



OSTBAYERISCHE  
TECHNISCHE HOCHSCHULE  
REGENSBURG

# **FMS-BERICHTE**

**SOMMERSEMESTER 2021**

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

## **Seminar zu aktuellen Themen der Elektro- und Informationstechnik**

12. Oktober 2021



# Inhaltsverzeichnis

## Vorwort

- 1 Fundamentals and Applications of Metamaterials  
*Verena Marterer*
- 6 Entsorgung und Recycling von Elektroschrott: Aktuelle Situation und Trends  
*Dominik Kemeter*
- 11 Anwendungsfallbezogene Vor- und Nachteile unterschiedlicher Typen von E-Maschinen in Elektrofahrzeugen  
*Andreas Lang*
- v
- 16 Aktive Geräuschkompensation: Verfahren und Grenzen  
*Alexander Dischner*
- 21 Grundprinzip von aktuellen Wetterradaren in Deutschland  
*Stephanie Huber*
- 26 Einsatzfelder und Zukunftschancen von 5G jenseits von Smartphones  
*Maximilian Obermeier*
- 31 Dual-CAN (FD) - Betrachtung hinsichtlich Fehlerdetektion und Nachrichtenumleitung und funktionaler Sicherheit  
*Tobias Langer*



# 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 Sommersemester 2021 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.



# Fundamentals and Applications of Metamaterials

Verena Marterer

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

**Abstract**—Metamaterials are new artificial materials with unusual electromagnetic properties that are not found in naturally occurring materials. The specific design of the elementary building blocks and their composition into homogeneous or inhomogeneous materials is carried out with the aim of achieving extraordinary, or extreme effective properties that differ fundamentally from the properties of the constituents. Negative refractive indices, cloaking via materially realized coordinate transformations, and band gaps are the best-known examples.

In the areas of electrical engineering, material science, and optics, the focus is on the design of efficient metamaterials and their use for potentially novel applications in antenna and radar design, subwavelength imaging, and invisibility cloak design. The presented review article provides an application-centered view of the research field and aims to highlight the basic physical properties of materials with negative electrical permittivity and negative magnetic permeability as well as structural features that are significantly smaller than the operating wavelength. By means of the freedom of design provided by negative index materials, a possibility to redirect electromagnetic fields is shown. Relevance and applicability in microwave engineering are discussed with giving examples of these concepts in practical applications, particularly in the field of optics and antenna technologies. Future challenges and potential regarding design, modeling and fabrication are also addressed.

**Keywords**—*left-handed materials, nanocomposites, optical cloaking, refractive index, smart materials, split ring resonators, electromagnetic metamaterials*

## I. INTRODUCTION

Although the term metamaterials was largely unknown in engineering sciences as well as in mechanics until recently, the idea of optimizing materials through specific structural design is not new [1–3]. However, the focus here is often on the optimization of common properties such as stiffness [4, 5], energy dissipation [6, 7] or heat transfer [8]. In contrast, the crucial aspect of metamaterials, namely the generation of novel and unusual properties that are qualitatively different from those of their constituents, will be discussed more in depth throughout the paper.

Therefore, a general overview of the classifications and properties of metamaterial structures is used depending on the sign of permittivity  $\epsilon$  and permeability  $\mu$ . Permittivity and permeability of metamaterial composites can be negative in certain frequency bands and so it is possible to implement a medium with negative refractive index (NRM). Thus, we can directly affect electrophysical properties of the material by modifying material structure.

The objective of this research is to classify metamaterials from different points of view and help to make the correct selection of materials according to the choice of specialization (Fig. 1). All these approaches aim at generating exceptional

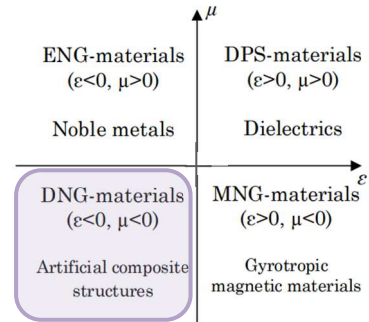


Fig. 1. A general classification of materials based on the electric permittivity  $\epsilon$  and magnetic permeability  $\mu$ . (according to [9])

linear effective properties, exploiting for this purpose the geometrically and materially linear behavior of the underlying structure. An extension of this concept to the nonlinear range by exploiting material and geometric nonlinearities, on the other hand, will not be considered here.

The literature review is organized as follows: The second section presents the basic physical properties of materials with a negative refractive index. So, before going further, it should be clarified how metamaterials can be created.

Looking at metals at the optical wavelength, negative permittivity can be observed relatively often. At the same time, however, it is very unusual to find natural materials that exhibit magnetic behavior at high frequencies. [10] In the third section, the most important structures known from the literature are presented, which are double-negative materials exhibiting both negative permeability and negative permittivity. The geometries mentioned show some essential advantages that make it possible to define a wide field of application.

The fourth section of the paper presents a compact overview of implement metamaterials in practical applications of microwave technology. One application area focuses on the optical superlens effect. The physicist John B. Pendry pointed out that a lens made of metamaterials could focus light for objects less than wavelength  $\lambda$  in size to a geometric point [11]. Moreover, the structure, the principle of operation, and advantages/disadvantages of metamaterial substrates are investigated for miniaturized printed antennas, improved electrically small antennas, leaky-wave antennas and complicated implementations due to corresponding artificial structures [12].

“Metamaterials applications will represent a multi-billion market within the next decade.” [13]. Finally, the fifth section deals with future prospects and outlooks. The most important technological challenges are discussed, and possible solutions are presented.

## II. PHYSICAL FOUNDATIONS

The electrical permittivity  $\epsilon$  and the magnetic permeability  $\mu$  serve as decisive factors for controlling the material parameters. Therefore, it is useful to consider the classification of materials shown in Figure 1 before turning to the specific structures and designs.

Materials that exhibit both positive permeability and positive permittivity are referred to as double positive (DPS) materials. As evidenced in [14], transverse electromagnetic waves exist in these media for which the vectors  $\mathbf{E}_0$ ,  $\mathbf{H}_0$ , and  $\mathbf{k}$  are mutually orthogonal and form a right-handed system (1). The Poynting vector  $\mathbf{S}$  points in the same direction as the wave vector  $\mathbf{k}$ .

$$\mathbf{S} = \frac{1}{2} \cdot (\mathbf{E}_0 \times \mathbf{H}_0) \quad (1)$$

In a single-negative (SNG) medium, either  $\epsilon$  or  $\mu$  is negative. They are divided into two classes: ENG (epsilon-negative) materials and MNG (mu-negative) materials. As soon as one of the constants takes a negative value, the refractive index of the incident beam becomes imaginary. Only damped (evanescent) wave propagation is possible.

In some artificial materials, both  $\epsilon$  and  $\mu$  are negative, so the terms double-negative (DNG) materials [15] and left-handed (LH) materials [16] in particular are used in various sources. Negative material constants result in a negative refractive index of the electromagnetic wave passing through the medium. As can be seen in Figure 2, the wave vector and the Poynting vector are parallel when the refractive index is positive and antiparallel when vice versa. Consequently, an incident beam on the interface between a DPS medium and a DNG material is refracted to the side from which the beam came.

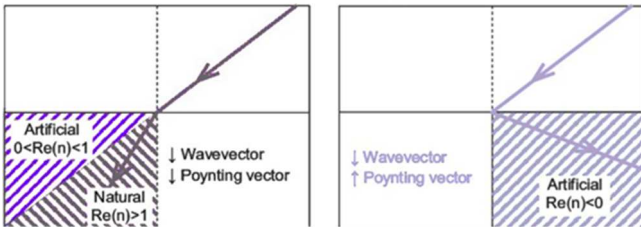


Fig. 2. Refraction in conventional material versus that in negative refractive index metamaterials (NRM). (according to [17])

Veselago shows in his pioneering 1968 paper that the group velocity and phase velocity of an electromagnetic wave through the LH medium have opposite signs. Furthermore, the reverse Doppler effect is listed as an important property in relation to metamaterials. When electromagnetic waves hit a disc made of DNG material, they are not scattered but focused instead. When a light source in the material approaches a detector, the frequency appears lowered and increases as the source moves away. [18]

Among many other unique properties of LH media, Veselago mentioned the fact that Cherenkov radiation is inverted. However, no mathematical consideration was given to this. Normally, Cherenkov radiation occurs when a charged particle moves in a material with a speed faster than that of light in that material, which can be observed emitting a bluish-colored light. In the case of light propagation in metamaterials, the Cherenkov radiation that occurs is not emitted in the

direction of the particle motion, but in the opposite direction to it. The dielectric shift for an approaching object made of DNG material is red, while it is blue for an object moving away. [19]

According to [20], metamaterials can thus be divided into two main classes:

- DNG and SNG structures
  - involve inclusions and inter-inclusion distances that are much smaller than a wavelength and
  - can be subscribed by homogenization and effective media concepts.
- Electromagnetic band-gap (EBG) structures
  - with distances that are approximately half a wavelength or more and
  - described by the Bragg reflection and other periodic media concepts.

## III. BACKGROUND ON CONSTRUCTION

After analyzing papers and monographs, which highlight the basic metamaterial strategies for microwave applications, the main principles of DNG material design will be considered in this section. The focus is on the approaches that are most commonly used for DNG material design.

### A. Split ring resonators and thin wires

In [21, 22], materials with LH properties in the centimeter wavelength range were presented for the first time. A combination of thin metal wires and split ring resonators (SRR) was used for the demonstration of a negative index of refraction of the incident electromagnetic (EM) wave. The first set is an artificially produced ENG material while the second belongs to MNG materials. The negative values for  $\epsilon$  and  $\mu$  of the composite structure, are caused by the periodic arrangement of the unit cells. Figure 3 below is a schematic showing the mentioned array. The narrow bandwidth and high electromagnetic losses are major drawbacks of the first metamaterials based on circular and square SRR. Since this limits the applicability of such structures, the frequency range can be partially extended by using other planar MNG structures instead of SRRs. S-shaped and spiral resonators are improved modifications in this context.

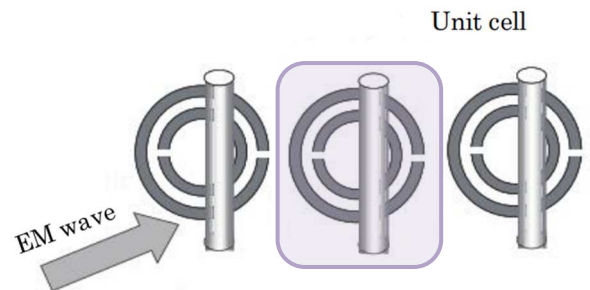


Fig. 3. The array of split ring resonators with wires placed uniformly between split rings. (according to [23])

### B. Transmission lines

Another completely independent approach is the formation of artificial transmission lines, whereby this is a non-resonant and mostly planar variant [24, 25].



It takes advantage of the fact that dielectric and magnetic materials can be modelled using distributed LC networks. At radio frequencies, this can be easily achieved by using lumped elements. A transmission line network with distributed impedance and admittance works as a high-pass filter, which supports backward wave propagation. An arrangement of the inductances as shown in Figure 4a gives the usual transmission line with positive propagation constant, while 4b yields a backward wave structure in which the phase and group velocities are opposite. Planar metamaterial transmission lines are typically implemented as a combination of SRRs and complementary structures coupled by microstrip technology or by embedding it in the structure of planar waveguide. Such backward wave structures show all the hallmarks of an NRM and have a great advantage of a large bandwidth.

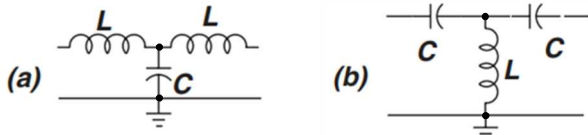


Fig. 4. An equivalent circuit for the transmission line unit cell with distributed impedance and admittance. [26]

### C. Mushroom structures

The third approach is called a mushroom structure, since the unit cells are similar to the cap and the stem of a mushroom in shape. In order to constitute a metamaterial, the unit cells are arranged periodically in a matrix over the ground conductor (Fig. 5). The gaps between the metal fields of adjacent unit cells form capacitors and the vias of the respective unit cells form inductors. The capacitors and inductors form the LH factors. When the unit cells are arranged closely enough to leave no gaps, and the vias of the unit cells are removed, the structure results with a ground conductor and a single metal plate placed on it, which is a common right-handed circuit. That is, the mushroom structure can be considered as a right-handed circuit with additional LH circuit elements, thus representing a composite right-handed/left-handed material. It has a number of applications suitable for the implementation of low-pass and high-pass filters. However, in this structure, stop bands can be used in addition to the left-handed frequency bands. [27]

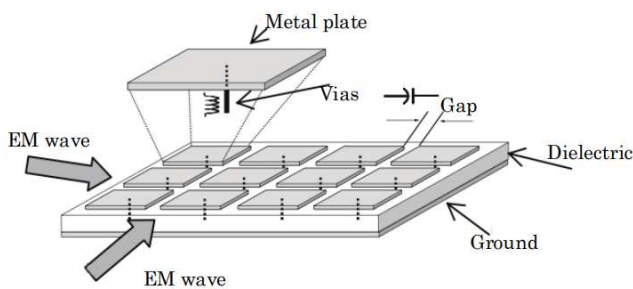


Fig. 5. Schematic showing the mushroom metamaterial structure. (according to [27])

## IV. APPLICATIONS

The special electrophysical properties of the artificial composite structures lead to their successful use in microwave technology. Many metamaterials (SNG, DNG) are actively used in the fields of waveguides, resonators, power dividers, absorbers, filters or couplers. Thereby components with

improved bandwidth, distributed amplifiers, zero-order resonators, advanced microwave filters, etc. can be observed.

In this part of the paper, important trends of applications are summarized.

### A. Optical superlens imaging

The striking demonstration by Pendry [12] that NRMs can be used to make perfect lenses with resolution capabilities not limited by the conventional diffraction limit represents the first application of artificially assembled metamaterials. Electromagnetic waves emanating from an object are separated into the propagating wave (far-field) and the evanescent wave (near-field). Conventional lenses can only process a part of the image information of the object. The propagating wave is that which is normally picked up by the lens and refracted to form the image, which implies a resolution limit  $\Delta x_{\min}$ . The minimum distance between two points that can still be resolved depends on the wavelength  $\lambda$  of the light used and the numerical aperture. As a rule of thumb, the smallest distance of an imaging system to be resolved is half the wavelength. It results in the imperfect image of the object. This is where metamaterials come in again. The extraordinary properties of the artificially produced structures enable lenses for which the resolution limit of half the wavelength ( $\lambda / 2$ ) no longer applies. The reason for this is that this lens does not suppress the evanescent waves, but actually amplifies them (Fig. 6). The exponentially decaying wave from the object on the left grows exponentially within the planar negative-index lens (violet curve with  $n < 0$ ). On the other side of the lens, it decays again until it has reached its original value at the image plane. These components of the object are lost in the absence of the superlens (gray curve with  $n > 0$ ). By means of a material with  $n < 0$  the lens' resolution is greatly enhanced. Subwavelength resolution, or focusing beyond the diffraction limit, is possible with a perfect, flat lens made up of metamaterials.

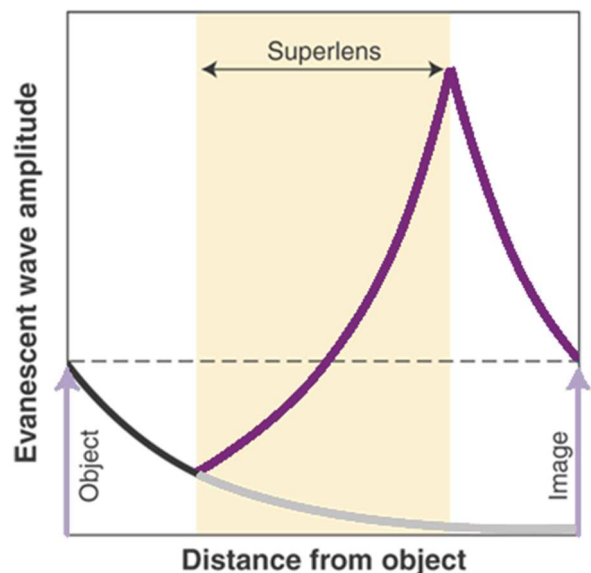


Fig. 6. Propagation of the evanescent wave in material with  $n > 0$  (gray) and  $n < 0$  (violet). (according to [28])

### B. Antennas and Elements

Metamaterials are also actively used in antenna technology. The most common antenna applications and their associated benefits are listed in Figure 7. [29] The most prevalent, of which include metamaterial substrates for:

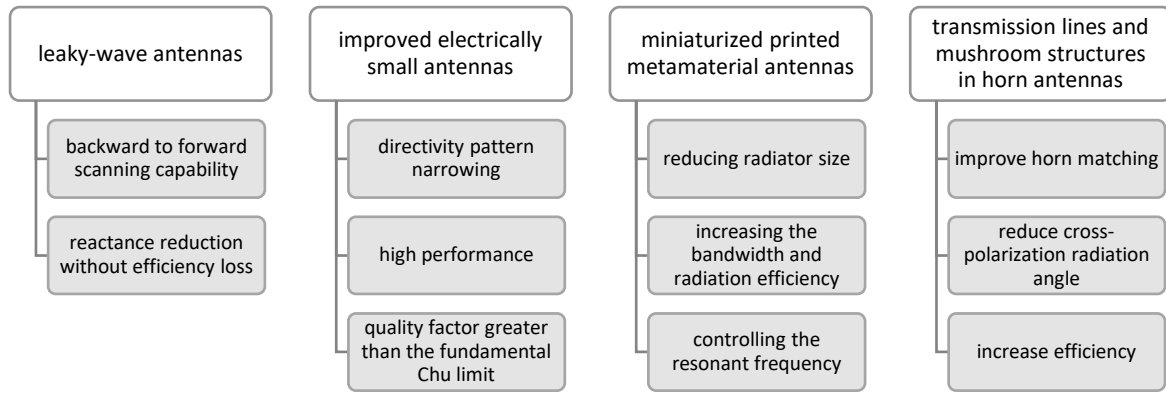


Fig. 7. Advantages resulting from the application of metamaterial structures in the field of antenna design.

Finally, the interaction of metamaterials and electrically small antennas (ESA) will be considered in more detail. The technology is based on covering a monopole radiator by a vaulted shell made of ENG material as seen in Figure 8.

No significant signal attenuation of the electromagnetic fields is apparent because the thickness of the metamaterial layer can be less than one hundredth of  $\lambda$ . The comparison of the metamaterial-inspired ESA and the conventional monopole antenna leads to the following results:

- increase in the radiation power of the monopole and
- increase in the overall efficiency due to very good impedance matching between source and antenna.

Published simulation results show that the measured total radiated power of the ESA with metamaterial under resonance conditions is about 35 dB larger than the measured total radiated power of a bare monopole antenna [30].

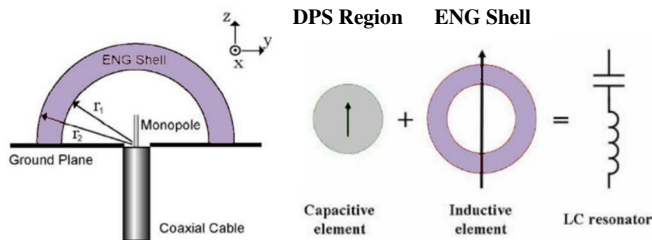


Fig. 8. Design and reactive power compensation of the electrically small antenna in ENG environment. (according to [30])

## V. CHALLENGES AND FUTURE TRENDS

Current problems, such as nonlocal fields, bianisotropy, and homogenization, need to be carefully studied in the future.

First and foremost, conduction losses in the metallic structures cause a worryingly high absorption. The related development of new designs for metamaterials with low losses is one of the major challenges. The scaling of metamaterials to infrared and optical frequencies is also a relevant area of current research.

The effects that a perfect lens brings with it represent immense potential, especially for near-field imaging, couplers and waveguides. Manipulation of near-field radiation was previously impossible and is one of the new effects resulting from fundamental research. Further development will depend on whether it is possible to produce metamaterials with better

quality. In particular, the aspects of wider bandwidth and lower losses are in focus.

Furthermore, it is known that occurring resonances in metamaterials can cause intense local field enhancements. Therefore, they play an important role when considering nonlinear phenomena. The extension of the previously known concept to the nonlinear domain by exploiting material and geometric nonlinearities has only emerged in recent years. Many questions regarding alternative material concepts or the susceptibility to disturbances can be derived from this. Starting from this point, there is thus a lot of potential for subsequent investigations.

## VI. CONCLUSION

The state of the art in metamaterials was summarized by looking at the physics of metamaterials, common designs, and current applications. Based on the general material classification, the main principles are elaborated to create artificial structures with special electrophysical effects. In addition, this background knowledge can be used to work out structures that are known and widely used, especially in millimeter and sub-millimeter band applications. A compact overview regarding the use of metamaterials in the field of optics and antenna applications shows the recent developments in the area of negative refractive index materials. The construction and operating principle of the superlens and the improved electrically small antenna lead to a compact, low-cost and simple fabrication with improved electrophysical parameters. Developments in recent years offer only a small glimpse of what will be possible in the future. Negative refractive materials are new electromagnetic materials for which, in many cases, there are no conventional compounds with structural or functional similarity. Therefore, it is necessary to develop a new physical intuition and to extensively discuss any subsequent effects that emerge.

## REFERENCES

- [1] V. S. Deshpande, M. F. Ashby, and N. A. Fleck, "Foam topology: bending versus stretching dominated architectures", *Acta Materialia*, vol. 49, no. 6, pp. 1035–1040, 2001, doi: 10.1016/S1359-6454(00)-00379-7.
- [2] V. S. Deshpande, N. A. Fleck, and M. F. Ashby, "Effective properties of the octet-truss lattice material", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 49, no. 8, pp. 1747–1769, 2001, doi: 10.1016/S0022-5096(01)00010-2.
- [3] L. J. Gibson and M. F. Ashby, "*Cellular solids: Structure and properties*", 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2001, doi: 10.1017/CBO9781139878326.

- [4] J. B. Berger, H. N. G. Wadley, and R. M. McMeeking, “Mechanical metamaterials at the theoretical limit of isotropic elastic stiffness”, *Nature*, vol. 543, no. 7646, pp. 533–537, 2017, doi: 10.1038/nature21075.
- [5] T. A. Schaedler, A. J. Jacobsen, A. Torrents, A. E. Sorensen, J. Lian, J. R. Greer, L. Valdevit, and W. B. Carter, “Ultralight metallic microlattices”, *Science*, vol. 334, no. 6058, pp. 962–965, 2011, doi: 10.1126/science.1211649.
- [6] J. Chen, X. Huang, G. Zerihun, Z. Hu, S. Wang, G. Wang, X. Hu and M. Liu, “Polarization-Independent, Thin, Broadband Metamaterial Absorber Using Double-Circle Rings Loaded with Lumped Resistances”, *Journal of Electronic Materials*, vol. 44, no. 11, pp. 4269–4274, 2015, doi: 10.1007/s11664-015-3951-x.
- [7] L. R. Meza, S. Das, and J. R. Greer, “Strong, lightweight, and recoverable three-dimensional ceramic nanolattices”, *Science*, vol. 345, no. 6202, pp. 1322–1326, 2014, doi: 10.1126/science.1255908.
- [8] A. G. Evans, J. W. Hutchinson, N. A. Fleck, M. F. Ashby, and H. N. G. Wadley, “The topological design of multifunctional cellular metals”, *Progress in Materials Science*, vol. 46, pp. 309–327, 2001.
- [9] J. Canet-Ferrer, “*Metamaterials and metasurfaces*”, London: IntechOpen, 2019, doi: 10.5772/intechopen.73359.
- [10] T. J. Yen et al., “Terahertz magnetic response from artificial materials”, *Science*, vol. 303, no. 5663, pp. 1494–1496, 2004, doi: 10.1126/science.1094025.
- [11] J. B. Pendry, “Negative Refraction Makes a Perfect Lens”, *Physical Review Letters*, vol. 85, no. 18, pp. 3966–3969, 2000, doi: 10.1103/PhysRevLett.85.3966.
- [12] H. M. M. Bernety and A. B. Yakovlev, “Decoupling antennas in printed technology using elliptical metasurface cloaks”, *Journal of Applied Physics*, vol. 119, no. 1, pp. 1–11, 2016, doi: 10.1063/1.4939610.
- [13] Research and Markets, “*The Global Market for Metamaterials 2021*”, 1st ed. Dublin: Future Markets, 2021.
- [14] C. Imhof, “*Entwurf und Charakterisierung von Metamaterialien und quasioptischen Bauelementen für Mikrowellen- und Terahertz-Strahlung*”, 1st ed. Göttingen: Cuvillier Verlag, 2009.
- [15] R. W. Ziolkowski, “Design, fabrication, and testing of double negative metamaterials”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 51, no. 7, pp. 1516–1529, 2003, doi: 10.1109/TAP.2003.813622.
- [16] N. Engheta and R. W. Ziolkowski, “A positive future for double-negative metamaterials”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 53, no. 4, pp. 1535–1556, 2005, doi: 10.1109/TMTT.2005.845188.
- [17] Z. Jaksic, N. Dalarsson, and M. Maksimovic, “Electromagnetic Structures Containing Negative Refractive Index Metamaterials”, in *7th International Conference on Telecommunications in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Services*, vol. 1, pp. 145–154, 2005.
- [18] V. G. Veselago, “The Electrodynamics of substances with simultaneously negative values of  $\epsilon$  and  $\mu$ ”, *Soviet Physics Uspekhi*, vol. 10, no. 4, pp. 509–514, 1968.
- [19] J. Lu, T. M. Grzegorzczak, Y. Zhang, J. P. Jr, B. Wu, J. A. Kong, and M. Chen, “Cerenkov radiation in materials with negative permittivity and permeability”, *Optics Express*, vol. 11, no. 7, pp. 723–734, 2003, doi: 10.1364/OE.11.000723.
- [20] N. Engheta and R. Ziolkowski, “*Metamaterials: Physics and engineering explorations*”, New York, NY: Wiley-Interscience [u.a.], 2006.
- [21] R. A. Shelby, D. R. Smith, and S. Schultz, “Experimental verification of a negative index of refraction”, *Science*, vol. 292, no. 5514, pp. 77–79, 2001, doi: 10.1126/science.1058847.
- [22] D. R. Smith and N. Kroll, “Negative refractive index in left-handed materials”, *Physical Review Letters*, vol. 85, no. 14, pp. 2933–2936, 2000, doi: 10.1103/PhysRevLett.85.2933.
- [23] D. R. Smith, W. J. Padilla, D. C. Vier, S. C. Nemat-Nasser, and S. Schultz, “Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity”, *Physical Review Letters*, vol. 84, no. 18, pp. 4184–4187, 2000.
- [24] G. V. Eleftheriades, A. K. Iyer, and P. C. Kremer, “Planar negative refractive index media using periodically L-C loaded transmission lines”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 50, no. 12, pp. 2702–2712, 2002, doi: 10.1109/TMTT.2002.805197.
- [25] L. Liu, C. Caloz, C. Chang, and T. Itoh, “Forward coupling phenomena between artificial left-handed transmission lines”, *Journal of Applied Physics*, vol. 92, no. 9, pp. 5560–5565, 2002, doi: 10.1063/1.1512682.
- [26] D. Kuylenstierna, S. E. Gunnarsson, and H. Zirath, “Lumped-element quadrature power splitters using mixed right/left-handed transmission lines”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 53, no. 8, pp. 2616–2621, 2005, doi: 10.1109/TMTT.2005.852751.
- [27] S. Takeda and T. Yoshinaga, “Left-Handed Metamaterial Technologies Significant for Information and Communication Devices”, *Science & Technology Trends*, vol. 3, no. 34, pp. 36–50, 2009.
- [28] H. Lee et al., “Realization of optical superlens imaging below the diffraction limit”, *New Journal of Physics*, vol. 7, no. 255, pp. 1–16, 2005, doi: 10.1088/1367-2630/7/1/255.
- [29] V. Slyusar, “Metamaterials on antenna solutions”, *International Conference on Antenna Theory and Techniques*, pp. 19–24, 2009, doi: 10.1109/ICATT.2009.4435103.
- [30] A. Erentok and R. W. Ziolkowski, “Metamaterial-Inspired Efficient Electrically Small Antennas”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 56, no. 3, pp. 691–707, 2008, doi: 10.1109/TAP.2008.916949.

# Entsorgung und Recycling von Elektroschrott: Aktuelle Situation und Trends

Dominik Kemeter  
Fakultät Elektro- und Informationstechnik  
Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg  
Regensburg, Deutschland  
dominik.kemeter@st.oth-regensburg.de

**Zusammenfassung**—Durch die steigende Technologisierung des Alltags nimmt das jährliche Volumen an Elektroschrott, sogenanntem E-Waste, immer weiter zu. Die Entsorgung elektrischer Geräte nach ihrer Benutzung ist und wird daher immer mehr zu einem wichtigen Punkt der Abfallwirtschaft.

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Problematik des Elektroschrotts auf Basis aktueller Veröffentlichungen und Literatur aufgezeigt. Betrachtung findet hierbei zunächst die aktuelle Situation bei der Entsorgung und dem Recycling von Elektroschrott. Dafür wird auf die Definition von Elektroschrott und Entstehungsursachen wie mangelnde Reparierbarkeit oder Obsoleszenz eingegangen. Die Entwicklung der jährlichen Gesamtmenge an Elektroschrott und des Recyclinganteils bezogen auf die Kontinente wird dargestellt. Diverse Möglichkeiten zur Rückgabe und Verarbeitung von E-Waste sind in Deutschland vorhanden und durch das Elektro- und Elektronikgerätegesetz geregelt. Hinsichtlich des Rohstoffverbrauchs der Hersteller und der Klimaproblematik des Rohstoffabbaus ist ein höherer Recyclinganteil sinnvoll. Gleichzeitig wird Elektroschrott aus den sogenannten „Erste-Welt-Staaten“ in die „Dritte Welt“ exportiert, wo dieser kaum oder gar nicht recycelt wird und auf Deponien deren Umwelt gefährdet.

Neue Trends und nationale sowie internationale Lösungsansätze für den Umgang mit Elektroschrott werden anhand aktueller Publikationen und Gesetzesänderungen betrachtet. Optimierte geschlossene Rohstoffkreisläufe, sogenanntes Closed Loop Recycling, und kameragestützte Sortiermaschinen verbessern den Umgang mit Elektroschrott seitens der Verwerter. Im Bereich des Verbrauchers soll die Recyclingquote durch Boni und erweiterte Rückgabemöglichkeiten erhöht werden.

Diese Arbeit zeigt die momentane Situation des unzureichenden Recyclings auf und stellt gleichzeitig einen Ausblick über neue Innovationen im Bereich des Recyclings von Elektroschrott vor.

**Indexbegriffe**—environmental management, recycling, waste management, waste disposal, waste handling, waste reduction, electronic waste

## I. EINLEITUNG

Die Weltbevölkerung und die Technologisierung des Alltags nehmen seit Jahren kontinuierlich zu. Einem dadurch immer größer werdenden Konsum folgt eine stetig wachsende Abfallmenge. Problematisch sind hierbei vor allem umweltgefährdende Produkte, welche zwingend einem geordneten Entsorgungs- oder Recyclingverfahren zugeführt werden müssen. Im Bereich des Elektroschrotts ist dies nicht nur aus Sicht der Ressourcenrückgewinnung notwendig, sondern vor allem um zu verhindern, dass gesundheitsgefährdende und

umweltschädliche Schwermetalle in die Umwelt gelangen. 2019 fielen weltweit 53,6 Mt (Megatonnen) Elektroschrott an, wovon nur 17,3 % korrekt recycelt wurden. [1]

Anhand dieser Literaturarbeit werden die derzeitige Situation und zukünftige Trends im Umgang mit Elektroschrott anhand aktueller Veröffentlichungen und Daten genauer betrachtet. Es werden Entstehungsursachen, aktuelle Zahlen und Zukunftsprognosen auf globaler Ebene dargestellt. Eine Aufschlüsselung der Abfallmenge und Recyclingquoten der einzelnen Kontinente zeigt Problemgebiete auf. Auf nationaler Ebene wird die aktuelle Situation in Deutschland für Elektrogeräte, welche unter das deutsche Elektro- und Elektronikgerätegesetz (ElektroG) fallen, betrachtet.

Durch optimiertes Recycling mit mathematischen Modellen, fortschreitende Technologisierung in der Materialtrennung und eine erweiterte Motivation des Verbrauchers wird weltweit daran gearbeitet die Recyclingquoten zu erhöhen. Die Darstellung gegenwärtiger und zukünftiger Gesetzesänderungen in Europa geben dabei einen Ausblick auf Entwicklungen und Ziele im Umgang mit Elektroschrott.

Abschnitt II zeigt zunächst Entstehungsursachen für Elektroschrott auf und stellt die gesetzliche Situation für Elektroartikel nach ihrer Benutzungszeit dar. In Abschnitt III werden weltweite aktuelle Zahlen und Statistiken im Bereich des Elektrorecyclings aufgezeigt und eine Zukunftsprognose gegeben. Abschnitt IV gibt einen Überblick über zukünftige Gesetzesänderungen, Technologien und Trends im Umgang mit Elektroschrott. Zuletzt werden die wichtigsten Punkte in Abschnitt V zusammengefasst und ein Ausblick wird gegeben.

## II. ENTSTEHUNG VON ELEKTROSCHROTT UND GESETZLICHE REGELUNG IN DEUTSCHLAND

### A. Entstehungsursachen

Grundsätzlich lassen sich die Entstehungsursachen von Elektroschrott in zwei verschiedene Kategorien einteilen. Die erste Kategorie umfasst Geräte, die tatsächlich defekt sind. Darunter fallen vor allem Kleingeräte, bei welchen eine Reparatur oft nicht möglich oder wirtschaftlich sinnvoll ist. Funktionierende Geräte, welche aber nicht mehr benutzt werden, gehören zur zweiten Kategorie. Auf Grund der Geschwindigkeit des technischen Fortschritts werden bestimmte Technologien überflüssig. Beispielsweise erforderte in der Musikbranche der Übergang von Schallplatte über Kassette und CD bis

hin zum Streaming stets ein neues Endgerät. Dieser Vorgang wird Obsoleszenz genannt. Beim Spezialfall der „qualitativen Obsoleszenz“ werden Geräte bereits bei der Herstellung auf eine beschränkte Lebenszeit konzipiert. [2, 3]

### B. Rückgabemöglichkeiten, Entsorgung und Recycling

Die Definition eines Elektrogeräts ist nicht weltweit identisch. Aus der Sicht des privaten Verbrauchers in Deutschland wird die Verwertung von Elektrogeräten im ElektroG festgelegt. Dieses gilt nach § 3(1) für Geräte mit einer Versorgungsspannung von höchstens 1000 V (AC) oder 1500 V (DC), welche für ihren „ordnungsgemäßen Betrieb von elektrischen Strömen oder elektromagnetischen Feldern abhängig sind oder [...] der Erzeugung, Übertragung und Messung von elektrischen Strömen und elektromagnetischen Feldern dienen“. Abschnitt 3 des ElektroG regelt die Sammlung und Rücknahme. Nach § 10(1) sind Altgeräte getrennt vom unsortierten Siedlungsabfall zu erfassen. Dies muss nach § 10(2) so erfolgen, „dass die spätere Vorbereitung zur Wiederverwendung, die Demontage und das Recycling nicht behindert werden“. In § 10(3) wird seit 2019 eine Mindest erfassung von 65 % des jährlichen Elektroschrotts festgelegt.

Aus Sicht des Privatverbrauchers dürfen gemäß § 12 des ElektroG nur öffentlich-rechtliche Entsorgungsträger, Vertrieber sowie Hersteller oder deren Bevollmächtigte Altgeräte erfassen. Die Paragraphen § 13 bis § 18 des ElektroG legen die möglichen Anlaufstellen im Einzelnen fest:

- Sammelstellen des öffentlich-rechtlichen Entsorgers (Bringsystem),
- Sammelbehältnisse aufgestellt von den Herstellern,
- Rücknahme durch den Hersteller oder dessen Bevollmächtigten und
- Rücknahme durch den Vertrieber, wenn die Verkaufsfläche für Elektro- und Elektronikgeräte mehr als 400 m<sup>2</sup> beträgt.

Abschnitt 4 des ElektroG regelt in den Paragraphen § 20 bis § 24 die Behandlungs- und Verwertungspflichten sowie Verbringung:

- Erstbehandlung und Prüfung zur Eignung zur Wiederverwertung,
- Erstbehandlung ausschließlich durch zertifizierte Erstbehandlungsanlagen,
- Festlegung des prozentualen Anteils der Wiederverwendung und Recycling je nach Gerätekategorie und
- Verbringung von Altgeräten ins Ausland nach Verordnungen der Europäischen Gemeinschaft (EG).

## III. AKTUELLE ZAHLEN UND LAGEENTWICKLUNG

### A. Jährlicher Anfall an Elektroschrott und Recyclingquoten

Nach Angabe des „Global E-Waste Monitors“ wurden im Jahr 2014 weltweit rund 44,4 Mt Elektroschrott erzeugt. Bis 2019 wuchs dieser Wert um 21 % auf 53,6 Mt an. Letzteres entspricht durchschnittlich 7,3 kg pro Kopf und Jahr. 2019 setzte sich der Großteil des Elektroschrotts aus 17,4 Mt Kleingeräte, 13,1 Mt Großgeräte und 10,8 Mt Geräte mit

Wärmetauschern zusammen. Eine Hochrechnung des Global E-Waste Monitors auf das Jahr 2030 zeigt einen Anstieg des jährlichen Elektroschrotts auf 74,7 Mt. [1] Einen vergleichbaren Ausblick liefert auch das „World Economic Forum“. Hier wird bis 2050 ein Wachstum auf 120 Mt prognostiziert [4]. Effekte durch das Coronavirus wurden bei diesen Hochrechnungen nicht beachtet.

Tabelle I stellt die weltweite Verteilung des 2019 angefallenen Elektroschrotts und dessen Recyclingquoten dar. Es zeigt sich, dass mit 24,9 Mt (46 %) knapp die Hälfte des weltweiten Elektroschrotts in Asien anfiel und Europa mit 42,5 % die größte Recyclingquote besitzt. Innerhalb der Europäischen Union (EU) ist ein Sammelziel von 45 % vorgegeben [5]. 2020 lebten 71 % der Weltbevölkerung in einem Staat mit Regelungen zur Entsorgung von Elektroschrott. Bezogen auf die Länderanzahl sind dies jedoch nur 78 von 193 Staaten und damit mit 40 % weit weniger als die Hälfte [1]. Vor allem in Staaten in Lateinamerika, Afrika und Südostasien spielt Elektroschrott keine hohe politische Rolle und Regelungen werden oft nicht durchgesetzt [4].

Tabelle I  
ELEKTROSCHROTT UND RECYCLINGQUOTEN NACH KONTINENT 2019 [1]

Kontinent	Elektroschrott	Recyclingquote
Afrika	2,9 Mt	0,9 % (0,03 Mt)
Amerika	13,1 Mt	9,4 % (1,2 Mt)
Asien	24,9 Mt	11,7 % (2,9 Mt)
Europa	12 Mt	42,5 % (5,1 Mt)
Ozeanien	0,7 Mt	8,8 % (0,06 Mt)

Laut Zahlen des „Naturschutzbund Deutschland e.V.“ wurden in Deutschland zwischen 2006 und 2016 ca. 19,35 Mt Elektrogeräte in den Verkehr gebracht. Im Mittel entspricht dies 1,75 Mt pro Jahr. Die jährliche Menge blieb im Gegensatz zu den weltweiten Zahlen nahezu konstant. So waren es 2006 rund 1,82 Mt und 2016 1,98 Mt. In diesem Zeitraum wurde eine durchschnittliche Sammelquote von 41 % pro Jahr erreicht, was in etwa dem europäischen Durchschnitt entspricht. Deutschland erreichte somit nicht das EU Sammelziel von 45 % und verfehlte ebenfalls das nationale Sammelziel nach dem ElektroG von 65 %. [1, 5, 6]

### B. Entsorgung und Recycling nach der Rückgabe

Eine Verbesserung dieser Lage ist aus mehreren Gründen erstrebenswert. Zum einen ist es finanziell günstiger Rohstoffe aus Elektroschrott zurückzugewinnen, als neue Erze abzubauen, zum anderen bedeutet weniger Rohstoffabbau auch eine geringere Umweltbelastung. [2]

Die Möglichkeiten zur Entsorgung und Recycling gliedern sich wie in Abbildung 1 dargestellt. Gemäß den Zahlen von 2019 werden weltweit nur 17,3 % dem Recyclingpfad zugeführt [1]. Dabei bestehen Elektroartikel aus bis zu 60 verschiedenen Elementen, von denen viele durch technisch ausgereifte und sichere Verfahren wie Elektrolyse zurückgewonnen werden können. Dazu wird das Material



zerkleinert, mit Hilfe einer Probenentnahme die Metallzusammensetzung geprüft, geschmolzen und zum Endprodukt raffiniert. Anfallende Schlämme und Abgase werden parallel aufgefangen. In Deutschland ist dies durch das Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) geregelt. [3, 4]

Schätzungen zufolge werden 75 % bis 80 % des jährlich weltweit anfallenden Elektroschrotts nach Asien oder Afrika exportiert. Offiziell, um diesen dort zu recyceln oder zu entsorgen. Alleine aus der EU wird die Menge des jährlich verschifften Elektroschrotts auf 1,3 Mt geschätzt. 95 % des Elektroschrotts wird in den Zielländern im nicht staatlich kontrollierten Sektor verarbeitet. Dort fehlen sowohl geeignete Geräte als auch Schutzausrüstung. Umweltgefährdende Säuren die zum Herauslösen wertvoller Metalle eingesetzt werden, versickern im Boden oder werden in Flüssen entsorgt. Durch das ElektroG § 23 wird, seit der Fassung von 2015, versucht, den illegalen Export in Entwicklungsländer zu reduzieren. Dazu ist nur noch der Export von überprüften und funktionsfähigen Gebrauchtgeräten erlaubt, welche nachweislich durch den Exporteur keine Altgeräte sein dürfen. Es handelt sich dabei um die nationale Umsetzung der europäischen „Waste of Electrical and Electronic Equipment“ (WEEE) Richtlinie 2012/19/EU. [7, 8]

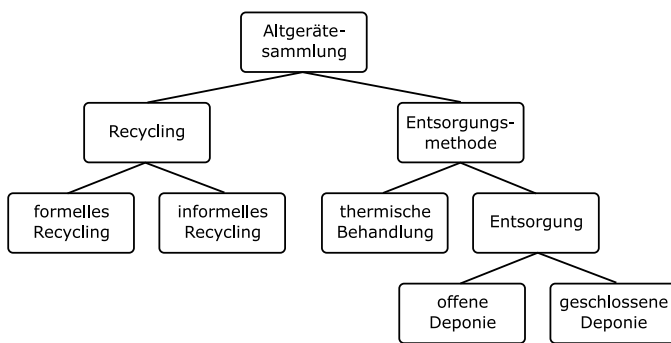


Abbildung 1. Mögliche Wege der Entsorgung und des Recyclings von Elektroschrott. (Angelehnt an [7])

#### IV. AKTUELLE UND ZUKÜNFTIGE ENTWICKLUNGEN

Die Verbesserung der Handhabung, der Rückgewinnung von Rohstoffen und der Vermeidung von Elektroschrott ist Grundlage vieler aktueller Veröffentlichungen. Räumlich zeigt sich hier vor allem ein großes Bestreben in den Entwicklungsländern Indien und China. Demzufolge auf dem Kontinent, auf welchen 2019 46 % des weltweit entstandenen Elektroschrotts entfielen [1]. Nachfolgend werden ausgewählte Zukunftstrends dargestellt.

##### A. Closed Loop Recycling

Eine oft genannte Methode zur Verbesserung des Recyclings ist das sogenannte Closed Loop Recycling (Abb. 2). Dieses Modell fasst Produktion und Entsorgung von Elektrogeräten zusammen, indem für die einzelnen Stufen Rückgewinnungsschritte geschaffen werden. Ziel ist hierbei die möglichst frühe Rückführung der Materialien in die Produktion neuer Komponenten. Dies führt im Optimalfall zu

einer geschlossenen Versorgungskette im Bezug auf Bauteile und Rohstoffe. Des Weiteren wird durch eine möglichst frühe Rückführung eine bessere Energiebilanz bei der Herstellung neuer Produkte erreicht. [2, 9]

Die Verbesserung des rückführenden Pfads der Entsorgung ist derzeit insbesondere in Asien ein aktuelles Forschungsgebiet. Wang und Li [10] realisieren und optimieren ein mathematisches Modell zur Minimierung der Kosten und Maximierung der Kundenzufriedenheit. Das Modell kann bei der Einrichtung eines Recyclingnetzwerks notwendige Knotenpunkte planen und vereinigt Kurz- sowie Langzeitziele.

Liu und Nishi [11] untersuchen bereits bestehende Arten des Closed Loop Recyclings mit Hilfe eines evolutionären Spielmodells. Dabei werden die vier gängigen Sammlungstypen (zentralkoordiniert, herstellerekoordiniert, verkäuferkoordiniert und Sammlung durch Drittparteien) im Hinblick auf Stabilität und Kostenoptimierung geprüft. Es zeigt sich, dass auf lange Sicht das zentralkoordinierte Modell am stabilsten ist und als das bevorzugte Modell vorgeschlagen wird.

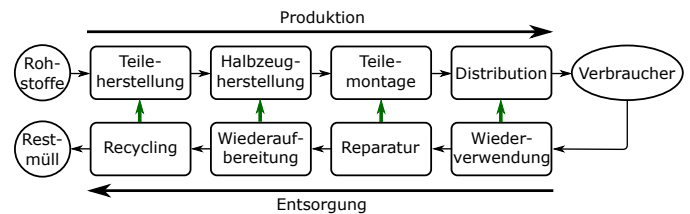


Abbildung 2. Übersicht über das Modell des Closed Loop Recyclings. Je näher am Verbraucher der Kreis geschlossen wird, desto besser. (Angelehnt an [9])

##### B. Aktuelle gesetzliche Änderungen

Eng verbunden mit dem Closed Loop Recycling ist der Bereich der Reparierbarkeit von Elektrogeräten. Dabei kann ein defektes Gerät direkt in ein funktionstüchtiges Gerät recycelt werden. Hinter „Recht auf Reparatur“ (right to repair) steht die weltweite Forderung nach einer einfacheren Reparierbarkeit von defekten Geräten. Das EU Parlament forderte in einem Beschluss vom 25.11.2020 die Kommission dazu auf, „den Verbrauchern ein „Recht auf Reparatur“ einzuräumen“ [12]. Die Forderungen des Parlaments reichen von der Unterstützung nachhaltiger Herstellungsverfahren, über die Vereinheitlichung von Ladegeräten bis hin zur Beseitigung von rechtlichen Hindernissen in den Bereichen Reparatur, Weiterverkauf und Wiederverwertung. Ebenfalls eingeführt werden sollen Kennzeichnungen zur erwarteten Lebensdauer von Produkten. [12]

In Frankreich erhalten Elektrogeräte bereits seit dem 01.01.2021 ein zusätzliches Label, welches Auskunft über die Reparierbarkeit eines Geräts gibt. Das Label „l'indice de réparabilité“ ist optisch an das europäische Energielabel angelehnt. Es gibt dem Verbraucher die direkte Möglichkeit auf einer Skala von 0 (schlecht) bis 10 (sehr gut) die Reparierbarkeit verschiedener Geräte zu vergleichen (Abb. 3). Wie bereits beim Energielabel wird gehofft, dass die Hersteller versuchen, ein möglichst gutes Label zu erhalten.

Die Möglichkeit zur einfacheren Instandsetzung trägt damit zur längeren Verwendung von Elektrogeräten und somit zur Reduktion von anfallendem Elektroschrott bei. [13]



Abbildung 3. Der französische Reparierbarkeitsindex zeigt dem Verbraucher wie gut sich ein Gerät instandsetzen lässt. [14]

Um in Deutschland die Recyclingquote von Elektroschrott von den derzeitigen rund 41 % auf das Ziel von 65 % (§ 10 ElektroG) zu erhöhen, beschloss das Bundeskabinett Ende 2020 eine Änderung des ElektroG. Die Änderung soll es zukünftig erlauben, dass Elektrokleingeräte bis zu einer Kantenlänge von 25 cm auch in Supermärkten zurückgegeben werden können. Bei größeren Geräten muss für die Rückgabe ein vergleichbares Gerät gekauft werden. Auch Onlinehändler werden in die Pflicht gerufen, dass sie beim Kauf eines neuen Geräts die Rücknahme des alten Geräts anbieten müssen. Nach Zustimmung des Bundestags und des Bundesrats soll die Reform ab dem 01.01.2022 in Kraft treten. Die zurückgenommenen Elektrogeräte müssen von den Händlern gemäß den Bestimmungen des ElektroG behandelt oder entsorgt werden. [5]

### C. Kameragestützte Systeme

Im Bereich der Metallrückgewinnung durch Schmelzverfahren ist es erforderlich, dass die Metallzusammensetzung des zu recycelnden Elektroschrotts bekannt ist. Dies geschieht derzeit über die Entnahme und Analyse von Proben [3]. Um diesen Prozess zu beschleunigen und eine Vorsortierung bestimmter Komponenten zu erreichen, können Kamerasysteme verwendet werden. Bei sogenannten „Smart Cameras“ werden Aufnahme- und Verarbeitungseinheit zusammengeführt. Das aufgenommene Bild wird dabei direkt in der Kamera ausgewertet und die entsprechenden Befehle werden an die Sortiertechnik weitergegeben. Laszlo et. al. [15] zeigen anhand eines Testaufbaus die Umsetzung einer solchen Sortiermaschine. Dabei werden die Chips eines Motherboards anhand ihrer Konturen und einer hinterlegten Datenbank klassifiziert. Je nach Chipart werden diese in 10/10 oder 9/10 Fällen richtig erkannt. Eine Erweiterung um ein neuronales Netzwerk, wie es beispielsweise schon bei der Kategorisierung von Kunststoffen Verwendung findet, wäre denkbar. [16]

### D. Erweiterte Motivation des Verbrauchers

Bevor ein Altgerät überhaupt einem weiterführenden Verfahren zugeführt werden kann, steht die Entscheidung des Verbrauchers ein Altgerät überhaupt zurückzugeben. Hierbei werden derzeit sowohl das nationale Ziel von 65 % als auch das europäische Ziel von 45 % verfehlt. Laut Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien (Bitkom) befanden sich beispielsweise Anfang 2020 199,3

Millionen ungenutzte Mobiltelefone in deutschen Haushalten [17]. Eine Veröffentlichung von Aboelmaged [18] aus den Vereinigten Arabischen Emiraten untersuchte das Recyclingverhalten junger Erwachsener unter verschiedenen Gesichtspunkten. Eine Verbesserung der Recyclingquote ließe sich erreichen, wenn

- die Geräterückgabe mit einem Gewohnheitsverhalten gekoppelt wird (zeitlich oder räumlich),
- die Rückgabe an Orten des täglichen Lebens möglich ist (Schule, Universität, Einkaufszentren) und
- die sozialen, ökonomischen und umwelttechnischen Vorteile besser vermittelt werden. Auch eine Art Belohnungssystem wäre denkbar.

Der notwendige einfache Zugang und der positive Effekt von Belohnungssystemen werden auch von Shevchenko et. al. [19] in einem Artikel der Zeitschrift Sustainability aufgezeigt. Es wird die Einführung einer Bonuskarte für das Recycling von Elektroschrott vorgeschlagen. Das dort gesammelte Guthaben soll dann finanziell auf den Kauf neuer Elektrogeräte umgelegt werden können. Ungeklärt bleibt dabei die Zuständigkeit und Finanzierung eines solchen Systems. Insbesondere in Ländern mit einer derzeitigen geringen Recyclingquote verspricht man sich durch ein Bonussystem eine Verbesserung.

## V. FAZIT UND AUSBLICK

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die derzeitige Situation und zukünftige Trends im Umgang mit Elektroschrott dargestellt. Es zeigte sich, dass in Asien die größte Menge an Elektroschrott anfällt, diese aber nur in unzureichendem Maße recycelt wird. Europa verfehlt das selbst gesteckte Ziel von 45 % Recyclinganteil um drei Prozentpunkte. Die aktuell gültige Gesetzeslage in Deutschland wurde anhand des ElektroG präsentiert und die möglichen Wege des Elektroschrotts nach seiner Rückgabe beleuchtet.

Neue Ansätze zur Optimierung des Recyclings im sogenannten Closed Loop Verfahren werden vor allem in Asien anhand von Modellbildungen untersucht. Aktuell geplante Gesetzesänderungen seitens der EU und Deutschland sollen den Recyclinganteil zukünftig erhöhen. Hierbei ist besonders der Ansatz der Reparierbarkeit defekter Geräte ein zentraler Punkt. Mit Hilfe neuer Technologien wie kameragestützte Erkennungssysteme und neuronale Netzwerke gibt es zukünftig Möglichkeiten zur besseren Sortierung von Elektroschrott. Schließlich wurden Punkte für eine Erhöhung der Recyclingmotivation des Verbrauchers dargestellt, wobei sich ein Bonusssystem für zurückgegebene Altgeräte als erfolgversprechend präsentiert.

Um zukünftig die immer weiter anwachsende Problematik des Elektroschrottrecyclings zu verbessern, sind sowohl Verbraucher, Hersteller, Entsorger als auch der Gesetzgeber in der Pflicht ihren Teil zur gemeinsamen Lösung beizutragen. Der positive Effekt, die oft unüblichen Materialzusammensetzungen wiederverwenden zu können, spielt besonders auf Grund des steigenden Rohstoffbedarfs für zukünftige Technologien eine immer große Rolle.

## LITERATUR

- [1] V. Forti, C. P. Baldé, R. Kuehr und G. Bel, „The Global E-waste Monitor 2020; Quantities, flows, and the circular economy potential“, UNU/UNITAR SCYCLE, ITU, ISWA, 2020.
- [2] D. W. Faulkner, „How Well Are We Handling Electronic-Waste?“, 17th European Conference on Networks and Optical Communications, Vilanova i la Geltru, Spanien, 2012, Seiten 1-2.
- [3] S. Laser, „Hightech am Ende; Über das globale Recycling von Elektroschrott und die Entstehung neuer Werte“, Wiesbaden, Deutschland, 2020, Seite 164f.
- [4] World Economic Forum, „A New Circular Vision for Electronics; Time for a Global Reboot“, weforum.org. [http://www3.weforum.org/docs/WEF\\_A\\_New\\_Circular\\_Vision\\_for\\_Electronics.pdf](http://www3.weforum.org/docs/WEF_A_New_Circular_Vision_for_Electronics.pdf) (aufgerufen am 15.04.2021).
- [5] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, „Referentenentwurf für ein erstes Gesetz zur Änderung des Elektro- und Elektronikgerätegesetzes“, bmu.de. <https://www.bmu.de/gesetz/referentenentwurf-fuer-ein-erstes-gesetz-zur-aenderung-des-elektro-und-elektronikgeraetegesetzes/> (aufgerufen am 13.05.2021).
- [6] R. Bliken et. al., „Recycling im Zeitalter der Digitalisierung; Spezifische Recyclingziele für Metalle und Kunststoffe aus Elektrokleingeräten im ElektroG: Regulatorische Ansätze“, NABU - Naturschutzbund Deutschland e.V., Berlin, 2019.
- [7] R. I. Moletsane und C. Venter, „Electronic Waste and its Negative Impact on Human Health and the Environment“, 2018 International Conference on Advances in Big Data, Computing and Data Communication Systems (icABCD), Durban, Südafrika, 6.-7. Aug., 2018, Seiten 1-7.
- [8] D. N. Perkins, M. B. Drisse, T. Nxele und P. Sly, „E-Waste: A Global Hazard“, *Annals of Global Health*, 2014, Seiten 286–295.
- [9] J. Hanafi, S. Kara und H. Kaebernick, „Reverse logistics strategies for end-of-life products“, *The International Journal of Logistics Management*, Ausgabe 18, 2008, Seiten 367-388.
- [10] B. Wang und H. Li, „Optimization of Electronic Waste Recycling Network Designing“, 2020 5th International Conference on Electromechanical Control Technology and Transportation (ICECTT), Nanchang, China, 15.-17. Mai, 2020, Seiten 368-371.
- [11] Z. Liu und T. Nishi, „An Evolutionary Game Model in Closed-Loop Supply Chain“, 2019 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), Macao, China, 15.-18. Dezember, 2019, Seiten 896-900.
- [12] I. Höglund, „Parliament wants to grant EU consumers a „right to repair““, <https://www.europarl.europa.eu/news/en/press-room/20201120IPR92118/parliament-wants-to-grant-eu-consumers-a-right-to-repair> (aufgerufen am 12.05.2021).
- [13] R. Heinz und K. Meyer, „Der französische Reparaturindex: Ein Modell für Deutschland und die EU?“, Runder Tisch Reparatur Factsheet, April, 2020.
- [14] Ministère de la Transition écologique, „Indice de réparabilité“, [ecologie.gouv.fr. https://www.ecologie.gouv.fr/indice-reparabilite](https://www.ecologie.gouv.fr/indice-reparabilite) (aufgerufen am 12.05.2021).
- [15] R. Laszlo, R. Holonec, R. Compindean und F. Dragan, „Sorting System for e-Waste Recycling using Contour Vision Sensors“, 2019 8th International Conference on Modern Power Systems (MPS), Cluj-Napoca, Cluj, Rumänien, 21.-23. Mai, 2019, Seiten 1-4.
- [16] A. Tehrani und H. Karbasi, „A novel integration of hyper-spectral imaging and neural networks to process waste electrical and electronic plastics“, 2017 IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech), Phoenix, Arizona, USA, 12.-14. November, 2017, Seiten 1-5.
- [17] Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien, „Deutsche horten fast 200 Millionen Alt-Handys“, [bitkom.org. https://www.bitkom.org/Presse/Presseinformation/Deutsche-horten-fast-200-Millionen-Alt-Handys](https://www.bitkom.org/Presse/Presseinformation/Deutsche-horten-fast-200-Millionen-Alt-Handys) (aufgerufen am 14.05.2021).
- [18] M. G. Aboelmaged, „Acceptance of E-waste Recycling Among Young Adults: An Empirical Study“, 2020 IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech), Santa Ana, Kalifornien, USA, 23.-25. April, 2020, Seiten 1-6.
- [19] T. Shevchenko, K. Laitala und Y. Danko, „Understanding Consumer E-Waste Recycling Behavior: Introducing a New Economic Incentive to Increase the Collection Rates“, *Sustainability*, Jahrgang 11, Heftnummer 9: 2656, 2019.



# Anwendungsfallbezogene Vor- und Nachteile unterschiedlicher Typen von E-Maschinen in Elektrofahrzeugen

Andreas Lang

*Elektro- und Informationstechnik*  
*Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg*  
Regensburg, Deutschland  
andreas2.lang@st.oth-regensburg.de

**Zusammenfassung**—Fast ein Fünftel des im Jahr 2017 ausgestoßenen CO<sub>2</sub> stammt aus dem Verkehrssektor. Bis 2050 soll Deutschland treibhausgasneutral werden. Deshalb wird intensiv nach Möglichkeiten gesucht den Verbrennungsmotor durch umweltfreundliche Antriebstechnologien zu ersetzen. Vor allem elektrische Maschinen (E-Maschinen) finden deswegen verstärkt Einsatz in Fahrzeugen.

Dieser Literaturvergleich zeigt Vor- und Nachteile von verschiedenen E-Maschinentypen im Elektrofahrzeug auf. Dazu wird die Funktionsweise von Gleichstrom- mit Bürsten, bürstenlosen Gleichstrom-, Asynchron-, permanenterregten Synchron- und Reluktanzmaschinen kurz erläutert und deren Eigenschaften aufgeführt. Die verschiedenen E-Maschinen werden miteinander unter den Gesichtspunkten Leistungsdichte, Wirkungsgrad, Gewicht und Kosten verglichen. Abschließend werden die Vor- und Nachteile für deren Einsatz in Personenkraftwagen (Pkw), Lastkraftwagen (Lkw), Baufahrzeugen, landwirtschaftlich genutzten Fahrzeugen und im Motorsport aufgezeigt.

Die einzelnen Typen der E-Maschinen eignen sich, auf Grund ihrer unterschiedlichen Eigenschaften, nicht für alle Anwendungen gleichermaßen. Die am meisten verbaute E-Maschine in Pkw, Lkw und im Motorsport ist die permanenterregte Synchronmaschine. In elektrischen Fahrrädern wird meist eine bürstenlose Gleichstrommaschine verwendet. Bei Baumaschinen finden hauptsächlich Asynchronmaschinen ihren Einsatz.

**Index Terms**—Propulsion, Electric vehicles, Motors, Traction motors, Electric motors, AC motors, DC motors, Induction motors, Permanent magnet motors

## I. EINLEITUNG

Mit den Klimaschutzplan soll die Bundesrepublik Deutschland bis 2050 weitgehend treibhausgasneutral werden. Neben dem Industriesektor und dem Wärmesektor steht der Verkehrssektor vor großen Herausforderungen. Bis 2030 soll in der EU eine Reduktion der Treibhausgase um 55 % gegenüber 1990 erreicht werden. Durch den Straßenverkehr wurden 2017 in der EU 19,7 % der Treibhausgase erzeugt. Werden die die Emissionszahl des Straßenverkehrs von 2005 mit dem Ziel für 2030 verglichen, ist bis 2017 eine Reduktion der Emissionen von 3,4 % erreicht worden. Bei weiterer Verwendung fossiler Brennstoffe ist ein vollständig treibhausgasneutraler Transportsektor nicht realisierbar. [1-3]

Die derzeitige Forschung und Entwicklung effizienter elektrisch betriebener Fahrzeuge trägt unter anderem zur Umsetzung gesetzter Klimaziele bei. Hierbei erweist sich die Energiespeicherung in Form von Akkus als fundamentale Herausforderung, da die Baugröße und Gewicht von der gewünschten Reichweite des Fahrzeuges abhängig ist. Hohe Reichweiten führen somit zu Akkus mit großen Volumen und hohem Eigengewicht. Um dies entgegenzuwirken muss der Antrieb der Elektrofahrzeuge einen besonders hohen Wirkungsgrad besitzen. Die Auslegung eines hocheffizienten Antriebs in Elektrofahrzeugen ist nur unter Betrachtung der verschiedenen Anwendungsfälle möglich.

Mit der Gleichstrommaschine (DCM) wurden bereits im 19. Jahrhundert die ersten elektrischen Fahrzeuge angetrieben. Wie sich im nachfolgenden Vergleich der einzelnen E-Maschinen zeigt, besitzt die DCM entscheidende Nachteile. Vor allem besitzt sie einen hohen Verschleiß gegenüber anderen Typen von E-Maschinen, welcher durch ihre Bauweise bedingt ist. Durch das Ersetzen der Spulen des Rotors mit Permanentmagneten wird die DCM zu einer permanenterregten bürstenlosen Gleichstrommaschine (BLDC-Maschine). Die BLDC-Maschine hat keine Bürsten, dadurch wird ihr Verschleiß deutlich verringert.

Die am häufigste verwendete E-Maschine in elektrischen Fahrzeugen ist die permanenterregte Synchronmaschine (PSM). Danach folgen die geschaltene Reluktanzmaschine (SRM) und Asynchronmaschine (ASM). [4]

Die genannten Typen an E-Maschinen werden im Folgenden genauer betrachtet. Anschließend werden einige Anwendungsbereiche für Elektrofahrzeuge aufgelistet und der jeweils am besten geeignete Typ E-Maschine erörtert. Zudem werden in einigen Anwendungsbereichen Problematiken aufgezeigt, weshalb die Elektrifizierung in einigen Anwendungen noch nicht sehr fortgeschritten ist. Dazu werden einige Lösungsvorschläge genannt, diese werden jedoch nicht bewertet.

## II. VERGLEICH EINIGER TYPEN VON E-MASCHINEN

Im Folgenden werden fünf Typen von E-Maschinen vorgestellt, ihre Eigenschaften genannt und ihre Vor- und Nachteile aufgezählt. Generell betrachtet haben Wechselstrommaschinen einen höheren Wirkungsgrad, eine höhere Leistungsdichte und eine effizientere Rekuperation gegenüber Gleichstrommaschinen [5]. Gleichstrommaschinen besitzen dagegen eine einfachere und kompaktere Ansteuerung.

### A. Gleichstrommaschine mit Bürsten

Bei Gleichstrommaschinen unterscheidet man zwischen Maschinen mit und ohne Bürsten. Durch die Schaltgeschwindigkeit der einzelnen Spulen kann die Drehzahl der DCM verändert werden.

Die DCM mit Bürsten wurde in den ersten elektrischen Fahrzeugen verwendet. In modernen Fahrzeugen eignet sich die Maschine nur bedingt, da Maschinen mit mehr als 20 kW Wendepole und Kompensationswindungen benötigt. Dadurch haben DCM mit mehr als 20 kW eine voluminöse Konstruktion. Die DCM mit Bürsten hat eine geringe Leistungsdichte und einen geringen Wirkungsgrad. Wegen der Bürsten besitzt die DCM eine geringe Zuverlässigkeit und weist einen hohen Wartungsaufwand auf. Ein Vorteil der DCM ist, dass sie ein hohes Drehmoment bei niedriger Drehzahl hat. Vor allem für Anwendungen bei denen eine geringe Leistung benötigt wird oder eine einfache Ansteuerung nötig ist, sind DCM geeignet. Zudem ist keine Umwandlung der Batteriespannung in eine Wechselspannung notwendig. [5-9]

### B. Permanenterregte bürstenlose Gleichstrommaschine

Die BLDC-Maschine löst die Nachteile der DCM, welche mit den Bürsten zusammenhängen, während sie die Vorteile der einfachen Ansteuerung beibehält. Die BLDC-Maschine besitzt durch die Permanentmagnete eine höhere Leistungsdichte. Für die Permanentmagnete werden Seltene Erden verwendet und ist ein enormer Nachteil zur DCM. Durch den Wegfall der Bürsten ist die Zuverlässigkeit gestiegen, der Wartungsaufwand gesunken und die Geräuschbelastung reduziert. Die BLDC-Maschine kann im Vergleich zu anderen Typen von E-Maschinen mit den gleichen Spannungs- und Stromwerten das größte Drehmoment erzeugen. [5-9]

### C. Asynchronmaschine

Eine ASM wird durch eine mehrphasige Wechselspannung gespeist. Durch die Veränderung der Frequenz der Spannung ändert sich die Drehzahl der ASM. Durch das Drehmoment wird ein Schlupf zwischen Drehfeld des Stators und Eigenfeld des Rotors erzeugt, wodurch sich die ASM mit geringer Drehzahl wie der Frequenz der Spannung dreht.

Die ASM mit Käfigläufer ist, zusammen mit den DCM, der ausgereifteste Maschinentyp. Verglichen mit der BLDC-Maschinen besitzt die ASM eine höhere Leistungsdichte und einen besseren Wirkungsgrad. Die ASM hat eine einfache Konstruktion, eine hohe Zuverlässigkeit, geringen Wartungsaufwand und geringe Produktionskosten. Der größte Anteil der

Verluste der ASM sind Kupferverluste. Durch den niedrigeren Magnetisierungsstrom während des Feldschwächebetriebs werden die Kupferverluste verringert und damit die Leistungsverluste bei hohen Drehzahlen minimiert. Aufgrund des Magnetisierungsstroms und den hohen Kupferverlusten besitzt die ASM im Vergleich zu einer PSM insgesamt höhere Verluste bei Nenndrehzahl. Um den Magnetisierungsstrom zu verringern ist ein geringerer Luftspalt nötig. In der Fertigung von ASM ist deshalb ein höherer Qualitätsstandard erforderlich, welcher sich durch erhöhten Produktionskosten äußert.

Dazu wurden verschiedene Lösungsansätze ausgearbeitet, um die negativen Eigenschaften der ASM entgegenzuwirken. Darunter fällt zum Beispiel der Einsatz von Doppelwechselrichtern, damit wird die Constant Power Region erweitert. Andere Ansätze sind eine zweifach gespeiste Maschine zu verwenden, so dass die Leistung bei geringen Drehzahlen erhöht wird und so einen schnelleren Hochlauf erlaubt oder beim Design die Verluste zu minimieren. [5-8]

### D. Permanenterregte Synchronmaschine

Zusammen mit der ASM ist die PSM der am meisten verwendete E-Maschinentyp für Traktionsanwendungen. Durch das Ersetzen der Spulen im Rotor durch Magnete wird die ASM zu einer PSM. Im Gegensatz zur ASM dreht sich die PSM synchron zu der Frequenz der ihr zugeführten Spannung. Das Drehmoment wird durch das Vor- bzw. Nacheilen des Rotors erzeugt.

Die Magnete besitzen eine höhere Energiedichte als Spulen bei einer gleichzeitig geringeren Baugröße, was dazu führt, dass die PSM eine sehr hohe Leistungsdichte besitzt. Da die PSM im Vergleich zur ASM keine Kupferverluste aufweist, hat die PSM einen sehr hohen Wirkungsgrad. Die Verluste in der PSM sind hauptsächlich Eisenverluste des Stators, deshalb können sie sehr gut durch das Gehäuse abgeleitet werden. Nachteil von permanenterregten Maschinen ist, dass sie hohe Anteile an Seltenen Erden benötigen und durch Hitze oder einen starken Ruck entmagnetisiert werden können. Zudem wird im Feldschwächebereich ein zusätzlicher Strom benötigt. Dadurch erhöhen sich die Eisenverluste und der Wirkungsgrad nimmt bei hohen Drehzahlen ab. [5, 6, 8, 9]

### E. Geschaltene Reluktanzmaschine

Durch kürzlich erzielte Fortschritte in der Leistungselektronik wurde der Einsatz von SRM in Fahrzeugen ermöglicht und stellt den neuesten Trend dar. Die SRM verwendet die Reluktanzkraft um ein Drehmoment zu erzeugen. Der Name Reluktanzkraft kommt von Reluktanz, dem magnetischen Widerstand. Die Reluktanzkraft stets in die Richtung, in der sie den magnetischen Widerstand verringert. Damit wird die Induktivität der Spulenpaare erhöht.

Die SRM hat eine einfache und robuste Konstruktion, da der Rotor keine Windungen besitzt. Sie weist eine hohe Ausfallsicherheit und eine Drehmoment-Drehzahl Beziehung auf, welche sich für Traktionsanwendungen gut eignet. Dazu hat sie eine sehr ausgedehnte konstante Power Region. Die Leistungsdichte und der Wirkungsgrad der SRM ist mit denen

der ASM vergleichbar. Da der Rotor der SRM keine Permanentmagnete und keine Spulen besitzt, lässt sich eine SRM besser kühlen als eine ASM oder eine PSM, da sich die Wärme homogen im Rotor verteilt.

Um eine hohe Leistungsdichte zu realisieren, wird ein kleiner Luftspalt benötigt. Dadurch tritt jedoch Geräuschbelastung während des Betriebs auf. Maßnahmen um die Betriebsgeräusche zu verringern, wirken sich negativ auf die Leistungsdichte aus. Außerdem besitzt die SRM bei geringen Drehzahlen Drehmomentenrippel und die Ansteuerung der SRM ist aufwendiger als bei gewöhnlichen Wechselstrommaschinen. SRM werden bisher überwiegend in Prototypen eingesetzt. [5-8]

#### F. Zusammenfassung

Die Tabelle I wird aus [5], [7-10] ermittelt. Die Tabellen aus [5] und [9] werden interpretiert. Die Tabellen aus [7], [8] und [10] werden auf eine einheitliche Bewertung angepasst. Vier ist die höchste Zahl und zeigt den besten Typen für das jeweilige Kriterium an.

Wie in Tabelle I zu sehen ist, besitzt die PSM den höchsten Wirkungsgrad und die höchste Leistungsdichte. Die ASM hat die geringsten Produktionskosten, ist am zuverlässigsten und ist der wartungsfreundlichste Maschinentyp. Am einfachsten anzusteuern ist die DCM. Da in der Vergangenheit an DCM und ASM geforscht wurde, sind sie die technisch ausgereiftesten Maschinentypen.

Tabelle I  
VERGLEICH DER EINZELNEN E-MASCHINEN

Vergleichskriterien	DCM	ASM	SRM	PSM
Wirkungsgrad [5,7-10] <sup>1</sup>	1,4	3,0	3,3	3,8
Leistungsdichte [5,8,9]	1,0	2,7	3,0	4,0
Kosten [5,7,8] <sup>1</sup>	3,3	3,7	3,0	2,0
Ansteuerung [5,8]	4,0	3,0	1,5	3,0
Zuverlässigkeit [5,8,9]	1,7	4,0	3,3	2,7
Techn. Ausgereiftheit [5,8]	4,0	4,0	2,5	2,5

Die Eigenschaften werden absteigend bewertet, wobei 4 der höchste Wert ist.

<sup>1</sup>In [7] wird die PSM nicht bewertet.

### III. ANWENDUNGSFALLBEZOGENER VERGLEICH DER E-MASCHINENTYPEN

Im Folgenden werden einzelne Anwendungen von E-Maschinen vorgestellt. In den einzelnen Anwendungen werden verschiedene Anforderungen an die E-Maschine gestellt. Vor allem die Energiespeicherung für E-Maschinen gestaltet sich bei vielen Anwendungen als problematisch.

#### A. Personenkraftwagen

Pkws nutzen den meisten Kraftstoff im Transportsektor. Im Jahr 2015 wurden insgesamt 560 TWh Kraftstoff von Straßenfahrzeugen verbraucht. Davon wurden 440 TWh für Pkw verwendet. [2]

Aus diesem Grund erzeugen Pkw von allen Fahrzeugen des

Transportsektors die meisten CO<sub>2</sub> Gase [11]. Da alle anderen, im Literaturvergleich, aufgelisteten Fahrzeuge kommerziell genutzt werden, bis auf das elektrische Fahrrad (E-Bike), ist vor allem der Preis der E-Maschine und deren Ansteuerung entscheidend, da Privatpersonen in der Regel weniger Kapital zur Verfügung haben.

In Pkws werden alle vorgestellten E-Maschinen eingesetzt. Jedoch eignen sich gerade die DCM und die BLDC-Maschine für kleine und leichte Fahrzeuge, welche für den Stadtverkehr und kurze Strecken entwickelt werden. Die Gleichstrommaschinen sind leichter und kompakter, da die Leistungselektronik zur Ansteuerung der E-Maschinen kompakter ist.

Bei größeren Pkw werden hauptsächlich Wechselstrommaschinen verwendet, da das Gewicht der Ansteuerung im Verhältnis zum Fahrzeuggewicht geringer ist. Sowohl SRM, PSM als auch ASM haben geeignete Anwendungsfälle. Für high-speed Anwendungen eignet sich vor allem die SRM. Um hocheffiziente Antriebe zu realisieren ist die PSM geeignet und für kostengünstige und wartungsarme Anwendungen ist die ASM geeignet. [8]

#### B. Lastkraftwagen

Lkws erzeugen mehr als 16% der im Transportsektor erzeugten CO<sub>2</sub>-Gase. Der Einsatz von Akkus ist dabei umstritten, da Lkws im Vergleich zu Pkws mehr als das zehnfache Leergewicht besitzen und täglich weitere Strecken zurücklegen. An einem Arbeitstag sollen keine Verzögerungen durch das Laden der Akkus entstehen. Daher müssen Lkws tonnenschwere Akkus verwenden, welche die Nutzlast der Lkws deutlich verringern. Deswegen sind auch andere Alternativen zu permanenten Akkus, wie eine Oberleitung [14] - ähnlich zu einem elektrischen Zug - oder ein Wechselsystem für Akkus in der Testphase.

In Lkws eignen sich vor allem PSM und SRM. Die beiden E-Maschinen besitzen einen hohen Wirkungsgrad, welcher für einen energieeffizienten Dauerbetrieb nötig ist. Die SRM besitzt im Vergleich zu PSM keine Permanentmagnete aus Seltenen Erden, weshalb die SRM eine umweltfreundlichere und kostengünstigere Alternative darstellt. Zudem besitzt die SRM ein hohes Hochlaufmoment. Nachteilig am Einsatz von SRM ist die aufwendigere Ansteuerung, weshalb in Lkws bisher hauptsächlich PSM verwendet werden. [11-13]

#### C. Elektrisches Fahrrad

Das E-Bike, bei der Verwendung des Begriffs wird sich ausschließlich auf Pedelecs bezogen, gewinnt seit einigen Jahren an Bedeutung. So stiegen die jährlichen Verkaufszahlen in Westeuropa von 2012 bis 2018 von 0,7 Millionen Fahrrädern auf über 1,5 Millionen Fahrräder an.

Die Leistung von E-Bikes ist in Europa gesetzlich auf 250 W begrenzt. Die maximale Geschwindigkeit eines E-Bikes ist in Europa auf 25 km/h festgelegt. Durch die Regulationen sinken die Anforderungen an die verwendete E-Maschine. Um das Fahrgefühl eines E-Bikes, im Vergleich zu einem herkömmlichen Fahrrad, nicht zu stark zu verändern, müssen die E-Maschine und die Ansteuerung möglichst leicht sein.

Der am meisten verwendete E-Maschinentyp im E-Bike ist die BLDC-Maschine. Auf Grund ihres geringen Gewichts und der einfachen Ansteuerung durch Gleichstrom ist die BLDC-Maschine die am besten geeignete E-Maschine in E-Bikes. [15]

#### D. Motorsport

Die Hauptanforderung an die E-Maschine im Motorsport ist das Verhältnis zwischen erzeugbarem Drehmoment zum Gewicht der E-Maschine. Besonders die PSM eignet sich für die Anforderung, da sie eine hohe Leistungsdichte und den höchsten Wirkungsgrad zu anderen E-Maschinentypen aufweist. Dies ist auch an den eingesetzten E-Maschinen in der Formel E erkennbar. Die Verwendung von teureren Seltenen Erden zur Herstellung der Permanentmagnete ist hierbei durch das große finanzielle Budget der Hersteller nicht relevant. [16]

#### E. Baufahrzeuge

Mobile Baufahrzeuge haben, wie auch Lkw, die Anforderung einen Arbeitstag ohne Ausfallzeiten zu überstehen. Zudem werden in einigen Anwendungen, vor allem bei Arbeiten in geschlossenen Räumen, Baufahrzeuge gefordert, die keine Emissionen ausstoßen. Hierbei wird grundsätzlich in leichten und schweren Baufahrzeugen unterschieden, da es für den jeweiligen Bereich unterschiedliche Anforderungen hinsichtlich der Energiespeicherung gibt. Leichte Baufahrzeuge wiegen nur wenige Tonnen und sind oft vollständig elektrifiziert. Sie werden mit einer Batterie mit wenig Gewicht ausgestattet, welche die Energie für die gesamte Betriebszeit liefern kann. Schwere Baufahrzeuge hingegen weisen größtenteils eine Teilelektrifizierung auf, da bestehende Energiespeichersysteme nicht die erforderliche Energiemenge bereitstellen können und somit mittels Kabel oder einem Verbrennungsmotor teilversorgt werden müssen.

Leichtere Baufahrzeuge, welche nur wenige Tonnen wiegen, sind oft elektrifiziert, da die benötigte Energie für einen Arbeitstag in leichten Batterien gespeichert werden kann. Schwerere Baufahrzeuge werden meist nur teilelektrifiziert, da die benötigte Energie nur schwer gespeichert werden kann. Jedoch gibt es durchaus rein elektrische Baumaschinen. Hauptsächlich handelt es sich dabei um Miningbagger, da diese sich nur wenig bewegen und somit auch per Kabel versorgt werden können.

Da bereits elektrifizierte Miningbagger eingesetzt werden, werden im Folgenden die Vorteile einer E-Maschine an Miningbaggern erklärt. Gegenüber einem Dieselmotor bietet die E-Maschine einige Vorteile. Durch die Rekuperation von E-Maschinen und die verschiedenen Drehzahlen einer E-Maschine können deutlich leistungseffizientere Hydrauliksysteme realisiert werden. Durch variable Verstellpumpen und high speed E-Maschinen ist eine Steigerung der Effizienz von bis zu 42 % möglich.

Bei Baufahrzeugen jeder Größe wird hauptsächlich eine ASM verwendet, da sie durch ihren geringen Wartungsaufwand und ihre hohe Zuverlässigkeit für einen Dauerbetrieb in rauer Umgebung am besten geeignet ist. [17]

## IV. SCHLUSSFOLGERUNG

Fahrzeuge und somit die eingesetzten E-Maschinen weisen für ihre Anwendung unterschiedliche Anforderungen auf und können untereinander stark voneinander abweichen. Dies wird besonders durch die Benennung der Eigenschaften der einzelnen E-Maschinen ersichtlich.

Für Fahrzeuge, mit Anforderung an ein geringes Gewicht, wie einem E-Bike oder einem Pkw für den Stadtverkehr, eignen sich DCM und BLDC-Maschine. Beide Typen von E-Maschinen können durch ihre einfache Ansteuerung kompakt und leicht verbaut werden. Die DCM ist kostengünstiger, dafür wartungsintensiver als die BLDC-Maschine.

Für den Automobilbereich gibt es, zusätzlich zu den Gleichstrommaschinen, drei weitverbreitete Typen. Während die Kosten der ASM gering im Vergleich zur PSM sind, hat die PSM eine höhere Leistungsdichte und Effizienz. Die SRM hat geringe Kosten, eine effiziente Kühlung und ist vom Wirkungsgrad, der Leistungsdichte und der Zuverlässigkeit mit einer ASM vergleichbar.

Für Lkw und im Motorsport ist vor allem der Wirkungsgrad der E-Maschine entscheidend, deshalb wird hier bevorzugt die PSM verwendet.

In Baufahrzeugen wird hauptsächlich die ASM verwendet, da sie am besten für raue Umgebungen geeignet ist.

## V. AUSBLICK

Die neueste und vielversprechendste E-Maschine für effiziente high-speed Anwendungen ist eine Kombination aus einer PSM und einer SRM, die permanenterregte synchrone Reluktanzmaschine (PSRM). Sie bietet eine höhere Leistungsdichte als andere Typen von E-Maschinen, ist robust, ausfallsicher und hat eine kleine Bauform. Jedoch gestaltet sich die Ansteuerung und die Herstellung von PSRM noch als sehr aufwendig, da, um ein effizientes Design zu erhalten, der Luftspalt minimiert werden muss. Deshalb wird die PSRM bisher nur von einigen wenigen Automobilherstellern verwendet. Zur Zeit werden verschiedene Ausführungen der PSRM erforscht. [18]

## LITERATUR

- [1] M. Fritsch, T. Puls, T. Schaefer, "Synthetische Kraftstoffe: Potenzial für Europa", *Institut der deutschen Wirtschaft*, Köln, 2021.
- [2] U. Kramer, F. Orloff, S. Stollenwerk, R. Thee, "Defossilisierung des Transportsektors Optionen und Voraussetzungen in Deutschland", in *FVV Prime Movers. Technologies.*, 2018, R586.
- [3] J. L. Breuer, R. C. Samsun, D. Stolten, Ralf Peters, "How to reduce the greenhouse gas emissions and air pollution caused by light and heavy duty vehicles with battery-electric, fuel cell-electric and catenary trucks", *Environment International*, Vol. 152, Jul. 2021.
- [4] A. M. Lulhe, T. N. Date, "A Technology Review Paper for Drives used in Electrical Vehicle (EV) & Hybrid Vehicles (HEV)", in *ICCICCT*, 2015, pp. 632-636.
- [5] N. Hashemnia, B. Asaei, "Comparativ Study of Using Different Electric Motors in the Electric Vehicles", in *International conference on Electrical Machines*, 2008, pp.1-5, Paper ID 1257.
- [6] G. Luthra, "Comparison of Characteristics of various motors drives currently used in electric vehicle propulsion system", in *Proceedings of SARC-ACN International Conference*, 2017, pp. 5-8.
- [7] X. D. Xue, K. W. E. Cheng, N. C. Cheung, "Selection of Electric Motor Drives for Electric Vehicles", in *AUPEC'08*, China, 2008, pp. 1-6.

- [8] T. Finken, M. Felden, K. Hameyer, "Comparison and design of different electrical machine types regarding their applicability in hybrid electrical vehicles", in *Proceedings of the 2008 international conference on electrical machines*, 2008, pp. 1-5, Paper ID 998.
- [9] P. N. Bhatt, H. Mehar, M. Sahajwani, "Electrical Motors for Electric Vehicle – A Comparative Study", in *RAITEA*, 2019.
- [10] J. d. Santiago, H. Bernhoff, B. Ekergård, S. Eriksson, S. Ferhatovic, R. Waters, M. Leijon, "Electrical Motor Drivelines in Commercial All-Electric Vehicles: A Review", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 61, NO. 2, pp. 475-484, Feb. 2012.
- [11] E. Cabukoglu, G. Georges, L. Küng, G. Pareschi, K. Boulouchos, "Battery electric propulsion: An option for heavy-duty vehicles? Results from a Swiss case-study", *Transportation Research Part C*, Vol. 88, pp. 107-123, Mar. 2018.
- [12] H. Liimatainen, O. van Vliet, D. Aplyn, "The potential of electric trucks – An international commodity-level analysis", *Applied Energy*, Vol. 236, pp. 804-814, Feb. 2019.
- [13] Y. Hu, C. Gan, Q. Sun, P. Li, J. Wu, H. Wen, "Modular Tri-Port High-Power Converter for SRM Based Plug-in Hybrid Electrical Trucks", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 4, pp. 3247-3257, April 2018.
- [14] Siemens AG/Siemens Mobility GmbH. (2021, May. 17). *eHighway-Solutions for electrified road freight transport* [Online]. Available: <https://press.siemens.com/global/en/feature/ehighway-solutions-electrified-road-freight-transport>
- [15] N. B. Hung, O. Lim, "A review of history, development, design and research of electric bicycles", *Applied Energy*, Vol. 260, Feb. 2020.
- [16] G. Volpe, F. Marignetti, J. Goss, M. Popescu, D. A. Staton, I. Foley, "High-Performance Electric Motor for Motor Sport Application", in *VPPC*, Dec. 2017, pp. 1-5.
- [17] A. Opgenoorth, S. Quabeck, R. W. De Doncker, K. Schmitz, "Challenges and possibilities of the integration of electric drives in mobile machinery", in *12th International Fluid Power Conference*, Deutschland, Dresden, 2020, pp. 471-480.
- [18] F. Un-Noor, S. Padmanaban, L. Mihet-Popa, M. N. Mollah, E. Hossain, "A Comprehensive Study of Key Electric Vehicle (EV) Components, Technologies, Challenges, Impacts, and Future Direction of Development", in *Energies*, Vol. 10, Num. 8, Aug. 2017.

# Aktive Geräuschkompensation: Verfahren und Grenzen

Alexander Dischner

*Elektro- und Informationstechnik*

*Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg*

Regensburg, Deutschland

alexander.dischner@st.oth-regensburg.de

**Zusammenfassung**—Die Reduzierung von Umgebungslärm und Hintergrundgeräuschen dient dem Schutz des Gehörs und sorgt für ein besseres Wohlbefinden in verschiedenen Alltagssituationen. Passive Systeme, wie ein Gehörschutz, Ohrstöpsel oder Isolation von Wänden, dämpfen lediglich hochfrequente und breitbandige Störungen zuverlässig. Für niederfrequente, schmalbandige Geräusche in Verkehrsmitteln oder in industriellen Anlagen, wird zusätzlich aktive Geräuschkompensation (engl. Active Noise Cancellation (ANC)) eingesetzt.

Aktiv bedeutet, dass Störgeräusche aus der Umgebung nach dem Prinzip der destruktiven Interferenz eliminiert werden. Lautsprecher erzeugen einen Antischall, der sich gegenphasig zum Umgebungsschall überlagert. Dabei treffen Wellentäler auf Wellenberge aufeinander, die sich in Summe auslöschen. Da sich Schall in alle Richtungen ausbreitet und Umgebungsgeräusche nicht nur aus einer Welle bestehen, gibt es verschiedene Verfahren, die Auslöschung zu erreichen und zu optimieren.

In dieser Arbeit werden verschiedene Lösungsansätze für ANC-Systeme vorgestellt und deren Schwierigkeiten bei der Umsetzung herausgearbeitet. Das einfache und übersichtliche System eines Kopfhörers wird dazu verwendet, die Prinzipien zu erklären. Eine Regelstrecke wertet dabei das Signal eines Mikrofons aus, das durch adaptive Filter in Echtzeit gewandelt und über den Lautsprecher emittiert wird. Je nach Anordnung des Mikrofons wird zwischen einer Messung des Umgebungslärms vor der Kompensation (feedforward) oder des resultierenden Fehlersignals aus Umgebungsgeräusch und Gegenlärm (feedback) unterschieden. Bei hybriden Modellen werden beide Verfahren kombiniert. Signalprozessoren berechnen Koeffizienten adaptiver Filter für die Regelung in Echtzeit. Dabei kommen unter anderen aus der digitalen Signalverarbeitung bekannte Least Mean Square (LMS) Algorithmen zum Einsatz.

Die Grenzen eines ANC-Systems werden erreicht, wenn der Regelkreis instabil wird. Dies kann zum Beispiel bei der Verarbeitung hoher Frequenzen eintreten. Auch Latenzzeiten der Regelstrecke machen die Kompensation nur endlich schnell. In Zukunft wird diese Technologie durch die Entwicklung schnellerer und optimierter Signalprozessoren noch verbessert werden können, wodurch neue Anwendungen denkbar sind.

**Index Terms**—Active Noise Cancelling (ANC), Noise Cancellation, Adaptive Filter, Digital Signal Processing, Least Mean Squared (LMS)

## I. EINFÜHRUNG

In einer lauten Umgebung wie in öffentlichen Verkehrsmitteln, Flugzeugen, Autos oder industriellen Umgebungen, ist der Mensch ständig verschiedenen Lärmquellen ausgesetzt. Eine Geräuschkürzung wird in der Regel durch passive Maßnahmen mit Dämmmaterialien oder direkt durch Gehör-

schützer und Ohrstöpsel erreicht. Gerade im unteren Frequenzbereich bis ca. 2 kHz [1] ist diese Vorgehensweise aber vor allem durch den erhöhten Platzbedarf und der Menge an benötigten Materialien teuer, sperrig und eher unwirksam. In diesem Bereich ergänzt die Technik der aktiven Geräuschkompensation die Erzeugung von Ruhebereichen und bietet außerdem zusätzlichen Schutz des menschlichen Gehörs [2] mit weniger Material- und Platzeinsatz.

Bei der aktiven Geräuschkompensation kommt ein physikalischer Effekt der destruktiven Interferenz zu tragen: Zwei Schallwellen heben sich gegenseitig auf, wenn sie mit der gleichen Amplitude aber mit entgegengesetzter Phase, also einer Verschiebung von  $180^\circ$  überlagert werden [3]. Dieses Superpositionsprinzip, das von Lueg 1936 als Patentschrift [4] veröffentlicht wurde, ist nach wie vor für gegenwärtige Anwendungen aktiver Reduzierung von Geräusche von Bedeutung. Dabei wird der Störschall von einem Referenzmikrofon aufgenommen und durch einen nachfolgenden Lautsprecher invertiert abgespielt, wodurch das Umgebungsrauschen minimiert werden soll. Eine zweite wichtige Theorie in der Literatur stammt von Olson und May 1953 [5], bei der das Signal nicht vor dem Lautsprecher aufgenommen wird, sondern danach. Dabei wird von der Lärmquelle aus gesehen nach dem Aktuator das gesamte Schallfeld (Lärm und Antischall) von einem Mikrofon erfasst. Ein Signalverarbeitungsblock erkennt die Abweichung und regelt die Ansteuerung des Lautsprechers, um das Störsignal zu minimieren [1]. Grundsätzlich lassen sich ANC-Systeme in feedforward (FF)-Systeme (mit einem Referenzmikrofon vor dem Lautsprecher) und feedback (FB)-Systeme (mit einem Fehlermikrofon nach dem Lautsprecher) einteilen.

Die Effektivität eines ANC-Systems hängt sehr stark von der exakten Rekonstruktion des Umgebungsrauschens ab, das mit dem Lautsprecher reduziert werden soll. Da sich die akustische Umgebung zeitlich ändert, muss für die Erzeugung eines Antischalls die Übertragungsfunktion des Systems mitberücksichtigt werden. Filter, deren Koeffizienten mit adaptiven Algorithmen optimiert werden, können somit in Echtzeit auf entsprechende Änderungen in der Umgebung reagieren.

Diese Arbeit soll eine Übersicht über verwendete Verfahren bieten. Dazu wird der Aufbau anhand einer feedback- und feedforward-Struktur und deren Zusammenführung in einem Kopfhörer betrachtet. Danach werden die benötigten Algorithmen

men, aufbauend auf Least Mean Squared (LMS) und Recursive Least Square (RLS), für die adaptiven Filter erklärt. Anschließend werden spezielle Anwendungen, wie Virtual Sensing und Multichannel-Systeme angesprochen. Zuletzt werden die Grenzen solcher Systeme zusammengefasst.

## II. NOISE CANCELLING

Für die Betrachtung des Konzepts von Noise Cancelling wird das Modell eines Kopfhörers (Abbildung 1) herangezogen. Dieses überschaubare und kompakte System ermöglicht eine nachvollziehbare Beschreibung aller Komponenten und Prinzipien. Dabei werden zwei Bereiche separat betrachtet. Im Vordergrund ist der akustische Teil, der das Gehäuse mit der Ausführung und Anordnung von Lautsprechern und Mikrofonen enthält. Im Hintergrund gibt es einen elektronischen Pfad, in dem die Realisierung der Filter zur Erzeugung des Antischalls stattfindet [6].

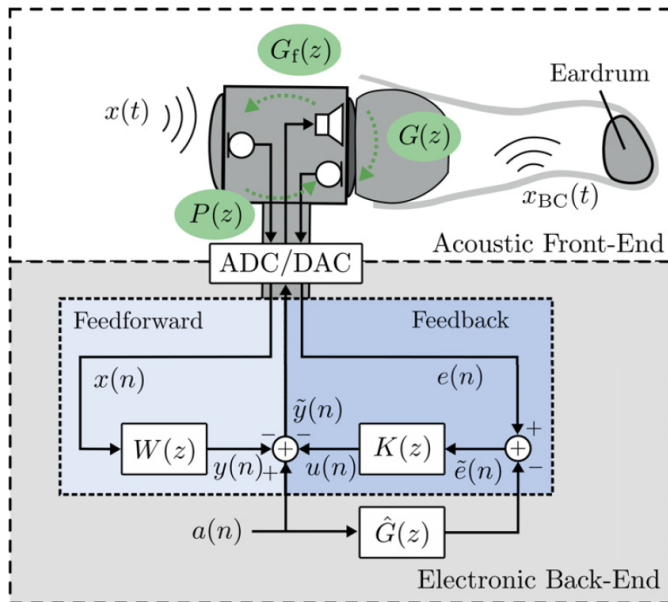


Abbildung 1: Grundaufbau eines ANC-Systems mit dem akustischen Vordergrund und dem elektrischen Hintergrund am Beispiel eines In-Ear-Kopfhörers mit dem Referenzsignal  $x(t)$  und dem Körperschall  $x_{BC}(t)$  des Gehörgangs. [6]

Der akustische Teil besteht aus drei elementaren Übertragungsfunktionen:

- 1) Der Primärpfad  $P(z)$  beschreibt den Übergang der Schallwelle vom Referenzmikrofon bis zum Fehlermikrofon.
- 2) Der Sekundärpfad  $G(z)$  stellt die Strecke zwischen dem digitalen Ausgang  $\tilde{y}(n)$  zum digitalen Eingang  $e(n)$  des Fehlermikrofons dar. Dabei werden u. a. auch die DA- bzw. AD-Wandlung, sowie anti-aliasing-Filter<sup>1</sup> und Charakteristiken von Mikrofon und Lautsprecher berücksichtigt.

<sup>1</sup>Tiefpass, um hochfrequente Störungen zu eliminieren, um Fehler in der Abtastung vorzubeugen.

- 3) Der feedback-Pfad  $G_f(z)$  beschreibt die eigentlich unerwünschte Rückkopplung vom Lautsprecher zum Referenzmikrofon. Dabei müssen auch sämtliche Einflüsse wie bei  $G(z)$  berücksichtigt werden.

Das Audiosignal  $a(n)$  dient der verbesserten Wahrnehmung durch ANC trotz externem Rauschens. Dazu wird ein zusätzliches Modellfilter  $\tilde{G}(z)$  nötig, um die Verzerrung durch das feedback-System zu kompensieren. Andernfalls würde das Audiosignal ebenfalls durch ANC unterdrückt werden. Das resultierende Signal für den Lautsprecher aus dem Gesamtsystem kann somit nach (1) berechnet werden.

$$\tilde{y}(n) = -y(n) - u(n) + a(n) \quad (1)$$

### A. Feedforward ANC

Bei der voraushörenden Lärmunterdrückung (feedforward) im linken Teil der Abbildung 1 wird ein Referenzsignal  $x(n)$  mit  $W(z)$  gefiltert, um das Auslöschungssignal  $y(n)$  zu erzeugen. Der Feedbackpfad wird dabei durch  $K(z) = 0$  vernachlässigt. Das zeitinvariante Signal wird dann für den Lautsprecher (Aktuator) gewandelt und ausgegeben. Wichtig bei diesem System ist, dass die Kausalitätsbedingung zwischen der Aufnahme der Störung und der Überlagerung mit dem Löschsingal gewährleistet ist. Das bedeutet, dass die Konvertierung von  $x(t)$  in ein digitales Signal  $x(n)$ , die Verarbeitung durch  $W(z)$  und die Rückwandlung von  $y(n)$  in ein analoges Signal  $y(t)$  für den Aktuator nicht länger dauern darf, als der Weg des Rauschsignals im Primärpfad  $P(z)$ . Hinzu kommt das Problem, dass sich der erzeugte Gegenschall vom Lautsprecher nicht nur in eine Richtung ausbreitet, sondern auch zum Referenz-Mikrofon zurück. Dies bedingt unter Umständen eine unerwünschte akustische Rückkopplung, was zur Instabilität führen kann [6]–[8].

Für die Unterdrückung von schmalbandigem, periodischem Rauschen vereinfacht sich die Implementierung. Bei diesem Verfahren synthetisiert ein Signalgenerator das Störgeräusch in einem bestimmten Frequenzbereich. Dadurch wird unter anderem die Kausalitätsbedingung entspannt und die Rückkopplung vom Sekundärlautsprecher zurück zum Referenzmikrofon minimiert. [7]

Unter Berücksichtigung der aktiven Dämpfung des Primärpfades  $P(z)$  im Kopfhörer lässt sich das ideale, möglicherweise nicht kausale und nicht stabile Filter  $W(z)$  durch (2) berechnen.

$$W_{\text{opt}}(z) = \frac{P(z)}{G(z)} \quad (2)$$

### B. Feedback ANC

Das Fehlermikrofon detektiert das kompensierte Signal  $e(n)$  nach dem Lautsprecher und führt es zu diesem zurück. In Abbildung 1 wird bei dieser Betrachtung der feedforward-Zweig durch  $W(z) = 0$  nicht betrachtet. Der verbleibende Fehler  $e(n)$  aus dem erzeugten Antischall und des Rauschens aus  $P(z)$  wird durch  $K(z)$  gefiltert und über den Lautsprecher in das Ohr zurückgespeist. Im Gegensatz zum feedforward-System muss hier die Latenzzeit zwischen Fehlersignal und

Antischall möglichst gering sein. Feedback Systeme sind sehr verbreitet für Anwendungen in Kopfhörern, welche speziell in [2], [9] und [10] behandelt werden.

### C. Hybrides ANC

Die Zusammenführung beider Teilsysteme sorgt dafür, dass das Referenzsignal  $x(n)$  vor und das Fehlersignal  $e(n)$  nach der Kompensation im Gesamtsystem berücksichtigt wird. Für die Modellierung des Vorwärts-Pfades dient ein Internal Model Control (IMC) zur Störungsschätzung. Das ist nötig, um eine wechselwirkungsfreie Kombination aus beiden Pfaden zu realisieren. Die Störungsschätzung ergänzt den Vorwärts-Regler um eine Nachbildung des Sekundärpfades  $\tilde{G}(z)$  (in Abbildung 1 nicht enthalten).

Diese Rückführung stellt allerdings gleichzeitig ein Problem dar, da sich die Sekundärstrecke  $G(z)$  z. B. bei Kopfhörern durch unterschiedliche Passformen und Gehörgängen verändern kann. Die Rückführung in den Feedback-Regler kann dadurch zu einem instabilen Gesamtverhalten führen, wodurch dieser Regler sehr „vorsichtig“ ausgelegt werden muss, was sich negativ auf die Kompensationsergebnisse auswirkt. [7], [11]

## III. FILTER UND ALGORITHMEN

ANC kann wie bereits vorher behandelt als feedback-, feedforward- oder als hybrides System realisiert werden. Die größte Herausforderung besteht dabei im Filterdesign in den Signalpfaden, um die Leistung und Stabilität bei wechselnden Bedingungen zu garantieren [6]. Typische digitale adaptive Filter sind Kalman<sup>2</sup>- oder Wiener<sup>3</sup>-Filter.

In einem zeitinvarianten System werden stationäre Filter im Vorfeld, unter der Voraussetzung, dass das System bereits vorher für den Anwendungsfall bekannt sein muss, definiert. Besonders der Übertragungskanal  $P(z)$  und der Sekundärpfad  $G(z)$  aus Abbildung 1 müssen genau definiert sein, um gerade im feedback-Pfad keine Instabilität hervorzurufen. [6], [7]

Rauschen ist im Regelfall ein Zufallsprozess. Dadurch werden adaptive Filter verwendet, die ihre Impulsantwort zur Laufzeit anpassen, um das korrelierte Signal am Eingang herauszufiltern. Diese Technik wurde bereits 1975 von Widrow [12] eingesetzt. Hochentwickelte Algorithmen haben die Aufgabe der schnellen Konvergenz und einer großen Rauschunterdrückung. Zudem sollen sie möglichst robust gegenüber Störungen sein [8].

### A. LMS Algorithmen

Der LMS-Algorithmus und Abwandlungen davon haben sich in der Anwendung von ANC durch ihre Einfachheit und Robustheit etabliert. Allerdings hängt die Konvergenzrate dieser Typen von den Eigenschaften des Eingangssignals ab.

<sup>2</sup>Ein Kalman-Filter ist ein mathematisches Konstrukt aus dem Bereich der Computergrafik. Durch eine Reihe von mathematischen Gleichungen wird eine Minimierung des geschätzten Fehlers erreicht [13].

<sup>3</sup>Ein Wiener-Filter ist ein digitaler Filter, der dazu dient, die mittlere quadratische Differenz zwischen einem gewünschten Signal und dem gefilterten Ausgang zu verringern. Die Realisierung ist mit FIR-Filter oder IIR-Filter möglich [13].

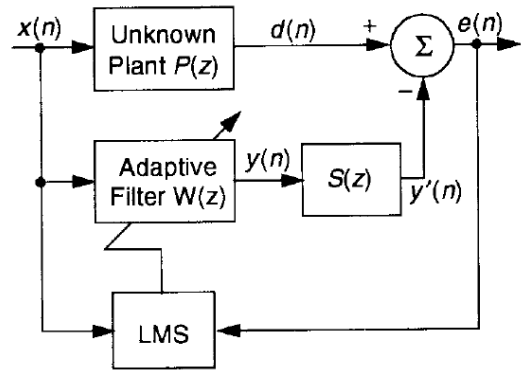


Abbildung 2: Vereinfachtes Blockdiagramm eines adaptiven Filters mit LMS-Algorithmus. Das Fehlersignal  $e(n)$  wird durch den Primärpfad  $P(z)$  des akustischen Pfades und dem adaptiven Filter  $W(z)$  ermittelt.  $S(z)$  beschreibt den Sekundärpfad zwischen Lautsprecher und Fehlermikrofon [8]

Abbildung 2 zeigt schematisch ein adaptives Filter mit dem LMS-Optimierungsalgorithmus. Durch ein Gradientenverfahren wird das zeitlich veränderliche Fehlersignal  $e(n)$  geschätzt. Durch die Berechnung der Filtergewichte  $w(n)$  in (3) wird der Gradient iterativ minimiert. Dabei werden für jede Iteration die aktuellsten Werte ( $d(n)$ ,  $x(n)$ ,  $w(n)$  und  $e(n)$ ) benötigt. In (4) wird dabei der Ausgangswert des Filters und in (5) das Fehlersignal berechnet. Der Parameter  $\mu$  in (3) gibt dabei die Schrittweite des Iterationsverfahren an. Die Konvergenz des Systems ist von der Leistungsdichte des Referenzsignals  $x(n)$ , der Filterlänge  $M - 1$  und von der Stabilität abhängig. [13], [14]

$$w_i(n+1) = w_i(n) + \mu \cdot e(n) \cdot x(n-i) \quad (3)$$

$$y(n) = \sum_{i=0}^{M-1} w_i(n) \cdot x(n-i) \quad (4)$$

$$e(n) = d(n) - y(n) \cdot s(n) \quad (5)$$

Die Wahl eines geeigneten Schrittweitenparameters  $\mu$  ist sehr komplex und ist wichtig für die Konvergenzgeschwindigkeit und Stabilität des LMS-Algorithmus. Dieses Problem wird durch den Normalized Least Mean Squares (NLMS)-Algorithmus minimiert, bei dem die Schrittweite  $\mu$  variabel ist. Die Berechnung nach (6) passt die Schrittweite bei jeder Iteration an das Eingangssignal an.  $\alpha$  und  $c$  sind dabei Anpassungskonstanten von NLMS mit  $0 < \alpha < 2$  und  $c < 1$ . [13]

$$\mu(n) = \frac{\alpha}{c + \|x(n)\|^2} \quad (6)$$

Durch die Berücksichtigung des Sekundärpfades in dem Regler neigt der Standard-LMS-Algorithmus zur Instabilität. Dies ist so zu begründen, da  $e(n)$  und  $x(n)$  zeitlich versetzt sind. Um diesen Effekt von  $S(z)$  zu kompensieren, wird ein



identisches Filter in den Referenzsignalpfad zur Gewichtsaktualisierung des LMS-Algorithmus platziert, wodurch der Filtered-x-LMS-Algorithmus (FxLMS) realisiert wird. [8]

### B. RLS Algorithmus

Für farbiges Rauschen<sup>4</sup> wird die Konvergenz der LMS-Algorithmen sehr langsam, wenn das adaptive Filter ein Signal mit hohem spektralen Dynamikbereich empfängt. Deshalb entwickelte man eine Alternative zu diesem Verfahren. Bei RLS werden die Filterkoeffizienten rekursiv berechnet. Daraus ergibt sich eine Kostenfunktion der kleinsten Quadrate im Bezug auf die Eingangssignale. Die Konvergenzgeschwindigkeit ist im Vergleich zu einem LMS-Algorithmus höher, was aber auf die Kosten eines erhöhten Rechenaufwands und schlechten numerischen Eigenschaften geht. [13]

## IV. SPEZIELLE ANWENDUNGEN

Für verschiedene Anwendungsfälle der aktiven Geräuschkompensation gibt es unterschiedliche Verfahren und Systeme, die an diese Gegebenheiten angepasst werden. Das Konzept von ANC kann mit komplexeren Systemen erweitert oder durch bestimmte Anordnungen verändert werden. Im Bereich der Fortbewegungsmittel, wie Flugzeug oder Auto, sind größere bzw. speziell angepasste Ruhezone nötig.

### A. Virtual Sensing

An der Position des Fehlermikrofons des feedback-Teils ist in der Regel der Mittelpunkt der Ruhezone eines ANC-Systems. In einigen Fällen in offenen Systemen, z. B. in Fahrzeuginnenräumen, ist es aber räumlich nicht immer möglich ein Referenzmikrofon an die Stelle zu platzieren, an der die Schallwellen unterdrückt werden sollen. Dabei wird die Technik der virtuellen Abtastung eingesetzt, bei der über virtuelle Sensoren eine Ruhezone geschaffen wird. Dies gelingt zum einen mit Systemmodellen, die über physikalische Sensoren Daten erfassen [7]. Zum anderen über stochastische Methoden, die in [16] erklärt werden. In [17] ist diese Methode für den Einsatz an Kopfstützen beschrieben.

### B. Single- und Multichannel Anwendungen

Je nach Umgebung und Geometrie des Bereiches, der schallarm gemacht werden soll, sind ein- oder mehrkanalige Ausführungen notwendig. Ein Schallfeld in einem Gehäuse oder in einem dreidimensionalen Raum ist wesentlich komplexer als in einem geschlossenen Übertragungskanal.

Grundsätzlich sind also mehrkanalige ANC-Systeme mit mehreren Sekundärquellen, Fehlersensoren oder evtl. mehreren Referenzsensoren nötig, um eine großflächige Auslöschung in einem Bereich zu erreichen. Dabei ist die Platzierung der Fehlersensoren sehr wichtig, um die potentielle akustische Energie bestmöglich zu erfassen [7]. Der Innenraum eines Fahrzeuges erfordert durch die größere Umgebung mehrere Lautsprecher in verschiedenen Richtungen.

<sup>4</sup>Bei farbigem Rauschen ist die Rauschspannungsdichte im Gegensatz zum weißen Rauschen frequenzabhängig [15].

Angenommen ein multi-channel ANC-System nutzt einen Referenzsensor M Sekundärquellen und N Fehlersensoren. Der sich ergebende FxLMS Algorithmus besteht dadurch aus M adaptiven Filtern und M x N Sekundärpfad-Modellierungen. Dadurch erhöht sich die rechnerische Komplexität des multi-channel Systems signifikant mit der Zahl der eingesetzten Messwertgeber [7].

## V. GRENZEN

Theoretisch führt die Überlagerung zweier Signale mit gleicher Amplitude und inverser Phase zur kompletten Auslöschung der Schallenergie. In [1] wird jedoch durch ein Experiment klar, dass in der Praxis schon geringe Abweichungen der Signale um wenige Abtastwerte zu einer deutlich wahrnehmbaren Restwelligkeit des daraus resultierenden Signals führen. Kopfhörer erreichen somit je nach Marke, Qualität und Aufbau eine Dämpfung zum Umgebungslärm von ca. 9 dB bis 30 dB [1].

Bei der analogen Implementierung eines feedback-Systems wird die zu eliminierende Bandbreite durch die des gesamten Kontrollsystems begrenzt [7]. Lautsprecher und Mikrophone sollten im unteren Frequenzbereich, der gedämpft werden soll, eine ausreichende Linearität aufweisen, um die Messergebnisse nicht zu verfälschen und die Algorithmen zu vereinfachen.

Die digitalen Systeme haben im Vergleich zu einer analogen Ausführung den großen Nachteil, dass Latenzzeiten durch die DA- beziehungsweise AD-Wandlung entstehen. Die Berechnung für die Abstimmung der Systeme (analog und digital) wird mit digitalen Signal Prozessoren (DSP) realisiert. Nach [1] tritt das Problem der Echtzeitfähigkeit durch sehr hohe Samplerraten von bis zu 1,2 GHz eher in den Hintergrund. Allerdings verschlechtert sich bei zu hohen Taktraten die Effizienz des Systems durch die erhöhte Rechenleistung, wodurch die Abtastfrequenz in der Größenordnung ca. 10-mal so hoch sein sollte, als die höchste auszulöschende Frequenz. Eine gute Funktionalität wird in einem Bereich von 1 % (untere Grenze) und 30 % (obere Grenze) der Samplingrate erreicht [1].

## VI. FAZIT UND AUSBLICK

Zusammenfassend ist das Konzept von ANC durch das Superpositionsprinzip aus [4] bis heute nahezu unverändert. Die großen Herausforderungen bestehen darin, die Übertragungsfunktionen der Gesamtsysteme inklusive des menschlichen Gehörgangs zu berücksichtigen und nachzubilden. Es wurden die Probleme und Herausforderungen beim Filterdesign besprochen. Durch Rückkopplungen, Nichtlinearitäten und komplexen Übertragungsfunktionen werden die verwendeten Algorithmen schnell instabil und schwer umzusetzen. In Zukunft wird daher der Fokus in der Forschung vor allem weiterhin bei der Optimierung von adaptiven Filtern und deren Algorithmen bleiben. Auch mit Deep Learning gibt es bereits Ansätze und Umsetzungen [18]. Filterkoeffizienten können dadurch mit maschinell trainierbaren Netzen auf Nichtlinearitäten in den Störgeräuschen und Übertragungsfunktionen noch besser optimiert werden [19].

## LITERATUR

- [1] T. Wilding, „ANC (Active Noise Cancellation)“, Graz: TU Graz Elektro- und Raumakustik Seminar, 2013.
- [2] Y. Song, Y. Gong, S.M. Kuo, „A robust hybrid feedback active noise cancellation headset“, in *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing*, vol. 13, no. 4, 2005, pp.607-617, doi:10.1109/TSA.2005.848878.
- [3] K. Ravinchandra, K.F. Than, C.Y. Lau, „Active Noise Reduction using LMS and FxLMS Algorithms“, in *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1228. International conference on computer vision and machine learning: Andhra Pradesh, India, 2019, doi:10.1088/1742-6596/1228/1/012064.
- [4] P. Lueg, „Process of Silencing Sound Oscillations“, U.S. Patent 2043416, Juni 9, 1936.
- [5] H.F. Olson, E.G. May, „Electronic Sound Absorber“, in *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 25, nr. 6. New Jersey, 1953, <https://doi.org/10.1121/1.1907249> [aufgerufen: 16.05.2021].
- [6] S. Liebich, J. Fabry, P. Jax, P. Vary, „Signal Processing Challenges for Active Noise Cancellation Headphones“, in *ITG-Fb. 282: Speech Communication; 13th ITG-Symposium*. Oldenburg: VDE Verlag, 2018.
- [7] Y. Kajikawa, W. Gan, S.M. Kuo, „Recent advances on active noise control: open issues and innovative applications“, in *APSIPA Transactions on Signal and Information Processing*, Volume 1, E3. Cambridge: University, 2012, doi:10.1017/ATSIP.2012.4.
- [8] S.M. Kuo, D.R. Morgan, „Active noise control: a tutorial review“, in *Proceedings of the IEEE*, vol. 87, no. 6. IEEE, 1999, pp. 943-973, doi: 10.1109/5.763310.
- [9] M. Bodson, J.S. Jensen, S.C. Douglas, „Active Noise Control for Periodic Disturbances“, in *IEEE Transactions on control systems Technology*, VOL. 0, No.1. IEEE, 2001, pp.200-205, doi:10.1109/87.896760.
- [10] C. Bruhnken, S. Priese, H. Foudhaili, D. Voss, E. Reithmeier, J. Peissig, „Feedback-Reglerauslegung für aktive Lärmkompensation bei In-Ear-Kopfhörern“, in *DAGA*. Darmstadt, 2012, pp. 757-758.
- [11] H. Foudhaili, B. Wolter, E. Reithmeier, J. Peissig, „Feedback-Feedforward aktive Lärmkompensation für den Kopfhörer“, in *DAGA*. Stuttgart, 2007, pp.705-706.
- [12] B. Widrow et al., „Adaptive noise cancelling: Principles and applications“, in *Proceedings of the IEEE*, vol. 63, no. 12. IEEE, 1975, pp. 1692-1716, 10.1109/PROC.1975.10036.
- [13] S. Dixit, D. Nagaria, „LMS Adaptive Filters for Noise Cancellation: A Review“, in *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, vol. 7, no. 5. Jahansi, Uttar Pradesh, India, 2017, pp. 2520-2529, doi: 10.11591/ijece.v7i5.pp2520-2529.
- [14] L. Bai and Q. Yin, „A modified NLMS algorithm for adaptive noise cancellation“, in *2010 IEEE International Conference on Acoustics: Speech and Signal Processing*. Dallas, TX, USA: IEEE, 2010, pp. 3726-3729, doi: 10.1109/ICASSP.2010.5495868.
- [15] A. Zwick, J. Zwick, X.P. Nguyen, „Rauschen in elektronischen Schaltungen“, in *Signal- und Rauschanalyse mit Quellenverschiebung*. Springer Vieweg: Berlin, Heidelberg, 2015, pp.1-14, doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-54037-0\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-54037-0_1) [aufgerufen am 10.05.21].
- [16] D.J. Moreau, J. Ghan, B.S. Cazzolato, A.C. Zander, „Active noise control in a pure tone diffuse sound field using virtual sensing“, *Journal of the Acoustical Society of America* 125(6):3741-55. Australia, 2009, doi:10.1121/1.3123404.
- [17] H.S. Deng, C.Y. Chang, S.M. Kuo, „Active Noise Control with Virtual Sensing Technology for Headrest“ in *APSIPA Annual Summit and Conference*. Honolulu, 2018, pp.1272-1275, doi: 10.23919/APSIPA.2018.8659516.
- [18] T.L. Le, T.T. Huynh, C.M. Lin, „Adaptive filter design for active noise cancellation using recurrent type-2 fuzzy brain emotional learning neural network“, in *Neural Computing and Applications* 32:8725-8734 Springer-Verlag: London, 2019, <https://doi.org/10.1007/s00521-019-04366-8> [aufgerufen am: 10.05.2021].
- [19] H. Zhang, D.L. Wang, „Deep ANC: A deep learning approach to active noise control“, in *Neural Networks Volume 141*, 2021, pp. 1-10, doi: <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2021.03.037> [aufgerufen am: 15.07.2021].

# Grundprinzip von aktuellen Wetterradaren in Deutschland

Stephanie Huber

*Elektro- und Informationstechnik*

*Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg*

Regensburg, Deutschland

stephanie.huber@st.oth-regensburg.de

**Zusammenfassung**—Das Wetter bildet einen wichtigen Parameter des ökologischen Systems der Erde und bestimmt dadurch das Leben auf ihr. Um das Wetter zu erforschen und vorherzusagen, werden unter anderem Wetterradare verwendet. Diese detektieren meteorologische Daten mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung. Mit den gemessenen Daten werden Lage, Bewegungszustand und Beschaffenheit der Atmosphäre analysiert und Vorhersagen über das Wetter generiert. Neben dem täglichen Wetterbericht ist dies für die rechtzeitige Warnung vor extremen und schnell veränderlichen Wetterlagen wie Starkregen essenziell. Auf Grund des Klimawandels treten Wetterextreme auch vermehrt in Deutschland auf. Dieser Artikel analysiert existierende Literatur zu theoretischen Grundlagen und Funktionsprinzipien von Wetterradarsystemen. Dabei wird auf die in Deutschland verwendeten Niederschlagsradare und Wind-Profiler eingegangen und deren charakteristische Merkmale dargestellt. Um einen Überblick über die Funktionsweise dieser Radarsysteme zu erstellen, werden die Radargleichung, der Doppler-Effekt und Erkenntnisse durch Polarimetrie erklärt sowie Parabol- und phasengesteuerten Antennen gegenübergestellt. Weiter werden mögliche Anwendungsgebiete der Wetterradarsysteme sowie die Verwendung der detektierten Daten aufgezeigt und auf Herausforderungen eingegangen. Die Genauigkeit, der durch Wetterradare erfassten meteorologischen Daten zur Erstellung von Wetterprognosen, wird durch die Verwendung anderer Anwendungen ähnlicher Frequenzbereiche sowie Umgebungseinflüsse beeinflusst.

**Index Terms**—doppler radar, meteorological radar, radars/radar observations, radar polarimetry, remote sensing, wind profilers

## I. EINLEITUNG

Radare (Radio Detection And Ranging), die zur Detektion von Wetterereignissen verwendet werden, basieren auf der Aussendung von elektromagnetischen Wellen, welche durch Objekte in der Umgebung reflektiert werden. Mit Hilfe einer Antenne werden die zurückgestreuten elektromagnetischen Wellen detektiert. Anschließend wird das Signal verstärkt und analysiert. Durch die Analyse dieses Signals ist es möglich Lage, Bewegungszustand und Beschaffenheit des Objekts zu bestimmen. [1, 2]

Radarsysteme werden auch zur Analyse meteorologischer Daten eingesetzt, welche für Wettervorhersagen verwendet werden. Das Wetter ist ein entscheidender Faktor des ökologischen Systems der Erde und bestimmt dadurch das Leben auf ihr. Der Klimawandel beeinflusst das Wetter, indem vermehrt extreme Wetterereignisse wie Starkregen ausgebildet

werden [3]. Um Vorkehrungen zur Eindämmung von Schäden durch extreme Wetterlagen machen zu können, ist eine exakte und frühzeitige Wetterprognose erforderlich. Eine Möglichkeit zur Vorhersage ist die Bestimmung des Wetters durch Wetterradarsysteme.

Im Rahmen dieser Arbeit werden die Grundlagen von Wetterradaren und die Anwendung als Niederschlagsradar und Wind-Profiler erörtert. Abschnitt 2 gibt einen Überblick über die physikalischen Grundlagen von Wetterradaren. Die in Deutschland verwendeten Wetterradare Niederschlagsradar und Wind-Profiler werden in Abschnitt 3 vorgestellt. Anschließend werden Einflüsse der Umgebung auf die Analyse mittels Wetterradar aufgezeigt (Abschnitt 4) und mögliche Anwendungsgebiete vorgestellt (Abschnitt 5). In diesem Artikel wird nicht explizit auf die Erzeugung des ausgesendeten Signals, die Steuerung der Antenne, die Software und die Auswertung der durch die Wetterradare detektierten Daten eingegangen.

## II. GRUNDLAGEN

### A. Funktionsweise

Wetterradare senden gepulste, hochfrequente, elektromagnetische Wellen über eine gerichtete Antenne aus [2]. Die ausgesendeten Wellen treffen dabei auf Objekte in der Umgebung und werden reflektiert. Die Objekte sind in diesem Kontext Gebilde in der Atmosphäre aus Wasserdampf in flüssiger und fester Form, wie Wolken, Regen, Schnee oder Hagel, und werden als Hydrometeore bezeichnet. Das reflektierte Signal wird von der Antenne detektiert und anschließend mittels Software ausgewertet und zur Prognose analysiert. In Abbildung 1 ist die Funktionsweise des Wetterradars schematisch dargestellt.

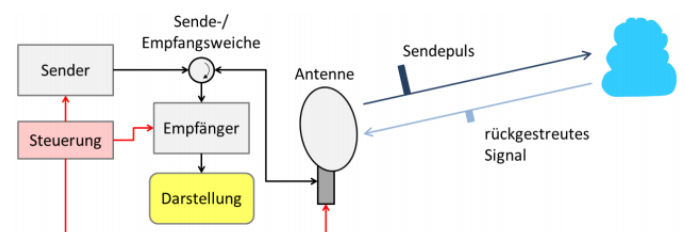


Abb. 1: Schematischer Aufbau eines Wetterradars [4].

## B. Radargleichung

Das detektierte Signal von Radarsystemen wird durch die allgemeine Radargleichung (1) dargestellt. Durch Anpassung von (1) auf die für Wetterradare Gegebenheiten, ergibt sich eine spezifische Form der allgemeinen Radargleichung (5). Ausführliche Herleitungen sowie Erklärungen sind unter anderem in [5 – 10] beschrieben.

$$P_d = \frac{P_t \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{(4 \cdot \pi)^3 \cdot r^4} \quad (1)$$

mit

$P_d$	detektierte Leistung des reflektierten Impulses
$P_t$	transmitierte Leistung
$G$	Antennenverstärkung über isotropen Kugelstrahler
$\lambda$	Wellenlänge der ausgesendeten Welle
$\sigma$	effektive Reflexionsfläche
$r$	Entfernung zwischen Antenne und Ziel

Die effektive Reflexionsfläche  $\sigma$  sind die im Volumen des Radarstrahls enthaltenen Hydrometeore, welche mit (2) beschrieben werden können. Da die Wellenlänge  $\lambda$  gegenüber der Größe einzelner Hydrometeore klein ist, wird die Näherung durch die Rayleigh-Streuung verwendet, wobei der Rückstreuquerschnitt der Hydrometeore indirekt proportional zur vierten Potenz der Wellenlänge  $\lambda$  ist.

$$\sigma = \eta \cdot V \quad (2)$$

Wobei

$$\eta = \frac{\pi^5}{\lambda^4} \cdot |K|^2 \cdot Z \quad (3)$$

und

$$V = \frac{\pi \cdot \theta_b \cdot \phi_b \cdot r^2 \cdot h}{8} \quad (4)$$

mit

$\sigma$	effektive Reflexionsfläche
$\eta$	Rückstreuquerschnitt der Regentropfen
$V$	Pulsvolumen
$\lambda$	Wellenlänge der ausgesendeten Welle
$ K ^2$	Materialkonstante
$Z$	Radarreflektivitätsfaktor
$\theta_b$	horizontale Halbwertsbreite des Pulses
$\phi_b$	vertikale Halbwertsbreite des Pulses
$r$	Entfernung zwischen Antenne und Ziel
$h$	Pulslänge

ist.

Durch (1) - (4) und weiteren Aspekten, die in [5] erörtert werden ergibt sich die folgende Gleichung für Wetterradare:

$$P_d = \frac{\pi^3}{1024 \cdot \ln 2} \cdot \frac{P_t \cdot h \cdot G^2 \cdot \theta_b \cdot \phi_b}{\lambda^2} \cdot \frac{|K|^2 \cdot 10^{-18} \cdot Z}{r^2} \quad (5)$$

Die Antenne misst die Leistung des reflektierten Signals und die Entfernung  $r$  der Reflexion, welche sich aus (6) ergibt.

$$r = \frac{\Delta t \cdot c}{2} \quad (6)$$

mit

$r$	Entfernung zwischen Antenne und Ziel
$\Delta t$	Laufzeit des Impulses bis zur Detektion
$c$	Lichtgeschwindigkeit

Anschließend lässt sich durch Berechnung mit (5) eine Prognose des Radarreflektivitätsfaktor  $Z$  und somit auf die Anzahl der detektierten Partikel  $N$ , sowie deren Durchmesser  $D$  aufstellen (7).

$$Z = \sum_{i=1}^N D_i^6 \quad (7)$$

## C. Doppler-Effekt

Durch die freie Bewegung der zu detektierenden Hydrometeore, kommt es zu einer zeitlichen Verschiebung zwischen gesendetem und reflektiertem Signal. Dies kann mit Hilfe des Doppler-Effekts berücksichtigt werden und lässt Rückschlüsse auf die relative Bewegung der Hydrometeore zum Wetterradar zu [10, 11]:

$$f_d = \frac{2 \cdot v_r}{\lambda} \quad (9)$$

mit

$f_d$	gemessene Dopplerfrequenz
$v_r$	radiale Geschwindigkeit
$\lambda$	Wellenlänge

Zudem ist es mit Hilfe des Doppler-Effekts möglich, an ruhenden Objekten reflektierte Signale, wie Gebäude oder Berge, welche die Datenanalyse von Hydrometeore durch Wetterradare negativ beeinflussen, zu analysieren und zu unterdrücken [11].

## D. Polarimetrie

Des Weiteren können Aussagen über die Form und Falleigenschaften der Hydrometeore getroffen werden. Dazu wird die Polarisation der linear ausbreitenden Welle in die horizontalen und vertikalen Anteile aufgeteilt und untersucht. Grundsätzlich wird eine Klassifikation der Hydrometeore angestrebt, um Informationen über z. B. Niederschlagsart und -intensität zu erhalten. [11]

Eine detailliertere Beschreibung des Effekts ist in [8, 12] zu finden.

## III. DEUTSCHE WETTERRADARE

In Deutschland betreibt der Deutsche Wetterdienst derzeit verschiedene Wetterradarsysteme. Die verbreitetsten Formen sind darunter Niederschlagsradare und Wind-Profiler, welche nachfolgend vorgestellt werden.

### A. Niederschlagsradar

Niederschlagsradare umfassen die Aufgabe der Hydrometeor-Klassifikation und bestimmen unter anderem ihre Bewegungsrichtung. Sie können grundsätzlich in zwei Arten eingeteilt werden, welche anhand der eingesetzten Polarisation der ausgesendeten Welle unterschieden werden. Einzelpolarisationssysteme verwenden dabei größtenteils nur

TABELLE I:  
CHARAKTERISTISCHE MERKMALE DEUTSCHER NIEDERSCHLAGSRADARE  
[9]

Parameter	C-Band Radar
Sendeleistung (Puls)	200 – 400 kW
Frequenz	5600 – 5650 MHz
Wellenlänge	5,4 – 5,3 cm
Pulsdauer	0,6 – 1,5 $\mu$ s
Tiefe des Messvolumens	90 – 225 m
Pulswiederholfrequenz	300 – 1200 Hz
Maximale Entfernung	120 – 300 km
Durchmesser Antenne	4,2 m
Drehgeschwindigkeit Antenne	2 – 6 U/min
Strahlbreite	1°

horizontale Polarisationsanteile und wurden in Deutschland bis 2009 eingesetzt. Nachfolgend wurde der Einsatz von Doppelpolarisationssysteme, die horizontale und vertikale Anteile verwenden, installiert. Derzeit sind 17 dual-polarisierte Niederschlagsradare in Deutschland aktiv. Zusätzlich wird ein Forschungsradar vom Deutschen Wetterdienst eingesetzt. [13, 14]

Die Niederschlagsradare werden im C-Band betrieben. In Tabelle 1 sind die charakteristischen Merkmale zusammengefasst.

Mit einer beweglichen Parabolantenne werden die hochfrequenten elektromagnetischen Welle ausgesendet. Um dabei ein Gesamtbild der Umgebung zu erhalten, wird der jeweilige Horizontalwinkel (Azimut) und Vertikalwinkel (Elevation) der Antenne schrittweise verändert. Die einzelnen Messungen werden anschließend zusammengefasst und ergeben die gewünschte Abbildung. Durch die Analyse der Atmosphäre mittels drei Niederschlagsradaren ist eine dreidimensionale Darstellung der Bewegungsrichtung möglich. [1]

### B. Wind-Profiler

Durch Erfassung der Bewegungsrichtung von Hydrometeorere können Niederschlagsradaren außerdem Informationen über einen vorherrschenden Wind liefern. Befinden sich jedoch keine Gebilde aus Wasserdampf in der Atmosphäre, ist dies nicht mehr möglich. Deshalb werden sogenannte Wind-Profiler eingesetzt. Mit diesen ist es möglich Wind unabhängig von Hydrometeorere zu messen. Auch eine Analyse des Windes durch Wolken und Niederschlag hindurch kann verwirklicht werden. Das Messprinzip basiert dabei auf Rückstreuung elektromagnetischer Wellen auf Grund der Bragg-Streuung an Fluktuationen des Brechungsindex im verwendeten Frequenzbereich. Diese Schwankungen basieren auf unterschiedliche Luftverhältnisse in der Atmosphäre wie Druck, Temperatur und Zusammensetzung [15]. Phasengesteuerte Antenne, sogenannte Phased Array Antennen, senden vertikale Radarstrahlen mit definierten Winkel  $\alpha$  gegen den Zenit  $z$  geneigt in die Atmosphäre aus. Dies wird in Abbildung 2 dargestellt. Die reflektierten Signale erfahren je nach verwendeter Sendefrequenz und Strahlneigung eine zur Windgeschwindigkeit

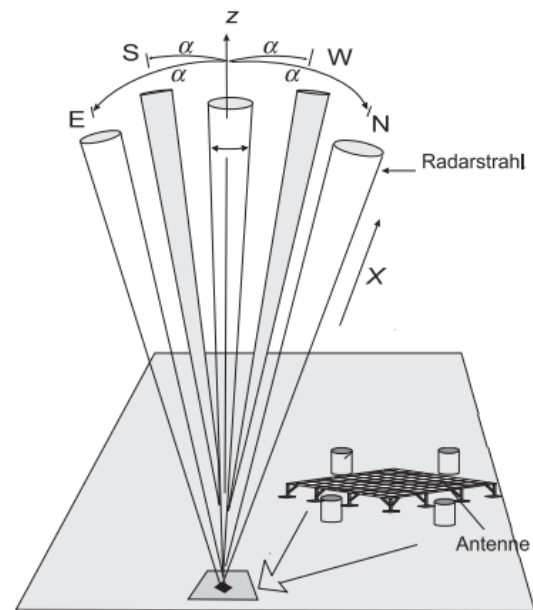


Abb. 2: Radarstrahl eines Wind-Profilers (angelehnt an [16]).

proportionale Dopplerverschiebung. Durch die Detektion von Amplitude und Phase des rückgestreuten Signals von drei nicht-koplanaren Radarstrahlen, welche somit nicht in einer gemeinsamen Ebene liegen, ist die Bestimmung des Windvektors möglich. [16]

Die in Deutschland verwendeten Wind-Profiler werden im Frequenzbereich von 40 MHz bis zu 1400 MHz betrieben. Dadurch ergeben sich Wellenlängen von 7,5 m bis 0,21 m. Die Bestimmung des Windes ist bis zu einer maximalen Höhe von 30 km möglich. [16]

### C. Antennen von Niederschlagsradar und Wind-Profiler

Bei Wind-Profiler werden elektrisch gesteuerte Phased Array Antennen verwendet. Der Einsatz dieser Antennen ist auch für Niederschlagsradare anstelle von Parabolantennen denkbar. Durch die elektronische Steuerung ist eine schnellere Schwenkung des Radarstrahls als durch die mechanische Drehung der Parabolantenne möglich. Womit die Abtastzeit der Atmosphäre verkürzt wird. Da Phased Array Antennen häufig im militärischen Bereich Anwendung finden und dafür der polarimetrische Effekt nicht benötigt wird, existieren diese kaum. Wodurch ein Einsatz dieser Antennen bei Niederschlagsradaren mit Forschung und Kosten verbunden ist. [17]

## IV. UMGEBUNGSEINFLUSS

Wetterradare detektieren neben Signalen, die von Hydrometeorere in der Atmosphäre reflektiert werden, auch reflektierte Signale von anderen Objekten innerhalb des Abtastvolumens. Statische Hindernisse werden erkannt mit einem Analysealgorithmus unter Berücksichtigung des Doppler-Effekts und herausgefiltert. Detektierte Störsignale von beweglichen Objekte hingegen können falsch interpretiert werden und die Auswertung negativ beeinflussen. Ein Beispiel hierzu ist die

Beeinträchtigung durch Windkraftanlagen. Das am Wetterradar detektierte Störsignal, welches durch Reflexion des Impulses an sich bewegenden Rotorblätter verursacht wird, gleicht dem Signal, welches bei starken Niederschlägen detektiert wird. Wird das Störsignal der Windkraftanlage durch Algorithmen herausgefiltert, verschlechtert sich dadurch die Sensibilität des Wetterradarsystems für starke Niederschläge. Ein Datenverlust ist unvermeidbar. Durch Vergrößerung der Entfernung zwischen Wetterradar und Windkraftanlage werden die Störsignale vermindert. Hierbei gilt es, einen Kompromiss zwischen Energiewende und Warnung vor Wettergefahren zu finden. [18, 19]

Das C-Frequenzband, mit welchem die Niederschlagsradare bei Frequenzen um 5,6 GHz in Deutschland arbeiten [9], wird von unterschiedlichen Technologien verwendet, wie z. B. als Übertragungsfrequenz in drahtlose lokale Netzwerke. Um die Genauigkeit der Wettervorhersage zu schützen, stellen diese Anwendungen in der Nähe von Wetterradaren durch dynamische Frequenzwahl automatisch auf eine andere Betriebsfrequenz um. Diese Funktion ist deaktivierbar, wodurch eine Beeinflussung der Wetterradarsysteme entsteht. Durch die Umrüstung der Wetterradare auf S-Band, welche bei einer Frequenz von etwa 3 GHz arbeitet, ist dieses Problem lösbar. Durch die größere Wellenlänge der Radare im S-Bandbereich (ca. 11 cm) gegenüber C-Band Radare (ca. 5,4 cm) ist die benötigte Baudimensionen der Wetterradarsysteme größer, wodurch höhere Kosten entstehen. Ein weiterer Aspekt, der gegen die Umrüstung auf Wetterradare mit S-Bandfrequenz spricht ist, dass auch hier andere Anwendungen betrieben werden, wie World Wide Interoperability for Microwave Access. Zudem ist das S-Band als zukünftiges Mobilkommunikationsnetz vorgesehen. [19]

## V. ANWENDUNGEN

Die analysierten Daten der Wetterradare werden hauptsächlich zur Beschreibung des aktuellen und des zukünftigen Wetters verwendet. Insbesondere frühzeitige Warnung der Bevölkerung vor Wettergefahren. Weiter ist durch die Nutzung von Wetterradaren eine Erforschung von dynamischen und mikrophysikalischen Vorgängen in Niederschlagssystemen möglich.

Zudem werden die analysierten Daten für hydrologische Anwendungen verwendet. Dazu zählen unter anderem die Hochwasservorhersagen, sowie die Steuerung von Kanalnetzen oder Kläranlagen. [9, 11]

Neben der Detektion von Hydrometeore können auch Signale analysiert werden, welche an Partikeln in Rauchfahnen von Feuern reflektiert werden. Dadurch ist das Erkennen von Waldbränden mittels Wetterradar möglich. [20]

Außerdem ist eine Nutzung zur Beobachtung der Flugbewegung von vielen Organismengruppen wie Vögeln, Fledermäusen und Insekten mit einem dafür entwickelten Algorithmus möglich [21].

## VI. ERGEBNISSE

Durch Forschung im Bereich von Radarsystemen, insbesondere der Wetterradare und deren Algorithmen zur Datenanalyse, ist mit einer Steigerung der Genauigkeit von Wetterprognosen zurechen. Da die detektierten Daten von Wetterradarsystemen auch in anderen Fachgebieten einsetzbar sind, entsteht hier durch Weiterentwicklung ein Nutzen auf mehreren Seiten. Hier sind beispielhaft der Katastrophenschutz, Hydrologie und der Beobachtung von Organismengruppen zu nennen.

An Wetterradaren detektierte Störsignale aus der Umgebung beeinflussen die Genauigkeit der Wetterdatenanalyse. Dazu zählen unter anderem das Betreiben von weiteren Anwendungen mit ähnlichen Frequenzen wie der Wetterradarsysteme, sowie reflektierte Störsignale, welche durch die Umgebung an Wetterradaren detektiert werden. Hierbei gilt es zwischen allen Betreibern einen Kompromiss zu finden, der die Wetterprognose und insbesondere die Warnung der Bevölkerung vor Wettergefahren nicht negativ beeinflusst.

## LITERATUR

- [1] T. Winterrath, C. Brendel, M. Hafer, T. Junghänel, A. Klameth, E. Walawender, E. Weigl und A. Becker, „Erstellung einer radargestützten Niederschlagsklimatologie“, in *Berichte des Deutschen Wetterdienstes*, Nr. 251, Offenbach am Main: Deutscher Wetterdienst, 2017.
- [2] E. David, S. Eggert und A. Wojtysiak, „Gepulste Hochfrequenz in der Radartechnik, Technisches Prinzip und Anwendungen“, in *Gepulste Felder - eine besondere Gefahr für die Gesundheit?*, BG Elektro Textil Feinmechanik, S. 27–30, 2008.
- [3] Q. Schiermeier, „Droughts, heatwaves and floods: How to tell when climate change is to blame“, in *Nature*, Bd. 560, S. 20–22, 2018.
- [4] M. Hagen, „Wetterradar - Eine Gerätevorstellung“, in *Wetterradar - Anwendungen und neue Entwicklungen*, KRdL-Schriftenreihe 47, S. 21–34, 2013.
- [5] J. R. Probert-Jones, „The radar equation in meteorology“, in *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Bd. 88, Nr. 378, S. 485–495, 1962.
- [6] S. Raghavan, *Radar Meteorology*, Springer Science+Business Dordrecht, 2003.
- [7] P. Meischner, *Weather Radar - Principles and Advanced Applications*, Berlin: Springer, 2004.
- [8] V. N. Bringi und V. Chandrasekar, *Polarimetric Doppler Weather Radar - Principles and Applications*, Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [9] T. Lübeck, M. Hagen, S. Jäckel und M. Quirnbach, „Grundlagen der Radarmessung des Niederschlages und Anwendung in der Wasserwirtschaft“, in *Korrespondenz Wasserwirtschaft*, Bd. 12, Nr. 12, S. 729–736, 2014.
- [10] J. L. Reed, A. D. Lanterman und J. M. Trostel, „Weather Radar: Operation and Phenomenology“, in *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, Bd. 32, Nr. 7, S. 46–62, 2017.
- [11] „Umweltmeteorologie - Bodengebundene Fernmessung des Niederschlags - Wetterradar“, VDI 3786, Blatt 20, 2014.
- [12] C. Qing, B. Mark und Z. Guifu, „Efficient Ways to Learn Weather Radar Polarimetry“, in *IEEE Transactions on Education*, Bd. 55, Nr. 1, S. 58–68, 2012.
- [13] K. Auerswald, F. K. Fischer, T. Winterrath und R. Brandhuber, „Rain erosivity map for Germany derived from contiguous radar rain data“, in *Hydrology and Earth System Sciences*, Bd. 23, S. 1819–1832, 2019.
- [14] „Meteorologie - Wetterradar - Teil1: Systemleistung und Betrieb“, ISO 19926-1, 2019.
- [15] J. C. Owens, „Optical Refractive Index of Air: Dependence on Pressure, Temperature and Composition“, in *Applied Optics*, Bd. 6, Nr. 1, 1967.
- [16] „Umweltmeteorologie Bodengebundene Fernmessung des Windvektors Wind-Profil-Radar“, VDI 3786, Blatt 17, 2007.
- [17] F. Gekat, „Entwicklungen der meteorologischen Radartechnik aus der Sicht eines Radarherstellers“, in *Wetterradar - Anwendungen und neue Entwicklungen*, KRdL-Schriftenreihe 47, S. 111–118, 2013.

- [18] U. Kirsche, „Unwetterwarnungen oder Strom aus Windenergie?“, Offenbach am Main: Deutscher Wetterdienst, 2015.
- [19] A. Huuskonen, E. Saltikoff und I. Holleman, „The Operational Weather Radar Network in Europe“, in *Bulletin of the American Meteorological Society*, Bd. 95, Nr. 6, S. 897–907, 2014.
- [20] N. McCarthy, A. Guyot, A. Dowdy und H. McGowan, „Wildfire and Weather Radar: A Review“, in *JGR Atmospheres*, Bd. 124, Nr. 1, S. 266–286, 2018.
- [21] J. A. Alves, J. Shamoun-Baranes, P. Desmet, A. Dokter, S. Bauer, O. Hüppop, J. Koistinen, H. Leijnse, F. Liechti, H. v. Gasteren und J. W. Chapman, „Die Nutzung eines Wetterradar-Netzwerks zur europaweiten Beobachtung des Vogelzugs“, in *Vogelwarte*, Nr. 52, S. 276f., 2014.

# Einsatzfelder und Zukunftschancen von 5G jenseits von Smartphones

1<sup>st</sup> Maximilian Obermeier

Fakultät Elektro- und Informationstechnik  
Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg  
Regensburg, Germany  
maximilian.obermeier@st.oth-regensburg.de

**Zusammenfassung**—Mobile Kommunikationssysteme haben in den vergangenen Jahrzehnten einen enormen Fortschritt erzielt. Aufgrund dieses zunehmenden Wachstums früherer Generationen ist durch Etablierung des 5G-Mobilfunkstandards ein noch größerer Fortschritt auf diesem Gebiet zu erwarten. Hauptmerkmale der 5G-Technologie beinhalten unter anderem höhere Datenraten, geringere Latenzzeiten und verbesserte Datenintegrität. Außerdem kann eine größere Anzahl an bedienbaren Endgeräten und eine effizientere spektrale Auslastung erreicht werden. Infolgedessen wird Potential für die Entwicklung moderner und innovativer Einsatzmöglichkeiten und Anwendungsdienste geschaffen. Während mobiles Telefonieren und mobile Breitbanddienste als klassische Netzwerkanwendungen bestehen bleiben, wird der 5G-Standard das Einsatzfeld von mobilen Kommunikationssystemen zunehmend erweitern und das gesellschaftliche Leben beeinflussen. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Haupteigenschaften der 5G-Technologie thematisiert und verschiedene Anwendungsfelder außerhalb der mobilen Nutzung durch Smartphones aufgezeigt. Es werden mögliche Konzepte und Szenarien geschildert, wie die Technologie in öffentlichen Bereichen des Lebens integriert werden könnte. Diese beziehen sich auf das Gesundheitswesen, Mobilität und Verkehr, Industrie, Energiemanagement, Stadtentwicklung, Bildung und die Landwirtschaft. Ein klarer Trend zu 5G-Realisierungen über die Nutzung von Smartphones hinaus ist an dem Ausbau von Internet of Things (IoT) und Big-Data Anwendungen zu erkennen.

**Index Terms**—5G mobile communication, Internet of things, Big data applications, Industry 4.0, Vehicle of Internet, Intelligent transportation systems, Smart health-care, E-health, Telemedicine, Smart home, Smart grids, Smart city, Educational technology, AR/VR, Smart farming

## I. EINLEITUNG

In den letzten 40 Jahren haben mobile Kommunikationssysteme einen enormen Fortschritt erzielt und bei Verwendung das individuelle Nutzungserlebnis bereichert. Die Möglichkeit Informationen und Daten ohne Beschränkungen an Zeit und Ort auszutauschen wird heutzutage täglich von 7,9 Milliarden Menschen genutzt (Stand Oktober 2020) und mit Etablierung der nächsten Generation (5G) auf 8,8 Milliarden Nutzern bis 2026 geschätzt. [1]

Die erste Generation (1G) verfolgte hauptsächlich das Ziel, mobiles Sprechen zweier Parteien durch Verwendung analoger Kommunikationstechnik zu ermöglichen. Die Vernetzung der Teilnehmer war dabei auf nationale Bereiche begrenzt, weshalb internationale Gespräche nicht möglich waren. Erst mit Einführung eines internationalen Mobilfunkstandards, dem

*Global System for Mobile Communication (GSM)* als zweite Generation (2G), konnte man dieser Problematik entgegenwirken. Der Wechsel von analoger zu digitaler Kommunikationstechnik äußerte sich außerdem in Verbesserung der Qualität und Sicherheit der Verbindung. Zudem war das Versenden von limitierten, kodierten Text-, Bild- und Multimedia-Nachrichten möglich. Das Zeitalter der mobilen Internetnutzung wurde mit Vorstellung des nachfolgenden Mobilfunkstandards *Universal Mobile Telecommunication System (UMTS)* eingeleitet. Neue Dienste wie IP-Telefonie, schnelles Internetbrowsing oder Video Streaming wurden damit unterstützt. Die Entwicklung und zunehmende Benutzung von Smartphones hat den Zuwachs der Verwendung mobiler Kommunikationssysteme deutlich verstärkt. Heutzutage ist größtenteils die vierte Generation in Gebrauch. *Long-Term Evolution (LTE)* verzeichnet dabei Datenraten von 50-100 Mbit/s. Später sind durch die Ergänzung von *LTE Advanced (LTE-A)* maximale Datenraten von 500-1000 Mbit/s umsetzbar. Aufgrund dessen können mobile Breitbanddienste als datenintensive Echtzeitanwendung realisiert werden, worunter hochauflösendes, mobiles TV oder interaktive Online Computerspiele fallen. [2]

Wie sich zeigt, deckt die Entwicklung früherer Generationen primär das Ziel der klassischen Nutzung mobiler Kommunikationssysteme wie mobiles Telefonieren und mobile Breitbanddienste ab. Mit Etablierung der nächsten Generation soll das Einsatzfeld mobiler Kommunikationssysteme erweitert werden und an den Erfolg der Generationen zuvor anknüpfen. Der Mobilfunkstandard verspricht ein verbessertes Nutzungserlebnis mit neuen Diensten, neuen Marktbranchen und höheren Umsätzen. Höhere Datenraten, geringere Latenzzeiten, verbesserte Datenintegrität und Zuverlässigkeit sowie die Anzahl an bedienbaren Endgeräten und effizienter spektrale Auslastung dienen als zukünftige Basis für moderne, innovative Einsatzmöglichkeiten und Anwendungsdienste [2]. Im Rahmen dieser Arbeit werden definierte Hauptanwendungsszenarien der 5G-Technologie thematisiert und verschiedene Anwendungsfelder außerhalb der mobilen Nutzung durch Smartphones aufgezeigt. Es werden mögliche Konzepte und Szenarien geschildert, wie die Technologie in öffentlichen Bereichen des Lebens integriert werden könnte.

Diese Arbeit ist wie folgt strukturiert: Abschnitt II werden verschiedene Anwendungsprofile der 5G-Technologie mit deren Schlüsseigenschaften vorgestellt. Anschließend werden



in Abschnitt III verschiedene Bereiche des öffentlichen Lebens aufgegriffen und mögliche Konzepte und Szenarien für den Einsatz von 5G beschrieben. Zuletzt werden die wichtigsten Punkte in Abschnitt IV zusammengefasst und ein Ausblick gegeben.

## II. DIE 5G-ANWENDUNGSPROFILE

Der International Telecommunication Union, Radio-communication Sector (ITU-R) hat drei grundsätzliche Anwendungsprofile definiert, in denen zukünftige 5G-Anwendungen eingeordnet werden können. [2], [3]

- *eMBB (enhanced Mobile Broadband)*: Hierunter werden Anwendungen eingeordnet, die eine möglichst hohe Übertragungsdatenrate für das Senden und Empfangen von großen Dateien benötigen. Dies wird anhand einer verbesserten mobilen Breitbandverbindung und einer effizienteren spektralen Auslastung ermöglicht. Big-Data Anwendungen, wie Augmented und Virtual Reality, High-Definition Three Dimensional (3D) Videos oder 4K/8K Streaming sind Beispiele hierzu. Des Weiteren zeichnen sich die Anwendungen durch Anforderungen an eine hohe Verbindungsdichte im jeweiligen Funkbereich und
- *URLLC (ultra-reliable low latency communication)*: Anwendungen dieses Profils zeichnen sich durch die Vorgabe und Einhaltung strenger Anforderungen hinsichtlich des Datendurchsatzes, Antwortzeiten, Ausfallsicherheit und Verfügbarkeit aus. Besonders zeitkritische Anwendungen, die im Verkehrs- und Industriesektor sowie vereinzelt im medizinischen Bereich vorzufinden sind, werden dem zugeordnet.
- *mMTC (massive Machine Type Communication)*: Anwendungen mit einer hohen Anzahl an vernetzten Geräten in unmittelbarer Umgebung werden mit diesem Szenario abgedeckt. Kommunizierende Netzwerkteilnehmer zeichnen sich durch einen energiesparenden Verbrauch aus und übermitteln gesammelte Daten vorwiegend eventbasiert. In erster Linie sind hier Internet-of-Things (IoT) Anwendungen vorzufinden.

Über diese Kategorien hinaus existieren Anwendungen, die nicht eingeordnet werden können. Überlappungen oder gar Nichteinordnung sind hier außerdem möglich.

## III. ANWENDUNGSKONZEPTE 5G TECHNOLOGIE

Aus den genannten Anwendungsprofilen mit verbundenen Schlüsseleigenschaften lassen sich nun konkrete Einsatzmöglichkeiten der 5G-Technologie ableiten. Hierzu werden unterschiedliche öffentliche Bereiche wie Gesundheitswesen, Mobilität und Verkehr, Industrie, Energiemanagement, Stadtentwicklung, Bildung sowie Landwirtschaft betrachtet.

### A. Gesundheitswesen

Die Digitalisierung im Gesundheitswesen ist für die erfolgreiche Weiterentwicklung unserer Gesundheitsversorgung von entscheidender Bedeutung. Die Erweiterung von Gesundheitsdienstleistungen und Behandlungsmöglichkeiten mittels 5G-Technologie stellt das Hauptbestreben dar. Zudem wurden mögliche 5G-Applikationen entworfen, um die Versorgung und Überwachung von Patienten und somit die allgemeine Lebensqualität zu verbessern. Mögliche Anwendungen sind in [4]–[8] zu finden und werden nachfolgend genannt:

- Aufgrund geringen Latenzzeiten und hoher Zuverlässigkeit der 5G-Verbindung kann die Realisierung von *Wireless Tele Surgery (WTS)* als Anwendung dargelegt werden. Dabei handelt es sich um Operationsrobotik, die über ein Interface mit visueller, akustischer und haptischer Interaktion ferngesteuert wird. Der Standort des Interfaces kann hierbei variieren und beliebig gewählt werden. Besteht z.B. im Notfall vor Ort keine Behandlungsmöglichkeit, so können Chirurgen und medizinische Spezialisten aus großer Entfernung aktiv in das Geschehen eingreifen.
- Des Weiteren ist hierbei die Anwendung von *Wireless Service Robots (WSR)* anzuführen. Ihre Aufgabe besteht darin, alltägliche Pflege- und Haushaltsaufgaben zu übernehmen, um ältere Menschen und Patienten mit Handicap zu versorgen. Infolgedessen können Pflegekosten reduziert und bestehendes Personal unterstützt werden.
- Auch IoT-Anwendungen sind durch 5G-Technologie im Gesundheitsbereich umsetzbar. Patienten werden hierbei mit einer hohen Anzahl von biomedizinischen Sensoren ausgestattet. Dadurch können vitale Messgrößen wie Blutdruck, Körpertemperatur, Glukose- und Sauerstoffgehalt im Blut, Herzrhythmus etc. dauerhaft erfasst werden. Die erzeugten Daten können anschließend für Diagnose- und Überwachungszwecke analysiert werden.

### B. Mobilität und Verkehrswesen

Die Anwendung von 5G-Technologie auf Mobilitäts- und Verkehrsproblematiken umfasst den Bereich von Intelligente Transportsystemen (ITS) durch Vernetzung von Fahrzeugen und Straßenteilnehmern. Dabei sollen vorhandene Ressourcen an Verkehrswegen, Parkräumen und Energie optimal ausgelastet und intelligenter genutzt werden. Beispiele hierfür sind unter anderem die Verbesserung des Verkehrsflusses und der Stauprävention. Zudem soll die Verkehrssicherheit erhöht werden und in Notfallsituation effizienter reagiert werden können. Durch die hohe Bandbreite von 5G wird eine reibungslose Kommunikation und Übertragung gewährleistet. Anwendungsbeispiele auf diesem Gebiet sind Systeme, die unter der sogenannten Vehicle-to-Everything (V2X) Kommunikation beschrieben werden können. Diese gewährleisten einen drahtlosen Datenaustausch mit Fahrzeugen, Fußgängern oder Fahrradfahrern in unmittelbarer Umgebung. [9]–[12]

Folgende Anwendungsszenarien lassen sich hierbei unterteilen:

- Vehicle-to-Vehicle Kommunikation (Austausch von Daten zwischen Kraftfahrzeugen)
- Vehicle-to-Pedestrian Kommunikation (Austausch von Daten zwischen Kraftfahrzeug und Individuum)
- Vehicle-to-Infrastructure Kommunikation (Austausch von Daten zwischen Kraftfahrzeug und Straßeninfrastruktur)
- Vehicle-to-Network Kommunikation (Austausch von Daten zwischen Auto und Mobilfunknetz)
- Vehicle-to-Grid Kommunikation (Austausch von Daten zwischen Auto und Energiemanagementsystemen)

### C. Industrie

Der industrielle Automatisierungsgrad ist in vielen Ländern bereits hoch. Das Bestreben von Industrieunternehmen ihre Prozesse ständig weiter zu entwickeln und optimieren stellt eine gegenwärtige Aufgabe dar, um international wettbewerbsfähig zu bleiben und sich schnell auf veränderte Marktbedürfnisse anpassen zu können. Die Digitalisierung der zukünftigen Produktion durch Ausstattung moderner Informations- und Kommunikationstechnik wird durch Industrie 4.0 bezeichnet. Darunter ist grundsätzlich die Vernetzung und Automatisierung bestehender Produktionsstätten und Entwicklung neuer Produktionsmöglichkeiten zu verstehen. Industrial Internet of Things (IIoT), anpassungsfähige Produktionsanlagen, Robotik, künstliche Intelligenz, fortschrittliche Werkstofftechnik, Cloud Systeme und moderne Datenanalyseverfahren stellen Schlüsseltechnologien zur Umsetzung von Industrie 4.0 dar. 5G dient hierbei als Bindeglied der einzelnen Technologien zur Vernetzung von Produktion, Instandhaltung und Logistik. [13]–[15]

Mögliche 5G-Anwendungsbeispiele stellen folgende Konzepte da:

- Die Realisierung von lokale und performante Datenverarbeitungssystemen als Multi-Access Edge Computing (MEC) kombiniert die Vorteile der Cloud und der direkten Präsenz in der Automatisierungsebene. Die dabei nötige zuverlässige Konnektivität und Bandbreite für den Datenaustausch zwischen Edge-Geräten und MEC liefert Industrial 5G. Die niedrigen Latenzzeiten ermöglichen schnelle Entscheidungen. Außerdem können Ergebnisse sofort analysiert, ausgetauscht und zugänglich gemacht werden.
- Durch autonom navigierende und agierende Transportfahrzeuge und -roboter, sogenannte AGV's (Automated Guided Vehicles) kann die zukünftige Logistik effizienter gestaltet werden. Die AGV's werden dazu in Paaren oder Gruppen eingeteilt, um große Güter wie Rotorblätter von Windrädern transportieren zu können. 5G garantiert die dafür erforderliche geringe Latenz und hohe Zuverlässigkeit bei der Datenübertragung zur Abstimmung der AGV's untereinander.
- Ferngesteuerte mobile Roboter in der Fertigung sowie nahtlose miteinander vernetzte und selbständig kommunizierende Maschinen und Geräte sind elementare Bausteine

für eine hochflexible und zugleich effiziente Produktion. Auch hierfür sind die bereits oben beschriebenen Voraussetzungen von 5G (hohe Latenz und Zuverlässigkeit) unabdingbar.

- Die Verwendung von Augmented Reality (AR) im industriellen Bereich kann in Zukunft für schnelle, sicherer und effizientere Einsätze von Service- und Wartungstechniken sorgen. Als Beispiel profitieren Maschinenbedienern davon, dass sie beim Einarbeiten und Bedienen der Maschinen durch AR Anweisungen unterstützt werden. 5G stellt hier die erforderliche hohe Bandbreite zur Übertragung von datenintensiven audio-visuellen Informationen bereit.

### D. Energiemanagement

Die Nachfrage nach immer mehr umweltfreundlicheren Strom ist in den letzten Jahren deutlich angestiegen und wird mit Einführung des Smart Grids Voraussetzungen für einen vollständigen Umstieg auf erneuerbare Energien schaffen. Die Realisierung eines intelligenten Stromnetzes mit untereinander vernetzten, kommunizierenden Komponenten besteht, wird als Smart Grid betitelt. Die Netzwerkteilnehmer sind hierbei sowohl Stromerzeuger und Netzbetreiber, als auch Stromverbraucher und Strom speichernde Einheiten, welche Informationen über ihren aktuellen Betriebszustand, Energieverbrauch und Energiebedarf bereitstellen austauschen. Die Ausnutzung des Energieverbrauchs kann somit effizienter gestaltet werden. Zudem können dezentral angesiedelte erneuerbare Energiequellen besser in das Netz integriert und kontrolliert werden. Als Anforderung steht hier die Echtzeitfähigkeit besonders im Mittelpunkt, um einen flexiblen Ausgleich zwischen Energienachfrage und Energieangebot zu schaffen. Leistungsschwankungen und Überdimensionierung der Netze lassen sich somit reduzieren. 5G liefert auch hier die nötige Technologie zur Steuerung des Netzes. Anforderungen sind hierbei geringe Latenzzeiten wegen Echtzeitfähigkeit, hohe Verfügbarkeit und Sicherheit. [16]

### E. Stadtentwicklung

Die zukunftsweisende Digitalisierung in der Stadtentwicklung beschreibt das Konzept von Smart City. Hierbei geht es maßgeblich um eine effizientere, klimaneutrale und fortschrittliche Gestaltung der Städteplanung durch die Nutzung der 5G-Technologie, um nicht nur die Lebensqualität der Bewohner zu verbessern, sondern auch den äußeren Rahmen einer Stadt nachhaltiger formen zu können. Anwendungen sind hierbei unter anderem der erhöhte Einsatz von Überwachungskameras, welche zur schnelleren Terror- oder Branderkennung genutzt werden sollen. Des Weiteren sollen Bürogebäude, Flughäfen oder Einkaufszentren als Smart Buildings realisiert werden, um deren Energieverbrauch effizienter regulieren zu können. Auch intelligenteres Abfallmanagement und die Überwachung von Luftverschmutzung und Temperatur, sowie Wetterdiagnosen können hierzu gezählt werden. Weitere Versorgungsleistungen wie Gas- oder Wasserablesungen, sollen in der Zukunft nicht mehr manuell durchgeführt werden müssen, sondern digital stattfinden. [17]

## F. Bildung

Digitale Medien sind heute als integrativer Bestandteil im Unterrichts- und Vorlesungsgeschehen zu betrachten. Unabhängig von der neuesten Entwicklung hin zur kompletten Umstellung auf Online-Lehre nimmt das Thema Digitalisierung in Bildung und Lehre schon seit Anbeginn moderner Medien einen wichtigen Stellenwert ein. Die 5G-Technologie würde in dieser Domäne Lehr- und Lernabläufe individualisieren, vereinfachen und beschleunigen. Einige bereits existierenden Anwendungsbeispiele zeigen sich an gut funktionierenden modernen Lernumgebungen, wie der Mischung aus Präsenz und online Kursen (blended learning). Für noch modernere Anwendungen wie z.B. der Nutzung von Virtual Reality, ist 5G für einen reibungslosen Ablauf unabdingbar, da nur durch hohe Übertragungsgeschwindigkeiten große Datenmengen abgerufen werden können. Dass Lernen für Lernende nicht nur durch fortschreitende Digitalisierung effizienter wird, sondern auch für Lehrende, kann durch funktionierende digitale Materialpools und Verwaltungssysteme gewährleistet werden. Auch in diesem Bereich würde 5G durch Effizienz und Beschleunigung maßgeblich an einer Verbesserung der allgemeinen Abläufe beitragen. [18]–[20]

## G. Landwirtschaft

Auch in der Landwirtschaft nehmen digitale Datenverarbeitungen und Automatisierung eine immer wichtiger werdende Rolle ein. Die Verbindung von digitaler Kommunikations- und Nachrichtentechnik mit konventionellen landwirtschaftlichen Arbeitsprozessen wird als Smart Farming bezeichnet. Der technologische Fortschritt durch 5G wird auch hier bei Nutzung von Landwirtschaft und Viehhaltung erkennbar sein. Im Bereich der landwirtschaftlichen Digitalisierung soll eine Vielzahl an entsprechende Sensoren eingesetzt werden, um Informationen über Wachstum und Zustand der Pflanzen zu erfassen und analysieren zu können. Messung von Düngung, Wasserversorgung, Krankheitsbefall, Bodeneigenschaften, Wetter etc. entsprechen hierbei die zu übermittelnden Daten, welche einen nicht zu unterschätzenden Einfluss auf das Gedeihen der Nutzpflanzen besitzen. 5G stellt dazu die erforderliche hohe Übertragungsgeschwindigkeiten mit geringer Latenz für die große Menge der Daten bereit. Des Weiteren sollen mehr ferngesteuerte Landmaschinen und Drohnen eingesetzt werden. Die Übermittlung von Positions- und Sensordaten sowie Kamerabilder müssen in Echtzeit an den Fahrer übermittelt werden. Neben dem Ackerbau ist die Digitalisierung auch in Viehbetrieben von Bedeutung. Hierzu können verschiedene digitale Systeme eingesetzt werden, um Arbeitsbedingungen zu erleichtern. Der Einsatz von Melkrobotern, Fütterungsautomaten oder Lüftungssteuerungen können hierzu gezählt werden. [21]

## IV. ERGEBNISSE UND FAZIT

Anhand den oben dargelegten Bereiche sieht man, dass die Hauptmerkmale der 5G-Technologie folgende Punkte umfasst: [3]

- Unter optimalen Bedingungen sollen Latenzzeiten von kleiner 1 ms erreicht werden.

- Es sollen maximale Übertragungsgeschwindigkeiten von 20 GBit/s erreicht werden.
- Eine Mobilfunkzelle soll maximal 1.000.000 kommunizierende Endgeräte versorgen können.
- Es kann eine dreimal so hohe spektrale Effizienz erreicht werden im Vergleich zur 4G-Technologie.
- Bis zu einer Geschwindigkeit von 500 km/h soll bei flächendeckender Infrastruktur die Kommunikation aufrecht erhalten bleiben.

Auf Grund der dargelegten Anwendungsbeispiele in den unterschiedlichen Bereichen wird ein klarer Trend zur Integration von IoT-Applikationen deutlich. Eine hohe Anzahl an kommunizierenden Endgeräten in einem Netzwerk, welche in den meisten Fällen als Messsensoren realisiert werden, erzeugt eine hohe Menge an Daten und Informationen. Durch die zusätzliche Verwendung von Big-Data Technologie mit Multi-Access Edge Computing, also dem Auslagern von Verarbeitungseinheiten an dem Rand des Kernnetzwerkes können diese Daten schneller analysiert und verarbeitet werden. Durch 5G wird die Verbindung zwischen diesen beiden Technologien ermöglicht und agiert somit als aktives Bindeglied.

In dieser Arbeit konnten mögliche Anwendungen aufgezeigt werden, die für die Etablierung des 5G-Mobilfunkstandards sprechen und diesen Ausbau maßgeblich in Bewegung setzen. Insgesamt ist festzuhalten, dass die 5G-Technologie Auswirkungen auf fast jeden Lebensbereich hat und daraufhin effizienter und individueller genutzt werden kann.

## LITERATUR

- [1] C. Iot, "Ericsson Mobility Report," no. November, 2020.
- [2] X. Lin and N. Lee, *5G and Beyond*. Springer International Publishing, 2021.
- [3] M. Series, "IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond," vol. 0, 2020.
- [4] D. Soldani, F. Fadini, H. Rasanen, J. Duran, T. Niemela, D. Chandramouli, T. Hoglund, K. Doppler, T. Himanen, J. Laiho, and N. Nanavaty, "5G Mobile Systems for Healthcare," *IEEE Vehicular Technology Conference*, vol. 2017-June, pp. 10–14, 2017.
- [5] G. Dimitrakopoulos, "Intelligent transportation systems based on internet-connected vehicles: Fundamental research areas and challenges," *2011 11th International Conference on ITS Telecommunications, ITST 2011*, pp. 145–151, 2011.
- [6] T. Padmashree and S. S. Nayak, "5G technology for e-health," *Proceedings of the 4th International Conference on IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud, ISMAC 2020*, pp. 211–216, 2020.
- [7] A. H. Sodhro and M. A. Shah, "Role of 5G in medical health," *ICIEECT 2017 - International Conference on Innovations in Electrical Engineering and Computational Technologies 2017, Proceedings*, pp. 1–5, 2017.
- [8] A. Ahad, M. Tahir, M. A. Sheikh, K. I. Ahmed, A. Mughees, and A. Numani, "Technologies trend towards 5g network for smart healthcare using iot: A review," *Sensors (Switzerland)*, vol. 20, no. 14, pp. 1–22, 2020.
- [9] G. K. Munasinghe and M. Murtaza, "Analyzing Vehicle-to-Everything Communication for Intelligent Transportation System: Journey from IEEE 802.11p to 5G and Finally Towards 6G," pp. 1–7, 2021.
- [10] D. Kombate and Wanglina, "The Internet of Vehicles Based on 5G Communications," *Proceedings - 2016 IEEE International Conference on Internet of Things; IEEE Green Computing and Communications; IEEE Cyber, Physical, and Social Computing; IEEE Smart Data, iThings-GreenCom-CPSCoM-Smart Data 2016*, pp. 445–448, 2017.
- [11] S. Huang, "5G-based intelligent transportation system construction," *Proceedings - 2019 2nd International Conference on Safety Produce Informatization, IICSPI 2019*, pp. 468–472, 2019.

- [12] A. Li, W. Yuan, X. Huang, X. Qiu, X. Ban, and Y. Zhang, "Traffic Control System Based on 5G Communication Network," *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, vol. 2019-June, pp. 1950–1955, 2019.
- [13] S. K. Rao and R. Prasad, "Impact of 5G Technologies on Industry 4.0," *Wireless Personal Communications*, vol. 100, no. 1, pp. 145–159, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s11277-018-5615-7>
- [14] M. Gundall, M. Strufe, H. D. Schotten, P. Rost, C. Markwart, R. Blunk, A. Neumann, J. Griebach, M. Aleksy, and D. Wubben, "Introduction of a 5G-Enabled Architecture for the Realization of Industry 4.0 Use Cases," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 25 508–25 521, 2021.
- [15] W. Haerick, M. Gupta, J.-S. Bedo, E. C. Strinati, S. Castellvi, T. Cherif, V. Frascolla, I. Korthals, O. Lazaro, E. Sutedjo, L. Usatorre, and M. Wollschlaeger, "5G and the Factories of the Future," *5G*, p. 10, 2015. [Online]. Available: <https://5g-ppp.eu/wp-content/uploads/2014/02/5G-PPP-White-Paper-on-Factories-of-the-Future-Vertical-Sector.pdf>
- [16] M. Forcan, M. Maksimovic, J. Forcan, and S. Jokic, "5G and cloudification to enhance real-time electricity consumption measuring in smart grid," *2020 28th Telecommunications Forum, TELFOR 2020 - Proceedings*, pp. 1–4, 2020.
- [17] S. K. Rao and R. Prasad, "Impact of 5G Technologies on Smart City Implementation," *Wireless Personal Communications*, vol. 100, no. 1, pp. 161–176, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s11277-018-5618-4>
- [18] A. Baratè, G. Haus, L. A. Ludovico, E. Pagani, and N. Scarabottolo, "5G Technology for Augmented and Virtual Reality in Education," *Education and New Developments 2019*, vol. 1, pp. 512–516, 2019.
- [19] X. Lu and Y. Sun, "Application of 5G Technology in Education Informatization," *Chinese Journal of Engineering Science*, vol. 21, no. 6, p. 120, 2019.
- [20] H. Lin, S. Xie, and K. Cai, "Construction of classroom teaching model based on the 5G communication technology," *Proceedings - 2019 IEEE International Conference on Smart Internet of Things, SmartIoT 2019*, pp. 393–396, 2019.
- [21] O. Elijah, T. A. Rahman, I. Orikumhi, C. Y. Leow, and M. N. Hindia, "An Overview of Internet of Things (IoT) and Data Analytics in Agriculture: Benefits and Challenges," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 5, no. 5, pp. 3758–3773, 2018.

# Dual-CAN (FD) – Betrachtung hinsichtlich Fehlerdetektion und Nachrichtenumleitung und funktionaler Sicherheit

Tobias Langer  
Fakultät Elektro- und Informationstechnik  
OTH Regensburg  
93053 Regensburg, Deutschland  
tobias.langer@st.oth-regensburg.de

**Abstract**—In vielen Bereichen der Industrie, sowie auch im Automobilbereich ist es Standard, die Komponenten mittels Controller Area Network (CAN) zu vernetzen. Auch weiterführende Entwicklungen der Kommunikation, wie beispielsweise CAN FD stellen wichtige Neuerungen dar. Meist können im Sinne der Funktion und der Sicherheit kurzfristige Störungen und Verzögerungen der Kommunikation toleriert oder auch algorithmisch ausgeglichen werden. Hinsichtlich spezieller Anwendungen, die erhöhte Anforderungen an Sicherheit und Fehlertoleranz haben, wird jedoch eine Steigerung der Zuverlässigkeit des Systems verlangt.

In dieser Arbeit werden die Entwicklungen in Bezug auf die redundante Realisierung des CAN-Bussystems erläutert. Der bereits bekannte und erprobte CAN-Bus wird hier um ein zweites, gleich aufgebautes Kommunikationsnetzwerk erweitert, um so die Übertragungsfehler zu minimieren. Das entstandene Netzwerk (Dual-CAN) findet Anwendung, wenn das Risiko eines Ausfalls der Kommunikation stark reduziert werden muss. Es werden Konzepte zum Aufbau eines solchen redundanten Systems, sowie ein kurzer Einblick zu den unterschiedlichen Realisierungen beschrieben. Im Speziellen wird hier genauer auf die verschiedenen Techniken der Redundanz, der Cold Redundancy und der Hot Redundancy, eingegangen. Weiter werden Beispiele für Anwendungsbereiche aufgezeigt und vorgestellt.

Auf der Grundlage des nicht-redundanten CAN-Bus wird der Mechanismus zur Nachrichtenumleitung im Falle eines Fehlers und die Verlässlichkeit in Bezug auf die funktionale Sicherheit des Systems bewertet und diskutiert.

**Index Terms**—CAN-Bus, Redundanz, Dual-Bus, funktionale Sicherheit, Verlässlichkeit

## I. EINLEITUNG

Der CAN-Bus ist ein universell einsetzbarer, kostengünstiger und zuverlässiger Feldbus für Echtzeitanwendungen mit Datenraten von bis zu 1 MBit/s. Der serielle Bus wurde ursprünglich von der Firma Bosch zur Kommunikation zwischen einzelnen Bauteilgruppen in Fahrzeugen entwickelt. Mit der weiterführenden Entwicklung dieses Standards durch CAN FD (flexible data-rate, Übertragungsgeschwindigkeiten bis zu 8 MBit/s) oder TTCAN (Time Triggered CAN) wurden die Anwendungsgebiete stark erweitert. [1]

Die typische Funktion des CAN-Bus beruht auf der differentiellen Zweidrahtleitung mit dem charakteristischen

CAN-Low und CAN-High Signal. Mithilfe des differentiellen Signals können Störsignale von außen beseitigt werden. Weiterhin ist die zyklische Redundanzprüfung (CRC Check) und das Bit-Stuffing von großer Bedeutung, da so überprüft wird, ob die Nachricht korrekt übermittelt wurde. Durch die erwähnten Mechanismen zur Fehlerreduktion, funktioniert der Bus bei richtiger Konfiguration nahezu fehlerfrei. Zu den wichtigen und charakteristischen Eigenschaften des CAN-Bus, welche in dieser Arbeit nicht näher aufgezeigt werden, zählen zudem auch die Fehlerzähler der einzelnen Teilnehmer. [2]

Aufgrund der sehr guten Fehlertoleranz des CAN-Bus, besteht bei den meisten Anwendungsgebieten kein weiterer Handlungsbedarf. Durch die geringe, aber vorhandene Ausfallwahrscheinlichkeit der Hardware bzw. den elektronischen Bauteilen, besteht bei sicherheitskritischen Systemen, wie z.B. in der Raum- oder Luftfahrttechnik, dennoch Handlungsbedarf [3, 4].

Um den Anforderungen zu entsprechen wird meist ein zweites, baugleiches (redundantes) CAN-Bussystem eingefügt, um so Fehler zu erkennen, bzw. auch einen Ausfall der Kommunikation durch Drahtbrüche zu vermeiden. Hier gibt es verschiedene Prinzipien, wie diese Redundanz realisiert werden kann.

In Kapitel II wird ein kurzer Überblick über verschiedene Redundanzrealisierungen gegeben. Weiter wird auf die verwendete Hardware zur Realisierung eines Dual-CAN und dessen Funktionsweise in Kapitel III eingegangen. Es folgt in Kapitel IV die Bewertung der Verlässlichkeit im Vergleich zum nicht-redundanten CAN-Bus. In Kapitel V werden die vorher genannten Realisierungen mit Anwendungsgebieten verknüpft. Abschließend soll in Kapitel VI und VII ein Fazit sowie ein weiterer Ausblick gegeben werden.

## II. REDUNDANZ

Um die Grundlagen des Dual-CAN beschreiben zu können, werden in diesem Kapitel verschiedene Techniken von redundanten Bussystemen beschrieben. Diese Techniken beschreiben die Kommunikationsstrecke zwischen zwei

Teilnehmern (d.h. Mikrocontroller, CAN-Controller, CAN-Transceiver, Busleitung, CAN-Transceiver, (Redundanzmanager), CAN-Controller, Mikrocontroller). (siehe Abbildung 3) Es gibt unterschiedliche, teils sehr aufwändige Stufen, um eine Redundanz zu realisieren. Die einfachste Methode ist die, nur die Treiberbausteine und das Übertragungssystem redundant (doppelt oder mehrfach) zu realisieren. Weiter wäre es möglich auch die CAN-Controller mehrfach auszuführen. Als aufwändigste Stufe, kann man die CPU bzw. auch die Spannungsversorgung redundant realisieren, um die Ausfallwahrscheinlichkeit zu minimieren. [5]

Im Nachfolgenden werden die zwei am häufigsten verwendeten Redundanzrealisierungen genauer erläutert und eine Formel zur Berechnung der jeweiligen Verlässlichkeit  $R(t)$ , welche die Qualität der fehlerfreien Funktion des Bussystems beschreibt, eingeführt.  $\lambda$  ist hier die Ausfallwahrscheinlichkeit des Übertragungssystems,  $\lambda_s$  ist die des Busselektors (Redundanzmanagers) (mehr hierzu in Kapitel IV).

#### A. Cold Redundancy

Bei der sogenannten Cold Redundancy verweilen die redundant verbauten Bauteile im Standby-Betrieb und werden aktiviert, sobald im Hauptkommunikationskreis ein Fehler erkannt wird. Oft werden hier die Fehlerzähler der einzelnen CAN-Teilnehmer verwendet. Werden Nachrichten nicht mehr korrekt empfangen oder gesendete Nachrichten nicht mehr bestätigt, ist dies ein Zeichen für eine fehlerhafte Kommunikation (Fehlerzähler). Es wird der Kommunikationskanal gewechselt und der redundante Kanal benutzt. Hierbei kann es oft zu Übertragungsverlusten kommen, da der Wechsel zwischen den beiden Kanälen nicht sofort bzw. nur mit einer bestimmten Verzögerung erfolgen kann. Die Vorteile hingegen sind der niedrige Energieverbrauch und auch die vergleichsweise einfache bzw. vom CAN-Protokoll bereits vorhandene Implementierung. Zudem wird hier keine zusätzliche Hardware, wie bei der in Kapitel III erwähnten Methode benötigt. In der nachfolgenden Formel wurde zum Vergleich dennoch der Redundanzmanager berücksichtigt. [4, 6] Verlässlichkeit  $R(t)$  [7]:

$$R(t) = e^{-\lambda_s t}(e^{-\lambda t} + \lambda t e^{-\lambda t}) \quad (1)$$

#### B. Hot Redundancy

Im Gegensatz zur vorhergehenden Cold Redundancy werden die Bauteile des Hauptkommunikationskanals und die des redundanten Kanals immer parallel betrieben. Es wird jede Nachricht, die vom Mikrocontroller gesendet wird, parallel auf beide Bussysteme wiedergegeben. Der Empfangsmechanismus gestaltet sich hier deutlich schwieriger, als bei der Cold Redundancy. Es muss geprüft werden, welcher Kanal richtig funktioniert und somit auch welche Nachricht zum Mikrocontroller weitergeleitet werden soll. Der Energieverbrauch ist bei dieser Methode höher, was aber durch die geringere Ausfallwahrscheinlichkeit und höhere Verlässlichkeit des Systems, aufgrund der stets korrekten Übermittlung der Nachrichten, kompensiert werden kann. [4, 6]

Verlässlichkeit  $R(t)$  mit  $n$  Anzahl der redundanten Systeme (bei Dual-CAN:  $n = 2$ ) [7]:

$$R(t) = e^{-\lambda_s t}(1 - (1 - e^{-\lambda t})^n) \quad (2)$$

#### C. Anwendung bei Dual-CAN

Die meist verwendete Realisierung der Redundanz ist die Hot Redundancy Methode. Es kann hier gewährleistet werden, dass in sicherheitskritischen Systemen keine wichtigen Informationen verloren gehen und auch im teilweise fehlerbehafteten Betrieb die Kommunikation weitergeführt wird. Gleichzeitig könnte das System gewartet und der Fehler wieder behoben werden. Die gewählte Methode der Redundanz sorgt für eine erhebliche Erhöhung der Verlässlichkeit und der Stabilität der Nachrichtenübertragung.

### III. DUAL-CAN - GRUNDLAGEN

In diesem Kapitel wird die Hot Redundancy Strategie und dessen Realisierung genauer betrachtet. Der Fokus liegt hierbei auf der am häufigsten eingesetzten Hardware, sowie die Realisierung der Nachrichtenumleitung und Fehlererkennung in der Software.

#### A. Aufbau

Die grundsätzlich benötigte Hardware ist ähnlich zum einfachen CAN. Benötigt wird ein Mikrocontroller für die Steueraufgaben und zur Interpretation der Nachrichten, ebenso wie der CAN-Controller und -Transceiver auf der Kommunikationsebene. Der CAN-Controller implementiert das CAN-Protokoll, wobei der CAN-Transceiver die Signale auf die typischen CAN-Low und CAN-High Pegel umsetzt. Das im Folgenden beschriebene Redundanzprinzip hat eine doppelte Ausführung des CAN-Transceivers. Der CAN-Controller und der Mikrocontroller sind nur einfach verbaut.

Wie in Abbildung 1 erkennbar ist, wird zusätzlich ein sog. Redundanzcontroller benötigt. Dieser wird als programmierbare Hardware ausgeführt (Complex Programmable Logic Devices (CPLD) oder Field Programmable Gate Array (FPGA)). Es können Prozesse parallel abgearbeitet und so der Programmablauf zum Empfang von Nachrichten realisiert werden. Aufgrund von möglichen Verzögerungen erreichen die Nachrichten auf den beiden Bussystemen nie gleichzeitig die beiden CAN-Transceiver. Daraus folgt, dass die empfangenen Nachrichten speziell ausgewertet und verglichen werden müssen.

Das Senden der Nachrichten erfolgt direkt (ohne Redundanzcontroller). Die Tx-Signale des CAN-Controllers werden ohne Umwege auf die Transceiver weitergegeben und gesendet. [8]

#### B. Empfang einer Nachricht

Der in Abbildung 1 beschriebene Aufbau prüft, in welchem Kanal die Nachricht als erstes ankommt und setzt mithilfe des HC123 Bausteins eine logische 1 für die Dauer des Empfangs der Nachricht. Dieses Bauteil verlängert also den ursprünglichen Startimpuls der empfangenen Nachricht. Wenn aufgrund von Fehlern auf dem Bus ein Kanal gestört ist,

wird dieser aufgrund der Verzögerung oder durch Ausbleiben der Nachricht als der langsame Kanal gewertet und die Nachrichten werden über den ungestörten Kanal verarbeitet. [8]

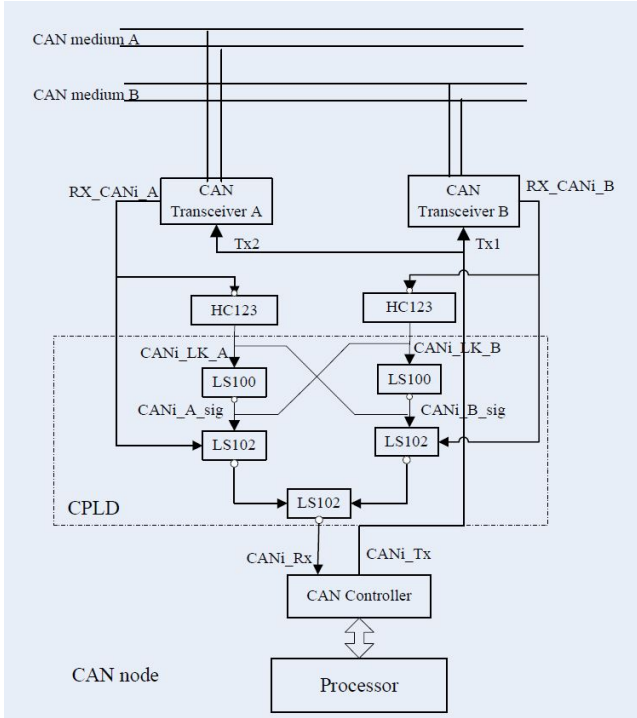


Fig. 1. Aufbau des redundanten CAN-Netzwerks [8]

Ähnliche Empfangsmechanismen, die darauf beruhen, die Daten des Kanals auszuwählen, der zuerst fehlerfreie Daten empfängt, werden in Literatur [4] und [6] beschrieben. Genauere Ausführungen der Realisierung mittels eines FPGAs sind in [5] zu entnehmen. Hier wird im Hardware Redundanz Manager (ausgeführt als FPGA) die gesamte Steuerungsaufgabe zur Nachrichtenübermittlung sowie Fehlerzähler der einzelnen Busteilnehmer übernommen.

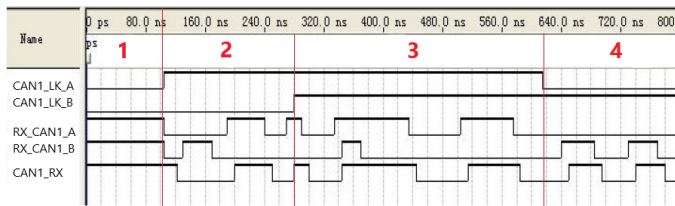


Fig. 2. Timingdiagramm der empfangenen Nachrichten und Prinzip der Nachrichtenumleitung auf den anderen Kanal [8]

### C. Nachrichtenumleitung und Kanalwechsel

In Abbildung 2 wird der Mechanismus zur Nachrichtenumleitung deutlich. Im markierten Teil 2 und 4 kann man erkennen, dass genau die Nachricht an CAN\_RX gesendet wird, dessen Kanal als erstes eine korrekte Nachricht empfängt. Teil 3 verdeutlicht das Prinzip, dass der Empfang einer

Nachricht erst abgeschlossen werden muss, bevor es dem anderen Kanal erlaubt wird, seine Nachrichten zu empfangen und an den Mikrocontroller weiterzuleiten (hier Kanal RX\_CAN1\_B gesperrt). Außerdem ist die kleine Verzögerung durch den Redundanzcontroller zu erkennen, die zwischen dem empfangenen und weitergeleiteten Signal entsteht. Die Nachrichtenumleitung funktioniert also automatisch durch den Redundanzcontroller, wie in Abbildung 3b dargestellt. [8]

## IV. DUAL-CAN - BEWERTUNG

Im Folgenden wird der Dual-CAN in den Punkten Sicherheit und Verlässlichkeit genauer betrachtet und ausgewertet.

### A. Verlässlichkeit / funktionale Sicherheit

Nachfolgend ist der Aufbau der Netzwerke schematisch dargestellt und die Verlässlichkeit den einzelnen Bauteilen zugewiesen. Berechnet wird die Verlässlichkeit des normalen CAN-Bus und des Hot Redundant Modus mit den Formeln (3) (zugehörig zu Abbildung 3a) und (4) (Abbildung 3b). Abbildung 3c wird hier nicht genauer betrachtet. [4] Die in Abbildung 3 dargestellten Verlässlichkeiten werden in den Formeln bereits summiert. Die Ausfallwahrscheinlichkeiten  $\lambda_n$  gehören zu den jeweiligen Verlässlichkeiten  $R_n$ .  $\lambda_s$  aus Kapitel II entspricht hier  $\lambda_6$ . Die Formel (2) der Hot Redundancy wurde hier um die entsprechenden Bauteile erweitert und formt nun Formel (4).

$$R(t)_{single} = e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5)t} \quad (3)$$

$$R(t)_{dual} = e^{-\lambda_1 t} [1 - (1 - e^{-(\lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4)t})^2] e^{-(\lambda_5 + \lambda_6)t} \quad (4)$$

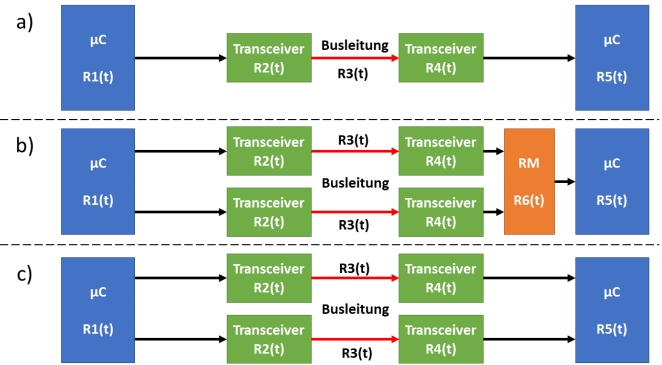


Fig. 3. Verlässlichkeit  $R(t)$  der einzelnen Bauteile - a) Single-CAN, b) Dual-CAN mit Hardware-Redundanzmanager, c) Dual-CAN ohne Hardware-Redundanzmanager (basiert auf Software) (angelehnt an [4])

Für die Ausfallwahrscheinlichkeiten werden im Paper [4] die Werte von  $\lambda_n = 0,00001/h$  verwendet. Da die Wahrscheinlichkeit höher ist, dass ein Fehler in der Übertragungsleitung auftritt, wird  $\lambda_3 = 0,0001/h$  gesetzt. In Abbildung 4 ist die berechnete Verlässlichkeit über die logarithmisch aufgetragene Zeit dargestellt. Wie zu erkennen ist, wirken sich die Vorzüge des Dual-CAN mit steigender Betriebsdauer immer stärker aus. So ist schon bei 100 Betriebsstunden ein deutlicher Vorteil zu erkennen.



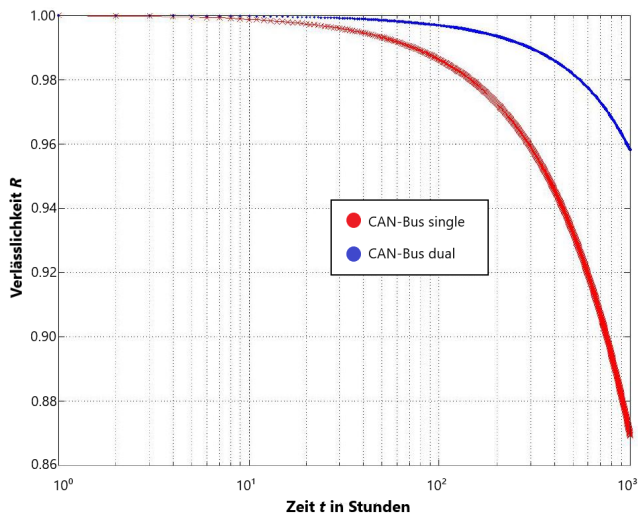


Fig. 4. Verlässlichkeit  $R(t)$  als Funktion über die logarithmisch aufgetragene Zeit  $t$  - Vergleich Single-CAN und Dual-CAN [4]

### B. Test der Fehlertoleranz

Fehler im CAN-Bus können von Drahtbrüchen oder auch Kurzschlüssen an und zwischen den CAN-Low bzw. -High Leitungen bis zu Erdschlüssen reichen. Die Folgen des Fehlers sind stark abhängig an welcher Position dieser genau auftritt. So wird bei einem Drahtbruch von CAN-Low die Kommunikation sofort unterbrochen. Bei anderen Fehlern, wie z.B. Erdschlüssen wird nur das Signal-Rausch-Verhältnis deutlich verschlechtert, aber die Kommunikation wird in den meisten Fällen aufrecht erhalten. [9]

Der Aufbau des Dual-CAN aus Kapitel III wurde auf Fehleranfälligkeit in der Nachrichtenübermittlung getestet. Es wurden Ausfallfehler simuliert, indem die verschiedenen Teilnehmer vom Bus getrennt wurden. In einem Zyklus von 1 ms wurden 16 Stunden lang bei einer Baudrate von 1 MB/s und in einem zweiten Test bei einer Testzeit von 32 Stunden mit der Baudrate 500 KB/s alle Nachrichten korrekt empfangen und keine Fehler erkannt. [8]

## V. DUAL-CAN - ANWENDUNGSBEISPIELE

Der Dual-CAN kommt dort zum Einsatz, wo erschwerte Bedingungen und erhöhte Anforderungen an Sicherheit und Zuverlässigkeit einen fehlersicheren Bus verlangen. Im Folgenden werden drei beispielhafte Einsatzgebiete für Dual-CAN aufgezeigt

### A. Raumfahrt - Weltraum-Roboterarm

Im Paper [3] kommt der Dual-CAN zur fehlertoleranten Signalübertragung zwischen den Gelenken eines chinesischen Weltraum-Roboterarms zum Einsatz. Aufgrund der Umgebungsbedingungen, wie z.B. Protonen und Ionen, die im Weltall den Roboterarm ungeschützt treffen, muss hier ein redundantes System eingesetzt werden. Ebenso wird dies verlangt, da die Reparatur des Roboterarms durch die Bedingungen im Weltall erschwert wird. Es entsteht so eine zusätzliche

Absicherung der Kommunikation im Fehlerfall.

Die in Kapitel III beschriebene Funktion des Dual-CANs wird ebenfalls bei Weltraum-Robotern eingesetzt. Es wurde speziell hierfür ein Test- und Kommunikationssystem entwickelt. [8]

### B. Luftfahrt - Avioniksystem von kleinen Flugzeugen

Um in kleinen Flugzeugen die Verlässlichkeit der Kommunikation der Bauteile und der Anzeigen im Cockpit zu verbessern, wurde in [4] ebenfalls ein Dual-CAN entwickelt und getestet. Zwei verschiedene Ansätze werden hier diskutiert und ausgewertet. Die erste Methode wurde mit redundanten CAN-Controllern realisiert, die andere Methode wurde mit einem Redundanzcontroller wie im Beispiel von Kapitel III aufgebaut (ähnlich zum FGPA).

### C. Seefahrt

Dual-CAN eignet sich ebenfalls zur Datenübertragung auf Schiffen. Hierzu wird ein redundantes CAN-Netzwerk eingesetzt, um von der Schiffsbrücke den Hauptantrieb mit allen nötigen Geräten zu steuern. Auch hier sollte ein Ausfall der Kommunikation aufgrund der eingeschränkten Möglichkeiten zur Reparatur unbedingt vermieden werden. [10] Ebenso ist es möglich, wie in [11] gezeigt, Dual-CAN für einen dynamischen Positionsregler zu verwenden.

## VI. FAZIT

Wie eingangs erwähnt läuft der einfache CAN-Bus schon sehr stabil und mit sehr seltenen Übertragungsfehlern. Mit der redundanten Ausführung kann jedoch eine noch bessere Verlässlichkeit des Systems erreicht werden. Von großen Vorteil ist dies bei Systemen, die schlecht gewartet werden können und bei solchen, die auf jeden Fall eine Kommunikation aufrecht erhalten müssen.

Trotz der Verbesserung der Echtzeitübertragung, entstehen hier nur relativ niedrige Zusatzkosten, wodurch der Dual-CAN bereits sinnvolle Anwendungsgebiete gefunden hat. Für die gängigen Anwendungen reicht die Ausfallrate des einfachen CAN-Bus aus und die zusätzlich benötigte Hardware kann eingespart werden, wodurch Dual-CAN meist nur bei besonderen Projekten Anwendung findet.

## VII. AUSBLICK

In den weiteren Schritten kann betrachtet werden, ob und welche Vorteile eine dreifache Redundanz mit sich bringt. In Quelle [1] wird dieser Aufbau mit drei CAN-Controllern aber nur einem Transceiver beschrieben. Ebenso ist zu diskutieren welche Vorteile und auch Schwierigkeiten die redundante Ausführung des Bussystems bei TTCAN mit sich bringt. Hierzu müssen die parallel laufenden Bussysteme genau synchronisiert werden, um keine Verschiebungen bei den Zeitslots zu riskieren. Die Herausforderungen und einige Lösungsvorschläge wurden in [12] herausgearbeitet.

Weiterhin kann auch ein breiteres Gebiet untersucht werden, bei welchen Anwendungen es ebenfalls sinnvoll wäre eine redundante Variante des CAN-Bus zu realisieren. Denkbar hierzu wären autonome Fahrzeuge, die ebenfalls eine sehr hohe Verlässlichkeit verlangen.



## LITERATUR

- [1] C. Guerrero, G. Rodriguez-Navas, and J. Proenza. "Design and implementation of a redundancy manager for triple redundant CAN controllers". In: *IEEE 2002 28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society. IECON 02*. 2002, 2294–2299 vol.3. DOI: 10.1109/IECON.2002.1185330.
- [2] Jose Rufino. *Dual-media redundancy mechanisms for CAN*. 1997. URL: <http://dario.di.fc.ul.pt/downloads/cstc-rt-9701.pdf>.
- [3] F. I. Ni et al. "Joint Fault-Tolerant Design of the Chinese Space Robotic Arm". In: *2006 IEEE International Conference on Information Acquisition*. 2006, pp. 528–533. DOI: 10.1109/ICIA.2006.305789.
- [4] C. E. Lin and H. Yen. "A Prototype Dual Can-Bus Avionics System for Small Aircraft Transportation System". In: *2006 IEEE/AIAA 25TH Digital Avionics Systems Conference*. 2006, pp. 1–10. ISBN: 2155-7209. DOI: 10.1109/DASC.2006.313766.
- [5] H. Xiang-Dong, Y. Hui-Mei, and Z. Xiao-Xu. "Design of dual redundancy CAN-bus controller based on FPGA". In: *2013 IEEE 8th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*. 2013, pp. 843–847. ISBN: 2158-2297. DOI: 10.1109/ICIEA.2013.6566484.
- [6] X. Zhai et al. "Design of Double Redundant Interface Based on CAN Bus for Nodes of FCS". In: *2010 Second WRI Global Congress on Intelligent Systems*. 2010, pp. 394–396. ISBN: 2155-6091. DOI: 10.1109/GCIS.2010.187.
- [7] F. G. R. Neves and O. Saotome. "Comparison between Redundancy Techniques for Real Time Applications". In: *Fifth International Conference on Information Technology: New Generations (itng 2008)*. 2008, pp. 1299–1300. DOI: 10.1109/ITNG.2008.229.
- [8] Jun Yang et al. "Redundant design of A CAN BUS Testing and Communication System for space robot arm". In: *2008 10th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision*. 2008, pp. 1894–1898. DOI: 10.1109/ICARCV.2008.4795817.
- [9] Zhenye Wang, Xiaosong Guo, and Chuanqiang Yu. "Research of fault-tolerant redundancy and fault diagnosis technology based on can". In: *2010 2nd International Conference on Advanced Computer Control*. Ed. by Huaiyu Xu. Piscataway, NJ: IEEE, 2010, pp. 287–291. ISBN: 978-1-4244-5845-5. DOI: 10.1109/ICACC.2010.5487002.
- [10] H. Cao et al. "Marine Main Engine Remote Control System with redundancy CAN bus based on distributed processing technology". In: *2010 International Conference on Intelligent Control and Information Processing*. 2010, pp. 638–640. DOI: 10.1109/ICICIP.2010.5564343.
- [11] D. Shengli and S. Ligang. "The design and realization of ship dynamic positioning controller based on DSP". In: *2017 36th Chinese Control Conference (CCC)*. 2017, pp. 6348–6352. ISBN: 1934-1768. DOI: 10.23919/ChiCC.2017.8028363.
- [12] B. Müller et al. *Fault tolerant TTCAN networks*. 2002. URL: [https://www.canopen.org/fileadmin/resources/documents/proceedings/2002\\_mueller.pdf](https://www.canopen.org/fileadmin/resources/documents/proceedings/2002_mueller.pdf).



# Impressum

**Hans Meier, Michael Niemetz, Andrea Reindl**  
Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg  
Fakultät Elektro- und Informationstechnik  
Seybothstraße 2  
93053 Regensburg