

# 124

Karlsruher Schriftenreihe  
Fahrzeugsystemtechnik

10. Fachtagung

**Hybride und energieeffiziente  
Antriebe für mobile Arbeitsmaschinen**

19. Februar 2025, Karlsruhe





10. Fachtagung

**Hybride und energieeffiziente Antriebe  
für mobile Arbeitsmaschinen**

Karlsruhe, 19. Februar 2025

Herausgegeben von

Institutsteil Mobile Arbeitsmaschinen (Mobima)

Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer

**Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik  
Band 124**

Herausgeber

**FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik**

Prof. Dr.-Ing. Martin Cichon

Prof. Dr. rer. nat. Frank Gauterin

Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer

Prof. Dr.-Ing. Frank Henning

Prof. Dr.-Ing. Luise Kärger

Das Institut für Fahrzeugsystemtechnik besteht aus den Institutsteilen Bahnsystemtechnik, Fahrzeugtechnik, Leichtbau und Mobile Arbeitsmaschinen.

---

Weitere Infos unter:  
[www.mobima.de](http://www.mobima.de)

---

Eine Übersicht aller bisher in dieser Schriftenreihe erschienenen Bände finden Sie am Ende des Buchs.

# Hybride und energieeffiziente Antriebe für mobile Arbeitsmaschinen

10. Fachtagung  
Karlsruhe, 19. Februar 2025

Herausgegeben von

Institutsteil Mobile Arbeitsmaschinen (Mobima),  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer

## Impressum



Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
KIT Scientific Publishing  
Straße am Forum 2  
D-76131 Karlsruhe

KIT Scientific Publishing is a registered trademark  
of Karlsruhe Institute of Technology.  
Reprint using the book cover is not allowed.

[www.bibliothek.kit.edu/ksp.php](http://www.bibliothek.kit.edu/ksp.php) | E-Mail: [info@ksp.kit.edu](mailto:info@ksp.kit.edu) | Shop: [www.ksp.kit.edu](http://www.ksp.kit.edu)



*This document – excluding parts marked otherwise, the cover, pictures and graphs – is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0): <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>*



*The cover page is licensed under a Creative Commons Attribution-No Derivatives 4.0 International License (CC BY-ND 4.0): <https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/deed.en>*

Print on Demand 2025 – Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier

ISSN 1869-6058 (Schriftenreihe)

ISSN 2510-7275 (Tagungsband)

ISBN 978-3-7315-1403-9

DOI 10.5445/KSP/1000177444





# Die Fachtagung wird 10.

Meine sehr geehrten Damen und Herren,

die Fachtagung „Hybride und energieeffiziente Antriebe für mobile Arbeitsmaschinen“ findet in diesem Jahr zum 10. Mal statt und kann damit einen runden Geburtstag feiern. Sehr gerne erinnere ich mich noch an die Zeit der ersten Fachtagung zurück: damals waren hybride Antriebe in Arbeitsmaschinen noch gänzlich neu, nur aus dem Pkw-Bereich war das Thema „Hybridantriebe“ bekannt. Zunächst musste erst einmal definiert werden, was überhaupt unter „Hybrid“ zu verstehen ist.

Neu am Format der 10. Fachtagung ist seine Kopplung mit der „Mobile Machines – Sicherheit und Fahrerassistenz für Arbeitsmaschinen“. Früher wurde diese Tagung vom Hanser Verlag ausgerichtet, der heute jedoch keine Tagungen mehr veranstaltet. Sehr gerne habe ich die Tagung übernommen und eine gemeinsame Abendveranstaltung für beide Tagungen vorgesehen. Ich bin sehr gespannt, wie sich die Kombination beider Veranstaltungen entwickeln wird.

Im Fokus der Fachtagung stehen Themen zur Nachhaltigkeit und zur Energieeffizienz. Freuen Sie sich auf Themen beginnend bei den Komponenten, wie z.B. Batterien oder energieeffiziente Getriebe, bis hin zu den Fahrzeugen, wie z.B. batterieelektrische oder mit Brennstoffzellen betriebene.

Ich wünsche Ihnen eine spannende Tagung. Nutzen Sie die Möglichkeit zur Vernetzung, insbesondere auf der Abendveranstaltung. Ich freue mich auf Sie.

*Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer*

*Leiter des Instituts Mobile Arbeitsmaschinen (Mobima) am KIT*



# Inhalt

## *Emissionsreduktion und Effizienzsteigerung*

F. von Arnim M. Geimer	Reduction of Transient Emissions from Internal Combustion Engines through Phlegmatization	1
M. Lang	Design and analysis of a magnetic electrical power split gearbox for application in an agricultural vehicle	19
M. Dällenbach H. Lüüs	Fallstudie Teelader: Energieeffizienzsteigerungspotenziale der Arbeitshydraulik	29

## *Elektrifizierung*

S. Wachter F. Bauer N. Hanebuth	Elektrifizierung von Arbeitsmaschinen konsequent zu Ende gedacht - Von der Batterie zum Anbaugerät ohne Energieumwandlung	43
L. Pullwitt J. Frerichs K. Palm R. Resch H. Ulmer T. Delebinski	Vollständige Elektrifizierung von Agrarmaschinen am Beispiel eines 150 kW-Schleppers	59

K. Götz	Simulative investigation of an electric drivetrain for tractors using real load cycles	73
S. Mailhammer		
L. Mayr		
J. Ettl		
M. Lienkamp		

### ***Emissionsfreie Fahrzeugantriebe***

J. Ratzinger	Wasserstoff-Hybrid – eine mögliche Lösung zur Reduktion der CO2-Emissionen	97
T. Aschauer		
D. Lindenthaler		
F. Falbesoner		



L. Reuter	Grüner Wasserstoff als Energieträger für Traktoren	111
L. Frerichs		

C. Konkol	Entwicklung skalierbarer Systeme – Baukasten für Brennstoffzellensysteme in mobilen Anwendungen	133
T. Reuter		

### ***Batteriespeicher***



A. Herkommer	Autonomes Batteriesystem zur Bewertung und Zukunftsprognose von Traktionsbatterien – ein datengesteuerter Ansatz	143
D. Schuhmann		
M. Merkel		

# Reduction of Transient Emissions from Internal Combustion Engines through Phlegmatization

Felix von Arnim <sup>1</sup>, Marcus Geimer <sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Institute of Mobile Machines, Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, Germany*

## Abstract

Reducing transient emissions from internal combustion engines in mobile working machines presents a significant challenge, especially in terms of complying with strict environmental regulations. A promising method for reducing these emissions is the phlegmatization, where the internal combustion engine is delayed in adjusting to the new load level after a load step. This allows the air path more time, resulting in lower NO<sub>x</sub> and PM emissions.

This paper presents the concept of a hybrid module used for phlegmatization and its approach for an operating strategy. Additionally, the simulation model built to investigate the concept is introduced, with a specific focus on parameterizing and verifying the engine models of two diesel engines. Furthermore, the map area with the highest savings potential for both engines is determined. Finally, the approach for an operating strategy of the hybrid module is outlined.

**Keywords:** internal combustion engine, phlegmatization, transient emissions, hydraulic hybrid

# 1 Transient Emissions in Mobile Working Machines

Climate change is driven, among other things, by emissions from internal combustion engines (ICE) powered by fossil fuels. Diesel engines, as a form of an ICE, are the most widely used primary energy converters in mobile working machines [1]. In the Following, diesel engines are referred to as ICE. The most important greenhouse gas in the context of climate change and ICEs is CO<sub>2</sub> [2] [3]. In addition to CO<sub>2</sub>, the harmful effects of nitrogen oxide (NO<sub>x</sub>) and particulate emissions (PM) from ICE on humans and the environment have been known since the 1960s [4].

As [5] shows in several measurement results, approximately 40% of NO<sub>x</sub> and PM emissions are attributable to transient operating conditions, characterized by rapid changes in engine operation. These conditions are particularly common in mobile working machines due to their recurring cycles (e.g., Y-cycle or 90° excavator cycle). Three types of operating conditions lead to transient events: load steps (LS) at constant speed, speed steps at constant load, or cold starts. These conditions can also occur in combination, amplifying their effects [6]. However, this paper only considers the first case.

During steady-state conditions, the air and fuel quantities are balanced to ensure both good power output and low fuel consumption and emissions. In the event of a sudden LS, the desired amount of diesel can be injected immediately, whereas the corresponding boost pressure, i.e., the air quantity, is only available with a significant delay due to turbo lag. [5] [6]

This leads to a reduction in the air-fuel ratio  $\lambda$ , which is the critical factor for the formation of PM. Consequently, many zones in the combustion chamber experience a significant lack of air, which is locally increased by the short mixing time due to the prevalent direct injection in modern ICE. This promotes PM formation. [5]

At the same time, poor mixing during turbo lag results in partially high  $\lambda$  values, leading to locally high gas temperatures and ultimately high NO<sub>x</sub>

emissions. Additionally, the reduction in the exhaust gas recirculation (EGR) rate to provide the required torque for the LS leads to more fresh air in the combustion chamber, resulting in less PM. However, this fresh air again causes higher gas temperatures and, within the context of the soot- $\text{NO}_x$  trade-off, increased  $\text{NO}_x$  emissions. [5] [6]

In addition to internal engine solutions such as the EGR or adapted injection times, various exhaust gas aftertreatment methods such as diesel particulate filters (DPF) against PM, diesel oxidation catalytic converters (DOC) against unburnt hydrocarbons and systems for selective catalytic reduction (SCR) against  $\text{NO}_x$  are also used. All of these systems must be tuned to the EGR, if available [7].

Hybrid systems, on the other hand, have so far mainly been used to increase performance and save fuel [8] [9] [10], but less for reducing (transient) emissions [11] [12]. This paper is therefore intended to provide an outlook on the possibilities of a compact hybrid module for reducing primarily transient  $\text{NO}_x$  and PM emissions from mobile working machines.

## 2 Concept of a Hybrid Module for Reducing Transient Emissions

The hybrid module (HyM) operates on the same principle as described in [13]. Figure 2.1 illustrates the basic idea using the example of a LS and following load drop (LD). The desired torque  $M_{\text{des}}$  is distributed between the internal combustion engine ( $M_{\text{ICE}}$ ) and the HyM ( $M_{\text{HyM}}$ ). In the case of a LS in area 1, the ICE builds up  $M_{\text{ICE}}$  slowly with a constant gradient, depending on the air path ramp-up time  $t_{\text{AP}}$ . The time required to build up the boost pressure allows for the reduction of transient emissions [14]. The HyM contributes the missing torque  $M_{\text{HyM}}$  to ensure that  $M_{\text{des}}$  is achieved at the output. The recharging of the HyM occurs when returning to partial load in area 2 through a delayed decrease of  $M_{\text{ICE}}$ . The presented principle is a

form of phlegmatization characterized by an extremely low degree of phlegmatization according to [15].

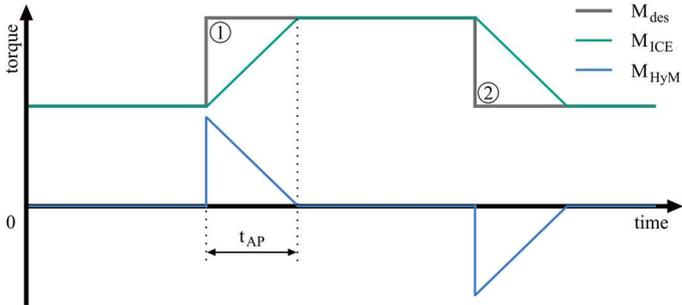


Figure 2.1: Basic principle of the hybrid module according to [13]

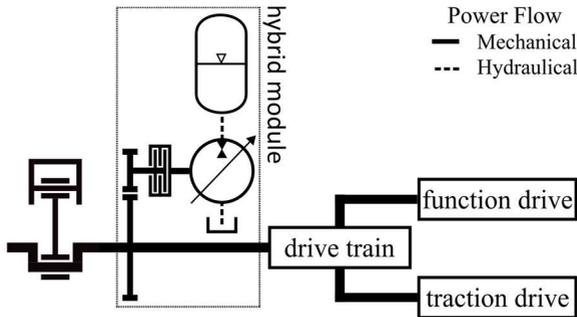


Figure 2.2: Topology of the hybrid module used with clutch [13]

The HyM is designed as a parallel hybrid. As shown in Figure 2.2, an axial piston pump with a swashplate design (APPSP) is used as the energy converter, and a hydraulic bladder accumulator is used as the power storage. The HyM is located... The APPSP is connected to the entire drivetrain via a spur gear and a clutch only during the transient event. Without the clutch, the constant rotation of the APPSP, even in the neutral position, would generate losses that cannot be neglected [17]. Additionally, the spur gear allows the speed or torque range to which the APPSP is exposed to be modeled.

### 3 Simulation of the Hybrid Module

The suitability of the HyM for reducing transient emissions is investigated through simulation. For this purpose, a simulation model (see Figure 3.3) is built up. This involves a co-simulation of two simulation environments: Cruise™ M by AVL, where the ICE is simulated, and MATLAB® Simulink®, which considers all other components. In the orange area of MATLAB® Simulink®, the cycle is applied on the far right, which provides  $M_{des}$  to the drivetrain via a dynamometer and simultaneously forwards it to the operating strategy (OS). Additionally,  $n_{des}$  is passed to the ICE. The HyM is positioned between the dynamometer and the ICE and receives the signal from the OS indicating the torque  $M_{HyM,des}$  it needs to generate. Simultaneously, the OS receives the current accumulator status of the HyM in the form of the accumulator pressure  $p_{acc}$  and the current ICE speed  $n_{ICE,cur}$  to calculate  $M_{HyM,des}$ .

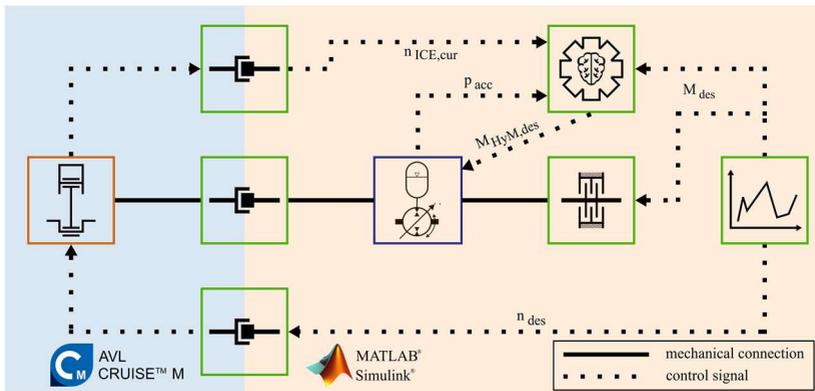


Figure 3.3: Overview of the basic structure of the model

The ICE in Cruise™ M is a semi-physical model of the cylinder block and a physically implemented air path using a 0D simulation approach [18] [19] [20]. Here, a PID controller based on  $n_{des}$  and  $n_{ICE,cur}$  determines the load

signal, which, together with  $n_{ICE,cur}$ , is used to read all important parameters such as injection quantity and timing, EGR rate, etc., from maps. This allows the engine model to simulate the combustion and thus the emissions for the required torque  $M_{des}$ .

Based on map measurements, two engine models have been developed that have different performance ranges and are used in both trucks and mobile working machines. Their technical data can be found in Table 3.1.

Table 3.1: Technical data of the two simulated ICE

	ICE 1	ICE 2
cylinders	inline, 6	inline, 6
displacement in l	12,8	7,7
$M_{ICE,max}$ in Nm	2600	1400
$P_{ICE,max}$ in kW	390	260
EGR	yes	yes
turbocharging	VTG	Bi-Turbo

### 3.1 Parameterization of the Engine Models

The models are parameterized using map measurements according to the definition in [21]. For evaluation, both a graphical method and a feature-based method are used as in [22]. Both methods utilize the 12 parameters shown in Figure 3.4 and Figure 3.5. The results of the measurements, represented by the blue solid lines, are compared with the corresponding simulation results (green solid line).

Each model is considered parameterized according to the graphical evaluation method when the measurement and simulation of the individual parameters match as closely as possible. The calculation of the deviation  $r_z$  in the upper left corner of each parameter diagram and thus the evaluation according to the feature-based method is carried out using the method from [23], which is further detailed in [22]. The better the agreement between

measurement and simulation, the smaller  $r_z$  is [24]. Analogous to [22],  $r_z$  less than 10% is considered very good. If  $r_z$  is less than 20%, the parameterization is still considered good.  $r_z$  up to a value of 25% is considered satisfactory.

The parameterization of ICE 1 in Figure 3.4 shows that simulation and measurement agree well both qualitatively and quantitatively at most measurement points. Only for the exhaust manifold pressure  $p_{31}$ , the EGR mass flow  $MF_{EGR}$ , and PM are there quantitative deviations, which slightly increase the values of  $r_z$ , but still remain in the good range with a maximum of 16.4%. The deviations of these three variables are all due to  $p_{31}$ , as  $MF_{EGR}$  and PM indirectly depend on  $p_{31}$ . In the simulation  $p_{31}$  is always about 0.5 bar below the measured values. This is due to the processes in the combustion simulation

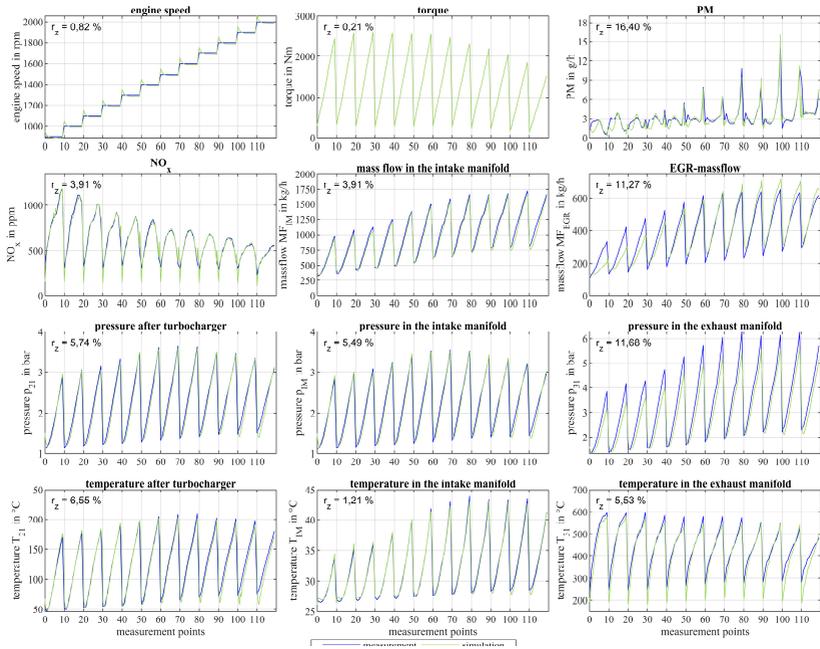


Figure 3.4: Result of parameterization of ICE 1

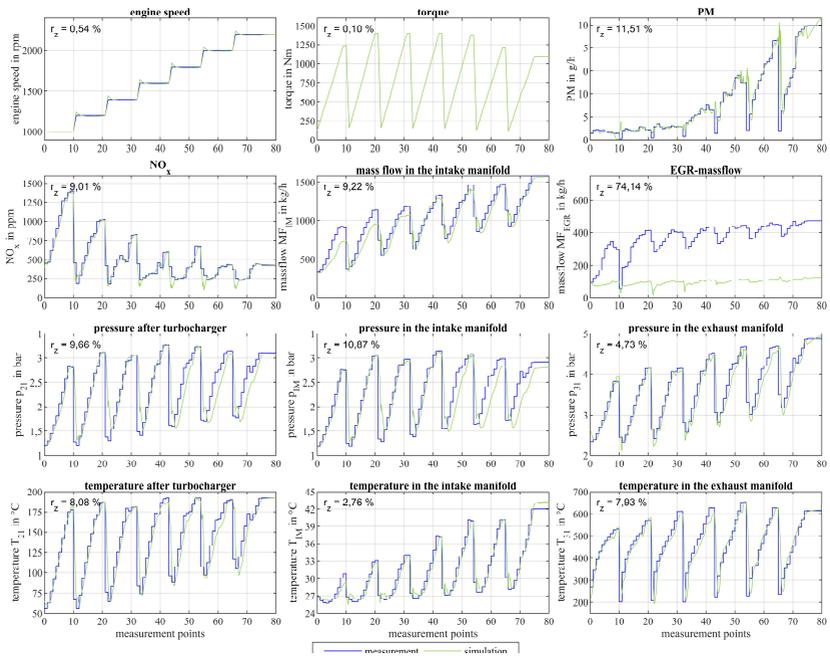


Figure 3.5: Result of parameterization of ICE 2

within the engine block, as all simulation values before and after match the measurement data very well. However, the engine block is a black box, so the influence on internal engine processes is very limited. Parameters such as the pressure at the start of injection are adjusted as much as possible to raise  $p_{31}$  while still ensuring a stable simulation process.  $MF_{EGR}$  flows along  $\Delta p$  from the exhaust manifold to the intake manifold when the EGR valve is open. If  $p_{31}$  is too low, this affects  $MF_{EGR}$  and thus directly the PM.

As shown in Figure 3.5 measurement and simulation also agree well for ICE 2 for most parameters. Only for  $MF_{EGR}$ , simulation and measurement differ by about a factor of 4. This is because the control of  $MF_{EGR}$  in the simulation, according to the state of the art [6], aims to achieve both the performance and emission values of the measurement simultaneously. However,

the approach to control  $MF_{EGR}$  in the measurement is unknown and can only be derived from assumptions. All other parameters agree good to very good.

In summary, it can be noted that all parameters have deviations in the good to very good range. Thus, the presented models of ICE 1 and ICE 2 are defined as successfully parameterized.

### **3.2 Verification of the Engine Models**

A verification compares an analytical solution with a numerical one. If both solutions agree to a certain extent, the numerical solution is considered verified [25]. For the validation of a simulation model, measurement data must be used. Without this measurement data, validation is not possible [21]. But this validation measurement is not available for the considered ICE. Therefore, this paper omits validation and instead conducts a more extensive verification focusing solely on  $NO_x$  and PM.

The literature does not present any clear trends regarding engine behavior, either stationary or transient. Based on this, a method is developed using LS as shown in Figure 2.1, which first compares the stationary level after the LS in the simulation with measurements from the literature or map measurements. If a comparison is possible, the stationary behavior is verified. Then, for  $NO_x$  and PM, the resulting peak and the level after the LS, and thus the transient behavior, are examined individually. The literature indicates that, except for PM peaks, there are no trends for various ICE. But a peak was always observed for PM after the LS.

The verification shows that the simulation data regarding the stationary level after the LS are comparable to the results from the map measurements. Additionally, the peak after the LS for PM can be demonstrated for all examined cases. An example of such a typical PM peak for LS from 1500 to 2250 Nm at 2200 rpm is shown in Figure 3.6. Since the ICE models do not

need to exactly replicate their underlying originals but should primarily reflect real engine behavior, the verification is successfully completed. Thus, the simulation results are usable within the defined boundary conditions, i.e., within the measured maps during stationary and transient states.

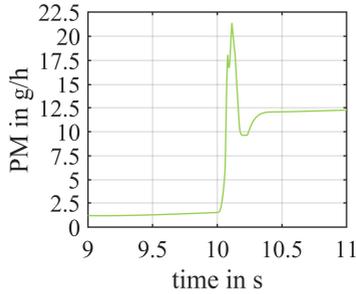


Figure 3.6: Typical PM peak after a LS

### 3.3 Potential Identification

Before developing operating strategies (OS) for phlegmatization, it is crucial to identify the areas in the engine map where the OS can actually achieve a reduction in transient emissions. For this purpose, LS similar to those in Figure 2.1 are used. At a constant speed, the engine map is traversed concerning the starting torques and speeds to cover every possible speed-torque (s-t) combination. The transient behavior with  $t_{AP} = 0$  s is used as a reference. The phlegmatized steps are run with a torque gradient of 100 Nm/s. The reduction can be calculated for  $\text{NO}_x$  and PM using formula (3.1). For each examined s-t combination, a field is created in the engine map, with its color reflecting the reduction in Figure 3.7 to Figure 3.10. In the fields colored white, the engine stalled due to excessive throttling.

$$\text{reduction} = \frac{\int_{LS_{\text{Start}}}^{LD_{\text{End}}} \text{NO}_{x,\text{trans}} - \int_{LS_{\text{Start}}}^{LD_{\text{End}}} \text{NO}_{x,\text{phleg}}}{\int_{LS_{\text{Start}}}^{LD_{\text{End}}} \text{NO}_{x,\text{trans}}} \quad (3.1)$$

ICE 1 shows a significant clustering of  $\text{NO}_x$  reduction in the torque range of  $M \leq 250 \text{ Nm}$  with a maximum reduction of 4.2 % in Figure 3.7. This potential for reducing  $\text{NO}_x$  is likely more usable than the distributed potential for reducing PM in the engine map shown in Figure 3.8.

In contrast to ICE 1, ICE 2 shows a significant clustering of PM reduction in the lower speed range (1000 to 1100 rpm) in Figure 3.10. Only there is a reduction in PM with values of up to 29.3 % promising. A reduction in  $\text{NO}_x$  does not seem particularly worthwhile in any area of the engine map in Figure 3.9, with a maximum reduction of 4.1 %. Based on these findings, the OS can subsequently be developed.

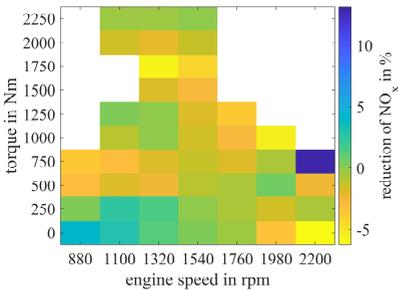


Figure 3.7:  $\text{NO}_x$  reduction for ICE 1

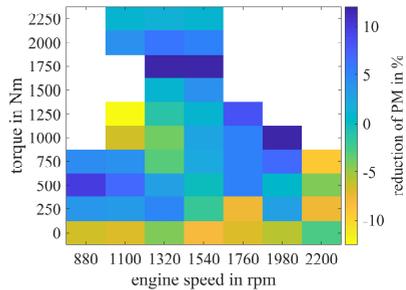


Figure 3.8: PM reduction for ICE 1

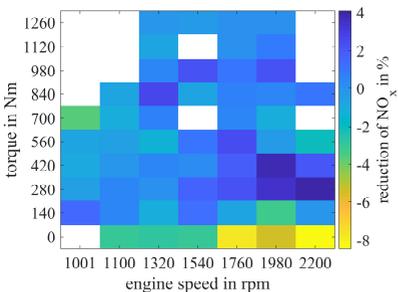


Figure 3.9:  $\text{NO}_x$  reduction for ICE 2

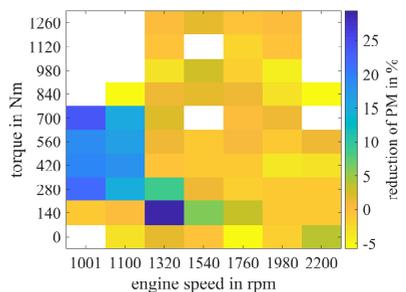


Figure 3.10: PM reduction for ICE 2

## 4 Operating Strategies

The goal of each developed OS is to control the APPSP, considering the current accumulator level and the current  $s$ - $t$  combination, so that the ICE is only loaded to the extent that minimal transient  $\text{NO}_x$  and PM emissions are produced. Thus, the engine should operate in a phlegmatized manner during transient operating conditions.

Chapter 2 already described the concept of the hybrid module with control via constant gradients. The OS must now determine the optimal gradient for each  $s$ - $t$  combination. [26] and [27] show that simulated stationary emissions in transient operating points can be converted into transient emissions by multiplying with the coefficient “c-factor” for defined map areas.

The approach of the OS used here is roughly the inverse of this procedure. Although the coefficients are also called c-factors, but here they are the gradients from Chapter 2 that need to be defined and determined for each of the  $s$ - $t$  combinations from Chapter 3.3. For this purpose, LS across the entire engine map of both ICEs are simulated with varying c-factors, and then the optimal c-factors are determined using a cost function. The goal is an optimum of low  $\text{NO}_x$  and PM emissions and the shortest possible  $t_{AP}$ .

To provide a reference for the cost function, a ramp-up time of  $t_{AP} = 5$  s is defined as optimal concerning emissions [5] [13]. LS are simulated as in Chapter 3.3, resulting in emission maps similar to those in Figure 3.7 to Figure 3.10. These emissions, optimally phlegmatized by definition, can be compared with the emissions of the various OS developed in order to determine the best OS.

The determination of the OS and the verification of their suitability for controlling the hybrid module is the subject of current research.

## 5 Summary and Outlook

This paper presents a concept for a hybrid module designed to reduce transient emissions from mobile working machines through phlegmatization. In addition to the basic principle, the simulation model of the hybrid module is also presented. This includes a detailed engine model of two internal combustion engines. Both engine models are parameterized and verified. The paper also identifies areas where  $\text{NO}_x$  and PM emissions can be reduced.

Finally, the planned approach for the operating strategies is presented. The result should be a map with maximum gradients (c-factors) for each s-t combination, based on which the hybrid module phlegmatizes the internal combustion engine.

The finalized operating strategies and the complete evaluation of the simulation results to determine the best strategy and its emission reduction potential are planned to be published in a PhD work by the end of 2025.

The completed hybrid module, with an OS tailored to the engine and the mobile working machine, aims to provide another option for sustainably reducing transient raw emissions from mobile working machines in the future. Especially in energy-intensive industrial sectors outside urban areas, where internal combustion engines will remain the state of the art for the foreseeable future, this technology can help counteract the ongoing air pollution.

It is conceivable to not only install the hybrid module in new machines but also retrofit older existing machines with it. Due to its simple design and compact dimensions, it is often possible to find space for installation despite the spatial constraints of mobile working machines.

## Acknowledgments

The authors would like to express their special thanks to the Anstalt für Verbrennungskraftmaschinen List GmbH (AVL) for providing the Cruise™ M simulation environment, including MoBEO.

## References

- [1] Geimer, M.: Mobile Working Machines. Society of Automotive Engineers. Electronic publications, Warrendale, Pa.: SAE International 2020, DOI: 10.4271/9780768094329.
- [2] Giakoumis, E. G.: Driving and Engine Cycles. 1. Auflage, Basel: Springer International Publishing 2017, DOI: 10.1007/978-3-319-49034-2.
- [3] Quaschnig, V.: Regenerative Energiesysteme – Technologie - Berechnung - Klimaschutz. 10. Auflage, München: Hanser 2019, DOI: Volker.
- [4] Primavesi, C. A.: Die Autoabgase und ihre Bedeutung für die menschliche Gesundheit. Zeitschrift für Präventivmedizin - Revue de Médecine Préventive 9 (1964) H. 1, S. 148-159.
- [5] Hagena, J. R.; Filipi, Z.; Assanis, D. N.: Transient Diesel Emissions: Analysis of Engine Operation During a Tip-In. SAE Technical Paper 2006-01-1151, 2006.
- [6] Rakopoulos, C. D.; Giakoumis, E. G.: Diesel engine transient operation – Principles of operation and simulation analysis. 1. Auflage, London: Springer 2009, ISBN: 978-1-8488-2374-7.
- [7] Grigoratos, T.; Fontaras, G.; Giechaskiel, B.; Zacharof, N.: Real world emissions performance of heavy-duty Euro VI diesel vehicles. Atmospheric Environment 201 (2019), S. 348-359.
- [8] Feld, D.; Bauer, F.; Röhr, A.: Hydraulischer Hybrid-Antrieb ermöglicht signifikantes Downsizing des Dieselmotors bei Tandemwalzen. Hybri-

- de und energieeffiziente Antriebe für mobile Arbeitsmaschinen, Karlsruhe. In: Geimer, M.; Synek, P.-M. (Hrsg.): 6. Fachtagung Hybride und energieeffiziente Antriebe für mobile Arbeitsmaschinen, KIT Scientific Publishing 2017, DOI: 10.5445/KSP/1000061921, S. 51-60.
- [9] Silvan, E.; Feyerabend, L.; Sachse, C.: Abfallsammelfahrzeug x2eco mit hydraulischem Hybridantrieb – Energie erhalten – Kosten senken – Umwelt schützen. In: Geimer, M. (Hrsg.): 3. Fachtagung Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen – 3. Fachtagung, 17. Februar 2011, Karlsruhe, Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik, Bd. 7, Hannover, Karlsruhe: KIT Scientific Publishing 2011, ISBN: 978-3-86644-599-4, S. 173-185.
- [10] Hohenlohe, F. P. zu: Phlegmatisierung als Tugend in der Mobilhydraulik – Das Energiespeichersystem des Kranvollernters HSM 405H2. In: Geimer, M. (Hrsg.): 3. Fachtagung Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen – 3. Fachtagung, 17. Februar 2011, Karlsruhe, Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik, Bd. 7, Hannover, Karlsruhe: KIT Scientific Publishing 2011, ISBN: 978-3-86644-599-4, S. 151-162.
- [11] Tikkanen, S.; Koskela, E.; Ahola, V.; Huhtala, K.: Emission reduction of mobile machines by hydraulic hybrid. DOI: 10.3384/ecp1714462. 15:th Scandinavian International Conference on Fluid Power, 7.-9. Juni, Linköping, Schweden. In: Krus, P.; Ericson, L.; Sethson, M. (Hrsg.): Proceedings of 15:th Scandinavian International Conference on Fluid Power, 2017, S. 62-67.
- [12] Tikkanen, S.; Heikkilä, M.; Linjama, M.; Huhtala, K.: Emission Reduction by Hydraulic Hybrids. 12th International Fluid Power Conference, 12.10.-14.10., Dresden. In: Dresdner Verein zur Förderung der Fluidtechnik e. V. (Hrsg.): 12th International Fluid Power Conference, Dresden: Technische Universität Dresden 2020, DOI: 10.25368/2020.6, S. 93-102.
- [13] Pult, F.; Engelmann, D.; Geimer, M.: Hybridisierung einer Verbrennungskraftmaschine zur Emissionsreduktion. 7. Fachtagung Hybride

- und energieeffiziente Antriebe für mobile Arbeitsmaschinen, 20.02.2019, Karlsruhe. In: Geimer, M.; Synek, P.-M. (Hrsg.): 7. Fachtagung Hybride und energieeffiziente Antriebe für mobile Arbeitsmaschinen, Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik, Bd. 67, KIT Scientific Publishing 2019, DOI: 10.5445/KSP/1000088252, S. 95-115.
- [14] Lindenkamp, N.; Tilch, B.; Eilts, P.: Reduzierung der Abgasemissionen von Dieselhybridfahrzeugen. MTZ-Motortechnische Zeitschrift 73 (2012) 7-8, S. 614-619.
- [15] Thiebes, P.: Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen – Grundlegende Erkenntnisse und Zusammenhänge, Vorstellung einer Methodik zur Unterstützung des Entwicklungsprozesses und deren Validierung am Beispiel einer Forstmaschine. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik, Nr. 10, Karlsruhe: Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek; KIT Scientific Publishing 2012, ISBN: 978-3-86644-808-7.
- [16] Nagel, P.: Entwicklung einer Betriebsstrategie zur Energierückgewinnung in hybriden Mehrverbrauchersystemen. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik, Nr. 46, Karlsruhe: KIT Scientific Publishing 2016, DOI: 10.5445/KSP/1000051743.
- [17] Linjama, M.; Huova, M.; Tammisto, J.; Heikkilä, M.; Tikkanen, S.; Kajaste, J.; Paloniity, M.; Pietola, M.: Hydraulic Hybrid Working Machines Project - Lessons learned. The Sixteenth Scandinavian International Conference on Fluid Power, 22.-24. Mai 2019, Tampere. In: Huhtala, K.; Tikkanen, S.; Uusi-Heikkilä, J. (Hrsg.): The Sixteenth Scandinavian International Conference on Fluid Power, 2019, ISBN: 978-952-03-1126-1.
- [18] AVL List GmbH: Model Logic – MoBEO Diesel Engine Calibration transient. Cruise M Training, AVL List GmbH, Karlsruhe 2018.
- [19] AVL List GmbH: Cruise M. AVL List GmbH 2018.

- [20] Arnberger, A.: Entwicklungsbegleitende Anwendung eines echtzeitfähigen Motormodells, am Beispiel eines künftigen Euro 6 Nutzfahrzeugmotors. Diplomarbeit, 2011, Technische Universität Graz, Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik.
- [21] Roache, P. J.: Perspective: Validation—What Does It Mean? *Journal of Fluids Engineering* 131 (2009) H. 3, Aufsatz 034503, S. 1-4.
- [22] Brinkschulte, L.; Pult, F.; Geimer, M.: The Use of a Holistic Machine Simulation for the Development of Hydraulic Hybrid Modules to Reduce Transient Engine-Out Emissions. 12th International Fluid Power Conference, 09.-11.03., Dresden. In: *Dresdner Verein zur Förderung der Fluidtechnik e.V. Dresden (Hrsg.): Conference Proceedings: 12th International Fluid Power Conference, 2020*, S. 499-512.
- [23] Ranjitkar, P.; Nakatsuji, T.; Asano, M.: Performance Evaluation of Microscopic Traffic Flow Models with Test Track Data. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1876 (2004) H. 1, S. 90-100.
- [24] Fahrmeir, L.; Heumann, C.; Künstler, R.; Pigeot, I.; Tutz, G.: *Statistik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2016, DOI: 10.1007/978-3-662-50372-0.
- [25] Oreskes, N.; Shrader-Frechette, K.; Belitz, K.: Verification, validation, and confirmation of numerical models in the Earth sciences. *Science (New York, N.Y.)* 263 (1994) H. 5147, S. 641-646.
- [26] Giakoumis, E. G.; Lioutas, S. C.: Diesel-engined vehicle nitric oxide and soot emissions during the European light-duty driving cycle using a transient mapping approach. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 15 (2010) H. 3, S. 134-143.
- [27] Nüesch, T.; Wang, M.; Isenegger, P.; Onder, C. H.; Steiner, R.; Macri-Lassus, P.; Guzzella, L.: Optimal energy management for a diesel hybrid electric vehicle considering transient PM and quasi-static NOx emissions. *Control Engineering Practice* 29 (2014), S. 266-276.

# Design and analysis of a magnetic electrical power split gearbox for application in an agricultural vehicle

*Dr. Matthias Lang*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *John Deere GmbH & Co. KG, Mannheim, Deutschland*

*PhD thesis, TU Berlin December 2020 [1], supervised by Prof. Dr. Meyer, TU Berlin*

## **Abstract**

Continuously variable transmissions have been established in agricultural vehicles besides manual and power shiftable transmissions within the last few years. With continuously variable transmissions, the vehicle speed can be adjusted independent from the speed of the combustion engine, usually making use of a controlling element for superpositioning of speed. As of today, this controlling element usually is formed by a mechanical circumferential gearbox unit whose output speed is controlled by two independent input speeds, specifically the one of the combustion engine and the one of a variable drive, usually a hydraulic motor. The hydraulic motors in these arrangements are expected to be replaced by electric motors in the future. Furthermore, scientific research in the last few years has shown that circumferential gearbox units can not only be realized using a mechanical principle but also using a magnetic one. An electrical motor in these arrangements can be integrated directly into a magnetic circumferential gearbox unit, leading to a significant reduction in part count. The question arises, whether there is a concept for an electric power split transmission with a magnetic circumferential gearbox unit and inbuilt electrical machine and whether this concept can be integrated in tractor transmissions of current and fictitious future tractor generations in terms of technical feasibility, space claim and

economics. It was shown that there is such a concept, providing diverse opportunities to emphasize dedicated design goals when designing new transmissions. This concept is therefore suitable for application in certain power and technology classes of tractors. These results are compliant to the current state of the art regarding engineering research, as the transmissions drafted during concepting work show many similarities to existing power split transmissions that are equipped with mechanical circumferential gearbox units and hydraulic motors. There is a tendency in automotive to qualify magnetic circumferential gearbox units for application in hybrid power trains, underlining their basic usage potential. Especially for expected future developments in agriculture regarding electrification of mounted implements that need to be powered by the tractor, the drafted transmission concepts provide attractive solutions. A single one of these concepts was selected, built and studied. One part requiring additional empiric research is the detailed investigation of the alternative concepts developed.

**Keywords:** continuously variable transmissions, electrification, magnetic gears

## 1 Motivation

Besides manual and power shiftable transmissions, there is a trend towards continuously variable transmissions in agricultural vehicles visible within the last years [2]. With continuously variable transmissions, the output speed can be adjusted seamlessly to any input speed. Continuously variable transmissions can be classified as mechanical, hydraulic or electrical. Hydraulic continuously variable transmissions have been established in agricultural vehicles and are commercially sold by various tractor companies [3].

In 2019, John Deere presented the first electrical continuously variable transmission for the use in an agricultural vehicle [4].

## 2 State-of-the-art of science and technology

Power split units in continuously variable transmissions are usually mechanical planetary gearsets. Recent developments have shown that a circumferential gearset can not only be realized using a mechanical principle, but also using a magnetic principle [5]. A magnetic circumferential gearbox unit in three shaft operation consists of two shafts with radial magnetic pole pairs and a modulating ring between them.

Standard electrical machines in electrical power split transmission concepts are usually connected to high speed low torque components, as this complements the operating range of electrical machines. For a regular mechanical planetary gearset, this usually means that an electrical machine will be connected to the sun gear. The inner component is difficult to reach from a design point of view and a lot of effort is needed to connect the electrical machine to this inner component. It would be a lot easier if the high speed low torque component would be located on the outside. This is not possible with a mechanical planetary gearset, as teeth numbers are always directly proportional to the diameter of the component and the smaller gear will always be the high-speed component.

The speeds and torques of the magnetic pendant are only dependent on the number of pole pairs, which itself is not dependent on the diameter of the component. As such, it is possible to switch positions of the high-speed and the low-speed component, leaving the high speed component accessible from the outside. It is then further possible to remove the outer (hollow) shaft equipped with permanent magnets and replace this component with a fixed stator that can create a rotating electromagnetic field. This concept was originally invented by Atallah and Howe [6] and later spun off into the company Magnomatics Ltd., holding a number of patents on this topic. §11 Abs. 2 PatG covers the rights for research and testing.

In the light of these recent developments, the question arises whether there is a concept for a seamless, magnetic-electrical power split transmission for

the use in agricultural vehicles that integrates an electrical machine directly in a variator.

### **3 Requirements and goal statement**

The requirements for the transmission that was to be developed were that all shift points should be fully seamless. No component, would be allowed to change speeds during a shifting event. Only a single magnetic-electrical recirculating gearset combination should be used to keep costs controlled. The vehicle should be able to use all gear ranges in forward and reverse operation and the transmission should enable “powered zero”. That is an output speed of 0 rpm at constant input speed, witch clutches engaged but the variator superpositioning the speed to 0 rpm.

### **4 Design of a magnetic-electrical power split gearbox**

Putting all the requirements for the transmission together, a schematic for the transmission was developed using the “WOLF-schematic” [7]. It serves to identify the location and connections of sum shafts and differential shafts and can be used to determine relative turning directions. The result of this basic design schematic , was that such a transmission would need to have two variator sections. A variator is a circumferential gearset that can superposition speeds and combine torques. This can either be a classical mechanical planetary gearset or the above-mentioned magnetic-electrical unit. The two circumferential gearsets need to be connected in a way that the combustion engine of the vehicle is connected to both variators, whereas one of the two output shafts is also connected to both variators and the other is connected to only one variator. Because of the nature of the design, only one variator can be directly controlled, meaning that the other output shaft is controlled by operating the transmission as a complex, linked planetary

gearbox. Still, the “WOLF-schematic” of this transmission leaves a number of design options. One of the options, seeming the most promising one, was selected to be detailed, manufactured, assembled and tested.

To detail this concept, the basic variator design was extended by a common range gearbox having two gears and an additional reverse module.

Comparing the final concept, especially the “WOLF-schematic” of the transmission to existing hydraulic power split transmissions, it became clear that the fundamental design concept and schematic is the same as some transmissions that have been in the market for several decades and therefore can be described as trusted technology.

## **5 Analysis of the transmission**

Using matrix calculation methods presented by Stangl [8], the speed and torque of every component of the transmission was calculated for the designated operating points. Based on the speeds and torques at these points, loss models were introduced to calculate overall transmission efficiency.

From this point, a series of fictitious electrical power split transmissions was created using available hydraulic power split transmissions and theoretically replacing the hydrostats in these transmissions with electrical machines. These fictitious transmissions served as a baseline to compare the efficiency, as they can be expected to be developed out of their hydraulic predecessors within the next decades.

Comparing the calculated transmission efficiency of the developed transmission with the fictitious electrical power split transmissions using all the loss models developed in this work, it could be shown that the efficiency is expected to be higher as compared to the efficiency of the fictitious electrical power split transmissions.

## 6 Manufacturing and test operation

To verify the efficiency calculations and the loss models, the core part of the transmission, namely the variator section consisting of the two coupled variators including the magnetic-electrical power split unit was detailed, manufactured, assembled and put to test. The test results showed good correlation with the calculations, reaching even higher efficiency in some points while being slightly off at high speeds.

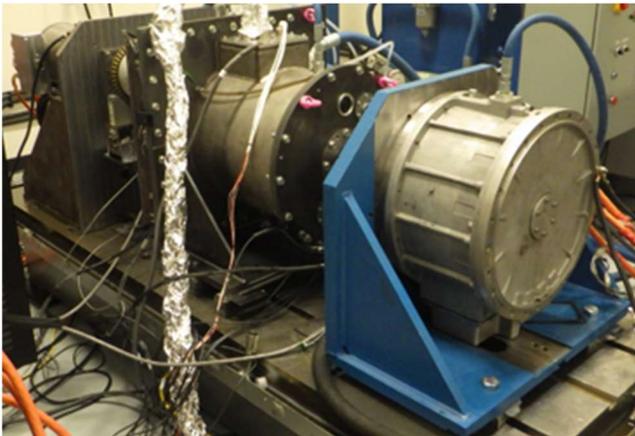


Figure 6.1: Transmission on test stand

## 7 Results of the test operation and comparison to other transmissions

The newly developed transmission reaches higher efficiency compared to the fictitious electrical power split transmissions and enables additional possibilities in the design process because of greater design freedom resulting from the position of the high-speed component in the magnetic-electrical power split gearset. The overall design space is expected to be

smaller as compared to the fictitious electrical power split transmissions, while the electrical machines are expected to be scalable in terms of power requirements. Additionally, the magnetic-electrical power split gearbox integrates an inherent overload protection as slip will occur when torque on the component exceeds its design limits. Service and repair are expected to be more difficult than for the fictitious electrical power split transmissions using only standard electrical machines because of the overall higher complexity of the system that also leads to a more complex failure diagnosis. High magnetic forces that can occur during assembly are another challenge that needs to be addressed.

Judging from all the mentioned advantages and disadvantages, there is no clear recommendation on the future use of a magnetic-electrical power split gearbox in an agricultural vehicle, which is a common outcome for basic research projects. It is recommended to detail the other “WOLF-schematics” that were found within the scope of this work to increase the understanding of the overall system and to increase the design possibilities. It is yet to be seen how future developments in the area of magnetics and power split transmissions, as well as electrification of accessory equipment will influence this research.

## **8 Summary and outlook**

Summing up this work, it could be shown that there is a potential to replace common mechanical planetary gearsets with magnetic-electrical gearset combinations including an electrical machine. Using a systematic synthesis by applying the “WOLF-schematic”, it could be shown that such a design is possible. It is also to be expected that there will be more electrical power split transmissions in the future as they naturally evolve from the hydraulic power split transmissions that are widely used in agriculture vehicles.

With future focus on electrification of accessory equipment, there is potential to further cut down on one electrical machine in the vehicle, as electrical

offboard power can be produced at every operating point using the integrated electrical machines in an electrical power split transmission in input coupled architecture. This is not possible for every operating point when output coupled architecture is used.

Within the scope of this work, it could also be shown that using a wide combination of loss models for all the different components within a transmission can be a quick way of obtaining good overall efficiency predictions, despite the individual loss models being quite simple.

Within the frame of this work, a detailed cost analysis could not be done. Also, there is still a lot of potential in the technical design of the modulating ring and its segments. Different stator winding schemes and the impact of surface magnets versus buried magnets are left for future research, as are the exact thermal and electrical operating limits.

Regarding further potential, the underlying requirements should be reviewed again, for instance with the quick response time of electrical machines compared to their hydraulic counterparts it could be possible to develop a transmission whose shifting points are not fully seamless. If future tractors will at some point be realized without a power take-off shaft because accessory equipment is fully electrified, this would free the transmission of design limitations resulting from the need to have a power take-off shaft going through the entire transmission.

## References

- [1] LANG, M.; 2020. Konzeption und Analyse einer magnetisch-elektrisch leistungsverzweigten Umlauftriebstufe zum Einsatz in einem landwirtschaftlichen Fahrzeug. Berlin. Dissertation. Technische Universität Berlin

- [2] STIRNIMANN, R., 2013. Stufenlos ist nicht gleich stufenlos. In: Lohnunternehmen. Jg. 68, Nr. 10
- [3] RENIUS, K. T., 2014. Globale Getriebekonzepte für Traktoren. In: ATZ offhighway. Nr. August 2014
- [4] LANDWIRTSCHAFTSVERLAG GMBH (Hrsg.), 2019. Agritechnica-Gold für John Deere eAutoPowr Getriebe und intelligentes e8WD System [online]. Münster [Zugriff am 18.06.2020]. Verfügbar unter: <https://www.topagrar.com/technik/news/agritechnica-gold-fuer-john-deere-eautopowr-getriebe-und-intelligentes-e8wd-system-11818225.html#>
- [5] ARMSTRONG, C. G., 1901. Power transmitting device. US687292.
- [6] ATALLAH, K.; HOWE, D., 2001. A novel high-performance magnetic gear. In: IEEE Transactions on Magnetics. Jg. 37, Nr. 4
- [7] WOLF, A., 1954. Die Grundgesetze der Umlaufgetriebe. Braunschweig: Vieweg. Schriftenreihe Antriebstechnik
- [8] STANGL, M., 2006. Methodik zur kinematischen und kinetischen Berechnung [sic!] mehrwelliger Planeten-Koppelgetriebe. München. Dissertation. Technische Universität München



# Fallstudie Telelader: Energieeffizienzsteigerungs- potenziale der Arbeitshydraulik

*Mario Dällenbach<sup>1</sup>, Fabio Huber<sup>1</sup> und Holger Lüüs<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> *Bucher Hydraulics AG, Industriestrasse 15, 6345 Neuheim, Schweiz*

<sup>2</sup> *Bucher Hydraulics GmbH, Industriestrasse 1, 79771 Klettgau Deutschland*

## **Kurzfassung**

Im Zuge von politisch vorgegebenen Klimazielen zur CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktion gewinnt die Elektrifizierung von mobilen Arbeitsmaschinen an Bedeutung. Der stückzahlmässige Anteil von elektrifizierten Maschinen im Vergleich zu ihren dieselbetriebenen Pendanten ist heute oftmals noch gering.

Um die Kosten tief zu halten sind die Maschinenhersteller bestrebt, die hydraulischen Systemarchitekturen möglichst unverändert von den Diesel- auf die E-Maschinen zu übertragen. In vielen Maschinentypen trägt die Arbeitshydraulik einen hohen Anteil am Leistungs- und Energiebedarf der Gesamtmaschine, was die erforderliche Batteriekapazität massgeblich beeinflusst.

Oftmals verfügen konventionelle Hydrauliksysteme mit zentraler Leistungsverorgung anwendungsspezifisch über viel Potenzial zur Steigerung der Energieeffizienz. Dieser Beitrag beinhaltet eine Fallstudie mit einem Telelader, in der gezeigt wird, dass der Wirkungsgrad von hydraulischen Systemen mit effizienzoptimierten Komponenten und neuartigen Systemarchitekturen erheblich gesteigert werden kann. Der Einsatz von effizienteren Komponenten kann bereits eine signifikante Verbesserung bringen, die grösseren

Potenziale bieten innovative Systemarchitekturen. Die technischen Möglichkeiten sind vielfältig, wobei für die ideale Lösung stets verschiedene Faktoren sorgfältig abgewogen werden müssen.

**Schlagworte:** Teelader, Fallstudie, Energieeffizienz, Wirkungsgrad, Arbeitshydraulik

## 1 Einleitung

Vor dem Hintergrund der politisch vorgegebenen Klimaziele zur Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen gewinnt die energieeffiziente Gestaltung mobiler Arbeitsmaschinen zunehmend an Bedeutung. Bei der Konstruktion dieser Maschinen müssen sich die Hersteller mit den vier Fragestellungen zur Leistungsbereitstellung und -verzweigung für die Arbeitsfunktionen auseinandersetzen. Dies sind:

- a) **Die Art der Leistungsbereitstellung:** *Erfolgt die Leistungsbereitstellung batterieelektrisch, wasserstoffelektrisch oder durch einen Verbrennungsmotor?*

Beim Verbrennungsmotor bieten sich unterschiedliche Energieträger an. Dies können fossile Kraftstoffe wie Benzin und Diesel, synthetische Kraftstoffe oder auch Wasserstoff sein. Bei der Konzeption zukünftiger mobiler Arbeitsmaschinen kleinerer Leistung sollten fossile Kraftstoffe aufgrund der nur schwer zu erreichenden Klimaneutralität möglichst vermieden werden. Die Marktdurchdringung von synthetischen Kraftstoffen, insbesondere E-Fuels, wird maßgeblich von deren preislicher Entwicklung abhängen. Wasserstoff als Energieträger ist nahezu ideal, da er einfach herstellbar ist und zu Wasser klimaneutral verbrennt. Allen Verbrennungsmotoren ist als Vorteil gemeinsam, dass der für die Verbrennung notwendige Reaktionspartner Sauerstoff nicht mitgeführt werden muss, sondern in der Luft kostenlos und frei zur Verfügung steht. Ein weiterer Vorteil von Verbrennungsmotoren ist die hohe Lei-

tungsdichte, während als Nachteil die schlechten Wirkungsgrade zu nennen sind.

Im Gegensatz dazu überzeugt die batterieelektrische Leistungsbereitstellung durch einen herausragenden Wirkungsgrad und bietet zudem die Möglichkeit der Energie-Rekuperation, was einen entscheidenden Vorteil darstellt. Dies liegt zum einem daran, dass ein Elektromotor ohne großen Aufwand auch als Generator betrieben werden kann. Zum anderen ist der Energiespeicher eines solchen Systems, der Fahrzeugakkumulator, für den Austausch von Energien ausgelegt und somit prädestiniert, entladen und wieder geladen zu werden.

Daher wird in diesem Beitrag von einem elektromechanischen Antrieb ausgegangen und vorausgesetzt, dass die Arbeitsmaschine bereits elektrifiziert wurde und demzufolge eine batterieelektrische Leistungsbereitstellung vorliegt.

- b) Die Art und Architektur der Leistungsverteilung:** *Erfolgt die Leistungsverteilung hydraulisch, elektrohydraulisch, elektrisch, elektro-mechanisch, mechanisch und/ oder durch Kombinationen davon?*

Bei den heutigen mobilen Arbeitsmaschinen erfolgt die Art der Leistungsverteilung für die Arbeitsfunktionen in den meisten Fällen hydraulisch. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die hydraulische Leistungsverteilung eine bewährte, sichere und bezahlbare Technologie ist, die eine präzise Steuerung ermöglicht und sich insbesondere für die Umsetzung von Linearbewegungen hervorragend eignet. In der vorliegenden Untersuchung wird daher in der ersten Ausbaustufe von einer hydraulischen Leistungsverteilung für die Arbeitsfunktionen ausgegangen.

- c) Steigerung der Effizienz der Leistungsverteilung:** *Wie kann die Effizienz der Leistungsverteilung verbessert werden?*

Die Arbeitshydraulik hat in vielen Maschinentypen einen wesentlichen Anteil am Leistungs und Energiebedarf der Maschine. Dadurch kann bereits in konventionellen Systemen mit zentraler Leistungsver-sorgung die Gesamteffizienz durch Optimierungsmaßnahmen

deutlich gesteigert werden. Dies kann auf Komponentenebene oder durch Verbesserung der Systemarchitektur erfolgen. Der vorliegende Beitrag präsentiert eine Analyse, in der die potenziellen Einsparungen verschiedener Maßnahmen am Beispiel eines Teeladers vorgestellt werden.

d) **Möglichkeiten und Umfänge von Energie-Rekuperation:** *Wie und in welchem Umfang können Energien rekuperiert werden?*

Neben der Steigerung der Effizienz der Leistungsverteilung kann die Möglichkeit der Energierückgewinnung wesentlich zur Verbesserung des Gesamtwirkungsgrads beitragen. Dies bedingt in der Regel die Integration zusätzlicher Systemkomponenten sowie eine Erweiterung der Systemarchitektur. In der letzten Ausbaustufe wird eine Systemarchitektur präsentiert, die eine Rückgewinnung von potenzieller Energie ermöglicht, die zuvor in mechanischer Arbeit aufgebracht wurde.

## 2 Fallstudie

### 2.1 Beschreibung der Basismaschine Teelader

In der folgenden Abbildung ist ein vereinfachter Schaltplan eines dieselbetriebenen Teeladers dargestellt. Die dieselbetriebene Maschine dient als technische Basis, welche elektrifiziert werden soll und deren Arbeitshydraulik in der Folge stufenweise hinsichtlich Energieeffizienz optimiert wird.

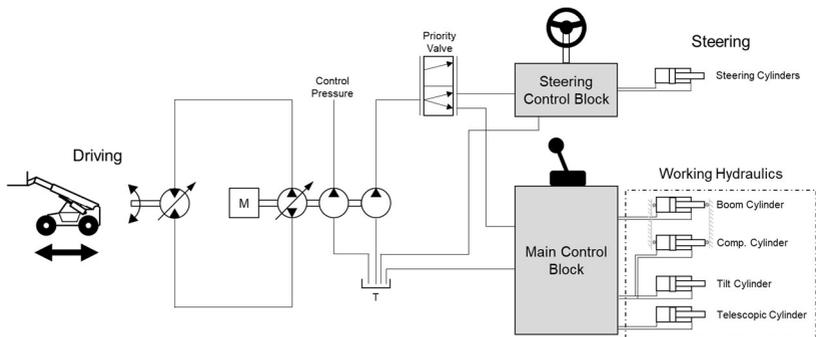


Abbildung 2.1: Vereinfachter Hydraulischer Schaltplan des betrachteten Teeladers

Bei der betrachteten Basismaschine treibt der Dieselmotor folgende 3 Pumpen an, welche auf einer gemeinsamen Welle sitzen: die Fahrtriebspumpe, die Steuerdruckpumpe und die Pumpe für die Arbeitshydraulik. Die verstellbare Fahrtriebspumpe liegt im geschlossenen Kreis mit dem verstellbaren Fahrmotor und bildet ein hydraulisches Getriebe. Der Steuerdruck wird mit einer kleinen Konstantpumpe erzeugt. Die Lenkung sowie die Arbeitshydraulik, bestehend aus Hub-, Kipp-, und Teleyzylinder, werden von einer weiteren Konstantpumpe versorgt. Das Prioritätsventil versorgt die Lenkung mit dem notwendigen Volumenstrom in allen Betriebspunkten.

## 2.2 Beschreibung des Bewegungs- und Lastprofils

Als Bewegungs- und Lastprofil wird für die vorliegende Fallstudie ein typischer Y-Zyklus betrachtet. Der Y-Zyklus beschreibt die Bewegung eines Teeladers, welcher von seiner Startposition vorwärts zur Ladeposition fährt, um dort eine Ladung von einem Stapel aufzunehmen. Anschließend erfolgt eine Rückwärtsbewegung gefolgt von einer Vorwärtsbewegung zur Entladeposition, wo die Ladung auf dem Boden abgestellt wird. Nach dem Abladen fährt der Teelader zurück zur Startposition. Dieses Ladespiel ist in der folgenden Grafik dargestellt.

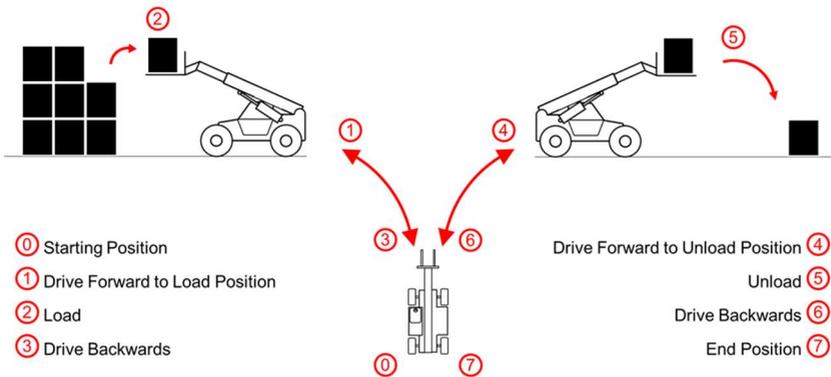


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung Y-Zyklus

Die Daten des Ladespiels können aus der Betriebslastkollektivsstudie<sup>1</sup> entnommen werden. Für die Energieeffizienzbetrachtung werden unter anderem der zeitliche Verlauf der Zylinderbewegung und die Zylinderdrücke der Arbeitshydraulik sowie die Drehzahl und der Druck des Fahrtriebs benötigt.

## 2.3 Optimierungstufen zur Energieeffizienzsteigerung

### 2.3.1 Stufe I – Elektrifizierung mit konventioneller Hydraulik

Stufe I beinhaltet den Ersatz des Dieselmotors durch ein batterieelektrisches Antriebssystem. Dieses umfasst eine Batterie sowie je einen Umrichter und Elektromotor für den elektromechanischen Fahrtrieb und die Pumpen für Steuerdruck und Arbeitshydraulik. Der Fahrtrieb ist drehzahl geregelt und kann Bremsenergie rekuperieren. Die Pumpe für die Arbeitshydraulik ist drehzahl geregelt gemäss aktuellem Volumenstrombedarf, währenddessen die Steuerdruckpumpe von einer simplen Konstantdrehzahleinheit angetrie-

<sup>1</sup> Marcus Geimer: Entwicklung von Methoden zur Bildung eines repräsentativen Betriebslastkollektivs und einer regelbasierten Steuerstrategie. [1]

ben wird. Diese Konfiguration bildet die Referenz für die weiteren Optimierungsstufen, wobei jede Stufe auf der vorherigen aufbaut.

Die Verbesserung der Energieeffizienz jeder Optimierungsstufe wird mit zwei verschiedenen Betrachtungsweisen dargestellt. Für die erste Betrachtungsweise wird die relative Laufzeitverlängerung der Gesamtmaschine mit einer Batterieladung angegeben, wobei die installierte Batteriekapazität als konstant angenommen wird. Die zweite Betrachtungsweise zeigt die relative Verkleinerung der erforderlichen Batteriekapazität unter Annahme einer konstanten Maschinenlaufzeit.

Die Änderungen jeder Stufe im Vergleich zu ihrer vorangehenden sind in der Tabelle fett hervorgehoben. Alle dargestellten Ergebnisse basieren auf Simulationsrechnungen.

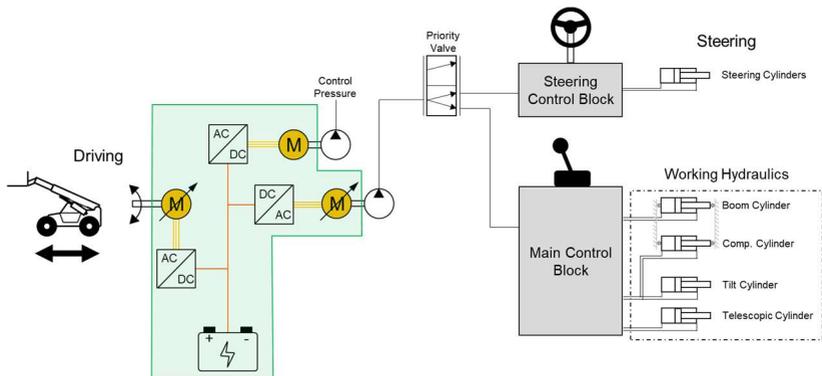


Abbildung 2.3: Stufe I – Schaltplan.

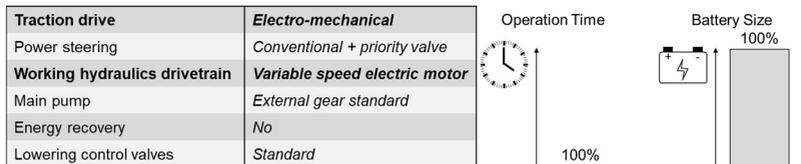


Abbildung 2.4: Stufe I – Veränderungstabelle und Resultate

### 2.3.2 Stufe II – Komponentenoptimierung der Pumpe für die Arbeitshydraulik

Stufe II beinhaltet den Ersatz der bestehenden Aussenzahnradpumpe der Arbeitshydraulik durch ein effizienzoptimiertes Modell. Die übrigen Komponenten und die Systemarchitektur bleiben erhalten.

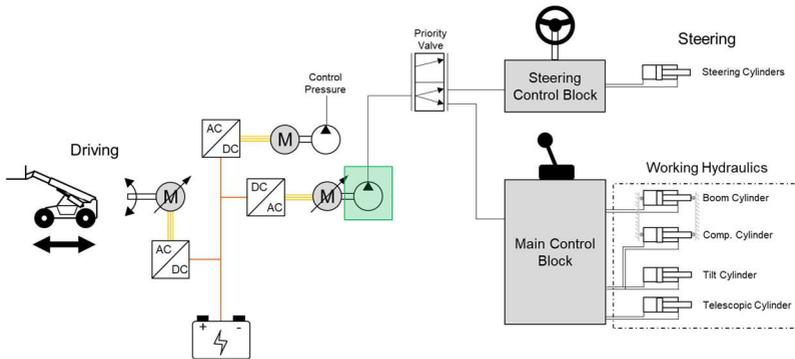


Abbildung 2.5: Stufe II – Schaltplan

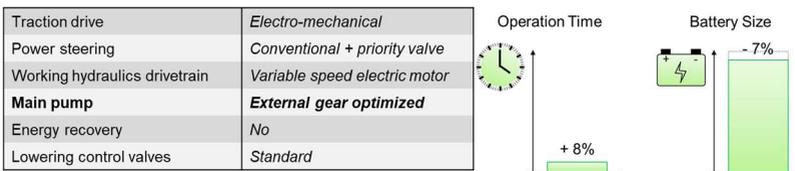


Abbildung 2.6: Stufe II – Veränderungstabelle und Resultate

### 2.3.3 Stufe III – Komponentenoptimierung des Lasthalte- und Sicherheitsventils

In Stufe III wird das intern von der Ringseite aufgesteuerte Lasthalte- und Sicherheitsventil auf dem Hubzylinder durch ein optimiertes Ventil mit externer Ansteuerung getauscht. Dadurch kann die Zylindereinspannung reduziert und Energie eingespart werden.

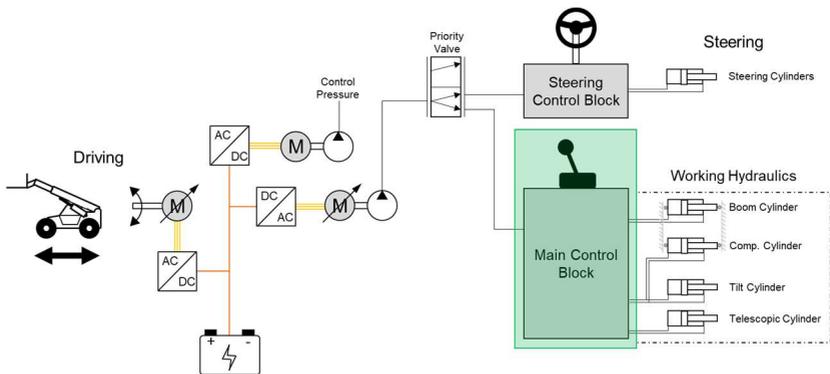


Abbildung 2.7 : Stufe III – Schaltplan

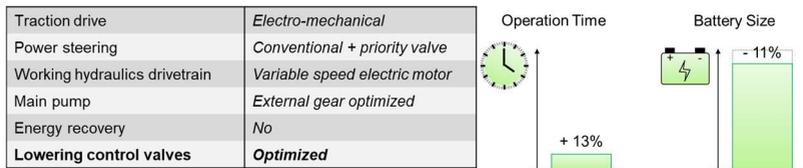


Abbildung 2.8: Stufe III – Veränderungstabelle und Resultate

### 2.3.4 Stufe IV – Systemoptimierung durch separate Lenkungsversorgung mit Konstantdrehzahl

Stufe IV zeichnet sich dadurch aus, dass das Prioritätsventil eliminiert und die Lenkung durch eine separate Motor-/ Pumpeneinheit mit Konstantpumpe und Konstantdrehzahl versorgt wird. Durch diese Entkoppelung werden Drosselverluste in der hydraulischen Systemarchitektur reduziert.

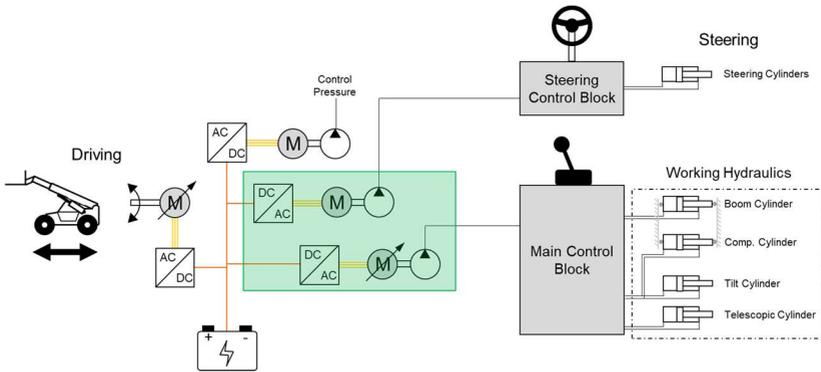


Abbildung 2.9: Stufe IV – Schaltplan

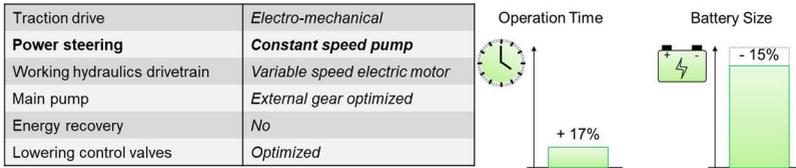


Abbildung 2.10: Stufe IV – Veränderungstabelle und Resultate

### 2.3.5 Stufe V – Systemoptimierung durch separate Lenkungsversorgung mit variabler Drehzahl

Die separate Pumpeneinheit wird ihrem aktuellen Volumenstrombedarf für die Lenkung entsprechend drehzahl geregelt ausgeführt. Dadurch werden Umlaufverluste reduziert, wenn nicht gelenkt wird.

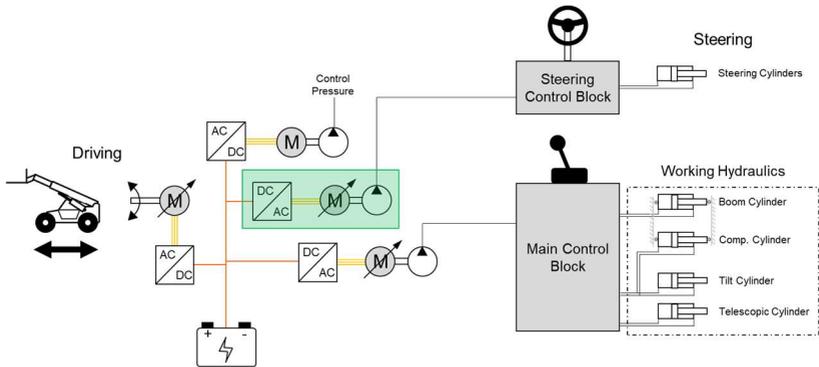


Abbildung 2.11: Stufe V – Schaltplan

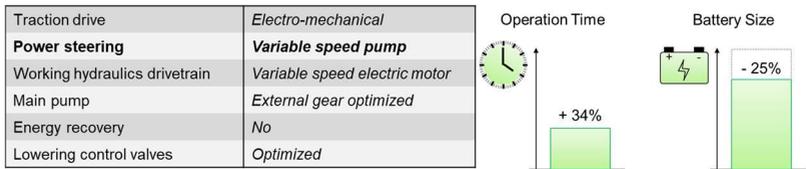


Abbildung 2.12: Stufe V – Veränderungstabelle und Resultate

### 2.3.6 Stufe VI – Komponentenoptimierung durch Bucher AX-Pumpe

Stufe VI beinhaltet den Ersatz der Aussenzahnradpumpe für die Arbeitshydraulik durch die Bucher AX-Pumpe. Die Bucher AX-Pumpe hat keine erforderliche Mindestdrehzahl und kann exakt dem momentanen Volumenstrombedarf der Arbeitshydraulik entsprechend geregelt werden. Damit werden Drossel- und Umlaufverluste reduziert.

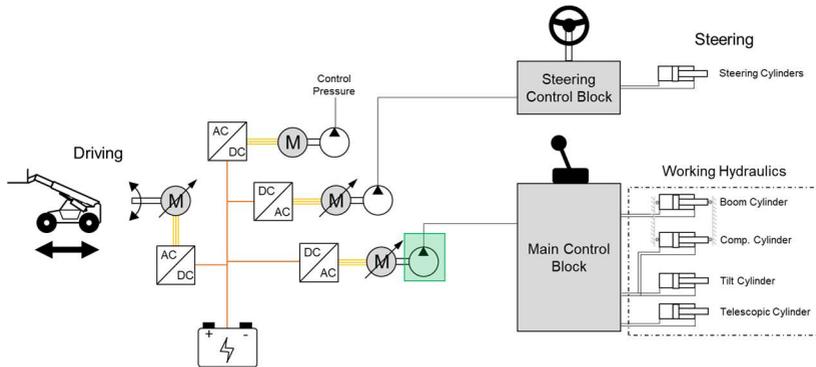


Abbildung 2.13: Stufe VI – Schaltplan

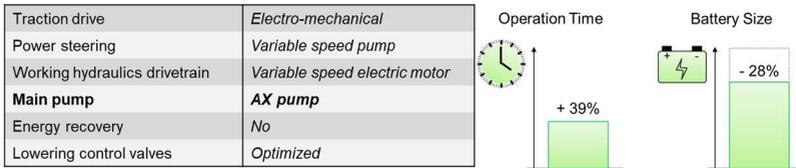


Abbildung 2.14: Stufe VI – Veränderungstabelle und Resultate

### 2.3.7 Stufe VII – Systemoptimierung durch Energierückuperation auf dem Hubzylinder

In Stufe VII wird im konventionellen Steuerblock die Schiebersektion für den Hubzylinder entfernt. Anstelle dessen wird eine dezentrale Linearachsensteuerung eingesetzt, welche den Hubzylinder in Verdrängersteuerung antreibt. Die Linearachsensteuerung erlaubt die elektrische Rekuperation von potenzieller Energie während der Senkbewegung und reduziert die Drosselverluste im Hauptsteuerblock.

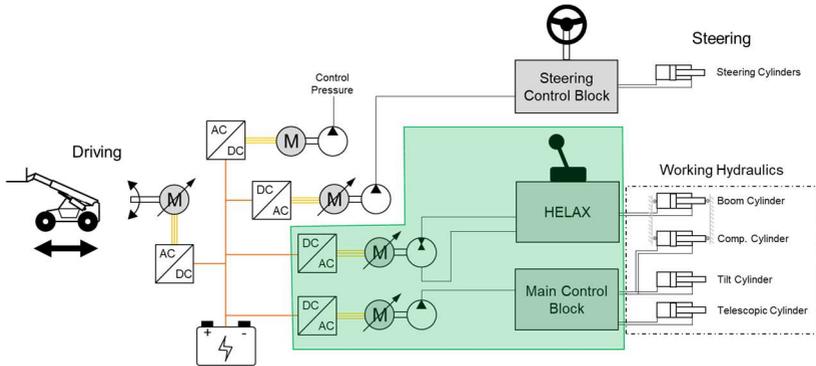


Abbildung 2.15: Stufe VII – Schaltplan

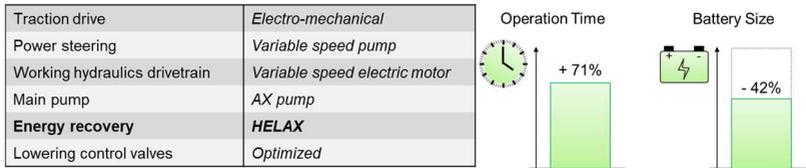


Abbildung 2.16: Stufe VII – Veränderungstabelle und Resultate

### 3 Konklusion

Konventionelle Hydrauliksysteme mit zentraler Leistungsverorgung verfü- gen oftmals anwendungsspezifisch über viel Potenzial zur Steigerung der Energieeffizienz. Der Einsatz von effizienteren Komponenten kann bereits eine signifikante Verbesserung bringen, die größeren Potenziale bieten innovative Systemarchitekturen. Die technischen Möglichkeiten sind vielfäl- tig, wobei für die ideale Lösung neben technischen stets auch kommerziel- len Faktoren sorgfältig abgewogen werden müssen.

	Stage I	Stage II	Stage III	Stage IV	Stage V	Stage VI	Stage VII
Traction drive	<i>electro-mech.</i>						
Power Steering	<i>priority valve</i>	<i>priority valve</i>	<i>priority valve</i>	<b>constant pump</b>	<b>variable pump</b>	<i>variable pump</i>	<i>variable pump</i>
Working Hydraulics Drivetrain	<b>variable speed</b>	<i>variable speed</i>					
Main Pump	<i>standard</i>	<b>optimized</b>	<i>optimized</i>	<i>optimized</i>	<i>optimized</i>	<b>AX pump</b>	<i>AX pump</i>
Energy Recovery	<i>no</i>	<i>no</i>	<i>no</i>	<i>no</i>	<i>no</i>	<i>no</i>	<b>HELAX</b>
Lowering Control Valves	<i>standard</i>	<i>standard</i>	<b>optimized</b>	<i>optimized</i>	<i>optimized</i>	<i>optimized</i>	<i>optimized</i>
<b>Battery size reduction</b>	<b>-0%</b>	<b>-7%</b>	<b>-11%</b>	<b>-15%</b>	<b>-25%</b>	<b>-28%</b>	<b>-42%</b>
<b>Operation time increment</b>	<b>+0%</b>	<b>+8%</b>	<b>+13%</b>	<b>+17%</b>	<b>+34%</b>	<b>+39%</b>	<b>+71%</b>
<b>Complexity &amp; Effort</b>							

Abbildung 3.1: Zusammenfassung Optimierungen und Resultate

## Literatur

- [1] Marcus Geimer: Entwicklung von Methoden zur Bildung eines repräsentativen Betriebslastkollektivs und einer regelbasierten Steuerstrategie, KIT Institut für Fahrzeugsystemtechnik, Teilinstitut für Mobile Arbeitsmaschinen, Karlsruhe, 2019.
- [2] Dierk Peitsmeyer, Eneko Goenechea: Hydraulik in elektrifizierten mobilen Arbeitsmaschinen, 11. Kolloquium Mobilhydraulik, Karlsruhe, 2020.
- [3] Daniel Bayer, Tobias Wagner, Thomas Wolfänger: Der Mobilbagger neu gedacht – Elektrifizierung mobiler Arbeitsmaschinen unter dem Paradigma hoher Leistungsfähigkeit bei hoher Energieeffizienz, 13. Kolloquium Mobilhydraulik, Karlsruhe, 2024
- [4] Wolfgang Rudschies: Synthetische Kraftstoffe: Sind E-Fuels die Zukunft der Mobilität? <https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/alternative-antriebe/synthetische-kraftstoffe/> aufgerufen am 20.11.2025

# **Elektrifizierung von Arbeitsmaschinen konsequent zu Ende gedacht - Von der Batterie zum Anbaugerät ohne Energieumwandlung**

*Dr. rer. nat. Sven Wachter<sup>1</sup>, Ferdinand Bauer<sup>1</sup> und Nils Hanebuth<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup> era-contact GmbH, Bretten, Deutschland*

## **Kurzfassung**

In der Entwicklung von Arbeitsmaschinen stellt der Elektrobagger eine innovative Lösung zur Reduzierung des CO<sub>2</sub> Abdrucks von Baumaschinen dar, die sich jedoch Herausforderungen in Bezug auf Laufzeit und Anschaffungskosten aufgrund großer Batterien stellen muss. Um Energieverluste, die z.B. bei der Umwandlung elektrischer in hydraulische Energie auftreten, zu minimieren, muss das Gesamtsystem eines Baugerätes betrachtet werden. Dadurch kann die Laufzeit der Baumaschine erhöht werden, ohne zusätzliche Kosten für eine größere Batterie in Kauf zu nehmen.

Durch die Steigerung des Gesamtwirkungsgrades mittels dezentraler hydraulischer Systeme und elektrischer Anbaugeräte lässt sich das volle Potenzial des Elektrobaggers ausschöpfen. Die Implementierung elektrischer Anbaugeräte ist dabei eine naheliegende und effektive Lösung, die Laufzeit eines elektrischen Baugerätes zu erhöhen.

Die vorliegende Arbeit beleuchtet das Gesamtsystem des Elektrobaggers als vielseitiger Anbaugeräteträger auf der Baustelle. Es werden neue, ungenutzte Möglichkeiten zur Effizienzsteigerung aufgezeigt, wobei der Fokus auf dem Betrieb elektrischer Anbaugeräte liegt. Weiterhin werden zukunfts-trächtige Konzepte für die Schnittstelle zwischen Bagger und Anbaugerät diskutiert, die eine effiziente Nutzung der elektrischen Anbaugeräte ermöglichen.

**Schlagnworte:** Elektrifizierte Baumaschinen, elektrische Anbaugeräte, Effizienzsteigerung von Baumaschinen

## 1 Einleitung

Die Elektrifizierung von Baumaschinen ist ein wichtiger Bestandteil zur Reduktion von Treibhausgasen im Baugewerbe. Aktuell werden die elektrischen Baumaschinen dennoch größtenteils elektrohydraulisch betrieben. Dies hat zur Folge, dass zwar die Energieverluste sowie lokale Emissionen eines Dieselmotors entfallen, nach wie vor viele Funktionen durch das hydraulische Ansteuern hohe Verluste aufweisen.

Diese Verluste treten unter anderem auch beim Betreiben von Anbaugeräten am Bagger auf wie z.B. bei Anbauverdichtern auf. Da diese Anwendungen sehr energieintensiv sind, schlagen eventuelle Verluste besonders zu Buche. Dies wiederum reduziert die Laufleistung der elektrischen Maschinen und verringert dadurch deren Attraktivität am Markt. Aus diesem Grund sollten Anbaugeräte konsequent elektrifiziert werden, um so hydraulische Verluste zu vermeiden und somit die Gesamteffizienz der Maschine zu steigern und ihre Marktposition zu verbessern.

Als Spezialist für automatisch gekuppelte Übertragungssysteme hat die era-contact GmbH sich es zur Aufgabe gemacht, ein sicheres, automatisch gekuppeltes System zu entwerfen, das ein sicheres Betreiben eines elektrisch angetriebenen Anbaugerätes am Baugerät erlaubt.

## 2 Stand der Technik

### 2.1 Elektrifizierte Baumaschinen

Durch elektrifizierte Baumaschinen können nachhaltige Energiequellen für deren Betrieb verwendet werden, was den ökologischen Fußabdruck wesentlich verbessern kann. Häufig werden die Elektromotoren der Baumaschinen auf drei verschiedenen Wegen oder Kombinationen daraus mit Strom versorgt. Durch eine fest verbundenen Versorgungsleitung, eine Batterie oder eine Brennstoffzelle. Diese Technologien müssen sich jedoch hohen Investitionskosten oder einer geringen Verfügbarkeit von grünem Wasserstoff auf dem Markt stellen. Zudem ist in vielen Anwendungsfällen auf der Baustelle keine ausreichende Energieversorgungsinfrastruktur vorhanden. Dies zwingt die Fahrzeuge zu einem sparsamen Umgang von Energie. Zur Erhöhung der Laufzeit der Baumaschinen auf der Baustelle müssen diese somit effizienter gestaltet werden. Dies kann entweder durch eine Optimierung einzelner Komponenten oder der Architektur des Systems erfolgen. [1]

Durch die Elektrifizierung der Baumaschine ergeben sich zudem neue Anforderungen. So stehen Anwender der beschränkten Laufzeit kritisch gegenüber, da bei klassischen dieselbetriebenen Baumaschinen Energieverfügbarkeit und Laufzeit gelöste Probleme sind. Der Anwender erwartet einen reibungslosen Einsatz über den Arbeitstag hinweg und akzeptiert keine erzwungenen Pausen zum Laden einer Batterie. Dem gegenüber stehen die steigenden Investitionskosten für größere Batterien und das damit einhergehende höhere Gewicht der Baumaschine. Um zum einen eine höhere Standzeit zu ermöglichen und zum anderen nicht höhere Investitionskosten zu erzeugen, müssen elektrifizierte Arbeitsmaschinen Effizienzsteigerung des Gesamtsystem erfahren. Dadurch kann der Erfolg der elektrifizierten Maschinen am Markt gesteigert werden. Darüber hinaus müssen die neuen elektrischen Systeme genauso robust und kräftig wie die bestehenden,

dieselhydraulischen Systeme sein, da die Anwender in dieser Hinsicht keinen Rückschritt akzeptieren.

## **2.2 Der Bagger als vielseitiger Anbaugeräteträger auf der Baustelle**

Viele Bagger werden aufgrund ihrer vielen Freiheitsgrade in den Bewegungsabläufen als Geräteträger für passive sowie aktive Anbaugeräte verwendet. Die Anbaugeräte sind trennbar mit dem Bagger verbunden, und können diesen je nach Bedarf spezialisieren. Dabei werden als passive Anbaugeräten, Anbauten bezeichnet, die keinen eigenen Antrieb besitzen, wie z.B. Löffel, Reißzähne etc.. Als aktive Anbaugeräte werden Geräte verstanden, welche zusätzlich eine meist hydraulische Energieversorgung benötigen, um ihre Aufgabe zu verrichten. Darunter fallen verschieden spezialisierte Werkzeuge, wie Geifer, Meißel oder Anbauverdichter. Aktuell werden diese aktiven Anbaugeräte vorwiegend über hydraulische Anschlussleitungen mit Energie versorgt. Falls elektrische Leistung an das Anbaugeräte übertragen wird, ist diese vorwiegend zur Steuerung oder Datenübertragung vorgesehen. [2].

Seit Jahren hat sich zum Wechseln solcher Anbaugeräte etabliert, sog. Schnellwechsler zu verwenden, wie z.B.: das LIKUFIX System von Liebherr. Dieses ermöglicht den schnellen automatischen Wechsel zwischen verschiedenen Anbaugeräten inkl. der Übertragung von hydraulischer Energie und elektrischen Signalen. [3] Diese Systeme haben neben einem praktischen Nutzen auch einen wirtschaftlichen Vorteil für die Betreiber von Baumaschinen. So werden an Baggern je nach Anwendungsgebiet zwischen 8- und 42-mal am Tag die Werkzeuge gewechselt. Da die Zeitersparnis abhängig von dem Anbaugerät ist können je nachdem pro Wechsel bis zu 9 Minuten Zeit gespart werden. Dadurch belaufen sich die Einsparungen für den Betreiber pro Jahr auf mehrere tausend Euro. [4]

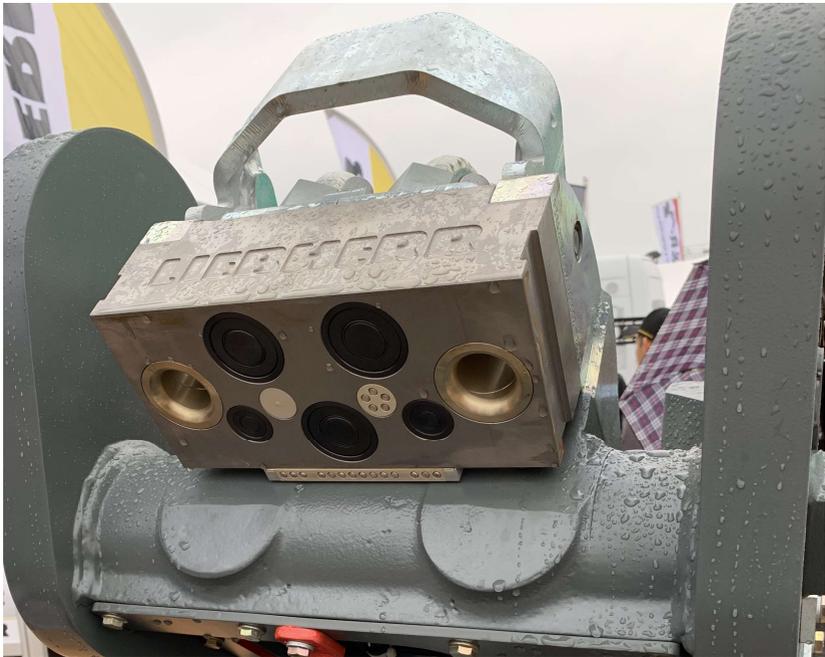


Abbildung 2.1: Schnellwechselsystem für Bagger am Beispiel des LIKUFIX Systems von Liebherr.

### 3 Möglichkeiten zur Effizienzsteigerung

Um die Energieeffizienz eines Systems zu steigern, muss zunächst verstanden werden, an welchen Punkten Energie in dem System verloren geht. Wird ein batterieelektrischer Bagger betrachtet, so weist die Batterie einen Wirkungsgrad von ca. 97% auf und betreibt mit ihrer Energie einen Elektromotor ( $\eta = 95\%$ ), welcher von einer modernen Leistungselektronik ( $\eta = 98\%$ ) angesteuert wird [5]. Dieser Motor betreibt eine hydraulische Pumpe mit einem Wirkungsgrad von 85% [6]. Durch die hydraulischen Ventile und das Schlauchsystem gehen je nach System erneut ca. 20% der eingesetzten Energie verloren ( $\eta = \text{ca. } 80\%$ ) [7]. Der hydraulische Drehmotor, welcher z.B.

an einem Anbaugerät sein könnte, besitzt einen Wirkungsgrad von 85% [6]. So beläuft sich der Gesamtwirkungsgrad eines elektro-hydraulisch betriebenen Anbaugerätes auf ca. 52%.

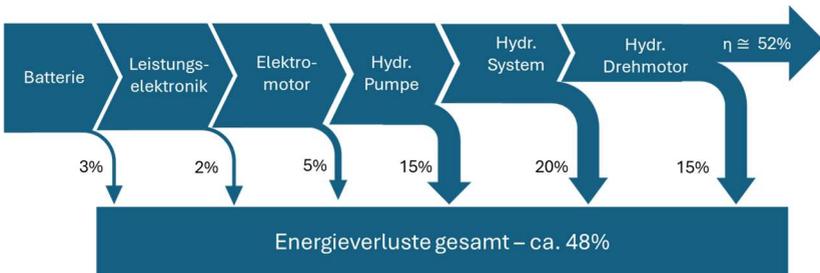


Abbildung 3.1: Systemverluste beim Betreiben von hydraulischen Anbaugeräten

Dem gegenüber steht eine Maschine, welche das Anbaugerät direkt elektrisch betreibt. Dort fallen ebenfalls die Leistungsabfälle an der Batterie ( $\eta = 97\%$ ), der Leistungselektronik ( $\eta = 98\%$ ) und am Elektromotor ( $\eta = 95\%$ ) an. Die hydraulischen Verluste entfallen. Hinzu kommen jedoch Verluste in den elektrischen Leitungen. Am Beispiel eines Elektromagneten mit 30m Kupferkabel und einer Leistung von 13kW bei 230V fallen Verluste in Höhe von 130W an. Somit beläuft sich der Wirkungsgrad der Elektroleitungen auf ca. 99%. Dies hängt von der spezifischen Anwendung und dem verwendeten Kabel ab. Tendenziell sind diese Verluste geringer, je höher die anliegende Spannung ist.

Wirkungsgrad Leitung:  $\eta_L$ , Leistung Anbaugerät  $P$ , Verlustleistung der Leitung  $P_L$ , Betriebsstrom  $I$ , Widerstand der Leitung  $R_L$ , Betriebsspannung  $U$ , spezifischer Kupferwiderstand  $\rho$ , Leitungslänge (hin und zurück insgesamt)  $l$ .

$$\eta_L = 1 - \frac{P_L}{P} = 1 - \frac{I^2 * R_L}{U * I} = 1 - \frac{I * \rho * l}{U} = 1 - \frac{64 * \frac{0,0175 \Omega}{m} * \frac{2 * 30m}{16mm^2}}{230V} \cong 99 \quad (1)$$

Formel 1 Berechnung des Wirkungsgrads einer elektrischen Leitung

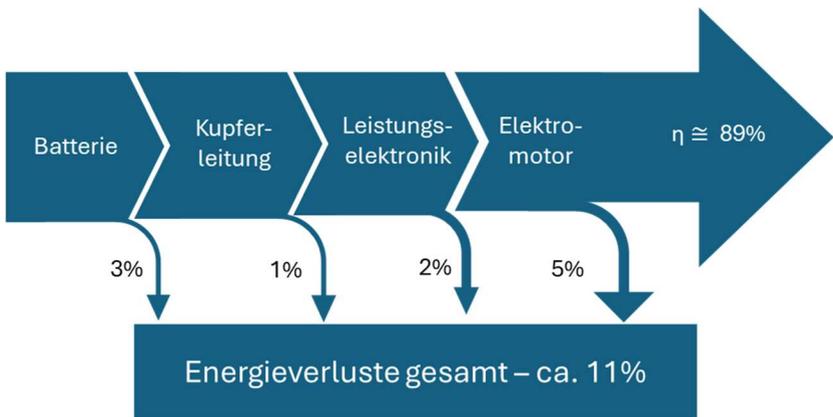


Abbildung 3.2: Systemverluste beim Betreiben von elektrischen Anbaugeräten

## 4 Elektrifizierung von Anbaugeräten

Wie oben beschreiben kann durch eine Elektrifizierung die Laufleistung eines Batterie-elektrischen Baggers wesentlich erhöht werden. Aus diesem Grund ist es sinnvoll zu prüfen, für welche Anwendungen elektrifizierte Anbaugeräte in Frage kommen. Hydraulische Aktuatoren zeichnen sich insbesondere durch ihre sehr hohe Leistungsdichte aus. So ist bei Linearantrieben die Leistungsdichte von hydraulischen Linearantrieben 10- bis 100-mal so hoch wie bei elektrischen Spindelantrieben. [5] Bei Rotationsmotoren können die elektrischen Motoren jedoch mit der Leistungsdichte von hydraulischen Motoren mithalten. In dem von Schröter in 2014 durchgeführten Versuch wurde ein Elektromotor mit einem Leistungsgewicht von  $0,11\text{W/kg}$  mit einem hydraulischen Motor und einem Leistungsgewicht von  $0,16\text{W/kg}$  verglichen, wobei der elektrische Motor einen wesentlich höheren Wirkungsgrad besitzt. [8] Ein weiterer Vorteil elektrischer Motoren ist die präzisere Ansteuerungsmöglichkeit, welche z.B. bei Fräsarbeiten durch eine Drehzahlsteuerung bessere und schnellere Ergebnisse erzeugen kann. Aus diesen Gründen wird erwartet, dass in den kommenden Jahren insbesonde-

re rotatorische Anbaugeräte wie Anbauverdichter, Straßenfräßen etc. elektrifiziert werden. Teilweise sind bereits einzelne Anbaugeräte wie Elektromagnete oder Abbruchhammer elektrifiziert auf dem Markt erhältlich. Allerdings besitzen diese aktuell entweder händische Steckverbinder zum Anbaugerät oder Schnittstellen, welche nicht für die vorherrschenden Umgebungsbedingungen geeignet sind.

Die aktuellen Lösungen zur automatischen Übertragung von elektrischer Leistung sind meist lediglich für eine Spannung bis 230V freigegeben und besitzen auch geringe Maßnahmen zum Schutz der Maschine und des Benutzers. So besteht das Problem von zu geringen Luft- und Kriechstrecken, welche Blindströme verursachen können. Maschinen detektieren diese Blindströme und es kommt zu einer Fehlermeldung. So muss der Baumaschinenführer bei Regenwetter oft aussteigen und die Kontakte händisch reinigen bzw. trockenen. Dies birgt aufgrund des nicht vorhandenen Berührungsschutzes gesundheitliche Risiken durch einen Stromschlag für den Bediener, wenn er nicht vorschriftsgemäß der Maschine ausschaltet. Aus diesem Grund muss für eine weitere Verbreitung der elektrischen Anbaugeräte eine Lösung geschaffen werden, welche sicherer in der Handhabung ist. Darüber hinaus fordern höhere Leistungsklassen stärkere Spannungen, welche die Anforderungen an die Sicherheit ebenfalls steigern lässt. Eine solche Lösung hat era-contact mit Ihrem eraConn System geschaffen

## **5 eraConn Heavy-Duty**

Die eraConn Heavy-Duty Serie von era-contact ist ein Hochleistungskontaktsystem zur Anwendung in extremer Umgebung. Mit dem Baukastensystem kann nahezu jeder Bauraum und Leistungsbereich abgedeckt werden. Mithilfe dieses Kontaktsystems kann nun die Elektrifizierung verschiedenster Anwendung im Bereich der Anbaugeräte vorangetrieben werden. Die Besonderheit des eraConn Systems besteht darin, dass der automatische Steckvorgang in einem Schnellwechselsystem so sicher und robust wie mit

etablierten Hydraulikventilen realisiert werden kann und elektrische Anbaugeräte mit der notwendigen elektrischen Leistung versorgt werden können.

Durch das Baukastensystem können je nach Bauraum über 200kW übertragen werden bei einer Nennspannung von bis zu 1.000V. Um Kosten zu sparen, ist es möglich, für einzelne Anbaugeräte z.B. kleinere Aderquerschnitte zu verwenden und trotzdem kuppelkompatibel zu sein. Nennenswerte Features sind das zum Patent eingereichte Dichtungssystem, welches den Steckverbinder vor Schmutz und Wasser schützt. Zudem ist das System aus mechanisch robust ausgelegt und ist damit für den harten Einsatz auf einer Baustelle oder in der Landwirtschaft geeignet. Durch eine Übertragung des Leitungsschirmes an das Anbaugerät kann so eine durchgehende EMV-Schirmung realisiert werden.



Abbildung 5.1: eraConn Kontaktssystem

Um volle Flexibilität bei der Einführung des Systems zu haben und eine Kombination mit hydraulischen Anbaugeräten zu ermöglichen, lässt sich der eraConn in bestehende Hydraulikbohrungen in Schnellwechslern integrieren. Dadurch wird ein Wechsel zwischen hydraulischen und elektrischen Anbaugeräten ermöglicht, womit je nach Anbaugerät die Stärken der jeweiligen Technologie ausgenutzt werden können.

Bei Beispiel für eine solche Integration konnte bereits gemeinsam mit der Firma Liebherr Hydraulikbagger GmbH realisiert werden, indem in ein bestehendes MH40 Schnellwechslersystem für Industriebagger drei eraConn B12 Kontakte eingebaut wurden, um einen Elektromagneten zu betreiben. Durch die Integration in den Schnellwechslerblock konnte hier ein hybrides System aufgebaut werden, welches dem Anwender das nahtlose Wechseln zwischen hydraulischem Greifer und Elektromagnet ermöglicht.



Abbildung 5.2: Hybrider Einsatz mit dem eraConn auf einem Metallschlagplatz

## 6 Einsparungspotentiale

Große Vorteile elektrischer Anbaugeräte sind Kosteneinsparungen im Betrieb der batterieelektrischen Baumaschine. Längere Laufzeiten bei gleicher Batterieleistung sind ein großer Vorteil, sowie die Einsparung von Treibhausgasen, welche im Folgenden näher beleuchtet werden sollen.

Wird ein elektrifizierter Bagger (kabellos, d.h. mit Batterie als Energiespeicher) mit einem Einsatzgewicht bis 26,1 Tonnen wie z.B. der Volvo EC260 Electric für den Einsatz im Tiefbau verwendet, so hat dieser eine Batteriekapazität von 264 kWh und einer Elektromotorendauerleistung von 105kW. [9] Eine Batterieladung reicht laut Hersteller für ca. 5h Betrieb. Angenommen wird eine durchschnittliche Leistungsabnahme von 42kW ohne die Verwendung eines Anbaugerätes. Wird an diesem Bagger ein passender Anbauverdichter mit einer hydraulischen Leistung von 70kW verwendet, ergibt sich eine benötigte elektrische Leistung von 134kW aufgrund der Umwandlungsverluste (siehe Abbildung 3.1). Bei einer Einschaltdauer von 25% verringert sich die Laufzeit eines solchen Baggers auf ca. 3,5 Stunden. Dabei beansprucht das Anbaugerät im Betrieb ca. 44 % der eingesetzten Energie. Bei elektrischem Betrieb dieses Anbaugerätes erhöht sich die Laufzeit bei sonst identischen Parametern auf ca. 4,3 Stunden, wodurch sich der anteilige Verbrauch des Anbaugerätes an der eingesetzten elektrischen Energie auf 31% reduziert. Um denselben Effekt mit einer größeren Batterie zu erreichen, müsste die Kapazität der Batterie um ca. 60 kWh erhöht werden. Bei einem Preis von ca. \$152/kWh im Jahr 2023 [10] würden sich die Mehrkosten auf \$9.120 belaufen, wobei der Preis für den Endverbraucher höher ausfallen dürfte. Neben dem Preis für die reine Batterie kommen weitere Nachteile wie der größere Platzbedarf und ein höheres Gewicht des Gesamtsystems zum Tragen.

Durch die geringeren Übertragungsverluste können bei einem Strompreis von 16,65 ct/kWh [11] ca. 4.115 € pro Jahr an Energiekosten eingespart werden. Dieser Berechnung liegt ein 8 Stunden Arbeitstag an 220 Arbeitstagen zugrunde. Erhöht sich die Betriebsdauer je Jahr, werden weitere Anbaugeräte verwendet oder eine höhere Einschaltdauer liegt vor, vergrößert sich das Einsparpotential.

Durch die Energieeinsparungen können im deutschen Strommix [12] durch die Verwendung elektrischer Anbaugeräte ca. 9 Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalent eingespart werden. Müsste dies durch CO<sub>2</sub>-Zertifikate ausgeglichen werden,

so würden weitere Kosten i.H.v. 405€ pro Jahr entstehen. Da dies auf Basis des Preises von 2024 berechnet wurde, und die Kosten je Tonne weiter steigen werden, werden sich auch diese Kosten in der Zukunft erhöhen. [13]

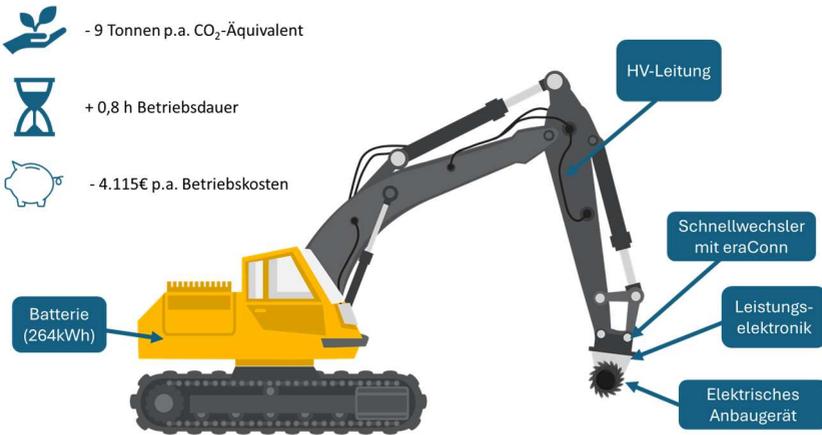


Abbildung 6.1: Einsparpotentiale am Beispiel eines Volvo EC 260

## 7 Fazit und Ausblick

Elektrifizierte Anbaugeräte können dazu beitragen elektrische Baumaschinen attraktiver zu gestalten, indem durch Effizienzsteigerung des Systems Verluste reduziert werden, um die Baumaschine länger, klimaschonender und kostengünstiger zu betreiben. Eine notwendige Technologie für die Marktreife dieser Anbaugeräte sind automatische Schnittstellen zur Versorgung dieser. Eine leistungsstarke, robuste und sichere Lösung bietet das eraConn System von era-contact.

Offen bleibt die Umsetzung der Elektrifizierung weiterer Anbaugeräte, sowie die Verbreitung elektrifizierter Baumaschinen. Zusätzlich zu dieser theoretischen Betrachtung und den ersten Felderfahrten müssen weitere Tests zur Verifizierung der Einsparpotenziale durchgeführt werden.

## 8 Danksagung

Wir möchten unseren aufrichtigen Dank an unsere Partner aussprechen, die maßgeblich zum Erfolg dieser Studie beigetragen haben. Unser besonderer Dank gilt unserem Entwicklungspartner, der Liebherr Hydraulikbagger GmbH, die durch ihre Unterstützung im Engineering, so wie durch die Bereitstellung der notwendigen Ressourcen einen wichtigen Teil zum Projekt beigetragen hat. Ebenso bedanken wir uns bei Metallhandel Stuttgart für die Durchführung des Testbetriebs. Schließlich möchten wir Tom Spike GmbH für die Methodik der strukturierten Innovation danken, die wir an diesem Beispiel zum ersten Mal erfolgreich eingesetzt haben.

## Literatur

- [1] A. Opgenoorth, R. Loewenherz, R. De Doncker, K. Schmitz „Untersuchung einer automatisierten Systemsynthese elektrifizierter mobiler Arbeitsmaschinen“ in „Hybride und energieeffiziente Antriebe für mobile Arbeitsmaschinen“ 9. Fachtagung, 28. Februar 2023, Karlsruhe, 2023, Bd. 106, S. 49-71
- [2] C. Schwab, (2014) „Beitrag zu einer universellen Baggerschnittstelle zur Übertragung elektrischer und hydraulischer Leistung sowie elektronischer Signale für komplexe Anbaugeräte“
- [3] Liebherr-Hydraulikbagger GmbH, (2024), Schnellwechselsysteme <https://assets-cdn.liebherr.com/assets/api/392b1193-6781-4110-b2a7-a1aed0fa0b64/Original/> abgerufen am 22.10.2024
- [4] Lehnhoff Hartstahl GmbH, Voll wirtschaftlich, <https://voll.lehnhoff.de/voll-wirtschaftlich/> abgerufen am 23.10.2024

- [5] A. Opgenoorth, S. Quabeck, R. De Doncker, K. Schmitz, (2020) “Challenges and possibilities of the integration of electric drives in mobile machinery, 12<sup>th</sup> international Fluid Power Conference, Dresden
- [6] Prof. Dr.-Ing. M. Geimer, N. Bargen, P. Shenoy, (2022) Erforschung von Hybridisierungsmaßnahmen am Beispiel eines Hydraulikbaggers, Abschlussbericht, Berichtszeitraum: 01.12.2020 – 31.12.2021.
- [7] HAWE Hydraulik SE, (2024), “Energieverluste in der Hydraulik“, <https://www.hawe.com/de-de/fluidlexikon/energieverluste-in-der-hydraulik/>, abgerufen am 22.10.2024
- [8] J. Schröter, Univ.-Prof. Dr.-Ing. G. Jacobs, (2014) “High Speed Electrical Drives for Mobile Machinery – Drive Concept and Selected Components”
- [9] Volvo Construction Equipment, “EC230 Electric” <https://www.volvoce.com/-/media/aprimo/pdf/electric-crawler-excavators/ec230-electric/product-guide-ec230-electric-de-25-20061559-a.pdf?v=umpuPw> abgerufen am 24.11.2024
- [10] Statista GmbH, Weltweite Preisentwicklung für Lithium-Ionen-Akkus in ausgewählten Jahren von 2013 bis 2023, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/534429/umfrage/weltweite-preise-fuer-lithium-ionen-akkus/> abgerufen am 24.10.2024
- [11] E.ON Energie Deutschland GmbH, Industriestrom: Vergleich für Unternehmen <https://www.eon.de/de/gk/strom/industriestrom.html> abgerufen am 24.10.2024
- [12] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz „Strom- und Wärmeversorgung in Zahlen“ <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/energieversorgung/strom-waermeversorgung-in-zahlen> abgerufen am 24.10.2024

- [13] Presse- und Informationsamt der Bundesregierung, (2024) „CO<sub>2</sub>-Preis steigt auf 45 Euro pro Tonne“, <https://www.bundesregierung.de/breg-de/aktuelles/co2-preis-kohle-abfallbrennstoffe-2061622> abgerufen am 24.10.2



# Vollständige Elektrifizierung von Agrarmaschinen am Beispiel eines 150 kW-Schleppers

*Lisa Pullwitt<sup>1</sup>, Dr. Jelto Frerichs<sup>1</sup>, Dr. Kerstin Palm<sup>1</sup>, Rico Resch<sup>1</sup>, Dr. Hubertus Ulmer<sup>1</sup>, Dr. Thaddaeus Delebinski<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup> IAV GmbH Ingenieurgesellschaft Auto und Verkehr - Commercial Vehicle  
Powertrain, Gifhorn, Deutschland*

## Kurzfassung

Angesichts der globalen Herausforderungen des Klimawandels und der Notwendigkeit, alle Wirtschaftsbereiche nachhaltiger zu gestalten, richtet sich auch in der Landwirtschaft der Fokus auf emissionsfreie und energieeffiziente Lösungen. Dabei ist eine Möglichkeit zur Dekarbonisierung die Elektrifizierung.

Im Rahmen einer Masterarbeit in Kooperation der TU Braunschweig und IAV wurden elektrifizierte Antriebsstränge für Traktoren untersucht. Im Zentrum des Beitrags steht die Entwicklung und Bewertung verschiedener Antriebsstrangkonzeppte für eine batterieelektrische Schlepperanwendung. Berücksichtigt werden sowohl Kunden-, Markt- sowie regionale Anforderungen. Dazu wurde bei IAV ein Simulationstool entwickelt, um den Antriebstrang entsprechend der für verschiedene Feldarbeiten benötigten Leistungsdaten auszulegen und mittels Zyklussimulation zu bewerten. Die vorgestellten Konzepte sollen einen konventionellen Schlepper mit 200 PS (ca. 150 kW) Dieselmotor ersetzen. Dabei werden die Leistung und Effizienz der verschiedenen Antriebsstrangvarianten verglichen und deren Eignung für den landwirtschaftlichen Einsatz bewertet.

**Schlagnvorte:** Innovative Antriebstopologien, Batterieelektrischer Antriebsstrang, BEV, Antriebsstrangentwicklung

## 1 Einleitung

Der Antrieb von Traktoren erfolgt in der Gegenwart überwiegend mittels Dieselmotoren. Mit dem Ziel einer Verringerung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes wird intensiv an alternativen Antriebstechnologien für Traktoren geforscht. Speziell elektrisch angetriebene Fahrzeuge zeichnen sich durch lokale Emissionsfreiheit aus. Ein weiterer Vorteil dieser Antriebe besteht in der geringeren Lärmemission.

Die vorliegende Untersuchung befasst sich mit der Frage, wie batterieelektrische Antriebskonzepte für Traktoren ausgestaltet werden können und für welche Anwendungen batterieelektrische Antriebe heute und zukünftig geeignet sind. Dazu wird bei IAV ein generisches, skalierbares Modell für verschiedene Varianten eines batterieelektrischen Traktor-antriebsstrangs entwickelt. Mithilfe dieses Modells wird der Energiebedarf der unterschiedlichen Antriebsvarianten bei verschiedenen Feldarbeiten ermittelt, um deren Eignung zu bewerten und die erforderliche Batteriekapazität abzuschätzen.

Wie in Abbildung 1.1 dargestellt, weist ein Großteil der bisher veröffentlichten batterieelektrischen Traktorkonzepte eine Leistung von unter 50 kW auf. Innerhalb dieses Leistungsbereichs sind drei Konzepte vertreten, die bereits am Markt verfügbar sind. In den Leistungsbereichen über 50 kW existiert eine Vielzahl an batterieelektrischen Traktorkonzepten, von denen jedoch lediglich eines die Marktreife erlangt hat. [1 - 14]

Eine Analyse der Zulassungszahlen von 2023 zeigt, dass die Leistungsklassen zwischen 100 bis 200 PS einen signifikanten Anteil an den Zulassungszahlen aufweisen. Zudem sind die Zulassungszahlen in diesen Leistungsklassen von 2022 zu 2023 nahezu konstant. Daher wird untersucht, ob auch Traktoren

dieser Leistungsklassen elektrifiziert werden können. Der Fokus liegt dabei auf dem oberen Rand dieser Leistungsklassen, da der Strukturwandel in Deutschland zu größeren Flächen und somit zu einer höheren Flächenleistung und größeren Traktoren führt. In dieser Untersuchung wird daher ein Traktor mit 200 PS, entsprechend 147 kW, betrachtet. [15, 16]

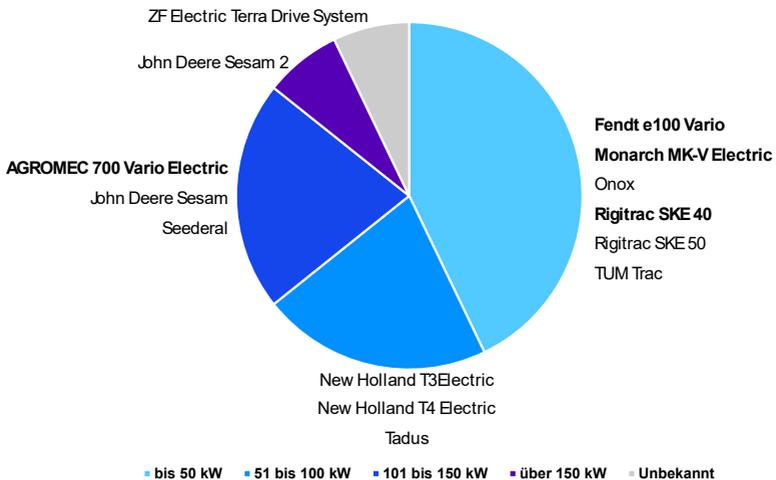


Abbildung 1.1: Leistungsklassen der veröffentlichten batterieelektrischen Traktorkonzepte

## 2 Systemarchitekturen der untersuchten Antriebsstrangvarianten

Basierend auf den Ergebnissen der Literaturrecherche zu den in Abbildung 1.1 dargestellten veröffentlichten batterieelektrischen Traktorkonzepten wurden vier unterschiedliche Antriebsstränge für einen batterieelektrischen Traktor konfiguriert. Diese sind in Abbildung 2.1 dargestellt.

Links ist Variante 1 zu sehen, die auf dem Austausch des Dieselmotors durch einen Elektromotor und des Tanks durch eine Batterie basiert. Diese Variante verfügt über ein Schaltgetriebe, das die Leistung vom Elektromotor auf

den Fahrtrieb, die Hydraulik und die Zapfwelle überträgt, wobei die Zapfwelle durch eine Kupplung vom Antriebsstrang getrennt werden kann.

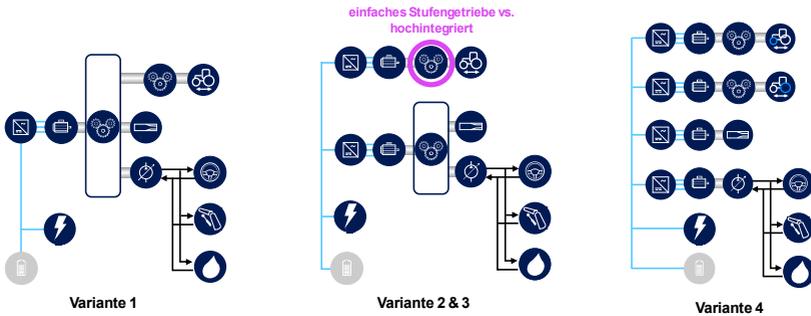


Abbildung 2.1: Antriebsstrangkonzeppte für einen batterieelektrischen Traktor

Die beiden Varianten 2 und 3 sind in der Mitte der Abbildung 2.1 dargestellt. Bei beiden Varianten ist eine Entkopplung des Fahrtriebs vom Antrieb der Zapfwelle sowie der Hydraulik vorgesehen. Beide Varianten sind mit zwei Motoren ausgestattet. Variante 2 ist mit einem Schaltgetriebe für den Fahrtrieb versehen. Im Gegensatz dazu weist Variante 3 eine hochintegrierte Hinterachse mit einem gestapelten Planetengetriebe auf. Bei dieser Variante sind der Elektromotor für den Fahrtrieb sowie das gestapelte Planetengetriebe in die Hinterachse integriert, wodurch mehr Bauraum, beispielsweise für die Batterie, zur Verfügung steht.

Variante 4 (Abbildung 2.1, rechts) ist mit vier Elektromotoren ausgestattet, welche die Vorder- und Hinterachse, sowie Zapfwelle und Hydraulikpumpe jeweils separat antreiben.

### 3 Aufbau der Modellumgebung

Die Abbildung 3.1 zeigt den Aufbau des Modells, welches als Rückwärtsmodell ausgeführt ist.

Zunächst wird aus der Fahrgeschwindigkeit mithilfe des dynamischen Reifendurchmessers die jeweilige Drehzahl der Vorder- und Hinterräder bestimmt. Aus der Zugkraft werden die Drehmomente an der Hinterachse und Vorderachse berechnet. Anschließend erfolgt die Umwandlung der Drehmomente und Drehzahlen im Endantrieb und im Differenzial. Für die Hydraulikleistung wird der Wirkungsgrad der Pumpe, der mithilfe eines repräsentativen Kennfelds bestimmt wurde, berücksichtigt.

Im Anschluss erfolgt eine Unterteilung in die vier Varianten, welche in SIMULINK als VARIANT SUBSYSTEM implementiert werden. Das VARIANT SUBSYSTEM erhält sämtliche erforderlichen Eingangsdaten für die vier Varianten. In Abhängigkeit der Auswahl des Subsystems erfolgt eine Berücksichtigung der jeweiligen Variante im Rahmen der Simulation. Dies ermöglicht die Erstellung eines einheitlichen Modells für alle vier Varianten, wobei lediglich in den Bereichen Unterschiede berücksichtigt werden, in denen sich die Varianten unterscheiden. Auf diese Weise können Duplizierungen innerhalb der Simulation vermieden werden. In den Varianten werden für die Motoren Motorkennfelder verwendet, aus denen in Abhängigkeit von Drehmoment und Drehzahl der Wirkungsgrad ermittelt wird. Diese Motorkennfelder, sowie Getriebe- und Inverterverluste wurden mit einem internen Simulationstool, der ANTRIEBSSTRANGSYNTHESE, von IAV ermittelt [17]. Nach dem VARIANT SUBSYSTEM wird die erforderliche Energie zum Fahren des Zyklus ausgegeben.

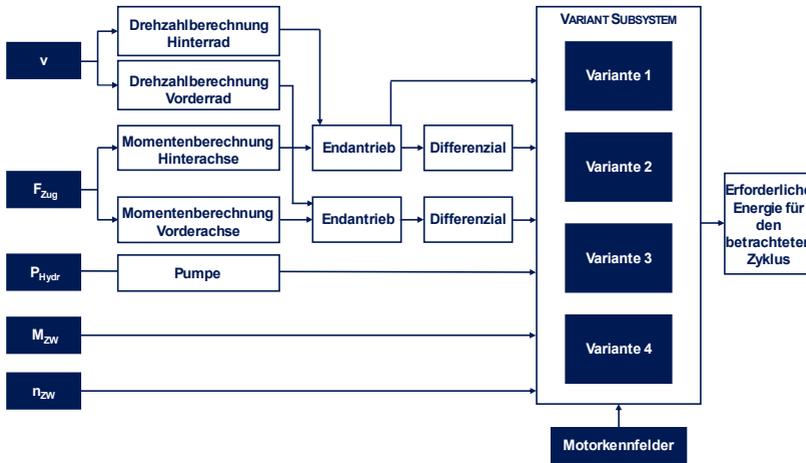


Abbildung 3.1: Aufbau des Simulationsmodells

## 4 Bewertung und Vergleich der Antriebsstrangvarianten

Die vorgestellten Antriebsstrangvarianten werden anhand der Bewertungskriterien Effizienz, Masse und Kosten verglichen.

Bei der Effizienz zeigt sich in Abbildung 4.1, dass der Energiebedarf bei allen vier Varianten bei den Zugarbeiten am höchsten ist, gefolgt von den Zapfwellenarbeiten und den gemischten Arbeiten. Bei allen Feldarbeiten zeigt sich, dass Variante 1 den höchsten Energiebedarf aufweist und Variante 4 den niedrigsten. Die Ausnahme bilden die Zapfwellenarbeiten, bei denen Variante 2 den geringsten Energiebedarf aufweist. Die Verbesserung des Energiebedarfs von der jeweils schlechtesten Variante zur besten Variante beträgt bei den Zugarbeiten 3,3 %, bei den Zapfwellenarbeiten 1,6 % und bei den gemischten Arbeiten 3,1 %. Damit ergibt sich im Durchschnitt über alle betrachteten Feldarbeiten eine Verringerung des Energiebedarfs von der schlechtesten zur besten Variante um 2,4 %.

Da es sehr aufwendig ist, die Masse des gesamten Antriebsstrangs bzw. Fahrzeugs abzuschätzen, werden nur die Massen der benötigten Batterien, Inverter und Motoren gegenübergestellt. Die Massen der Inverter und Motoren wurden ebenfalls mithilfe der ANTRIEBSSTRANGSYNTHESE von IAV ermittelt. Die Massen der Getriebe konnten im Rahmen des Umfangs dieser Arbeit nicht ermittelt werden, da hierfür eine detaillierte Ausgestaltung des Getriebes notwendig ist.

Die Ermittlung der Batteriemasse (Annahme: 150 Wh/kg auf Systemebene) ergibt, dass das Gewicht für eine Batterie, welche einen achtstündigen Arbeitstag abdeckt, zu hoch ist, da dieses bereits 85 % eines vergleichbaren Dieseltraktors beträgt. Daher wird die Masse für eine vierstündige Betriebsdauer ermittelt, wobei der Energiebedarf für die Zugarbeiten der jeweiligen Variante als Grundlage dient, da dieser größer ist als der Energiebedarf der übrigen Feldarbeiten.

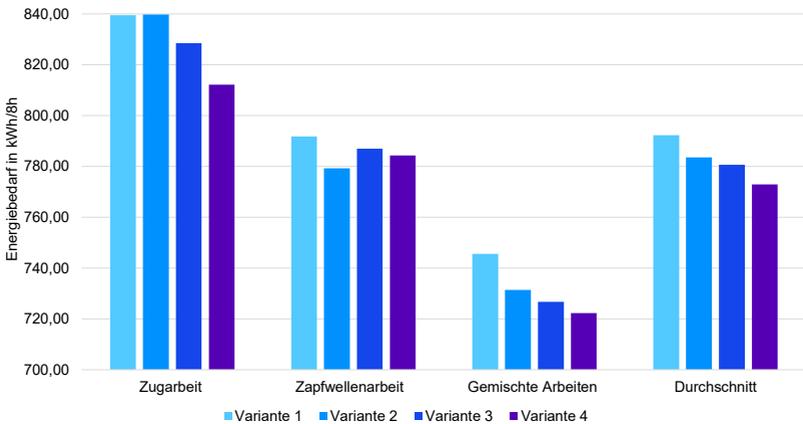


Abbildung 4.1: Energiebedarf der untersuchten Antriebsstrangvarianten bei unterschiedlichen Feldarbeiten

In Bezug auf die Massen für Motoren und Inverter lässt sich feststellen, dass diese von Variante 1, welche lediglich über einen Motor und Inverter verfügt, über Variante 2 und 3, die jeweils zwei Motoren und zwei Inverter aufweisen, bis hin zu Variante 4 mit vier Motoren und vier Invertern ansteigen. Infolge des geringsten Energiebedarfs weist das Batteriegewicht bei Variante 4 den geringsten Wert auf. Obgleich die höchsten Massen für Inverter und Motoren zu verzeichnen sind, weist Variante 4 das geringste Gesamtgewicht der betrachteten Komponenten auf. Im Anschluss folgen die Varianten 3 und 1, deren Gewichte für die betrachteten Komponenten des Antriebsstrangs sich auf einem ähnlichen Niveau befinden. Das größte Gewicht weist Variante 2 auf. Der Gewichtsunterschied zwischen den Varianten beträgt insgesamt maximal 2,4 %.

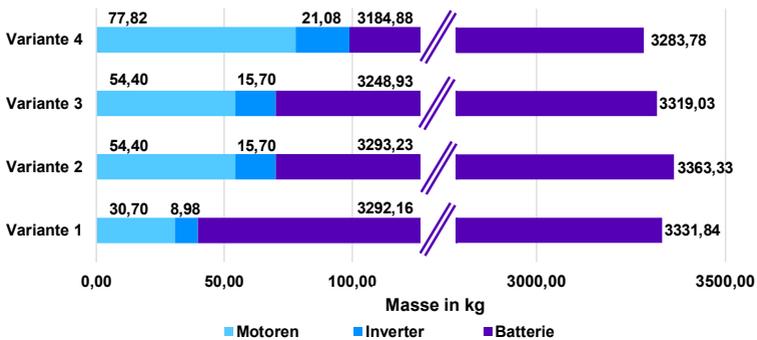


Abbildung 4.2: Massen für die vier betrachteten Antriebsstrangvarianten

Für die Kostenbetrachtung werden ebenfalls die Kosten für Batterien (Annahme: 200 €/kWh), Motoren und Inverter berücksichtigt. Zusätzlich werden die Kosten für die einzelnen Komponenten des Getriebes analysiert, wobei nur die Komponenten betrachtet werden, die nicht in jeder Variante vorkommen. Beispielsweise wird der Endantrieb, der in jeder Variante identisch ist, nicht berücksichtigt. Die Kosten für die Motoren, Inverter und

Getriebe der einzelnen Varianten beziehungsweise die Differenzkosten zwischen den Getrieben der einzelnen Varianten wurden ebenfalls mithilfe der ANTRIEBSSTRANGSYNTHESE ermittelt.

In Bezug auf die Kosten für Motoren und Inverter lässt sich feststellen, dass diese bei Variante 1 am geringsten sind, da diese lediglich über einen Motor und einen Inverter verfügt. Die nächsthöheren Kosten für Motoren und Inverter fallen bei den Varianten 2 und 3 an, welche jeweils zwei Motoren und zwei Inverter aufweisen. Die höchsten Kosten für Motoren und Inverter entstehen bei Variante 4, die über vier Motoren und vier Inverter verfügt.

Bei der Betrachtung der Getriebekosten zeigt sich ein gegenläufiger Trend: Die Kosten sind bei Variante 4 am geringsten, gefolgt von Variante 3, dann Variante 2 und am höchsten bei Variante 1. Dies lässt sich hauptsächlich durch die steigende Anzahl der Teile erklären.

Des Weiteren lässt sich erkennen, dass die Batterie den stärksten Einfluss auf die Kosten ausübt. Die Gesamtkosten aller betrachteten Komponenten fallen bei Variante 4 am niedrigsten aus. Die nächsthöheren Kosten sind bei Variante 3 zu verzeichnen, gefolgt von Variante 1. Die höchsten Gesamtkosten aller betrachteten Komponenten weist Variante 2 auf. Der Unterschied zwischen der günstigsten und der teuersten Variante beträgt lediglich 3 %.

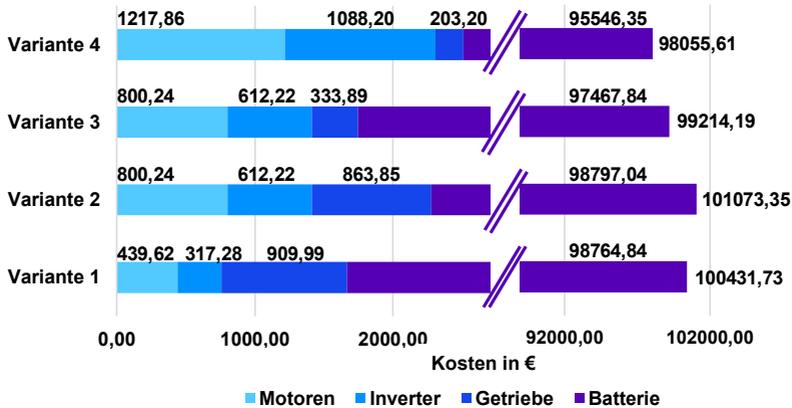


Abbildung 4.3: Kosten für die vier betrachteten Antriebsstrangvarianten

Es kann festgehalten werden, dass die vier betrachteten Varianten in Bezug auf Effizienz, Kosten und Masse sehr ähnliche Resultate aufweisen. Die Differenz zwischen der jeweils am besten und der schlechtesten bewerteten Variante beträgt 2,4 % hinsichtlich der Effizienz, ebenfalls 2,4 % bezüglich der Masse und 3 % bezüglich der Kosten. Die geringen Differenzen lassen den Schluss zu, dass alle Varianten als relativ ausgewogen zu betrachten sind. Die Analyse offenbart, dass Variante 4 zwar als die beste der entwickelten Lösungen zu betrachten ist, die übrigen Varianten jedoch ebenfalls überzeugende Resultate liefern und in spezifischen Kontexten konkurrenzfähig sein können. Bei der Entscheidung für eine bestimmte Variante sollten daher auch spezifische Projektanforderungen und individuelle Prioritäten berücksichtigt werden.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Die durchgeführten Simulationen zeigen, dass die Unterschiede zwischen den vier betrachteten Antriebsstrang-Varianten in Bezug auf Effizienz,

Kosten und Masse weniger als drei Prozent betragen. Dies lässt den Schluss zu, dass alle Varianten als relativ ausgewogen zu bewerten sind.

Es konnte festgestellt werden, dass das Gewicht der Batterie derzeit eine erhebliche Einschränkung darstellt. Demgemäß wurde eine maximale Einsatzdauer der Batterie von vier Stunden festgelegt. Aufgrund der fehlenden Lademöglichkeiten im Feld sowie der nicht flächendeckenden Verfügbarkeit von Schnellladesäulen ist die Einplanung von langen Ladezeiten oder Wechselakkus erforderlich. Bei leichteren Feldarbeiten könnte die Batteriekapazität jedoch einen ganzen Arbeitstag lang ausreichen.

Gegenwärtig weisen aktuelle Zellen für Lithium-Ionen-Batterien eine Energiedichte von bis zu 280 Wh/kg auf, während erste Prototypen zukünftiger Lithium-Ionen-Batterien bereits eine Energiedichte von bis zu 600 Wh/kg erreichen. Es ist zu erwarten, dass sowohl Feststoffbatterien als auch Weiterentwicklungen der Lithium-Ionen-Batterien eine Energiedichte von bis zu 1000 Wh/kg erreichen werden. Unter Berücksichtigung der beschriebenen technologischen Fortschritte wird angenommen, dass Traktoren mit Lithium-Ionen- oder Feststoffbatterien in zehn Jahren eine achtstündige Feldarbeit bewältigen können. [18 - 21]

## Literatur

- [1] agrarheute: "Prototyp Sesam: Der vollelektrische Traktor von John Deere". <https://www.agrarheute.com/technik/prototyp-sesam-vollelektrische-traktor-john-deere-529512>, Zuletzt geprüft am: 26.07.2024.
- [2] AGCO Fendt: "Fendt e100 V Vario: Zukunft der Landwirtschaft". <https://www.fendt.com/de/landmaschinen/traktoren/fendt-e100-v-vario>, Zuletzt geprüft am: 26.07.2024.

- [3] Böhrens, A.: "Neuer 100-kW-Elektro-Traktor von Tadás".  
<https://www.profi.de/aktuell/aktuelle-meldungen/neuer-100-kw-elektro-traktor-von-tadas-31143.html>, Zuletzt geprüft am: 29.07.2024.
- [4] Böhrens, A.: "Neuer E-Traktor aus Frankreich". "Das französische Startup Seederal hat einen Prototyp eines Elektrotraktors vorgestellt.". <https://www.profi.de/aktuell/aktuelle-meldungen/neuer-e-traktor-aus-frankreich-31796.html>, Zuletzt geprüft am: 27.08.2024.
- [5] Feuerborn, B.: "Allgäuer Start-Up baut futuristischen Elektro-Traktor mit Wechselakku".  
<https://www.agrarheute.com/technik/traktoren/allgaeuer-start-up-baut-futuristischen-elektro-traktor-wechselakku-615598>, Zuletzt geprüft am: 29.07.2024.
- [6] Göggerle, T.: "Sepp Knüsel baut elektrisch angetriebenen Rigitrac".  
<https://www.agrarheute.com/technik/traktoren/Traktor-Rigitrac-elektrischer-Antrieb-550945>, Zuletzt geprüft am: 29.07.2024.
- [7] Göggerle, T.: "John Deere: vollelektrischer Traktor soll 2026 kommen". <https://www.agrarheute.com/technik/traktoren/john-deere-vollelektrischer-traktor-2026-kommen-605742>, Zuletzt geprüft am: 29.07.2024.
- [8] Göggerle, T.: "Landtechnik-Baukasten für Elektro-Traktoren".  
<https://www.agrarheute.com/technik/traktoren/landtechnik-baukasten-fuer-elektro-traktoren-616819>, Zuletzt geprüft am: 29.07.2024.
- [9] Göggerle, T.: "Elektrischer Fendt 700 Vario: 205 PS-Elektro-Traktor, wie geht das?".  
<https://www.agrarheute.com/technik/traktoren/elektrischer-fendt-700-vario-elektrotraktor-205-ps-geht-617529%3Fid%3D617562>,  
Zuletzt geprüft am: 10.12.2024.

- [10] Monarch Tractor: "MK-V an Autonomous Electric Tractor | Monarch Tractor". <https://www.monarchtractor.com/mk-v-electric-tractor>, Zuletzt geprüft am: 29.07.2024.
- [11] New Holland Agriculture a brand of CNH Industrial N.V.: "New Holland präsentiert auf der Agritechnica 2023 den T4 Electric Power | New Holland DE". <https://agriculture.newholland.com/de-de/europe/die-new-holland-welt/news/2023/new-holland-praesentier-auf-der-agritechnica-2023-den-t4-electric-power>, Zuletzt geprüft am: 29.07.2024.
- [12] Rigitrac Traktorenbau AG: "RIGITRAC SKE 40". <https://www.hissink-oeken.nl/downloads/de-rigitrac-ske-40.pdf>, Zuletzt geprüft am: 29.07.2024.
- [13] Tractorgyan: "T3 Electric Power: New Holland's Recently Launched 100% Electric Tractor". <https://tractorgyan.com/tractor-industry-news-blogs/1393/t3-electric-power-new-hollands-recently-launched-100-percent-electric-tractor>, Zuletzt geprüft am: 29.07.2024.
- [14] Willems, S.; Himmelsbach, R.; Igl, S. Hrsg.: "Electric powertrain solutions for tractors - An introduction to a highly integrated electric axle drive system" in LAND.TECHNIK AgEng 2023. VDI Bericht Nr. 2427, Düsseldorf, 2023.
- [15] Bundesinformationszentrum Landwirtschaft: "Warum werden Landmaschinen immer größer?". <https://www.landwirtschaft.de/wirtschaft/beruf-und-betrieb/betrieb-und-technik/warum-werden-landmaschinen-immer-groesser>, 12.11.2024.
- [16] Göggerle, T.: "Traktoren mit 50 oder 300 PS: Was Landwirte aktuell kaufen, überrascht". <https://www.agrarheute.com/technik/traktoren/traktoren-50-300-ps-landwirte-aktuell-kaufen-ueberrascht-616905>, 12.11.2024.

- [17] Wukisiewitsch, W.; Danzer, C.; Semper, T.: "Systematische Entwicklung nachhaltiger Antriebe für das Jahr 2030 und darüber hinaus". In MTZ, Heft 02, 2020, 81; S. 30–37.
- [18] Messe München GmbH: "Festkörperbatterie: Der heilige Gral der Batterie-forschung | electronica".  
<https://electronica.de/de/entdecken/branchenportal/detail/festkoerperbatterie-der-heilige-gral-der-batterie-forschung.html>, Zuletzt geprüft am: 09.12.2024.
- [19] Köllner, C.: "Was macht Natrium-Ionen-Batterien so interessant?".  
<https://www.springerprofessional.de/batterie/energiespeicher/was-macht-natrium-ionen-batterien-so-interessant-/26150338>, Zuletzt geprüft am: 09.12.2024.
- [20] Wunderlich-Pfeiffer, F.: "Wie ein Akku über 700 Wh/kg erreicht hat".  
<https://www.golem.de/news/energiedichte-wie-ein-akku-ueber-700-wh-kg-erreicht-hat-2305-174255.html>, Zuletzt geprüft am: 09.12.2024.
- [21] EnBW Energie Baden-Württemberg AG: "Natrium-Ionen-Akkus: Günstiger und sicherer?".  
<https://www.enbw.com/blog/elektromobilitaet/laden/natrium-ionen-akku-was-macht-die-technologie-so-interessant/>, Zuletzt geprüft am: 09.12.2024.

# Simulative investigation of an electric drivetrain for tractors using real load cycles

*Korbinian Götz<sup>1</sup>, Simon Mailhammer<sup>1</sup>, Lukas Mayr<sup>1</sup>, Johannes Ettl<sup>2</sup>, and Markus Lienkamp<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup>Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München (TUM)*

*<sup>2</sup>Technologie und Förderzentrum Straubing (TFZ)*

## Abstract

The electrification of tractors offers the potential to increase the degree of self-supply of energy produced on the farm and to reduce the operating costs of tractors. However, electric tractors encounter the challenge of higher upfront costs than their diesel counterparts, as well as limited operating time. To reduce operating costs and maximize the use of installed energy capacity, the drivetrain must provide high levels of efficiency across a wide range of agricultural applications with a minimum of components. To enable the design of highly efficient drivetrains, we propose a quasi-static longitudinal dynamics simulation with real-world load cycles. Our investigation focuses on an axle individual drivetrain topology (eAxle) as the most promising trade-off between efficiency and complexity.

Our simulation includes the design parameters of the individual components, such as the inverter, motor, and transmission, which are varied based on the load. The results show the influence of different motor transmission combinations for different work cycles and serve as a design aid for future tractor concepts.

**Keywords:** electric tractor, agricultural load cycles, optimization

# 1 Introduction

## 1.1 Motivation

Germany's agriculture requires approximately 2 billion liters of diesel yearly to power farm machinery for food production [1]. To substitute at least part of the diesel consumption and reduce the associated emissions, the electrification of tractor powertrains is a promising solution, particularly with the advances in the automotive sector [2]. However, experience from the automotive sector and first series tractors, for instance, the Fendt e100, shows a significant rise in upfront costs compared to diesel tractors. Currently, an electric tractor acquisition costs between 60 to 70 % more than a comparable machine with an Internal Combustion Engine (ICE) [3]. To enable the widespread adoption of the new technology, electric tractors must become competitive with diesel tractors. Hence, achieving cost parity with diesel tractors is a must. The main lever for lower total cost of ownership lies in lower operating costs. In addition to the low operating and maintenance costs, the advantage of locally emission-free and low-noise operation in stables and buildings comes into play in agriculture.

There are two key aspects to achieving lower operating costs: (1) the fact that electric tractors allow the farmer to use self-produced renewable energy from photovoltaic, biogas, or wind, thereby reducing energy costs, and (2) the significantly higher efficiency of the electric powertrain which needs less energy input to achieve the same energy output as an ICE. Additionally, the limited battery capacity enforces the need for an efficient use of installed energy.

This publication aims to provide a design aid for electric powertrains by presenting a methodology for the simulation and design of axle-specific powertrains (eAxles) for tractors based on real agricultural load cycles.

## 1.2 State of the art

While extensive studies have been carried out for road vehicles in which electric powertrains have been examined about topology [4–8], component types, and dimensioning, comparable research for off-road vehicles is limited. Several authors investigate how hybrid drives improve efficiency [9–11]. Lajunen et al. [8] extend this comparison by evaluating a battery-electric drivetrain with a three-speed gearbox alongside conventional, hybrid, and fuel-cell tractor options.

Opgenoorth et al. [12] focused on the complexity of pure electric powertrains, outlining an automated methodology for drivetrain design, whereas Serrao [13] proposed the listed topologies in Figure 1 as relevant for the off-highway industry. Recent research primarily looked into wheel-individual motors [14–16] or addressed central motor concepts [17, 18].

The advent of electric tractors is shown through various industry concepts (e.g. John Deere SESAM, New Holland T4 electric, Tafe E30, Volkswagen Gen.Farm), new startups (Tadus Tractors, Monarch, Onox), as well as first series production, e.g., the Fendt e100, Rigitrac SKE40, and the Monarch MKV.

With the new design freedom established through the electric powertrain, also industrial manufacturers pursue different tracks: Figure 1 shows the current concepts in the industry. Established manufacturers such as Fendt and CNH access their current platform and transmission by replacing the diesel engine with one central electric motor, exploiting the current platform and keeping uncertainties of the new technology low [19, 20]. The

Fendt e100 comes with its standard CVT transmission whereas the New Holland T4 electric contains a twelve-gear power shuttle transmission.

On the contrary, Rigitrac showed in a study a completely dissolved drivetrain, exploiting the design freedom of electric drivetrains by powering each wheel individually and enabling the highest tractive efficiency for each wheel [21]. As a tradeoff between drivetrain complexity and drivetrain design utilization, the Todus and Onox concepts presented at Agritechnica 2023 and the commercially available tractor SKE 40 from Rigitrac, power each axle individually with an electric motor and a single-speed gearbox [22–24]. To reach the power and maximum speed, the motors tend to be significantly oversized if just coupled with a single-speed gearbox.

According to the investigation of Serrao [13], which states that the axle-individual topology offers the highest utility level for the off-highway industry and the interest of new incumbents in the tractor market pursuing this topology, our research focuses on the axle-individual topology.

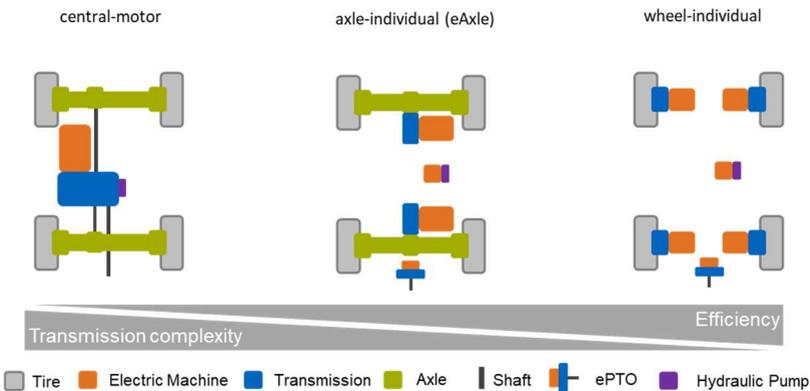


Figure 1: Main topologies for off-highway electrification in series production and industry concepts.

## 2 Methodology

The aim of this investigation is to take a system perspective on the drivetrain and to show the overall system relationships between the individual components and the influence of their combination on the axle-individual drivetrain.

Figure 2 shows our methodology to simulate the axle-individual electric drivetrain according to real-world load cycles. Load cycles are crucial to derive the requirements for the powertrain and the main input to every powertrain simulation. Unlike on-road vehicles, which have publicly accessible, standardized driving cycles, agricultural operations lack such resources. Existing cycles, like the OECD Tractor Code 2 or the NRSC and NRTC, are designed for diesel engines and cannot be directly applied. While DLG cycles could be a potential solution, they are not publicly available. As a result, we adapt the load cycles of Ettl et al. [25] for our purpose. These load cycles reflect the characteristics of the load requirements for specific implements from recorded field work without considering transient behavior due to idling which is also dependent on the power class of the tractor.

For our analysis of a 50 kW class electric tractor, we use load cycles of mowing, seeding, power harrowing, and transport operation. The load is scaled to a maximum system power of 50 kW, and split into the driving task and the PTO. The solution space contains all simulated drivetrain configurations for the axle-individual topology, including discrete sizing steps for the components of the inverter, motor, multi-speed transmission, and final drive. The simulation applies all duty cycles and evaluates them in their efficiency and energy consumption.

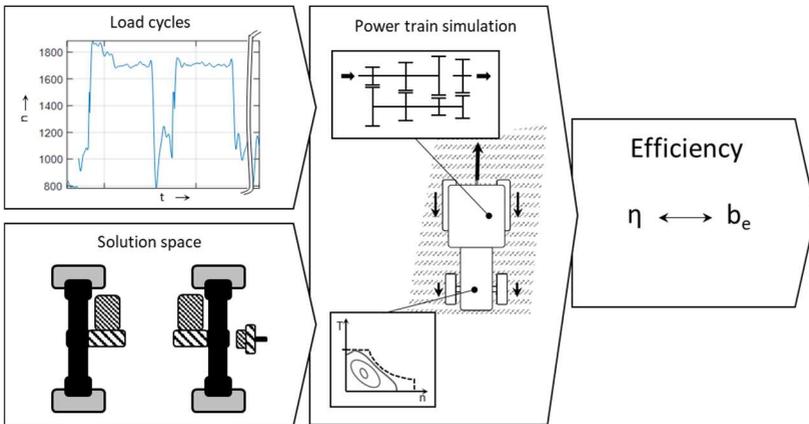


Figure 2: Methodology to evaluate an axle-individual powertrain topology for agricultural load cycles.

## 2.1 Derivation of load cycles based on real-world data

The load cycles for the simulation must represent typical driving situations that the electric tractor should be able to cope with. Due to the fact that there is no representative load cycle for electric tractors available, we base our simulation on the demand of the implements, as they generally determine the power necessary to power the traction drive, the PTO, and the speed. Part of our simulation is the transport, mowing, seeding, and power-harrowing cycle. The original data was recorded by Ettl et al. [25] in more than 200 hours with a diesel tractor of 130 kW (Fendt 718 Vario) and then composed to load cycles reflecting real-world agricultural operations in their system power demand and characteristics.

Since we want to derive the drivetrain for an electric tractor with maximum  $P_{target} = 50$  kW, a scaling of the power values is necessary to make them transferable to our considered power level. If the necessary implement power is scaled, hence, the size of the implement which is reflected in the scaled cycle also changes in its width  $w_{scaled}$ :

$$P_{cycle}(t) = \frac{T_{eng}(t)2\pi n_{eng}}{P_{max,drive\&PTO}} * P_{target} \quad w_{scaled} = \frac{P_{target}}{P_{max,drive\&PTO}} * w_{orig} \quad (1)$$

with the demanded engine torque  $T_{eng}$  and rotational speed  $n_{eng}$ , and the implement width in the recordings  $w_{orig}$ . The recorded torque contains the demand necessary for the driving task, and PTO, but also losses in the diesel powertrain and auxiliary drives such as hydraulics, air conditioning, etc. To remove the influence of all auxiliaries except the traction drive and PTO, considered in this work, the power demand is normalized by the maximum available power for the driving and PTO task of  $P_{max,drive\&PTO} = 93.7$  kW, which was derived experimentally by Ettl et al. [25]. Due to the design of experiment, losses from the diesel powertrain to the PTO are still included.

The load cycles do not allow to distinguish between the necessary power demand for the traction drive and the PTO ( $P_{cycle} = P_{drive} + P_{PTO}$ ), hence, we consider a constant share of the provided power for the PTO according to the experimental sources in Table 1:

$$T_{PTO} = \frac{P_{cycle} * \gamma}{2\pi n_{PTO}} \quad (2)$$

Table 1: PTO parameters and their sources

Implement	Share $\gamma$	Source
Mower	0.553	[26]
Power harrow	0.635	[27]
Seeder	0.159	[27]

With the PTO power determined, the remaining power is available for the traction drive. However, the remaining power  $P_{drive}$  still includes the efficiencies of the diesel drivetrain of the recorded tractor. To provide applicability for electric drivetrains, we calculate the actual necessary traction power  $P_{traction}$  by considering the losses of the drivetrain during the record-

ings from the diesel tractor. The actual available traction power  $P_{traction}$  is derived from the provided drive power  $P_{drive}$  with an assumed efficiency of  $\eta_{TM} = 90 \%$ , to avoid any pro electric bias.

$$P_{traction} = P_{drive} \eta_{TM} \quad (3)$$

Then we derive the net implement draft force with the actual traction power and the recorded front axle speed:

$$F_{draft} = \frac{P_{traction}}{v_{frontaxle}} \quad (4)$$

Forces below  $v = 0.6 \text{ km/h}$  and above the maximum transmittable tire force are removed.

Figure 3 shows the distribution and frequency of the total draft force  $F_{draft}$  for the considered duty cycles from Ettl et al. [25]. It becomes evident that the load differs significantly between the load cycles, highlighting that (1) agricultural loads are diverse, which must be addressed with the design flexibility of electric powertrains, and (2) a system perspective from the loads to the individual component is necessary.

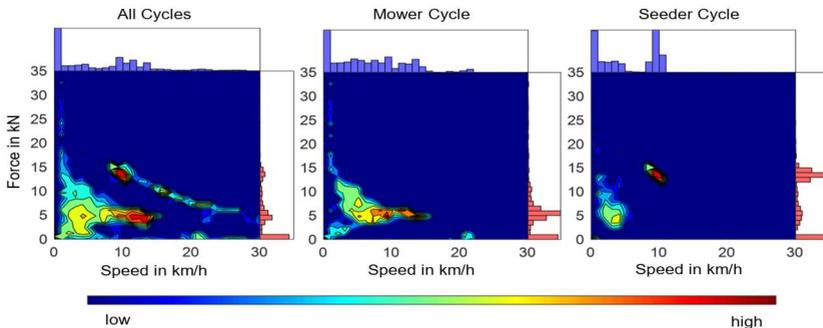


Figure 3: Distribution and frequency of the load points (draft force and tractor speed) for the considered load cycles from Ettl et al. [25].

## 2.2 Solution space

To provide a system perspective, our simulation includes a solution space with different hierarchies of variation for the axle-individual drivetrain. The quasi-static simulation includes then all combinations of the solution space and derives the efficiency for every load point from the previously determined duty cycles. The simulation focuses on the traction drive of the system without PTO.

Table 2 shows the discrete variations of the solution space considered in this simulation. Our quasi-static simulation differs the driven axle for the axle-individual topology, the component characteristic of the electric motor (permanent magnetic synchronous machine/induction machine), and the number of gears. The solution space includes additionally the components varied in their dimension, allowing for the most beneficial combination of inverter, motor, and transmission to enable an overall system assessment and not just the optimization of single components. The simulation allows for a significant oversizing of the components up to three times the tractor power to enable also single-gear motor transmission combinations to fulfill the requirements.

Table 2: Solution space for the different variation levels

Level	Parameter	Parameter characteristic	Number of variants
Topology	Architecture	axle-individual	1
Topology	Driven axles	4WD	1
Component type	EM type	PSM, IM	2
Component type	Transmission: number of gears	1,2,3	3
Component size	Power rear axle	40 - 150 kW in steps of 5 kW	144

Component size	Power front axle	0 - 75 kW in steps of 5 kW	
Component size	Gear step	1.3, 1.7, 2.1, 2.5	4

The components of the inverter and electric motor are sized according to the load with standard efficiency maps, reflecting the characteristic of standard automotive components as the IGBT inverter from Pathak et al. [28], a permanent magnet synchronous machine (PSM) from the VW ID.3 [29], and an Induction machine (IM) from MDL Ltd. [30]. To simulate different power levels, the efficiency maps for the components are fitted in their torque delivery to fit the power requirement.

The transmission is designed to include spur gears with two axle-parallel shafts, including the option of one, two, or three gears, depending on the necessary gear ratio. The maximum necessary gear ratio is specified by the maximum speed of the tractor, in this case 40 km/h, in combination with the gear ratio of the differential  $i_{diff} = 4$  and the final drive  $i_{FD} = 7$ . In case of more than one speed for the transmission, the gear step determines the ratios of the other gears. The transmission efficiency map, which we calculate according to the methodology of Pathak et al. [28], is dependent on the geometry of the gear wheels, the number of transmission speeds, the input speed, and the torque. The simulation accounts for a shifting algorithm that chooses the gear with the highest efficiency. A hysteresis between the gears is introduced to prevent high shifting frequencies and ambiguities.

### 2.3 Quasi-static simulation for tractor drive modeling

The quasi-static simulation applies the duty cycle to each powertrain configuration from the solution space by expressing the load in torque and rotational speed values at the wheel hubs. The powertrain is simulated for every timestep with every load point running through the established component chain and calculating the efficiencies and energy consumptions. As every

load point is treated individually, our simulation is quasi-static, not including acceleration of the tractor itself; nevertheless, acceleration is already contained in the originally recorded tractor data.

We assume that the tire-soil interaction of the recorded diesel tractor and the simulated electric tractor are the same and equal wheel hub torques are necessary. We account for the multipass effect of the rear axle according to Renius [31] with  $(\kappa_f + \rho_f) = (\kappa_r + \rho_r)$  and assume a constant rolling resistance efficiency:

$$\eta_{\rho,4WD} = \frac{\kappa_r \lambda F_W + \kappa_f (1 - \lambda) F_W}{\kappa_r \lambda F_W + \kappa_f (1 - \lambda) F_W + \rho_f (1 - \lambda) F_W + \rho_r \lambda F_W} = 0.848$$

with  $\kappa_f = 0.4$  and  $\rho_f = 0.1$ .

The torque for the front ( $T_r$ ) and rear axle ( $T_f$ ) are applied in the simulation according to the wheel load distribution  $\lambda = 0.6$  and the original tire dimensions from the recorded tractor by the following formulas. In the case of the recorded data, 65.8 % of the draft force needs to be transmitted by the rear axle due to the weight distribution and tire sizes:

$$T_r(t) = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{1}{\frac{F_{W,f} \cdot r_f}{F_{W,r} \cdot r_r} + 1} \right) \cdot \frac{d_{Tire,r}}{2} \cdot F_{draft}(t) \quad (5)$$

$$T_f(t) = \frac{1}{2} \cdot \left( 1 - \frac{1}{\frac{F_{W,f} \cdot r_f}{F_{W,r} \cdot r_r} + 1} \right) \cdot \frac{d_{Tire,f}}{2} \cdot F_{draft}(t) \quad (6)$$

By applying the loads to each variant from the solution space, the efficiency and energy consumption are determined in every timestep. The mean efficiency of a configuration for each working cycle is calculated by weighting the efficiency according to the current load consumption as follows for every timestep  $i$ :

$$\eta_{mean} = \frac{E_{out}}{E_{in}} = \frac{\sum_{i=1}^N \eta_i \cdot P_{i,cycle}}{\sum_{i=1}^N P_{i,cycle}}, \text{ where } \eta_{powertrain} > 0 \quad (7)$$

### 3 Results

The results from the simulation reveal not just the drivetrain with the highest efficiency, but especially the role of a well-tuned motor transmission configuration.

#### System configuration with the highest efficiencies

The quasi-static longitudinal dynamics simulation reveals the combination with the highest efficiency through all load cycles: The optimal axle-individual drivetrain is a combination of two PSM motors, one at the front (25 kW) and one at the rear axle (45 kW), each of them with a two-gear transmission with a gear step of 2.1. The simulated drivetrain ensures efficiencies on average of 82.1 % with the varying loads from all cycles. Figure 4 shows the final results for the most efficient powertrain with the overall efficiency map. The drivetrain can reach a maximum efficiency of 85.6 % with the two-gear transmission with a tractive force of up to 23.4 kN at the rear wheels and a maximum speed of 40 km/h. The load points are shown exemplary for the transport cycle.

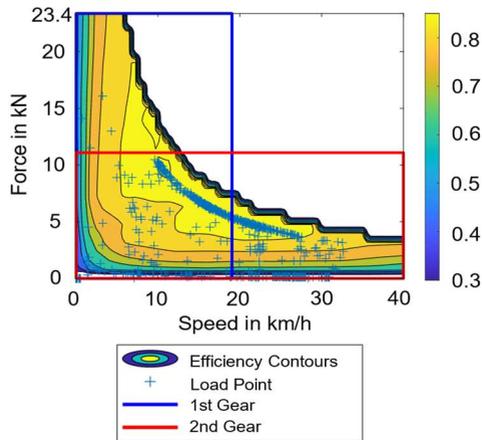


Figure 4: Load points and efficiency map at the rear axle in the transport cycle

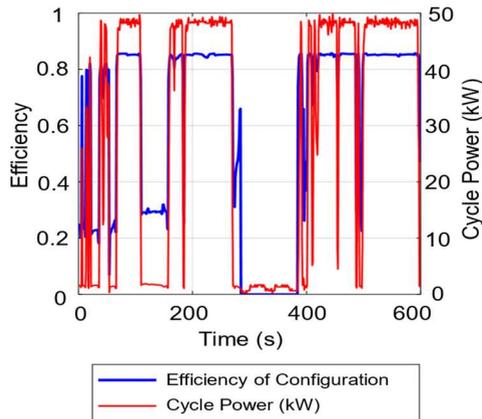


Figure 5: Efficiency and power over time in the transport cycle

Figure 5 depicts the transport cycle with its power requirements and the achievable efficiency of the drivetrain in each time step. The powertrain is optimized to achieve high efficiencies in regions of high load requirements. Despite the diversity of the considered agricultural load cycles, the proposed configuration enables efficiencies from 80.5 to 84.4 % for all agricultural operations, as shown in Table 3.

Table 3: Most efficient powertrain configurations for the simulated duty cycles

Drivetrain	Gears	Motor Type	Rear Motor (kW)	Front Motor (kW)	Gear Step	Load Cycle	Efficiency
<b>Most efficient drivetrain</b>	2	PSM	45	25	2.1	All operations	82.1 %
						Transport	82.8 %
						Mower	80.9 %
						Power harrow	80.5 %
						Seeder	84.4 %
<b>Reference drivetrain (single-gear)</b>	1	PSM	85	45	-	All operations	79.2 %
						Transport	80.4 %
						Mower	76.6 %
						Power harrow	76.1 %
						Seeder	83.9 %

When comparing the most efficient drivetrain to a reference drivetrain, with only a single gear, the diversity of the load cycles becomes apparent (Table 3 and Figure 4). Figure 6 shows the efficiencies for the individual load cycles of the most efficient overall drivetrain and compares it to the reference drivetrain from Table 3. The single-gear configuration of the reference drivetrain performs worse in every cycle: To provide the large variation of load points, which demand the maximum power at speeds between 5-12 km/h and still reach the maximum speed of 40 km/h, either at least two gears must be provided, or the motor must be significantly oversized, leading to the exploitation of inefficient load points. Depending on the cycle, the optimized configuration with two gears reaches a 4.3 % higher efficiency. For cycles with less variable load and medium power demand as the seeder cycle, the deviation is 0.5 %. To conclude, a multiple-speed transmission enables a 3 % higher efficiency on average.

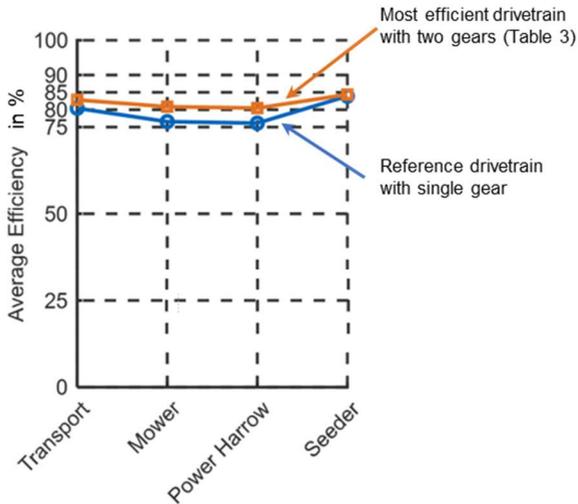


Figure 6: Efficiencies of the most efficient drivetrain from Table 3 compared to the reference drivetrain.

### Interrelation of engine and transmission combination

To show the impact of a well-tuned configuration of motor and transmission for efficient drivetrains, Figure 7 illustrates the interrelation of motor power and the number of gears: While the power requirement of the power harrow cycle can be fulfilled with a single gear and a combined motor power higher than 55 kW due to lower speed and torque requirements, a configuration capable of handling all four working cycles with just one single gear requires a combined motor power of at least 130 kW.

However, a third gear does not lead to a significant further reduction of motor power. This highlights the significance of the system perspective on the drivetrain, accounting for the combination of motor and transmission. As a design criterion, oversizing the motors by a factor of 1.9 compensates for the lack of second gear at an average efficiency loss of 2.9 %.

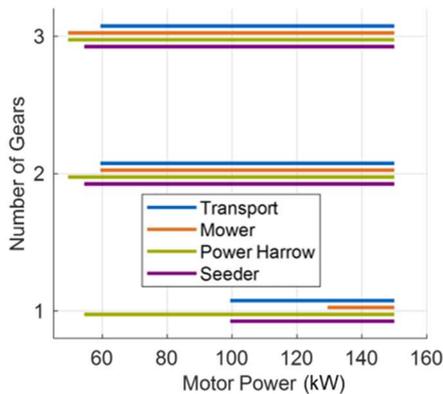


Figure 7: Possible motor-transmission combinations that can fulfill the load requirements of the different cycles.

## 4 Discussion

The basis for designing suitable drivetrain configurations is the availability of load cycles, that suit as a requirement space. Due to the lack of open-source real-world data, this publication uses the initial data of the load cycles from Ettl et al. [25], who describe the creation of the load cycle in their publication. The main shortcoming of the load cycles is the missing information on the timeshares of the different implement works, which can differ heavily depending on the farm and region. Angelucci and Mattetti [32] state that the main shortcoming of the current load cycles is the missing transient behavior as idling during setup times, which is a major motivation for electric drivetrains but not considered in this publication. Furthermore, Ettl et al. [25] argue that the soil type, field conditions, and the influence of the used tractor, for instance, its axle load distribution, has a large impact on the load cycles and on our simulation. Due to the missing knowledge of these parameters, we assume a fixed distribution of load between the front and rear

axle, as done similarly by Mattetti et al. [33], and constant rolling resistance and tractive efficiency, which is in accordance with Lagnelöv et al. [34]. Due to the lack of the recording of the PTO power, we assume constant shares according to literature which might not perfectly depict reality. The applicability of our methodology allows for future adjustment as soon as more precise data becomes available.

Due to the aim of investigating the optimal drivetrain configuration, the power levels of the electric motors on the front axle and rear axle are varied from 0-150 kW. By that, we ensure that also single-gear drivetrain configurations become feasible, which is done, for instance, by Tadus in practice as well. The variation in motor power necessitates the scaling of the efficiency maps of the electric inverters and motors suiting as a design aid; however, to derive a product, the actual efficiency maps of the used inverters and motors must be included.

## 5 Conclusion

The advent of electric tractors enables farmers to reduce the carbon footprint of their machinery and operate on self-produced renewable energy. However, battery electric tractors have significantly higher upfront costs than diesel tractors. Electrified powertrains must be developed based on real agricultural duty cycles to ensure lower operational costs to amortize the higher one-time costs. This publication aims to exploit design freedom and give a design aid for powertrain configuration for electric tractors using real-world load cycles.

Due to the diversity of tractor operations, agricultural loads vary significantly. In the absence of a unified agricultural load cycle applicable to our purpose, we show scalable load cycles for the applications of mowing, seeding, power harrowing, and transport, which differ significantly in their load characteristics. Our powertrain solution provides a solution space for an axle-individual configuration, including scalable components for the invert-

er, motor, and transmission. In a quasi-static longitudinal dynamics simulation, the loads are applied for each powertrain configuration at the wheel hub and the average efficiency, weighted by power demand, is calculated. The interaction between tire and soil is assumed to be the same as in the recorded load cycle for the diesel tractor.

Thus, our powertrain simulation suits as a methodology to derive an anchor point for reasonable drivetrain configurations capable with the required load. The simulation can provide the most efficient axle-individual drivetrain for the given load cycles and components, showing achievable average efficiencies of 82.1 % for each load cycle. The simulation shows that the load cycles can be achieved with different motor and transmission configurations, for instance, a single-gear configuration and significant motor oversizing instead of two gears. However, the highest efficiencies are reached with the later. The results emphasize the importance of a holistic system approach to powertrain design for achieving an optimal configuration that exploits high power densities of the powertrain and efficiencies. For future research, the integration of additional agricultural load cycles with medium loads, as well as the savings due to the absence of idling with electric tractors, shall be considered.

## References

- [1] H. Eckel *et al.*, *Kraftstoffnutzung in der Landwirtschaft: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL)*. Darmstadt, 2020.
- [2] A. Lajunen, P. Sainio, L. Laurila, J. Pippuri-Mäkeläinen, and K. Tammi, "Overview of Powertrain Electrification and Future Scenarios for Non-Road Mobile Machinery," *Energies*, vol. 11, no. 5, p. 1184, 2018, doi: 10.3390/en11051184.
- [3] A. Haitsch, "Elektrische Landmaschinen: So fährt der Trecker der Zukunft," *DER SPIEGEL*, 11 Jan., 2024. Accessed: Oct. 23, 2024.

- [Online]. Available: <https://www.spiegel.de/auto/bauernproteste-traktoren-mit-elektroantrieb-wann-koennen-sie-diesel-ersetzen-a-e2ddf47e-c71c-4eeb-9824-cc3e5e906f14>
- [4] C. Angerer, "Antriebskonzept-Optimierung für batterieelektrische Allradfahrzeuge," (Dissertation), 2019.
- [5] F. Küçükay, T. Kassel, M. Eghtessad, and H. Kollmer, "Requirement Engineering Using the 3D Method," *The Automotive Research Association of India*, 2011, doi: 10.4271/2011-26-0012.
- [6] M. Tsochner, "Comparative Assessment of Vehicle Powertrain Concepts in the Early Development Phase," (Dissertation), 2018.
- [7] F. J. R. Verbruggen, E. Silvas, and T. Hofman, "Electric Powertrain Topology Analysis and Design for Heavy-Duty Trucks," *Energies*, vol. 13, no. 10, p. 2434, 2020. doi: 10.3390/en13102434. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/10/2434>
- [8] A. Lajunen, K. Kivekäs, V. Freyermuth, R. Vijayagopal, and N. Kim, "Simulation of Alternative Powertrains in Agricultural Tractors," *36th International Vehicle Symposium and Exhibition (EVS36), Sacramento, California, USA, June 11 - 14, 2023*, 2023. [Online]. Available: [https://evs36.com/wp-content/uploads/finalpapers/FinalPaper\\_Lajunen\\_Antti.pdf](https://evs36.com/wp-content/uploads/finalpapers/FinalPaper_Lajunen_Antti.pdf)
- [9] E. Scolaro, M. Beligoj, M. P. Estevez, L. Alberti, M. Renzi, and M. Mattetti, "Electrification of Agricultural Machinery: A Review," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 164520–164541, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3135037.
- [10] F. Mocera and A. Somà, "Analysis of a Parallel Hybrid Electric Tractor for Agricultural Applications," *Energies*, vol. 13, no. 12, p. 3055, 2020. doi: 10.3390/en13123055. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/12/3055>
- [11] D. Troncon and L. Alberti. "Duty Cycle of the Electric Motor Driving a Plant Lifting Plough in Pure Electric Mode.: Data Set." Accessed: Dec. 21, 2023. [Online]. Available: <https://docs.google.com/document/d/>

e/2PACX-1vTeL8ZezHadvITaSIYsj-SQduoc5RFFIFaGZkKHilpKgA-V\_  
vGmLYZqm2RXxWiyC\_D7AN6qnVyZGE8I/pub

- [12] A. Opgenoorth, R. Loewenherz, R. W. de Doncker, and K. Schmitz, "Untersuchung einer automatisierten Systemsynthese elektrifizierter mobiler Arbeitsmaschinen," in *Hybride und energieeffiziente Antriebe für mobile Arbeitsmaschinen: 9. Fachtagung, Karlsruhe, 28. Februar 2022* (Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik Band 106), A. Opgenoorth, R. Loewenherz, R. W. de Doncker and K. Schmitz, Ed., Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2023, pp. 49–71.
- [13] L. Serrao, "Driving the electric transformation: The evolution of off-highway powertrain," (VDI-Berichte Nr. 2402), 2022, doi: 10.51202/9783181024027-135.
- [14] T. Li, B. Xie, Z. Li, and J. Li, "Design and Optimization of a Dual-Input Coupling Powertrain System: A Case Study for Electric Tractors," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 5, p. 1608, 2020. doi: 10.3390/app10051608. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/5/1608>
- [15] Y. Chen, B. Xie, Y. Du, and E. Mao, "Powertrain parameter matching and optimal design of dual-motor driven electric tractor," *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, vol. 12, no. 1, pp. 33–41, 2019, doi: 10.25165/j.ijabe.20191201.3720.
- [16] Y. Tong, J. Zhang, L. Xu, and X. Yan, "Driving System Design and Power Source Parameter Optimization of Tractor with Dual-Motor Coupling Drive," *WEVJ*, vol. 14, no. 3, p. 63, 2023, doi: 10.3390/wevj14030063.
- [17] M. Liu, L. Xu, and Z. Zhou, "Design of a Load Torque Based Control Strategy for Improving Electric Tractor Motor Energy Conversion Efficiency," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2016, pp. 1–14, 2016, doi: 10.1155/2016/2548967.
- [18] C. R. Gade and R. S. Wahab, "Conceptual Framework for Modelling of an Electric Tractor and Its Performance Analysis Using a Permanent

- Magnet Synchronous Motor," *Sustainability*, vol. 15, no. 19, p. 14391, 2023, doi: 10.3390/su151914391.
- [19] S. Fries, "e100 - Vom Prototyp zur Serienreife," in *Hybride und energieeffiziente Antriebe für mobile Arbeitsmaschinen: 9. Fachtagung, Karlsruhe, 28. Februar 2022* (Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik Band 106), A. Opgenoorth, R. Loewenherz, R. W. de Doncker and K. Schmitz, Ed., Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2023, pp. 37–48.
- [20] Case IH. "Website Case Farmall Electric Tractor." Accessed: Nov. 4, 2024. [Online]. Available: <https://www.caseih.com/en-us/unitedstates/products/tractors/farmall-series/farmall-electric-tractor>
- [21] M. Geissler, T. Herlitzius, M. Lindner, and W. Aumer, "Elektrifizierter Radnabenantrieb im Traktor," (Conference Paper), *68. Int. Tagung Land. Technik 2010*, doi: 10.13140/2.1.3312.4167.
- [22] A. Böhrnsen, "Neuer 100-kW-Elektro-Traktor von Tadás," *profi*, 01 Oct., 2023. Accessed: Nov. 4, 2024. [Online]. Available: <https://www.profi.de/aktuell/aktuelle-meldungen/neuer-100-kw-elektro-traktor-von-tadas-31143.html>
- [23] Onox. "Website Onox." Accessed: Nov. 4, 2024. [Online]. Available: <https://www.onox.de/>
- [24] Rigitrac. "Prospekt Rigitrac SKE 40 ELECTRIC." Accessed: Nov. 4, 2024. [Online]. Available: <https://www.rigitrac.ch/produkte-1/rigitrac-ske-40-electric/>
- [25] J. Ettl, H. Bernhardt, P. Pickel, E. Remmele, K. Thuneke, and P. Emberger, "Transfer of agricultural work operation profiles to a tractor test stand for exhaust emission evaluation," *Biosystems Engineering*, vol. 176, pp. 185–197, 2018, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2018.10.016.
- [26] "ASAE D497.5 FEB2006", "Agricultural Machinery Management Data," [Online]. Available: [https://www.tractoresymaquinas.com/wp-content/uploads/2021/07/ASABE\\_D497.5.pdf](https://www.tractoresymaquinas.com/wp-content/uploads/2021/07/ASABE_D497.5.pdf)

- [27] P. Balsari *et al.*, "Performance analysis of a tractor - power harrow system under different working conditions," *Biosystems Engineering*, vol. 202, pp. 28–41, 2021, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2020.11.009.
- [28] A. Pathak, G. Sethuraman, S. Krapf, A. Ongel, and M. Lienkamp, "Exploration of Optimal Powertrain Design Using Realistic Load Profiles," *World Electric Vehicle Journal*, vol. 10, no. 3, p. 56, 2019. doi: 10.3390/wevj10030056. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2032-6653/10/3/56>
- [29] N. Wassiliadis *et al.*, "Quantifying the state of the art of electric powertrains in battery electric vehicles: Range, efficiency, and lifetime from component to system level of the Volkswagen ID.3," *eTransportation*, vol. 12, p. 100167, 2022. doi: 10.1016/j.etrans.2022.100167. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590116822000133>
- [30] J. Goss, "Performance Analysis of Electric Motor Technologies for an Electric Vehicle Powertrain: White Paper," *Motor-Design Ltd.*, 2019.
- [31] K. T. Renius, *Fundamentals of Tractor Design*. Cham: Springer International Publishing, 2020.
- [32] L. Angelucci and M. Mattetti, "The development of reference working cycles for agricultural tractors," *Biosystems Engineering*, vol. 242, pp. 29–37, 2024. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2024.04.004. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1537511024000771>
- [33] M. Mattetti, G. Annesi, F. P. Intrevado, and L. Alberti, "Investigating the efficiency of hybrid architectures for agricultural tractors using real-world farming data," *Applied Energy*, vol. 377, p. 124499, 2025. doi: 10.1016/j.apenergy.2024.124499. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261924018828>
- [34] O. Lagnelöv, G. Larsson, D. Nilsson, A. Larsolle, and P.-A. Hansson, "Performance comparison of charging systems for autonomous electric field tractors using dynamic simulation," *Biosystems Engineering*,

vol. 194, pp. 121–137, 2020, doi:  
10.1016/j.biosystemseng.2020.03.017.



# Wasserstoff-Hybrid – eine mögliche Lösung zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen

*Josef Ratzinger<sup>1</sup>, Thomas Aschauer<sup>2</sup>, David Lindenthaler<sup>1</sup>, Florian Falbesoner<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> *Liebherr-Werk Telfs GmbH, Telfs, Österreich*

<sup>2</sup> *Technische Universität Graz, Graz, Österreich*

## Kurzfassung

Im Liebherr Werk Telfs werden sowohl Teleskoplader als auch Rohrleger, Laderaupen sowie Planiertraupen entwickelt und produziert. Für diese Produkte sollen zukünftig auch alternative Antriebssysteme mit geringsten CO<sub>2</sub>-Emissionen angeboten werden. Dafür sind sehr unterschiedliche Lösungsansätze notwendig. In einer gemeinsamen Studie mit der Technischen Universität Graz wurden die Potentiale, Rahmenbedingungen und Schwierigkeiten der verschiedenen Umsetzungskonzepte näher beleuchtet. Beispielsweise sind für Maschinen mit geringen Volllastanteil und Einsatzdauern batterieelektrische Antriebe eine mögliche Lösung. Für Einsätze mit hohem Volllastanteil, wie bei Planiertraupen, stellen Wasserstoffantriebe eine attraktive Möglichkeit dar. Allerdings gibt es auch Einsätze zwischen diesen beiden Extremen, hier kann ein Wasserstoff-Hybridantrieb die Lücke schließen. Mit einer seriell-elektrischen Anordnung, einem Seriellhybridantrieb, kann der Wirkungsgrad im Antriebsstrang gesteigert werden. Durch das Speichern und Wiederverwenden von Rekuperationsenergie kann der Gesamtwirkungsgrad der Maschinen weiter gesteigert werden. Es bestehen jedoch für die reale Umsetzung noch beachtliche Hürden. In der Studie

werden deshalb die aktuellen Herausforderungen und offenen Punkte aus Maschinenherstellerperspektive dargelegt.

**Schlagnworte:** NRMM, Hybrid, Wasserstoff, Technologievergleich, Baumaschine, Liebherr

## 1 Einleitung

Im Liebherr-Werk Telfs werden die Produkte Planierdraupe, Teleskoplader, Laderraupe und Rohrleger entwickelt, produziert und vertrieben. Die Antriebe dieser breiten Produktpalette sind grundsätzlich gleich aufgebaut. Der Hauptantrieb ist ein Dieselmotor, der die Leistung sowohl für die Arbeits- als auch Fahrhydraulik bereitstellt. In allen Maschinen ist der Fahrtrieb hydrostatisch aufgebaut. Diese Technologie hat sich vor allem Aufgrund ihrer hohen Effizienz, Robustheit und Kompaktheit bewährt. Nachteilig an Antrieben mit fossilem Dieselmotor sind die damit einhergehenden CO<sub>2</sub>-Emissionen. Es stellt sich daher die Frage welche Alternativen es dazu gibt und wie die Liebherr Produkte aus Telfs in Zukunft angetrieben werden.

Wesentlichen Einfluss darauf hat jedenfalls die Gesetzgebung. Es wird erwartet, dass sich die zukünftige Gesetzgebung im Bereich der nicht für den Straßenverkehr zugelassenen mobilen Arbeitsmaschinen (Englisch: non-road mobile machinery (NRMM)) von den aktuellen Gesetzgebungen im Pkw- und Lkw-Bereich ableiten wird. Die aktuelle Gesetzgebung im Lkw reduziert den CO<sub>2</sub>-Ausstoß der Fahrzeuge über Flottengrenzwerte. Das bedeutet Lkw-Hersteller müssen mit Ihren verkauften Fahrzeugen einen durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Emissionswert erreichen. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen müssen bis 2025 um 15% und bis 2030 um 30% im Vergleich zu den Referenzjahren 2019/2020 reduziert werden [1]. Weitere Reduktionen erfolgen schrittweise, ab 2030 müssen die CO<sub>2</sub>-Emissionen um 45% reduziert werden, ab 2035 um 65% und ab 2040 um 90%.

Dafür sind zunächst Effizienzsteigerungsmaßnahmen in konventionell mit Dieselmotoren angetriebenen Maschinen erforderlich. Darüber hinaus müssen allerdings auch Zero Emission Fahrzeuge zum Erreichen der Ziele verkauft werden. Als Zero Emission Fahrzeuge gelten laut Gesetz aktuell elektrisch oder Wasserstoff angetriebene Fahrzeuge.

## **2 Antriebssystem Vergleich**

Um Maschinen die gesetzlich als Zero Emission Vehicle eingestuft werden zukünftig anbieten zu können werden deshalb mögliche batterieelektrische als auch wasserstoffbetriebene Antriebssysteme vertieft betrachtet. Als Beispielmaschine wird der Teleskoplader herangezogen, er ist eine sehr vielseitig einsetzbare Maschine und wird sowohl in der Bau- als auch Landwirtschaft verwendet.

Wie 2022 auf der Bauma vorgestellt ist ein batterieelektrischer Antrieb eine mögliche Lösung zum Erreichen von lokalen Nullemissionen. Vor allem für dynamische Einsätze mit vielen Fahrtrichtungswechsel ist die Möglichkeit der Energierückgewinnung (Rekuperation), neben der deutlich höheren Maschineneffizienz ein wesentlicher Vorteil. Die Einsatzdauer ist jedoch begrenzt, hauptsächlich aufgrund des eingeschränkten Bauvolumens, das für die Batterie zur Verfügung steht.

Der verfügbare Bauraum begrenzt sehr wohl auch für wasserstoffbetriebene Maschinen die Einsatzdauer, allerdings ist gegenüber batterieelektrischen Maschinen die Betankungszeit sehr kurz. Aus diesem Grund ermöglicht der Wasserstoffantrieb Maschineneinsätze mit hohem Leistungsbedarf bei gleichzeitig Nullemissionen. In weiterer Folge werden deshalb, mögliche Antriebssysteme basierend auf Wasserstoff vertieft betrachtet. Anzumerken ist an dieser Stelle noch, dass sowohl für batterieelektrische als auch wasserstoffbetriebene Maschinen das Thema Infrastruktur eine beachtliche Herausforderung darstellt.

## 2.1 Mögliche Wasserstoff-Antriebe

Eine wasserstoffbetriebene Maschine kann mit einem Wasserstoff-Verbrennungsmotor oder einer Brennstoffzelle angetrieben werden. Beide Technologien haben Vor- und Nachteile. In weiterer Folge werden deshalb die vielversprechendsten Antriebssysteme beider Technologien zunächst dargestellt und in weiterer Folge gegenübergestellt.

### 2.1.1 Wasserstoff-Verbrennungsmotor (kurz: H2-VM)

In dieser Antriebsvariante wird der Dieselmotor durch einen Wasserstoff-Verbrennungsmotor ersetzt – siehe Abbildung 2.3. Der restliche Antriebsstrang bleibt gleich, damit ist diese Variante mit den geringsten Veränderungen gegenüber einer konventionellen Dieselmachine verbunden.

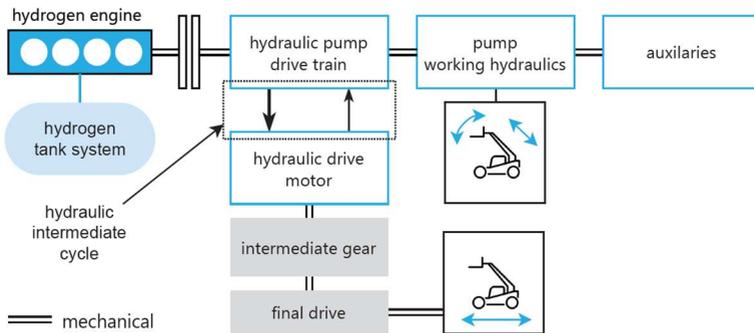


Abbildung 2.3: Wasserstoff-Verbrennungsmotor Antriebssystem am Beispiel Teleskoplader [2].

### 2.1.2 Wasserstoff-Verbrennungsmotor Hybrid (kurz: H2-Hybrid)

Ersetzt man zusätzlich zum Dieselmotor den hydrostatischen Antrieb durch einen seriell elektrischen Antrieb und verbaut zusätzlich einen Energiespei-

cher (Batterie) erhält man die in weiterer Folge als Wasserstoff-Verbrennungsmotor Hybrid Antrieb bezeichnete Maschinenvariante – siehe Abbildung 2.4.

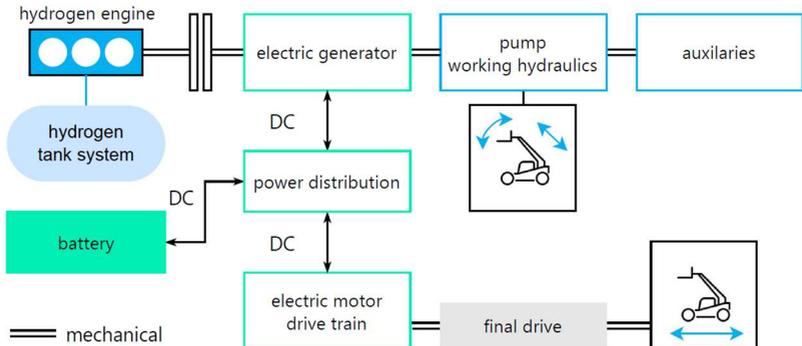


Abbildung 2.4: Wasserstoff-Verbrennungsmotor Hybrid Antriebssystem am Beispiel Teleskoplader [2].

### 2.1.3 Wasserstoff-Brennstoffzellen Antrieb (kurz: H<sub>2</sub>-BSZ)

Der Wasserstoff-Brennstoffzellen Antrieb stellt den größten Eingriff in die bestehende Antriebsstruktur dar – siehe Abbildung 2.5. Anstatt des Verbrennungsmotors wird eine Brennstoffzelle als Energiequelle verbaut. Zusätzlich ist hier ein weiterer Elektromotor für den Antrieb der Arbeitshydraulik erforderlich. Durch die Freiheiten die sich durch die zwei Energiespeicher (Batterie und H<sub>2</sub>-Tank) ergeben, ist jedenfalls eine Betriebsstrategie erforderlich.

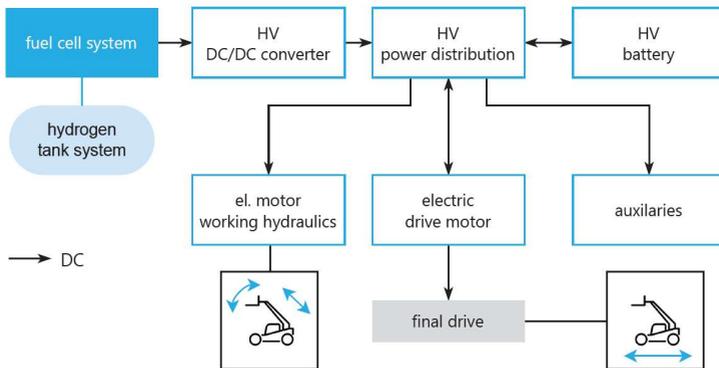


Abbildung 2.5: Wasserstoff-Brennstoffzellen Antriebssystem am Beispiel Teleskoplader [2]

## 2.2 Vergleich

Eine wasserstoffbetriebene Maschine kann wie bereits erwähnt mit einem Wasserstoff-Verbrennungsmotor oder einer Brennstoffzelle angetrieben werden. Wasserstoff-Verbrennungsmotoren haben den Vorteil, dass sie aktuell kostengünstig hergestellt werden können, weil der Großteil der Komponenten von bestehenden Dieselmotoren übernommen werden kann. Nachteil von Wasserstoffmotoren ist, dass bedingt durch den Verbrennungsprozess geringe Emissionen von Stickoxiden auftreten. Diese werden zwar durch eine entsprechende Abgasnachbehandlung auf unkritische Werte reduziert, allerdings bestimmt die Gesetzgebung, ob sie dennoch als Zero Emission Vehicle eingestuft werden. Positiv ist, dass Wasserstoff-Verbrennungsmotoren im Bereich der schweren Nutzfahrzeuge im Fall einer Unterschreitung von 1 gCO<sub>2</sub>/kWh als emissionsfreies Nutzfahrzeug eingestuft werden [3]. Der Vorteil von Wasserstoffmotoren ist jedenfalls, dass es sich um erprobte Technik handelt, die auch unempfindlich gegenüber Verunreinigungen im Wasserstoff oder der angesaugten Luft ist. Brennstoffzellen verwenden zur Umwandlung von Wasserstoff und Sauerstoff in

Wasserdampf Katalysatoren die empfindlich auf Verunreinigungen reagieren [4]. Die aktuell vielversprechendste Technologie für mobile Brennstoffzellen ist die Polymer Elektrolyt Membran (PEM) Brennstoffzelle. Das Temperaturniveau des Kühlmittels liegt bei 80°C, was gegenüber den etwa 105°C von Verbrennungsmotoren eine deutlich höhere erforderliche Kühlfläche und damit mehr Bauraum bedeutet. Beim Verbrennungsmotor wird ein Großteil der Abwärme mit der Verbrennungsluft abtransportiert bei Brennstoffzellen nur ein sehr geringer Anteil. Auch dadurch ergibt sich bei gleicher Leistungsfähigkeit ein deutlich höherer Flächenbedarf für die Kühlung.

### **2.2.1 Wirkungsgrad**

Der maximale Wirkungsgrad einer Brennstoffzelle liegt deutlich über dem Maximalwert eines Verbrennungsmotors. In Abbildung 2.6 sind die Wirkungsgradkennlinien beider Systeme über der abgegebenen Leistung gegenübergestellt. Die strichlierten Linien in Abbildung 2.6 repräsentieren Nutzfahrzeugsysteme, durchgezogene Linien Pkw-Systeme. Typischerweise sinkt bei Brennstoffzellen mit steigender Leistung der Wirkungsgrad stark ab, bei Wasserstoffverbrennungsmotoren steigt mit zunehmender Leistung der Wirkungsgrad. Es ist deshalb sehr stark davon abhängig in welchem Bereich eine Maschine typischerweise betrieben wird, wie hoch die Differenz der Wirkungsgrade tatsächlich ist.

Brennstoffzellen geben elektrische Leistung ab, zum Antrieb einer Hydraulikpumpe ist deshalb noch ein Inverter und Elektromotor erforderlich, um die mechanische Leistung zu erzeugen. Verbrennungsmotoren geben bereits mechanische Leistung ab und schaffen deshalb ab gewissen Leistungen die gleichen Wirkungsgrade wie Brennstoffzellensysteme in Kombination mit Elektromotoren – siehe Abbildung 2.6 – rechts Schnittpunkte 2 und 3. Bei der Gegenüberstellung der Wirkungsgrade ist es deshalb zielführend zu beachten in welchem Bereich sich die geforderten Leistungen der Maschine hauptsächlich bewegen.

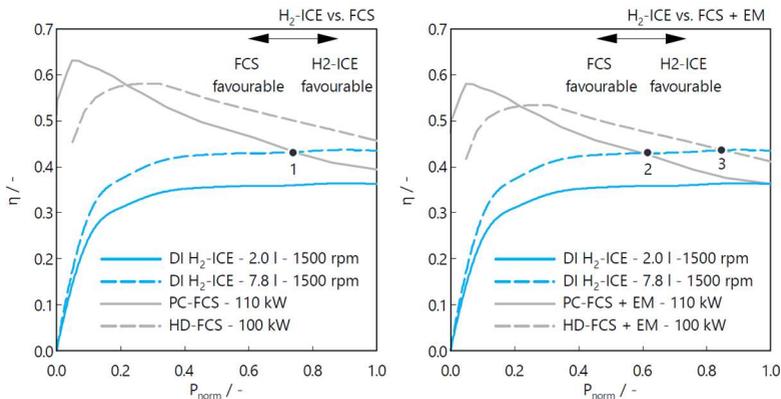


Abbildung 2.6: Wirkungsgradvergleich von Brennstoffzelle (grau) und Wasserstoff-Verbrennungsmotor (blau) [2].

### 2.2.2 Vorteil von Wasserstoff-Verbrennungsmotoren Hybrid vs. Wasserstoff-Verbrennungsmotor

Um den Gesamtmaschinen Wirkungsgrad weiter zu steigern ist es sinnvoll Energie rückzugewinnen. Prinzipiell kann in einer Arbeitsmaschine potentielle und kinetische Energie rückgewonnen werden. Hier ergeben sich deutliche Unterschiede abhängig davon welcher Maschinentyp genauer betrachtet wird. Im Fall des Teleskopladers ist das Potenzial zur Rückgewinnung im Fahrtrieb deutlich höher gegenüber dem Arbeitsantrieb. Grund dafür ist, dass die Last beim Teleskoplader am höchsten Punkt meist abgeladen wird und dadurch die potentielle Energie beim Absenken des Hubarms gering ist. Im Gegensatz dazu wird die Maschine mit häufigen Fahrtrichtungsänderungen (vorwärts – rückwärts) betrieben. Bei jedem Richtungswechsel muss die Maschine abgebremst und anschließend wieder beschleunigt werden. Abhängig vom Fahrverhalten kann mehr oder weniger Energie während des Abbremsvorgangs rückgewonnen werden – siehe Abbildung 2.7. Ein entscheidender Vorteil für den Wasserstoff-Verbrennungsmotoren Hybrid ist

im Gegensatz zum „reinen“ Wasserstoff-Verbrennungsmotor Antrieb, dass die Energie rekuperieren werden kann und damit die Effizienz steigt.

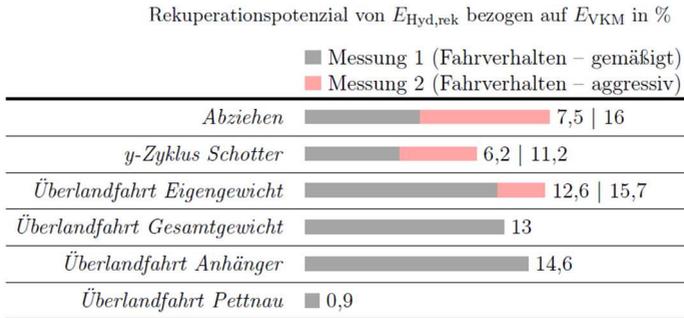


Abbildung 2.7: Rekuperationspotenzial berechnet basierend auf hydraulischen Messdaten und bezogen auf die effektiv abgegebene mechanische Energie des Dieselmotors eines Teleskopladlers [5].

Ein weiterer Vorteil ergibt sich für den H<sub>2</sub>-Hybrid Antrieb durch den Aufbau des Antriebsstrangs in Bezug auf Stickoxid-Emissionen (NO<sub>x</sub>-Emissionen). Stickoxid-Emissionen entstehen bei Wasserstoff-Verbrennungsmotoren vor allem in sehr dynamischen Phasen, wo innerhalb kurzer Zeit die Leistungsanforderung stark steigt – siehe Abbildung 2.8. Beim H<sub>2</sub>-Hybrid Antrieb kann kurzfristig stark ansteigende Leistung von der Batterie abgegeben werden. Das betrifft sowohl Leistung die vom Fahrtrieb als auch den Arbeitsantrieb gefordert wird. Wird ein starker Leistungsanstieg im Arbeitsantrieb gefordert liefert der im Regelfall als Generator arbeitende Elektromotor die fehlende Leistung zum Antrieb der Arbeitshydraulikpumpen. Wird der Leistungsanstieg vom Fahrmotor gefordert wird die elektrische Energie nicht direkt vom Generator geliefert, sondern von der Batterie. Die verwendete Batterieenergie muss schlussendlich durch Rekuperation oder den Wasserstoff-Verbrennungsmotor in Kombination mit dem Generator mit erhöhter Leistung wieder aufgeladen werden.

Der Wasserstoff-Verbrennungsmotor kann deshalb mit sehr geringer Dynamik betrieben werden, was sich sehr günstig auf die Stickoxid-Rohemissionen auswirkt – siehe Abbildung 2.8 – rechts [6]. Zu beachten ist die Skalierung der NO<sub>x</sub>-Rohemissionen links – hohe Dynamik gegenüber rechts – geringe Dynamik. Ein Faktor 100 liegt zwischen sehr dynamischen und wenig dynamischen Betrieb. Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass die in Abbildung 2.8 dargestellten Emissionen, Rohemissionen sind. Das bedeutet, dass die darauffolgende Abgasnachbehandlung die Emissionen auf unter gesetzliche Grenzwerte reduziert.

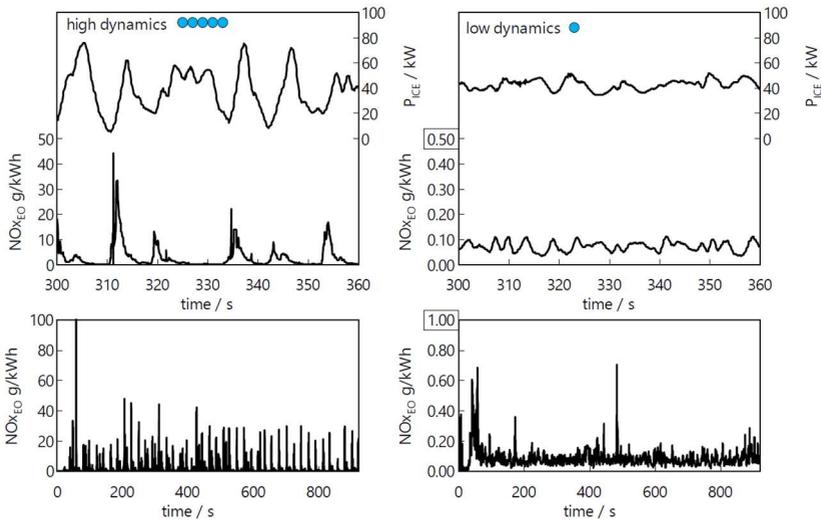


Abbildung 2.8: Zeitbasierte NO<sub>x</sub>-Emissionen für hohe Dynamik (links) und geringe Dynamik (rechts) [6].

### 2.2.3 Total Cost of Ownership (TCO)

Um die Kosten für die unterschiedlichen Antriebe zu vergleichen, eignen sich die Total Costs of Ownership (TCO). Hier werden die Anschaffungskosten der Maschine sowie alle Betriebskosten über die gesamte Lebensdauer sum-

miert. Abbildung 2.9 stellt die TCO über der jährlichen Betriebsdauer für zwei unterschiedliche Annahmen von Wasserstoffkosten gegenüber. Durchgezogene Linien repräsentieren die Antriebe mit einem Wasserstoffpreis von 10€/kg, strichpunktierte Linien repräsentieren Wasserstoffpreise von 4€/kg. Für die dargestellte Abbildung wurden die Fahrerkosten vernachlässigt, da sie sehr stark von dem Einsatzort des Teleskopladers abhängen. Außerdem wurde der Restwert der Maschine am Ende der Lebensdauer vernachlässigt. Kernaussage der Abbildung ist, dass bei hohen Wasserstoffkosten der Brennstoffzellen-Antrieb aufgrund des höheren Wirkungsgrad Vorteile gegenüber den restlichen Antriebsarten aufweist. Für geringere Wasserkosten ist die Reihung der Antriebssysteme im verglichenen Zyklus prinzipiell gleich, aber die Kurven liegen sehr viel näher aneinander. Die Kosten divergieren erst bei höheren Betriebsstunden pro Jahr merklich.

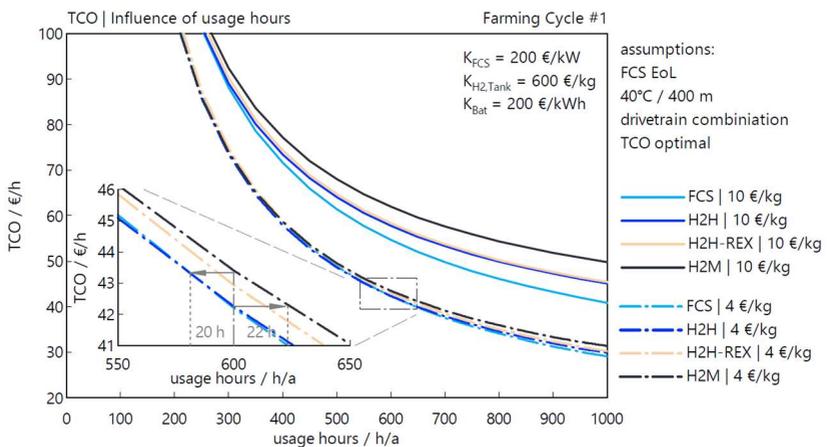


Abbildung 2.9: Kostenverlauf über die Betriebsdauer der Maschine für hohe Wasserstoffpreise 10€/kg (durchgezogene Linien) und geringe Wasserstoffkosten 4€/kg (strichpunktierte Linien) [2].

### **2.2.4 Umsetzungsschwierigkeiten**

Für die maximale Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen ist es wesentlich, dass vor allem grüner Wasserstoff zum Antrieb verwendet wird. Grüner Wasserstoff erfordert zur kostengünstigen Herstellung vor allem billigst hergestellten erneuerbaren Strom. Aktuelle Studien zeigen, dass dies vor allem in Regionen um Äquatornähe aus Photovoltaik oder Wind-Kraftwerken möglich ist [7]. Das bedeutet, dass sehr günstig erzeugter Strom verwendet wird, um den Wasserstoff mittels Elektrolyse zu erzeugen. Von den Herstellungsorten muss der Wasserstoff zu den Verbraucherländern, beispielsweise Europa transportiert werden. Es gibt jedoch noch weitere Umsetzungsschwierigkeiten, genau wie die Elektromobilität ist auch der Wasserstoffantrieb sehr stark auf Infrastruktur angewiesen. Diese Infrastruktur muss jedenfalls erst errichtet werden. Zusätzlich ist es erforderlich, dass Baumaschinen mobil betankt werden. Aktuell werden Baumaschinen üblicherweise vor Ort betankt, eine mobile Betankung ist auch für Wasserstoff betriebene Maschinen erforderlich.

## **3 Zusammenfassung**

Auch im Bereich der mobilen Arbeitsmaschinen ist es wahrscheinlich, dass eine CO<sub>2</sub>-limitierende Gesetzgebung ähnlich wie im Pkw- und Lkw-Bereich eingeführt wird. Batterieelektrische und Wasserstoff betriebene Fahrzeuge gelten nach aktueller Gesetzgebung als Nullemissionsfahrzeuge (Zero Emission Vehicle). Batterieelektrische Antriebe sind eine sehr interessante und umsetzbare Lösung zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen. Vor allem die höhere Effizienz, die geringen Geräuschemissionen und lokalen Nullemissionen sind die wesentlichen Vorteile der Technologie. Das Liebherr-Werk Telfs hat deshalb bereits auf der BAUMA 2022 einen batterieelektrischen Teleskoplader vorgestellt. Nachteile sind die beschränkte Einsatzdauer vor allem für Maschinen mit hohen Auslastungen. Dieser Nachteil ist vor allem auf das beschränkte Bauvolumen zurückzuführen. Grundsätzlich teilen Wasserstoff

Antriebe den Nachteil des beschränkten Bauvolumens mit batterieelektrischen, die Wasserstoff-Nachbetankung ist jedoch deutlich schneller möglich.

Eine möglicher Wasserstoff-Antrieb ist der Brennstoffzellen Antrieb, er bedeutet die größte Veränderung gegenüber dem bestehenden Antrieb. Der Vorteil von Brennstoffzellenantrieben liegt im höheren Wirkungsgrad. Vor allem bei hohen Wasserstoffpreisen ist dieser Vorteil deutlich. Nachteilig ist, dass Brennstoffzellensysteme einen hohen Wasserstoffreinheitsgrad fordern und ansonsten schneller altern. Der Wirkungsgrad sinkt allerdings mit höherer Leistung. Umgekehrt ist bei Wasserstoff-Verbrennungsmotoren der Wirkungsgrad bei hohen Leistungen maximal. Abhängig von der Auslastung ist deshalb auch ein Antriebssystem mit Wasserstoff-Verbrennungsmotor eine interessante Möglichkeit. Außerdem bedeutet der Ersatz des Dieselmotors durch einen Wasserstoff-Verbrennungsmotor den geringsten Eingriff in das Antriebssystem. Ersetzt man zusätzlich den hydrostatischen Antrieb durch eine seriell elektrische Anordnung von Elektromotoren und verbaut einen Energiespeicher, lässt sich die Effizienz des Antriebs deutlich steigern. Diese als Wasserstoff-Verbrennungsmotor Hybrid Antrieb bezeichnete Variante steigert die Effizienz durch Energierückgewinnung und einem höheren Wirkungsgrad im Fahrantrieb. Zusätzlich besteht das Potential das Abgasnachbehandlungssystem zur Stickoxid-Reduktion zu vereinfachen in dem die Dynamik des Verbrennungsmotors reduziert wird. Der Wasserstoff-Verbrennungsmotor Hybrid ist deshalb eine sehr interessante mögliche Lösung zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen.

## Literatur

- [1] Europäische Kommission Pressemitteilung:  
[https://germany.representation.ec.europa.eu/news/eu-parlament-und-rat-einigen-sich-auf-neue-co2-standards-fur-lkw-und-busse-2024-01-19\\_de](https://germany.representation.ec.europa.eu/news/eu-parlament-und-rat-einigen-sich-auf-neue-co2-standards-fur-lkw-und-busse-2024-01-19_de), abgerufen am 29.10.2024

- [2] Thomas Franz Aschauer: „Hydrogen powered vehicles in non-road environments“, Dissertation, Institut für Thermodynamik und nachhaltige Antriebssysteme, Graz, 2023
- [3] Europäische Verordnung 2024/1610:  
[https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=OJ:L\\_202401610](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202401610), abgerufen am 22.11.2024
- [4] M. Klell, H. Eichlseder, A. Trattner: „Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik: Erzeugung, Speicherung, Anwendung“, Springer Vieweg ATZ/MTZ-Fachbuch, 4. Auflage, 2018, ISBN 978-3-658-20446-4
- [5] Josef Markus Ratzinger: “Elektrifizierte Antriebssysteme für mobile Arbeitsmaschine am Beispiel Teleskoplader“, Dissertation, Institut für Thermodynamik und nachhaltige Antriebssysteme, Graz, 2021
- [6] Aschauer, T., Roiser, S., Schutting, E., Eichlseder, H. et al., "Hydrogen Hybrid ICE Powertrains with Ultra-Low NO x Emissions in Non-Road Mobile Machinery," SAE Technical Paper 2023-01-0471, 2023, <https://doi.org/10.4271/2023-01-0471>.
- [7] Thijs Van de Graaf et al.: “Geopolitics of the Energy Transformation: The Hydrogen Factor“, International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi, 2022, ISBN 978-92-9260-370-0

# Grüner Wasserstoff als Energieträger für Traktoren

Lukas Reuter<sup>1</sup>, Ludger Frerichs<sup>1</sup>



<sup>1</sup> Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge, Technische Universität Braunschweig, Deutschland

## Kurzfassung

Wasserstoff als Energieträger für Traktoren stellt derzeit eine große technische Herausforderung dar. Einerseits ist die benötigte Infrastruktur zur Betankung insbesondere im ländlichen Raum sehr rar, andererseits ist die mitführbare Energiemenge im Vergleich zum konventionellen Traktor mit Dieselmotor deutlich geringer. Im vom Land Niedersachsen geförderten Forschungsprojekt H2Agrar wurde eine lokale Wasserstoffwirtschaft demonstriert. Von der Erzeugung von grünem Wasserstoff mittels Elektrolyseurs über die leistungsstarke Vertankung bei 700 bar bis zur Anwendung in einem Brennstoffzellen-Traktor wird der klimaneutrale Energieträger in einer Wertschöpfungskette erprobt. Neben der im Projekt aufgebauten Tankstelle wurden simulativ alternative Betankungskonzepte untersucht. In diesem Artikel wird das Testumfeld beschrieben und die Chancen und Herausforderungen für grünen Wasserstoff als Energieträger für Traktoren dargestellt. Zudem wird eine monetäre Betrachtung der Betankungskonzepte durchgeführt.

**Schlagnworte:** H2Agrar, Grüner Wasserstoff, Brennstoffzelle, Wasserstoffbetankung, Elektrolyseur, Landwirtschaft

## 1 Einleitung

Das Projekt H2Agrar untersucht und erprobt modellhaft, wie eine dezentrale Wasserstoffwirtschaft im landwirtschaftlichen Sektor Niedersachsens praktisch umgesetzt werden kann. Der Schwerpunkt liegt darauf, den Agrarsektor von fossilen Energieträgern auf eine wasserstoffbasierte Bewirtschaftung umzustellen. Dies umfasst die gesamte Wertschöpfungskette, von der dezentralen Erzeugung über die Speicherung bis hin zur Nutzung von grünem Wasserstoff. Das übergeordnete Ziel des Projekts H2Agrar ist es, aufzuzeigen, wie ein Modell für die Versorgung landwirtschaftlicher Betriebe mit grünem Wasserstoff, der aus lokal produzierter Windenergie gewonnen wird, aussehen kann. Langfristiges Ziel ist es, die Landwirtschaft, neben anderen potenziellen Abnehmern, in eine umfassende und vernetzte Verteilungsinfrastruktur einzubinden, da größere Wasserstoffinfrastrukturen nicht ausschließlich für den Agrarsektor genutzt werden können, sondern auch Anwendung im beispielsweise On-Highway-Bereich finden können. Die Dekarbonisierung in der Landtechnik bietet in den ländlichen Regionen großes Potential, da eine verlässliche und kostengünstige Energieversorgung aus erneuerbaren Energien wie Wind- bzw. Solarenergie zur Verfügung steht [1]. Aufgrund der hohen Maschinenleistungen, die derzeit in der Landwirtschaft Anwendung finden, können reine batterieelektrische Antriebssysteme häufig nicht zum Einsatz kommen. Daher stellt Wasserstoff aufgrund der hohen gravimetrischen Energiedichte im Vergleich zu anderen alternativen Energieträgern eine prinzipiell geeignete Variante für die Landtechnik dar. Der landwirtschaftliche Sektor hat bisher jedoch eine eher untergeordnete Rolle bei der Anwendung von Wasserstoff als Energieträger für beispielsweise Brennstoffzellen-Traktoren gespielt.

Das Projekt ist in der Region Emsland angesiedelt. Diese Region zeichnet sich durch eine ländliche Struktur sowie eine hohe Dichte an landwirtschaftlichen Betrieben aus und bietet deshalb optimale Bedingungen für die Demonstration des Vorhabens. Konkret adressiert das Projekt die Implementierung und Erprobung der Wasserstoffanwendung für Traktoren in Haren

(Ems) im Landkreis Emsland. Das Vorhaben umfasst die Bereitstellung von regionalem grünem Wasserstoff und den Aufbau einer entsprechenden Verteilungsinfrastruktur für die Landwirtschaft. Dazu werden neue Composite-Wasserstofftanks entwickelt, die u. a. für Verteiler-Lkw geeignet sind. Darüber hinaus werden drei wasserstoffbetriebene Traktoren entwickelt und praktisch erprobt.

## **2 Testumfeld und Praxiseinsatz des Brennstoffzellen-Traktors**

Für die Erzeugung des grünen Wasserstoffs dient der Windpark Fehndorf/Lindloh als Quelle für erneuerbare Energie. Dieser wird in einem Bürgerwindparkmodell realisiert und finanziert. Neben dem Windpark besteht ein „Speicherfeld“ mit zwei Elektrolyseuren und einem Batteriespeicher mit einer Kapazität von ca. 7 MWh. An der Autobahn A31 wurde im Rahmen des Projektes eine Wasserstofftankstelle aufgebaut. Neben der Möglichkeit, Wasserstoff bei 350 bar oder 700 bar Druck zu tanken, stehen HPC-Schnellladepunkte (High Power Charging) sowohl für die Landwirtschaft als auch perspektivisch für den elektrifizierten Fernverkehr und weitere Nutzergruppen zur Verfügung.

### **2.1 Beschreibung des Testumfelds**

Die elektrische Energie für den Elektrolyseur wird in einem Windpark mit 16 Windenergieanlagen der Firma Enercon erzeugt. Der verwendete Typ hat eine Nennleistung von 4,2 MW. Der Windpark, mit einem ungefähren Ertrag von 230.000 MWh pro Jahr, ist als Bürgerwindpark angelegt, wodurch die Teilhaber an der lokalen Wertschöpfung vor Ort beteiligt werden. An den Windpark angeschlossen kommen zwei Elektrolyseure des Herstellers H-TEC vom Typ ME450 mit jeweils 1 MW Leistung zum Einsatz. Die Elektrolyseure sind in der Lage, jeweils 450 kg Wasserstoff pro Tag zu erzeugen. Der Was-

Wasserstoff wird mittels Protonen-Austauschmembran-Elektrolyse (PEM) erzeugt. Der erzeugte Wasserstoff erfüllt die Reinheitsklasse 5.0 und ist damit direkt für die Verwendung in Brennstoffzellen geeignet, es ist keine Nachreinigung notwendig. Für die Elektrolyse wird Trinkwasser benötigt, welches vor dem Elektrolyseprozess entmineralisiert wird. Der produzierte Wasserstoff hat einen Übergebdruck zwischen 20 – 30 bar [2].

Der grüne Wasserstoff kann in der Nähe der Autobahnabfahrt Wesuwe an der Bundesautobahn A31 getankt werden. Dort befindet sich der „Grüne H2-Hub Haren“, welcher eine Betankungsanlage für bis zu 700 bar Fülldruck bereitstellt. Diese Tankstelle ist in der Lage, den etwa 20 kg großen Wasserstofftank des Versuchstraktors vollständig zu befüllen. Aufgrund des umgekehrten Joule-Thompson-Effektes kommt es bei der Befüllung mit Wasserstoff zu einer Erwärmung des Wasserstoffs bzw. der Tanks. Daher wird der Wasserstoff vor dem Betankungsvorgang auf etwa -40 °C heruntergekühlt, um die Vorgaben des Betankungsprotokolls SAE J2601 zu erfüllen und die maximale Wasserstofftemperatur von 85 °C nicht zu überschreiten.

Als Versuchsträger wird der Fendt 700 Vario Gen6 als Basis für die Prototypen verwendet. Dabei bleiben die Kabine, das Chassis sowie das Vario-Stufenlosgetriebe samt Hydrauliksystem, Zapfwelle, Bremsen und Lenkung erhalten. An der Leistungsverteileinheit (PDU) sind sämtliche Hochspannungskomponenten über einen Gleichspannungs-Zwischenkreis angeschlossen. Es wird eine PEM-Brennstoffzelle mit einer Leistung von 100 kW verwendet, die aufgrund der begrenzten Dynamik einen Pufferspeicher benötigt. Dafür wird eine Batterie mit einer Kapazität von 25 kWh eingesetzt. Die Batterie besitzt eine Lade- bzw. Entladeleistung von 40 kW bzw. 70 kW. Statt des Dieselmotors treibt ein einstufiger Axialflussmotor das Stufenlosgetriebe mit bis zu 100 kW Dauerleistung an und kann bis zu 15 kW Leistung rekuperieren. Zusätzlich kommt ein Bremswiderstand zum Schutz vor plötzlichem Lastabwurf (Abschalten elektrischer Verbraucher) zur Anwendung. Die Hydraulik des Traktors wird über die Hydraulikpumpen des Getriebes versorgt, welches auch den Antrieb der Heckzapfwelle sicherstellt.

Das Kühlsystem des Traktors wird mit einem Lüfter mit 10 kW Leistung bedient. Die Klimatisierung der Kabine und das Druckluftsystem werden von elektrisch betriebenen Komponenten übernommen. Die verbaute Batterie kann mittels On-Board-Ladegerät mit bis zu 22 kW geladen werden. Die Niederspannungsseite der 24 V und 12 V Versorgung wird durch zwei Abwärtswandler mit jeweils 3 kW versorgt. Das Wasserstoffspeichersystem ist aufgrund der Bauraumanforderungen auf dem Dach der Kabine montiert. Dies besteht aus fünf Tanks mit jeweils einer Kapazität von 4,2 kg bei einem maximalen Druck von 700 bar. Eine Betankungsvorrichtung ist in der Nähe der Tür platziert. [3] Auf der Kathodenseite der Brennstoffzelle (BZ) stellen Luftfilter die notwendige Reinheit der angesaugten Luft sicher, um das System vor Ammoniak, einem für die PEM-Brennstoffzelle schädlichem Katalysatorgift, zu schützen [4].

Die praktische Erprobung der Prototypen, die den Namen HELIOS (*hydrogen-electric operated tractor system*) tragen, erfolgt auf zwei landwirtschaftlichen Betrieben im Ortsteil Fehndorf der Stadt Haren (Ems). Die beiden Betriebe bewirtschaften zusammen etwa 290 ha Ackerland. Die angebauten Fruchtarten sind Kartoffeln, Zuckerrüben, Gerste, Roggen, Triticale und Weizen.

## 2.2 Herausforderungen in der Praxis

Im Jahr 2023 verfügte Deutschland über ca. 100 öffentlich zugängliche Wasserstofftankstellen, wobei eine Konzentration dieser in urbanen Zentren und entlang bedeutsamer Verkehrsrouten verzeichnet wird [5]. Ballungszentren sowie hochfrequentierte Autobahntrassen sind vergleichsweise gut mit Wasserstofftankstellen ausgestattet. Demgegenüber zeigt der ländliche Raum eine erhebliche Unterversorgung.

Die öffentliche Tankstellenverfügbarkeit erzeugt logistische und betriebliche Herausforderungen für landwirtschaftliche Betriebe. Hofeigene Anlagen sind bislang nicht eingerichtet. Landwirte in wenig erschlossenen Regionen

müssten daher mitunter große Distanzen zurücklegen, um Wasserstoff tanken zu können. Diese zusätzlichen Fahrtwege resultieren in erhöhten Zeit- und Betriebskosten und stören den landwirtschaftlichen Betriebsablauf. Effiziente Landwirtschaft erfordert eine hohe Maschinenverfügbarkeit, insbesondere während intensiver Arbeitsphasen wie der Aussaat oder Ernte. Die Notwendigkeit, große Entfernungen zur nächsten Wasserstofftankstelle zu überwinden, kann daher zu Verzögerungen und Produktivitätseinbußen führen. Die im Projekt gebaute Tankstelle liegt in etwa sechs Kilometer Entfernung zu den beiden Betriebshöfen der Erprobungsbetriebe. Für die Betankung des Traktors sind inklusive der Fahr- und Betankungszeit etwa 45 Minuten notwendig.

Auch die Kosten für den Aufbau der notwendigen Infrastruktur sind derzeit sehr hoch. Die Kosten des Wasserstoffs sind maßgeblich von der Auslastung der Elektrolyseurinfrastruktur abhängig. Für Wasserstofftankstellen, mit einer Kapazität in der Größenordnung von etwa 500 kg/Tag, ist von einer Investitionssumme zwischen 1,9 – 2,4 Millionen Euro auszugehen [6]. Über einen üblichen Abschreibez Zeitraum von zehn Jahren sind so pro Kilogramm vertankten Wasserstoff entsprechende Anteile der Investition auf den Endkunden umzulegen.

Eine weitere große Hürde ist die Energiespeicherkapazität. Die Wasserstoff-Versuchstraktoren weisen einen im Vergleich zum dieselbetriebenen Modell begrenzten Energiespeicher auf, was die Problematik der weiten Distanzen zu Tankstellen verschärft. Die aktuelle Speichertechnologie für gasförmigen Wasserstoff umfasst vier normierte Behältertypen. Der Behältertyp 1 beschreibt traditionelle industrielle Gasflaschen aus Stahl, deren Masse die gravimetrische Energiedichte negativ beeinflusst. Eine Verbesserung dieser wird mit Behältertyp 2 erzielt, bei dem ein Stahlliner im zylindrischen Teil durch eine Faserbewicklung verstärkt wird. Für mobile Anwendungen, die hohe Anforderungen an Gewicht und Platzbedarf stellen, werden Behälter vom Typ 3 oder 4 präferiert. Diese vollbewickelten Composite-Behälter bieten bis zu 70 % Gewichtsreduktion im Vergleich zu Stahlbehältern. Typ 3

kombiniert einen dünnwandigen Stahl-Inliner mit einer Faserbewicklung, während Typ 4 einen Kunststoff-Inliner verwendet. [7] Für den Transport des Wasserstoffs vom Elektrolyseur zur Tankstelle oder zu weiteren Endverbrauchern ist im Rahmen des Projektvorhabens ein Typ 4 Hochdruckspeicher von der Firma Röchling Industrial entwickelt worden. Um diese Art von Tanks für den Verwendungszweck einsetzen zu können, sind diese gemäß der EN 17339 „Ortsbewegliche Gasflaschen – Vollumwickelte Flaschen und Großflaschen aus Kohlenstoff-Verbundwerkstoffen für Wasserstoff“ zu zertifizieren. Dieser Prozess umfasst eine aus 13 Einzelprüfungen bestehenden Baumusterprüfung.

Um der geringen Speicherkapazität von Wasserstoff auf dem Traktor zu entgegnen und das Potential von Betankungsvarianten für einen Wasserstofftraktor zu beurteilen, wurden im Projekt verschiedene Szenarien für die Versorgung des Traktors mit Wasserstoff erstellt. Diese sollen im ländlichen Raum die Möglichkeit aufzeigen, unabhängig von der Tankstelleninfrastruktur den Traktor mit dem Energieträger zu versorgen. Mittels simulativer Untersuchung wurden die betrachteten Szenarien auf die beiden Partnerbetriebe projiziert und mit der Betankung an der öffentlichen Tankstelle verglichen. Neben der Zeitersparnis wird auch eine Kostenrechnung der Betankungskonzepte durchgeführt, um die Konzepte bewerten zu können (s. Kapitel 3.2).

## **2.3 Potential der CO<sub>2</sub>-Einsparung**

Etwa 5 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen des Landwirtschaftssektors in Deutschland werden durch die Verbrennung fossiler Kraftstoffe in Landmaschinen emittiert [8]. Der Einsatz von grünem Wasserstoff in Traktoren kann dabei helfen, den CO<sub>2</sub>-Ausstoß in dem Sektor zu reduzieren. Im Rahmen des Forschungsvorhabens ist von der Hochschule Emden/Leer eine Life-Cycle-Analyse (LCA) durchgeführt worden, bei der ein Gesamtsystem für die Modellregion und das Projektszenario erstellt wurde und mit dem Einsatz eines

Dieseltraktors verglichen wurde. Mit der Methode kann für die gewählten Systemgrenzen von der Produktion, über den Transport, die Bereitstellung des jeweiligen Kraftstoffes, der Maschinennutzung und der Entsorgung das Treibhausgaspotential bestimmt werden. Die LCA zeigt, dass die Verwendung eines Traktors mit dem alternativen Energieträger Wasserstoff im Rahmen der betrachteten Systemgrenzen eine Reduktion der Treibhausgase um den Faktor sieben gegenüber der fossil betriebenen Maschine aufweist.

### **3      Betankungskonzepte für einen           Brennstoffzellen-Traktor**

Aufgrund der geringen Dichte an Wasserstofftankstellen, sind einige alternative Betankungslösungen für Wasserstoff in der Entwicklung oder bereits am Markt verfügbar. So bieten Hersteller wie Wystrach, Westfalen oder Bayo-Tech mobile Wasserstofftankstellen an, welche beispielsweise auf einer BDF-Wechselbrücke oder einer Containerausführung basieren. Die Lösungen speichern bei einem Druck von 250 bar – 520 bar bis zu 435 kg Wasserstoff [9 - 11]. Die Betankung erfolgt bei den Konzepten durch Überströmen, da sie aufgrund der Autarkie keine Verdichterstufe haben. Die Betankung von Wasserstofffahrzeugen kann so flexibel und unabhängig von der Tankstelleninfrastruktur erfolgen. Eine weitere Idee der Betankung eines Traktors ist die direkte Betankung mittels Betankungsfahrzeug. Die Betankung würde für den Traktor direkt am Feldrand erfolgen. Das Unternehmen JCB hat für Baustellenanwendungen ein solches Fahrzeug bereits demonstriert [12]. Die direkte Betankung stellt den idealen Fall dar, bei dem aus Sicht des Traktorfahrers am wenigsten Zeit für die Betankung aufgewandt werden muss. Derzeitige Dieseltraktoren werden auf den landwirtschaftlichen Betrieben meist an der hofeigenen Tankstelle betankt. Für Wasserstoff ist eine solche Betankung über eine Abfüllstation, wie sie zum Beispiel Batarow Hydrogen anbietet, möglich. Bei dieser Anwendung kommen Flaschenbündel zur Anwendung, in denen je Bündel bei einem Druck von 300 bar etwa 15 kg Wasserstoff gespeichert ist (12 × 50 Liter Flaschen). [13]

### **3.1 Landwirtschaftliche Verfahrenssimulation der Betankungsszenarien**

Für die Untersuchung des Brennstoffzellen-Traktors und der Betankungskonzepte wird die am Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge der Technischen Universität Braunschweig entwickelte Methode der landwirtschaftlichen Verfahrenssimulation angewandt. Das Gesamtmodell der Verfahrenssimulation besteht aus zwei Teilmodellen: Dem Maschinenmodell, welches den Energiebedarf der Maschine mit einem Anbaugerät bestimmt, und dem Verfahrensmodell, welches die Maschine in einem landwirtschaftlichen Verfahren simuliert. Dabei wird die Arbeit der Maschine gemäß dem Zeitgliederungsschema des Kuratoriums für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL) in Haupt- und Nebenzeiten unterschieden. Die Simulation ist in Form einer agentenbasierten Simulation ausgeführt und basiert auf dem „AnyLogic“ Framework. Das Verhalten der Agenten wird in den Agentensteuerungen (Agent-Control-Unit ACU) definiert. Die Agenten in der Simulation haben die Möglichkeit, untereinander zu agieren oder mit der simulierten Umgebung zu interagieren. Im Rahmen der Untersuchung der Wasserstoffanwendung bei Traktoren, wurde der Bewegungs- und Entscheidungsalgorithmus der ACUs auf den veränderten Energieträger angepasst. Den Agenten in der Simulation ist es nun möglich, neben der ortsfesten Tankstelle (öffentliche Tankstelle oder hofeigene Tankstelle) auch am Feldrand durch einen zusätzlichen Betankungswagen mit Wasserstoff betankt zu werden. Dabei wird von einem sogenannten Energiezulieferer der Tankinhalt des auf dem Feld arbeitenden Agenten dauerhaft überwacht. Die Entscheidungslogik der ACU des Betankungswagens wurde so programmiert, dass abhängig von der Feldentfernung ein frühzeitiges Starten vom Betriebshof erfolgt, sodass der Energiezulieferer vor dem Traktor am Feldrand angekommen ist. So können die ablaufbedingten Wartezeiten reduziert werden.

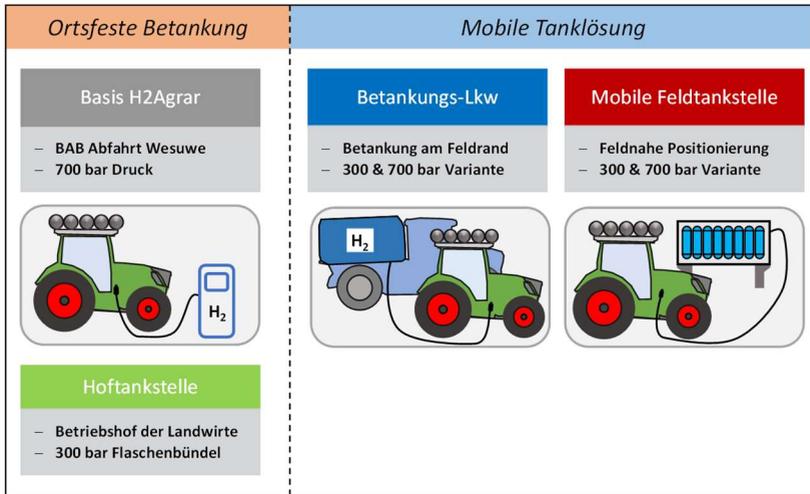


Abbildung 1: Betrachtete Betankungsszenarien in der Simulation

In der Betrachtung des Projektes wurden sechs mögliche Szenarien für die Wasserstoffversorgung eines Traktors erstellt und simulativ untersucht. Die Basis stellt das H2Agrar Szenario (H2A) dar, bei dem die Versorgung des Traktors mit Wasserstoff über die öffentliche 700 bar Tankstelle erfolgt. Als weitere Variante wird die Wasserstoffversorgung über eine hofeigene Abfüllanlage (HAA) simuliert. Der Wasserstoff wird dabei in Form von austauschbaren Flaschenbündeln bereitgestellt. Der Wasserstofftank wird mit einem maximalen Druck von 300 bar gefüllt. Diese beiden Varianten stellen die „ortsfeste“ Betankung dar, da der Standort der Tankstelle nicht flexibel gewählt werden kann (s. Abbildung 1). Im Weiteren werden zwei mobile Tanklösungen betrachtet. Für das Szenario mit einem Energiezulieferer mit Betankung am Feldrand werden die Varianten 300 bar und 700 bar betrachtet (BTW). Das Konzept des mobilen Betankungscontainers (TC) benötigt für die Landwirte eine günstige Platzierung, um die Fahrwege für die Betankung möglichst gering zu halten. Dazu wird ein „facility location problem“ (bekannte Optimierungsaufgabe) gelöst, welches den idealen

Standort unter Einbeziehung der Feld-Feld-Entfernung und als Gewichtungsfaktor den saisonalen Wasserstoffbedarf pro Feld bestimmt. Aufgrund der betrieblichen Struktur der beiden Erprobungsbetriebe im Emsland, deren Felder quasi kreisförmig um den jeweiligen Betriebshof liegen, ist nach der Lösung des „p-center facility location problem“ der Ortskern des Stadtteils Fehndorf von Haren (Ems) der ideale Standort für einen solchen Tankcontainer. Es wird für beide Betriebe an diesem Container getankt, für den auch sowohl die 300 bar als auch die 700 bar Variante abgebildet wird.

Da zum Zeitpunkt der Simulation keine Verbrauchsdaten des HELIOS vorliegen, wird auf bekannte Kraftstoffbedarfsdaten von Dieselmotoren zurückgegriffen. Für diese wird mit dem entsprechenden Wirkungsgrad des Antriebsstranges und des Dieselmotors zurück auf die notwendige Energie des Prozesses gerechnet. Anschließend wird mit dem Wirkungsgrad des Antriebsstranges des BZ-Traktors und der Brennstoffzelle ein äquivalenter Wasserstoffverbrauch für die verschiedenen Verfahrensschritte auf dem landwirtschaftlichen Betrieb erstellt. Da die Kraftstoffverbrauchsdaten für Dieseltraktoren meist mit einer Leistung von mehr als 100 kW vorliegen, muss im Zuge der Umrechnung auch der Wasserstofftank mit der höheren Leistung skaliert werden. Als Basis wird die Tankgröße des HELIOS (100 kW Leistung) angenommen, dessen Tank 20 kg Wasserstoff bei 700 bar Druck beinhaltet. Für die 300 bar Varianten wird die Tankgröße mittels der Realgasgleichung unter Annahme des gleichen Tankvolumens bestimmt. Die Tankgrößen sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1: Wasserstofftankgrößen skaliert auf die Leistungsklasse des Traktors

<b>Leistungsklasse in kW</b>	<b>H<sub>2</sub> Tankinhalt in kg bei 700 bar</b>	<b>H<sub>2</sub> Tankinhalt in kg bei 300 bar</b>
<b>93 – 111</b>	20,4	10,7
<b>112 – 129</b>	24	12,6
<b>130 – 147</b>	27,6	14,5

148 – 167	31,4	16,5
168 – 184	35,2	18,5
185 – 215	40	21,0

### 3.2 Kostenrechnung der Szenarien

Zum Vergleich der betrachteten Szenarien wird eine Kostenrechnung durchgeführt. Diese umfasst neben den fixen Kosten der Konzepte auch die variablen Kosten, die durch die Nutzung entstehen. Dafür wird neben dem in der Simulation bestimmten Wasserstoffbedarf auch der Arbeitszeitbedarf des Brennstoffzellentraktors bzw. im Falle der Betankung durch einen Betankungs-Lkw auch die Arbeitszeit des Betankungskonzeptes betrachtet. Für die variablen Kosten sind unter anderem die Lohnkosten und die Wasserstoffkosten relevant. Für die Lohnkosten wird ein Stundensatz von 24 €/Akh angesetzt [14]. Für den Wasserstoffpreis für den Betrieb der Traktoren wird der im September 2024 bei H2Mobility an den Tankstellen aufgerufene Preis von 17,75 €/kg verwendet [5]. Im Falle des Szenarios der Flaschenbündellösung wird zur besseren Vergleichbarkeit pro Kilogramm Wasserstoff der gleiche Preis angenommen, auch wenn Wasserstoff in Gasflaschen z. B. von der Fa. Linde Gas zu einem höheren Preis pro Kilogramm angeboten wird. Bei der Flaschenbündellösung kommen Transport-, Miet- und Gefahrgutkosten in Höhe von etwa 100 € pro Bündel hinzu.

Die weiteren variablen Maschinenkosten (nur Reperaturen – keine Betriebsstoffe) werden mithilfe der Kalkulationsgrundlagen nach der KTBL-Betriebsplanung bestimmt. Für den Traktor in der Leistungsklasse 100 kW werden 7,80 €/h angegeben. Für den Energiezulieferer wird der Wert für einen zweiachsigen 18 t Lkw mit 36,55 €/h verwendet. Ebenso werden die jährlichen Fixkosten (Abschreibungs-, Zins- und Wartungskosten) mit 11.273 €/a bzw. 19.576 €/a in die Kostenrechnung aufgenommen. [15] Hierbei ist zu beachten, dass sich die Werte des KTBLs auf dieselbetriebenen Maschinen beziehen und zum jetzigen Zeitpunkt noch keine konkrete Investitions-

größe für eine Maschine mit alternativem Antrieb beziffert werden kann. Es wird angenommen, dass sich die Reparatur- und Wartungskosten der elektrifizierten Maschine auf einem ähnlichen Niveau bewegen wie die eines konventionellen Dieseltraktors.

Für die Investition der Tankstelle werden nach [6] 1,195 Mio. Euro für eine „Medium HRS“ mit einer zur H2Agrar Tankstelle vergleichbaren täglichen Tankleistung von 420 kg angesetzt. Für den 300 bar Tankcontainer wird ein Anschaffungspreis von 600.000 € verwendet [16]. Eine Variante mit 700 bar existiert bisher am Markt nicht, daher wird aufgrund der aufwändigeren Technik und Verdichtung eine anderthalbmal so hohe Investition zur 300 bar Ausführung angenommen. Eine Hofabfüllanlage für Wasserstoffbündel von der Fa. Batarow Hydrogen kostet 7.500 € (Stand 2023), die pro landwirtschaftlichen Betrieb die kostengünstigste Infrastrukturinvestition darstellt [13]. Der Betankungswagen wird nach [17] mit einem Endkundenpreis von etwa 300.000 € in die Kalkulation aufgenommen, welcher einem Zugfahrzeug mit einem Stahl-Röhrentrailer für Wasserstoff entspricht. Die Abschreibung der jeweiligen Kosten der Varianten erfolgt über die Nutzungszeit. Für Tankstellen wird die AfA-Tabelle für den Wirtschaftszweig „Landwirtschaft und Tierzucht“ verwendet. Dort ist eine Nutzungsdauer von 20 Jahren für die Tankstelle angegeben [18]. Die Nutzungszeit für den Tankcontainer ist vom Anbieter Westfalen AG mit 15 Jahren vorgesehen [19]. Der Betankungs-Lkw wird nach der KTBL-Betriebsplanung gemäß der Nutzungsdauer eines Lkws mit einer Verwendungsdauer von 6 Jahren in die Berechnung aufgenommen [15].

Die Fixkosten der Betankungsszenarien (außer der Hofabfüllanlage) werden, abhängig von der tatsächlich getankten Wasserstoffmenge durch die Prototypen, anteilmäßig in die saisonalen Gesamtkosten einbezogen. Dies ist notwendig, da die Infrastruktur bzw. das Betankungskonzept auch von anderen Abnehmern über das Projektumfeld hinaus genutzt werden könnte. Die bei den Szenarien von den Traktoren benötigte Menge an Wasserstoff ist geringer als die Kapazität der jeweiligen Infrastruktur. Die Kosten des Betan-

kungswagens werden auslastungsabhängig berechnet. Es wird davon ausgegangen, dass der Betankungswagen pro Arbeitstag eine Lieferung Wasserstoff (300 bar oder 700 bar) von 150 kg bzw. 300 kg zur Verfügung stellen kann. Die Traktoren auf den beiden Betrieben kommen pro Saison auf 65 Arbeitstage in der 300 bar Variante oder 64 Arbeitstage in der 700 bar Variante. Für den Betankungswagen besteht so eine Auslastung von etwa 31 % bzw. 13 %. Für die Tankcontainerlösung wird angenommen, dass dieser pro Monat zweimal aufgefüllt wird. Aufgrund der geringeren Gesamtkapazität des Containers bei 300 bar unterscheidet sich die benötigte Anzahl an Wasserstoffcontainerbefüllungen. Für die Variante in 300 bar wird ein Inhalt von 240 kg Wasserstoff angenommen (vgl. mobile Wasserstofftankstelle von Westfahlen [10]), in einer möglichen 700 bar Variante sind unter der Annahme eines idealen Gases 560 kg Wasserstoff. Daraus ergibt sich, dass die beiden Betriebe in einer Anbausaison nur fünf Containerbeladungen bei 700 bar benötigen, jedoch 12 Containerbefüllungen in der 300 bar Variante. Daraus lässt sich eine jährliche Auslastung des Containers durch die beiden Landwirte von 22 % bzw. 53 % bestimmen. Der restliche verfügbare Wasserstoff steht damit anderen Abnehmern zur Verfügung und fließt nicht in die Gesamtkosten der betrachteten Betriebe ein. Für das Basisszenario der H2Agrar Tankstelle werden die Fixkosten abhängig von der getankten Menge berücksichtigt. In der Annahme, dass die Tankstelle max. 380 kg Wasserstoff pro Tag vertankt, also eine 80 % Gesamtauslastung besitzt, werden von den Prototyptraktoren nur etwa 2 % der jährlichen Gesamtleistung benötigt.

Bei reiner Betrachtung des Wasserstoffbedarfs und des Arbeitszeitbedarfs wurde in [3] gezeigt, dass mit den meisten Betankungsvarianten im Vergleich zum H2Agrar Szenario Kosten eingespart werden können. Im Idealszenario „BTW 700 bar“ ist eine Reduktion der Arbeitszeit des Traktors von etwa fünf Prozent möglich. Eine Ausnahme stellt der Tankcontainer mit 300 bar dar. In dem Szenario sind aufgrund der geringen Tankkapazität des Traktors häufige Unterbrechungen der Feldarbeit notwendig, um Wasser-

stoff nachzutanken. Die Arbeitszeit und der Wasserstoffbedarf sind in diesem Fall höher als im Basisszenario H2Agrar.

Um die beschriebenen Betankungsszenarien nun ganzheitlicher zu betrachten, sind in Abbildung 2 die saisonalen Gesamtkosten dargestellt. Um die Varianten vergleichen zu können, sind die Kosten auf die gesamte bewirtschaftete Fläche der beiden Betriebe normiert. Es zeigt sich, dass alle Szenarien höhere jährliche Kosten als das Basisszenario verursachen. Die Mehrkosten der HAA und der beiden Varianten des BTW liegen zwischen 10 € und 40 € pro Hektar. Die Containerlösungen, insbesondere die 300 bar Variante, zeigen die höchsten Mehrkosten. Im Falle des 300 bar Tankcontainers sind diese um 150 € pro Hektar höher als im Basisszenario.

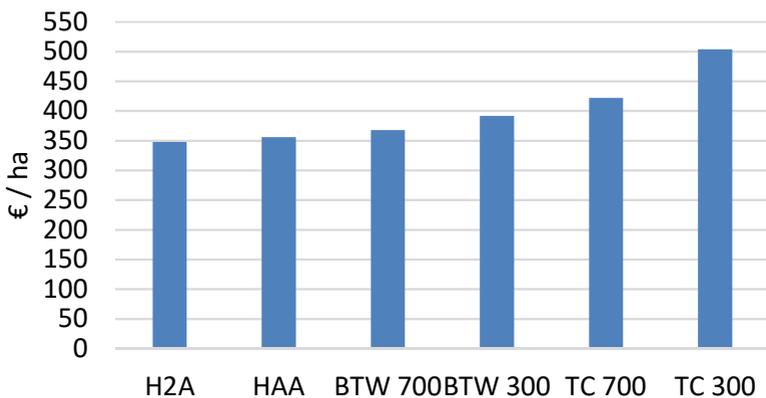


Abbildung 2: Kosten der Betankungsvarianten für beide landwirtschaftliche Betriebe pro Anbausaison

### 3.3 Interpretation der Ergebnisse

Die Betrachtung der saisonalen Kosten, die durch die Infrastruktur, Energieträger, Maschinen und Arbeitskraft entstehen, zeigt, dass alle alternativen Betankungskonzepte im Anwendungsumfeld des H2Agrar Projektes keine

Kosteneinsparungen ermöglichen. Die Kosten des Basisszenarios werden dadurch begünstigt, dass der Wasserstoffbedarf durch die Landwirte deutlich geringer als die Kapazität der Tankstelle ausfällt. So fallen die anteiligen Kosten der Tankstelle für die beiden Landwirte gering aus, obwohl die in diesem Szenario notwendigen Investitionen derzeit am höchsten sind. In Zukunft könnten die Kosten für Wasserstofftankstellen und mobile Abfüllanlagen (bspw. Tankcontainer) aufgrund der größeren Verbreitung und Skaleneffekten sinken. Die Variante der Hofabfüllanlage zeigt nur geringen Mehrkosten gegenüber dem Basisszenario. Unter der Annahme eines vergleichbaren Wasserstoffpreises, ist diese Art der Betankung eine am ehesten geeignete Alternative. Es ist dennoch zu beachten, dass die zusätzlichen Kosten, die bei allen Varianten entstehen, im Kontrast zur eingesparten Arbeitszeit stehen. Wie bereits gezeigt, weisen die meisten Betankungsszenarien eine Reduktion der für die Bearbeitung der Felder benötigten Zeit auf. Durch reduzierte Fahrten zur Tankstelle und zusätzliche Tankzeiten kann für den Landwirt insbesondere in zeitkritischen Phasen die durch die Betankungskonzepte gewonnene Flexibilität ein Vorteil sein. Diesen gilt es im Anwendungsfall gegenüber den Mehrkosten abzuwiegen.

Es gilt auch zu beachten, dass aufgrund der relativ gesehen geringen Entfernung der beiden landwirtschaftlichen Betriebe zur Tankstelle im H2Agrar Projekt keine großen Kosteneinsparungen möglich sind. Das Szenario im Projekt stellt für die Versorgung mit Wasserstoff einen Idealfall dar, der monetär betrachtet keine Notwendigkeit für Betankungsvarianten erfordert. Für den Fall, dass sich ein landwirtschaftlicher Betrieb in deutlich weiterer Entfernung zu einer öffentlichen Tankstelle befindet, werden der zusätzliche Zeitaufwand und der damit einhergehende Wasserstoffbedarf die Kosten erhöhen. In diesem Fall gewinnen alternative Betankungskonzepte an Relevanz. Insbesondere in Hinblick auf die möglicherweise auch zukünftig geringe flächendeckende Wasserstoffinfrastruktur bieten Betankungskonzepte Potential zur Versorgung eines Brennstoffzellen-Traktors.

Weiter gilt die Entwicklung des Endkundenpreises von Wasserstoff als wichtiger Faktor für die im Betrieb anfallenden variablen Kosten. Der für die Kostenrechnung verwendete Wasserstoffpreis von 17,75 €/kg ist ein derzeit für (grauen) Wasserstoff aufgerufener Preis. Grüner Wasserstoff ist in Deutschlands bestehenden Wasserstofftankstellen derzeit nicht überall verfügbar. Die Wirtschaftlichkeit von grünem und grauem Wasserstoff wird in erheblichem Maße durch den CO<sub>2</sub>-Preis beeinflusst, der durch den zukünftigen Zertifikatehandel bestimmt wird. In Anbetracht einer fortschreitenden Skalierung der Elektrolyseurproduktion ist davon auszugehen, dass die Investitionskosten für Elektrolyseure tendenziell sinken werden. Diese erwartete Reduktion der Investitionsaufwendungen, kombiniert mit einem Anstieg der CO<sub>2</sub>-Preise, ist essenziell, um die Wettbewerbsfähigkeit von grünem Wasserstoff gegenüber grauem Wasserstoff sowie anderen Energieträgern zu gewährleisten. [20] Im Rahmen des Projektes wurden zusätzlich die Kosten, die pro vertanktem Kilogramm Wasserstoff entstehen, untersucht. Dabei wurden die tatsächlichen Anschaffungskosten der Projekt-tankstelle betrachtet. Es zeigt sich deutlich, dass mit zunehmender vertankter Menge an Wasserstoff, die auf den Endkunden zukommenden Kosten des Energieträgers sinken.

Für beide Betriebe zusammen ergibt sich ein durchschnittlicher Standarddeckungsbeitrag (SDB) nach dem KTBL für das Jahr 2022/2023 für alle Verfahrensketten (Weizen, Gerste, Roggen, Silomais, Kartoffeln und Zuckerrüben) von 3790 €/ha [21]. Die saisonalen Kosten für die betrachteten Szenarien auf den beiden Betrieben nur für die Traktoren belaufen sich zwischen 9 und 13 % des SDBs der angebauten Kulturen. Analog wurde der aktuelle Status quo mit ausschließlich Dieselmotoren betrachtet. Die Kosten der Dieselmotoren beider Betriebe würden sich auf etwa 232 €/ha pro Saison belaufen und sind damit etwa halb so groß wie das günstigste Wasserstoff-szenario.

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Im Forschungsprojekt H2Agrar wurde gezeigt, wie eine lokale Wasserstoffwirtschaft basierend auf erneuerbaren Energien aussehen kann. Durch die zielführende Zusammenarbeit aller Projektpartner konnte ein solches Vorhaben demonstriert und erprobt werden. Als Anwendungsfall wurde ein Brennstoffzellen-Traktor von AGCO/Fendt mit 100 kW Leistung aufgebaut, der an der durch die CEC Haren gebauten öffentlichen Tankstelle Druckwasserstoff betankt werden kann. Aktuell ist Wasserstoff jedoch als Energieträger für Antriebe in landwirtschaftlichen Maschinen in der Breite im ländlichen Raum aufgrund der flächendeckend fehlenden Infrastruktur praktisch nicht einsetzbar. Die Kosten der Wasserstoffproduktion sind weiter ein entscheidender Faktor für die Umsetzung der neuen Antriebstechnologie.

Um der Herausforderung der geringen Energiespeicherkapazität des Wasserstoffes für den Anwendungsfall eines Brennstoffzellen-Traktors entgegenzuwirken, werden alternative Betankungskonzepte für den ländlichen Raum in Betrachtung gezogen. Mittels geeigneter Verfahrenssimulation werden die Betankungskonzepte im landwirtschaftlichen Verfahren simuliert. Zum Vergleich der Konzepte werden die jeweiligen saisonalen Gesamtkosten, die sich aus den fixen und variablen Kosten ergeben, bestimmt. Dabei zeigt sich, dass die Kosten der alternativen Betankungskonzepte im Anwendungsfall des Projektumfeldes H2Agrar höher als im Falle der ausschließlichen Verwendung der Projekt-tankstelle ausfallen. Die Gesamtkosten sind zudem auch von der Auslastung der jeweiligen Betankungsinfrastruktur abhängig. Dennoch gilt es, die Mehrkosten gegenüber der gewonnenen Flexibilität abzuwägen. Insbesondere bei zeitkritischen Feldarbeiten haben Wasserstofftraktoren im Vergleich gegenüber konventionell betriebenen Maschinen den Nachteil einer geringeren mitführbaren Energie. Dieser kann durch ein geeignetes Betankungskonzept ausgeglichen werden.

Durch die Entwicklung eines innovativen Wasserstofftanks von Röchling Industrial kann auch in Zukunft die Wasserstoffverteilung über das Projektumfeld hinaus erfolgen und auch anderen Abnehmern zur Verfügung gestellt werden. Zukünftig ist zu untersuchen, ob eine Skalierung der Betankungskonzepte auf einen größeren Nutzerkreis zu einer weiteren Reduktion der Kosten für den einzelnen Landwirt führen kann. Insbesondere die betrachteten Konzepte eines Tankcontainers und des Betankungs-Lkws bieten neue Marktperspektiven.

## Literatur

- [1] Böhm, J.: Vergleich der Flächenenergieerträge verschiedener erneuerbarer Energien auf landwirtschaftlichen Flächen – für Strom, Wärme und Verkehr (2023).
- [2] N.N.: H-TEC ME450. URL: [https://www.h-tec.com/fileadmin/user\\_upload/produkte/produktseiten/ME450-1400/spec-sheet/H-TEC-Datenblatt-ME450-DE-23-08.pdf](https://www.h-tec.com/fileadmin/user_upload/produkte/produktseiten/ME450-1400/spec-sheet/H-TEC-Datenblatt-ME450-DE-23-08.pdf), Zugriff am: 23.09.2024.
- [3] VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.): LAND.TECHNIK AgEng 2023 – The Forum for Agricultural Engineering Innovations : November 10th - 11th 2023, Hannover. VDI-Berichte, Bd. 2427, Düsseldorf: VDI Verlag 2023, DOI: 10.51202/9783181024270.
- [4] Wissenschaftlicher Verein für Mobile Arbeitsmaschinen, Marcus Geimer, Christian Kunze (Hrsg.): Hybride und energieeffiziente Antriebe für mobile Arbeitsmaschinen : 9. Fachtagung, 28. Februar 2023, Karlsruhe.
- [5] H2 MOBILITY Deutschland GmbH & Co. KG: H2.LIVE: Wasserstofftankstellen in Deutschland & Europa. URL: <https://h2.live/>, Zugriff am: 09.09.2024.
- [6] Apostolou, D.; Xydis, G.: A literature review on hydrogen refuelling stations and infrastructure. Current status and future prospects. Renewable and Sustainable Energy Reviews 113 (2019), S. 109292.

- [7] Schmidt, T.: Wasserstofftechnik – Grundlagen, Systeme, Anwendung, Wirtschaft. Hanser eLibrary, München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG 2020, DOI: 10.3139/9783446465992.
- [8] Eckel, H.; Remmele, E.; Frerichs, L.; Hipp, J.; Müller-Langer, F.; Schröder, J.: Verwendung erneuerbarer Antriebsenergien in landwirtschaftlichen Maschinen. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (Hrsg.), Darmstadt 2023.
- [9] Wystrach GmbH: Datenblatt WyRefueler 350/120. URL: [https://www.nweurope.eu/media/4386/181012\\_datenblatt\\_wyrefueler.pdf](https://www.nweurope.eu/media/4386/181012_datenblatt_wyrefueler.pdf), Zugriff am: 23.11.2022.
- [10] N.N.: Factsheet zur mobilen Wasserstofftankstelle in Kooperation mit NanoSun (Prototyp). Münster.
- [11] Bayo Tech: BayoTech ProductSheet GTM\_Hydrogen. URL: [https://go.bayotech.us/hubfs/BayoTech\\_ProductSheet\\_GTM\\_Hydrogen.pdf](https://go.bayotech.us/hubfs/BayoTech_ProductSheet_GTM_Hydrogen.pdf), Zugriff am: 28.11.2022.
- [12] N.N.: Wraps come off hydrogen refueller as JCB unveils industry first. URL: <https://www.jcb.com/en-gb/news/2022/10/wraps-come-off-hydrogen-refueller-as-jcb-unveils-industry-first>, Zugriff am: 29.11.2022.
- [13] Batarow Hydrogen: T-7 - Batarow Hydrogen. URL: <https://h2-batarow.com/wasserstoff-h2-tankstellen/t-7>, Zugriff am: 09.09.2024.
- [14] Hiß, M.; Schroers, J. O.: Die Lohnansätze des KTBL. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (Hrsg.), Darmstadt 2024.
- [15] KTBL (Hrsg.): Betriebsplanung Landwirtschaft 2016/17 – Daten für die Betriebsplanung in der Landwirtschaft. 25. Auflage, Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft 2016.
- [16] Herzog, I.: Westfalen präsentiert mobile Wasserstoff-Tankstelle. URL: <https://www.mobility-impacts.de/h2weekly/nachrichten/detail/news/westfalen-praesentiert-mobile-wasserstoff-tankstelle-1.html>, Zugriff am: 09.09.2024.

- [17] S. M. Aceves, G. Berry, and A. Weisberg: Lawrence Livermore National Laboratory: Inexpensive Delivery of Compressed Hydrogen with Advanced Vessel Technology.
- [18] Bundesministerium der Finanzen: AfA-Tabelle für den Wirtschaftszweig "Landwirtschaft und Tierzucht", 19.11.1996.
- [19] N.N.: Mobile Wasserstofftankstelle: Flexibel, robust und kostengünstig. URL: <https://www.westfalen.com/de/de/wasserstoff-fuer-die-energie-wende/wasserstoff-als-kraftstoff/mobile-wasserstofftankstelle>, Zugriff am: 09.09.2024.
- [20] Bühler, L.; Möst, D.; Scharf, H.: Grüner Wasserstoff: Wie steht es um die Wirtschaftlichkeit und welche Nachfrage lässt sich erwarten? ifo Dresden berichtet 2023 (30) H. 4, S. 16-22.
- [21] Sauer, N.; Hardeweg, B.: Standarddeckungsbeiträge (SDB) – Kalkulation der Rechenwerte zur Betriebsklassifizierung nach der EU-Typologie. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (Hrsg.), Darmstadt 2019.



# Entwicklung skalierbarer Systeme – Baukasten für Brennstoffzellensysteme in mobilen Anwendungen

*Christoph Konkol<sup>1</sup>, Timo Reuter<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> *GreenIng GmbH & Co. KG, Leutenbach, Deutschland*

## Kurzfassung

Die Entwicklung skalierbarer Systeme im Baukastenprinzip bietet zahlreiche Vorteile, darunter Skaleneffekte, Flexibilität, reduzierte Entwicklungszeiten und -kosten sowie eine schnellere Markteinführung. Diese Ansätze sind besonders relevant für die Entwicklung von fahrzeugspezifischen Brennstoffzellensystemen, die aus komplexen Systemen von Balance-of-Plant (BoP)-Komponenten bestehen. Durch die Anwendung dieser Strategien können sowohl große als auch kleine Fahrzeughersteller von den wirtschaftlichen und technischen Vorteilen profitieren, was die Einführung nachhaltiger Mobilitätslösungen fördert.

Als Beispiel für die Entwicklung skalierbarer Brennstoffzellensysteme wird das im Oktober 2024 abgeschlossene Forschungsprojekt SkalITABs näher vorgestellt.

**Schlagnworte:** Baukastenprinzip, Brennstoffzellensysteme, Skalierbarkeit

## 1 Einleitung

Die steigenden Anforderungen an nachhaltige und effiziente Energielösungen erfordern innovative Ansätze in der Entwicklung von Antriebssystemen. Besonders im Bereich der Nutz- und Sonderfahrzeuge sind alternative Antriebssysteme wie Brennstoffzellen von großer Bedeutung, um die Umstellung in der Mobilität zu effizienteren und umweltfreundlicheren Antriebstechnologien zu erreichen. Das Baukastenprinzip bietet hier entscheidende Vorteile. Diese Ansätze ermöglichen es, Systeme flexibel und kosteneffizient zu gestalten, was die Markteinführung beschleunigt und die Entwicklungskosten senkt. Weiter führt diese Senkung der Entwicklungskosten und Entwicklungszeit dazu, dass vor allem mittelständische Hersteller von Nutz- und Sonderfahrzeugen, eine Entwicklung in einem neuen Technologiefeld anstoßen und für sich nutzbar machen können.

Zu diesem Zweck hat sich 2020 ein Konsortium aus Partnern der Industrie und wissenschaftlichen Instituten gebildet und sich für die Förderung des Projekts SkalTABS beworben. Der Start des bewilligten Projekts war im Juli 2021 und sollte innerhalb von drei Jahren bearbeitet werden.

## 2 Vorteile von skalierbaren Systemen im Baukastenprinzip

Die Plattformstrategie und das Baukastenprinzip bieten zahlreiche Vorteile, die die Entwicklung und Implementierung von Brennstoffzellensystemen und Traktionsbatterien unterstützen:

1. **Skaleneffekte:** Durch die Nutzung gemeinsamer Komponenten und Module können Unternehmen Skaleneffekte erzielen, was zu Kosteneinsparungen und effizienteren Produktionsprozessen führt.

2. **Flexibilität und Anpassungsfähigkeit:** Modulare Produktplattformen ermöglichen es, Produkte schnell und effizient an spezifische Kundenanforderungen anzupassen, ohne die gesamte Systemarchitektur neu entwickeln zu müssen.
3. **Reduzierte Entwicklungszeiten und -kosten:** Die Wiederverwendung von Modulen und Komponenten verkürzt die Entwicklungszeiten und senkt die Kosten, da weniger neue Teile entwickelt werden müssen.
4. **Markteinführungszeit:** Durch die effiziente Nutzung von Plattformen können neue Produkte schneller auf den Markt gebracht werden, was einen Wettbewerbsvorteil darstellt.

### 3 **SkalTABS: Skalierbares Thermomanagement und Antriebsstrang für Brennstoffzellen-Nutzfahrzeuge**

#### **Problembeschreibung**

Geänderte gesetzliche Rahmenbedingungen sowie steigendes Umweltbewusstsein erfordern auch für den Nutzfahrzeugbereich innovative, effiziente und umweltschonende Antriebskonzepte. Die aus den Use Cases abgeleiteten technischen Anforderungen an die Fahrzeuge unterscheiden sich grundlegend von klassischen Pkw-Anwendungen. Insbesondere die hohe täglich benötigte Reichweite oder Einsatzdauer, die hohe notwendige Verfügbarkeit, längere Fahrzeug- und damit Komponenten-Lebensdauern sind hier zu nennen. Gleichzeitig sind für eine Marktakzeptanz wettbewerbsfähige Total-Costs-of-Ownership (TCO) erforderlich.

Diese geänderten Randbedingungen führen dazu, dass das Thema der alternativen Antriebssysteme für Nutzfahrzeuge aktuell technologieoffener diskutiert und erforscht wird als bei Pkw, bei denen mittelfristig ein klarer Trend zu batterieelektrischen Lösungen absehbar ist. Die Anwendung von Batterien als Energiespeicher für Nutzfahrzeuge, wie beispielsweise beim

Tesla Semi vorgestellt, weist den Nachteil einer hohen benötigten Batteriekapazität auf, um die benötigten Reichweiten mit dem der erforderlichen Nutzlast zu erreichen. Dies führt zu hohen initialen Kosten sowie einem hohen Fahrzeuggewicht. Das Laden führt selbst bei den diskutierten Schnellladekonzepten zu langen unproduktiven Stillstandzeiten des Fahrzeugs und erfordert entsprechende Ladeinfrastrukturen mit sehr hohen Anschlussleistungen, gerade entlang der Autobahnen.

Große Chancen insbesondere für den Langstrecken-Schwerlastverkehr aber auch im Bereich der Sonderfahrzeuge werden Brennstoffzellen-Nutzfahrzeugen eingeräumt. Sie vereinen die Vorteile der hohen Energiedichte des Energieträgers Wasserstoff mit einer lokalen Emissionsfreiheit der Fahrzeuge. Der Tankvorgang kann bei entsprechender Gestaltung der Speichersysteme sowie der Infrastruktur zügig durchgeführt werden. Neben den Forschungsgebieten der Wasserstoffherzeugung, des -transports und der -bereitstellung erfordern wasserstoffbetriebene Nutzfahrzeuge grundlegend neue Systemarchitekturen und Komponenten im Vergleich zu dieselbetriebenen Fahrzeugen nach dem Stand der Technik.

### **3.1 Gesamtziel**

Hier setzt das Projekt SkalTABS an. In diesem werden skalierbare Powertrain- und Thermomanagement-Architekturen sowie die zugehörigen Hardware-Komponenten für zukünftige Antriebsstränge von Brennstoffzellen-Nutzfahrzeugen erforscht und demonstriert. Ziel ist Erhöhung der Reichweite und der Effizienz sowie die Senkung der TCOs von Nutzfahrzeugen mit Brennstoffzellenantrieb. Im Bereich des Powertrains sind hier gesamtenergetisch optimale Systemkonfigurationen zu vergleichen und zu bewerten und die Anforderungen an die skalierbaren Komponenten abzuleiten. Dies beispielsweise für die Brennstoffzelle selbst, den Antriebsstrang bestehend aus Motor und Umrichter, etwaige Stützbatterien sowie für alle Nebenaggregate. Für das Thermomanagement werden ganzheitliche VTMS-Architekturen konzipiert, methodisch untersucht und bewertet und hieraus

Kühlkonzepte und Komponentenspezifikationen abgeleitet. Ein besonderer Fokus wird hierbei auf das Thermomanagement der Brennstoffzelle selbst sowie auf die Nutzbarmachung der erzeugten Abwärme, beispielsweise für die Klimatisierung weiterer Komponenten oder der Fahrerkabine, gelegt.

Ein zentrales Alleinstellungsmerkmal des Projektes ist hierbei, dass eine flexible und skalierbare Gestaltung des Brennstoffzellen-Antriebs sowie der zugehörigen Powertrain- und Thermomanagement-Komponenten adressiert wird. Die erarbeiteten Lösungen sollen somit ein möglichst breites Spektrum an Fahrzeugklassen abdecken wie beispielsweise (kommunale) Sonderfahrzeuge, Fahrzeuge für die innerbetriebliche Logistik oder den Transportverkehr. Zu Projektbeginn werden Use Cases und Einsatzprofile von repräsentativen Fahrzeugklassen und Fahrzeugherstellern gesammelt, geclustert und übergreifende Spezifikationen abgeleitet. Hierzu wird ein herstellerübergreifender Beraterkreis von Fahrzeugherstellern eingerichtet.

Durch diesen skalierbaren Architekturansatz sollen die Projektergebnisse einen Beitrag leisten um Brennstoffzellen-Antriebsstränge kosteneffizient für größere OEMs zu gestalten aber diese insbesondere auch zugänglich für kleinere Fahrzeughersteller zu machen. Somit sollen die Projektergebnisse dazu beitragen die Einstiegshürden für umweltschonende Antriebssysteme gerade für kleinere OEMs zu senken, da die initialen Entwicklungskosten für einen spezifischen Antriebsstrang für solche Firmen ansonsten finanziell kaum zu tragen sind.

### **3.2 Wissenschaftliche und/oder technische Arbeitsziele des Vorhabens**

- Erarbeitung skalierbarer Thermomanagement- und Powertrain-Architekturen, die durch ihre Flexibilität eine möglichst breite Variantenanzahl an Nutzfahrzeugen abdecken können. Dies soll eine effizi-

ente, leise und lokal-emissionsfreie Elektrifizierung einer breiten Fahrzeugpalette ermöglichen.

- Erforschung und prototypische Realisierung skalierbarer Komponenten für Brennstoffzellen, Brennstoffzellen-Nebenaggregate und Powertrain-Komponenten auf Basis der erarbeiteten Nutzfahrzeug-Architekturen.
- Demonstration und experimentelle Charakterisierung des erarbeiteten Nutzfahrzeug-Antriebsstranges (inklusive kompletten Brennstoffzellen-Stack).

### **3.3 Bezug des Vorhabens zu den förderpolitischen Zielen**

Das Projekt SkalTABS adressiert somit unmittelbar die Schwerpunkte der Förderausschreibung „Neue Fahrzeug- und Systemtechnologien“ in der „innovative Ansätze und Strategien zum Antriebs-, Energie- und Thermomanagement“ sowie „Antriebsstränge in ihrer Gesamtheit oder deren Einzelkomponenten für Fahrzeuge des Personen- und Güterverkehrs sowohl auf der Straße als auch auf der Schiene“ direkt angesprochen werden. Die Ergebnisse können einen relevanten Beitrag zur Erarbeitung notwendiger Technologien, deren Verfügbarmachung, gerade für kleinere Fahrzeughersteller, sowie zur Vernetzung von Industriepartnern, inklusive KMU, und Forschung in diesem Zukunftsbereich beitragen.

Die Ergebnisse von SkalTABS können einen Beitrag dazu liefern Emissionen im Straßenverkehr zu reduzieren da der skalierbare Ansatz den Einsatz von lokal-emissionsfreien Brennstoffzellen in einer breiten Auswahl an Nutzfahrzeugen ermöglicht.

SkalTABS adressiert klar das Ziel der Förderbekanntmachung wirtschaftliche, energieeffiziente, schadstoffarme und leise Mobilitätskonzepte zu erarbei-

ten. Gerade für kommunale Nutzfahrzeuge bietet dies auch die Möglichkeit die Lärmbelastigung in den Innenstädten zu reduzieren.

SkalTABS ermöglicht die Einbindung und übergreifende Vernetzung von führenden Wirtschaftsunternehmen, KMUs und Forschungsinstituten im Bereich innovativer und Klima-schonender Nutzfahrzeug-Antriebssysteme. Dabei ermöglicht die Förderung hier die Zusammenarbeit und schafft den Rahmen für eine enge und Firmen-übergreifende Kooperation. Adressiert werden hier die wichtigen Zukunftsfelder Wasserstofftechnologie und Brennstoffzellensysteme für mobile Anwendungen. Dadurch, dass ein starkes internationales Marktwachstum dieser Technologien in den nächsten Jahren erwartet wird, werden die Ergebnisse die Innovationskraft im Wirtschaftsstandort Deutschland zukünftig stärken. Die Nutzung von Wasserstoff ist als einer der vielversprechendsten Ansätze für die Elektrifizierung von Nutzfahrzeugen anzusehen, aufgrund der Möglichkeit größere Energiemengen zu speichern und schnell aufzutanken.

### **3.4 Ausführliche Projektbeschreibung**

Brennstoffzellenbetriebene Nutzfahrzeuge unterscheiden sich in ihren Anforderungen, Komponenten und Architekturen grundlegend von dieselbetriebenen Modellen nach Stand der Technik oder auch von batterieelektrischen Fahrzeugen. Die Erzeugung der elektrischen Energie für den Antriebsstrang des Fahrzeuges erfolgt durch Umwandlung von chemisch gespeicherter Energie aus Wasserstoff mit Sauerstoff in der Brennstoffzelle (zumeist PEM). Die Speicherung des Wasserstoffs erfolgt in Fahrzeuganwendungen zumeist in Drucktanks mit bis zu 700 bar. Bei diesem Prozess erzeugen die Brennstoffzellen auch große Mengen thermische Energie die quantitativ in einer ähnlichen Größenordnung zur erzeugten elektrischen Energie liegen. Diese Wärme muss aus der Brennstoffzelle durch entsprechende Kühlvorrichtungen abgeführt werden, um eine Überhitzung zu vermeiden. Gleichzeitig wird thermische Energie zur Beheizung der Fahrerkabine oder zum schnellen Erreichen der optimalen Betriebstemperatur der Komponen-

ten bei kalten Umgebungsbedingungen benötigt. Dieses Beispiel verdeutlicht bereits, dass Thermomanagement- und Powertrain-Architektur in einem Brennstoffzellen-Fahrzeug multiple und komplexe wechselseitige Abhängigkeiten aufweisen. Ein Systemoptimum kann nur durch eine ganzheitliche Betrachtung erzielt werden.

Hier setzt das Projekt SkalTABS an: Ziel ist die Erforschung skalierbarer Thermomanagement- und Powertrain-Architekturen sowie der hierfür benötigten Komponenten die durch ihre Flexibilität eine möglichst große Variantenanzahl an Nutzfahrzeugen abdecken können.

Besonderer Fokus liegt im Projekt daher auf der Anforderungsphase bei der zunächst unter Einbeziehung eines Beraterkreises von Fahrzeugherstellern Use Cases und Spezifikationen von für Brennstoffzellen relevanten Nutzfahrzeugklassen gesammelt werden. Auf dieser Basis wird ein Skalierungskonzept erarbeitet mit dem Ziel einer möglichst hohen Abdeckung der fahrzeugklassenübergreifenden Anforderungen. Technisch/wirtschaftliche Limitierungen des Skalierungsansatzes, z.B. aufgrund von unterschiedlichen Profilen oder Leistungsanforderungen, sollen identifiziert und mögliche Lösungsansätze diskutiert werden.

Die finalisierten fahrzeugübergreifenden Anforderungen sind sowohl der Input für die Erarbeitung der ganzheitlichen Powertrain- und Thermomanagement-Architektur als auch für die Erforschung und prototypische Realisierung von zugehörigen und skalierbaren Brennstoffzellen- und Powertrain-Komponenten.

Die sich hieraus ergebenden Projektschwerpunkte werden nachfolgend detaillierter beschrieben.

### **3.4.1 Optimierte und skalierbare Thermomanagement- und Powertrain-Architektur**

Zu Beginn des Projektes werden die relevanten Schnittstellen zwischen skalierbarer Thermomanagement- und Powertrain-Architektur identifiziert

und die Modellkopplung beziehungsweise der Datenaustausch definiert. Ebenso erfolgt die gemeinsame Festlegung der Bewertungskriterien.

Zur Erarbeitung einer ganzheitlich optimierten Thermomanagement Architektur erfolgt zunächst die Erstellung eines eindimensionalen thermischen Simulationsmodells für das Brennstoffzellensystem und für die Integration in eine übergeordnete Simulationsumgebung zur Auslegung des Thermomanagements auf Fahrzeugebene.

Die Umsetzung erfolgt über eine detaillierte dreidimensionale Untersuchung aller relevanten Geometrien und Systeme der Brennstoffzelle, um für alle Zonen innerhalb der Brennstoffzelle zum einen die Vermeidung von "hot-spots" für den Bauteilhitzeschutz und zum anderen die thermische Betriebssicherheit in allen Betriebspunkten sicherzustellen. Dazu werden für die jeweiligen Komponenten elektro-thermische Modelle erzeugt. Das Ergebnis ist zum einen die erzeugte Wärmemenge, die über das Kühlungssystem abgeführt werden muss sowie zum anderen der Druckverlust in den Komponenten oder dem Subsystem.

Auf dieser Basis wird eine generische 1D Simulationsarchitektur für die Anforderungen an die Konditionierung des gesamten Antriebstrangs und für Aspekte der Klimatisierung erstellt. Der modulare und flexible Aufbau der Simulationsarchitektur erlaubt eine schnelle und valide Betrachtung von verschiedenen möglichen Systemvarianten und den damit verbundenen Technologien. Die Simulationsumgebung beinhaltet alle betroffenen Komponenten (Brennstoffstellen-Stack, Batterie, E-Motoren und Inverter sowie Leistungselektronik, Klimagerät und Kältemittelkreis) für eine Gesamtbeurteilung des Antriebstrangs hinsichtlich der Energieeffizienz und einer Kostenvalidierung. Für die Umsetzung dieses Simulationsbaukastens können alle Modelle innerhalb der Systemgrenzen für die Einzelkomponenten skalierbar integriert werden.

Die Architekturbewertung des Hochvolt-Antriebsstrangs inklusive der zugehörigen Komponenten erfolgt ebenfalls in Bezug auf die definierten Use

Cases und Anforderungen. Fragestellungen sind hierbei beispielsweise die optimale Wahl der Spannungslevel der unterschiedlichen (Teil-)Bordnetze des Fahrzeugs und die sich daraus ergebenden Anforderungen und Eigenschaften der Komponenten. Mittels simulativ gestützter Analyseverfahren basierend auf Komponentenmodellen werden verschiedene praxis- und zulassungsrelevante Mission Profiles für die unterschiedlichen Fahrzeugklassen untersucht. Zusätzlich werden hiermit neuartige Ansteuerungsverfahren untersucht zur Verlustreduzierung des Gesamtsystems, beispielsweise durch dynamische Spannungsstellung des Brennstoffzellenwandlers.

Die ganzheitliche Bewertung und finale Auswahl der kombinierten Powertrain- und Thermomanagement-Architektur erfolgt nach gemeinsam definierten Bewertungskriterien wie Skalierbarkeit, Effizienz, Übertragbarkeit für verschiedene Fahrzeugklassen, Komponentenaufwand, Komplexität und Kosten.

### **3.4.2 Skalierbare Komponenten für Powertrain, Brennstoffzelle und Brennstoffzellen-Nebenaggregate**

Basierend auf den Fahrzeuganforderungen und den im Projekt erarbeiteten Architekturen werden die Anforderungen an die benötigten skalierbaren Komponenten in den Bereichen Powertrain, Brennstoffzelle und Brennstoffzellen-Nebenaggregate erarbeitet.

# Autonomes Batteriesystem zur Bewertung und Zukunftsprognose von Traktionsbatterien – ein datengesteuerter Ansatz

Andreas Herkommer<sup>1</sup>, Dirk Schuhmann<sup>2</sup>, und Markus Merkel<sup>1</sup>



<sup>1</sup> Zentrum für virtuelle Produktentwicklung, Hochschule Aalen, Beethovenstraße 1, 73430 Aalen, Deutschland

<sup>2</sup> Ingenieurbüro Weigel, Hauptstraße 48, 74595 Langenburg, Deutschland

## Kurzfassung

Der zunehmende Einsatz elektrifizierter Fahrzeuge im On-Road- und NRMM (Non Road Mobile Machinery) -Sektor, in Kombination mit den kontinuierlichen Fortschritten in der Batterietechnologie und dem exponentiellen Wachstum dieser Fahrzeugkategorie, erfordert eine präzise und unabhängige Evaluierung der Leistungsfähigkeit und Lebensdauer von Traktionsbatterien. Da teil- oder vollelektrifizierte Fahrzeuge stark preissensibel sind, gewinnt die Genauigkeit solcher Bewertungen an Bedeutung. In diesem Beitrag wird ein vollständig digitalisiertes, autarkes Batterietestsystem vorgestellt, das eigenständig Originaldaten von Traktionsbatterien erfasst und analysiert. Durch die Integration von Künstlicher Intelligenz ist das System in der Lage, auf Basis weniger Messpunkte präzise Leistungsprognosen zu erstellen. Historische Daten und Ladezyklen werden erfasst, um Fehlfunktionen und ungewöhnliche Nutzungsmuster zu identifizieren, die auf eine Verschlechterung der Batteriegesundheit hinweisen könnten. Kurzfristig unterstützt das System die Routenplanung durch Berücksichtigung des aktuellen Batteriezustands, während es langfristig das Potenzial für

eine Second-Life-Nutzung der Batterien maximiert. Das vorgestellte Verfahren schafft Transparenz und liefert verlässliche Informationen zur mittelfristigen und langfristigen Leistungsfähigkeit von Traktionsbatterien.

**Schlagnworte:** Batterietestsystem, Batterielebenszustand, Künstliche Intelligenz, Maschinelles Lernen

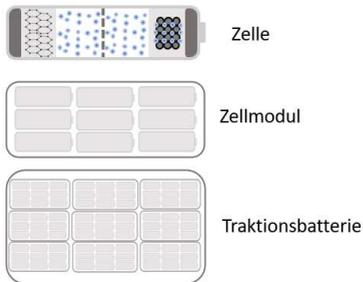
## 1 Einleitung

Die kontinuierliche Entwicklung der Batterietechnologie, charakterisiert durch steigende Energiedichten und reduzierte Ladezeiten, ermöglicht zunehmend eine effizientere Energiespeicherung und bildet eine entscheidende Grundlage für die fortschreitende Elektrifizierung der Mobilität [1]. Die technologischen Fortschritte führen zu einer wachsenden Vielfalt an Batterietopologien, die sich hinsichtlich Leistungsfähigkeit und Komplexität dynamisch weiterentwickeln. Prognosemodelle bestätigen die wachsende Relevanz der Elektromobilität und prognostizieren ein anhaltendes, exponentielles Wachstum elektrisch angetriebener Fahrzeuge [2, 3]. Der Einsatz von Traktionsbatterien hat sich gegenwärtig als bevorzugte Technologie im Vergleich zu alternativen Antriebssystemen in Personenkraftwagen etabliert, da ihre Integration mit erneuerbaren Energiequellen das Potential für eine nahezu emissionsfrei Mobilität bietet [4, 5]. Parallel dazu gewinnt die Integration bereits degradierter Batterien in Second-Life-Applikationen zunehmend an Bedeutung, da sie nicht nur die Nutzungsdauer verlängert, sondern auch die Ressourceneffizienz optimiert und zur Nachhaltigkeit des gesamten Batteriesystems beiträgt [6].

Die Evaluierung von Traktionsbatterien, die als Energiespeichersysteme speziell für den Einsatz in Fahrzeugen mit elektrischem oder hybridem Antrieb konzipiert wurden und der Versorgung des Elektromotors dienen, nimmt daher eine zunehmend bedeutende Rolle ein. Der derzeitige Markt wird maßgeblich von Lithium-Ionen-Batterien dominiert, die aufgrund ihrer hohen Energie- und Leistungsdichte, schnellen Ladefähigkeit sowie ihrer

langen Lebensdauer signifikante Vorteile im Vergleich zu anderen Batterietypen aufweisen [1, 2, 7]. Den Vorteilen dieser Batterietechnologie stehen jedoch die derzeit hohen Kosten der Traktionsbatterie gegenüber, die etwa 81 % der Gesamtkosten des Antriebsstrangs ausmachen [1]. Traktionsbatterien bestehen aus zahlreichen seriell und parallel verschalteten Zellen, die in Modulen zusammengefasst sind und die Energie auf elektrochemischer Basis speichern [8, 9] (s. Abbildung 1.1 a). Die Leistungsfähigkeit der Batterie wird grundlegend durch das Zusammenspiel der Zellkomponenten sowie durch deren spezifische Materialeigenschaften und Verschaltungsstrategie beeinflusst. Zur Bewertung des Batteriezustands werden üblicherweise der Ladezustand (State of Charge, SoC) und der Gesundheitszustand (State of Health, SoH) herangezogen (s. Abbildung 1.1 b).

**Aufbau einer Traktionsbatterie: Vom Einzelzellformat zur Batterieeinheit mit modularer Struktur**



**Vergleich zwischen State of Health (SOH) und State of Charge (SOC) bei Lithium-Ionen-Batterien**

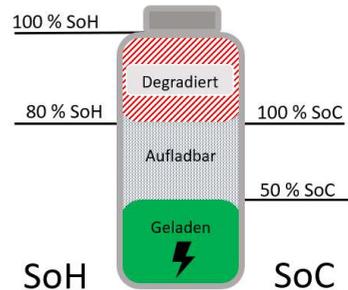


Abbildung 1.1: a) Aufbau einer Traktionsbatterie: Vom Einzelzellformat bis zur vollständigen Batterie bestehend aus Zellen und Modulen.  
 b) Vergleich von State of Charge (SOC) und State of Health (SOH): SOC beschreibt den aktuellen Ladezustand, während SOH den Alterungszustand und die verbleibende Leistungsfähigkeit der Batterie angibt.

Der State of Health ermöglicht eine quantitative Bewertung des allgemeinen Gesundheitszustandes sowie des Alterungsfortschritts und beschreibt das Maß, in dem die Batterie ihre ursprüngliche Kapazität und Leistungsfähigkeit

im Vergleich zum Neuzustand erhalten hat. Die Differenz zwischen dem ursprünglichen und dem aktuellen SoH-Wert stellt den degradierten Kapazitätsbereich dar, der aufgrund diverser Alterungseffekten für folgende Ladezyklen nicht mehr nutzbar ist. Dieser Verlust lässt sich segmentieren und kann sowohl kalendarischen als auch zyklischen Alterungsprozessen zugeordnet werden. Die kalendarische Lebensdauer wird durch Kapazitäts- und Leistungsverluste charakterisiert, die infolge chemischer Reaktionen auftreten und während der Inaktivitätsphase fortschreiten. Die zyklische Lebensdauer hingegen wird durch die Anzahl der Lade- und Entladezyklen definiert und korreliert direkt mit der Kapazitätsreduzierung [9]. Insofern stellt der SoH einen zentralen Parameter zur Evaluierung der Lebensdauer und der funktionalen Integrität von Batterien dar. Im Vergleich dazu charakterisiert der State of Charge den aktuellen Ladezustand in Relation zur gesamten verfügbaren Kapazität und ermöglicht eine Einschätzung der momentan verfügbaren Energiemenge der Batterie. Der SoC stellt somit eine Momentaufnahme des aktuellen Ladezustands der Batterie dar, während der SoH den langfristigen Gesundheitszustand und die Alterung der Batterie beschreibt. Da bislang eine einheitliche Definition des SoH fehlt, ist die Erfassung und Überwachung verschiedener Batterieparameter ein zentraler Forschungsbereich, wobei unterschiedliche Parameter zur Bewertung des Gesundheitszustands herangezogen werden (s. Abbildung 1.2).

### Relevante Parameter zur Bewertung des Gesundheitszustandes

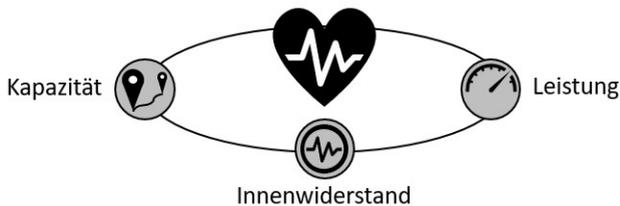


Abbildung 1.2: Relevante Parameter zur Bewertung des Gesundheitszustandes einer Batterie. Die zentralen Parameter, die üblicherweise zur Bestimmung des State of Health (SoH) herangezogen werden, sind Kapazität, Innenwiderstand und Leistung.

Eine Reduzierung der Kapazität, ein zentrales Merkmal der Batteriedegradation, führt zu einer Verringerung der verfügbaren Energiemenge der Batterie und somit zu einer Reduktion der Reichweite des Fahrzeugs. Die Kapazitätsverluste lassen sich in erster Linie auf chemische und mechanische Alterungsprozesse innerhalb der Batteriezellen zurückführen. Mit fortschreitender Alterung ist zudem eine Leistungsminderung der Traktionsbatterie zu erkennen, wodurch die Fähigkeit, Energie schnell bereitzustellen, eingeschränkt wird. Dies hat insbesondere Auswirkungen auf die Anforderungen des Antriebsstrangs, unter anderem bei Beschleunigungsvorgängen, bei denen eine hohe Leistungsabgabe erforderlich ist. Der zentrale Mechanismus, welcher für die Verringerung von Kapazität und Leistung verantwortlich ist, ist der Anstieg des Innenwiderstands, der sich negativ auf die verfügbare Spannung, den Strom sowie die Effizienz auswirkt. Insgesamt sind eine kontinuierliche Überwachung und Analyse dieser Parameter unerlässlich, um die Betriebsfähigkeit und Sicherheit der Batterien zu gewährleisten [10].

Die Bestimmung des SoH erfolgt aufgrund der Evaluierung verschiedener Parameter durch eine Vielzahl von Methoden und Technologien, die sowohl auf Messungen als auch auf Modellierungen basieren. Abbildung 1.3 veranschaulicht einige der gängigen Ansätze zur SoH-Bewertung [10].

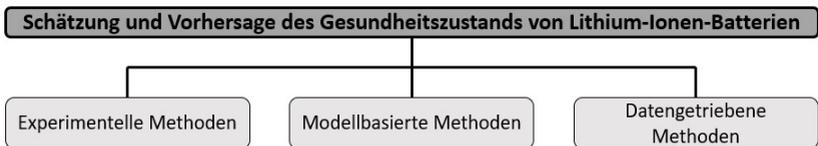


Abbildung 1.3: Unterteilung der Ansätze zur SOH-Vorhersage und Schätzung von Lithium-Ionen-Batterien: Experimentelle Methoden, Modellbasierte Methoden und Datengetriebene Methoden

Elektrochemische Tests wie die Impedanzspektroskopie und Coulomb-Zählung gelten unter Laborbedingungen als präzise Methoden zur

Bewertung von Batteriezellen [11-13]. Daneben existieren verschiedene modellbasierte Ansätze zur Bestimmung des Batteriezustands. Diese integrieren physikalische und chemische Prozesse, um Degradationsmechanismen auf Zell- oder Systemebene zu verstehen. Empirische Modelle, die auf experimentelle Daten basieren, stellen mathematische Beziehungen zwischen Betriebsparameter und dem SoH her, während datengetriebene Ansätze mittels maschinellen Lernens nichtlineare Zusammenhänge erfassen [13-15]. Diese Modelle bieten jedoch weniger Einblicke in die zugrunde liegende Degradationsmechanismen. Trotz Fortschritten in der Batterieforschung bleibt das mikroskopische Verständnis der Alterungsmechanismen unvollständig. Die Modelle sind häufig zeit- und kostenintensiv, da Alterungseffekte unter kontrollierten Laborbedingungen getestet werden müssen und schränkt ihre Anwendbarkeit in dynamisch realen Einsatzszenarien von Traktionsbatterien ein [15-17]. Zudem stellt die Ermittlung des SoH während des Betriebs eine Herausforderung dar, da Fahrzeug- und Batteriehersteller oft nur begrenzte Informationen bereitstellen und hauptsächlich Brutto- und Nettokapazität berücksichtigen [18]. Dynamische Belastungen jedoch, wie Rekuperation oder Schnellladeverfahren beschleunigen die Alterung der Batterien und beeinflussen den Kapazitätsverlust und die Leistungsfähigkeit [19]. Die Alterung von Batterien wird entscheidend durch die Nutzungsintensität und die Umgebungstemperaturen beeinflusst. Insbesondere extreme Betriebsbedingungen, wie eine anhaltende Vollast, extreme Umgebungstemperaturen oder verlängerte Standzeiten, tragen wesentlich zur Beschleunigung des Alterungsprozesses bei [18].

Eine verlässliche Bewertung von Batteriesystemen ist angesichts ihrer komplexen Struktur von zentraler Bedeutung. Derzeit fehlen jedoch standardisierte Verfahren zur einheitlichen Bestimmung des SoH für Traktionsbatterien, und die von Herstellern eingesetzten Methoden sind häufig zeitintensiv und führen zu variierenden Ergebnissen [2, 10, 19]. Bei Erreichen eines SoH von 80 % gilt eine Batterie als ungeeignet für den Fahrzeugeinsatz und wird in der Regel ausgetauscht. Eine systematische Klassifizierung

der Batterien eröffnet jedoch Potenziale für Second-Life-Applikationen, wodurch sowohl ökonomische als auch ökologische Vorteile erzielt werden können [18]. Im Rahmen dieses Beitrags wird ein methodischer Ansatz zur unabhängigen Analyse von Traktionsbatteriedaten vorgestellt und ermöglicht die Analyse von Batterie-Lebensdauerdaten und historische Einsatzdaten, um vertiefte Erkenntnisse über den Alterungsprozess und den Zustand von Batterien zu gewinnen.

## 2 Methodik

Das geplante Batterietestsystem ermöglicht eine herstellerunabhängige und autarke Erfassung sowie Analyse von Betriebsdaten der Traktionsbatterien in elektrischen Fahrzeugen (s. Abbildung 2.1). Die Grundlage bilden aufgezeichnete Lade- und Entladeintervalle, die eine präzise und schnelle Leistungsbewertung der Batterie unter realen Betriebsbedingungen zulassen. Mit einer zeitnahen Analyse innerhalb weniger Minuten als auch einer Prognose über potentiellen Second-Life-Applikationen unterscheidet sich diese Methodik von bestehenden Batterietestgeräten, die ebenfalls auf der Überwachung von Lade- und Entladezyklen basieren. Diese erfordern zeit- und energieintensive Auswertungen von Vollzyklen, bei denen die Batterie über mehrere Tage entladen werden muss [20]. Eine Anwendung in Prüfstellen ist aufgrund des erheblichen Aufwands sowie der zeitlichen Restriktionen nicht praktikabel. Daher werden kürzere Messungen angeboten, die jedoch auf Plausibilitätsprüfungen, Signalabfragen oder Auslesen von Ist-Werten basieren, bei denen keine Messungen erfolgen und ungenaue Ergebnisse erzielen [21]. Im Folgenden wird eine Methodik zur Datengenerierung, die Entwicklung der Prüfzyklen sowie die detaillierte Analyse der Batteriedaten beschrieben.

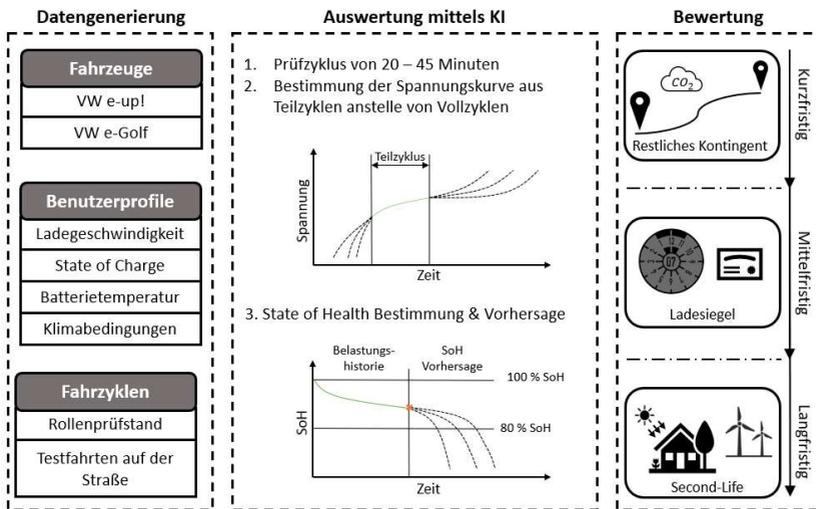


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung der Methodik des geplanten Batterietestsystems. Strukturierte Unterteilung in die Datengenerierung zur Entwicklung einer KI, die Auswertung der KI sowie die anschließende Bewertung der Traktionsbatterien.

## 2.1 Datengenerierung und Entwicklung der Prüfzyklen

Die Generierung der Daten erfolgte auf Basis von Fahrzyklen unter realen Bedingungen im öffentlichen Straßenverkehr sowie auf einem hochdynamischen Rollenprüfstand der Firma MAHA Maschinenbau Haldenwang GmbH. Im Straßenverkehr werden reale Betriebsdaten, darunter Geschwindigkeitsprofile, Beschleunigungs- und Verzögerungsmuster sowie Lade- und Entladevorgänge aufgezeichnet, welche typische Fahrbedingungen oder das Nutzungsverhalten abbilden. Aus den gewonnenen Erkenntnissen werden verkürzte Prüfzyklen entwickelt, welche die Nachbildung typischer Fahrbedingungen zum Ziel haben. Diese bestehen aus definierten Sequenzen von Beschleunigungs-, Verzögerungs- und Konstantfahrphasen, ergänzt durch Lade- und Entladevorgänge, welche auf dem Rollenprüfstand implementiert

werden, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Die Auswahl der Versuchsfahrzeuge zur Systematisierung der Traktionsbatterie-Topologien sowie der Lade- und Entladekurven erfolgt auf Basis des jeweiligen Batteriezustandes, um eine breite Variabilität in Kilometerständen und Alterungszuständen der Traktionsbatterie sicherzustellen. Eine Übersicht der aktuell verwendeten Versuchsfahrzeuge findet sich in Tabelle 2.1.

Tabelle 2.1: Auswahl der Versuchsfahrzeuge mit zusätzlichen Daten: Jahr der Herstellung

Merkmale	VW e-up! – 2022	VW e-up! – 2021	VW e-Golf
Jahr der Herstellung	2022	2021	2020
Motorleistung [kW]	61		100
Motordrehmoment [Nm]	212		290
Kapazität [kWh] / Reichweite [Km]	36.8 / 260		35.8 / 200
Leergewicht [kg]	1248		1615
Kilometerstand [Km]	2001	32539	20550

Motorleistung, Motordrehmoment, Kapazität/Reichweite, Leergewicht und Kilometerstand

Der eigentliche Batterietest und die Aufzeichnung der Daten für die Untersuchung und Bewertung von Traktionsbatterien erfolgt rein über die standardisierte On-Board-Diagnose (OBD)-Schnittstelle, die auf den Informationen des fahrzeugeigenen Diagnosesystem basiert. Das Batterietestsystem ist somit herstellerunabhängig und ermöglicht eine präzise Erfassung und Analyse relevanter Batteriedaten ohne zusätzlich verbaute Sensorik. Neben den aktuellen Batteriedaten werden über die OBD-Schnittstelle mithilfe einer Sniffing-Option historische Fahrzeugdaten erfasst. Die Primärdaten werden in mehrere Datenpfaden aufgezeichnet und ermöglichen eine visuelle Darstellung der Ladezustände und Nutzungsprofile der Traktionsbatterie, was eine tiefgehende Analyse des Batterieverhaltens ermöglicht. Die Batteriedaten selbst werden während des Prüzyklus über das Diagnosetool VCDS von Ross-Tech aufgenommen, das über eine USB-Verbindung an einen Rechner angeschlossen ist und die relevanten Parameter aufzeichnet. Zur

Vervollständigung werden neben den Batteriedaten verschiedene Umgebungsparameter wie die Außentemperatur oder die Luftfeuchtigkeit erfasst. Zur unabhängigen Bestimmung der Fahrzeuggeschwindigkeit während den Testfahrten auf der Straße wird das VBOX-Racelogic-Messsystem eingesetzt, das auf GPS-Daten mehrerer Satellitensysteme zugreift, um zusätzlich das Höhenprofil der Strecke zu erfassen.

## **2.2 Auswertung mittels Künstlicher Intelligenz**

Der Aufbau einer reproduzierbaren Messprozedur zur Bewertung von Traktionsbatterien stellt eine wesentliche Herausforderung in der Entwicklung moderner Batterietestsysteme dar. Im Hinblick auf die Bewertung von Traktionsbatterien wird ein datengetriebener Ansatz in Kombination mit künstlicher Intelligenz (KI) für die Interpretation unterschiedlicher Ladezyklen angewandt. Die KI dient dabei der Bestimmung und Vorhersage des Gesundheitszustandes sowie der Identifikation und Minimierung potentieller Einflussfaktoren während der Prüfzyklen, welche die Messung verfälschen könnten.

Die Auswertung erfolgt mit Hilfe eines Long Short-Term Memory (LSTM) Netzes, das speziell für die Modellierung von zeitlichen Abhängigkeiten in den Daten geeignet ist. Die Grundlage für diese Vorhersagen bilden Inputsequenzen, die entweder auf dem Rollenprüfstand oder im realen Straßenverkehr erfasst werden. Das LSTM-Netzwerk nutzt die gelernten Muster der zuvor gelernten Lade- und Entladekurven, um präzise Vorhersagen für die aktuellen Inputsequenzen zu generieren. Für die Optimierung der Trainingsergebnisse wird eine Bayes'sche Hyperparameteroptimierung eingesetzt. Mithilfe dieser Methode werden intelligent Hyperparameterkombinationen gesucht und ermittelt. Dadurch wird nicht nur die Effizienz des Trainingsprozesses gesteigert, sondern auch die Gesamtleistung des Modells erheblich verbessert.

Die Anwendung dieser Methoden bilden dabei die Basis zur Bereitstellung präziser Zustandsinformationen zur Batterie mit höherer Effizienz und schnelleren Ergebnissen. Die angestrebten Ziele werden durch eine Implementierung einer zentralen Datenbank erzielt, die spezifische Kennlinien und signifikante Belastungspunkte von Batterien einer einzelnen Topologie oder eines Fahrzeugtyps erfasst. Aufgrund der Heterogenität der Zellkomponenten sowie deren spezifischer Materialeigenschaften und Verschaltungsstrategie ist eine generalisierte Auswertung nicht möglich. Die gesammelten Daten erlauben eine laufende Optimierung und Verbesserung des Modells, was zu einer genaueren Bestimmung der Spannungskurven und des Gesundheitszustandes der Batterie führt. Insgesamt ermöglicht das LSTM-Netz eine Identifizierung der Alterungsprozesse sowie ineffiziente Nutzung, sodass eine präzise Bewertung in Bezug auf Leistungsfähigkeit und Lebensdauer möglich ist.

## **2.3 Bewertung der Traktionsbatterien**

Die gewonnenen Daten durch Nutzung des LSTM-Netzes sind Grundlage für die umfassende Bewertung batterie relevanter Parameter als auch statischer oder dynamischer Betriebsbedingungen des Fahrzeugs. Durch den Vergleich der ermittelten SoH-Daten mit den Referenzwerten identischer Fahrzeugmodelle kann eine modellbasierte Vorhersage des Batteriezustands erstellt werden. Für kommerzielle Nutzer, Flottenbetreiber und Prüfstellen wird eine verlässliche Bewertung des Batteriezustands bereitgestellt.

Um eine schnelle und gleichzeitig verlässliche Bewertung für kurzzeitige Anwendungen (wie gemietete Elektrofahrzeuge) zu gewährleisten, wird ein Bewertungsverfahren entwickelt, das Ergebnisse innerhalb kurzer Zeit liefert und die Reichweite und Wartungsbedarf des Fahrzeugs prognostiziert. Die Bewertung erlaubt zusätzlich eine Einordnung des untersuchten Fahrzeugs in Relation zu gleichen Modellen mit ähnlicher oder interpolierter Laufleistung. Durch die automatische Einordnung der SoH-Werte wird eine zukunftsge-

richtete Fahrzeugbewertung im Rahmen der Hauptuntersuchung (HU) und die Erstellung von Gutachten unterstützt, die sowohl die aktuelle Betriebsfähigkeit als auch das Potential für zukünftige Verwendungen der Batterie erfassen. Dieser methodische Ansatz stellt sicher, dass Batterien durch fundierte, standardisierte und effiziente Verfahren bewertet werden, die eine zuverlässige Grundlage für den Betrieb und die Wiederverwendung von Traktionsbatterien im Straßenverkehr bieten. Für eine umfassendere Analyse ist eine 45-minütige Bewertung möglich, die detaillierte Einblicke in die Leistungsfähigkeit sowie eine fundierte Prognose zur langfristigen Verwendbarkeit der Batterie für Second-Life-Anwendungen bietet. Ein Schwellwert zur Einschätzung der Eignung der Batterie für Primär- oder Sekundärnutzungen wird definiert, wobei die Batterie, sobald sie für den Fahrzeugbetrieb ungeeignet ist, für spezifische Second-Life-Szenarien empfohlen wird. Die Herausforderung, Zustandsdaten über eine verlängerte Nutzungsdauer zu extrapolieren, wird durch die Entwicklung physikalisch-technischer Modelle adressiert, die eine präzisere Vorhersage der Restkapazität ermöglichen.

### **3 Zusammenfassung und Ausblick**

Die vorliegende Arbeit widmet sich der dringenden Notwendigkeit, den Gesundheitszustand von Traktionsbatterien in Elektrofahrzeugen zuverlässig und genau zu bestimmen. Aufgrund der komplexen Struktur und der vielfältigen Alterungsmechanismen, die Lithium-Ionen-Batterien im Einsatz prägen, gewinnen wissenschaftliche Erkenntnisse zur Zustandsbewertung zunehmend an Relevanz. Die hier präsentierten Untersuchungen haben wesentliche Fortschritte bei der datenbasierten Bewertung des Batteriezustands erzielt, insbesondere durch die Entwicklung einer innovativen Methodik zur KI-gestützten Analyse. Diese Methodik gestattet es, Daten aus unterschiedlichen Prüfzyklen auf ein einheitliches Bewertungsniveau zu interpolieren und vergleichbare Ergebnisse zu liefern. Durch die Identifizierung und Spezifizierung der Alterungsprozesse in Batterien können präzise Aussagen zum Gesundheitszustand und zur Leistungsfähigkeit von Trakti-

onsbatterien getroffen werden. Die Ergebnisse ermöglichen zudem Rückschlüsse auf eine effiziente Nutzung der Batterien in sogenannten Second-Life-Anwendungen, die sowohl ökonomische als auch ökologische Vorteile bieten. Durch die systematische Klassifizierung der Batteriealterung lassen sich Batterien künftig gezielter in Zweitanwendungen integrieren, was eine signifikante Reduktion der Umweltbelastung durch Batterieherstellung und -entsorgung verspricht. Die praktische Anwendung der entwickelten Methodik wird mit steigender Anzahl von batterieelektrischen Fahrzeugen auf den Straßen von besonderer Bedeutung sein. Für Prüfstellen, Werkstätten und Flottenbetreiber stellt die objektive und neutrale Bewertung der Batterie ein unverzichtbares Werkzeug dar, da die Lebensdauer vieler Traktionsbatterien die versprochene Lebenszeit der Fahrzeuge nicht übersteigt. Die Methode kann an allen Elektrofahrzeugen angewendet werden, die über die genormte OBD-Schnittstelle die nötigen Daten zur Verfügung stellen.

Trotz der erzielten Fortschritte besteht weiterer Forschungsbedarf. Eine systematische Analyse der verschiedenen Alterungsmechanismen und ihrer spezifischen Einflüsse auf Lade- und Entladezyklen ist für die genauere Interpretation des SoH weiterhin erforderlich. Der Einsatz einer ausgereiften, datengetriebenen KI zur Zustandsbewertung verlangt zusätzlich nach robusten Algorithmen, die auf dynamische Werte aus verschiedenen Nutzungsszenarien reagieren und ein vergleichbares Bewertungsniveau garantieren. Langfristig könnte eine standardisierte, schnelle und kosteneffiziente Batteriezustandsprüfung den Weiterverkauf und das Second-Life-Potenzial von Elektrofahrzeugen verbessern. Zukünftige Studien könnten sich daher darauf konzentrieren, physikalische und datengestützte Modelle für Langzeitprognosen des Restnutzungspotentials von Lithium-Ionen-Batterien zu entwickeln. Diese Modelle sollten eine präzise Extrapolation ermöglichen, um die Anforderungen an wirtschaftliche und nachhaltige Mobilitätslösungen zu erfüllen.

## Literatur

- [1] Huynh, Phan-Lam.: Beitrag zur Bewertung des Gesundheitszustands von Traktionsbatterien in Elektrofahrzeugen. Dissertation, Universität Stuttgart (2016)
  
- [2] Thielmann, A., Wietschel, M., Funke, S.: Batterien für Elektroautos – Faktencheck und Handlungsbedarf – Sind Batterien für Elektroautos der Schlüssel für eine nachhaltige Mobilität der Zukunft?. Fraunhofer ISI (2020)
  
- [3] Statista: Elektroautos – Anteil am Pkw-Bestand 2030. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1202904/umfrage/anteil-der-elektroautos-am-pkw-bestand-in-deutschland/>. Aufgerufen am 14. Januar 2024
  
- [4] Bundesumweltministerium: Warum überhaupt Elektromobilität? <https://www.bmu.de/themen/verkehr/elektromobilitaet/ueberblick-elekt-romobilitaet>. Aufgerufen am 14. Juni 2024
  
- [5] Statista: Anzahl der Neuzulassungen von Personenkraftwagen in Deutschland nach alternativen Antriebsarten von Januar 2016 bis Oktober 2024. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1211919/umfrage/moentliche-pkw-neuzulassungen-in-deutschland-nach-alternativen-kraftstoffarten/>. Aufgerufen am 20.11.2024
  
- [6] Europäisches Parlament: Neue EU-Vorschriften für nachhaltigere und ethisch bedenkenlose Batterien. <https://www.europarl.europa.eu/topics/de/article/20220228STO24218/neue-eu-vorschriften-fur-nachhaltigere-und-ethisch-bedenkenlose-batterien>. Aufgerufen am 14. Juni 2024

- [7] Dirk Uwe Sauer, Heribert Schmidt, Jerome Kuhmann (2016) Elektrische Energiespeicher und Laderegler für Geräte und Kleinsysteme. Research Gate:1–48. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.17026.27849>
- [8] Bauer, M.: Elektrische und mechanische Verfahren zur Detektion von Alterungseffekten in Lithium-Ionen-Batterien. Dissertation, Technische Universität München (2017)
- [9] Korthauer, R.: Handbuch Lithium-Ionen-Batterien. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg (2013)
- [10] Yao, L., Xu, S., Tang, A.: A Review of Lithium-Ion Battery State of Health Estimation and Prediction Methods. WEVJ 12, 113 (2021). <https://doi.org/10.3390/wevj12030113>
- [11] Haußmann, P., Melbert, J.: Spannungsgeregelte Impedanzspektroskopie mit breitbandigen Anregungssignalen für Lithium-Ionen-Zellen in Kfz-Anwendungen. TECH MESS 84, 411-425 (2017). <https://doi.org/10.1515/teme-2017-0018>
- [12] Käbitz, S.R.: Untersuchung der Alterung von Lithium-Ionen-Batterien mittels Elektroanalytik und elektrochemischer Impedanzspektroskopie. Dissertation, RWTH Aachen Universität (2016)
- [13] Kohs, A.: Batteriemodell zur Prädiktion des Gesundheitszustands von Lithium-Ionen-Batterien. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden (2022)
- [14] Deng, Z., Hu, X., Li, P.: Data-Driven Battery State of Health Estimation Based on Random Partial Charging Data. IEEE T POWER ELECTR 37, 5021-5031 (2022). <https://doi.org/10.1109/TPEL.2021.3134701>

- [15] Neue H., Schmuck, N., Annuth, R.: Vergleich von Konzepten zur datenbasierten Ermittlung der Alterung von Fahrzeugbatterien. Helmut-Schmidt-Universität, Universität der Bundeswehr Hamburg (2023)
- [16] Pires Mimoso, R.: Maschinelles Lernen in der Batteriedatenanalyse. Masterthesis, FH Vorarlberg (2023)
- [17] Zhang, M., Yang, D., Du, J.: A Review of SOH Predictions of Li-Ion Batteries Based on Data-Driven Algorithms, ENERGIES 16 (2023). <https://doi.org/10.3390/en16073167>
- [18] Hubik, F.: Hauptuntersuchungen bei Elektroautos lückenhaft – Experten schlagen Alarm. Vorabdruck bei <https://www.handelsblatt.com/mobilitaet/el-ektromobiltaet/tuev-und-dekra-hauptuntersuchung-bei-elektroautos-lueckenhaft-experten-schlagen-alarm/27864550.html> (2021)
- [19] Sonnenholzner, J.: Warum der Akkuzustand beim E-Auto oft für Rätsel sorgt. Tagesschau.de (2024)
- [20] AVILOO GmbH: AVILOO-Batterietest für Elektrofahrzeuge und PHEVS - Das AVILOO-Batteriezertifikat gibt en Kunden Klarheit über den Zustand der Antriebsbatterie. <https://aviloo.com/batterietest.html>. Aufgerufen am 15.08.2024
- [21] AVILOO GmbH: AVILOO Flash Test. <https://aviloo.com/home-aviloo.html>. Aufgerufen am 15.08.2024





# Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

Eine vollständige Übersicht der Bände finden Sie im Verlagsshop

---

- Band 76** Kai-Lukas Bauer  
**Echtzeit-Strategieplanung für vorausschauendes automatisiertes Fahren**  
ISBN 978-3-7315-0949-3
- Band 77** Thomas Schirle  
**Systementwurf eines elektromechanischen Fahrwerks für Megacitymobilität**  
ISBN 978-3-7315-0995-0
- Band 78** Dominik Dörr  
**Simulation of the thermoforming process of UD fiber-reinforced thermoplastic tape laminates**  
ISBN 978-3-7315-0998-1
- Band 79** Dominik Robert Naake  
**Simulation of damage mechanisms in weave reinforced materials based on multiscale modeling**  
ISBN 978-3-7315-1005-5
- Band 80** Martin Hohberg  
**Experimental investigation and process simulation of the compression molding process of Sheet Molding Compound (SMC) with local reinforcements**  
ISBN 978-3-7315-1007-9
- Band 81** Benedikt Fengler  
**Manufacturing-constrained multi-objective optimization of local patch reinforcements for discontinuous fiber reinforced composite parts**  
ISBN 978-3-7315-1006-2
- Band 82** Johannes Masino  
**Road Condition Estimation with Data Mining Methods using Vehicle Based Sensors**  
ISBN 978-3-7315-1004-8
- Band 83** **11. Kolloquium Mobilhydraulik**  
**10. September 2020, Karlsruhe**  
ISBN 978-3-7315-1036-9

- Band 84** Felix Weber  
**Beitrag zur Entwicklung von Konstantflusspumpen für Frischbeton unter genauerer Betrachtung der Dickstoffventile**  
ISBN 978-3-7315-1037-6
- Band 85** 8. Fachtagung  
**Hybride und energieeffiziente Antriebe für mobile Arbeitsmaschinen. 23. Februar 2021, Karlsruhe**  
ISBN 978-3-7315-1071-0
- Band 86** Sebastian Fünfgeld  
**Vorausschauende Regelung von Fahrzeugsystemen durch stochastische Vorhersage der Fahrzeugdynamik**  
ISBN 978-3-7315-1060-4
- Band 87** Isabelle Charlotte Ays  
**Development of a CO<sub>2</sub>e quantification method and of solutions for reducing the greenhouse gas emissions of construction machines = Entwicklung einer CO<sub>2</sub>e Quantifizierungsmethode und von Lösungen zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen in Baumaschinen**  
ISBN 978-3-7315-1033-8
- Band 88** Alexander Bernath  
**Numerical prediction of curing and process-induced distortion of composite structures**  
ISBN 978-3-7315-1063-5
- Band 89** Nils Bulthaupt  
**Objektivierung des Schwingungskomforts schwerer Nutzfahrzeuge**  
ISBN 978-3-7315-1075-8
- Band 90** Lars Brinkschulte  
**Assistenzsysteme zur Reduktion des Schädigungsverhaltens von Komponenten einer mobilen Arbeitsmaschine**  
ISBN 978-3-7315-1089-5
- Band 91** Dominik Dörr  
**Adaptive Fahrhinweise für ein längsdynamisches Fahrerassistenzsystem zur Steigerung der Energieeffizienz**  
ISBN 978-3-7315-1090-1
- Band 92** Jürgen Römer  
**Steuerung und Regelung des Lenkradmoments durch Nutzung radselektiver Frontantriebe**  
ISBN 978-3-7315-1104-5

- Band 93** Christian Riese  
**Werkzeuge und Konzepte für die Untersuchung und Entwicklung zukünftiger Kfz-Bremssysteme**  
ISBN 978-3-7315-1125-0
- Band 94** Yaoqun Zhou  
**Dynamisches Bremsverhalten des Reifen-Fahrwerk-Systems**  
ISBN 978-3-7315-1156-4
- Band 95** Stefan Haug  
**Ganzheitliche Optimierung einer Axialkolbenpumpe durch bedarfsangepasste Entlastung tribologischer Kontakte**  
ISBN 978-3-7315-1150-2
- Band 96** Stefan Scheubner  
**Stochastic Range Estimation Algorithms for Electric Vehicles using Data-Driven Learning Models**  
ISBN 978-3-7315-1166-3
- Band 97** Yusheng Xiang  
**AI and IoT Meet Mobile Machines: Towards a Smart Working Site**  
ISBN 978-3-7315-1165-6
- Band 98** Nils Meyer  
**Mesoscale simulation of the mold filling process of Sheet Molding Compound**  
ISBN 978-3-7315-1173-1
- Band 99** Christian Timo Poppe  
**Process simulation of wet compression moulding for continuous fibre-reinforced polymers**  
ISBN 978-3-7315-1190-8
- Band 100** Torben Fischer  
**Modellprädiktive Regelung eines innovativen Thermomanagement-Systems für batterieelektrische Fahrzeuge**  
ISBN 978-3-7315-1199-1
- Band 101** Florian Wittemann  
**Fiber-dependent injection molding simulation of discontinuous reinforced polymers**  
ISBN 978-3-7315-1217-2
- Band 102** Sebastian Watzl  
**Experimentelle und numerische Analyse des Körperschallübertragungsverhaltens von Aggregatlagerelementen im akustisch relevanten Frequenzbereich**  
ISBN 978-3-7315-1226-4

- Band 103** Dominik Stretz  
**Vibroakustische Analyse eines elektrischen Radnabenmotors und Optimierung durch geeignete Steuerungsansätze**  
ISBN 978-3-7315-1245-5
- Band 104** Mohamed Elgharbawy  
**Measurable Safety of Automated Driving Functions in Commercial Motor Vehicles - Technological and Methodical Approaches**  
ISBN 978-3-7315-1254-7
- Band 105** Bernhard Schmiedel  
**Indirekte Schätzung des Fahrbahnneigungsgrads zur Detektion von gefährlichen Fahrzuständen**  
ISBN 978-3-7315-1258-5
- Band 106** 9. Fachtagung  
**Hybride und energieeffiziente Antriebe für mobile Arbeitsmaschinen. 28. Februar 2023, Karlsruhe**  
ISBN 978-3-7315-1260-8
- Band 107** Patrick Riehm  
**Zur Wechselwirkung zwischen Fahrbahntextur und Laufstreifenmischung von Pkw-Reifen**  
ISBN 978-3-7315-1268-4
- Band 108** Markus Tesar  
**Deep Reinforcement Learning zur Steigerung von Energieeffizienz und Pünktlichkeit von Straßenbahnen**  
ISBN 978-3-7315-1277-6
- Band 109** Michael Mürken  
**Methode zur Bewertung der Zuverlässigkeit der elektrischen Energieversorgung in der automobilen Vorentwicklung**  
ISBN 978-3-7315-1298-1
- Band 110** Julien Pinay  
**Experimental investigation of relevant road surface descriptors for tire-road noise measurements on low-absorbing road surfaces**  
ISBN 978-3-7315-1328-5
- Band 111** Adrian Strigel  
**Methode zur Ermittlung optimaler Rad- und Reifendimensionen in der frühen Entwicklungsphase von Personenkraftwagen**  
ISBN 978-3-7315-1321-6

- Band 112** Jens Jauch  
**Trajectory optimization based on recursive B-spline approximation for automated longitudinal control of a battery electric vehicle**  
ISBN 978-3-7315-1332-2
- Band 113** Nicolas Fraikin  
**Methodik zur effizienten Applikation automatisierter Fahrfunktionen**  
ISBN 978-3-7315-1339-1
- Band 114** Jan Siebert  
**Effizienzoptimierung mobilhydraulischer Load-Sensing-Systeme durch Reduzierung systembedingter Druckverluste am Beispiel eines Hydraulikbaggers**  
ISBN 978-3-7315-1343-8
- Band 115** Tobias Sebastian Straub  
**Flottendatenbasierte physikalische Routenenergiebedarfsprognose**  
ISBN 978-3-7315-1348-3
- Band 116** Michael Herrmann  
**Eine Methodik zur Definition von Zielkriterien am Beispiel des tieffrequenten Geräuschkomforts eines Fahrzeugs**  
ISBN 978-3-7315-1370-4
- Band 117** Adam Thor Thorgeirsson  
**Probabilistic Prediction of Energy Demand and Driving Range for Electric Vehicles with Federated Learning**  
ISBN 978-3-7315-1371-1
- Band 118** Alexander Jackstadt  
**Constrained-layer damping in hybrid fibre metal elastomer laminates and its tolerance to damage**  
ISBN 978-3-7315-1376-6
- Band 119** **13. Kolloquium Mobilhydraulik**  
**8./9. Oktober 2024, Karlsruhe**  
ISBN 978-3-7315-1381-0
- Band 120** Toni Wilhelm  
**Querodynamik von Velomobilen unter Berücksichtigung der Reifeneigenschaften**  
ISBN 978-3-7315-1382-7

- Band 121** Alexander Brunker  
**Hochgenaue und robuste odometriebasierte  
Lokalisierung in einem Parkvorgang**  
ISBN 978-3-7315-1383-4
- Band 122** Daniel Förster  
**Systemauslegung autarker Hybridantriebe unter Berücksichti-  
gung kundenspezifischer Randbedingungen**  
ISBN 978-3-7315-1384-1
- Band 123** Maurizio Mauro Festa  
**Objektive Fahrkomfortbewertung des Gesamtfahrzeugs unter  
Berücksichtigung menschlicher Wahrnehmungsaspekte**  
ISBN 978-3-7315-1392-6
- Band 124** 10. Fachtagung  
**Hybride und energieeffiziente Antriebe für mobile  
Arbeitsmaschinen. 19. Februar 2025, Karlsruhe**  
ISBN 978-3-7315-1403-9



Eine Veranstaltung von



Der Tagungsband enthält die Beiträge zu den Vorträgen der 10. Fachtagung vom 19. Februar 2025 in Karlsruhe. In 10 Artikeln wird über den Stand der Forschung und neue Entwicklungen auf dem Gebiet der Antriebstechnik für mobile Arbeitsmaschinen berichtet. Der Tagungsband zeichnet sich durch Fachbeiträge zu effizienzoptimierten und elektrifizierten Antrieben in verschiedensten Maschinen aus. Neben Fahrantrieben werden auch nachhaltige und innovative Arbeitsantriebe thematisiert.

Die Fachtagung findet seit 2007 alle zwei Jahre in Karlsruhe statt. Auch die 10. Fachtagung eröffnet die Möglichkeit zum persönlichen und direkten Austausch. Begleitend zur Tagung gibt der Institutsteil Mobile Arbeitsmaschinen (Mobima) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) den vorliegenden Tagungsband heraus.

Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier

**ISSN 1869-6058 (Schriftenreihe)**  
**ISSN 2510-7275 (Tagungsband)**  
**ISBN 978-3-7315-1403-9**

