

Wärmepumpen in batterieelektrischen Landmaschinen zur Nutzung der Abwärme

Benjamin Wilk, Jan Wieckhorst, Philipp Heymann, Ludger Frerichs

In diesem Beitrag wird das Potenzial von Wärmepumpen mit Sekundärkreislauf zur Nutzung von Abwärme in batterieelektrischen Landmaschinen sowie deren Einfluss auf die Maschinennutzungsdauer untersucht, insbesondere im Hinblick auf die Beheizung der Fahrzeuggabine und der Traktionsbatterie. Hierzu wird ein kompaktes R134a-Wärmepumpensystem mit Wasser-Glykol-Sekundärkreis auf einem Prüfstand aufgebaut, messtechnisch charakterisiert und über Temperaturen, Drücke und Volumenströme bilanziert. Aus den Messdaten werden der Coefficient of Performance (COP) und thermische Leistungen abgeleitet und mittels k-Nearest-Neighbors-Interpolation (k-NN) zu Lookup-Tabellen über Verdampfer- und Kondensatoreintrittstemperaturen für eine 0D/1D-Simulation aufbereitet. Auf dieser Basis wird ein 100-kW/100-kWh-Traktor betrachtet und die Wärmepumpe gegenüber einer Widerstandsheizung in praxisnahen Szenarien verglichen. Die Arbeit zeigt damit Potenziale und Grenzen der Abwärmenutzung und leitet Implikationen für Auslegung, Integration und Betrieb künftiger Thermomanagementsysteme in elektrifizierten Landmaschinen ab.

Schlüsselwörter

Thermisches System, Wärmepumpe, batteriebetriebener Traktor

Im Gegensatz zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren, bei denen die Reichweitenproblematik aufgrund der hohen Energiedichte von Flüssigkraftstoffen kaum relevant ist, stellt die Elektromobilität im Land- und Baumaschinensektor neue Herausforderungen. Bei Verbrennungsmotoren nutzt man die reichlich anfallende Abwärme zur Beheizung des Fahrgastraumes. Batterieelektrische Fahrzeuge generieren hingegen nur begrenzte Abwärme, weshalb herkömmliche Heizkonzepte auf Basis einer Widerstandsheizung in diesen Fahrzeugen zu Einbußen bei Reichweite und Nutzungsdauer führen können. Die Elektrifizierung des Land- und Baumaschinensektors erfordert daher innovative Lösungen mit hoher Energieeffizienz, um diese Einschränkungen zu minimieren (PRAETORIUS 2018, MARKETS AND MARKETS 2025). Im Pkw-Bereich erzielten Maßnahmen wie infrarotreflektierende Verglasungen, Wärmepumpen und Abwärmerückgewinnung in der Innenraumentlüftung Reichweitevorteile von etwa 10–30 % (SUCK und SPENGLER 2014). Im Bereich batterieelektrischer Traktoren wurde in einem von Fendt 2017 vorgestellten Entwicklungsfahrzeug der Einsatz eines Wärmepumpensystems zur Kabinenbeheizung sowie zur Batteriekonditionierung demonstriert (BREU und PICHLMAIER 2017), allerdings ist eine Umsetzung dieses Konzepts in den Serienfahrzeugen bislang nicht erfolgt (AGCO GMBH 2026). Im Gegensatz dazu ist beim Rigitrac SKE 40 serienmäßig ein Wärmepumpensystem im Fahrzeug integriert. Zudem wird die Option der Wärmerückgewinnung bei niedrigen Temperaturen erwähnt, wobei jedoch unklar bleibt, ob die Abwärme ausschließlich im Wärmepumpensystem genutzt oder auch direkt verwendet werden kann (AGROFOSSILFREE 2020, RIGITRAC TRAKTORENBAU AG 2025). Wärmepumpen stellen für elektrifizierte Landmaschinen eine vielversprechende Alternative

zur konventionellen Widerstandsheizung dar, da sie Abwärme aus elektrischen Komponenten wie der E-Maschine, dem Inverter und dem Antriebsstrang nutzbar machen. Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf der Analyse von Wärmepumpensystemen mit Sekundärkreislauf, wie sie von WEUSTENFELD (2018) ausführlich für batterieelektrische Fahrzeuge beschrieben werden, sowie auf einem Vergleich mit konventioneller Widerstandsheizung.

Wärmepumpenprüfstand

Zur Erfassung der spezifischen Kennwerte einer Wärmepumpe wird ein Kaltdampfprozess mit einem Wasser-Glykol-Sekundärkreislauf aufgebaut. In diesem System sind Sensoren integriert, die Temperatur und Durchflussrate der zu untersuchenden Wärmeübertrager messen. Zusätzlich sind kombinierte Druck- und Temperatursensoren im Kaltdampfprozess installiert. Diese Sensoren sind für die Regelung des elektronischen Expansionsventils sowie des Kältemittelkompressors erforderlich. Darüber hinaus liefern die an den Messstellen erfassten Kältemitteldruck- und Temperaturwerte wichtige Informationen zur Berechnung der inneren thermischen Leistung (DOHMANN 2016). Das Wärmepumpensystem ist kompakt in einem gemeinsamen Rahmen zusammengefasst, der neben den Wärmeübertragern auch den Hochspannungsheizler und die Pumpen umfasst (Abbildung 1).

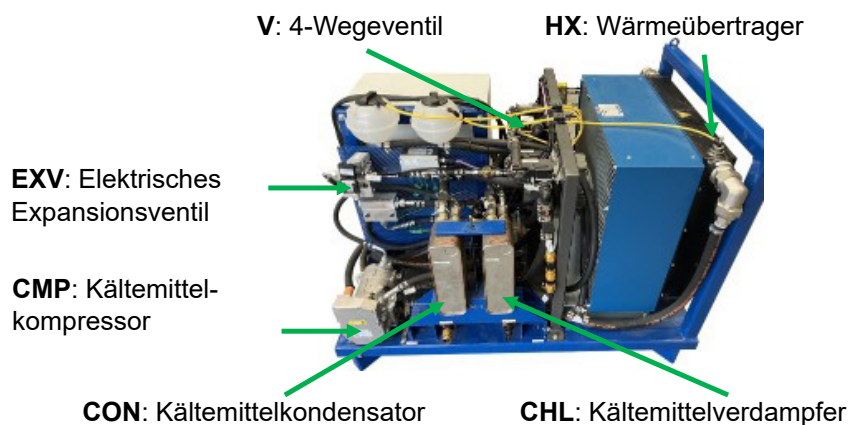
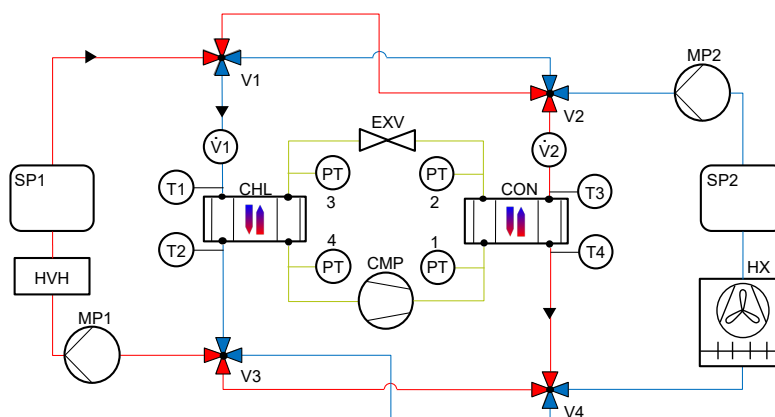


Abbildung 1: Aufbau und Komponenten des Wärmepumpenprüfstands

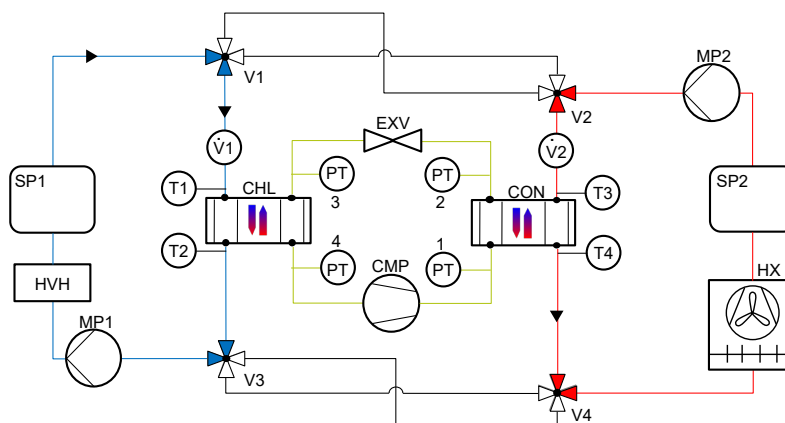
Abbildung 2 veranschaulicht den schematischen Systemaufbau für den Wärmepumpenbetrieb der Anlage und die Positionierung der Sensoren zur Messung der charakteristischen Systemkennwerte. Dabei sind insbesondere die Messwerte des Volumenstroms und die Temperaturdifferenzen über die Plattenwärmeübertrager CHL (Verdampfer) und CON (Kondensator) von Interesse. Die benötigte elektrische Leistung für den Kältemittelkompressor CMP wird dem Versorgungsnetzteil entnommen. Der COP (Coefficient of Performance) ist dabei als Quotient der erzeugten thermischen Leistung und der eingesetzten elektrischen Leistung zu berechnen (Joos 2004).



- | | |
|--|-------------------------------------|
| CHL: Verdampfer Plattenwärmeübertrager | MPn: Medienpumpe |
| CON: Kondensator Plattenwärmeübertrager | SPn: Speicher |
| CMP: Kältemittelkompressor | PTn: Druck-/Temperatursensor |
| ELE: Wärmeübertrager Elektronikreisl. | Qn: Volumenstromsensor |
| EXV: Elektrisches Expansionsventil | Tn: Temperatursensor |
| HX: Lamellen-Wärmeübertrager | Vn: 4-Wegeventil |
| HVH: Hochspannungsheizer | |

Abbildung 2: Systemaufbau für den Wärmepumpenbetrieb des Prüfstandes; rot = Sekundärkreislauf des Kältemittelkondensators, blau = Sekundärkreislauf des Kältemittelverdampfers, Dreieck = Flussrichtung

Abbildung 3 zeigt den Systemzustand des Kälteanlagenbetriebes. Dabei werden die Ventile V1-V4 so verschaltet, dass im Speicher SP1 das heruntergekühlte Kühlmedium aus dem Verdampfer ankommt. In diesem Fall verringert sich die Temperatur im Speicher so weit, bis der Kältemittelmassenstrom nicht mehr vollständig über den Verdampfer verdampft werden kann. Zum Schutz vor einem Flüssigkeitsschlag des Kältemittelkompressors wird in diesem Betriebspunkt der Anlagenbetrieb abgebrochen.



- | | |
|--|-------------------------------------|
| CHL: Verdampfer Plattenwärmeübertrager | MPn: Medienpumpe |
| CON: Kondensator Plattenwärmeübertrager | SPn: Speicher |
| CMP: Kältemittelkompressor | PTn: Druck-/Temperatursensor |
| ELE: Wärmeübertrager Elektronikreisl. | Qn: Volumenstromsensor |
| EXV: Elektrisches Expansionsventil | Tn: Temperatursensor |
| HX: Lamellen-Wärmeübertrager | Vn: 4-Wegeventil |
| HVH: Hochspannungsheizer | |

Abbildung 3: Systemaufbau für den Kälteanlagenbetrieb des Prüfstandes; rot = Sekundärkreislauf des Kältemittelkondensators, blau = Sekundärkreislauf des Kältemittelverdampfers, Dreieck = Flussrichtung

Tabelle 1 illustriert exemplarisch einen Messdatensatz für den Betrieb der Wärmepumpe bei drei unterschiedlichen Drehzahlen des Kältemittelkompressors (n in 1/min). Die angegebenen Messgrößen umfassen dabei die Ein- und Austrittstemperaturen des Wärmetauschers auf der Kaltseite (T_1 , T_2) sowie auf der Warmseite (T_3 , T_4), die Volumenströme des Kühlmittels (\dot{V} und \dot{V}_2) in Litern pro Minute, die thermischen Leistungen (\dot{Q}_1 und \dot{Q}_2) in Kilowatt, die elektrische Leistungsaufnahme des Kompressors (P) in Kilowatt und schließlich den berechneten COP. Die Messwerte machen deutlich, wie sich bei steigender Kompressordrehzahl und unterschiedlichen Temperaturbedingungen die thermische Leistung und die Effizienz der Wärmepumpe verändern. So steigt beispielsweise mit zunehmender Temperatur auf der Kaltseite (T_1) bei konstanter Drehzahl die Wärmeabgabe (\dot{Q}_2) auf der Warmseite, was sich auch in einem verbesserten COP zeigt.

Tabelle 1: Beispiel eines Messdatensatzes für den Wärmepumpenbetrieb mit drei verschiedenen Kältemittelkompressordrehzahlen; Wärmeabgabe (positiv), Wärmeaufnahme (negativ)

n in 1/min	T_1 in °C	T_2 in °C	\dot{V}_1 in l/min	\dot{Q}_1 in kW	T_3 in °C	T_4 in °C	\dot{V}_2 in l/min	\dot{Q}_2 in kW	P in kW	COP
2.500	6	4,7	17,5	-1,35	44,3	46,9	20	3,08	1,8	1,61
2.500	10	8,4	17,5	-1,66	47,7	50,8	20	3,68	2,0	1,73
2.500	15	12,6	17,5	-2,49	49,4	53,4	20	4,74	2,2	2,03
3.500	5	4,1	18,6	-0,99	45,1	47,3	23	3,00	2,4	1,18
...
5.000	15	12,2	19,5	-3,24	56	61,1	24	7,26	5,1	1,34

Die Lookup-Tabelle (Tabelle 2) ermöglicht die Bestimmung der erzeugbaren thermischen Leistung, die in jedem Betriebspunkt definiert und einer elektrischen Kältemittelkompressorleistung zugeordnet werden kann. Die Daten aus der Tabelle 1 werden mithilfe der k-NN-Methode interpoliert und für eine konstante Schrittweite der Verdampfer- und Kondensatoreingangstemperaturen in der Lookup-Tabelle aufgetragen (ERTEL 2025). Jede Lookup-Tabelle steht für einen festen Kühlmittelvolumenstrom in beiden Kühlmittelkreisen und einer festen Kältemittelkompressordrehzahl.

Tabelle 2: Verdampferleistungstabelle \dot{Q}_2 in kW für eine Kältemittelkompressordrehzahl von $n = 2.500$ 1/min und einem Kühlmittelvolumenstrom von $\dot{V}_1 = 20$ l/min bei Variation der Verdampfereingangstemperatur (T_1) und der Kondensatoreingangstemperatur (T_3)

		T_1 in °C				
		29,5	29,6	29,7	...	49,4
T_3 in °C	6	5,3	5,3	5,2	...	2,2
	6,3	5,3	5,3	5,2	...	2,2
	6,6	5,3	5,3	5,3	...	2,2

	70	6,4	6,4	6,5	...	6,7

Wenn also die Verdampferleistung für verschiedene Kompressordrehzahlen oder Kühlmittelvolumenströme ausgegeben werden soll, so muss jeweils für den Betriebspunkt eine weitere Lookup-Tabelle erstellt werden. Die beschriebenen Messdaten und Lookup-Tabellen bilden die Grundlage für eine numerische Simulation des Wärmepumpenbetriebs. Durch die Verwendung der k-NN-Methode können aus diskreten Messpunkten kontinuierliche Kennlinien erzeugt werden, welche das Ver-

halten der Wärmepumpe bei unterschiedlichen Ein- und Ausgangstemperaturen sowie variierenden Kompressordrehzahlen und Kühlmittelvolumenströmen in einer Simulation abbilden. Für jeden definierten Betriebspunkt werden mithilfe der Lookup-Tabellen die erzeugbaren thermischen Leistungen sowie die elektrische Leistungsaufnahme bestimmt. Daraus ergibt sich der COP, welcher die Effizienz der Anlage unter den jeweiligen Betriebsbedingungen charakterisiert. Durch die Simulation über einen zeitlichen Verlauf unterschiedlicher Umgebungsbedingungen kann somit die dynamische Leistungsfähigkeit und Effizienz des Wärmepumpensystems prognostiziert werden. Zudem ist der Rechenaufwand der Simulation gering, da keine komplexen Berechnungen erforderlich sind, um im Rahmen eines zweiphasigen Prozesses Effizienz und Leistung zu bestimmen.

Thermische Effizienz und Temperaturgrenzen

Der COP ist das Verhältnis von erzeugter Wärme zu aufgewendeter elektrischer Energie. Wenn also ein COP von 3 erzielt wird, bedeutet das, dass für jede kWh elektrische Energie 3 kWh Wärme erzeugt wird. Messungen an einer R134a-Wärmepumpe mit Sekundärkreislauf zeigten im Bestpunkt einen Gesamt-COP von über vier (Abbildung 4).

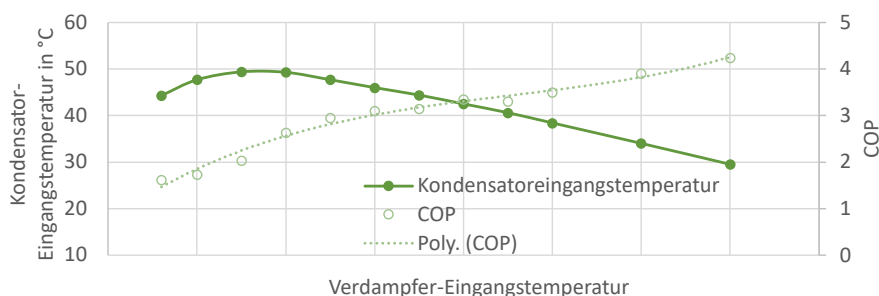


Abbildung 4: Coefficient of Performance für eine R134a-Wärmepumpe mit Sekundärkreislauf (KORFF 2024)

Während Widerstandsheizsysteme typischerweise einen COP von 1 erreichen, weisen Wärmepumpen eine höhere Effizienz auf. Sofern Abwärme aus dem Sekundärkreislauf in ausreichender Menge zur Verfügung steht, kann deren Nutzung die Effizienz weiter erhöhen. Für einen quantitativen Vergleich der Heizsysteme muss zudem die temperaturabhängige nutzbare Batteriekapazität berücksichtigt werden. Abbildung 5 stellt die temperaturabhängigen Entladekennlinien der Batteriezelle dar. Bei einer Zelltemperatur von 0 °C wird die Entladeschlussspannung bereits nach der Entnahme von etwa 85 % der bei 20 °C verfügbaren Kapazität erreicht, während bei 20 °C die gesamte Kapazität (Nennkapazität) der Batteriezelle nutzbar ist (DOPPELBAUER 2025). Der Wert Depth of Discharge (DOD) beschreibt dabei das Verhältnis zwischen entnommener Ladung und Nennkapazität.

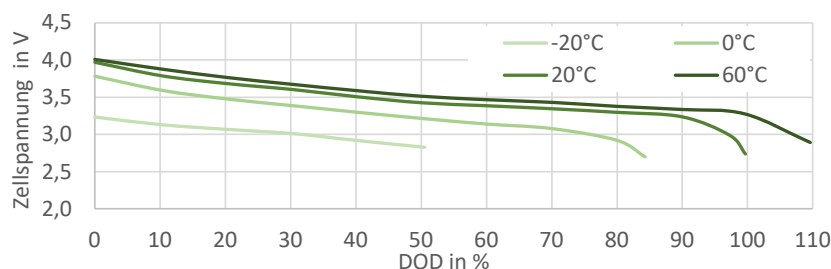


Abbildung 5: Zellspannungsverlauf über der entnommener Energie bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen (DOPPELBAUER 2025)

Für die Bewertung der Maschinennutzungsdauer ist jedoch die nutzbare Energie maßgebend, die sich aus dem Integral der Spannung über der entnommenen Kapazität ergibt. Da die Spannungskurve bei 0 °C insgesamt auf einem niedrigeren Niveau verläuft, entspricht eine Reduktion des DOD um 15 % nicht zwangsläufig einer proportionalen Abnahme der nutzbaren Energie. Die Größenordnung ist jedoch vergleichbar, sodass diese Annahme für die folgenden Abschätzungen verwendet wird.

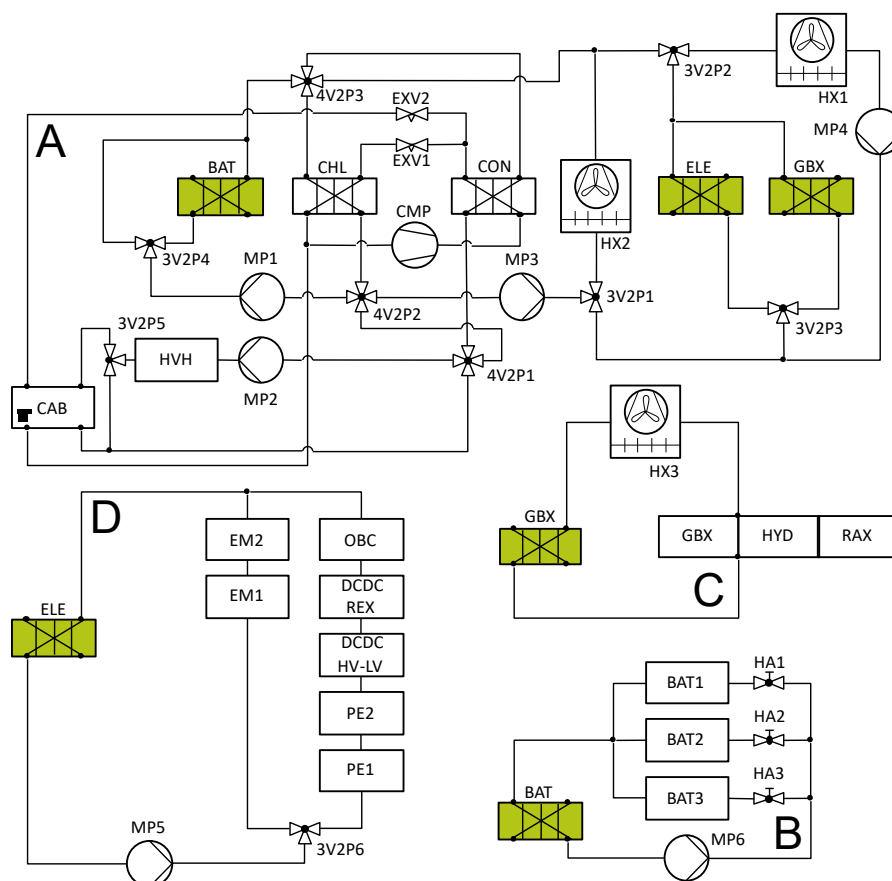
Ein wesentlicher Aspekt bei der Nutzung von Abwärme ist die Temperaturgrenze der verfügbaren Wärmequellen. In kalten Umgebungen, gekennzeichnet durch geringe Verdampfer Eingangstemperaturen und hohe Kondensatorausgangstemperatur, kann die Effizienz der Wärmepumpe abnehmen, sodass eine Hybridlösung mit zusätzlichen Heizsystemen erforderlich wird. Dazu wird bei niedrigen Temperaturen eine Widerstandsheizung eingesetzt, um die Kabine und die Batterie zu beheizen. Neben geringen Verdampfer-Eingangstemperaturen stellen auch hohe Eingangstemperaturen eine Herausforderung dar. Bei hohen Verdampfer-Eingangstemperaturen kann es zum Ausfall des elektrischen Kompressors kommen, da das komprimierte Kältemittel eine Temperatur von weit über 100 °C annehmen kann. Handelsübliche elektrische Kältemittelkompressoren schalten sich ab einer zu hohen Temperatur ab, um sich vor Beschädigungen zu schützen. Die maximale Temperaturgrenze ist vom verwendeten Kältemittelkompressor abhängig.

Sekundärkreislauf zur Abwärmenutzung

Die Abbildung 6 zeigt ein mögliches thermisches Managementsystem (TMS), das eine Kopplung mehrerer Teilsysteme über Plattenwärmeübertrager vorsieht. Im Zentrum des Aufbaus befindet sich der thermodynamische Kreisprozess der Wärmepumpe (im Teilsystem A), welcher über den Sekundärkreislauf mit den weiteren Teilsystemen verbunden ist. Die Plattenwärmeübertrager ELE und GBX koppeln dabei die Kreisläufe der elektrischen Komponenten (Teilsystem D) sowie des Antriebsstrangs (Teilsystem C) an den Sekundärkreislauf der Wärmepumpe an. Dadurch kann der dort entstehende Verlustwärmestrom als Wärmequelle für den Wärmepumpenkreislauf genutzt und zur Beheizung anderer Komponenten bereitgestellt werden. Der Batteriekonditionierungskreislauf (Teilsystem B) ist über den Plattenwärmeübertrager BAT in das Gesamtsystem eingebunden. Somit kann die Batterie je nach Betriebszustand sowohl beheizt als auch gekühlt werden. Durch diese vollständig gekoppelte Systemarchitektur ist eine effiziente thermische Vernetzung sämtlicher Hauptwärmequellen und -senken realisiert. Dies ermöglicht eine bedarfsgerechte Temperierung aller Teilsysteme. Die möglichen Betriebszustände des TMS umfassen verschiedene Heiz- und Kühlfunktionen für die Fahrzeugkomponenten, dabei liegt das optimale Temperaturniveau der Batterie zwischen 25 und 30 °C. Die mit dem gezeigten Aufbau möglichen TMS-Funktionen definieren sich allgemein wie folgt:

- Batterie kühlen mittels Kälteanlage: Die Batterie wird aktiv mit einer Kälteanlage gekühlt, um optimale Betriebstemperaturen sicherzustellen.
- Batterie kühlen zur Umgebung: Wärme wird direkt an die Umgebung abgegeben, um die Batterietemperatur zu senken.
- Batterie heizen mit Hochspannungsheizer: Der Hochspannungsheizer erwärmt die Batterie bei niedrigen Außentemperaturen.
- Batterie heizen mit Wärmepumpe: Die Wärmepumpe nutzt thermische Energie (Verlustwärmestrom), um die Batterie effizient zu erwärmen.
- batterie heizen mit Abwärme: Die direkte Abwärmenutzung anderer Komponenten dient zur Beheizung der Batterie.

- Kabine kühlen mit Kälteanlage: Die Fahrzeugkabine wird über eine Kälteanlage gekühlt.
- Kabine heizen mit Hochspannungsheizer: Der Hochspannungsheizer sorgt für schnelle und gezielte Erwärmung der Fahrzeugkabine.
- Kabine heizen mit Wärmepumpe: Die Wärmepumpe nutzt thermische Energie (Verlustwärme-
strom), um die Fahrzeugkabine effizient zu erwärmen.
- Kabine heizen mit Abwärme: Abwärme aus dem System wird zur Beheizung der Kabine genutzt
(wie aus den verbrennungsmotorischen Fahrzeugen bekannt).
- Öl kühlen zur Umgebung: Das Schmier- und Hydrauliköl wird durch Wärmeabgabe an die Umge-
bung (über HX3/HX1) auf optimaler Temperatur gehalten.
- Elektronik kühlen zur Umgebung: Elektronische Bauteile werden aktiv durch Wärmeabgabe an
die Umgebung (über HX1) gekühlt.



BATn:	Batterie	HAn:	Abgleichventil
BAT:	Wärmeübertrager Batteriekreisl.	HVH:	Hochspannungsheizer
CAB:	Fahrzeugkabine	HYD:	Hydraulik
CHL:	Verdampfer	HV-LV:	Hoch- zu Niederspannung
CMP:	Kältemittelkompressor	HXn:	Lamellen-Wärmeübertrager
CON:	Kondensator	MPn:	Medienpumpe
DCDC:	Gleichspannungswandler	OBC:	On-Board Ladegerät
ELE:	Wärmeübertrager Elektronikreis.	PEn:	Inverter
EMn:	Elektromotor	RAX:	Hinterachse
EXV:	Elektrisches Expansionsventil	REX:	Range Extender
GBX:	Wärmeübertrager Getriebekreis.	3V2Pn:	3/2-Wege-Ventil
		4V2Pn:	4/2-Wege-Ventil

Abbildung 6: Schema für ein Thermomanagementsystem (TMS) einer batterieelektrischen Landmaschine

Vergleich der Maschinennutzungsdauer durch zwei unterschiedliche Heizmethoden

Als Basisfahrzeug wird ein elektrifizierter Traktor betrachtet. Anhand des typischen Nutzungsprofils wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit das Potential zur Energieeinsparung mithilfe einer Wärmepumpe aufgezeigt. Zur Einordnung der Fahrzeugleistungs-klasse und der Energiespeichergröße wird für die folgenden Untersuchungen eine Maximalleistung von 100 kW mit einer nutzbaren Energie-speicherkapazität von 100 kWh angenommen. Zur besseren Veranschaulichung der Einsatzszenari- en und der Maschinenauslastung zeigt Abbildung 7 exemplarisch die Auslastung eines batterieelek- trischen Traktors in Abhängigkeit von der zu verrichtende Arbeit.



Abbildung 7: Maschinenauslastung anhand eines Traktors

Das Vergleichsbeispiel der Abbildung 8 zeigt verschiedene Einsatzszenarien für einen Traktor. Dabei wird das Fahrzeug kalt bei 0 °C gestartet und die Batterie sowie die Kabine werden auf 20 °C aufgeheizt. Der Vergleich zeigt die potenzielle Verlängerung der maximalen Maschinennutzungsdauer, wenn das Fahrzeug mithilfe einer Wärmepumpe unter Berücksichtigung verschiedener COP im Vergleich zur Widerstandsheizung aufgeheizt wird. Da der Aufheizvorgang bei 0 °C startet, liegt eine nutzbare Batteriekapazität von 85 % vor. Bei einer leichten Maschinenauslastung können Einsparungen von etwa 7 % bei einem COP von 2 bzw. bis zu 11 % bei einem COP von 4 erzielt werden (Abbildung 8, linkes Diagramm). Das rechte Diagramm der Abbildung 8 zeigt dabei zum besseren Verständnis eine mögliche Verlängerung der Maschinennutzungsdauer in Minuten. Bei einer leichten Arbeit der Maschine kann die Verlängerung der Maschinennutzungsdauer 14 bis 22 Minuten betragen. Die maximale Gesamteinsatzzeit des Traktors beträgt somit 3,3 Stunden.

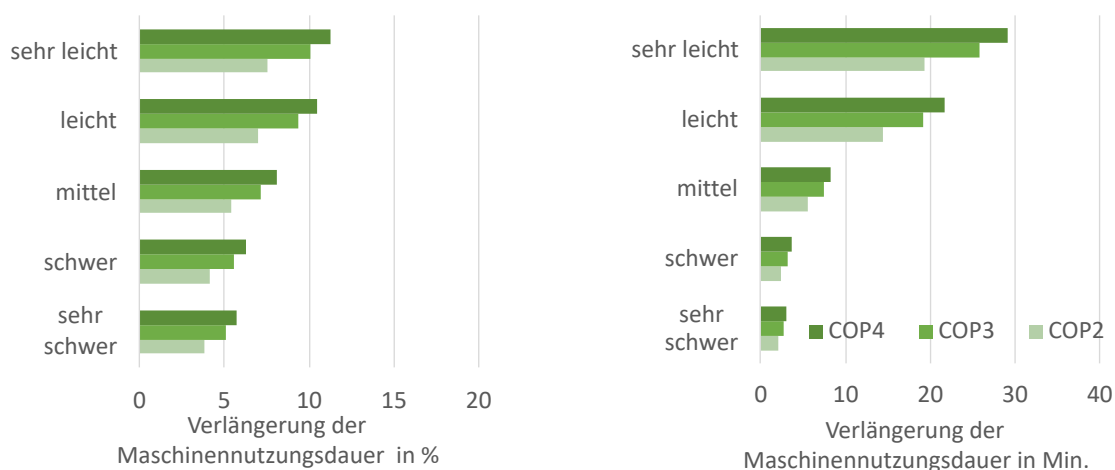


Abbildung 8: Vergleich der Maschinennutzungsdauer zwischen Wärmepumpe und Widerstandsheizung im Fall eines Kaltstarts, COP = Coefficient of Performance

Abbildung 9 veranschaulicht die Maschinennutzungsdauer des Traktors bei einer Starttemperatur von 0 °C und einer nutzbaren Batteriekapazität von 85 %. Dargestellt sind verschiedene Szenarien mit und ohne Beheizung der Fahrzeugkomponenten (Kabine und Batterie). Die unterste Balkengruppe repräsentiert den Referenzfall ohne Heizung, in dem eine maximale Maschinennutzungsdauer von über 4,3 Stunden erreicht wird. Durch den Einsatz eines Hochspannungsheizers (HVH), der aufgrund seines Wirkungsgrades einem COP von etwa 1 entspricht, reduziert sich die Nutzungsdauer deutlich, da ein erheblicher Anteil der elektrischen Energie für die Wärmeerzeugung aufgewendet werden muss. Mit zunehmendem COP, also einer höheren Effizienz der Wärmeerzeugung (durch den Einsatz einer Wärmepumpe), verlängert sich die mögliche Betriebszeit wieder.

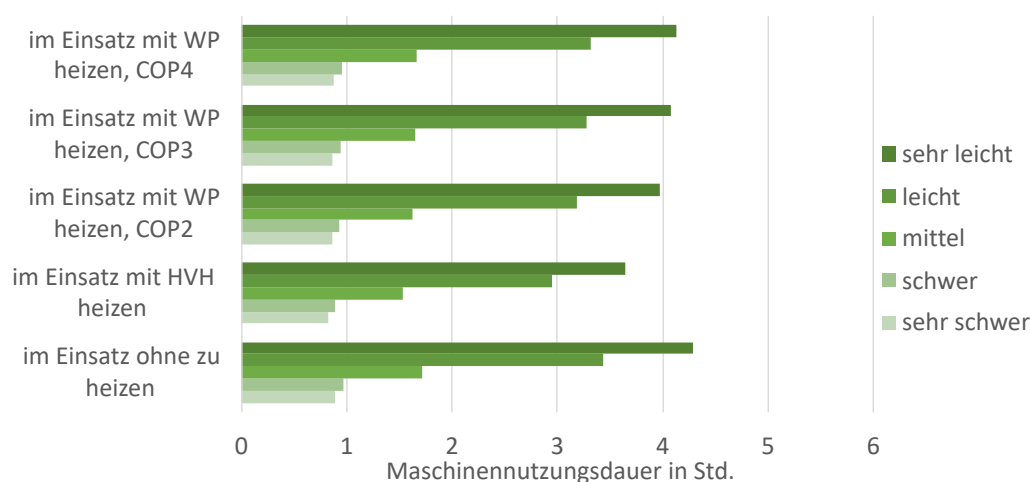


Abbildung 9: Maschinennutzungsdauer bei Variation der Beheizung und Maschinenauslastung; Batterie 85 % DOD, HVH = Hochspannungsheizer, WP = Wärmepumpe, COP = Coefficient of Performance

Bei einem COP von 4 nähert sich die Maschinennutzungsdauer nahezu dem Referenzfall ohne Heizung an. Auffällig ist, dass das Potenzial zur Verlängerung der Maschinennutzungsdauer mit sinkender Maschinenlast zunimmt. Ursache hierfür ist der konstante Heizleistungsbedarf der Kabine, der bei einer Umgebungstemperatur von 0 °C nie vollständig entfällt. Bei geringer Auslastung der Maschine stellt dieser konstante Wärmestrom einen größeren Anteil am Gesamtenergieverbrauch dar, wodurch Effizienzsteigerungen im Heizsystem stärker ins Gewicht fallen.

Abbildung 10 präsentiert verschiedene Einsatzszenarien für einen Traktor mit vorgeheiztem System (Kabine und Batterie). Dabei wird die Maschine kalt bei 0 °C Außentemperatur gestartet, wobei die Batterie sowie die Kabine auf 20 °C vorgeheizt sind (Warmstart). Die elektrische Energie hierfür wird aus dem Versorgungsnetz entnommen und nicht aus der Batterie. Zudem ist durch die Vorkonditionierung der Batterie am Stromnetz dessen Kapazität vollständig nutzbar. Der Vergleich zeigt, dass sich bei einer geringen Auslastung die Verlängerung der Maschinennutzungsdauer auf etwa 2,6 % bei einem COP von 2 bzw. auf 3,9 % bei einem COP von 4 reduziert. Die Verlängerung der Maschinennutzungsdauer beträgt dann 6 bis 10 Minuten, woraus eine Gesamteinsatzzeit von etwa 4 Stunden erreicht werden kann.

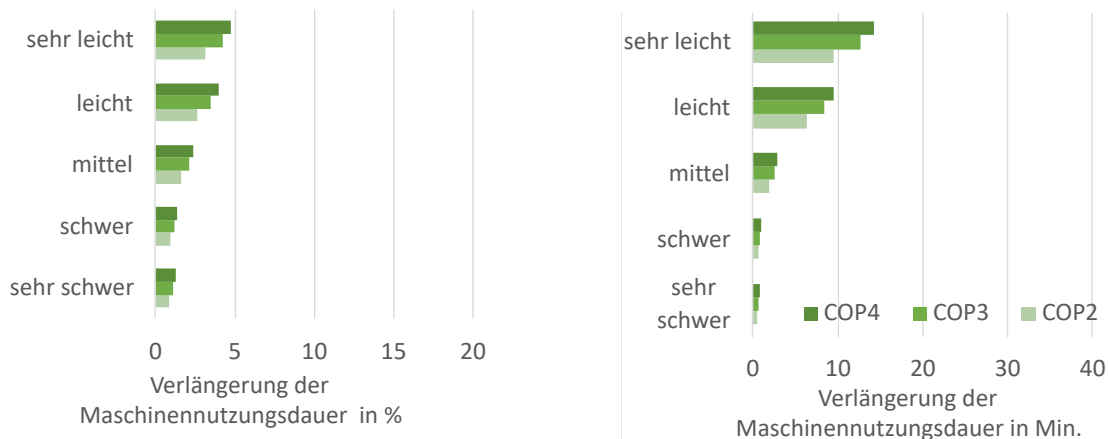


Abbildung 10: Vergleich der Maschinennutzungsdauer zwischen Wärmepumpe und Widerstandsheizung im Fall eines Warmstarts, COP = Coefficient of Performance

Abbildung 11 veranschaulicht, dass bei 100 % nutzbarer Batteriekapazität (vorgeheizte Batterie und Kabine) und sehr leichter Auslastung eine Maschinennutzungsdauer von 5 Stunden erreicht wird. Durch die Vorkonditionierung von Batterie und Kabine, die etwa 30 Minuten dauert und dabei rund 4,75 kWh Energie benötigt, müssen diese Komponenten während der Nutzung nicht mehr aufgeheizt, sondern lediglich auf Temperatur gehalten werden. Dadurch ergibt sich ein niedriger Wärmebedarf zum Heizen während der Maschinennutzungsdauer. Folglich ändert sich die Maschinennutzungsdauer bei einem COP von 4 nur marginal.

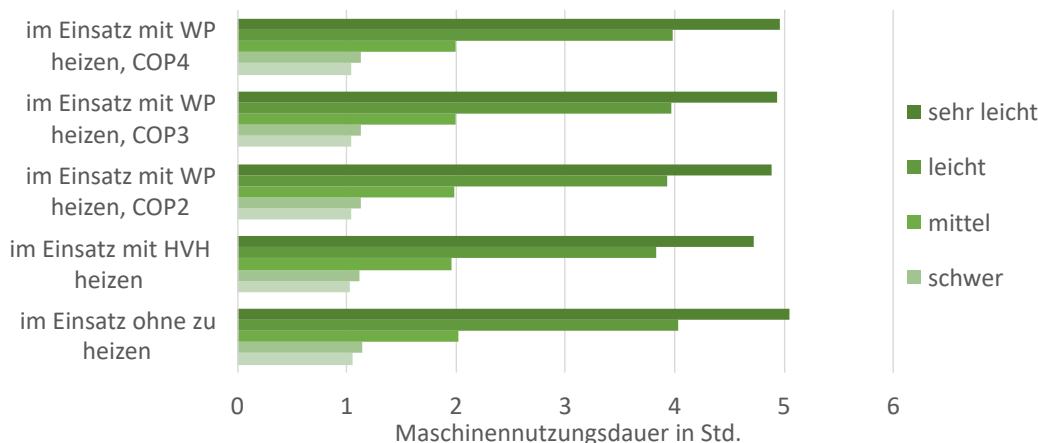


Abbildung 11: Maschinennutzungsdauer bei 100 % Batteriekapazität, HVH = Hochspannungsheizter, WP = Wärmepumpe, COP = Coefficient of Performance

Schlussfolgerungen

Wärmepumpen stellen eine vielversprechende technische Lösung zur Steigerung der Energieeffizienz von Elektrofahrzeugen dar, insbesondere unter Bedingungen, bei denen keine netzseitige Vorkonditionierung möglich ist. Die Nutzung von Abwärme aus Fahrzeugsystemen kann Energie einsparen und dadurch die Einsatzdauer eines Traktors verlängern, wenn sowohl ausreichend Abwärme zur Verfügung steht als auch die Temperatur des Abwärmemediums ausreichend hoch ist, um der Wärmepumpe die benötigte Wärme wirksam bereitzustellen. Sowohl im Fall eines Kaltstarts bei 0 °C ohne Vorkonditionierung (mit 85 % nutzbarer Batteriekapazität) als auch eines Warmstarts

mit netzseitiger Vorkonditionierung (100 % nutzbarer Batteriekapazität) wurden bei geringer Last mittels Messungen und Analysen Bestwerte für den Coefficient of Performance (COP) von über 4 ermittelt. Dies führt beim Kaltstart zu einem Maschinennutzungsdauergewinn von etwa 7–11 % bzw. 14–22 Minuten (COP 2–4) und beim Warmstart zu einer Steigerung von circa 2,6–3,9 % bzw. 6–10 Minuten. Der positive Effekt der Wärmepumpen nimmt mit abnehmender Maschinenauslastung zu, da der Wärmebedarf der Kabine konstant bleibt. Insgesamt unterstreichen die erzielten Ergebnisse das Potenzial von Wärmepumpen als Lösung zur Steigerung der Energieeffizienz und Verlängerung der Einsatzdauer von batterieelektrischen Landmaschinen, insbesondere unter realen Betriebsbedingungen ohne netzseitige Vorkonditionierung. Dennoch erfordert die erhöhte Systemkomplexität weitere Untersuchungen, um die Langzeitzuverlässigkeit und daraus resultierende Auswirkungen auf den Betrieb umfassend beurteilen zu können.

Literatur

- AGCO GmbH (2026): Fendt e100 Vario | Fendt – Der E-Standardtraktor. <https://www.fendt.com/de/landmaschinen/e-traktoren/fendt-e100vario>, Zugriff am 27.01.2026
- AgroFossilFree (2020): Rigitrac SKE 40 ELECTRIC. <https://www.platform.agrofossilfree.eu/de/view/feft/487>, Zugriff am 26.01.2026
- Breu, W.; Pichlmaier, B. (2017): Electrified Utility Tractor. In: Land.Technik AgEng 2017, VDI Verlag, S. 9–14
- Dohmann, J. (2016): Thermodynamik der Kälteanlagen und Wärmepumpen. Berlin, Heidelberg, Springer Verlag
- Doppelbauer, M. (2025): Grundlagen der Elektromobilität. Wiesbaden, Springer Fachmedien
- Ertel, W. (2025): Grundkurs Künstliche Intelligenz. Wiesbaden, Springer Fachmedien
- Joos, L. (Hg.) (2004): Energieeinsparung in Gebäuden – Stand der Technik, Entwicklungstendenzen. Essen, Vulkan-Verlag
- Korff, L. (2024): Entwicklung einer thermischen Arbeitsmaschine auf Basis des Kaltdampfprozesses mit Sekundärkreislauf für ein elektrifiziertes Fahrzeug. Masterarbeit, FH Münster, unveröffentlicht
- Markets and Markets (2025): Electric Tractor Market. <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/electric-tractor-market-109801941.html>, Zugriff am 21.10.2025
- Praetorius, B. (2018): Quo vadis Energiewende – Vision und Wirklichkeit. In: In Zukunft elektrisch - Energiesysteme im ländlichen Raum, KTBL-Tage 07.-08.03.2018 in Bayreuth, Darmstadt, KTBL, S. 4–7
- Rigitrac Traktorenbau AG (2025): Rigitrac SKE 40 e-direct Electric. https://www.rigitrac.com/app/download/12054267577/Prospekt+Rigitrac+SKE+40_2025.09_WEB.pdf?t=1768558063, Zugriff am 27.01.2026
- Suck, G.; Spengler, C. (2014): Lösungen für das Wärmemanagement von Batteriefahrzeugen. ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift 116(7-8), S. 12–19, <https://doi.org/10.1007/s35148-014-0443-x>
- Weustenfeld, T.A. (2018): Heiz- und Kühlkonzept für ein batterieelektrisches Fahrzeug basierend auf Sekundärkreisläufen. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, Cuvillier Verlag, https://leopard.tu-braunschweig.de/servlets/MCRFileNodeServlet/dbbs_derivate_00044210/Diss_Weustenfeld_Thomas.pdf, Zugriff am 27.01.2026

Autoren

Benjamin Wilk, M. Sc., ist Mitarbeiter der elektrischen Antriebstechnik und **Dipl.-Ing. (FH) Philipp Heymann** ist Abteilungsleiter der elektrischen Antriebstechnik, Claas Industrietechnik GmbH, Halberstädter Straße 15-19, 33106 Paderborn und **Dr.-Ing. Jan Wieckhorst** ist Abteilungsleiter der Traktor Vorentwicklung, Claas Tractor SAS, Halberstädter Straße 15-19, 33106 Paderborn. E-Mail: Benjamin.Wilk@claas.com

Prof. Dr. Ludger Frerichs ist Institutsleiter am Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge der TU Braunschweig, Langer Kamp 19a, 38106 Braunschweig.