

Thermisches Systemdesign für batterieelektrische Landmaschinen

Benjamin Wilk, Jan Wieckhorst, Philipp Heymann, Ludger Frerichs

Die zunehmende Nutzung batterieelektrischer Antriebssysteme in Landmaschinen der unteren Leistungsklassen erfordert Lösungen zur Optimierung der Energieeffizienz. Dies stellt komplexe Herausforderungen an das Energiemanagement und die thermische Regelung der Fahrzeuge dar. Neben der Steigerung der Gesamteffizienz durch die Weiterentwicklung des elektrisch-mechanischen Antriebsstrangs gewinnt vor allem das thermische System an Bedeutung. Durch die Nutzung von Abwärme lässt sich der elektrische Energiebedarf für die Klimatisierung der Fahrzeugkabine und die Konditionierung der Traktionsbatterie reduzieren, was die Einsatzdauer erhöhen kann.

In diesem Beitrag wird ein Ansatz zur Auslegung und Umsetzung thermisch-hydraulischer Systemarchitekturen für batterieelektrische Landmaschinen vorgestellt. Ein Schwerpunkt der Untersuchung liegt auf der Integration von Standardfahrzeugkabinen, wie sie in verbrennungsmotorisch angetriebenen Maschinen verwendet werden. Dadurch wird vermieden, dass weitere Varianten im Produktportfolio der Kabinen erforderlich sind. Da diese Kabinen für hohe Wassereingangstemperaturen von etwa 90 °C ausgelegt sind, ergeben sich beim Einsatz in batterieelektrischen Fahrzeugen aufgrund des niedrigeren Temperaturniveaus des Komponentenkühlmediums spezifische Herausforderungen im Thermomanagement, um die Kabine bereits ab einem niedrigen Starttemperaturniveau schnell, ausreichend und effizient zu konditionieren.

Um diesen Herausforderungen gerecht zu werden, dient eine Systemarchitektur als Grundlage für die Entwicklung hybrider Betriebsmodi, die verschiedene Heizmethoden kombinieren und so eine flexible sowie energieeffiziente Temperierung von Kabine und Traktionsbatterie ermöglichen. Es wird eine experimentelle Systemarchitektur präsentiert, die es erlaubt, Kabine und Traktionsbatterie mit drei wesentlichen Heizmethoden zu konditionieren.

Schlüsselwörter

Thermomanagement, Wärmepumpe, batterieelektrischer Traktor

Die zunehmende Elektrifizierung von Land- und Baumaschinen verstärkt die Notwendigkeit effizienter Heizsysteme, um die Einsatzdauer der Maschinen zu verlängern. Bisherige Ansätze zur Beheizung batterieelektrischer Fahrzeuge, die primär auf elektrischen Widerstandsheizern basieren, führen zu einer deutlichen Reduzierung der Einsatzdauer (KONZ et al. 2023). Wärmepumpen bieten hier eine vielversprechende Alternative, indem sie Abwärme aus Fahrzeugkomponenten wie dem Elektromotor, der Leistungselektronik und dem mechanischen Antriebsstrang nutzen (BACH et al. 1966, REMSBURG 1998, Joos 2004, KONZ et al. 2023). Zudem kann durch die intelligente Vernetzung des thermischen Systems mittels Ventilen die Abwärme effizient zum Heizen genutzt werden (PICHLMAIER und EHRL 2025). Fendt hat in diesem Zusammenhang einen schematischen Aufbau des Ther-

momagements am Versuchstraktormodell e100 Vario vorgestellt, bei dem mithilfe einer Wärmepumpe sowie entsprechender Sekundärkreisläufe mit Ventilen ein thermisches Managementsystem entwickelt und getestet wurde (BREU und PICHLMAIER 2017). Dabei wurden jedoch keine Angaben zu einem möglichen Effizienzsteigerungspotenzial durch ein ganzheitliches Thermomanagement gemacht. Für die Konzeptstudie war somit ein Wärmepumpensystem vorgesehen, während ein solches in den bislang verfügbaren Serienfahrzeugen nicht verbaut wird.

Die Firma Rigitrac hat mit dem Traktor SKE 40 e-direct Electric die erste Serienmaschine auf dem Markt, welche mithilfe einer Wärmepumpe die Kabine beheizen kann. Zusätzlich wird der Kaldampfprozess auch genutzt, um die Kabine zu kühlen (RIGITRAC TRAKTORENBAU AG 2025). Im Rahmen eines durch das Schweizer Bundesamt für Energie geförderten Pilot- und Demonstrationsprojekts wurden weiterführende Informationen zum eingesetzten Wärmepumpensystem veröffentlicht. Dabei kommt eine Sole-Sole-Wärmepumpe mit zwei umschaltbaren hydraulischen Kreisläufen zum Einsatz, welche die Abwärme von Elektromotor, Frequenzumrichtern und der Hydraulikölkühlung nutzt, um sowohl die Fahrzeugkabine als auch die Batterie zu temperieren. Die im Projekt veröffentlichten Untersuchungen zeigen, dass das System im Heizbetrieb einen mittleren COP von etwa 2,9 erreicht. Abhängig vom Einsatzprofil ermöglicht dies eine Verlängerung der Einsatzdauer um etwa 6 bis 10 % gegenüber einer rein elektrischen Widerstandsheizung. Zudem wird hervorgehoben, dass aufgrund der Nutzung interner Abwärmequellen auf eine Außenluftquelle verzichtet werden kann, wodurch Vereisungsprobleme des Verdampfers vermieden werden. Die Systemarchitektur basiert dabei ebenfalls auf umschaltbaren hydraulischen Kreisläufen und Ventilen, wodurch ein kombinierter Heiz- und Kühlbetrieb ermöglicht wird (VOGEL 2026).

Die vorgestellten Untersuchungen zielen auf die Entwicklung eines integrierten thermischen Systems ab, um Verlustleistungswärmeströme für die Konditionierung von Batterie und Fahrzeugkabine nutzbar zu machen. Es gibt verschiedene thermische Systemarchitekturen, um die Anforderungen an die Konditionierung unterschiedlichster Komponenten in einem Flüssigkeitskühlkreislauf (MENKEN 2016) zu erfüllen. Die prominenteste Methode im Automobilsektor zeigt Tesla mit dem Oktovalve-Konzept, bei dem mit einem einzigen Ventil ein ganzheitliches Thermomanagement inklusive Abwärmenutzung realisiert wird (TESLA INC 2024).

Bisherige Arbeiten zeigen bereits die grundsätzliche Möglichkeit zur Nutzung von Wärmepumpen und Abwärme in elektrifizierten Fahrzeugen. Allerdings fokussieren diese Ansätze überwiegend einzelne Teilsysteme oder spezifische Fahrzeuganwendungen, ohne eine systematische Betrachtung eines vollständig gekoppelten Thermomanagements für batterieelektrische Landmaschinen bereitzustellen. Insbesondere die flexible Kopplung unterschiedlicher Wärmequellen und Wärmesenken, die Abbildung verschiedener Betriebszustände innerhalb einer einheitlichen Systemarchitektur sowie die Integration bestehender Standardfahrzeugkabinen aus einem verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeug wurden bislang nur begrenzt behandelt. Der vorliegende Beitrag adressiert diese Forschungslücke durch die Entwicklung und Analyse eines mehrkreisigen, ventilgesteuerten Thermomanagementsystems, das verschiedene Heiz- und Kühlstrategien innerhalb einer unveränderten Hardwarearchitektur ermöglicht.

Systemanalyse

Im weiteren Verlauf wird der Systemaufbau mit ausschließlich flüssigkeitsgekühlten Komponenten betrachtet. Um einen grundsätzlichen Überblick über die möglichen Systemzustände zu erhalten, wird eine Variantenanalyse durchgeführt (Tabelle 1). Dies ermöglicht es, die maximalen Systemzustände zu bestimmen und mögliche nicht logische Zustände auszuschließen. Nicht logische Zustände umfassen beispielsweise das gleichzeitige Heizen und Kühlen der Batterie (Tabelle 1, Spalte 63, rot markiert).

Tabelle 1: Variantenanalyse zur Bestimmung der Systemzustände für ein Thermomanagement; 1: System aktiv, 0: System inaktiv, grün hinterlegt: logisch, rot hinterlegt: nicht logisch

Fall:	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	...	63
Batterie kühlen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	...	1
Batterie heizen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	...	1
Kabine kühlen	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	...	1
Kabine heizen	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	...	1
Öl kühlen	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	...	1
Elektronik kühlen	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	...	1

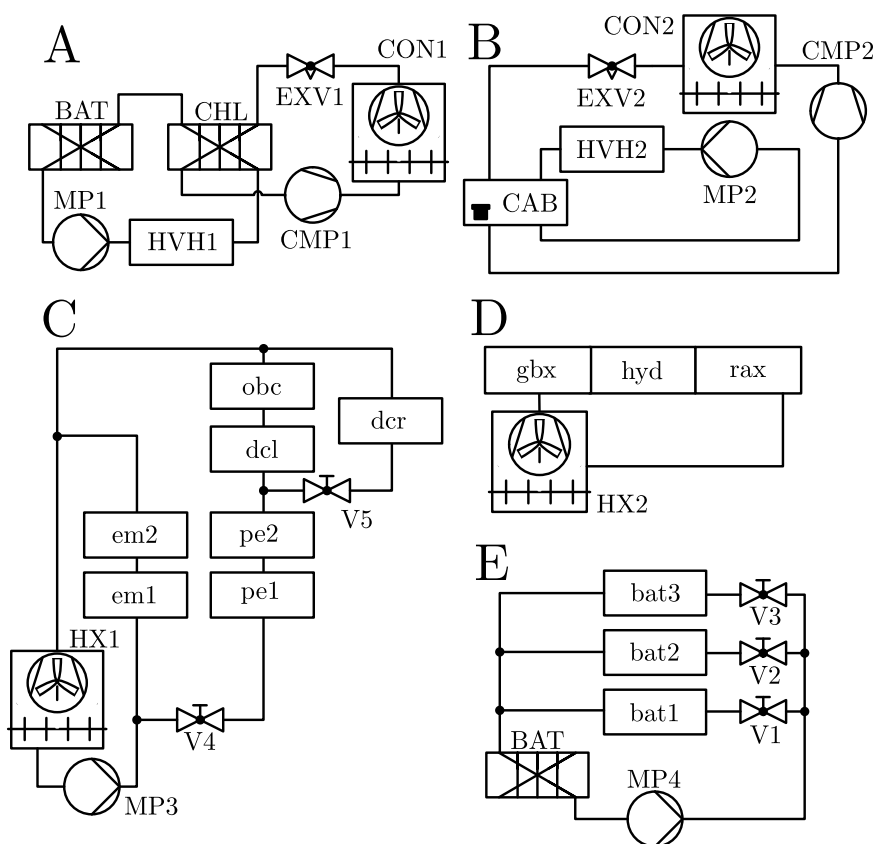
Nachdem die Matrix auf 48 logische Systemzustände reduziert wurde, erfolgte eine weitere Filterung der Variantenanalyse, um die im realen Fahrzeugbetrieb relevanten Systemzustände zu identifizieren.

Die in Tabelle 2 dargestellte Methode analysiert verschiedene Betriebsvarianten des Fahrzeugs unter unterschiedlichen Temperaturbedingungen, ausgehend von definierten Starttemperaturen sowie verschiedenen Phasen wie Laden oder Fahren. Ziel ist es, die tatsächlich für den Betrieb relevanten Zustände zu bestimmen und somit die Komplexität der Softwareentwicklung zu verringern. Diese Zustände sind in der Zeile „Gefilterte Var.“ codiert (0 = nicht benötigt, 1 = benötigt) und können den entsprechenden Systemzuständen zugeordnet werden.

Tabelle 2: Variantenfilter in Abhängigkeit von der Starttemperatur und des Fahrzeugsystemzustandes; L: niedrige, M: mittlere, H: hohe; 0 = nicht benötigt, 1 = benötigt

Fall:	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	...	47
L. Temp.	Vor: Laden	1															...	
	Während: Laden	1	1			1	1						1	1			...	
	Vor: Fahrt	1				1							1				...	
	Während: Fahrt	1	1		1	1		1					1	1		1	...	1
M. Temp.	Vor: Laden	1															...	
	Während: Laden	1	1										1	1			...	
	Vor: Fahrt	1											1				...	
	Während: Fahrt	1	1		1								1	1		1	...	1
H. Temp.	Vor: Laden	1															...	
	Während: Laden																...	
	Vor: Fahrt	1							1				1				...	
	Während: Fahrt																...	1
Gefilterte Var.	1	1		1	1	1		1	1			1	1		1	...	1	

Nachdem die Variantenmatrix auf die im realen Betrieb benötigten Systemzustände reduziert wurde, wird ein schematisches System entwickelt, das die wesentlichen Zustände abbildet. Dabei wird der Detailaufbau des Systems noch nicht berücksichtigt, und Komponenten wie ein Kältemittel-trockner oder andere Hilfseinrichtungen bleiben unberücksichtigt. Die Abbildung 1 zeigt eine thermische Systemarchitektur für eine elektrische Landmaschine, welche alle Systemzustände erfüllt, wie zuvor mit der Variantenanalyse bestimmt. Dabei ist anzumerken, dass die Standardfahrzeugkabine aus dem verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeug unmodifiziert genutzt wird. Jede Komponente kann so fundamental nach den vorgegebenen Anforderungen gekühlt oder beheizt werden.



BAT	Wärmeübertrager	EXV	Expansionsventil
CAB	Fahrzeugkabine	GBX	Wärmeübertrager
CHL	Kältemittelverdampfer	HVH	Hochspannungsheizer
CMP	Kältemittelkompressor	HX	Wasser/Luft-Wärmeübertrager
CON	Kältemittelkondensator	MP	Medienpumpe
ELE	Wärmeübertrager	V	Ventil
bat	Batterie	hyd	Hydraulik
dcl	Gleichspannungswandler	obc	On-Board Ladegerät
dcr	Gleichspannungswandler	pe	Leistungselektronik
em	E-Maschine	rax	Hinterachse
gbx	Getriebe		

Abbildung 1: Basis-Systemaufbau eines Thermomanagements für eine batterieelektrische Landmaschine; Kreislauf A: Batterieconditionierung, Kreislauf B: Kabinenklimatisierung, Kreislauf C: Elektronikkomponenten-Kühlung, Kreislauf D: Antriebsstrangkühlung, Kreislauf E: Batterieconditionierungs-Flüssigkeitskreislauf

Kreislauf A ist für die Temperierung des Batteriekreislaufs zuständig und stellt sowohl Heiz- als auch Kühlfunktionen bereit. Die Verbindung zum Kreislauf E erfolgt über den Plattenwärmeübertrager BAT, der einen weiteren Flüssigkeitskreislauf für die Immersionskühlung der Batteriezellen mit einer dielektrischen Flüssigkeit ermöglicht. Diese Flüssigkeit darf nicht mit leitfähigen Medien in Kontakt kommen. Über eine Medienpumpe (MP1) wird ein Wasser-Glykol-Gemisch durch den Hochspannungsheizer (HVH1) und den Verdampfer (CHL) des Kältemittelkreislaufs (CMP1, CON1, EXV1) zum Wärmeübertrager (BAT) gepumpt. Im Heizbetrieb erwärmt der Hochspannungsheizer das Wasser-Glykol-Gemisch, das anschließend über die Primärseite des Wärmetauschers Wärme an die Batterie abgibt (Kreislauf E). Eine weitere Medienpumpe (MP4) im Kreislauf E führt das erwärmte Medium zu hydraulischen Abgleichventilen (V1-3), welche die Verteilung des Volumenstroms auf die parallel angeordneten Batteriemodule (bat1-3) sicherstellen. Diese Ventile kompensieren Strömungsverluste, die infolge asymmetrischer Schlauchführungen auftreten können.

Im Kreislauf B wird der Systemaufbau für die Klimatisierung der Fahrzeugkabine beschrieben, wobei der Reheat-Betrieb zur Entfeuchtung der Innenraumluft berücksichtigt wird. Dabei wird die Luft unterhalb des Taupunkts abgekühlt, um Feuchtigkeit auszuscheiden, und anschließend wieder erwärmt, um die Luftfeuchtigkeit zu regulieren. Eingesetzt wird eine Standardfahrzeugkabine mit Wasser-Luft- und Kältemittel-Luft-Wärmeübertragern, die in Serie angeordnet sind. Die Kabinenkühlung erfolgt über einen separaten Kältekreislauf (CMP2, CON2, EXV2) mit direkter Luftkühlung des Kondensators. Für die Beheizung wird ein Hochspannungsheizer (HVH2) eingesetzt, der mit einem Wasser-Glykol-Gemisch versorgt wird und die Wärme über einen Wärmeübertrager an die Innenraumluft abgibt.

Der flüssigkeitsgekühlte Kreislauf C versorgt elektrische Komponenten wie Gleichspannungswandler, Leistungselektronik und Maschinen mit einem Wasser-Glykol-Gemisch. Über den Wärmeübertrager (HX1) wird die aufgenommene Verlustwärme an die Umgebung abgegeben. Die Volumenstromverteilung erfolgt über hydraulische Abgleichventile (V4-5) passend zu den jeweiligen Kühlanforderungen. Abschließend regelt Kreislauf D die Ölkühlung für den gemeinsamen Vorrat aus Getriebe, Hydraulik und Hinterachse. Das Öl wird über einen Wärmeübertrager (HX2) an die Umgebungsluft abgegeben, wobei die Medienpumpe in der Hinterachse integriert ist.

Für die Auslegung eines solchen Systems ist vorab eine umfassende Systemanalyse erforderlich, die die erreichbaren Volumenströme in den einzelnen Subsystemen sowie die maximal zulässigen Eingangstemperaturen berücksichtigt. Wasserpumpen (ausgeführt als Strömungsmaschine) unterliegen einer charakteristischen Förderkennlinie, sodass aufgrund des entstehenden Druckverlustes nicht unbegrenzt viele Komponenten mit dem erforderlichen Volumenstrom durchströmt werden können. Zudem darf die maximale Eingangstemperatur des Kühlmediums unter spezifizierter Last nicht überschritten werden, da sonst die geforderte Leistungsfähigkeit des Systems eingeschränkt wird. Insbesondere elektrische Komponenten wie Leistungselektronik und E-Maschine müssen innerhalb ihrer vorgegebenen Temperaturgrenzen betrieben werden, da andernfalls aufgrund des sogenannten Deratings die elektrische Ausgangsleistung reduziert wird, um thermische Überlastungen und Schäden an der Elektronik zu vermeiden.

Darüber hinaus wird angestrebt, die Kühlwassertemperatur möglichst hoch zu halten, um die Effizienz des Wärmeübertragers zur Umgebung zu maximieren. Bei geringer Temperaturdifferenz zwischen Kühlmedium und Umgebung muss entweder der Luftvolumenstrom erhöht oder die Wärmeübertragerfläche vergrößert werden. Letzteres ist jedoch durch den begrenzten Bauraum, bei-

spielsweise in Standardtraktoren, stark eingeschränkt. Gleichzeitig sollte der elektrische Leistungsbedarf für den Lüfterbetrieb minimiert werden, da Landmaschinen in der Regel aktiv mit Kühlluft versorgt werden müssen, was den Energieverbrauch maßgeblich beeinflusst. Daher wird nachfolgend die Analyse des hydraulisch-thermischen Systems am Beispiel skizziert.

Analyse der stationären thermischen Anlagenkennlinie eines Kühlkreislaufs

Abbildung 2 zeigt ein Temperatur-Leistungs-Diagramm eines exemplarischen Kühlkreislaufs für Elektronikkomponenten. Mithilfe dieses Diagramms können die Einlasstemperatur, die minimal benötigte Kühlleistung sowie der benötigte Gesamtvolumenstrom für den Luft-Wasser-Wärmeübertrager (HX) bestimmt werden.

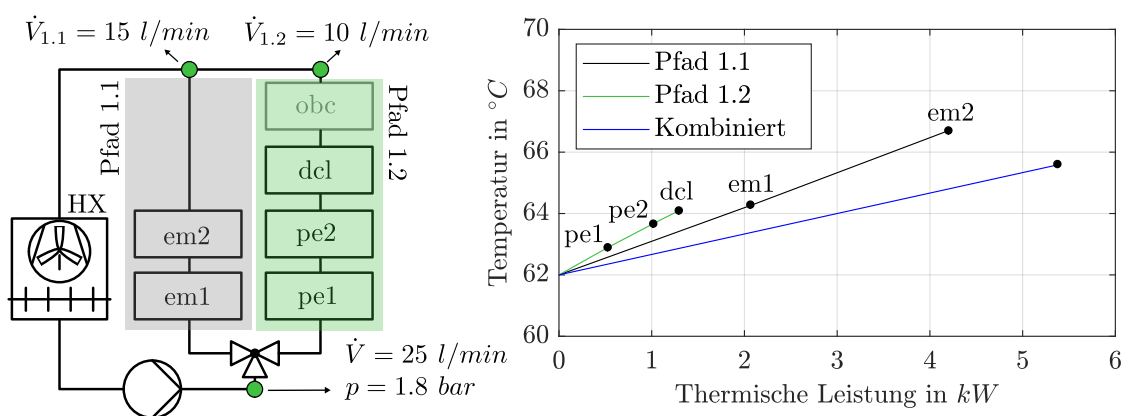


Abbildung 2: Temperatur-Leistungs-Diagramm eines exemplarischen Kühlkreislaufs für Elektronikkomponenten; HX: Wärmeübertrager, em: elektrische Maschine, pe: Inverter, dcl: Spannungswandler, obc: On-Board Ladegerät

Die Anordnung der Komponenten erfolgt entsprechend ihrer maximal zulässigen Eingangstemperaturen und thermischen Sensitivitäten. Anschließend werden sie unter Berücksichtigung der Volumenstromanforderungen systematisch auf die jeweiligen Kühlstränge verteilt (REITER 2020). Hierfür wird der benötigte Kühlwasservolumenstrom angenommen, der vom Hersteller zur Kühlung der Komponenten gefordert wird. Zur Bestimmung der Ausgangstemperaturen wird das Temperatur-Leistungs-Diagramm nach BRUNNER et al. (2017) herangezogen. Dieses stellt eine etablierte Methode zur thermischen Bewertung gekoppelter Prozesse dar und ermöglicht die systematische Analyse von Temperatur- und Leistungsniveaus in kontinuierlichen sowie diskontinuierlichen Prozessen. Die Anwendung erfolgt gemäß den im Handbuch für die Analyse von kontinuierlichen Prozessen und Batch-Prozessen beschriebenen Grundsätzen.

Mithilfe dieser Methode erfolgt eine iterative Erhöhung der Systemstarttemperatur, bis die Grenze der maximalen Einlasstemperatur der seriell geschalteten Komponenten als thermische Randbedingung erreicht wird. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass alle Komponenten innerhalb ihrer spezifizierten Temperaturgrenzen betrieben werden. Für den Pfad ELE 1.1 beträgt die Wassereingangstemperatur für die Komponente EM2 67 °C. Des Weiteren lässt sich die benötigte thermische Leistungsfähigkeit des Wärmeübertragers bestimmen. Hierzu wird der Gesamtvolumenstrom des Kühlmediums aus den Pfaden ELE 1.1 und ELE 1.2 ermittelt und anschließend eine Temperaturänderung durch die Mischung der Flüssigkeiten mit unterschiedlichen Volumenströmen berechnet. Durch

die Addition der Wärmeleistungen aus den Pfaden ELE 1.1 und ELE 1.2 wird die in diesem Betriebspunkt abzuführende Gesamtwärmeleistung ermittelt. Im dargestellten Beispiel muss der Wärmeübertrager (HX) in der Lage sein, eine Wärmeleistung von 5,4 kW bei einer Wassereingangstemperatur von 66 °C und einem Volumenstrom von 25 l/min abzuführen.

Analyse der hydraulischen Anlagenkennlinie eines Kühlkreislaufs

Abbildung 3 zeigt die Anlagenkennlinie (BSCHORER und KÖLTZSCH 2021) eines Kühlkreislaufs und bietet eine detaillierte Analyse des Druckverhaltens in Abhängigkeit vom Volumenstrom. Die schwarze Linie repräsentiert den Druckverlust, der durch alle im Kreislauf integrierten Komponenten verursacht wird, während die grüne Linie die Charakteristik der Wasserpumpe darstellt.

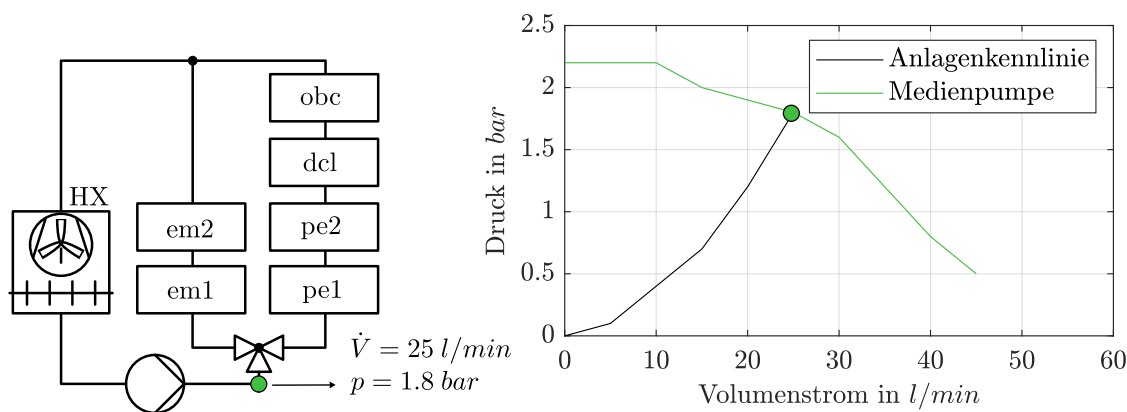


Abbildung 3: Identifikation der hydraulischen Anlagenkennlinie; der grüne Punkt stellt den Messpunkt der Anlagenkennlinie am Pumpenausgang dar; HX: Wärmeübertrager, em: elektrische Maschine, pe: Inverter, dcl: Spannungswandler, obc: On-Board-Ladegerät

Die schwarze Linie zeigt einen kontinuierlichen Anstieg des Druckverlusts mit steigendem Volumenstrom. Dieser Verlauf ist typisch für hydraulische Systeme, da der Druckverlust bei turbulenter Strömung mit zunehmendem Volumenstrom überproportional ansteigt (SIGLOCH 2022). Dies resultiert aus Reibungsverlusten in den Rohrleitungen und zusätzlichen Verlusten in Komponenten wie Wärmetauschern und Ventilen. Bei geringen Volumenströmen sind die Druckverluste marginal, nehmen jedoch mit zunehmendem Durchfluss deutlich zu. Die grüne Linie stellt den Förderdruck der Medienpumpe in Abhängigkeit vom Volumenstrom dar. Zu Beginn, bei niedrigen Volumenströmen, zeigt die Pumpe einen hohen Förderdruck. Mit zunehmendem Volumenstrom nimmt der Förderdruck ab, was für Strömungsmaschinen charakteristisch ist (BOHL und ELMENDORF 2013). Diese Abnahme resultiert aus den steigenden dynamischen Verlusten, die bei höheren Durchflussraten auftreten. Der Schnittpunkt der schwarzen und grünen Linie definiert den Betriebspunkt des Systems. An diesem Punkt sind der von der Pumpe erzeugte Druck und der Druckverlust im Kreislauf gleich. Der Betriebspunkt zeigt den Arbeitspunkt der Anlage und quantifiziert zudem den Fördervolumenstrom im System. Die Analyse des Diagramms verdeutlicht die Notwendigkeit einer präzisen Abstimmung zwischen Pumpenleistung und Systemanforderungen. Durch die Optimierung des Betriebspunkts kann der Energiebedarf der Anlage verringert werden (ALLELEIN et al. 2010).

Während der Entwicklung ist es wichtig, bei Veränderungen in den Systemanforderungen die Leistungsfähigkeit des Kühlkreislaufs zu überprüfen, damit der minimal erforderliche Kühlmittelvolumenstrom nicht unterschritten wird. Darüber hinaus ist die Anzahl der in Serie durchströmten Komponenten innerhalb eines Kühlkreislaufs begrenzt. Ursache hierfür ist der mit jeder zusätzlichen Komponente zunehmende Druckverlust, der bei gegebener Pumpenauslegung zu einer Reduktion des Volumenstroms führt. Wird der erforderliche Mindestvolumenstrom unterschritten, kann die thermische Leistungsfähigkeit des Kreislaufs nicht mehr gewährleistet werden. Aus diesem Grund wird der Kühlkreislauf bei gegebener Pumpe in parallele Kühlpfade unterteilt. Jedes Segment wird spätestens dann durch einen Wärmeübertrager hydraulisch geschlossen, wenn infolge des kumulierten Druckverlustes der minimal erforderliche Volumenstrom nicht mehr erreicht werden kann (KONZ et al. 2023).

Wärmepumpen in batterieelektrischen Landmaschinen

Wärmepumpen können eine Maßnahme zur Verbesserung der Energieeffizienz bei batterieelektrischen Landmaschinen darstellen, vor allem in Situationen, in denen eine Vorkonditionierung über das Stromnetz nicht möglich ist. Eine modellbasierte Sensitivitätsanalyse deutet darauf hin, dass im Kaltstart durch den Einsatz einer Wärmepumpe zur Nutzung von Abwärme gegenüber einer Widerstandsheizung eine Nutzungsdauerverlängerung im Bereich von etwa 7 bis 11 % für einen Hoftraktor mit einem moderaten gemischten Einsatzprofil, einer Systemleistung von 100 kW und einer Batteriekapazität von 100 kWh erreicht wird. Bei einem COP von 2 bis 4 entspricht dies einer Verlängerung der Betriebsdauer von ca. 14 bis 22 Minuten (WILK et al. 2026). Auf dieser Grundlage ist ein fahrzeugintegriertes thermisches System zu entwickeln, mit dem die modellierten Einsparungen experimentell validiert werden können.

Funktionsweise der Wärmepumpe

Wärmepumpen transportieren Wärmeenergie unter Einsatz mechanischer Arbeit von einem niedrigeren auf ein höheres Temperaturniveau. Sie entziehen der Umgebung Wärme und übertragen diese auf ein höheres Temperaturniveau (BÖCKH und STRIPF 2015). Der Prozess umfasst vier Hauptphasen: Verdampfung, Kompression, Kondensation und Expansion (DOHMANN 2016). Im Fahrzeug kann ein Kaltdampfprozess sowohl als Wärmepumpe zur Beheizung als auch als Kälteanlage zur Kühlung eingesetzt werden, was seine Vielseitigkeit deutlich erhöht (WEUSTENFELD 2018). Abbildung 4 zeigt exemplarisch die Wirkungsweise eines Kaltdampfprozesses im Wärmepumpenbetrieb. Dabei wird der Umgebung mithilfe des Verdampfers Wärme entzogen und auf der Kondensatorseite auf einem höheren Temperaturniveau abgegeben.

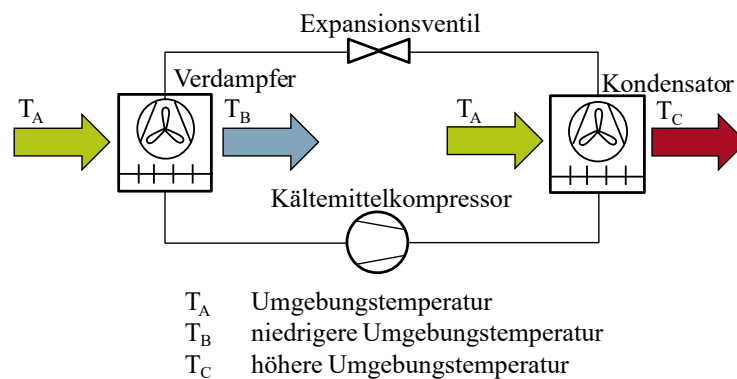


Abbildung 4: Schema des Wärmepumpenprinzips hinsichtlich der Prozesstemperatur

Sekundärkreisläufe zur Abwärmenutzung

Ein Sekundärkreislauf kann implementiert werden, um die Abwärme von Komponenten wie dem Getriebe und der Hydraulik nutzbar zu machen. Dabei ist der Primärkreislauf stofflich vom Sekundärkreislauf getrennt, sodass beispielsweise kein Fluidaustausch stattfindet, sondern über einen Wärmeübertrager ausschließlich ein Wärmestrom übertragen wird.

Direkte Abwärmenutzung

In diesem Fall könnte die Hydraulik mit einem Wasser-Glykol-Kreislauf gekoppelt werden. Diese Abwärme kann dann in den Heizprozess eingebracht werden, welcher die Wärme direkt an eine Wärmesenke überträgt, wie etwa die Fahrzeugkabine und/oder die Batterie (Abbildung 5).

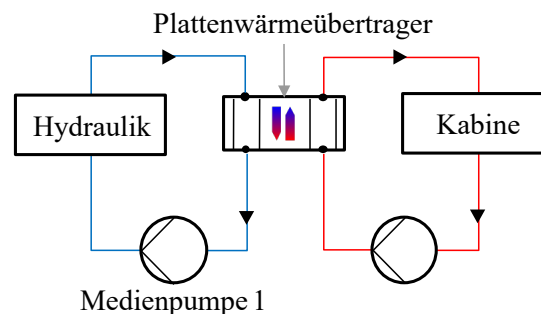


Abbildung 5: Schema für einen einfachen Sekundärkreislauf zur Abwärmenutzung aus der Hydraulik

Der Wärmestrom könnte aber auch einem Verdampfer eines Kaltdampfprozesses zugeführt werden, wodurch dieser anschließend an einen weiteren Sekundärkreislauf auf der Kondensatorseite des Kaltdampfprozesses mit höherem Temperaturniveau abgegeben wird. Dies hätte den Vorteil, dass die zugeführte Verlustleistung bereits bei Temperaturen unter 60 °C im Hydraulikölkreislauf nutzbar gemacht werden kann. Dies ist der Fall, wenn eine Standardfahrzeugkabine ohne Modifikation des Wärmeübertragers genutzt wird, da bei geringeren Temperaturdifferenzen eine reduzierte Heizleistung des Wärmeübertragers resultiert.

Wärmepumpenbetrieb mit Umgebungsluft

Abbildung 6 zeigt eine Wärmepumpe, bei der mithilfe des Primärkreises (grüne Verbindungslinien) und des Wärmeübertragers HX Wärme aus der Umgebung entnommen wird. Diese Wärme wird dann im Kaltdampfprozess auf ein höheres Temperaturniveau gebracht und über den Plattenwärmeübertrager CON in den Sekundärkreislauf übertragen. Die dort übertragene Wärme kann dann zur Beheizung der Kabine mithilfe des in der Kabine befindlichen Wärmeübertragers genutzt werden. Zusätzlich steigt die Heizleistung durch die im Kaltdampfprozess eingebrachte Verdichterarbeit, welche sich im Kondensatorwärmestrom wiederfindet.

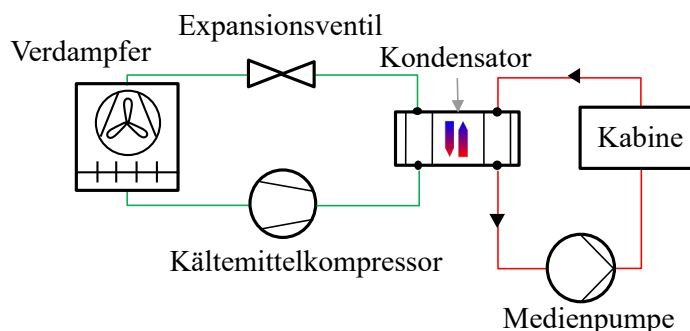


Abbildung 6: Schema eines Kaltdampfprozesses mit Sekundärkreislauf im Wärmepumpenbetrieb aus der Umgebungsluft

Wärmepumpe mit Abwärmequelle

Abbildung 7 veranschaulicht ein mehrstufiges Heizsystem, das zur Übertragung von Wärme aus einem Hydraulikölkreislauf auf einen Wasser-Glykol-Heizkreislauf für die Fahrzeugkabine dient. Dieses System besteht im Wesentlichen aus einem zentralen Primärkreislauf und zwei Sekundärkreisläufen, die jeweils unterschiedliche Funktionen übernehmen und durch Wärmeübertrager thermisch gekoppelt sind, dabei jedoch eine medien- und druckseitige Entkopplung gewährleisten.

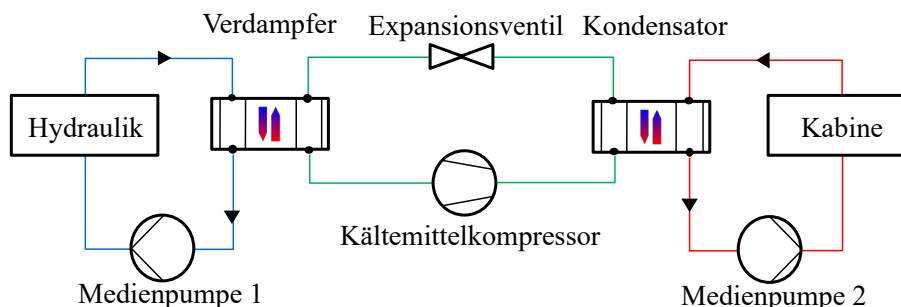


Abbildung 7: Kaltdampfprozess mit zwei Sekundärkreisläufen zur Nutzung von Abwärme aus dem Hydraulikölkreislauf mittels des Wärmepumpenprinzips

Der Primärkreislauf, farblich grün dargestellt, arbeitet im Kaltdampfprozess und übernimmt die Rolle eines thermischen Vermittlers zwischen den Sekundärkreisläufen. Er nimmt den Wärmestrom aus dem Hydrauliksystem auf, verdichtet das Kältemittel zur Erhöhung von Druck und Temperatur und

transportiert die Wärme anschließend zum Heizkreislauf. Durch diese Funktion ermöglicht der Primärkreislauf eine flexible Steuerung des Wärmetransports, ohne die Medien direkt zu vermischen.

Der linke, blau dargestellte, Sekundärkreislauf repräsentiert den Hydraulikölkreislauf und dient als Wärmequelle für das Thermomanagementsystem. Die Abwärme kann hierbei auf einem niedrigeren Temperaturniveau entnommen werden. Dabei ist sicherzustellen, dass in der energetischen Bilanz ausreichend nutzbare Abwärme zur Verfügung steht, wobei insbesondere die spezifisch erforderliche Betriebstemperatur des hydraulischen Systems zu berücksichtigen ist. Eine übermäßige Abkühlung des Hydrauliköls führt zu einer erhöhten Viskosität, was aufgrund des nichtlinearen Temperatur-Viskositäts-Zusammenhangs, z.B. dargestellt im Ubbelohde-Diagramm in BAUER und NIEBERGALL (2020), zu überproportional steigenden hydraulisch-mechanischen Verlusten und damit zu Effizienzeinbußen führen kann. Die tatsächlich verfügbaren Verlustleistungen hängen dabei von der jeweiligen Anwendung sowie von den Belastungszeiten und -zyklen der Hydraulikanlage ab. Für die Nutzung eines Kühl- oder Ölkreislaufs als Wärmequelle für ein Wärmepumpensystem müssen jedoch bestimmte thermische und betriebliche Randbedingungen erfüllt sein.

Entscheidend sind ein ausreichend hohes und zeitlich möglichst kontinuierlich verfügbares Temperaturniveau sowie eine ausreichende thermische Leistung des jeweiligen Kreislaufs. Zusätzlich darf die Entnahme von Wärme aus dem jeweiligen Kreislauf nicht zu einer unzulässigen Abkühlung der Komponenten oder Betriebsmedien führen, da dies beispielsweise im Hydrauliksystem infolge steigender Viskosität zu erhöhten Strömungs- und Reibungsverlusten führen kann. Darüber hinaus ist die zeitliche Verfügbarkeit der Abwärme von Bedeutung, da bei dynamischen Lastprofilen zeitweise nur geringe Verlustwärmeströme zur Verfügung stehen können. Daher ist die Eignung eines Kreislaufs als Wärmequelle unter Berücksichtigung des jeweiligen Einsatzprofils, der thermischen Leistung sowie der zulässigen Temperaturgrenzen der beteiligten Komponenten zu bewerten.

Als Abwärmequelle muss jedoch nicht zwangsläufig der Hydraulikölkreislauf herangezogen werden. Grundsätzlich kann auch die Abwärme aus elektrischen Komponenten genutzt werden, sofern dies aus energetischer und systemtechnischer Sicht vorteilhaft ist. Generell erlaubt die Kombination eines zentralen Kaltdampf-Primärkreislaufs mit zwei mediengetrennten Sekundärkreisläufen nach eigener Untersuchung die Nutzung von Abwärme aus dem Hydrauliksystem bei gleichzeitiger medien- und druckseitiger Entkopplung.

Umschaltbare mehrkreisige Systeme

Zur thermischen Konditionierung von Fahrzeugkomponenten wie der Fahrzeugkabine wird ein umschaltbar betriebenes Wärmepumpensystem mit angebundenem Sekundärkreislauf eingesetzt. Der schematische Aufbau des Systems ist in Abbildung 8 dargestellt. Das System zeichnet sich dadurch aus, dass es sowohl im Heiz- als auch im Kühlbetrieb ohne hydraulische Anpassung innerhalb der Kälteanlage betrieben werden kann, wobei das Umschalten der Sekundärkreise mithilfe von vier 4/2-Wegeventilen erfolgt.

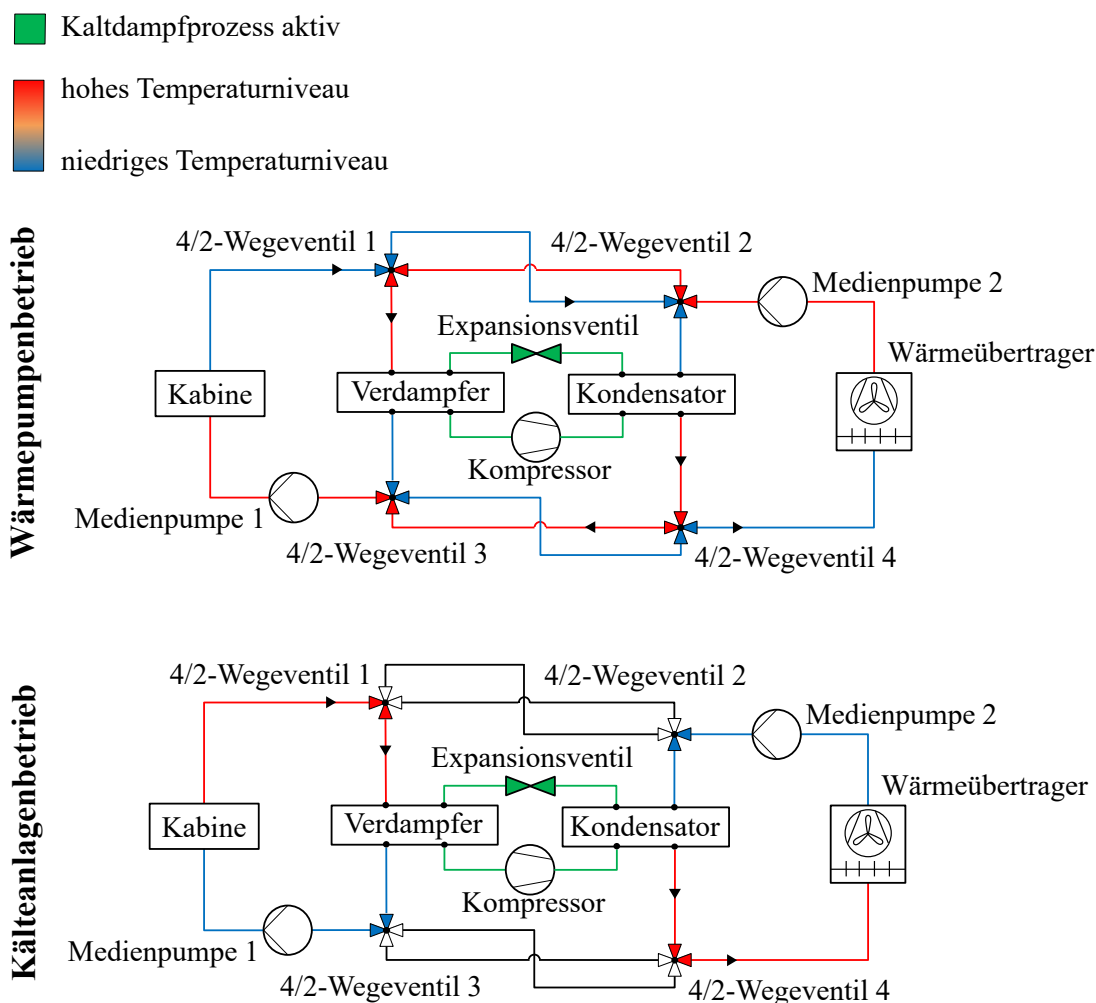


Abbildung 8: Darstellung des Kalt dampfprozesses mit integriertem Sekundärkreislauf und Umschaltventilen zur flexiblen Systemumschaltung zwischen Wärmepumpen- und Kälteanlagenbetrieb

Der Primärkreislauf ist als geschlossener Kältemittelkreis ausgeführt und verbleibt in seiner hydraulischen Verschaltung während aller Betriebszustände unverändert. Wesentliche Komponenten wie Kältemittelkompressor, Expansionsventil sowie Verdampfer und Kondensator sind fest integriert und bleiben mechanisch unverändert. Der Sekundärkreislauf ist hydraulisch über einen Plattenwärmeübertrager (Verdampfer und Kondensator) an den Primärkreislauf gekoppelt. Dieser ermöglicht den bidirektionalen Energieaustausch zwischen dem Kältemittel im Primärkreislauf und dem Sekundärmedium, beispielsweise einem Wasser-Glykol-Gemisch. Das Medium durchströmt die zu konditionierende Fahrzeugkomponente, beispielsweise die Kabine, und nimmt dabei thermische Energie auf oder gibt diese ab.

Der Wärmeübertrager zur Umgebungsluft ist für den bidirektionalen Betrieb ausgelegt. Je nach gewähltem Betriebsmodus dient er entweder dem Kondensator, der Wärme an den Sekundärkreislauf abgibt (Abbildung 8, Wärmepumpenbetrieb), oder dem Verdampfer, der Wärme aus dem Sekundärkreislauf aufnimmt (Abbildung 8, Kälteanlagenbetrieb). Die Umschaltung zwischen Heiz- und Kühlbetrieb erfolgt ausschließlich durch eine gezielte Ansteuerung der 4/2-Wegeventile 1 bis 4. Dieses

Verfahren ermöglicht, wie in Abbildung 8 dargestellt, sowohl die Kühlung als auch die Beheizung der Fahrzeugkabine. Dabei wird das niedrige Außentemperaturniveau mittels des Kaltdampfprozesses auf ein höheres Temperaturniveau angehoben. Das vorgestellte Konzept bietet mehrere Vorteile: Es ermöglicht die reversible Nutzung derselben Hardware zum Heizen und Kühlen, reduziert die Systemkomplexität im Kältemittelkreislauf durch den Verzicht auf mechanische Umschaltorgane und erlaubt eine flexible sowie bedarfsgerechte thermische Konditionierung verschiedener Fahrzeugkomponenten. Im Wärmepumpenbetrieb muss der Wärmeübertrager zur Umgebung vereisungstauglich sein.

Bei der Nutzung von Umgebungsluft als Wärmequelle besteht bei niedrigen Temperaturen die Gefahr von Vereisung, da der Wärmeübertrager im Betrieb Temperaturen unter 0 °C erreichen kann. Deshalb ist eine geeignete Abtaustrategie erforderlich, beispielsweise das zyklische Umschalten zwischen Wärmepumpenbetrieb und Kälteanlagenbetrieb, um die Vereisung des Wärmeübertragers an der Umgebungsluft zu verhindern und den normalen Betrieb sicherzustellen. Je nach Wasser-Glykol-Füllmenge bzw. thermischer Kapazität im Sekundärkreislauf kann ein Abtauprozess die Effizienz des Systems verringern und zusätzlich die Regelbarkeit der Warmseite erschweren, was den Komfort im Innenraum vermindert. Mithilfe des Wasser-Glykol-Sekundärkreislaufs kann anstelle des Wärmeübertragers (Wasser/Luft) auch ein anderer Wärmeübertrager (Wasser/Wasser) eingesetzt werden, der dem System Abwärme aus Komponenten zuführt und diese bei einem niedrigen Temperaturniveau nutzbar macht.

Abbildung 9 zeigt ein Thermomanagementsystem, das mithilfe einer Wärmepumpe und eines Sekundärkreislaufs sowohl die Batterie als auch die Fahrzeugkabine konditioniert. Bei diesem Aufbau handelt es sich um eine Hybridlösung (Wärmepumpe und Widerstandsheizung), die den Aufheizvorgang der Batterie und Kabine ermöglicht.

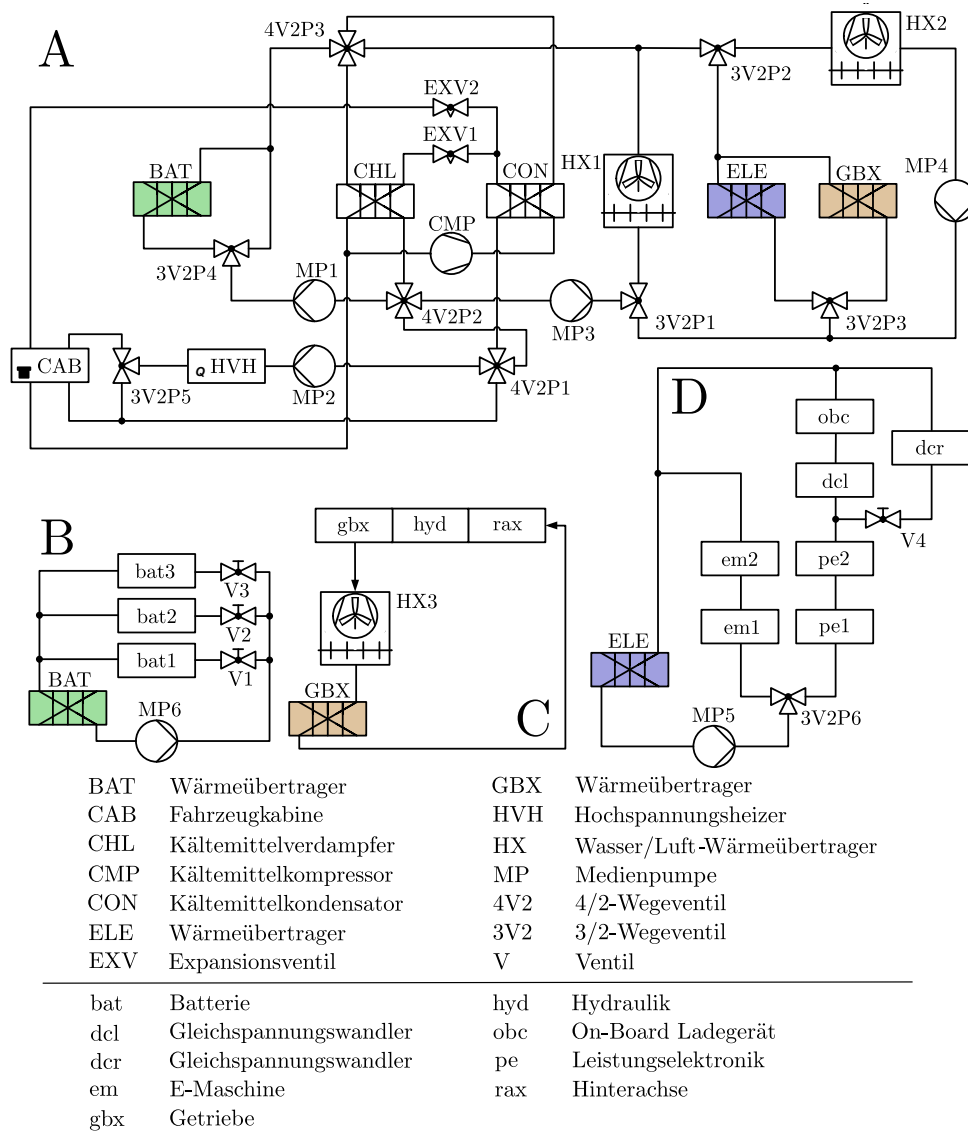


Abbildung 9: Vollständig gekoppelter Thermomanagement mit Wärmepumpe; A: Hauptkreislauf, B: Batteriekreislauf, C: Hydraulikkreislauf, D: Elektronikreislauf; Kopplung der Kreisläufe über die dargestellten Plattenwärmeübertrager BAT (grün), GBX (braun) und ELE (blau)

Die Anzahl der dazugehörigen Systemzustände ist in Tabelle 3 aufgeführt. Durch das Hinzufügen einer Wärmepumpe erhöht sich die theoretisch mögliche Anzahl an Systemzuständen auf 256. Diese Zustandsmatrix wird jedoch nur auf logische Zustände beschränkt, sodass sich die Anzahl der benötigten Zustände deutlich reduzieren kann (ca. 30).

Tabelle 3: Bestimmung der Systemzustände für ein fortgeschrittenes Thermomanagement; HVH: Hochspannungsheizer, WP: Wärmepumpe, 1: System aktiv, 0: System inaktiv, grün hinterlegt: logisch, rot hinterlegt: nicht logisch, nach WILK (2026)

Fall:	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	...	255
Batterie kühlen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	...	1
Batterie heizen - HVH	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	...	1
Batterie heizen - WP	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	...	1
Kabine kühlen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	...	1
Kabine heizen - HVH	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	...	1
Kabine heizen - WP	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	...	1
Öl kühlen	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	...	1
Elektronik kühlen	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	...	1

In dem gezeigten Thermomanagementsystem kann der thermische Wärmestrom, der durch die Verlustleistung der Komponenten entsteht, unter anderem dem Wärmepumpenkreislauf zugeführt werden. Der Schwerpunkt der Nutzung der Verlustleistungswärme liegt dabei im Bereich des Hydraulikölkreislaufs sowie im Kühlkreislauf der elektrischen Komponenten. Darüber hinaus können alle weiteren Komponenten entsprechend ihrem Temperaturarbeitsfenster gekühlt werden.

Im Zentrum des Aufbaus (Teilabschnitt A) liegt der thermodynamische Kreisprozess. Dieser kann beispielsweise Verlustwärmeströme aus dem Teilsystem C und/oder D nutzen, d. h. aus Sicht der Systementwicklung des Thermomanagements aus dem Kühlkreislauf der elektrischen Komponenten und/oder aus dem Schmierölkreislauf des Antriebsstrangs. Die Kopplung der verschiedenen Systeme, welche als Wärmequelle genutzt werden, erfolgt über zwei Plattenwärmeübertrager mit der Bezeichnung ELE und GBX. Des Weiteren befindet sich, wie schon erläutert, der Batteriekonditionierungskreislauf in einem separaten Teilsystem mit der Bezeichnung B. Das so aufgebaute System kann eine Vielzahl an Betriebsmodi annehmen. Wie in der Variantenmatrix gezeigt, nimmt die Komplexität exponentiell zu, was die Regelung eines solchen Systems aufwendig macht. Trotzdem wird dieser Systemaufbau verwendet, um mithilfe eines Thermomanagementsystems verschiedene Betriebsmodi abzubilden, die ausschließlich durch softwareseitige Steuerung unterschiedliche Systemzustände ermöglichen, während die zugrunde liegende Hardware-Architektur unverändert bleibt. Insgesamt werden mit dem gezeigten Aufbau 31 verschiedene Anforderungsvarianten untersucht, welche je nach Fahrzeugzustand und Systemtemperatur eingestellt werden können. Darüber hinaus können Batterie und Kabine über einen Hochspannungsheizer, Wärmepumpe oder aber direkt mit der Wärmequelle gekoppelt werden. Das im Folgenden dargestellte Thermomanagementsystem ist als mehrkreisiges, ventilgesteuertes Wärmemanagementkonzept ausgeführt und ermöglicht eine bedarfsgerechte Verteilung, Aufnahme und Abgabe thermischer Energie zwischen verschiedenen Fahrzeugkomponenten. Die Umschaltung zwischen den einzelnen Betriebsmodi erfolgt ausschließlich über die gezielte Ansteuerung der integrierten Ventile, während die hydraulische Grundstruktur der Kreisläufe unverändert bleibt.

Der Zustand des thermischen Systems bei der Verwendung des Hochspannungsheizers ist in der Abbildung 10 dargestellt. Dabei kann der Wärmestrom für die Kabine primär über die thermische Leistungsbereitstellung des Hochspannungsheizers eingestellt und selektiv mit den Ventilen 3V2P_5 und 3V2P_4 für die Kabine und die Batterie eingeregelt werden.

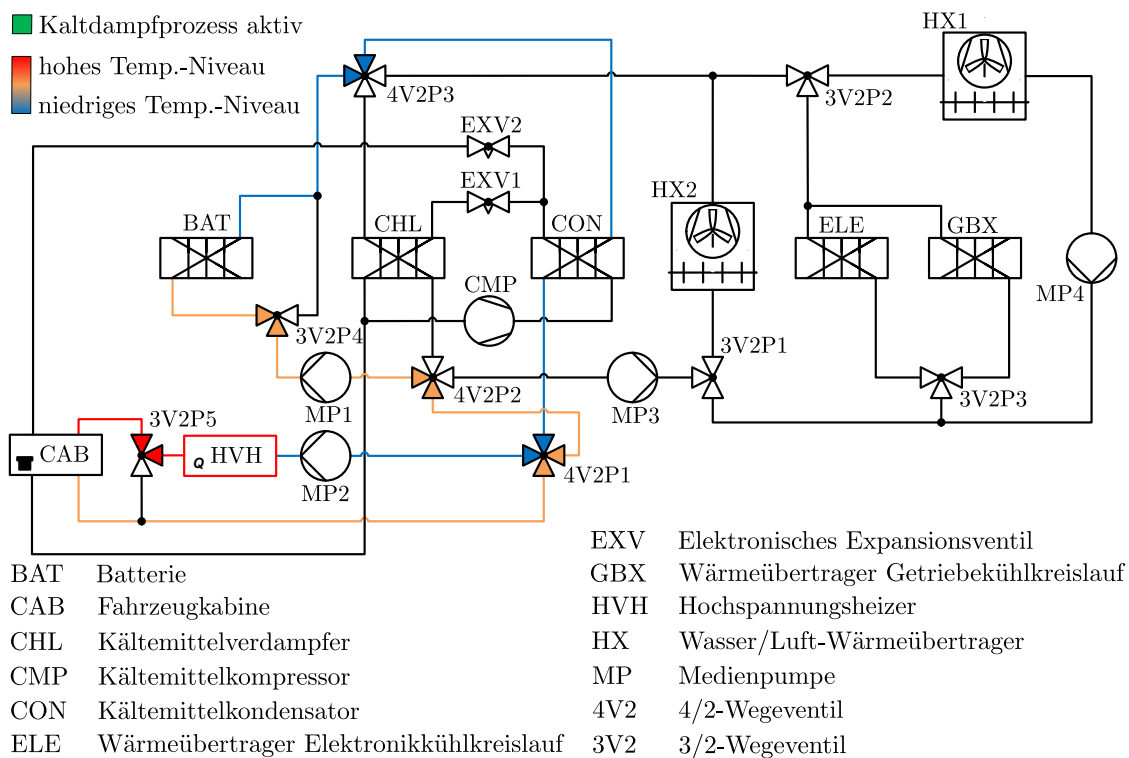


Abbildung 10: Systemverschaltung zum Heizen mit dem Hochspannungsheizer

Die Verwendung der Wärmepumpe unter Zuhilfenahme von Abwärme zeigt die Abbildung 11. Hier wird der Wärmestrom für die Kabine primär über die Leistung der thermischen Arbeitsmaschine bestimmt, die sich im Wesentlichen aus der Drehzahl des Kältemittelverdichters sowie dem Wärmestrom am Eingang des Kältemittelverdampfers zusammensetzt. Der Eingangswärmestrom für den Verdampfer wird in diesem Fall aus der thermischen Verlustleistung der Elektronikkomponenten und des Getriebes bereitgestellt.

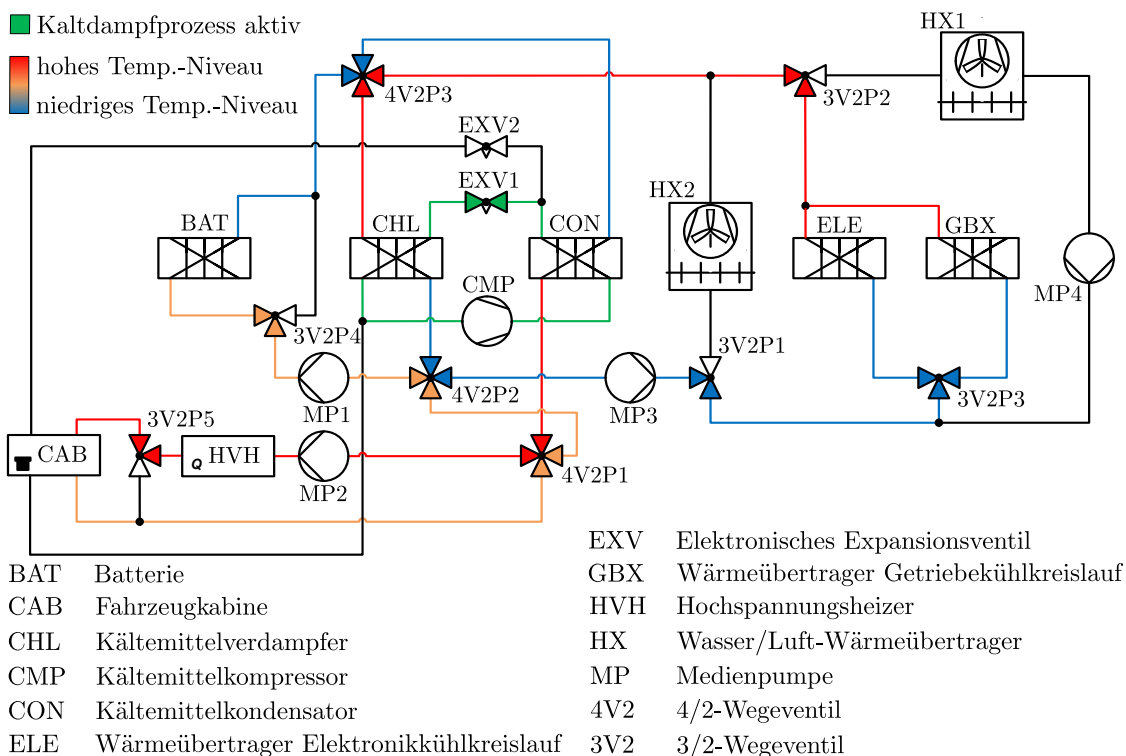


Abbildung 11: Systemverschaltung zum Heizen unter Anwendung des Wärmepumpenprinzips

Alternativ kann das Ventil 3V2P1 auf den Wärmeübertrager HX2 umgestellt werden. In diesem Betriebsmodus entzieht die Wärmepumpe die benötigte Wärme der Umgebungsluft; daher ist der Wärmeübertrager explizit für den Betrieb unter Vereisungsbedingungen auszulegen. Dies umfasst konstruktive Maßnahmen zur Erhöhung der Vereisungsresistenz (z. B. geeignete Lamellengeometrie und -abstände, Optimierungen von Materialien und Beschichtungen) sowie die Integration einer wirksamen Abtaustrategie, welche das während des Abtauens anfallende Schmelzwasser zuverlässig ableitet. Zudem kann bei Bedarf ein zusätzlicher Wärmestrom über den Hochspannungsheizer in das System eingebracht werden. Die Wärmestromverteilung auf Kabine und Batterie wird dabei über die Ventile 3V2P_5 und 3V2P_4 geregelt und kann gezielt an den jeweiligen Wärmebedarf von Kabine und/oder Batterie angepasst werden.

Die direkte Nutzung der thermischen Verlustleistung ist in Abbildung 12 dargestellt. In dieser Systemeinstellung wird der Wärmestrom aus dem Antriebsstrang (GBX) und den Elektronikkomponenten (ELE) direkt zum Beheizen der Batterie und der Fahrzeugkabine genutzt. In diesem Betriebsmodus ist der Kaltdampfprozess nicht beteiligt, stattdessen wird die Abwärme auf klassische Weise genutzt, ähnlich wie bei verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeugen (Abwärme aus dem Verbrennungsmotorkühlwasser). Dieses Beispiel dient als Referenz, um den Unterschied zu modernen Thermomanagementstrategien in Elektrofahrzeugen hervorzuheben, bei denen beispielsweise Wärmepumpen zum Einsatz kommen.

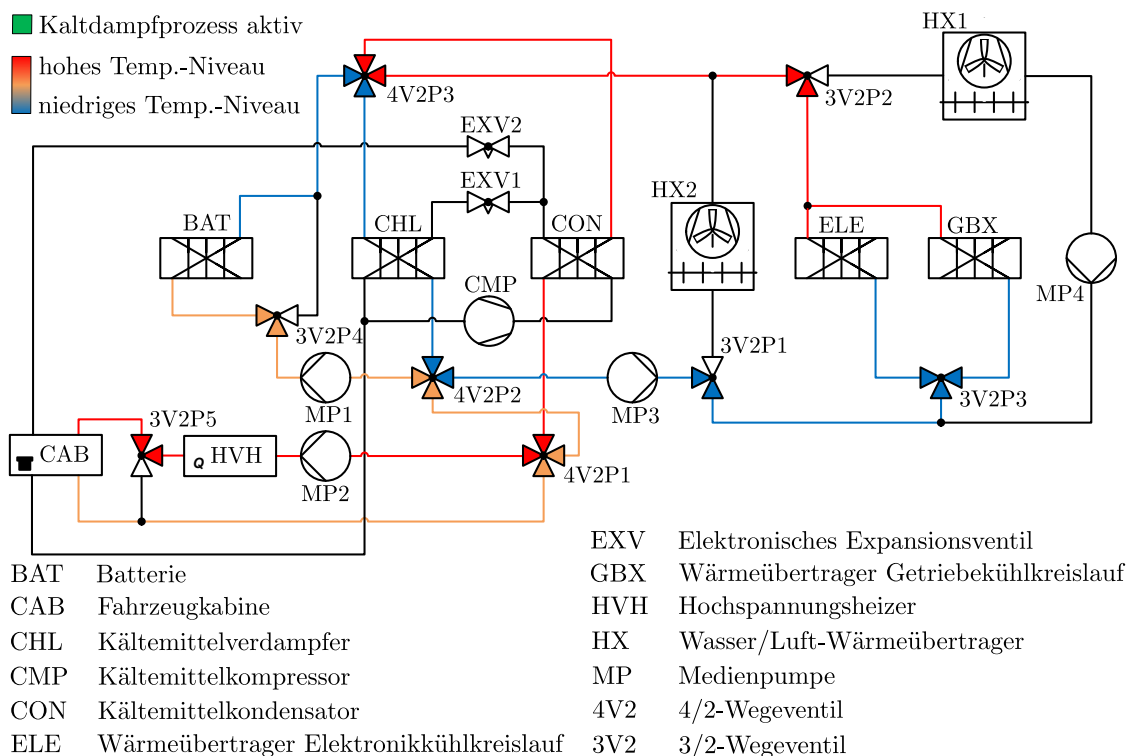


Abbildung 12: Systemverschaltung zum Heizen mit direkter Abwärmenutzung

Schlussfolgerungen

Die Integration einer Wärmepumpe mit Sekundärkreisläufen in das Fahrzeug stellt technische Herausforderungen dar, insbesondere hinsichtlich des Platzbedarfs. Innovative Ansätze im Fahrzeugdesign, vor allem bei Standardtraktoren, sind notwendig, um diese Herausforderungen zu bewältigen. Ein Beispiel dafür sind die Kühler, die aufgrund der niedrigeren Temperaturen und der verhältnismäßig kleinen Volumenströme (Wasser/Luft) größer ausfallen. Dies gilt auch, wenn die abzuführenden Wärmeströme im Vergleich zu einem verbrennungsmotorischen Fahrzeug mit gleicher Leistung deutlich geringer sind. Zusätzlich vergrößern sich die Kühler nochmals, wenn sie möglichst leise und effizient durch einen elektrischen Lüfter mit Kühlluft versorgt werden sollen. Ein subjektiver Vergleich der Geräuschemissionen heutiger Traktoren zeigt, dass ein Großteil der Geräusche durch den Kühllüfter verursacht wird. Dies muss gelöst werden, damit hier kein Widerspruch zum Konzept eines geräuscharmen batterieelektrischen Traktors entsteht.

Die Kombination verschiedener Heizmethoden ermöglicht eine flexible Anpassung an unterschiedliche Einsatzbedingungen bei gleichzeitiger Nutzung der Standardfahrzeugkabine ohne erforderliche Modifikationen. Solche Modifikationen könnten beispielsweise eine spezifische Anpassung der Wärmeübertragerflächen, des Luftvolumenstroms oder des Übertragungsmediums (z. B. zur Kühlung des Innenraums durch den Einsatz eines Wasser-Glykol-Gemisches), den Einbau einer Scheibenheizung sowie die Integration weiterer Strahlungsflächen oder warmer Kontaktflächen umfassen. Darüber hinaus würde eine derartige Anpassung eine Neubewertung des thermischen Komforts innerhalb der Kabine erforderlich machen, sofern sich die Wärmeübertragungsart und somit die fühlbare Wärme auf die Insassen verändert.

Der hier präsentierte schematische Aufbau erlaubt zudem, diverse Betriebszustände unter realistischen Bedingungen gezielt zu untersuchen und zu bewerten, wodurch eine Grundlage für die Entwicklung effizienter Thermomanagementkonzepte geschaffen wird. Zukünftige Forschungsarbeiten sollten die Optimierung der Systemarchitektur unter besonderer Berücksichtigung der thermischen Effizienz und der Geräuschemissionen vorantreiben sowie die Integration der Systeme in kosteneffiziente Serienfahrzeuge ermöglichen. Solche modularen Thermomanagementlösungen können zur Verlängerung der Maschinennutzungsdauer und zur Verbesserung der Energieeffizienz elektrifizierter Landmaschinen beitragen.

Literatur

- Allelein, H.-J.; Bollin, E.; Oehler, H. (2010): Energietechnik: Systeme zur Energieumwandlung. Kompaktwissen für Studium und Beruf. Wiesbaden, Vieweg+Teubner Verlag
- Bach, K.; Grassmann, P.; Göldner, R.; Linge, K.; Neuenschwander, A.; Plank, R.; Váhl, L. (Hg.) (1966): Kältemaschinen. Kaltgasmaschinen und Kaltdampfmaschinen, Kaltgasmaschinen und Kaltdampfmaschinen/s.l., Berlin, Heidelberg, Springer Verlag
- Bauer, G.; Niebergall, M. (2020): Ölhydraulik. Grundlagen, Bauelemente, Anwendungen, Wiesbaden/Heidelberg, Springer Vieweg
- Böckh, P.; Stripf, M. von (2015): Technische Thermodynamik: Ein beispielorientiertes Einführungsbuch, Berlin, Heidelberg, Springer Vieweg
- Bohl, W.; Elmendorf, W. (2013): Strömungsmaschinen 1: Aufbau und Wirkungsweise. Vogel Buchverlag
- Breu, W.; Pichlmaier, B. (2017): Electrified Utility Tractor. In: Land.Technik AgEng 2017, Düsseldorf, VDI Verlag, pp. 9–14
- Brunner, F.; Krummenacher, P.; Wellig, B.; Liem, P. (2017): Einführung in die Prozessintegration mit der Pinch-Methode: Handbuch für die Analyse von kontinuierlichen Prozessen und Batch-Prozessen. https://www.pinch.ch/docs/PDFs-Research-Publications/Einfuehrung_in_die_Prozessintegration_2017.pdf, Zugriff am 13.05.2026
- Bschorer, S.; Költzsch, K. (2021): Technische Strömungslehre: Mit 262 Aufgaben und 31 Beispielen. Wiesbaden, Springer Vieweg
- Dohmann, J. (2016): Thermodynamik der Kälteanlagen und Wärmepumpen. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag
- Joos, L. (Hg.) (2004): Energieeinsparung in Gebäuden – Stand der Technik, Entwicklungstendenzen. Essen, Vulkan-Verlag
- Konz, M.; Lemke, N.; Försterling, S. (2023): Spezifische Anforderungen an das Heiz-Klimasystem elektromotorisch angetriebener Fahrzeuge. <https://www.vda.de/en/news/publications/publication/fat-schriftenreihe-233>, Zugriff am 13.05.2026
- Menken, J.C. (2016): Thermomanagement im batteriebetriebenen Pkw unter Nutzung eines Kaltdampfprozesses mit Sekundärkreislaufsystem. Dissertation, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Fakultät für Maschinenbau
- Pichlmaier, B.; Ehrl, M. (2025): Battery electric tractor development. ASABE Distinguished Lecture Series (Tractor Design No. 45), <https://doi.org/10.13031/913C0125>
- Reiter, C. (2020): Thermische Vorauslegung hochbelasteter Batteriesysteme für Elektrofahrzeuge in der Konzeptphase. Dissertation, Technische Universität München, Fakultät für Maschinenwesen, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik
- Rensburg, R. (1998): Advanced thermal design of electronic equipment. New York, Springer, Chapman & Hall
- 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
- Sigloch, H. (2022): Technische Fluidmechanik, Springer Vieweg
- TESLA Inc (2024): US11932078B2, P. Pinto, D. F. Hanks

- Vogel, B. (2026): Effiziente Wärmepumpenheizung für elektrische Landwirtschaft- und Kommunalfahrzeuge – Texte. <https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=48584>, Zugriff am 08.05.2026
- Weustenfeld, T.A. (2018): Heiz- und Kühlkonzept für ein batterieelektrisches Fahrzeug basierend auf Sekundärkreisläufen. Dissertation, TU Braunschweig, https://leopard.tu-braunschweig.de/receive/dbbs_mods_00065436, Zugriff am 27.01.2026
- Wilk, B. (2026): Systemarchitekturentwicklung für fortgeschrittene Kühl- und Heizsysteme in elektrifizierten Landmaschinen. In: 9. VDI-Fachtagung Antriebssysteme in mobilen Arbeitsmaschinen 2026, 30.06.–01.07.2026 in Baden-Baden, Düsseldorf, VDI Wissensforum
- Wilk, B.; Wieckhorst, J.; Heymann, P.; Frerichs, L. (2026): Wärmepumpen in batterieelektrischen Landmaschinen zur Nutzung der Abwärme. agricultural engineering.eu 81(1), <https://doi.org/10.1515/AE.2026.3357>

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.