquid electrolyte based on LiPF_6 conducting salt and a mixture of carbonates as solvents [11].

manganese oxide and LFP - lithium iron phosphate. LMO is mainly used as additive in cathode blends, whereas LCO with the theoretical specific capacity of 274 mAh g^{-1} still dominates the PED market [11]. Most common and promising cathode materials are given in the Table I.

One of the ways to improve performance of LCO cathodes is a surface modification using metal oxide coating, which protects the original cathode at high voltage and acts as a passivation layer, preventing structural degradation. Surface modification with antimony-doped tin oxide (ATO-LCO) and syntheses of ATO nanoparticles with natural graphite (c/ATO-NG) is a promising strategy to achieve higher energy density LIBs. Doping of foreign elements (Mg and P) is used to prevent thermal runaway on LCO cathodes and to improve cycle performance. For improvement of the theoretical capacity various over-lithiated oxides (OLOs) were introduced. OLOs offer exceptionally high specific capacity over 250 mAh g^{-1} at high voltage over 4.5 V and, therefore, are on the point of interest for the development of new cathode species [3].

Due to environmental and moral concerns linked to Co, and its high price, Co content is continuously being replaced with Ni in higher energy LIBs. For example, NCA (nickel cobalt aluminium) has allowed improvement in specific capacity and longer lifetime; NMC (nickel manganese cobalt) in its turn significantly enhanced lifetime and safety, having, on the other hand, lower energy density [11], [12]. The other free from cobalt cathode materials, expecting to enter the market are the high voltage spinel (LMNO) and Li-rich layered oxides (LRLO). However, they cannot be utilized with the conventional electrolytes [11]. The instability of the common electrolyte under high voltage conditions or poor rate capability and capacity retention of Li-excess materials limits the possible use of Co-free materials [12].

Phospho-olivine-type cathode materials like LFP only consist of abundant materials and, therefore, are considered to be eco-friendly [11]. The cathodes, however, cannot meet requirements for automotive industry in terms of energy content at the material level [12]. LMP - lithium manganese phosphate - has attracted attention due to its larger theoretical capacity, and the energy density of 701 Wh kg^{-1} . But due to its drawbacks there have been no applications in practical batteries. Iron manganese phosphate-based material (LFMP), which combines the advantages of both, LFP and LMP, is considered to be one of the promising cathode materials, however, improvement of specific capacity, rate performance and easiness of synthesis procedure are required [11], [14].

B. Anode Materials

Graphite has been widely used as an anode material in LIBs. Even though achieving the reversible capacity of 372 mAh g^{-1} is possible, the extension of the energy density is difficult. Strategies as surface modification with foreign materials and composite layers have been used to undergo the mentioned issues [3]. Safety issues of graphite anode can be overcome using a redox couple with a higher lithiation potential. Lithium titanate oxides (LTO) retain considerably higher working po-

tential and is a structurally stable material with an extremely flat potential plateau during charging and discharging process. However, it has a halved specific capacity of graphite and low intrinsic electronic conductivity and diffusion coefficient. The main markets for LTO anodes are public transportations and medical devices, where safety is extremely important [11].

Silicon is a well-suited anode material due to several advantages: theoretical capacity of 3579 mAh g^{-1} , it is abundant, non-toxic and eco-friendly, and shows proper average voltage of ca. 0.4 V . The challenges, linked with Si anodes: significant volume change of the electrode; low thermal stability and low volumetric capacity. Composition of silicon, graphite and carbon (Si/G/C) in micrometer-sized hierarchical structures is an effective way to tailor morphology, surface and robustness of the anode, improving the overall electronic conductivity of the electrode [3], [11].

The alternatives to silicon are germanium (Ge) and tin (Sn). High electrical conductivity of Ge anodes in comparison to silicon and carbon, makes high rate capability achievable. Considering the high specific capacity of transition metal (TM) oxides, they are seen to be promising anode candidates. An optimized $\text{TiO}_2\text{-MoO}_3$ (TO-MO) hybrid anode demonstrates gravimetric capacity of 670 mAh g^{-1} , and exceptional cycling retention during 200 cycles. LIBs combined out of LCO cathode and TO-MO anode showing exceptional energy density of 285 Wh kg^{-1} . The low Coulombic efficiency should be increased up to 90% to assure their use in advanced LIBs for commercial applications [3].

C. Electrolyte

The electrolyte should not only provide an efficient transportation of Li^+ ions over a wide temperature range, but also there is a direct contact of the electrolyte with a highly reductive anode, extremely oxidative cathode, the separator, and other inactive material. Therefore, the electrolyte should offer high ionic and low electronic conductivity, high chemical and thermal stability, and a wide electrochemical window [12].

Functional additives suppress unwanted electrolyte decomposition at the electrodes, improving its electrochemical performance. The merge of a vinylene carbonate (VC) additive, with an organophosphorus compounds additive protects the anodes and lessens manganese dissolution at the cathode [3].

Carbonate-based electrolytes are volatile and flammable, what leads to a limited thermal stability, and low recyclability. Replacement of carbonate solvents with non-flammable ionic liquids (ILs) and adding of flame-retardant additives (e.g., organic phosphorus compounds) are in the point of research interests. Nevertheless, there is still a need of considerable improvement of liquid electrolytes to access high-performance batteries [12], [10].

Many studies are concentrated on the attempts to solidify electrolytes based on gel polymer electrolytes (GPE) and all solid-state electrolytes to increase LIB's safety. GPEs are utilizing only a certain amount of liquid components, reducing, thus, risk of leakage, and offer higher ionic conductivity compared to solid polymer electrolytes (SPEs). Though, the

TABLE I
COMPARISON OF THE VARIOUS CATHODE MATERIALS USED IN LITHIUM-ION BATTERIES [1], [3], [11], [13], [14]

Cathode	Spec. Capacity (mAh g ⁻¹)	Avg. Potential (V vs. Li ⁺ /Li)	Advantages	Disadvantages	Applications
LCO	150	3.90	Widely used, good cycle life and energy	Restrained charged state thermal stability	Mostly smaller PE
LFP	165	3.45	Excellent thermal stability, long cycle and shelf life, appropriate power capability	Need for special preparation conditions, lower energy, patent issues	Mostly stationary energy storage and heavy-duty automotive applications
LFMP	155	3.90	Good capacity and cycling performance, low cost, environmentally friendly	Capacity loss	High power applications
NCA	188	3.80	Excellent energy, good cycle life and power capability	Moisture sensitivity (even in discharged state), restrained charged state thermal stability	Motive power and premium electronic applications
NMC	160-190	3.70	Great combination of characteristics (energy, power cycle life, thermal stability)	Patent issues	Portable and high power applications, incl. electric vehicles

compatibility between the graphite anode and GPEs need an improvement. To sum up, the electrolyte has the greatest complexity of the all battery elements, but offers the most possibilities for performance improvement [3], [10].

III. POST LITHIUM-ION BATTERIES

Fig. 2 concludes advantages and disadvantages of PLIBs, which have been discussed in the paper.

A. Sodium-Ion Batteries

Metal-ion concept systems are replicating the LIB technology using alternative charge carriers. Na-ion, among others, is the most attractive technology. The chemical similarity to the Li-ion allows the adoption of the well-established LIB technology, promising a fast progress in this field [15].

Difference from the LIBs in ionic radius of the shuttling ions results in a need for different physical properties of the ion storage materials, solvents and salts for electrolyte. The choice of the anode is restricted to hard carbon, that offers capacities over 300 mAh g⁻¹ and shows promising performance. Producibility of hard carbons out of bio-waste enhances the sustainability of the batteries. However, it suffers from irreversible capacity loss upon the first cycle, restricting the achievable energy density. Sodium salts have higher solubility what results in serious interfacial instability issues for SIBs. This leads to a fast electrolyte decomposition, reducing the cycle life. In addition, migration of the soluble species to the cathode stimulates self-discharge. Electrochemical properties of carbonaceous materials can be improved by doping with light-weight heteroatoms (e.g., B, N, P, and S). The other alternatives for anodes in SIBs are alloying and conversion materials (e.g. Sn alloys, transition metal sulfides, and others). They are compatible with carbonates electrolytes; however, the volume change and the price can be an issue [2], [6], [8].

In case of the cathode, a Na-based counterpart can only be obtained by replacement of Li for Na during the electrochemical process. Na-based cathodes show generally lower

capacities than Li cathode materials. Therefore, more alkali ions are needed to achieve high energy density. There are three major types of compounds for the SIBs cathodes. Sodium transition metal oxides - have open structures, high reversible capacity and high working voltage; however, most of the oxides are suffering from an irreversible phase transition, insufficient battery performance and air instability. Prussian blue analogues - have high operation voltage, rate capability and cycling stability. The main problem is associated with the control of lattice defects, low tap density, crystallinity, water content, and thermal instability. Polyanionic compounds are attractive for the structure stability, high safety, and small volume change during cycling. However, polyanion-based insertion compounds retain comparably low gravimetric capacity and low volumetric energy density. To broaden the use of these compounds the high-power polyanion materials has to be explored [2], [8]

For electrolyte dominant salt, the solvent, and the optimal concentration are similar to the LIBs. The utilization of propylene carbonate (PC) as solvent, which causes exfoliation of graphite in LIBs, is possible. The use of co-solvents (e.g. ionic liquids) may be advantageous for the safety improvement [15]. Liquid electrolytes are more common for SIBs. Even though non-aqueous electrolyte-based SIBs show great electrochemical performance, they have serious safety issues (electrolyte leakage, flammability, dendrite growth). Therefore, high safety, environmentally friendly, low-cost aqueous SIBs (ASIBs) has been driven attention in large-scale and long cycle life applications. To improve the ASIBs capabilities, developing of hybrid sodium-ion battery or utilization of concentrated electrolyte must be considered [2].

Utilization of aluminium foil as current collector on the anode helps to prevent critical safety issues of LIBs, that comes from the oxidation of the copper foil. Al foil does not oxidize at high potentials, thus, the full discharge of the batteries is achievable before transportation; therefore, shipment costs for Na-ion batteries are significantly lower [8].

Sodium-ion battery		Lithium sulfur battery	
Advantages	Disadvantages	Advantages	Disadvantages
Low cost and high availability of sodium	Poor cycle life	Low cost and natural availability of sulfur	Capacity degradation due to polysulfide dissolution
Chemical similarity to LIB	Low energy density	High theoretical energy density of sulfur (1672 mAh g ⁻¹)	Volume variation of sulfur
Similar to LIB cell performance	Large volume variation during sodiation and desodiation process	Non-toxic	Polysulfide shuttle-contamination of the polysulfide species on the anode
Utilization of inexpensive cathode materials			

Fig. 2. Key features of examined post-lithium-ion battery technologies [7].

Possible application fields of SIBs are narrowed by the lower energy density to large-scale energy storage and light-duty vehicles for short range transportation. Additionally, SIBs with layered sodium TM oxides as cathode materials can provide comparable to LIBs energy density and, thus, can be used in vehicle electrification. Deeper research on anode materials and electrolytes compositions is required to utilize a full SIB system [8], [7].

B. Lithium-Sulfur Batteries

Interest to the Li-S batteries is driven due to its high theoretical energy density, low cost, safety, and environmentally compatible manufacturing due to abundance of sulfur [16]. Combination of sulfur with lithium in an electrochemical cell forms one of the highest energy material couples. In addition, water-based manufacturing of the sulfur-based electrodes reduces the use of energy-intensive toxic solvents.

Main challenges, constrained to Li-S batteries, are the relatively low cycle life and the rate capability. Moreover, electrolyte consumption at the anode/electrolyte interface causes electrolyte depletion. Necessity for an excess of electrolyte and lithium in the cell reduces the gravimetric and volumetric energy densities of the whole system. Improvement of the Li-S battery technology relies on the development of a stable and reversible lithium-metal electrode [17], [10].

Improvement of the anode/electrolyte interface relies on the development of a stable electrolyte system and in utilization of solid-state electrolyte coatings. Realization of a stable lithium anode can improve specific energy, energy density, safety, and power performance [10].

Li-S batteries are characterized by high energy density; however, insoluble polysulfide tends to precipitation inhibition on the lithium metal anode, resulting in material loss and impedance increase. Except of the polysulfide shuttle at the anode, exceeding of a certain sulfur loading leads to the increase of the overall current density on anode and cathode, what accelerates lithium dendrite growth. Addition of new solvents and additives beyond lithium nitrate is crucial for the electrolyte adjustment and, thus, reduction of the anode corrosion. The solid-state electrolyte based on sulfide-based inorganic glasses is the most promising concept that allows the achievement of reasonable power capability [7], [17].

Following parameters have to be adapted to improve the battery performance: reduction of lithium-ion transport; microscale structuring or porosity in the cathode layer to obtain higher-power systems; usage of carbon additives to increase the power capabilities; development of electrolyte viscosity. Additionally, packaging and sealing are important for the usage in space and maritime applications [10].

Lithium anode design determines cycle life, energy efficiency, and power-capability of the batteries. High overall electrolyte content, and inactive materials (e.g. current collector) taking a high mass fraction in Li-S cells, decreasing, thus, specific energy of the batteries and limiting volumetric energy density. “Li-free” anodes, above all with lithiated nickel-manganese-cobalt-oxide cathode, have demonstrated high potential, however, their applicability has to be investigated [17].

There is a need for integration strategies for the cells and cell packs to real-world applications, with the following evaluation of the integrated cells in functional tests, certification, and safety assessment. The current performance of Li-S batteries is suitable for applications with low power and limited cycle life requirements [10]. Improving the cell chemistry of Li-S batteries may allow further energy density improvements. Reducing of amount of passive material will be profitable for the volumetric energy. Stabilization of the anode/electrolyte interface is essential for improving the cycle life of the cell [17].

IV. CONCLUSION AND FUTURE WORK

The full-cell development of the battery depends upon a combination of compatible cathode/anode couple, enhanced electrolytes, and optimized separators. There is a need for standardization, and systematic deep studies to achieve progress towards low-cost and high energy density batteries.

The use of one or another battery technology will depend on the application and the system needs, there will not be the one technology for all applications. For example, Na-ion is interesting for light-duty vehicles with a short-range, redox flow battery is a choice for large-scale applications, whereas LIBs remain the most suitable and affordable technology for mobile applications. It is considered, that the Li-based battery technology will remain for a long time on the market. The discussed alternative battery technologies are relatively young and further development and research are needed to compete with the state-of-the-art lithium-ion technology. Development direction is given by the demand for low cost, and specific energy and energy density.

It is clear, that future generation batteries must be based on abundant materials and eco-efficient production, enabling, thus, long-term sustainable solutions. Concerning the industrial applications in electric vehicles, replacement of the liquid electrolyte with a polymer electrolyte is considered as the trend for further development. The important issues, that have not been addressed in this paper are battery management systems, which are essential for the improvements of lifetime, efficiency, and safety; and efficient recycling technologies, which also should be considered for the next-generation batteries.

REFERENCES

- [1] G. E. Blomgren, "The development and future of lithium ion batteries," *J. of the Electrochem. Society*, vol. 164, no. 1, pp. A5019-A5025, Jan. 2017, doi: 10.1149/2.0251791j.
- [2] X. Pu, H. Wang, D. Zhao et al., "Recent progress in rechargeable sodium-ion batteries: toward high-power applications," *Small*, vol. 15, no. 32, Aug. 2019, Art no. 1805427, doi: 10.1002/sml.201805427.
- [3] S. Choi, G. Wang, "Advanced lithium-ion batteries for practical applications: technology, development, and future perspectives," *Adv. Mater. Technol.*, vol. 3, no. 9, Sep. 2018, Art no. 1700376, doi: 10.1002/admt.201700376.
- [4] J. Wang, S. Myung, Y. Sun. "Recent progress in rechargeable potassium batteries," *Adv. Funct. Mater.*, vol. 28, no. 43, Oct. 2018, Art no. 1802938, doi: 10.1002/adfm.201802938.
- [5] T. Placke, R. Kloepsch, S. Dühnen, M. Winter, "Lithium ion, lithium metal, and alternative rechargeable battery technologies: the odyssey for high energy density," *J. Solid State Electrochem.*, vol. 21, no. 7, pp. 1949-1964, Jul. 2017, doi: 10.1007/s10008-017-3610-7.
- [6] R. J. Gummow, G. Vamvounis, M. B. Kannan, Y. He. "Calcium-ion batteries: current state-of-the-art and future perspectives," *Adv. Mater.*, vol. 30, no. 39, Sep. 2018, Art no. 1801702, doi: 10.1002/adma.201801702.
- [7] L. J. Aaldering, C. H. Song, "Tracing the technological development trajectory in post-lithium-ion battery technologies: A patent-based approach," *J. Cleaner Prod.*, vol. 241, Dec. 2019, Art no. 118343, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118343.
- [8] Y. E. Durmus, H. Zhang, F. Baakes et. Al. "Side by side battery technologies with lithium-ion based batteries," *Adv. Energy Mater.*, vol. 10, no. 24, Jun. 2020, Art no. 2000089, doi: 10.1002/aenm.202000089.
- [9] Z. Rhodes, J. R. Cabrera-Pardo, M. Li, S. D. Minter. "Electrochemical advances in non-aqueous redox flow batteries," *Isr. J. Chem.*, vol. 60, pp. 1-13, Aug. 2020, doi: 10.1002/ijch.202000049.
- [10] S. Dörfler, S. Walus, J. Locke et al., "Recent progress and emerging application areas for lithium-sulfur battery technology," *Energy Technol.*, Oct. 2020, Art no. 2000694, dot: 10.1002/ente.202000694.
- [11] M. Armand, P. Axmann, D. Bresser et al., "Lithium-ion batteries – current state of the art and anticipated developments," *J. Power Source.*, vol. 479, Jun. 2020, Art no. 228708, doi: 10.1016/j.jpowsour.2020.228708.
- [12] S. Dühnen, J. Betz, M. Kolek et al., "Toward green battery cells: perspective on materials and technologies," *Small Methods*, vol. 4, no. 7, Jul. 2020, Art no. 2000039, doi: 10.1002/smt.202000039.
- [13] Q. Wang, N. Tian, K. Xu et al., "A facile method of improving the high rate cycling performance of $\text{LiNi}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$ cathode material," *J. Alloys and Compounds*, vol. 686, pp. 267-272, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.jallcom.2016.06.017.
- [14] Y. Deng, C. Yang, K. Zou et al., "Recent Advances of Mn-rich $\text{LiFe}_{1-y}\text{Mn}_y\text{PO}_4$ ($0.5 \leq y < 1.0$) cathode materials for high energy density lithium ion batteries," *Adv. Energy Mater.*, vol. 7, no. 13, Jul. 2017, Art no. 1601958, doi: 10.1002/aenm.201601958.
- [15] A. Ponrouch, M. R. Palacín, "Post-Li batteries: promises and challenges," *Phil. Trans. R. Soc.*, vol. 377, no. 2152, Aug. 2019, Art no. 20180297, doi: 10.1098/rsta.2018.0297.
- [16] D. Zheng, G. Wang, D. Liu et al., "The progress of Li-S batteries – understanding of the sulfur redox mechanism: dissolved polysulfide ions in the electrolytes," *Adv. Mater. Technol.*, vol. 3, no. 9, Sep. 2018, Art no. 1700233, doi: 10.1002/admt.201700233.
- [17] A. Varzi, K. Thanner, R. Scipioni et al., "Current status and future perspectives of lithium metal batteries," *J. Power Source*, vol. 480, Dec. 2020, Art no. 228803, doi: 0.1016/j.jpowsour.2020.228803.

Communication in multi-microcontroller systems

1stViola Schneider
Faculty of Electrical Engineering
OTH Regensburg
Regensburg, Germany
viola1.schneider@st.oth-regensburg.de

Abstract—Today, the size and complexity of connected systems is increasing rapidly. If we look at motor vehicles, for a long time their mode of operation was mainly mechanically secured. Nowadays, electronic components take over a large number of these tasks. For example, a lot of effort is being put into increasing safety in car. Likewise, many assistance systems increase comfort on board. Each of these systems has more and more participants, that have to communicate with each other to ensure the functionality of the respective process.

This paper will discuss what kind of communication can be used to connect a large system of microcontrollers. Since there are numerous possibilities, only wired variants are considered. The four most common bus-system protocols SPI, I2C and CAN (FD) will be discussed as well as the Ethernet protocol. The function of these protocols is briefly explained. Furthermore, it is demonstrated in which layer the Open System Interconnect model (OSI model) performs. Afterwards the advantages and disadvantages of each protocol in general are discussed. Their usability within a large multi-microcontroller systems is classified. Finally, we elect a communication protocol that best fits the requirements of decentralized and real-time capable multi-microcontroller system and consider its expandability and sustainability.

Index Terms—communication systems, communication networks, computer network management, multiprocessor interconnection network, protocols

I. INTRODUCTION

The number of participants in a system is increasing. Most of them are interconnected and need to communicate with each other to secure the functionality of the system. Per definition communication is a process where information is exchanged between individuals through a common system of symbols, signs or behaviour [1]. Therefore, this paper describes the four most common wired communication protocols and examines their usability in a large multi-microcontroller system. The protocols are evaluated for their usability in a decentralised system and their expandability. The elected protocol always depends on the requirements of the corresponding system. Therefore, there is not only one answer to this question and for each new system it must be determined, which criteria will be used to select the protocol.

Chapter II explains the basics for a multi-microcontroller communication system. In chapter III the four most common transmission protocols are briefly explained. Chapter IV describes the approach for selecting one of these protocols for an example project.

II. BASIC DEFINITIONS

The following chapter describes the definition of a multi-microcontroller system. In addition the OSI reference model is explained.

A. Multi-microcontroller systems

The first thing that needs to be clarified in this paper is the definition of a microcontroller. Considering a huge variety of definitions a very common one is the following one:

A microcontroller is an integrated system containing a minimum of a microprocessor, dynamic and non-volatile memory, and a set of peripherals consistent with all design requirements. [2]

A multi-microcontroller system is a connection of at least two microcontrollers between which communication takes place.

B. OSI reference model

The Open System Interconnect Model (OSI model) is described in layers and thus explains the complex communication systems through a hierarchical approach. Each layer makes its services available to the layer above. Figure 1 shows the seven layers of the OSI reference model. Since the following communication protocols are mainly located in the lowest two layers, the ones above are only briefly explained.

Application Layer	7
Presentation Layer	6
Session Layer	5
Transport Layer	4
Network Layer	3
Data Link Layer	2
Physical Layer	1

Fig. 1. OSI reference model [3]

1. The physical layer is the transmission technology basis. Here, for example, the cables used for communication are defined. This layer determines which medium is used and how the bits are represented. There are three media that can be used for transmission: copper lines, fibre optic lines and wireless transmission. Special bit sequences inform about the beginning and end of a transmission in all media. [4]

2. The data link layer controls and secures the point-to-point connections. The primary task of the layer is to transmit the bit stream in logical units. It protects the message frames and provides them with additional information such as a frame check sequence. The addresses of these layers are physical addresses. They allow the transport of packages within local networks. [4]
3. The network layer takes care of a logical structure of the communication. It directs the proper transport of each individual packet. [4]
4. The transport service is determined by the transport layer. It ensures that all bits are transmitted correctly, the order is not changed, and nothing is sent twice. [4]
5. The synchronisation and dialogue flow between two communication participants is regulated in the session layer. This layer is a particularly important part for network operating systems. [4]
6. The presentation layer takes over the data compression, i.e. the reduction of the data volume to minimize the network load, and the encryption of the data to prevent unauthorised persons from reading it. [4]
7. The application layer informs about the status of the communication. It is also an interface to the actual application on top. [4]

III. COMMUNICATION PROTOCOLS

In the following, the protocols SPI, I2C, CAN and CAN FD as well as the Ethernet are briefly explained.

A. Serial Peripheral Interface

In the late 1980s, today's NXP Semiconductors developed the Serial Peripheral Interface (SPI). SPI is a synchronous communication and operates on the lowest two layers of the OSI reference model. Figure 2 shows the connections between a master two slaves. A slave participant has four connections to the master. The Serial Clock (SCLK) transmits the timing from the master to the slave. The Master Out, Slave In (MOSI) input is used for instructions and data from the master and the Master In, Slave Out (MISO) is for the slave's response to the master node. These wire connections are shared by all slaves. The fourth connection to the master is the Slave Select (SS) input. This is connected from the master to only the respective slave. The SS connections at the master node are numbered. In order to address the required station the corresponding line is set to active LOW by the master. A compatible clock frequency is selected by the master as well. [5]

After a slave has been selected, the system waits a short time to ensure that the selected node is ready. Then the bi-directional transmission starts, as can be seen in figure 3. The master transmits the timing with the pulses of the SCLK, usually eight pulses in total. During each of the clock cycles, one bit is transmitted from the master to the slave via the MOSI line and simultaneously one bit from the slave's register to the master via the MISO line. Typically, each register contains 8 bits and a 16-bit cyclic buffer is generated. [5]

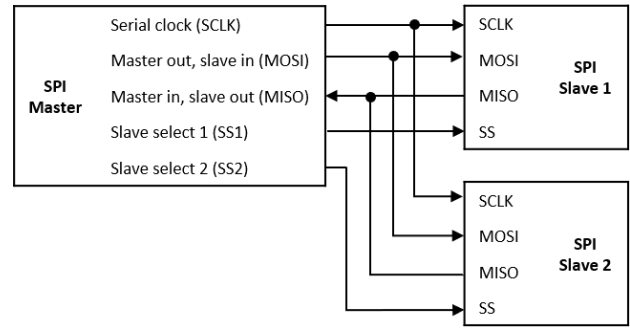


Fig. 2. SPI bus connection [5]

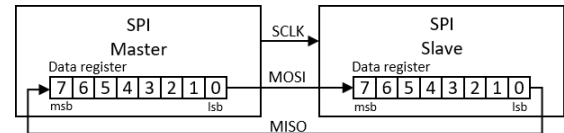


Fig. 3. SPI cyclic buffer [5]

a) Advantages: SPI is very well suited for communication with sensors, is very easy to implement and has no complex hardware requirements. It is always full duplex capable (simultaneous transmission and reception) with the selected slave and has the ability to achieve a very high data rate, up to 400 Mb/s [6]. Since each slave is addressed individually, no addressing is required. This also eliminates collisions on the bus. [5]

b) Disadvantages: Each additional participant on the bus requires a new pin on the master for the SS. There is also no acknowledgement mechanism and thus no confirmation of a successful transmission. SPI works best in very short distances, which means for large systems it is not suitable. [5]

B. Inter-integrated circuit

The transmission on the Inter-integrated circuit (I2C) bus, which works on the layer one and two of the OSI reference model, takes place over two lines, as shown in figure 4. The value of the pull up resistors depend on the capacity of the I2C bus. The bus lines are called serial clock line (SCL), on which the timing is transferred from the master, and serial data line (SDA). The timing can be stretched and thus slowed down by the slave. The transmission starts when the master sends a start bit during a positive clock pulse. Afterwards the transmission of the data follows whenever positive pulses of the clock are present. The end of the transmission is signalled by a stop bit. If a repeated start signal follows instead, a new transmission is started. [5]

Each data unit consist of 8 data bits and every transmission is confirmed with an acknowledgement (ACK). This ACK is generated by the master when reading from the slave and by the slave when writing to the slave. The ACK signal is a LOW-level on the data line at the ninth clock edge of the CLK. [5] The I2C protocol allows several masters to be connected to one bus. These then behave like slaves to another master. The

master listens to the bus permanently to determine whether it is busy or free to send. If the bus is free and several masters start transmitting at the same time, the timing is reduced to the slowest speed of one of the masters. Similar to a slave this master slows down the pulses. Then all masters send simultaneously until there is a conflict. This means that one master sends the logical "0" and another sends the "1". The bus assumes the "0" level. The master sending the logical "1" notices that there is a conflict and resets its sending process. This can be repeated until only one master is sending. [5] I2C supports different data rate modes, the standard mode with 100 Kb/s, the fast mode with 400 Kb/s and the high speed mode with up to 3.4 Mb/s [6].

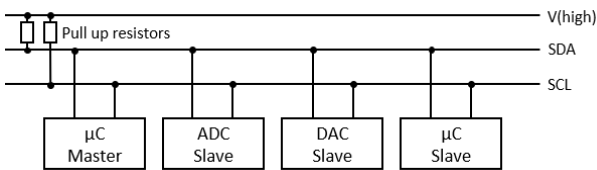


Fig. 4. I2C bus connection [5]

a) *Advantages:* The I2C protocol has the advantage that it only requires two data lines. I2C is very well suited for communication with sensors and it is also very easy to expand, even during operation (hot pluggin). [5]

b) *Disadvantages:* The protocol is slower than newer bus systems. It is also very susceptible to interference and unsuitable for longer data lines. [5]

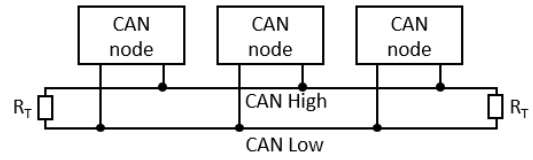
C. Controller Area Network

The Controller Area Network (CAN) is a multi-master system in which all participants have equal rights. The Protocol takes place on the lower two OSI layers. Figure 5 shows the CAN bus. It has two different lines, the CAN High and the CAN Low line, which have opposite polarities. The two lines are connected with a termination resistor - usually 120 Ω - at the beginning and at the end of the bus to prevent reflections on the trace.

In theory, an infinite number of participants can be connected to the CAN bus. In short high-speed networks, the major constraint on bus length is the propagation delay of the receiver through the transceiver. The relative importance of the propagation delay of the electrical medium increases as the bus length is increased. The bus length is terminated by the selected bit rate. For a bit rate of 10 kb/s, the bus can be 5000 metres long and for the maximum bit rate of 1 Mb/s, it may only be a maximum of 30 metres. [7]

Since all participants have equal access to the bus, it is necessary to decide which node may occupy the bus first if several participants want to send their messages simultaneously. This is done by using the identifier part of the CAN frame. The message with the lower ID is sent first on the bus. [7]

The data frame in the CAN protocol is composed of different parts, shown in figure 6. The fields required for successful CAN communication are the message address, called Identifier



RT: Termination resistor 120 Ω

Fig. 5. CAN bus connection [7]

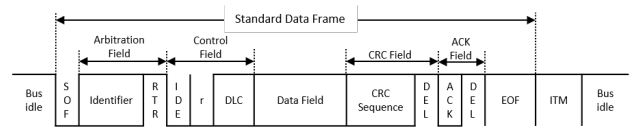


Fig. 6. Standard CAN frame [7]

(ID), the Data Length Code (DLC), the Cyclic Redundancy Check (CRC sequence), acknowledgement of receipt and the acknowledgement field. The Data Field can transfer up to 8 bytes. Besides the data frame, there are also error frames and remote frames. The remote frame is identified by setting the Remote Transmission (RTR) bit to recessive, which is "1". As a consequence this frame contains no data. The error frame violates the bit stuffing used for CAN, i.e. six dominant bits are transmitted in succession. [7]

To connect a microcontroller to the CAN bus it is necessary to connect a transceiver. This translates the CAN High and CAN Low signal level of the bus line to the receive and transmit interfaces required by the microcontroller. [7]

a) *Advantages:* CAN has the possibility to connect many participants to the bus and it can be expanded easily. They all have equal rights and speeds of up to 1 Mb/s can be achieved. CAN suits very good in assemblies. [7]

b) *Disadvantages:* To connect new participants to the bus, a transceiver is required. Worst case latency can be high. The CAN protocol is more extensive than SPI or I2C. With high access rates, the CAN protocol has weaknesses in real-time capability. [7]

D. Controller Area Network Flexible Data-rate

The Controller Area Network Flexible Data-rate (CAN FD) is a further development of the CAN protocol. It was developed to solve some of the problems of the existing CAN network. CAN FD is based on the standard CAN protocol and is therefore downward compatible [8]. The first part of a CAN FD frame can be seen in figure 7. The 11 bit Identifier can be extended by additional 18 bits. The protocol supports data rates of up to 10 Mb/s in the data field - and the associated fields such as DLC - and can transfer up to 64 bytes [8]. The Bit Rate Switch (BRS) is used to decide whether the bit rate of the data field frame part is changed. [9]

a) *Advantages:* Significantly faster data rates can be achieved compared to the standard CAN protocol. In addition, up to 64 bytes can be sent in one frame. CAN FD is able to use the existing hardware and software of a standard CAN

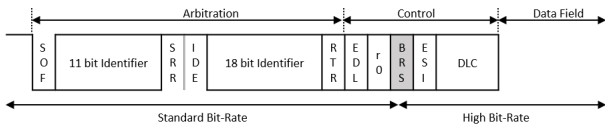


Fig. 7. CAN FD frame part [10]

network, so it can be easily migrated. CAN FD solves the weaknesses of the real-time capability of the classic CAN protocol. [9]

b) Disadvantages: To use CAN FD new CAN FD controllers are necessary. As long as standard CAN devices are still connected to the bus, the classic CAN protocol has to be used. CAN FD devices can usually use the standard CAN protocol, but the latter cannot use the CAN FD protocol. [9]

E. Ethernet according to IEEE 802.3

The first prototype of the Ethernet protocol was already developed at the beginning of the 1970s. The architecture of the IEEE 802.3 standard is based on the definition of functions of the two lower layers of the OSI reference model. An Ethernet packet, as shown in figure 8, consists of the preamble, the destination MAC address, the source MAC address, the package type, the data and finally a frame check sequence. Between two packets there is an interframe gap of 20 bytes. Bus access with Ethernet is controlled with Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD). [4]

CSMA is the monitoring of activity on the cable. Before

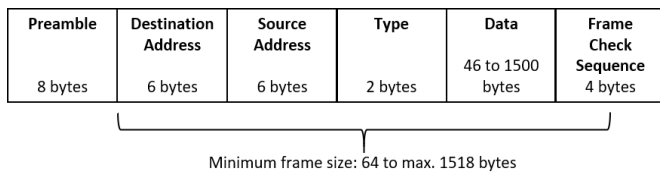


Fig. 8. Ethernet frame [4]

a participant has to transmit, it ensures that the transmission medium is not occupied by another participant. If the medium is detected as free (Idle State), a certain period of time (Inter-frame Gap) is waited until the participant starts the transmission while still listening to the bus (Listening while Talk). Nowadays, however, the collision problem is circumvented with switches. [4]

a) Advantages: Numerous options for implementing an Ethernet network. It is very well suited for assemblies. With low load, a station willing to transmit gets fast access to the transmission medium. [4]

b) Disadvantages: The Ethernet protocol is much more complex than SPI, I2C, CAN or CAN FD. For simpler systems, the advantages of the Ethernet protocol are therefore often not profitable.

IV. PROTOCOL ELECTION

The selection of a communication protocol always depends on the requirements of the system. Each system has differ-

TABLE I
EVALUATION OF THE PROTOCOLS

	decentralisation	in large systems	speed	simplicity	no. of participants	expandability
SPI	-	-	++	++	-	-
I2C	+	-	-	++	-	++
CAN	+	+	+	+	+	+
CAN FD	+	+	++	+	+	+
Ethernet	+	++	++	-	+	+

ent requirements, therefore each system must be considered individually. In order to select a communication protocol, a separate selection system must be chosen for each multi-microcontroller system. The criteria used for the example project are multi-master capability, or decentralisation, the behaviour of the protocols in large systems, the speed, the number of possible participants and the expandability of the system. Table I shows the evaluation of the protocols based on previously defined criteria. These refer to a decentralised multi-master system. It is advantageous that a system can be easily expanded in order to connect further participants to the bus if necessary. Depending on the system, the simplicity of the protocol can be neglected. The SPI protocol requires a central master, so it is not suitable for a decentralised system. I2C is a master-slave network in which multiple masters exist that can serve as slaves for the current master, but due to susceptibility to interference it is not suitable in large systems. In order to decentralise a system, equal rights for all participants would be advantageous. The CAN protocol provides this equality of all participants. Both CAN and CAN FD are suitable protocols for a decentralised multi-master system. Ethernet is also suitable. For a large but relatively simple network and with short message lengths, CAN or CAN FD would still be the better choice. If high data rates are an advantage, CAN FD can perform even better than the standard CAN protocol. Ethernet would be ideal for more complex processes with very high access requirements. In order to support real-time capability, it is therefore advantageous to select the CAN FD protocol.

V. CONCLUSION AND OUTLOOK

In this paper it was evaluated that the CAN FD protocol is most favourable for a decentralised multi-master system. In general, a individual evaluation must be carried out for each system. It is also advantageous to consider other transmission options, such as wireless transmission. In a decentralised battery management system, where the data throughput is only moderately high, the classic CAN protocol is sufficient [11]. Often, different protocols can also be combined with each other. For in-car networks, typical bus technologies are CAN, FlexRay or Most. However, Ethernet is also increasingly being used there [12]. In addition, efforts are being made in researching and improving new concepts such as CAN XL, which is intended to combine the advantages of CAN and Ethernet [13].

REFERENCES

- [1] Definition of communication. <https://www.merriam-webster.com/dictionary/communication>, 12.12.2020.
- [2] Donald Norris. *Programming with STM32: Getting started with the Nucleo Board and C/C++*. McGraw-Hill Education, New York, 2018.
- [3] Clyde F. Coombs and Catherine Anne Coombs, editors. *Communications network test and measurement handbook: Local, cellular, and public networks; performance testing; network management; quality of service*. McGraw-Hill, New York, 1998.
- [4] Riggert. *Rechnernetze 5.A*. Carl Hanser Verlag GMBH & Co, 2014.
- [5] *Samsung ARTIK Reference: The Definitive Developers Guide*. Apress, Berkeley, CA, 1st ed. edition, 2016.
- [6] D. Trivedi, A. Khade, K. Jain, and R. Jadhav. Spi to i2c protocol conversion using verilog. In *2018 Fourth International Conference on Computing Communication Control and Automation (ICCCUBEA)*, pages 1–4, 2018.
- [7] *Controller area network communication standard: Understanding and using the CAN bus*. Springer, New York, 2011.
- [8] Bomu Cheon and Jae Wook Jeon. The can fd network performance analysis using the canoe. In *IEEE ISR 2013*, pages 1–5, Seoul, 2013. IEEE.
- [9] Ricardo de Andrade, Armando A. M. Lagana, Marcos A. C. Guedes, Joao F. Justo, Armando A. M. LaganaKleber N. Hodel, and Felipe Serafim Albaladejo. A didactic platform to study of can fd bus. In *IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON), 2013*, pages 318–323, Piscataway, NJ, 3/13/2013 - 3/15/2013. IEEE.
- [10] N. Jyothsna and Dr. G. V. R. Sagar. Implementation of control area network with flexible data rate protocol controller. IJSR, 2016.
- [11] Andrea Reindl, Viola Schneider, Hans Meier, and Michael Niemetz. Software update of a decentralized, intelligent battery management system based on multi-microcomputers. In *Tagungsband 2. Symposium Elektronik und Systemintegration ESI 2020: Intelligente Systeme und ihre Komponenten: Forschung und industrielle Anwendung*, pages 8–19, URN: urn:nbn:de:bvb:860-opus4-2078, 2020.
- [12] Kasper Revsbech, Tatiana K. Madsen, and Henrik Schioler. High precision testbed to evaluate ethernet performance for in-car networks. In *2012 12th International Conference on ITS Telecommunications (ITST 2012)*, pages 548–552, Piscataway, NJ, 2012. IEEE.
- [13] Vector Informatik GmbH. Ip concepts with can xl. https://assets.vector.com/cms/content/know-how/_technical-articles/CAN_XL_IP_Concepts_Hanser_automotive_202008_PressArticle_EN.pdf, 16.01.2021.

MQTT: Konzept, Vorteile, Einsatzbereiche, Vergleich mit XMPP

Tobias Ostermeier

*Fakultät Elektro- und Informationstechnik
Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg
Regensburg, Deutschland
tobias.ostermeier@st.oth-regensburg.de*

Zusammenfassung—Die Vernetzung von Internet of Things Geräten und das Ermöglichen eines Datenaustausches ist die zentrale Aufgabe von Übertragungsprotokollen. Für die Machine-to-Machine Kommunikation werden derzeit verschiedene Protokolle verwendet. In diesem Paper wird auf das Konzept, die Vorteile und Einsatzbereiche des Message Queue Telemetry Transport (MQTT) Protokolls eingegangen. Danach wird es hinsichtlich Nachrichtenaufbau, Kommunikationsstruktur und Übertragungsdauer mit dem ursprünglich für Instant Messaging entwickelten Extensible Messaging and Presence Protocol (XMPP) verglichen. MQTT ist ein leichtgewichtiges und bandbreitenschonendes Publish/Subscribe-Protokoll, das speziell für den Einsatz in unzuverlässigen Netzwerken mit einer geringen Bandbreite geeignet ist. Zusätzlich bietet es drei verschiedene Quality of Service Level. Einsatzbereiche von MQTT sind Umgebungen in denen Netzwerk- und Energieressourcen gering sind, wie in batteriebetriebenen Endgeräten im Wireless Local Area Network oder in Funknetzwerken. XMPP verwendet die Extensible Markup Language für Nachrichten, wobei MQTT ein binäres Nachrichtenformat verwendet.

Schlüsselwörter—MQTT, XMPP, Internet of Things, Machine-to-machine Kommunikation, Anwendungsschicht-Protokoll

I. EINLEITUNG

Durch das Internet of Things (IoT) wird einer stark steigenden Anzahl an Geräten ermöglicht, über das Internet miteinander zu kommunizieren und Daten auszutauschen. Um diesen Datenaustausch zu ermöglichen und um den Einsatzbereich entsprechende Anforderungen zu erfüllen, wurden einige Übertragungsprotokolle entwickelt. [1] [2].

Das Message Queue Telemetry Transport (MQTT) Protokoll ist speziell für die Übertragung von Telemetriedaten in ressourcenarmen Umgebungen entwickelt worden [3]. Das Extensible Messaging and Presence Protocol (XMPP) adressiert überwiegend Anwendungen im Instant Messaging (IM) [2].

Die Auswahl eines Protokolls für einen spezifischen Anwendungsfall hängt stark von den Umgebungsbedingungen ab und kann für Entwickler aufgrund der zahlreichen Möglichkeiten herausfordernd sein [2]. Die Aktualität des Themas lässt sich aus der prognostizierten Anzahl Geräte im IoT erschließen. Diese soll zwischen 21 Milliarden und 50 Milliarden bis ca. 2020/2021 liegen [6] [7, S. 20].

Dieses Paper liefert einen Überblick über MQTT und zeigt dessen Stärken sowie Einsatzbereiche auf. Es werden auch Unterschiede von MQTT und XMPP hinsichtlich Nachrichtenaufbau, Kommunikationsstruktur und Übertragungsdauer

dargestellt. Dadurch sollen dem Leser die Grundlagen der Protokolle vermittelt werden und mögliche Einsatzgebiete dargestellt werden.

Es existieren mehrere Versionen von MQTT wie MQTT 3.1.1, MQTT 5.0 und MQTT for Sensor Networks (MQTT-SN). In diesem Paper wird überwiegend auf MQTT 3.1.1 eingegangen, da die grundlegenden Prinzipien auch für MQTT 5.0 gelten. MQTT-SN weist deutliche Unterschiede zu MQTT auf, weswegen es in diesem Paper nicht behandelt wird. [3] [8]

II. KONZEPT, VORTEILE UND EINSATZBEREICHE VON MQTT

A. Konzept

Das Konzept von MQTT wird anhand der Kommunikationsstruktur und dem generellen Nachrichtenaufbau vorgestellt.

1) *Kommunikationsstruktur*: MQTT ist ein leichtgewichtiges verbindungsorientiertes Client-Server-Publish/Subscribe-Nachrichtenprotokoll der Anwendungsschicht. Clients können als Publisher Nachrichten senden oder als Subscriber Nachrichten empfangen. Ein Client kann Publisher und Subscriber mehrerer Nachrichten sein. Ein Publisher sendet Nachrichten unter einer sogenannten Topic an den Broker, der die Nachricht an alle Subscriber der jeweiligen Topic weiterleitet. Dies ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt. Der Broker kann eine Nachricht an keinen, einen, oder mehrere Subscriber weiterleiten. Die Nachrichten werden mithilfe der Topics z. B. „haus1/zimmer1/temp_sensor1“ strukturiert. Eine valide Topic kann sich aus mehreren mit einem Schrägstrich voneinander getrennten Topicleveln zusammensetzen. [3]

In MQTT 3.1.1 ist noch kein Standard enthalten, um mehrere Broker als Cluster arbeiten zu lassen. Es ist jedoch möglich die Implementierung eines Brokers von z. B. von Eclipse Mosquitto mit einem Loadbalancer als Cluster zu betreiben oder durch „bridging“ einen Nachrichtenaustausch zwischen Brokern zu ermöglichen. [4] [5]

Die Session zwischen Client und Broker wird über das Transmission Control Protocol (TCP) realisiert und dauerhaft aufrecht erhalten. Es kann eine Authentisierung der Clients beim Server mit Benutzername und Passwort gefordert werden. Der Nachrichtenaustausch kann mithilfe von Transport Layer Security verschlüsselt stattfinden. [3]

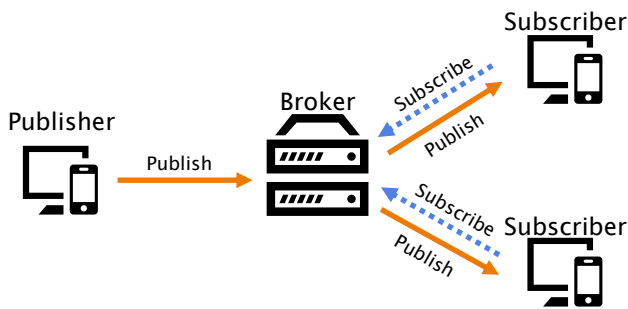


Abbildung 1. Schematische Darstellung eines MQTT Netzwerkes mit zentralem Broker sowie einem Publisher und zwei Subscribern.

2) *Nachrichtenformat*: Jede MQTT Nachricht kann in drei Teile untergliedert werden, den fixen Header, den variablen Header und die Nutzdaten. Der fixe Header umfasst immer zwei Byte. Dieser enthält den Nachrichtentyp sowie die Flags „DUP“, „QoS“ und „RETAIN“ und Informationen zur Größe der Nachricht. „DUP“ signalisiert, ob eine Nachricht ein Duplikat einer bereits gesendeten Nachricht ist, „QoS“ beschreibt das Quality of Service (QoS) Level und „RETAIN“, ob die Nachricht vom Broker aufbewahrt werden soll. Der zweite Teil ist der variable Header, der den Protokollnamen, Protokolllevel und weitere Flags enthalten kann. Dieser Headerteil ist nicht bei allen Nachrichtentypen vorhanden. Optionale Nutzdaten befinden sich am Ende einer Nachricht. In Abbildung 2 ist der beschriebene Aufbau einer Nachricht optisch dargestellt. Es sind 15 Nachrichtentypen definiert, wie z.B. CONNECT, PUBLISH oder SUBSCRIBE. [3]

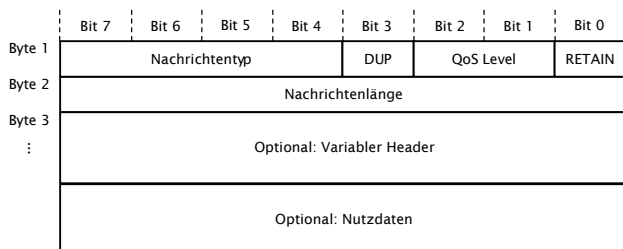


Abbildung 2. Schematische Darstellung einer MQTT Nachricht mit variablem Header und Nutzdaten.

B. Vorteile

Durch die Publish/Subscribe-Architektur können Sender und Empfänger entkoppelt voneinander operieren. Sowohl Clients als auch der Broker können Sender bzw. Empfänger von Nachrichten sein. Clients sind nicht auf das Wissen über die Existenz, die Verfügbarkeit oder die physikalische Adresse weiterer Clients angewiesen. Dies ermöglicht eine Entkopplung der Clients hinsichtlich Zeit, Raum und Synchronizität. [3] [9]

MQTT bietet den Clients die Möglichkeit in der Subscribe-Nachricht Topics über Wildcards effektiv zu filtern. Die Einzel-Level-Wildcard „+“ ermöglicht es ein Topiclevel zu überspringen und den darunterliegenden Pfad weiter zu spezifizieren, z. B. „haus1/+temp_sensor1“. Die Multi-Level-

Wildcard „#“ kann nur am Ende eines Topic Pfades eingesetzt werden, z. B. „haus1/#“. Durch diese wird die Elternebene sowie alle Topics der Kinderebenen abonniert. Durch die beiden Wildcards ist es mit geringem Aufwand möglich flexibel mehrere Topics zu abonnieren. [3]

Durch die Entkopplung von Sender und Empfänger ist es nicht garantiert, zu welchem Zeitpunkt der Empfänger eine gesendete Nachricht erhält. Durch Retained Messages wird die letzte gesendete valide Nachricht vom Broker zwischengespeichert und automatisch an Clients weitergeleitet, die die entsprechende Topic abonnieren oder abonniert haben. Somit kann einem Client immer die letzte valide Nachricht zur Verfügung gestellt werden. Eine besondere Retained Message stellt die Last Will and Testament (LWT) Nachricht dar. Diese Nachricht wird beim Verbindungsaufbau im Broker gespeichert. Falls die Verbindung zum Broker unvorhergesehen abbricht, sendet der Broker die LWT Nachricht an alle abonnierten Clients weiter, damit diese gegebenenfalls reagieren können. [3]

Das QoS Level stellt eine Vereinbarung zwischen Sender und Empfänger dar mit welcher Sicherheit eine Nachricht geliefert werden soll. Der Energieverbrauch kann durch ein an den Anwendungsfall angepasstes QoS Level minimiert werden [10]. Das Level 0 wird auch „fire and forget“ genannt, die Nachricht wird gesendet und wird nicht vom Empfänger bestätigt. Dadurch kann die Nachricht maximal einmal beim Empfänger ankommen. Bei Level 1 wird die Nachricht vom Empfänger bestätigt. Falls keine Bestätigung bei dem Sender ankommt, wird die Nachricht nach einer bestimmten Zeit erneut gesendet. Bei Level 2 wird durch einen Vier-Wege-Handschlag sichergestellt, dass eine Nachricht exakt einmal beim Empfänger ankommt. Durch QoS kann anwendungsspezifisch der Overhead bzw. die Übertragungssicherheit angepasst werden. [3]

C. Einsatzbereiche

MQTT wird in vielen Bereichen genutzt. Es kommt mitunter im Gesundheitswesen, bei Überwachungsanlagen, in der Versorgungstechnik, wie bei Ölpipelines oder bei Fernwärmeanbietern, und beim Facebook Messenger zum Einsatz. Dort kommt vor allem die Fähigkeit von MQTT zu tragen, dass mit günstigen und leistungsschwachen Geräten Nachrichten effektiv in unzuverlässigen Netzen mit geringer Bandbreite geroutet werden können. [6] [11] [12]

III. XMPP

In diesem Abschnitt sollen kurz die Grundlagen zu XMPP vermittelt werden.

A. Kommunikationsstruktur

XMPP versendet Nachrichten in der Extensible Markup Language (XML) durch eine auf TCP aufbauende dezentralisierte Client-Server-Architektur wie in Abbildung 3 dargestellt. [13]

Nachrichten von einem Client werden erst zum eigenen Server gesendet und von diesem ohne Zwischenserver direkt

über den Zielservers an den Zielclient geroutet [14, S. 11]. Der Server übernimmt die Aufgaben des Routens von Nachrichten zwischen Clients, des Zwischenspeicherns von Nachrichten und des Verwaltens von Verbindungen [15].

Alle Einheiten im XMPP Netzwerk besitzen eine Adresse, die JabberID, mit Username, Domain und Resource. Das Format einer JabberID ist `user@domain.de/resource`. [13]

Die Vorteile einer Publish/Subscribe-Architektur können mit dem XMPP Extension Protocol (XEP) XEP-0060 genutzt werden [14]. Durch diese Erweiterung können Clients Nachrichten an Nodes (bei MQTT Topics genannt) senden, welche dann von einem Pubsub-Service (XMPP Server) an die Subscriber weitergeleitet werden [16]. Es sind serverseitig zusätzliche Funktionen implementiert, jedoch keine QoS Level [15]. Für eine detaillierte Beschreibung der verfügbaren Funktionen kann die Spezifikation [16] herangezogen werden.

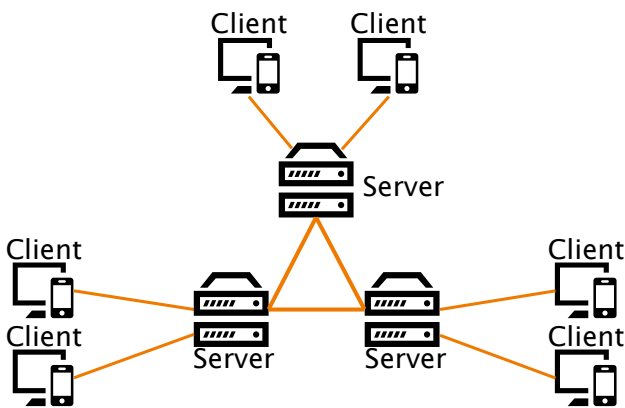


Abbildung 3. Schematische Darstellung des XMPP Netzwerkes mit drei Servern und je zwei Clients.

B. Nachrichtenaufbau

Ein Client kann eine Session mit einem XMPP Server aufbauen, einen sogenannten XML Stream. Nach erfolgreichem Verbindungsaufbau können Nachrichten, auch XML Stanzas genannt, versendet und empfangen werden. [14, S. 165] [13]

Ein XMPP Stanza ist ein „message“, „presence“ oder „iq“ XML Element. Die Attribute des Elements beinhalten unter anderem die JabberID des Senders und Empfängers, die Stream ID, Zeichencodierung und Version des Protokolls. Die Nutzdaten werden in Kinderelementen transportiert. Der Inhalt dieser ist abhängig von der Art der Nachricht und den verwendeten XEPs. [13] [14, S. 167]

IV. VERGLEICH VON MQTT UND XMPP

In diesem Abschnitt werden die Protokolle MQTT und XMPP hinsichtlich der Kommunikationsstruktur, dem Nachrichtenaufbau und der Übertragungsdauer verglichen.

Ein XMPP Netzwerk besitzt durch dessen dezentralisierte Architektur keinen Single Point of Failure, doch der Routingaufwand von Nachrichten wird dadurch erhöht [14, S. 11]. Da XMPP ursprünglich für IM in ressourcenreichen Netzwerken entwickelt wurde, eignet es sich gut zur serverübergreifenden

Kommunikation von Clients. Die komplexere Architektur und der höhere Aufwand beim Senden von Nachrichten macht es nicht optimal für das IoT. Durch XEPs kann XMPP gut an verschiedene Problemstellungen adaptiert werden und bietet dadurch eine Plattform für viele Anwendungsfälle [15]. MQTT wurde für die M2M Kommunikation entwickelt und ist dadurch speziell für ressourcenarme Netzwerke geeignet [3].

Zur Erstellung und zum Versenden einer MQTT Nachricht wird weniger Rechenleistung und Bandbreite benötigt als bei einer XMPP Nachricht. Dies lässt sich aus der binären Codierung von MQTT Headern im Vergleich zur Codierung in XML bei XMPP folgern.

Viele der in Abschnitt II-B vorgestellten Features sind auch in XMPP verfügbar. Die QoS Level sind davon jedoch ausgenommen [15]. Eine Implementierung bzw. Erweiterung der QoS Level wären bei XMPP und MQTT noch von Vorteil, da die Verfügbarkeit von nur rudimentären QoS Level laut [1] ein Grund für die Protokollfragmentierung im IoT ist.

Durch die simple Architektur von MQTT mit einem zentralen Server, den in Abschnitt II-B beschriebenen Vorteilen sowie die clientseitige leichtgewichtige Implementierung ist dieses Protokoll speziell für den Einsatz von rechenschwachen Prozessoren in unzuverlässigen Netzwerken geeignet [6] [8] [17].

Der Vergleich der Übertragungsdauer stellt eine Herausforderung dar, da die Umgebungsbedingungen sowie die Realisierungen der Server und Clients starken Einfluss auf das Ergebnis haben [6]. In den Papern [18] und [6] wurde die Übertragungsdauer von Sensordaten von Publisher zum Subscriber gemessen. Im ersten Paper benötigte eine MQTT Nachricht 0.589 ms, eine XMPP Nachricht 41.83 ms. Im zweiten Paper wurde die Übertragungsdauer in Abhängigkeit von den Nutzdaten gemessen. Mit zunehmenden Nutzdaten stieg die Übertragungsdauer von 2.53 ms zu 4.33 ms bei MQTT und von 4.11 ms zu 6.34 ms bei XMPP.

In den Papern ist zu erkennen, dass die Übertragungsdauer von den äußeren Bedingungen, wie Implementierung von Client und Server, Netzwerkauslastung und Art des Netzwerks abhängt. Die beiden zum quantitativen Vergleich herangezogenen Arbeiten bestätigen jedoch die Eigenschaften, welche aus der leichtgewichtigen Implementierung von MQTT folgt. Die Übertragungsdauer mit MQTT im Vergleich zu XMPP ist im Allgemeinen geringer. XMPP mit XEPs kann eine angemessene Plattform darstellen, um die Kommunikation zwischen Clients zu realisieren. Dies ist der Fall, wenn die oben zitierten Übertragungsdauern genügend kurz sind und eine optimale Nutzung der Bandbreite nicht priorisiert ist.

V. FAZIT

In diesem Paper wurden die Grundlagen des MQTT Protokolls vorgestellt. Unter anderem wurde das generelle Konzept der Publish/Subscribe-Architektur, der Nachrichtenaufbau, einige Features und Vorteile sowie mögliche Einsatzbereiche explizit betrachtet.

MQTT ist durch das leichtgewichtige Design mit geringem Energieverbrauch und Overhead speziell für ressourcenarme

Netzwerke und Geräte geeignet. XMPP ist durch den auf XML basierenden Stanzas weniger bandbreiteneffizient als MQTT. Ein Vorteil von XMPP ist die gute Erweiterbarkeit und Anpassbarkeit durch XEPs, wodurch mit einem Protokoll eine große Abdeckung erreicht werden kann. Die Übertragungsdauer von MQTT ist meist geringer als von XMPP.

Es besitzen beide Protokolle Vor- und Nachteile, weshalb es nicht möglich ist eines dieser Protokolle für alle IoT Anwendungen einzusetzen. Die Abhängigkeit der Performance von den Netzwerkbedingungen sollte immer mitbetrachtet werden. Es sollte für einen vorliegenden Anwendungsfall gesondert evaluiert werden, welches Protokoll die erforderlichen Eigenschaften besitzt.

LITERATUR

- [1] A. Al-Fuqaha, A. Khreishah, M. Guizani, A. Rayes, and M. Mohammadi, "Toward better horizontal integration among IoT services," in *IEEE Communications Magazine*, 2015, pp. 72–79, doi: 10.1109/MCOM.2015.7263375.
- [2] N. Naik, "Choice of effective messaging protocols for IoT systems: MQTT, CoAP, AMQP and HTTP," *IEEE Int. Systems Engineering Symp.*, Vienna, 2017, pp. 1–7, doi: 10.1109/SysEng.2017.8088251.
- [3] MQTT, 5.0 OASIS Standard, Andrew Banks, Ed Briggs, Ken Borgendale, and Rahul Gupta, 07.03.2019. [Online]. Available: <https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v5.0/os/mqtt-v5.0-os.html>
- [4] P. Jutadhamakorn, T. Pillavas, V. Visoottiviset, R. Takano, J. Haga, and D. Kobayashi, "A scalable and low-cost MQTT broker clustering system," in *Int. Conf. on Information Technology*, 2017, pp. 1-5, doi: 10.1109/INCIT.2017.8257870.
- [5] Z. Y. Thean, V. Voon Yap and P. C. Teh, "Container-based MQTT broker cluster for edge computing," in *Int. Conf. and Workshops on Recent Advances and Innovations in Engineering*, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICRAIE47735.2019.9037775.
- [6] Z. B. Babovic, J. Protic, and V. Milutinovic, "Web performance evaluation for internet of things applications," in *IEEE Access*, 2016, pp. 6974–6992, doi: 10.1109/ACCESS.2016.2615181.
- [7] A. Bahga, and V. Madisetti, *Internet of Things: A hands-on approach*. Vpt, 2014.
- [8] R. Kumar N.V., and M. Kumar P., "Survey on state of art IoT protocols and applications," *Int. Conf. on Computational Intelligence for Smart Power System and Sustainable Energy*, 2020, pp. 1–3, doi: 10.1109/CISPSSE49931.2020.9212227.
- [9] P. Eugster, P. Felber, R. Guerraoui, and A.-M. Kermarrec, "The many faces of publish/subscribe," in *ACM computing surveys*, 2003, pp. 114–131, doi: 10.1145/857076.857078.
- [10] J. Toldinas, B. Lozinskis, E. Baranauskas, and A. Dobrovolskis, "MQTT quality of service versus energy consumption," in *23rd Int. Conf. Electronics*, 2019, pp. 1–4.
- [11] M. B. Yassein, M. Q. Shatnawi, S. Aljwarneh, and R. Al-Hatmi, "Internet of things: survey and open issues of MQTT protocol," in *Int. Conf. on Engineering*, 2017, pp. 1–6.
- [12] S. Lee, H. Kim, D. Hong, and H. Ju, "Correlation analysis of MQTT loss and delay according to qos level," in *The Int. Conf. on Information Networking*, 2013, pp. 714–717.
- [13] O. Ozturk, "Introduction to xmpp protocol and developing online collaboration applications using open source software and libraries," in *Int. Symp. on Collaborative Technologies and Systems*, 2010, pp. 21–25.
- [14] P. Saint-Andre, K. Smith, and R. Troncon, *XMPP: The Definitive Guide*. O'Reilly Media, 2009.
- [15] H. Wang, D. Xiong, P. Wang, and Y. Liu, "A lightweight xmpp publish/subscribe scheme for resource-constrained IoT devices," in *IEEE Access*, 2017, vol. 5, pp. 16393–16405.
- [16] Xep-0060: Publishsubscribe, 1.19.0, P. Millard, P. Saint-Andre, and R. Meijer, 16.08.2020. [Online]. Available: <https://xmpp.org/extensions/xep-0060.html>
- [17] S. Jaikar, and R. Kamatchi, "A survey of messaging protocols for IoT systems," in *Int. Journal of Advanced in Management, Technology and Engineering Sciences*, 2018, vol. 8, no. 2, pp. 510–514.
- [18] B. H. Çorak, F. Y. Okay, M. Guzel, S. Murt, and S. Ozdemir, "Comparative analysis of IoT communication protocols," in *Int. Symp. on Networks, Computers and Communications*, 2018, pp. 1–6.

Impressum

Hans Meier, Michael Niemetz, Andrea Reindl
Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg
Fakultät Elektro- und Informationstechnik
Seybothstraße 2
93053 Regensburg