Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech

Schlussbericht vom 20.11.2023

Effiziente Wärmepumpenheizung für elektrische Landwirtschafts- und Kommunalfahrzeuge

Rigitrac Traktorenbau AG

Quelle: Rigitrac Traktorenbau AG, https://www.rigitrac.ch/produkte-1/rigitrac-ske-40-electric/

Datum: 18.08.2023

Ort: Bern

Subventionsgeberin:
Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Subventionsempfänger/innen:
Rigitrac Traktorenbau AG
Aahusweg 4, 6403 Küssnacht
www.rigitrac.ch

Autor/in:
Silvan Rebsamen, Rigitrac Traktorenbau AG, sr@rigitrac.ch
Pirmin Zimmermann, Rigitrac Traktorenbau AG, pz@rigitrac.ch
Stefan Flück, Hochschule Luzern, stefan.flueck@hslu.ch
Stefan Hochuli, Hochschule Luzern, stefan.hochuli@hslu.ch
Michael Giger, Hochschule Luzern, michael.giger@hslu.ch
Beat Wellig, Hochschule Luzern, beat.wellig@hslu.ch

BFE-Projektbegleitung:
Men Wirz, men.wirz@bfe.admin.ch
Stephan Renz, info@renzconsulting.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/502233-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Zusammenfassung

Die Rigitrac Traktorenbau AG (nachfolgend Rigitrac) entwickelt und produziert Traktoren in Küssnacht am Rigi. Im Jahr 2018 hat Rigitrac den Prototyp eines ersten batterie-elektrisch angetriebenen Traktors vorgestellt. Das Fahrzeug wird nun zur Serienreife weiterentwickelt. Das Thermomanagement-System des E-Traktors stellt dabei eine besondere Herausforderung dar.

Das Thermomanagement-System hat die Aufgabe, gleichzeitig die thermischen Bedürfnisse der elektrischen Komponenten (insbesondere der Batterie) und der Benutzerin bzw. des Benutzers zu erfüllen. Rigitrac hat zur Realisierung des Thermomanagement-Systems ein Konzept erstellt, welches auf einem hydraulisch umschaltbaren Wärmepumpen/Kälteanlagen-Modul (WP/KA-Modul) basiert. Dieses Modul kann die einzelnen Komponenten des E-Traktors je nach Bedarf heizen und kühlen. Die Hochschule Luzern unterstützt Rigitrac bei der konzeptionellen Weiterentwicklung des Thermomanagement-Systems und führt experimentelle Untersuchungen des WP/KA-Moduls im Labor sowie im Feldbetrieb durch, um dessen Betriebscharakteristik, Leistungsfähigkeit und Effizienz zu bestimmen.

In einem umfassenden Konzeptreview konnte aufgezeigt werden, dass die Funktionsfähigkeit des Thermomanagement-Systems gegeben ist. Keine der identifizierten Problemstellen gefährdet die grundsätzliche Funktionsweise des Thermomanagement-Systems. Die Absicherung des Kompressors gegenüber unerlaubter Betriebszuständen muss erweitert werden, so dass die komplette Hüllkurve des Kompressor-Kennfeldes abgedeckt wird. Die hydraulische Schaltung der Kreisläufe wird dahingehend optimiert, dass hydraulische Probleme beim Umschalten zwischen den Kreisläufen und während des Betriebs vermieden werden können. Weiter wurde aufgezeigt, dass der eingebaute Luftkühler bei hohen Aussentemperaturen und hoher Leistung des E-Traktors die erforderliche Kühlleistung nicht erbringen kann, da zum Abführen der Wärme eine Kühlmitteltemperatur über der maximal erlaubten Kondensationstemperatur des WP/KA-Moduls notwendig wäre. Dieser Betriebsfall stellt allerdings einen absoluten «worst-case» dar, der im praktischen Betrieb des Traktors nicht auftreten sollte. Daher wird auf eine Vergrösserung der Luftkühlerfläche verzichtet.

Die experimentellen Untersuchungen im Labor zeigen, dass das WP/KA-Modul in den unterschiedlichen Betriebspunkten innere Gütegrade von rund 40% erreicht. Die Effizienz ist im Vergleich zu modernen Heizungswärmepumpen tiefer; es muss jedoch beachtet werden, dass das WP/KA-Modul aufgrund der auftretenden Vibrationen äusserst robust ausgeführt werden und der Kompressor einen sehr breiten Einsatzbereich abdecken muss. Es wurde festgestellt, dass die Überhitzungsregelung mit dem thermostatischen Expansionsventil bei kleinen Verdampferleistungen nicht einwandfrei funktioniert. Der Kompressor ist damit nicht in allen Betriebspunkten vor Flüssigkeitsschlägen geschützt, was zu einer verkürzten Lebensdauer oder im schlimmsten Fall zum Totalausfall des Kompressors führen kann. Nach Neueinstellung des Expansionsventil (in Rücksprache mit dem Modulhersteller) ist eine genügend grosse Sauggasüberhitzung im gesamten Leistungsbereich sichergestellt.

Die Messreihen im Feld bei Sommer- und Winterbedingungen bestätigten die Erkenntnisse aus den Labormessungen. Ein stabiler Betrieb des WP/KA-Moduls unter den geprüften Bedingungen konnte nachgewiesen werden. Eine Herausforderung bei den Feldmessungen stellte die Messunsicherheit der Temperatursensoren dar. Die wasserseitigen Temperaturdifferenzen über die verschiedenen Komponenten sind so klein, so dass sich die Messunsicherheit stark auf die Berechnung der thermischen Leistungen auswirkt. Die Auswertungen über den Kältemittelkreislauf zeigen jedoch, dass die Kennwerte des WP/KA-Moduls aus den Feldmessungen gut mit den Labormessungen übereinstimmen. Die Messungen bei Winterbedingungen zeigen, dass das Beheizen der Fahrzeugkabine mit dem WP/KA-Modul deutlich schneller (um rund einen Faktor 3, höherer Komfort) und energieeffizienter erfolgt als mit einem PTC-Heizelement. Der COP der Wärmepumpe nimmt während des Aufheizvorganges von ca. 3.42 auf 2.36 ab, wobei der durchschnittliche COP («Zyklusarbeitszahl») 2.88 beträgt. Der Gütegrad ist während des Aufheizvorganges nahezu konstant und beträgt durchschnittlich 0.44. Die Kondensator-Leistung nimmt auf Grund des steigenden Verdampfungsdruckes von ca. 1'800 W auf ca. 2'400 W zu bzw. die elektrische Leistungsaufnahme des WP/KA-Moduls steigt von ca. 520 W auf ca. 1'000 W an. Für den Aufheizvorgang ist ein Strombedarf von 231 Wh notwendig. Durch den Einbau des WP/KA-Moduls kann die Einsatzdauer des E-Traktors im betrachteten Szenario «tiefe bis mittlere Belastung des Traktors» um ca. 6% bis 10% gesteigert werden. Dies entspricht einer Erhöhung der Einsatzdauer von 15-45 min, wobei die Erhöhung der Einsatzdauer grösser wird, je kleiner die durchschnittliche Belastung des E-Traktors ist.

Aus den Messungen in Verbindung mit den Simulationen konnte die Wärmekapazität (ca. 38 Wh/K) und der Wärmeverlust (ca. 30 W/K) der Kabine ermittelt werden. Obwohl diese beiden Werte explizit für den Aufbau des heutigen E-Traktors SKE40 gelten, können diese Werte zur Ermittlung des groben Wärme- bzw. Kältebedarfs von zukünftigen Kabinen herangezogen werden. Es ist eine Korrektur anhand der Kabinenfläche und Materialisierung notwendig.

Auf Grund der Steigerung der Einsatzdauer durch den Einsatz des WP/KA-Moduls kann eine Aussage zur Wirtschaftlichkeit gemacht werden. Um eine vergleichbare Einsatzdauer wie beim Einsatz einer elektrischen Heizung zu erreichen, kann die Batterie um ca. 3% bis 5% kleiner ausgelegt werden. Dies würde eine Batteriekosteneinsparung von 278 CHF – 1160 CHF bedeuten. Der Mehraufwand für die Verwendung des WP/KA-Moduls zur Abwärmenutzung beläuft sich auf ungefähr 200 CHF. Dementsprechend kann der finanzielle Mehraufwand des WP/KA-Moduls zur Abwärmenutzung bereits vom Hersteller amortisiert werden. Zusätzlich profitiert der Anwender durch einen tieferen Energieverbrauch und dadurch ebenfalls von geringeren Energiekosten. Diese Einsparung kann je nach Betriebsbedingungen ca. 40-70 CHF/Jahr betragen.

Das Projekt liefert wichtige Erkenntnisse für die Weiterentwicklung des jetzigen E-Traktors sowie für die Entwicklung neuer Traktoren bei Rigitrac. Das verbesserte Thermomanagement-System liefert einen wichtigen Beitrag an den robusten und energieeffizienten Betrieb des Traktors und damit an einen nachhaltigen und umweltfreundlichen Einsatz in der Praxis.

Summary

Rigitrac Traktorenbau AG (hereinafter Rigitrac) develops and produces tractors in Küssnacht am Rigi. In 2018, Rigitrac presented a prototype of its first battery-electric tractor. The vehicle is now to be further developed to production readiness. In particular, the thermal management system of the electric tractor poses a challenge.

The thermal management system has the task of simultaneously meeting the thermal needs of the electrical components (especially the battery) and the user. To realize this thermal management system, Rigitrac created a concept based on a hydraulically switchable heat pump / refrigeration system module (HP / RS module), which can be used to heat and cool the individual components as needed. The Lucerne University of Applied Sciences and Arts (hereafter HSLU) supports Rigitrac in the conceptual further development of the thermal management system and conducts experimental investigations on the HP / RS module as well as on the tractor in the field in order to experimentally determine its characteristics and application limits.

The concept review showed that the planned thermal management system works in principle. The protection of the compressor against unauthorized operating conditions must be extended so that the complete envelope of the compressor map is covered. Furthermore, the hydraulic circuitry of the circuits must be investigated to avoid hydraulic problems when switching between the circuits and during operation. It could also be shown that the installed air cooler cannot provide the required cooling capacity at high outside temperatures and high output of the electric tractor, since a coolant temperature above the maximum permitted condensation temperature of the HP / RS module would be necessary to dissipate the heat via the cooler. However, this operating case represents a "worst case" which should not occur in actual operation. Therefore, an increase in the area of the air cooler can be dispensed with.

During the experimental investigations in the laboratory, it could be determined that the HP / RS module achieves average 2nd law efficiency in the different operating points of 40%. Although this seems to be rather low compared to modern heat pumps for building heating, it has to be considered that the HP / RS module and especially the compressor of the module have to be designed extremely robust due to the occurring vibrations. In addition, it was found that the superheat control via the thermostatic expansion valve did not function as intended at all operating points, which means that the compressor was not protected against liquid damage at all operating points. This could result in shortened compressor life or even total compressor failure. In order to evaluate possible adjustments, the manufacturer of the HP / RS module was contacted again. After readjustment of the expansion valve, it could be ensured that a sufficiently high superheat results in the relevant power range.

Finally, experimental tests were carried out in the field under typical summer and winter conditions. Again, a stable operation of the HP / RS module could be demonstrated. A challenge for the field measurements was the measurement uncertainty of the currently installed temperature sensors. Since the individual heat outputs of the different components are determined by the respective small temperature differences, deviations in the measurement evaluation have a strong effect. However, the problem could be mitigated by an additional consideration of the module performance via the refrigerant circuit. The measurements under winter conditions further showed that the heating of the vehicle cabin with the HP / RS module is significantly faster (by about a factor of 3, higher comfort) and more energy-efficient than with a PTC heating element. The operating time of the electric tractor can thus be increased by approx. 6% to 10% in the scenario considered (assuming a low to medium load on the tractor).

Résumé

La société Rigitrac Traktorenbau AG, ci-après dénommée Rigitrac, est spécialisée dans le développement et la fabrication de tracteurs à Küssnacht am Rigi. En 2018, Rigitrac a dévoilé le prototype de son premier tracteur électrique alimenté par batterie. Depuis lors, ce véhicule a été développé pour la production en série. Le défi majeur réside dans la gestion thermique du tracteur électrique.

Le système de gestion thermique doit répondre aux besoins de chaleur des composants électriques, en particulier la batterie, tout en garantissant le confort de l'utilisateur. Pour relever ce défi, Rigitrac a conçu un concept basé sur un module de pompe à chaleur/installation frigorifique (module PAC/IF) à commutation hydraulique. Ce module peut chauffer ou refroidir les composants du tracteur électrique en fonction des exigences. L'Haute Ecole Spécialisée de Lucerne collabore avec Rigitrac pour le développement conceptuel du système de gestion thermique. Des expériences en laboratoire et sur le terrain ont été menées pour évaluer ses performances et son efficacité.

Une revue complète du concept a montré que le système de gestion thermique est fonctionnel, sans mettre en danger son fonctionnement de base. Pour garantir la protection du compresseur contre des conditions de fonctionnement non autorisées, des ajustements ont été apportés. De plus, des mesures ont confirmé que l'échangeur d'air intégré n'est pas capable de fournir la puissance de refroidissement requise dans des conditions extrêmes, mais cela ne devrait pas se produire dans un usage pratique.

Les tests en laboratoire ont montré que le module PAC/IF atteint a 2nd law efficiency d'environ 40% dans diverses conditions de fonctionnement. Bien que son efficacité soit inférieure à celle des pompes à chaleur de chauffage modernes, il est important de noter que le module PAC/IF doit être robuste en raison des vibrations et de la large plage d'utilisation du compresseur. Des ajustements ont également été apportés pour garantir la protection du compresseur contre les coups de liquide.

Les tests sur le terrain, en été et en hiver, ont confirmé les résultats des essais en laboratoire. L'installation du module PAC/IF pour chauffer la cabine s'est avérée nettement plus rapide et économe en énergie qu'un élément de chauffage PTC. En raison de ces améliorations, la durée d'utilisation du tracteur électrique a augmenté de 6% à 10%, ce qui équivaut à une augmentation de 15 à 45 minutes, en fonction de la charge.

Les mesures combinées aux simulations ont permis de déterminer la capacité thermique de la cabine (environ 38 Wh/K) et la perte de chaleur (environ 30 W/K), qui peuvent servir comme référence pour les futures cabines en fonction de leur taille et de leur matériau de construction.

L'augmentation de la durée d'utilisation grâce au module PAC/IF permet des économies sur la batterie, compensant ainsi le surcoût initial. De plus, l'utilisateur bénéficie d'une consommation d'énergie réduite, ce qui se traduit par des coûts énergétiques moins élevés, pouvant atteindre environ 40 à 70 CHF par an selon les conditions d'utilisation.

Ce projet revêt une importance capitale pour le développement actuel et futur des tracteurs électriques chez Rigitrac. Le système de gestion thermique amélioré contribue de manière significative à l'efficacité et à la durabilité environnementale des tracteurs, assurant ainsi une utilisation respectueuse de l'environnement dans la pratique.

Take-Home Messages

Das Thermomanagement-System von Rigitrac für den Elektrotraktor SKE40 wurde in einem Konzeptreview sowie in Labor- und Feldmessungen umfassend untersucht. Das Konzept war bereits vor dem Projekt auf einem guten Stand und bedurfte nur kleinerer Anpassungen. Trotz der für den realen Betrieb notwendigen, sehr robusten Ausführung des Wärmepumpen-/Kälteanlagen-Moduls werden zufriedenstellende Leistungs- und Effizienzwerte erreicht.

Die Feldmessungen deckten die Herausforderung auf, bei der Untersuchung des komplexen Systems sämtliche Einflüsse sauber zu erfassen und zu berücksichtigen. Weiter zeigte sich, dass die Messungen im Labor mit exakt konditionierten Stoffströmen (Wärmequelle und -senke) gerechtfertigt waren. Mit den Labormessungen konnten wichtige Erkenntnisse zur Performance des Moduls sowie zu den notwendigen Anpassungen am Thermomanagement-System gewonnen werden.

Die Sinnhaftigkeit des WP/KA-Moduls und des gesamten Thermomanagement-Systems wurde durch die wesentliche energieeffizientere Beheizung der Fahrzeugkabine und die Verlängerung der Einsatzdauer nachgewiesen. Rigitrac konnte mit der Durchführung dieses Pilot- und Demonstrationsprojekts zusätzliches Knowhow für die Weiterentwicklung des SKE40 sowie zukünftigen Elektrotraktoren aufbauen.

Der vollelektrische Traktor SKE40 von Rigitrac überzeugt insgesamt und ebnet den Weg für eine nachhaltige Zukunft, beispielsweise im Fuhrpark eines Kommunalbereichs. Die hohe Effizienz, die tiefen Energiekosten, die reduzierten CO2-Emissionen sowie die geringen Lärmemissionen sind nur einige der Pluspunkte, welche zu einem umweltfreundlichen und ressourcenschonenden Einsatz im Kommunalbereichs oder in der Landwirtschaft führen werden.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung ... **3**

Summary ... **5**

Take-Home Messages ... **7**

Inhaltsverzeichnis ... **8**

Abkürzungsverzeichnis ... **8**

Symbolverzeichnis ... **9**

1 Einleitung ... **11**

1.1 Ausgangslage und Hintergrund ... 11
1.2 Motivation des Projektes ... 13
1.3 Projektziele ... 13

2 Anlagenbeschrieb ... **15**

2.1 Thermomanagementsystem des Traktors ... 15
2.2 Beschreibung des WP / KA - Moduls ... 17

3 Vorgehen und Methode ... **19**

3.1 Konzeptreview ... 19
3.2 Messungen auf dem Laborprüfstand ... 19
3.3 Messungen im Feld ... 22
3.3.1 Messkonzept ... 22
3.3.2 Messungen unter Sommerbedingungen ... 26
3.3.3 Messungen unter Winterbedingungen ... 26

4 Ergebnisse und Diskussion ... **27**

4.1 Ergebnisse aus dem Konzeptreview ... 27
4.2 Messungen auf dem Laborprüfstand ... 29
4.3 Messungen im Feld ... 33
4.3.1 Messungen unter Sommerbedingungen ... 33
4.3.2 Messungen unter Winterbedingungen ... 38
4.3.3 Steigerung der Einsatzdauer durch den Einsatz des WP / KA - Moduls ... 43

5 Schlussfolgerungen und Fazit ... **47**

6 Ausblick und zukünftige Umsetzung ... **49**

7 Nationale und internationale Zusammenarbeit ... **50**

8 Publikationen ... **51**

9 Anhang ... **52**

9.1 Schema zum Betriebsfall «Aktiv heizen» ... 52
9.2 Serieller Betriebsfall ... 53
9.3 Prinzipschema einer hydraulischen Weiche ... 53

Abkürzungsverzeichnis

AGCO	Unternehmen, Allis-Gleaner Corporation
CNH Industrial	Unternehmen, CNH steht für Case und New Holland
FI (FIC)	Flow Indicator (Flow Indicator Control)
HSLU	Hochschule Luzern
HP	Heat Pump
KA	Kälteanlage
PTC	Positive Temperature Coefficient
PWM	Puls-Weiten-Modulation
RS	Refrigeration System
TI	Temperature Indicator
WP	Wärmepumpe
WP/KA-Modul	Wärmepumpen- / Kälteanlagen-Modul
WÜ	Wärmeübertrager

Symbolverzeichnis

Variablen

A	Fläche	m^2
c	spezifische Wärmekapazität	J/(kg·K)
COP	Coefficient of Performance	-
CP	Wärmekapazität	J/K
E	Energie	J
EER	Energy Efficiency Ratio	-
m	Masse	kg
n	Drehzahl	min^{-1}
p	Druck	bar
P	Leistung	W
Q	Wärme	J
t	Zeit	s
T	Temperatur	°C
ζ	Gütegrad	-

Indizes

ab	abgeführt
Bk	Batteriekreislauf
el	elektrisch
Hot	heiss
Ik	Inverterkreislauf
K	Kondensation
Kab	Kabine
Kk	Komponentenkreislauf
Kond	Kondensator
Komp	Kompressor
Kü	Kühler
L	Lüfter
out	austretend
P	Pumpe
Sg	Sauggas
Sub	Subcooling (Unterkühlung)
th	thermisch
Umg	Umgebung
Üh	Überhitzung
V	Verdampfung
V	Verlust
zu	zugeführt

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Hintergrund

Die Rigitrac Traktorenbau AG (nachfolgend «Rigitrac») entwickelt und produziert Traktoren in Küssnacht am Rigi. Im Jahre 2018 hat Rigitrac ihren ersten batterie-elektrisch angetriebenen Traktor vorgestellt. Das Fahrzeug soll nun bis zur Marktreife weiterentwickelt werden.

Weltweit gibt es bisher noch kaum Traktoren mit rein elektrischem Fahrantrieb. Bei den wenigen existierenden Fahrzeugen handelt es sich primär um Funktionsmuster. Seriengefertigte und kommerzielle Fahrzeuge sind jedoch noch nicht erhältlich, zumindest was den europäischen Markt angeht. In der Vergangenheit wurden Studienprojekte präsentiert, in welchen nur der Dieselmotor mit einem E-Motor ersetzt wurde (z.B. Fendt e100Vario, CNH mit dem T4 Electric Power [2, 3]). Der Einsatz von Wärmepumpen zur Beheizung der Kabine und weiteren Komponenten in diesen Fahrzeugen ist nicht bekannt.

Für ein funktionierendes E-Fahrzeug muss der Traktor aber von Grund auf neu entwickelt werden, sodass möglichst kleine Verbraucher-Verluste auftreten. Dabei spielt die Wärmepumpe, welche in ein Thermomanagement-System integriert ist, für die Beheizung der Kabine und von weiteren Komponenten eine wichtige Rolle. Darum hat Rigitrac in den Jahren 2018/2019 einen Elektrotraktor Typ SKE50 hergestellt, wobei für die Beheizung ein elektrisches Heizelement eingesetzt wurde. Mit diesem Prototyp konnten Messungen durchgeführt und Erfahrungen gesammelt werden, mit denen eine nächste Generation E-Traktor inkl. Thermomanagement-System ausgelegt und aufgebaut werden kann.

Mit den Erfahrungen des SKE50 Funktionsmusters konnten die nächsten Entwicklungsschritte identifiziert werden. Einerseits muss das Fahrzeugkonzept optimiert und zu einem vermarktbaren Serienfahrzeug entwickelt werden. Dazu gehört die Identifikation von zuverlässigen und kostengünstigen technischen Komponenten und die Optimierung der Fahrzeugkonstruktion.

Andererseits schlagen sich gerade bei kleineren elektrischen Fahrzeugen die Nachteile des bisherigen Thermomanagement-Systems nieder: die für die elektrische Heizung benötigte Batteriekapazität führt dazu, dass die Batterie grösser dimensioniert werden muss: Beim Prototyp des E-Traktors SKE50 wird eine Heiz- bzw. Kühlenergie von 6-7 kW benötigt. Die Batterie vom SKE40 hat die Abmasse von 2x 600x420x420 mm und ist links und rechts unterhalb der Kabine platziert. Die Unterbringung von zusätzlicher Batteriekapazität im Fahrzeug ist deshalb eine Herausforderung. Auch das Gewicht ist ein kritischer Faktor. Ein höheres Fahrzeuggewicht reduziert die verfügbare Nutz- und Zuglast und reduziert die mögliche Reichweite des Fahrzeuges. Schliesslich stellt die Batterie einer der grössten Kostenpunkte eines solchen Fahrzeuges dar (Batteriekosten eines Serienfahrzeuges entsprechen in etwa 35% der gesamten Fahrzeugkosten).

Eine weitere Herausforderung besteht im Winter, sofern der E-Traktor an der kalten Umgebung steht und auskühlt. Dabei besteht die Gefahr der Vereisung des Luftkühlers unterhalb einer Temperatur von 0°C, sofern die Aussenluft als Quelle für die Wärmepumpe benötigt wird und zu wenig Abwärme von den elektrischen Komponenten zur Verfügung steht.

Eine wichtige Aufgabe stellt darum die Entwicklung und Umsetzung eines betriebssicheren und effizienten Thermomanagement-Systems dar. Dieses hat einerseits die Aufgabe, die Komponenten während des Betriebs im zulässigen Temperaturbereich zu temperieren und andererseits die komfortbedingten Heiz- und Kühlanforderungen der Kabine sicherzustellen. Die typischerweise hohe Effizienz von elektrischen und elektronischen Komponenten wie Inverter, Motoren usw. führt dazu, dass diese Komponenten nur eine geringe Abwärme aufweisen, die beispielsweise für die Kabinenheizung verwendet werden könnte. Aus diesem Grund werden elektrische Fahrzeuge häufig über eine Wärmepumpe und/oder elektrische Heizelemente beheizt. Im Forschungsprojekt «Kombiniertes Wärmepumpen- und Klimakälteanlagensystem mit Turbokompressor für Elektrofahrzeuge» konnte die HSLU aufzeigen, dass durch den Einsatz einer Wärmepumpe mit Aussenluft als Wärmequelle die Reichweite des betrachteten Referenzfahrzeugs in der «Golfklasse» um 23% gesteigert werden konnte (im Vergleich zur reinen elektrischen Heizung) [1]. Weiter konnte durch ein neu entwickeltes Thermomanagement-Konzept, welches unter anderem die Abwärme aus dem Fahrgastraum nutzt, eine Reichweitensteigerung von bis zu 38% errechnet werden.

Inzwischen bietet ein Grossteil der namhaften Hersteller im Personenwagenbereich batterie-elektrisch angetriebene Fahrzeuge an. Ebenfalls sind batterie-elektrisch angetriebene Lastwagen auf dem Markt

verfügbar. Batterie-elektrisch angetriebene Traktoren sind Stand Mitte 2023 serienmässig jedoch noch keine auf dem Markt erhältlich. Einige etablierte Traktorenhersteller (z.B. Fendt mit dem e100 Vario, respektive e300 Vario, oder CNH mit dem T4 Electric Power) haben bekannt gegeben, an Projekten zu deren Einführung zu arbeiten [2, 3]. Grundsätzlich können die Erfahrungen bezüglich des Thermomanagement-Systems von Personen- und Lastwagen, mit gewissen Einschränkungen auch auf Traktoren übertragen werden.

Die Mahle Aftermarket GmbH zeigt in einem Bericht [3] Möglichkeiten zur Realisierung des Thermomanagements in Elektrofahrzeugen auf, wobei teilweise ein konventionelles Klimakältemodul mit einem zusätzlichen «Batterieverdampfer» erweitert wird, der die Batterie des Elektrofahrzeugs kühlt. Die Kühlung kann dabei über einen direkt in der Batterie eingebauten Verdampfer oder über einen vom Verdampfer kommenden Luftstrom gekühlt werden. Weiter wird ein System beschrieben, das neben dem Kältemittelkreislauf einen Kühlmittelkreislauf (z.B. Wasser/Glykol-Gemisch) verwendet.

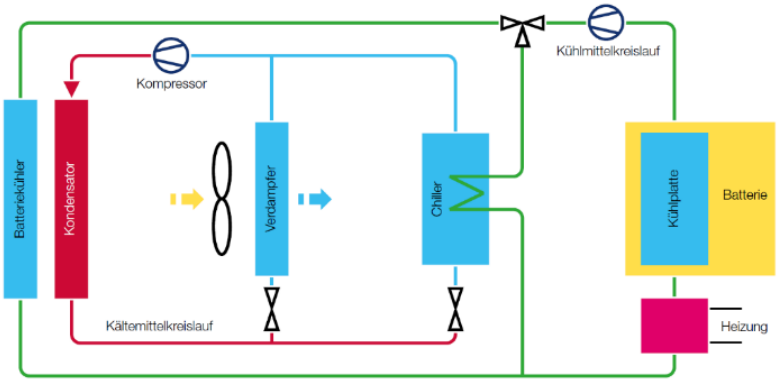

Abbildung 1: Möglichkeit zur Realisierung des Thermomanagement-Systems eine Elektrofahrzeuges aus [4].

Bei diesen erwähnten Systemen wird jedoch die Abwärme der elektrischen Komponenten wie Motoren, Inverter etc. nicht als Wärmequelle für die Wärmepumpe verwendet.

Weiter geht ein Konzept der AGCO GmbH. Dieses beinhaltet neben der Temperierung der Batterie über ein Kühlmittel zusätzlich die Nutzung der Abwärme der elektrischen Komponenten, um die Fahrgastkabine zu temperieren (vgl. Abbildung 2) [4].

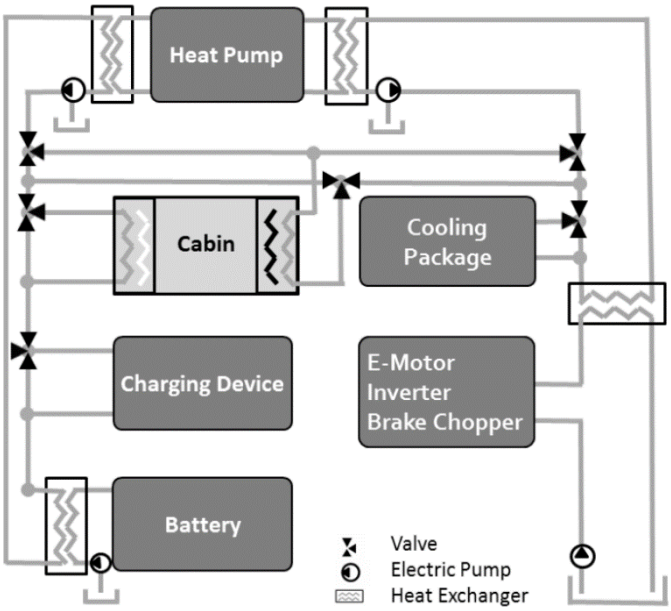

Abbildung 2: Schematische Darstellung des Thermomanagement-Systems eines Elektrotraktors der AGCO GmbH [4].

Die «umschaltbare» Wärmepumpe kann dabei verwendet werden, um die Kabine zu kühlen oder zu heizen, wobei die Abwärme der Komponenten als Wärmequelle dienen kann.

1.2 Motivation des Projektes

Die Klimatisierung der Fahrzeugkabine, Batterie und weiteren Komponenten spielt in Fahrzeugen eine wichtige Rolle. Nebst Komfortaufgaben stellen sich Anforderungen hinsichtlich Sicherheit, z.B. Verhindern von Beschlagen der Scheibe im Winter oder Kühlen im Sommer zur Erhöhung der Konzentrationsfähigkeit, und Schutz der Komponenten vor Überhitzung.

Auf Grund der sehr hohen Wirkungsgrade der elektrischen Komponenten steht für die Beheizung der Kabine und weiteren Komponenten im Vergleich zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor eine geringe direkt nutzbare Abwärme zur Verfügung. Die Sicherstellung der Heizanforderung erfolgt durch den Einsatz von elektrischer Energie. Dies hat zur Folge, dass die Einsatzdauer des E-Traktors abnimmt oder die Batteriekapazität erhöht werden muss. Für die Kühlung der Fahrzeugkabine wird heute bereits standardmässig eine Kälteanlage verbaut.

Auf Basis dieser Ausgangslage soll ein möglichst effizientes und kostengünstiges Thermomanagement-System entwickelt werden. Für die Klimatisierung soll ein kombiniertes WP/KA-Modul eingesetzt werden. Um den zusätzlichen Strombedarf zu reduzieren, soll die freie Kühlung mit dem Aussenlüfter ausgenützt und im Winter die Abwärme nach Möglichkeit direkt für die Beheizung verwendet werden. Falls die Abwärme für die direkte Heizung zu gering ist, dient diese Abwärme als Wärmequelle für die Wärmepumpe. Da für die Kabinen-Kühlung bereits eine Kälteanlage installiert wird, hält sich der Mehraufwand für die Beheizung in Grenzen, da die Verdampfer- und Kondensatorkreisläufe hydraulisch umgeschaltet werden können. Im Vergleich zu einer stationären Anwendung einer Wärmepumpe bzw. Kälteanlage ist das zur Verfügung stehende Platzangebot eingeschränkt und das WP/KA-Modul muss auf Grund der Vibrationen und anderen Umwelteinflüssen robust ausgelegt werden. Dies kann durch den Einsatz von kompakten Bauteilen und einem robusten Drehzahl-geregelten Verdichter erreicht werden.

Nebst der Komponenten-Seite umfasst das Thermomanagement-System die Steuerung und Regelung. Dieser Aspekt stellt ein wichtiger Teil der Innovation dar. Damit ein effizienter und sicherer Betrieb der Klimatisierung sichergestellt werden kann, müssen die Erfahrungen der Rigitrac aus dem Traktorenbau und Kenntnisse über den Betrieb von Wärmepumpen bzw. Kälteanlagen in die Entwicklung einfliessen. So muss z.B. das automatische Umschalten zwischen Heiz- und Kühlanforderungen gewährleistet sein, ohne dass einzelne Komponenten thermisch überlastet werden.

1.3 Projektziele

Das übergeordnete Ziel von Rigitrac ist die Realisierung eines vollelektrischen und effizienten Serientraktors für Landwirtschafts- und Kommunalbetriebe. Das Ziel des vorliegenden Projekts ist die Entwicklung und Erprobung eines Thermomanagement-Systems in Kombination eines WP/KA-Moduls für kleinere elektrische Fahrzeuge. Konkret soll durch den Einsatz einer Wärmepumpe und der Verwendung der Abwärme der Komponenten als Wärmequelle die benötigte elektrische Energie für die Beheizung im Vergleich zu einer rein elektrischen Heizung (mit Abwärmenutzung) um 70% reduziert werden. Dadurch soll die Einsatzdauer bei gleicher Batteriekapazität um 20% erhöht werden.

Da es im Moment auf dem Markt kaum geeignete Lösungen für solche WP/KA-Module gibt und Erfahrungen dazu fehlen, ist die Entwicklung eines Prototypensystems erforderlich, mit dem die notwendigen Grundlagen für die darauffolgende Serienproduktion geschaffen werden. Konkret müssen folgende Aspekte im Rahmen des Prototypenbaus und eines ersten Feldtests untersucht werden:

- Ermittlung der Auslegungsgrundlagen für das WP/KA-Moduls (z.B. Heiz – und Kühlanforderungen, Temperaturen der Quellen- und Senken-Seite, Abwärmenutzung, etc.)
- Erprobung des WP/KA-Moduls bei unterschiedlichen Bedingungen (u.a. Winter/Sommer) und erfassen des Energieverbrauchs für unterschiedliche Temperaturbedingungen (sowohl in der Kabine als auch draussen)
- Untersuchung des Einflusses der Abwärmenutzung auf den Energieverbrauch
- Optimierung der Wärmepumpe durch Anpassung der Ansteuerstrategie. (Effizienter Drehzahlbereich, taktender Betrieb etc.)

Im Rahmen der Erprobung soll die Funktionstüchtigkeit des WP/KA-Moduls und deren energetischen und wirtschaftlichen Eigenschaften im Detail untersucht werden. Folgende Analysen sind geplant:

- Im Winterbetrieb wird untersucht, ob bei Temperaturen von -10°C bis -5°C genügend Abwärme für die direkte bzw. indirekte Abwärmenutzung zur Verfügung steht. Dabei muss die Fahrerkabine auf eine Temperatur von 20°C geheizt werden können.
- Es wird untersucht, ob die Luftverteilung so ausgelegt ist, sodass die Scheiben bei hoher Luftfeuchtigkeit (Regen, nasser Kleidung) nicht anlaufen.
- Im Sommerbetrieb muss das Kühlsystem genügend Kälteleistung zur Verfügung stellen, um die Fahrerkabine und die weiteren Komponenten zu kühlen.
- Es wird untersucht, welcher Stromverbrauch des WP/KA-Moduls bei welchen Temperaturen resultiert.
- Es werden Dauertests für den Winter- und Sommereinsatz bei einem ganzen Batteriezyklus durchgeführt.

2 Anlagenbeschrieb

2.1 Traktor

Die Wärmepumpe wird in einen Traktor eingebaut, welcher der Kleintraktoren bis 50 kW zugeteilt werden kann. Das Haupteinsatzgebiet dieser Klasse sind leichte Arbeiten der Graswirtschaft und Gemüsebau, sowie auch im Obst- und Weinbau. Auch im Kommunalbereich werden Kleintraktoren oft eingesetzt, dabei sind typische Einsatzgebiete der Winterdienst mit Pflug und Salzstreuer aber auch Sommereinsätze mit Mähwerk oder Anhänger.

Durch eine minimale Aussenbreite von 1.3m ist ein Einsatzbereich auf engen Plantagen oder Strassen gegeben. Ein Gesamtgewicht von bis 4'300 kg stellt genügend mögliche Zuladung für Anbaugeräte zur Verfügung. Für eine optimale Gewichtsverteilung ist die Batterie zwischen den Achsen unterhalb der Kabine angebaut. Je eine Batterie links und rechts von Rahmen beinhalten eine nutzbare Gesamtkapazität von 46.4 kWh bei einer Nominalspannung von 374 V. Dadurch wird eine durchschnittliche Einsatzdauer von 4-6 h erzielt.

Der Traktor verfügt über 5 verschiedene elektrische Hochvoltantriebe. Der leistungsstärkste Elektromotor für den Fahrantrieb weist eine Dauerleistung von 40 kW auf. Für eine optimale Energieeffizienz sind die Zapfwellenantriebe vorne und hinten mit je einem einzelnen Motor versehen. Die Dauerleistung pro Zapfwellenmotor beträgt 16.5 kW. Für die Bremsunterstützung, Lenkung und hydraulische Funktionen wird eine drehzahlgeregelte Hydraulikpumpe eingebaut, welche von einem Elektromotor mit einer Leistung von 15 kW angetrieben wird. Der fünfte Hochvoltantrieb ist der Kompressor im WP/KA-Modul.

2.2 Thermomanagementsystem des Traktors

Das Thermomanagement-System des E-Traktors soll in der Lage sein, die Kühlung und/oder Heizung der betriebsnotwendigen Komponenten sicherzustellen sowie die komfortbedingte Klimatisierung der Fahrgastkabine ermöglichen.

Die Komponenten-Temperaturen sollen dabei die in der nachfolgenden Tabelle aufgeführten Werte nicht über- bzw. unterschreiten (Angaben aus den Datenblättern der jeweiligen Komponenten).

Komponente	Optimale Temperatur [°C]	Minimale Temperatur [°C]	Max. Temperatur ohne Derating [°C]	Max. Temperatur [°C]
Elektromotoren	25-45	10	120	140
Inverter Fahrantrieb	25-45	10	80	100
Öl Wärmeübertrager (Hydrauliköl)	65	-	-	-
Ladegerät	25-45	10	55	65
Inverter DCDC & Hydraulik	25-45	10	65	75
Inverter Zapfwellen	25-45	10	65	75
Batterie	25	10	45	59

Tabelle 1: Angaben zu den optimalen Temperaturniveaus der elektrischen Komponenten und akzeptable Maximal- und Minimalwerte der Komponenten-Temperaturen mit und ohne Derating.

Abbildung 3 zeigt den geplanten schematischen Aufbau des Thermomanagement-Systems. Das bestehende Konzept zur Realisierung des Thermomanagement-Systems kann im Grundsatz in vier Kreisläufe eingeteilt werden.

Das hydraulisch umschaltbare WP/KA-Modul bildet das Herzstück des Systems. Wahlweise kann das Modul zum Heizen des Kabinenkreislaufs verwendet werden (Fall «Aktiv heizen», Schema im Anhang), wozu es Abwärme aus dem Inverter- und Komponentenkreislauf als Wärmequelle nutzt, oder aber zum Kühlen des Kabinenkreislaufs (Fall «Aktiv Kühlen», Schema in Abbildung 3), wobei die Wärmeenergie des Kondensators in den Inverterkreislauf abgeführt wird.

Der Inverter- und der Komponentenkreislauf sind zwei parallel geführte Kreisläufe, die vor dem Luftkühler zur Wärmeabgabe zusammengeführt und anschliessend nach dem Kühler wieder aufgetrennt werden. Der Komponentenkreislauf enthält dabei diejenigen Komponenten des Kreislaufs, welche einen Grossteil der Abwärme erzeugen (Motoren und Inverter Fahrantrieb) und wird somit hauptsächlich direkt über den Luftkühler gekühlt. Im Inverterkreislauf ist der in Serie geschaltete Wärmeübertrager des WP/KA-Moduls (wahlweise Kondensator oder Verdampfer, je nach Stellung der Ventile) enthalten, womit Wärme zu- oder abgeführt werden kann. Der Luftkühler führt die überschüssige Wärme aus dem System an die Umgebung ab.

Der Batteriekreislauf ist über einen Mischkreis an den Kabinenkreislauf angeschlossen. Je nach Bedarf der Batterie wird Kühlmittel aus dem Kabinenkreislauf zugemischt, um die Batterie zu kühlen oder zu heizen.

Des weiteren bieten die Umschaltventile die Möglichkeit, den Inverterkreislauf und den Kabinenkreislauf seriell zu verbinden (Fall «Serieller Betrieb», Schema im Anhang). Dieser Betriebsfall kann beispielsweise zum Befüllen/Entleeren der Kreisläufe mit dem Kühlmittel oder im Betrieb zur direkten Nutzung der Abwärme des Inverterkreislaufs zum Beheizen der Kabine verwendet werden.

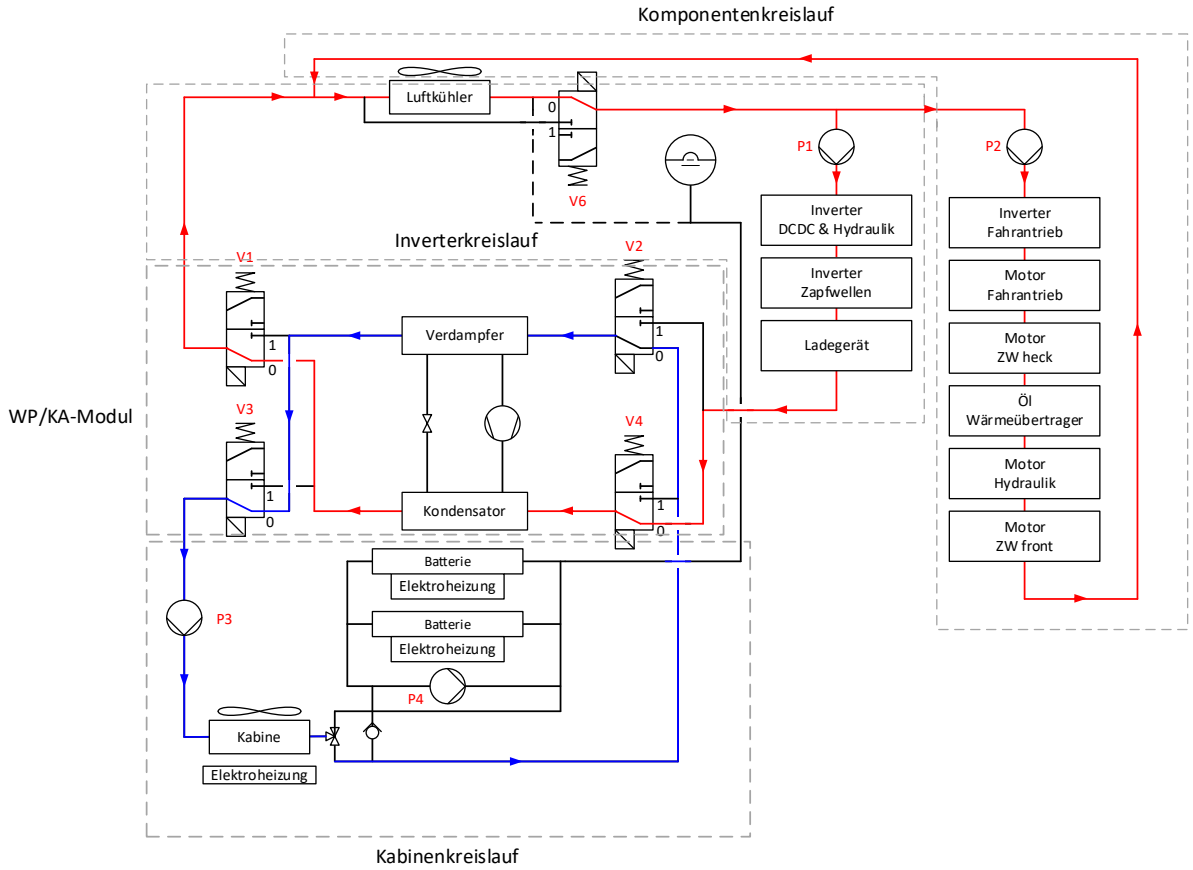

Abbildung 3: Schematische Darstellung des Thermomanagement-Systems (inkl. Bezeichnung der Kreisläufe).

Farblich eingezeichnet ist der Fall "Aktiv kühlen".

2.3 Beschreibung des WP/KA-Moduls

Das verwendete WP/KA-Modul ist eine Eigenentwicklung der Firma Aircontech GmbH. Die Eckdaten des Moduls sind in Tabelle 2 zusammengefasst:

Kompressor-Bauart	hermetischer horizontaler Scroll-Kompressor, mit Sauggaskühlung
Kältemittel	R134a
Drehzahlbereich	1'000 min^{-1} bis 8'600 min^{-1}
Verdampfungstemperatur	-10.0°C bis +12.5°C
Kondensationstemperatur	26.7°C bis 68.0°C
Elektrische Nennleistung Kompressor	3'200 W
Bereich der Kühlleistung	ca. 0.5 - 4.5 kW
Bereich der Heizleistung	ca. 1.7 - 7.0 kW
Typ und Fläche des Kondensators	Platten-Wärmeübertrager, 0.20 m^2
Typ und Fläche des Verdampfers	Platten-Wärmeübertrager, 0.68 m^2
Expansionsventil	thermostatisches Expansionsventil

Tabelle 2: Eckdaten des verwendeten WP/KA-Moduls.

Zur Kältemittelauswahl

Im entwickelten WP/KA-Modul wird das Kältemittel R134a eingesetzt, welches einen GWP-Wert von 1430 aufweist. Auf Grund dieses hohen Wertes muss damit gerechnet werden, dass das Kältemittel auf Grund regulatorischer Massnahmen zukünftig nicht mehr in neuen Anlagen bzw. Traktoren eingesetzt werden darf. In der Automobil-Branche wird zurzeit vielfach das Kältemittel R1234yf mit einem GWP-Wert von 4 eingesetzt. Ähnliche thermodynamische Eigenschaften hinsichtlich Effizienz weist das natürliche Kältemittel Propan (R290, GWP-Wert von 3) auf. Nachteilig ist dabei die Brennbarkeit (Kältemittelklasse A3).

Verdichter für Wärmepumpen von Fahrzeugen sind zurzeit am freien Markt nur eingeschränkt verfügbar. Im Vergleich zu stationären Wärmepumpen (z.B. Gebäudeheizung, Haushaltsgeräte) müssen Komponenten für mobile Anwendungen eine grössere Robustheit (z.B. Vibrationen, Aussen-Temperaturen) aufweisen. Zudem werden in E-Fahrzeugen unterschiedliche Spannungsniveaus der Leistungselektronik eingesetzt, was dazu führen kann, dass die Auswahl an Verdichtern im entsprechenden Leistungsbereich weiter eingeschränkt wird.

Da der Fokus dieses Projektes auf die Entwicklung eines Thermomanagement-Systems und nicht ausschliesslich auf die Entwicklung des WP/KA-Moduls liegt, wurde entschieden, möglichst kostengünstige und gut auf dem Markt verfügbare Komponenten einzusetzen. Daher wurde entschieden, das WP/KA-Modul mit dem Kältemittel R134a aufzubauen. In zukünftigen Entwicklungen wird der Einsatz von zukunftsfähigen Kältemittel berücksichtigt, sofern die Komponenten auf dem Markt verfügbar sind.

Hydraulische Einbindung

Damit hydraulisch zwischen Batterie- und Kabinenheizung sowie -kühlung umgeschaltet werden kann, sind insgesamt vier Umschaltventile am Modul angebracht. Abbildung 4 stellt den schematischen Aufbau des WP/KA-Moduls dar.

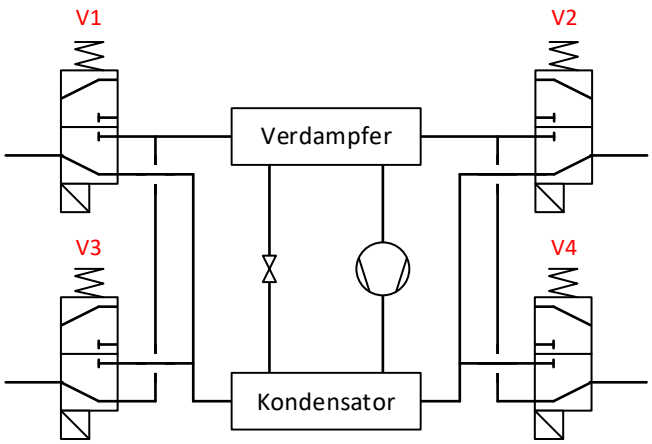

Abbildung 4: Schematische Darstellung des WP/KA-Moduls mit vier Umschaltventilen zur hydraulischen Kreislaufumschaltung.

3 Vorgehen und Methode

Die HSLU unterstützt Rigitrac im konzeptionellen Aufbau des Thermomanagement-Systems. Das von Rigitrac erstellte Thermomanagement-Konzept wurde hierfür in einer Konzeptreview einer umfassenden Überprüfung unterzogen. Ausserdem wurde der Prototyp des WP/KA-Moduls auf dem Wärmepumpen-Prüfstand der HSLU sowie im Feld untersucht, um die Effizienzkennwerte des Moduls zu bestimmen und die Eignung für die vorgesehene Anwendung im Elektrotraktor zu überprüfen.

3.1 Konzeptreview

Das von Rigitrac erstellte Thermomanagement-Konzept wurde von der HSLU umfassend überprüft. Konkret umfasste das Konzeptreview folgende Punkte:

- Überprüfung des schematischen Aufbaus des Thermomanagement- und WP/KA-Systems.
- Plausibilitätsprüfung der in den Auslegungsunterlagen ausgewiesenen Betriebsbedingungen in den verschiedenen Betriebsfällen.
- Überprüfung der in den Auslegungsunterlagen ausgewiesenen «Energiebilanzen» in den verschiedenen Betriebsfällen. Beispielsweise wird hier geprüft, ob die Abwärme stets ausreichend als Wärmequelle der Wärmepumpe ist.
- Überprüfung der Auslegung des Thermomanagement- und WP/KA-Systems mit Hilfe von zusätzlichen Energiebilanzen und vereinfachten Berechnungen des Kältemittelkreislaufs.
- Weist das System Schwächen auf? Gibt es Problemstellen und kritische Punkte?

Anhand dieser Fragen soll überprüft werden, ob das Thermomanagement die Anforderungen erfüllen kann, oder ob punktuell Anpassungen am Konzept (inkl. des Regelkonzepts) notwendig sind.

3.2 Messungen auf dem Laborprüfstand

Zur Bestimmung der wichtigsten charakteristischen Kenngrössen des von der Firma Aircontech entwickelten WP/KA-Moduls wurden experimentelle Untersuchungen im Labor der HSLU durchgeführt. Das WP/KA-Modul wurde zu diesem Zweck an die Prüfinfrastruktur der HSLU angeschlossen, welche unterschiedlich konditionierte Stoffströme (Quellen und Senken) zur Verfügung stellen kann.

Abbildung 5 zeigt den vereinfachten schematischen Messaufbau sowie die verwendeten Messstellen am WP/KA-Modul. Zur Vereinfachung wurde die hydraulische Umschaltung des WP/KA-Moduls mit den vier Ventilen nicht dargestellt (vgl. Abbildung 4).

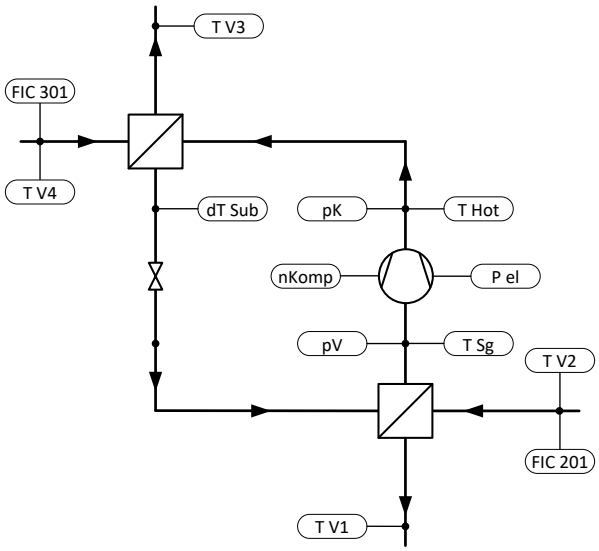

Abbildung 5: Vereinfachte schematische Darstellung der Messpunkte am WP/KA-Modul.

Die verwendeten Messstellen und Messmittel sind in Tabelle 3 aufgelistet:

Messstelle	Bezeichnung im Schema	Sensor	Einheit
Wasser/Glykol-Kreislauf			
Temperatur Glykol Verdampfer ein	T V2	3 x PT-100	°C
Temperatur Glykol Verdampfer aus	T V1	3 x PT-100	°C
Temperatur Glykol Kondensator ein	T V4	3 x PT-100	°C
Temperatur Glykol Kondensator aus	T V3	3 x PT-100	°C
Durchfluss Verdampfer	FIC 201	Endress & Hauser Promass 83F (Coriolis)	kg/h
Durchfluss Kondensator	FIC 301	Endress & Hauser Promass 83F (Coriolis)	kg/h
Kältemittelkreislauf			
Heissgastemperatur	T_{Hot}	PT-100	°C
Sauggastemperatur	T_{Sg}	PT-100	°C
Temperatur unterkühltes Kältemittel	T_{Sub}	PT-100	°C
Leistung WP/KA-Modul	P_{el}	Interne Messung Spannungsversorgung	W
Verdampfungsdruck	p_V	Carel SPKT*P0 (Relativdruck)	mbar(r)
Kondensationsdruck	p_K	Carel SPKT*P0 (Relativdruck)	mbar(r)
Ist-Drehzahl Kompressor	n_{Komp}	Drehzahlsensor	min^{-1}

Tabelle 3: Verwendete Messstellen und Messmittel für die Labormessungen an der HSLU.

Die Temperaturen des Kältemittelkreislaufs werden dabei mit an den Rohrleitungen des Kältemittelkreislaufs angebrachten Oberflächen-PT-100 Sensoren gemessen. Ein Foto des in die Prüfeinrichtung eingebundenen WP/KA-Moduls inkl. Bezeichnung der Sensorpositionen ist in Abbildung 6 ersichtlich.

Definition der zu untersuchenden Betriebspunkte

Um für den effektiven Betrieb des Traktors repräsentative Betriebspunkte in den Laborversuchen zu messen, wurden einfache, stationäre Energiebilanzen der Kreisläufe aufgestellt. Anhand dieser Bilanzen wurde das Betriebsfeld des WP/KA-Moduls eingegrenzt. Die Betriebsfälle und Lastannahmen stammen dabei von Rigitrac und wurden anhand von Erfahrungswerten und den Effizienzwerten der elektrischen Komponenten abgeschätzt.

Die von Rigitrac vorgegebenen Betriebspunkte sind in nachfolgender Tabelle 4 zusammengefasst:

Tätigkeit		T_{Umg} [°C]	T_{Kabine} [°C]	Heiz- / Kühlleistung der Kabine [kW]	Abwärme der Batterie [kW]	Abwärme Inverterkreislauf [kW]	Abwärme Komponentenkreislauf [kW]
H1	Mähen	20	25	0.5	0.22	0.5	2.0
H2	Starten	20	25	0.5	0.04	0.1	0.1
H3	Mulchen	15	25	1.0	0.34	0.7	2.5
H4	Horizontal	-15	25	2.8	0.22	0.2	2.0
H5	Schneeräumen	-5	25	2.8	0.36	0.3	3.1

H6	Stark ausgelastet	-15	25	2.8	1.16	2.2	9.2
H7	Schneefräsen	-10	25	2.8	0.54	0.9	4.4
K1	Horizontal	35	25	-1.5	0.22	0.2	2.0
K2	Bergauf	25	25	-0.3	0.52	0.2	4.9
K3	Ausgelastet	35	25	-1.5	0.78	1.2	6.4
K4	Stark ausgelastet	35	25	-1.5	1.16	2.2	9.2

Tabelle 4: Vorgegebene Betriebspunkte mit abgeschätzten Wärmeleistungen von Rigitrac,
«H» steht dabei für Heizfälle und «K» für Kühlfälle

Die Faktorstufenkombination für die Messungen am WP/KA-Modul wurde anhand der oben genannten Betriebsfälle folgendermassen definiert (vgl. Tabelle 5):

Faktor	Faktorstufen
Quelleneintrittstemperatur [°C]	5 / 10 / 15
Senkeneintrittstemperatur [°C]	40 / 50 / 60
Massenstrom Quelle [kg/h]	684
Massenstrom Senke [kg/h]	612
Kompressordrehzahl [rpm]	1500 / 2500 / 3500 / 4500 / 6000 / 7000 / 8000

Tabelle 5: Fahrstufenkombinationen für die Messungen am WP/KA-Modul im Labor der HSLU.

Total ergibt dies einen Umfang von 63 Messungen. Die Versuche im Labor wurden unter stationären Bedingungen durchgeführt. Die Messdauer für einen Punkte betrug jeweils 10 Minuten.

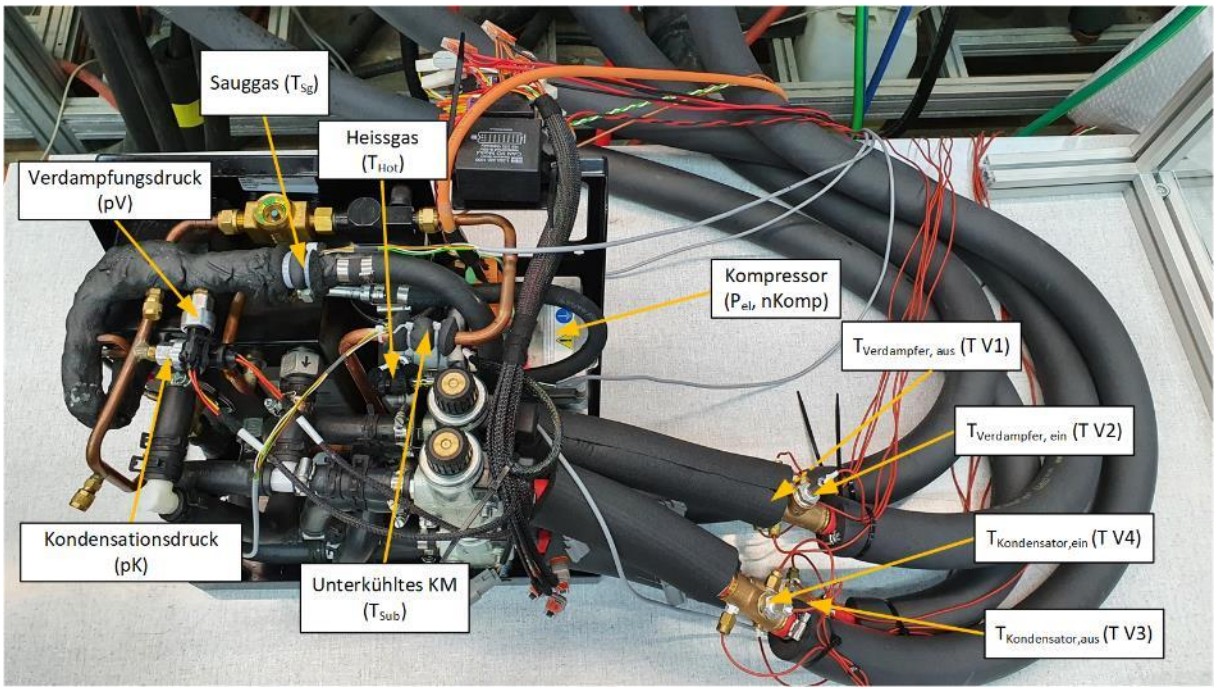

Abbildung 6: An Prüfeinrichtung angeschlossenes WP/KA-Modul inklusive bezeichneter Messtechnik.

3.3 Messungen im Feld

3.3.1 Messkonzept

Zur weiteren Überprüfung des Thermomanagement-Konzepts werden Feldmessungen an einem Prototyp des Elektrotraktors durchgeführt. Zusätzlich zur bereits im Serienfahrzeug vorgesehenen Messtechnik werden zusätzliche Sensoren im Thermomanagement-System des Traktors verbaut.

Aus den in den Feldmessungen aufgezeichneten Messdaten sollen der zeitliche Verlauf folgender Grössen abgeleitet werden können:

- Wärmeleistung & Temperatur im Komponentenkreis
- Wärmeleistung & Temperatur im Inverterkreis
- Kühlleistung des Luftkühlers
- Elektrische Leistungsaufnahme der Wärmepumpe
- Kühl-/Heizleistung des Kabinen-Wärmeübertragers
- Temperatur und Wärmeleistung des Batteriekreises
- Stromverbrauch des Thermomanagement-Systems

Die Wärmeleistungen des Inverter- sowie Komponentenkreises werden einerseits zur Validierung der getroffenen Lastannahmen verwendet und andererseits zur weiteren Bilanzierung des Thermomanagement-Systems benötigt.

Neben den Messgrössen im Kreislauf wurden im Betrieb des Traktors folgende Grössen erfasst:

- Stellung der Umschaltventile (für Bestimmung des Betriebsfalls)
- Drehzahl des Luftkühlers
- Drehzahl des Kabinenlüfters
- Stellung der Zuluft - Klappe Kabine (zur Bestimmung des Umluftanteils in der Kabine)
- Eingestellte Soll-Kabinentemperatur
- Status aller elektrischen Heizelemente (Ein/Aus plus bezogene Leistung)
- Batteriespannung

Das Messkonzept mit den eingezeichneten Messstellen ist in Abbildung 7 ersichtlich.

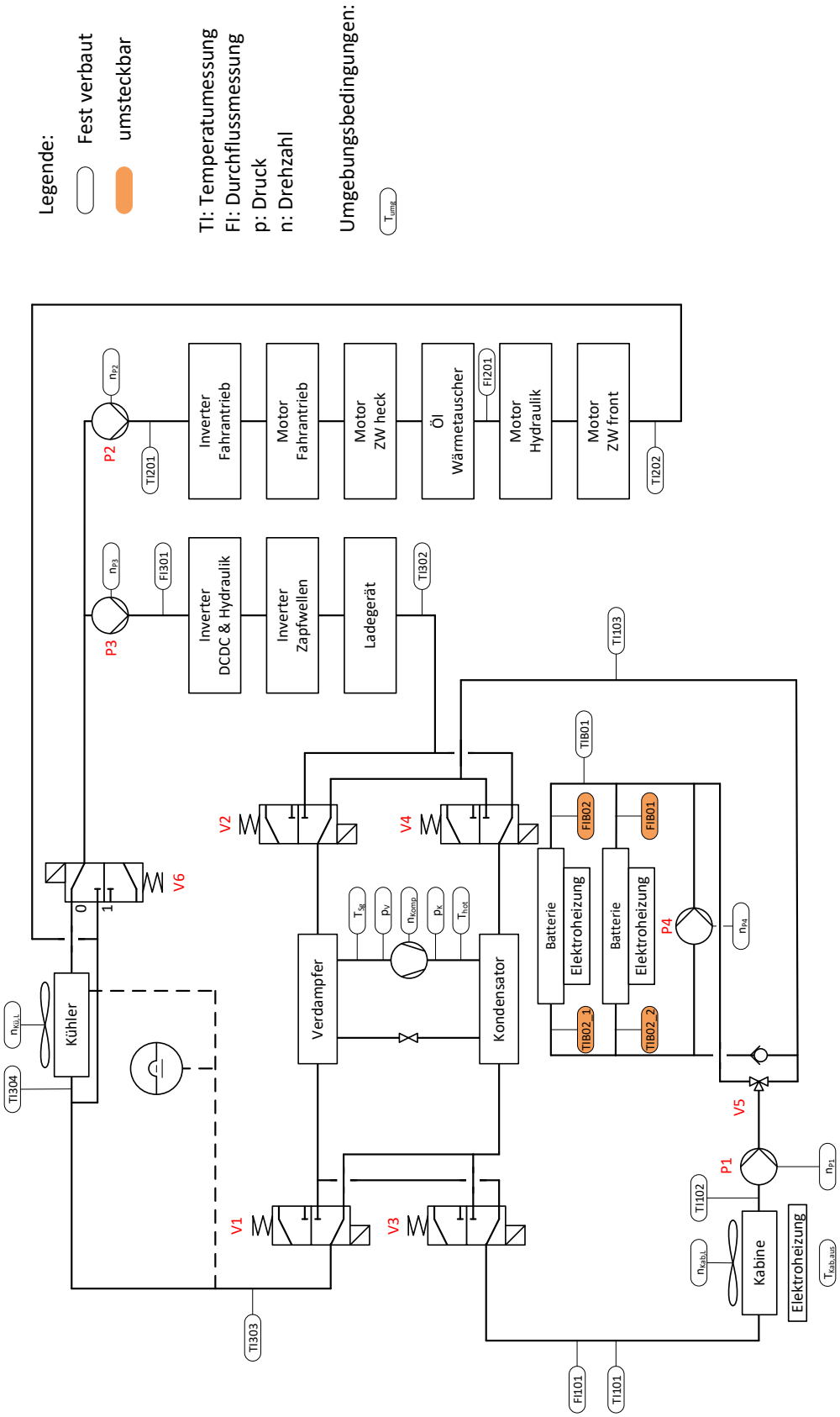

Abbildung 7: Schematische Darstellung der Thermomanagement-Systems inklusive Messtechnik für die Feldversuche.

Nachfolgende Tabelle 6 gibt einen Überblick über die Messstellen für die Feldmessungen:

Messstelle	Bezeichnung im Schema	Einheit
Wasser / Glykol – Kreisläufe		
Temperatur Glykol WP-Austritt Kabinenkreis	TI101	°C
Temperatur Glykol Austritt Kabinen-WÜ	TI102	°C
Temperatur Glykol WP-Eintritt Kabinenkreis	TI103	°C
Durchfluss Glykol Kabinenkreislauf	FI101	kg/s
Temperatur Glykol vor Invertern	entspricht TI201	°C
Temperatur Glykol nach Invertern	TI302	°C
Temperatur Glykol Inverterkreis nach WP	TI303	°C
Temperatur Glykol vor Kühler	TI304	°C
Durchfluss Glykol Inverterkreis	FI301	kg/s
Temperatur Glykol vor Komponenten	TI201	°C
Temperatur Glykol nach Komponenten	TI202	°C
Durchfluss Glykol Komponentenkreis	FI201	kg/s
Kältemittelkreislauf		
Heissgastemperatur	T_{Hot}	°C
Sauggastemperatur	T_{Sg}	°C
Verdampfungsdruck	p_V	mbar(r)
Kondensationsdruck	p_K	mbar(r)
Drehzahl Kompressor	n_{Komp}	min-1
Spannung Kompressor, interne Messung Kompressorsteuerung	-	V
Stromaufnahme Kompressor, interne Messung Kompressorsteuerung	-	A
Lufttemperaturen		
Umgebungstemperatur	T_{Umg}	°C
Kabinentemperatur	T_{Kab}	°C
Austrittstemperatur Kabinenlüfter	$T_{Kab,out}$	°C
Sonstiges		
Drehzahl Kabinenlüfter	$n_{Kab,L}$	min^{-1}
Drehzahl Kühllüfter	$n_{Kü,L}$	min^{-1}
Drehzahl Pumpe 1	n_{P1}	min^{-1}
Drehzahl Pumpe 2	n_{P2}	min^{-1}
Drehzahl Pumpe 3	n_{P3}	min^{-1}
Drehzahl Pumpe 4	n_{P4}	min^{-1}

Tabelle 6: Verwendete Messstellen und Messmittel für die Feldmessungen bei Rigitrac.

Die Wärmepumpe, Inverter und Motoren sind mit internen Strommessgeräten ausgestattet, welche den bezogenen elektrischen Strom mit ausreichender Genauigkeit ausgeben. Die Batterie misst die aktuelle Batteriespannung und gibt den Ladezustand an. Aus diesen Daten kann die Leistung der Komponenten berechnet werden.

Die elektrischen Heizelemente werden per PWM-Signal angesteuert. Im Betrieb wird die Leistung dieser Elemente nicht gemessen. Der Tastgrad des PWM-Signals ist allerdings bekannt. Zur Bestimmung der

bezogenen elektrischen Leistung bei einem bestimmten PWM-Signal, werden vor dem Einbau Leistungsmessungen bei unterschiedlichen PWM-Signalen durchgeführt. Anschliessend kann während des Betriebs anhand des PWM-Signals auf die bezogene Leistung geschlossen werden.

Die gesuchten Grössen können anschliessend über folgende Gleichungen berechnet werden:

Abgegebener / aufgenommener Wärmestrom im Kabinen-WÜ:

$$\dot{Q}_{Kab} = \dot{m}_{101} \cdot c_p \cdot \left(T_{102} - T_{101}\right)$$

Abgegebener Wärmestrom im Luftkühler:

$$\dot{Q}_{Kü} = \dot{m}_{Kü} \cdot c_p \cdot \left(T_{304} - T_{201}\right),$$

wobei der Massenstrom des Kühlmittels durch den Kühler folgendermassen berechnet werden kann:

$$\dot{m}_{Kü} = \dot{m}_{201} + \dot{m}_{301}$$

Wärmestrom im Verdampfer der Wärmepumpe:

$$\dot{Q}_V = \begin{Bmatrix} \dot{m}_{101} \cdot c_p \cdot \left(T_{103} - T_{101}\right) & \text{Fall "Kabine kühlen"} \\ \dot{m}_{301} \cdot c_p \cdot \left(T_{303} - T_{302}\right) & \text{Fall "Kabine heizen"} \end{Bmatrix}$$

Wärmestrom im Kondensator der Wärmepumpe:

$$\dot{Q}_K = \begin{Bmatrix} \dot{m}_{101} \cdot c_p \cdot \left(T_{103} - T_{101}\right) & \text{Fall "Kabine heizen"} \\ \dot{m}_{301} \cdot c_p \cdot \left(T_{303} - T_{302}\right) & \text{Fall "Kabine kühlen"} \end{Bmatrix}$$

Wärmeleistung Inverterkreis:

$$\dot{Q}_{Ik} = \dot{m}_{301} \cdot c_p \cdot \left(T_{302} - T_{301}\right)$$

Wärmeleistung Komponentenkreis:

$$\dot{Q}_{Kk} = \dot{m}_{201} \cdot c_p \cdot \left(T_{202} - T_{201}\right)$$

Gesamtwärmeleistung Batteriekreis:

$$\dot{Q}_{Bk} = \dot{m}_{101} \cdot c_p \cdot \left(T_{103} - T_{102}\right)$$

Es besteht zudem die Möglichkeit, die Wärmeleistung der einzelnen Batterien über die umsteckbaren Sensoren FIB01 und FIB02 sowie TIB02_1 und TIB02_2 zu berechnen. Dies kann zur Validierung verwendet werden, dass beide Batterien gleichmässig vom Kühlmittel durchströmt und elektrisch gleichmässig belastet werden. Es ist jedoch nicht möglich, den Durchfluss durch beide Batterien gleichzeitig aufzuzeichnen.

Aufgrund des beschränkten Bauraums können nicht alle Temperatursensoren direkt vor oder nach den jeweiligen Komponenten eingebaut werden. Dies führt dazu, dass eine gewisse Rohrlänge zwischen Komponenten und Sensor vorhanden sind, was eine kleine Totzeit in der Temperaturmessung zur Folge hat.

Beim WP/KA-Modul werden zusätzlich die Sauggas- und Heissgastemperatur zur Sicherstellung der Betriebssicherheit des Moduls gemessen. Anhand der im Labor der HSLU aufgezeichneten Messdaten kann anschliessend auf den Betriebszustand des WP/KA-Moduls geschlossen werden.

Neben den oben beschriebenen Daten werden zudem die internen Temperatursensoren der einzelnen Inverter und Motoren aufgezeichnet. So kann eine allfällige unzureichende Kühlung der einzelnen Komponenten erkannt und berücksichtigt werden. Ausserdem verfügen die Motoren und Inverter über eigene Leistungsmessungen, welche die bezogene Leistung der Komponente mit ausreichender Genauigkeit ausgeben können.

Messplan: Im Rahmen der Feldmessungen soll mit den gegebenen Umgebungsbedingungen ein möglichst breites und dennoch realistisches Feld für die Messungen abgedeckt werden. Dabei werden die in Tabelle 4 aufgeführten Betriebspunkte verwendet. Generell ist es anzustreben, bei verschiedenen Umgebungstemperaturen und unterschiedlicher Intensität der Sonneneinstrahlung ungleiche Auslastungen des Traktors (bei Tätigkeiten wie Mähen, Mulchen etc.) Messungen durchzuführen.

Die Messkampagne wird in zwei Teile aufgesplittet. Die ersten Messungen finden im Zusammenhang mit der allgemeinen Inbetriebnahme des Traktors ab Juni 2022 statt. In diesem Zeitraum wird der Betrieb in der Übergangszeit bzw. im Sommer betrachtet. Anschliessend findet im Winter 2022/23 eine zweite Messkampagne zur Überprüfung der Funktion des Thermomanagement-Systems im Heizbetrieb statt.

Metadaten: Zusätzlich zu den aufgezeichneten Messdaten sollen zu jeder durchgeführten Messung die Randbedingungen (Metadaten) festgehalten werden. Konkret sollte dies folgende Angaben pro Messung enthalten:

- Angaben zur Tätigkeit
- Angaben zum Wetter (z.B. ob der Himmel bedeckt war oder die Sonne stark schien)
- Ungefährer Ort
- Tageszeit

Damit ist sichergestellt, dass für eventuelle weitere Auswertungen zusätzliche Daten (z.B. Wetterdaten wie die Globalstrahlung) beschafft werden können.

3.3.2 Messungen unter Sommerbedingungen

Die durchgeführten Feldmessungen unter Sommerbedingungen decken den Betriebsfall «Aktiv kühlen» ab. Es war angedacht, möglichst zwei Betriebspunkte gemäss Tabelle 4 abzudecken: Zum einen sollte der Betriebspunkt K1 bei sehr hohen Umgebungstemperaturen von rund 35°C, zum anderen der Betriebspunkt H1 bei milden Umgebungstemperaturen von rund 20°C gemessen werden.

3.3.3 Messungen unter Winterbedingungen

In den Feldmessungen unter Winterbedingungen wird der Betriebsfall «Aktiv heizen» betrachtet und beurteilt, welche Vorteile das WP/KA-Modul gegenüber einer rein elektrischen Heizung über das PTC-Heizelement mit sich bringt.

Ursprünglich war angedacht, wiederum einige typische Betriebspunkte aus Tabelle 4 auszumessen, beispielsweise Betriebspunkt H5, das Schneeräumen bei -5°C und einer Kabinentemperatur von 25°C. Da der Winter 2022/23 jedoch sehr mild war und es nur wenige schneereiche Tage gab, konnten keine Feldmessungen bei den gewünschten Bedingungen durchgeführt werden. Stattdessen wurden zwei Messungen am über Nacht vollständig ausgekühlten Traktor und möglichst tiefen Umgebungstemperaturen (0°C bis 5°C) angestrebt, in welchen jeweils das Aufwärmen der Kabine bis 23.5°C betrachtet wurde (PTC-Heizelement versus WP/KA-Modul).

Prinzipiell besteht bei Temperaturen unterhalb von 0°C die Gefahr der Vereisung des Aussenluftkühlers, falls die Umgebungsluft als Wärmequelle der Wärmepumpe benötigt wird. Dies kann z.B. der Fall sein, wenn das Fahrzeug längere Zeit im Freien steht, ohne an einer Ladestation angeschlossen zu sein. Im entwickelten Thermomanagement-System ist der Betriebsfall «Umgebungsluft als Wärmequelle der Wärmepumpe» nicht vorgesehen, d.h. eine Vereisung findet nicht statt und muss daher nicht experimentell untersucht werden.

Falls das Fahrzeug auskühlt oder zu wenig Abwärme aus den Komponenten für direkte oder indirekte Abwärmenutzung anfällt, kann die Betriebssicherheit und das Aufheizen der Kabine über die Elektro-Heizung, welche im Luftstrom nach dem Kabinenwärmeübertrager eingebaut ist, gewährleistet werden (vgl. Abbildung 7). Die Elektro-Heizung wird so lange betrieben, bis sich der Komponentenkreislauf so stark erwärmt hat, bis eine direkte oder indirekte Abwärmenutzung möglich ist. Die Steuerung erfolgt über das Thermomanagement-System.

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Ergebnisse aus dem Konzeptreview

Dimensionierung Luftkühler: Es wurde festgestellt, dass der Luftkühler im Fall einer Lastannahme (vgl. Tabelle 7) zu klein dimensioniert ist. Dieser Fall tritt bei hohen Aussenlufttemperaturen bei gleichzeitig starker Auslastung des Traktors und aktivierter Kabinen-/Batteriekühlung über das WP/KA-Modul auf. Hier muss erwähnt werden, dass dieser Betriebspunkt das absolute Maximum der möglichen Leistung des Elektrotraktors darstellt, da in diesem Fall die Kapazität der Batterie bereits nach weniger als einer Stunde erschöpft wäre. Es wird daher davon ausgegangen, dass der Betriebsfall selten auftritt und damit vernachlässigt werden kann.

Tätigkeit	T_{Umg} [°C]	T_{Kab} [°C]	Heiz- bzw. Kühlleistung Kabine [kW]	Abwärme Batterie [kW]	Abwärme Inverterkreislauf [kW]	Abwärme Komponenten-kreislauf [kW]
Stark ausgelastet	35	25	1.5	1.16	2.2	9.2

Tabelle 7: Angenommene Heiz- und Kühlleistungen für stark ausgelasteten Betrieb bei gleichzeitiger hoher Aussentemperatur.

Tabelle 8 gibt einen Überblick über den Betriebszustand der Wärmepumpe und die vom Luftkühler abzuführende Wärmeleistung unter der Annahme, dass die maximale Kondensationstemperatur des Moduls eingehalten wird.

T_V [°C]	T_K [°C]	Kühlleistung WP/KA-Modul [kW]	Heizleistung WP/KA-Modul [kW]	Total abzuführende Heizleistung Kühler [kW]	Erf. Temperaturdifferenz Kühler [K]	Kühlmitteltemperatur am Eintritt Luftkühler [°C]
5	68	2.7	4.4	15.8	44	78

Tabelle 8: Resultierende Heizleistung im Betriebsfall aus Tabelle 7 und erforderliche Temperaturdifferenz zur Wärmeabfuhr über den Luftkühler. Die erforderliche Temperaturdifferenz über den Kühler bezieht sich auf die Umgebungstemperatur und Kühlmitteleintrittstemperatur.

Es ist ersichtlich, dass die Kühlmitteltemperatur am Eintritt des Luftkühlers die maximale Kondensationstemperatur sowie auch die zulässigen Komponententemperaturen deutlich überschreitet (vgl. mit Tabelle 1).

Betriebsfeld des Kompressors: In der aktuellen Implementierung der regeltechnischen Absicherung des Kompressors gegen unerlaubte Betriebszustände wird nur der Hochdruckfall auf der Kondensatorseite und der Niederdruckfall auf der Verdampferseite abgedeckt. Um sicherzustellen, dass der Kompressor keinen Schaden nimmt, sollte die gesamte Hüllkurve des Kompressors in die regeltechnische Absicherung implementiert werden. Abbildung 8 zeigt die momentane Absicherung (grün) sowie jenen Bereich der Hüllkurve, welche noch nicht abgesichert wird (rot).

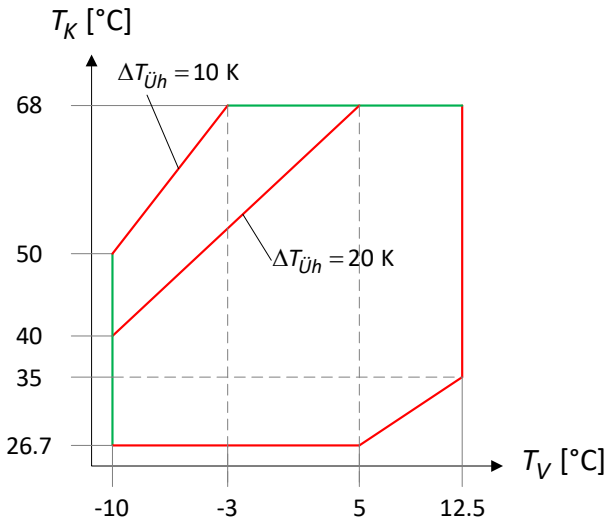

Abbildung 8: Durch Regelung abgesicherter Teil der Hüllkurve des Kompressors (grün) und nicht abgedeckter Teil (rot).

Einhalten der Betriebsbedingungen von Verdampfer und Kondensator: Das Umschalten zwischen den Betriebszuständen «Aktiv kühlen» und «Aktiv heizen» ist dahingehend problematisch, da im Verdampfer und Kondensator im Moment des Umschaltens die Temperatur des Kühlmittels sprunghaft ändert.

Das Problem könnte im Betrieb folgendermassen gelöst werden: Es wird nicht direkt zwischen den beiden Betriebszuständen umgeschaltet, sondern zuerst in den Betriebsfall «Direkte Abwärmenutzung» geschaltet. Die Temperaturen des Kühlmittels im Kabinenkreislauf sowie Komponenten- und Inverterkreislauf können sich dabei angleichen, bevor in den gewünschten Betriebsfall umgeschaltet wird. Das WP/KA-Modul wird dabei während des Umschaltprozesses ausgeschaltet und erst wenn die Temperaturen im Kühlmittelkreislauf im Betriebsbereich des WP/KA-Moduls sind, wird dieses wieder gestartet.

Trotzdem ist es möglich, dass diese Massnahme nicht ausreichend ist. Es besteht jedoch die Möglichkeit, beim Kondensator des WP/KA-Moduls einen Mischkreis zu installieren, womit die kühlmittelseitigen Temperaturen im Kondensator jeweils «schneller» auf den Zielwert aufgeheizt werden können.

Beim Verdampfer gilt es zu prüfen, ob das verbaute Expansionsventil mit einer MOP-Regelung (maximum operating pressure) ausgestattet ist. Wenn dies der Fall ist, sollte es möglich sein, auf einen Mischkreis zu verzichten. Falls nicht, soll der Einsatz eines Expansionsventils mit MOP-Regelung geprüft werden.

Anordnung der Komponenten: Hier gilt der Grundsatz, dass temperaturempfindliche Komponenten tendenziell zuerst durchströmt werden sollten, damit die Kühlung dieser Komponente jederzeit sichergestellt ist. Komponenten, die eine grosse Menge Abwärme erzeugen, sollten tendenziell in der Reihenfolge der in Serie geschalteten Komponenten zuhinterst eingebunden werden. Dieser Grundsatz wurde von Rigitrac bereits bei der Ausarbeitung des Konzepts berücksichtigt.

Hydraulik: Die Anordnung der einzelnen Kreise und die Möglichkeit, zwischen den einzelnen Betriebsfällen umzuschalten, könnte im Betrieb aufgrund der stark ändernden Anlagenkennlinien des hydraulischen Systems zu hydraulischen Problemen führen. Insbesondere der serielle Betrieb mit zwei Pumpen in Serie wird von der HSLU als möglicherweise kritisch angesehen. Ein hydraulisch definierter Zustand könnte durch das Implementieren einer «hydraulischen Weiche» erreicht werden, wie es beispielsweise in der Gebäudetechnik bei Heizungssystemen üblich ist (vgl. Abbildung 31 im Anhang).

Abdeckung der Extremfälle: Bischof [6] untersuchte im Rahmen einer Bachelor Thesis das Thermomanagement-System und ging insbesondere auf die Abdeckung der Extremfälle (beispielsweise hohe Aussentemperaturen bei hoher Arbeitsbelastung des Elektrotraktors usw.) ein. Es konnte gezeigt werden, dass das Thermomanagement-System die auftretenden Betriebsfälle abdecken kann.

Kabinen-Wärmeübertrager: Der für die Konditionierung der Kabinenluft verwendete Wärmeübertrager ist aufgrund des stark begrenzten Bauraums relativ klein dimensioniert. Die maximale Kühlleistung be-

trägt gemäss Herstellerdaten bei einer Vorlauftemperatur des Kühlmittels von 5°C und einer Aussenlufttemperatur von 35°C maximal 1.5 kW. Die maximale Heizleistung bei einer Vorlauftemperatur des Kühlmittels von 45°C beträgt ebenfalls gemäss Herstellerdaten 1.8 kW. Die Heizleistung des Kabinen-Wärmeübertragers kann über eine Erhöhung der Vorlauftemperatur des Kühlmittels problemlos erhöht werden. Die Kühlleistung ist dadurch begrenzt, da das WP/KA-Modul eine minimale Verdampfungstemperatur von -10°C aufweist, daher könnte die Vorlauftemperatur des Kühlmittels nur bis auf ca. -5°C gesenkt werden.

Bischof berechnet die im stationären Fall benötigte Heiz- und Kühlleistung der Kabine zu max. 1.22 kW im Kühlbetrieb (bei 35°C Aussentemperatur) bzw. 2.56 kW im Heizbetrieb (bei -15°C Aussentemperatur) [6]. Im instationären Fall ist die benötigte Heiz- und Kühlleistung jeweils deutlich höher, daher wird insbesondere die maximale Kühlleistung des Kabinen-Wärmeübertragers von der HSLU als kritisch betrachtet.

4.2 Messungen auf dem Laborprüfstand

COP und Gütegrad: Zur Effizienzbewertung des Moduls wurden die Kenngrössen Coefficient of Performance (COP) und innerer Gütegrad ausgewertet.

Der COP einer Wärmepumpe bezeichnet das Verhältnis zwischen Nutzen (Wärmeleistung des Kondensators) und Aufwand (elektrische Leistung des Kompressors) und berechnet sich wie folgt:

$$\mathrm{COP} = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} = \frac{\dot{Q}_K}{P_{el}}$$

Da der COP einer Wärmepumpe stark vom inneren Temperaturhub abhängig ist, wird zur Effizienzbewertung der innere Gütegrad ausgewertet. Der innere Gütegrad beurteilt die Effizienz der Wärmepumpe im Vergleich zur idealen Wärmepumpe, welche zwischen der gleichen Verdampfungs- und Kondensationstemperatur betrieben wird.

$$\zeta_{WP} = \frac{\mathrm{COP}}{\frac{T_K}{T_K - T_V}}$$

Abbildung 9 zeigt den gemessenen Gütegrad unterschiedlicher Messpunkte in Abhängigkeit der Verdampferleistung.

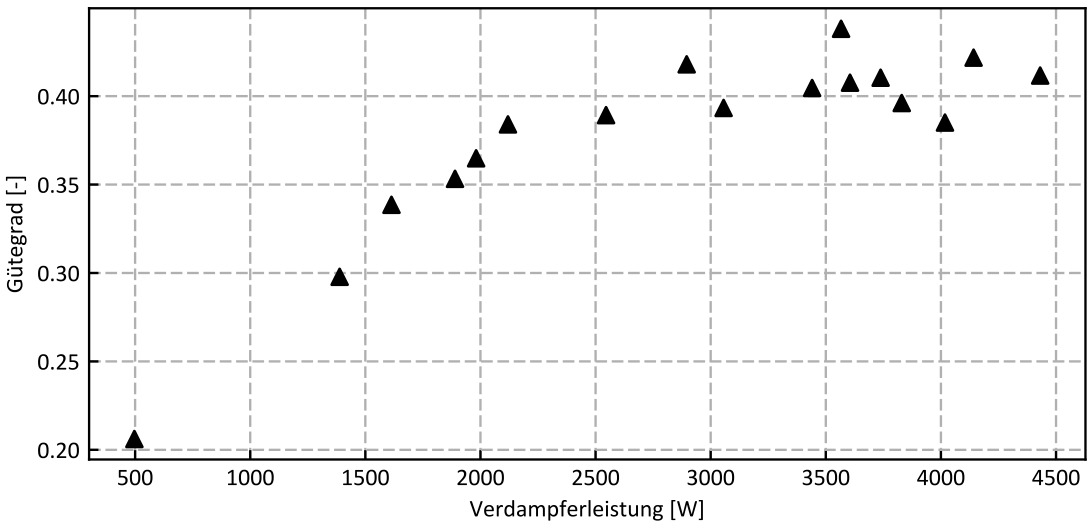

Abbildung 9: Gemessener innerer Gütegrad der Wärmepumpe in Abhängigkeit der Verdampferleistung.

Deutlich ersichtlich ist die Abnahme des Gütegrades bei einer Verdampferleistung unterhalb von ca. 2'300 W. Dies kann einerseits am Teillastverhalten des verwendeten Scroll-Kompressors liegen, andererseits kann auch der Wirkungsgrad des Inverters und Motors des Kompressors einen Einfluss haben. Da die tiefen Gütegrade hauptsächlich bei Betriebspunkten auftreten, bei denen eine tiefe bis gar keine Überhitzung des Sauggases gemessen wurde (vgl. Abbildung 10), kann anhand der Messdaten keine abschliessende Beurteilung zur Ursache dieser Beobachtung abgegeben werden.

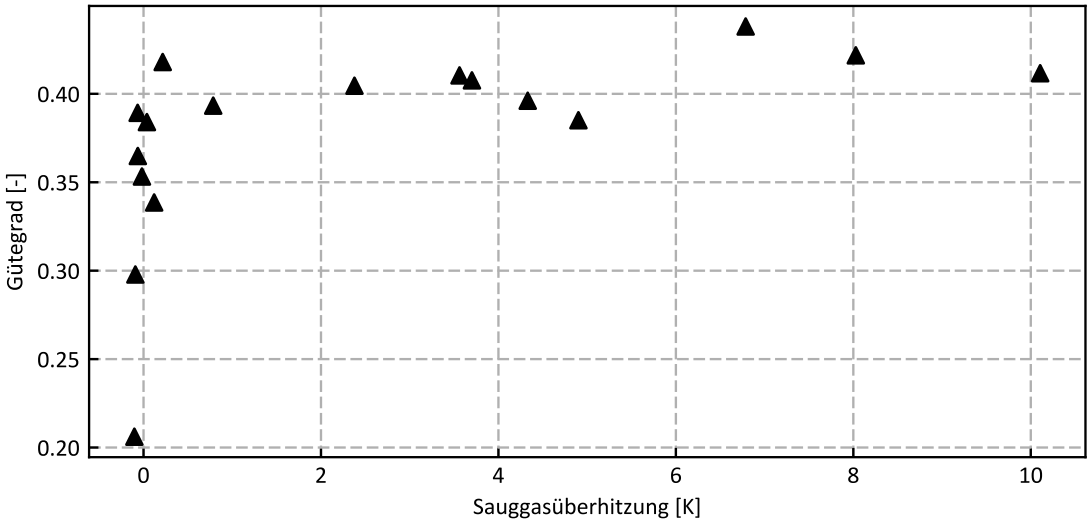

Abbildung 10: Gemessener Gütegrad in Abhängigkeit der gemessenen Sauggasüberhitzung bei einzelnen Messpunkten

Temperaturannäherungen Wärmeübertrager: Nachfolgend wird eine Beurteilung über die Auslegung der Wärmeübertrager des WP/KA-Moduls anhand der Temperaturannäherungen zwischen Kältemittel und Kühlmittel vorgenommen.

Kondensator des WP/KA-Moduls: Anhand der Temperaturannäherung zwischen Kondensationstemperatur und Heizwasser-Austrittstemperatur kann die Auslegung des Kondensators beurteilt werden.

Im Idealfall kann die Wasseraustrittstemperatur durch Ausnutzung der Enthitzungsenthalpie des Heissgases die Kondensationstemperatur erreichen oder sogar leicht darüber liegen. Abbildung 11 zeigt die Temperaturannäherung in Abhängigkeit der Kondensatorleistung für verschiedene Messpunkte.

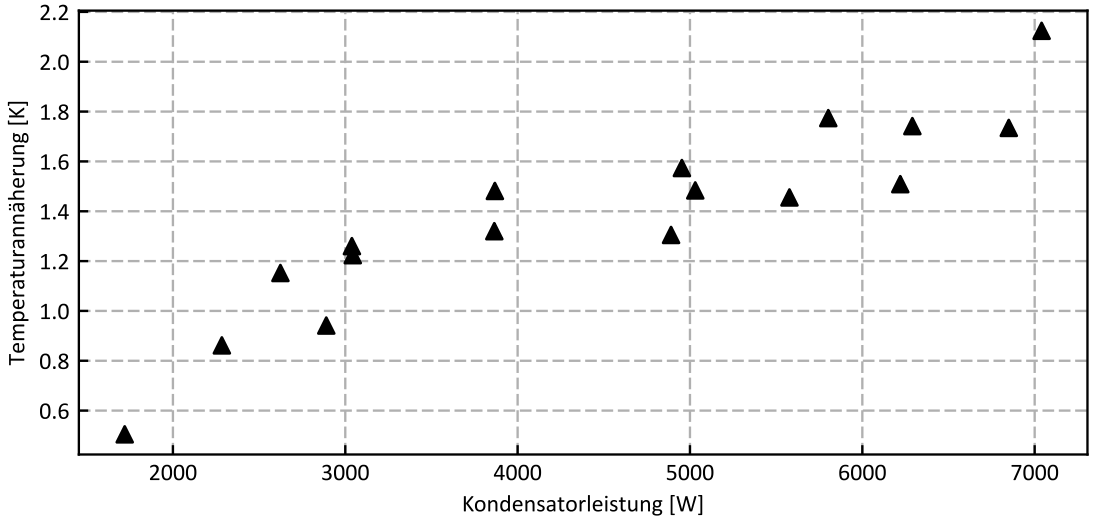

Abbildung 11: Temperaturannäherung zwischen der aus dem Druck berechneten Kondensationstemperatur und der Heizwasser-Austritttemperatur in Abhängigkeit der Kondensatorleistung.

Die Temperaturannäherung liegt im Bereich von 0.6 - 2.2 K. Die Auslegung des Kondensators ist somit zweckmässig und liegt im Bereich der empfohlenen Temperaturannäherungen [7].

Verdampfer des WP/KA-Moduls: Analog dazu kann die Auslegung des Verdampfers ebenfalls über die Temperaturannäherung zwischen Kältemittel und Kühlmittel beurteilt werden. Aufgrund der zunächst ungenügenden Überhitzungsregelung (vgl. nachfolgender Abschnitt) wurde diese Bewertung erst nachträglich durchgeführt.

Sauggasüberhitzung: Um den Kompressor vor Flüssigkeitsschlägen zu schützen, wird der Verdampfungsdruck über das Expansionsventil so geregelt, dass das Kältemittel am Austritt des Verdampfers jeweils um einige Kelvin überhitzt ist. Da das WP/KA-Modul über einen relativ grossen Leistungsbereich betrieben werden kann, stellt die korrekte Auslegung des thermostatischen Expansionsventils eine Herausforderung dar. Die Sauggasüberhitzung wurde daher bei den Messungen ebenfalls ausgewertet. Abbildung 12 zeigt die gemessene Sauggasüberhitzung für verschiedene Messpunkte.

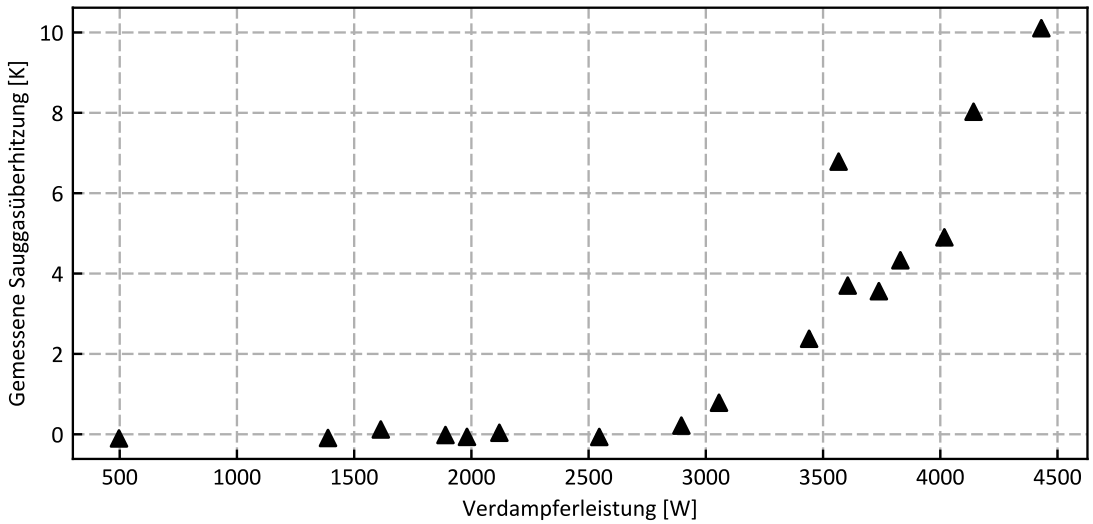

Abbildung 12: Sauggasüberhitzung in Abhängigkeit der Verdampferleistung.

Es ist zu erkennen, dass bis ca. 3'000 W Verdampferleistung die gemessene Überhitzung 0 K oder sogar negativ ist (aufgrund der Messunsicherheiten). Erst bei höheren Verdampferleistungen kann eine

signifikante Überhitzung gemessen werden. Dies führt dazu, dass der Kompressor bei kleinen bis mittleren Kälteleistungen nicht vor Flüssigkeitsschlägen geschützt ist. Im Betrieb könnte dies zu einer reduzierten Lebensdauer des Kompressors bis hin zum Totalausfall des Kompressors führen. Es wird empfohlen, mit dem Hersteller des WP/KA-Moduls bezüglich dieser Thematik in Kontakt zu treten (Meeting wurde durchgeführt). Zu prüfende Lösungsansätze sind die Verwendung eines elektronischen Expansionsventils oder einer zusätzlichen Blende mit Bypass, welche seriell nach dem thermostatischen Expansionsventil eingebaut wird (vgl. Abbildung 13).

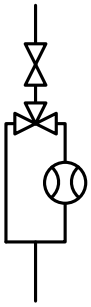

Abbildung 13: Grundidee Vorschlag für Anpassung des Expansionsventils.

Nach Feststellen der oben beschriebenen Problematik der Überhitzungsregelung wurde entschieden, weitere Messungen mit angepasster, sprich erhöhter Überhitzung durchzuführen. Dazu wurde das Expansionsventil nach Rücksprache mit dem Modulhersteller neueingestellt.

In Abbildung 14 wird nochmals die gemessene Sauggasüberhitzung in Abhängigkeit der Verdampferleistung nach neu eingestelltem Expansionsventil dargestellt. Der für Rigitrac interessanteste Betriebsbereich liegt zwischen 2'000 W - 3'000 W Kälteleistung, in welchem die Überhitzung nun zwischen etwas hohen, jedoch akzeptablen 5 - 12.5 K liegt. Eine noch höhere Überhitzung sollte vermieden werden, da damit die Heissgastemperatur in gewissen Betriebspunkten (bei einem hohen Druckverhältnis und einer hohen Kondensationstemperatur) gemäss Datenblatt limitierend werden könnte.

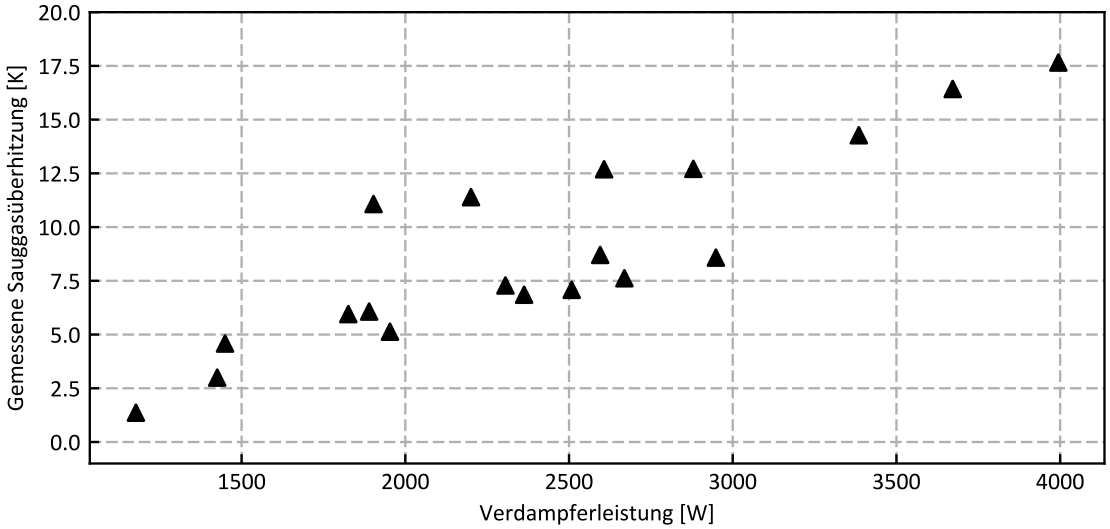

Abbildung 14: Sauggasüberhitzung in Abhängigkeit der Verdampferleistung nach Neueinstellung des Expansionsventils.

4.3 Messungen im Feld

4.3.1 Messungen unter Sommerbedingungen

Wie bereits erwähnt sollen die Feldmessungen die gewonnenen Erkenntnisse aus dem Konzeptreview und den Labormessungen bestätigen. Dazu werden neben den verschiedenen Wärmeleistungen einige typische Kennzahlen betrachtet.

Auswertungen Messung 1 (widerspiegelt Betriebspunkt K1 aus Tabelle 4): Die erste Feldmessung wurde beim Mähen und Einsaugen von kurzem Gras auf einer Wiese durchgeführt. Es herrschten dabei sonnige Bedingungen bei 30 - 33°C Lufttemperatur sowie einer Kabinentemperatur von rund 27°C. Die Messung wurde über 50 min. bei sehr konstanten Bedingungen durchgeführt.

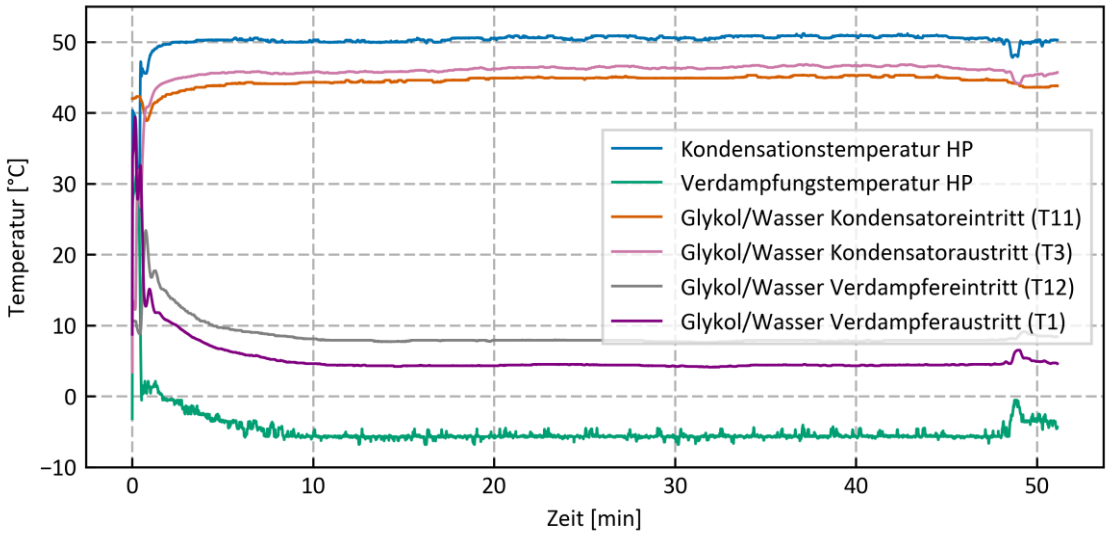

Abbildung 15: Temperaturen des WP/KA-Moduls bei der Feldmessung zum Betriebspunkt K1.

In Abbildung 15 sind die Temperaturverläufe des WP/KA-Moduls in einer Übersicht dargestellt. Die Kondensations- und die Verdampfungstemperaturen liegen bei rund 50°C bzw. bei -6°C. Die Sauggasüberhitzung beträgt im Mittel rund 7 K, der Kompressor wird (gemäss Hüllkurve) im sicheren Bereich betrieben. Sowohl im Kondensator als auch im Verdampfer ist die Temperannäherung im Wasserkreislauf mit 4 K bzw. 10 K im Vergleich zu den Labormessungen etwas hoch. Insgesamt kann der Betrieb des WP/KA-Moduls jedoch als sehr robust betrachtet werden.

Über den ebenfalls gemessenen Durchfluss sowie die oben gezeigten Temperaturen im Wasserkreislauf können die Wärmeleistungen von Kondensator und Verdampfer bestimmt werden (vgl. Abbildung 16). Da die elektrische Leistung des Kompressors beim betrachteten Betriebspunkt im Mittel bei 1'032 W liegt, dürften die gezeigten Kurven kaum realistisch sein. Die mittlere Wärmeleistung des Verdampfers läge bei 1'274 W, jene des Kondensators bei 1'145 W, die Differenz, welche zugleich durch den Kompressor erbracht wird (innere Kompressorleistung), wäre demnach deutlich geringer als dessen gemessene Leistung.

Das Problem wurde in der Messunsicherheit der verwendeten Temperatursensoren identifiziert, welche je nach Messbereich in der Grössenordnung von 0.7-0.8 K liegen kann. Bei der gemessenen kleinen Temperaturdifferenz (vgl. Abbildung 15) hat eine solche Messunsicherheit einen sehr grossen Einfluss. Die Leistung von Kondensator und Verdampfer muss daher über den Kältemittel- anstatt über den Wasserkreislauf bestimmt werden.

Dazu werden aus den durchgeführten Labormessungen bei möglichst ähnlichen Bedingungen gewisse Werte wie der Liefergrad des Kompressors, die Unterkühlung oder der Kältemittelmassenstrom verwendet. Damit können die jeweiligen Enthalpiedifferenzen und die Wärmeleistungen bestimmt werden. Die

Verdampferleistung beträgt im Mittel 1'573 W, jene des Kondensators 2'351 W. Die innere Kompressorleistung liegt bei 778 W.

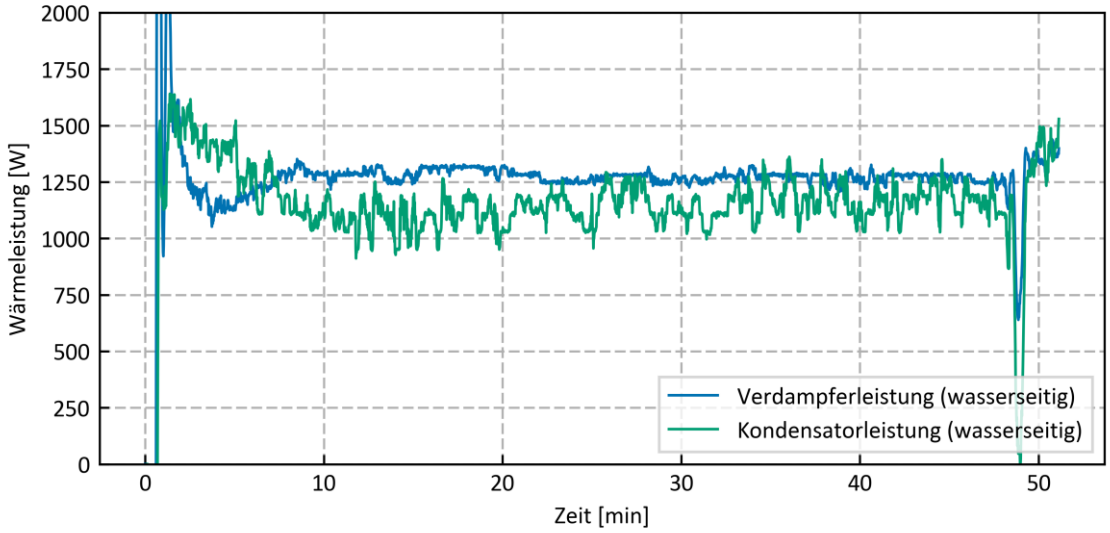

Abbildung 16: Wasserseitig bestimmte Wärmeleistungen des WP/KA-Moduls bei der Feldmessung zum Betriebspunkt K1.

Weiter werden einige Kennzahlen aus den Feldmessungen mit jenen aus den Labormessungen (bei möglichst ähnlichen Bedingungen) verglichen (vgl. Tabelle 9). Bei der Feldmessung lag die verdampferseitige Kühlwassereintrittstemperatur im Mittel bei 7.8°C, die kondensatorseitige bei 45°C. Die Drehzahl des Kompressors betrug 3'300 U/min. Bei der Labormessung lagen die Temperaturen bei 10°C, respektive 50°C und die Drehzahl des Kompressors bei 4'000 U/min.

Kennzahl	Labormessung	Feldmessung
Leistungszahl	5.80	5.75
COP	2.45	2.28
EER	1.65	1.52
Innerer Gütegrad	0.42	0.40

Tabelle 9: Vergleich Kennzahlen Labor- und Feldmessungen im Betriebspunkt K1.

Für die kältemittelseitige der Kennzahlen ist eine gute Übereinstimmung der Werte vorhanden.

Auswertungen Messung 2 (widerspiegelt Betriebspunkt H1 aus Tabelle 4): Die zweite Feldmessung wurde ebenfalls beim Mähen und Einsaugen von Gras auf einer eher feuchten Wiese durchgeführt. Es herrschten leicht bewölkte Bedingungen bei 22-24°C Lufttemperatur sowie einer Kabinentemperatur von 22°C. Die Messung wurde über ca. 3 h bei einigermassen konstanten Bedingungen durchgeführt.

In Abbildung 17 sind die Temperaturverläufe des WP/KA-Moduls dargestellt. Die Kondensations- und die Verdampfungstemperaturen liegen bei rund 47.5°C bzw. bei -5°C bis -10°C. Die Sauggasüberhitzung beträgt im Mittel rund 9 K, der Kompressor wird im sicheren Bereich (innerhalb der Hüllkurve) betrieben. Sowohl im Kondensator als auch im Verdampfer ist die Temperannäherung im Wasserkreislauf mit 5 K bzw. 10 K im Vergleich zu den Labormessungen relativ hoch.

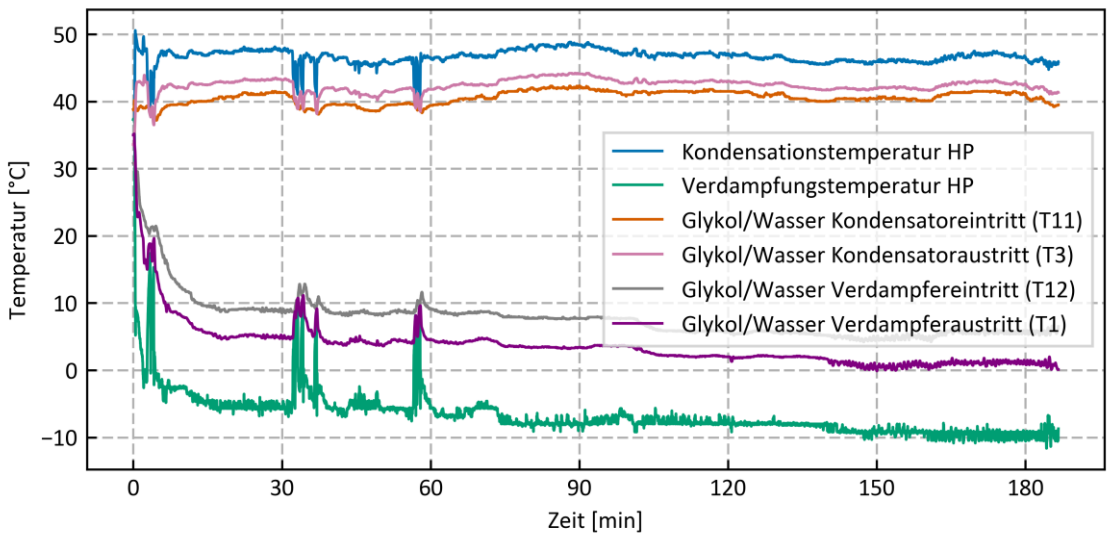

Abbildung 17: Temperaturen des WP/KA-Moduls bei der Feldmessung zum Betriebspunkt H1

Erwartungsgemäss mussten auch bei dieser Messung die Wärmeleistungen über den Kältemittelkreislauf bestimmt werden (Messunsicherheit der Temperatursensoren im Wasserkreislauf zu gross für eine exakte Auswertung). Mit diesen konnten anschliessend wiederum die resultierenden Kennzahlen der Feldmessung mit jenen einer Labormessung unter ähnlichen Bedingungen verglichen werden.

Bei der Feldmessung lag die verdampferseitige Kühlwassereintrittstemperatur im Mittel bei 7.3°C, die kondensatorseitige bei 40.6°C, die Drehzahl des Kompressors betrug 3'100 U/min. Im Vergleich dazu lagen bei der Labormessung die Temperaturen bei 10°C bzw. 40°C und die Drehzahl des Kompressors bei 4'000 U/min.

Kennzahlen	Labormessungen	Feldmessungen
Leistungszahl	6.58	5.8
COP	2.96	2.55
EER	2.19	1.68
Gütegrad	0.45	0.44

Tabelle 10: Vergleich Kennzahlen aus Labor- und Feldmessungen zu Betriebspunkt H1

In der Feldmessung wurden nicht die gleich hohen Kennzahlen erreicht, trotzdem sind die erzielten Werte vergleichbar und damit zufriedenstellend.

Auswertung Wechsel Betriebsfall von «Aktiv heizen» auf «Aktiv kühlen»: Bei der zweiten Feldmessung wurde der Wechsel des Betriebsfalles von «Aktiv heizen» zu «Aktiv kühlen» betrachtet. In Abbildung 18 sind die Temperaturen des Wasserkreislaufs sowie des Kondensators und Verdampfers dargestellt. Der Wechsel des Betriebsfalles erfolgt nach ungefähr 8 min.

Die Kondensationstemperatur steigt vor dem Wechsel auf ein Maximum von rund 68°C (vgl. blaue Kurve in Abbildung 18 zwischen Minute 5 und 8). Nach dem Wechsel des Betriebsfalles verhalten sich die Temperaturen innerhalb weniger als 10 min wieder nahezu stationär.

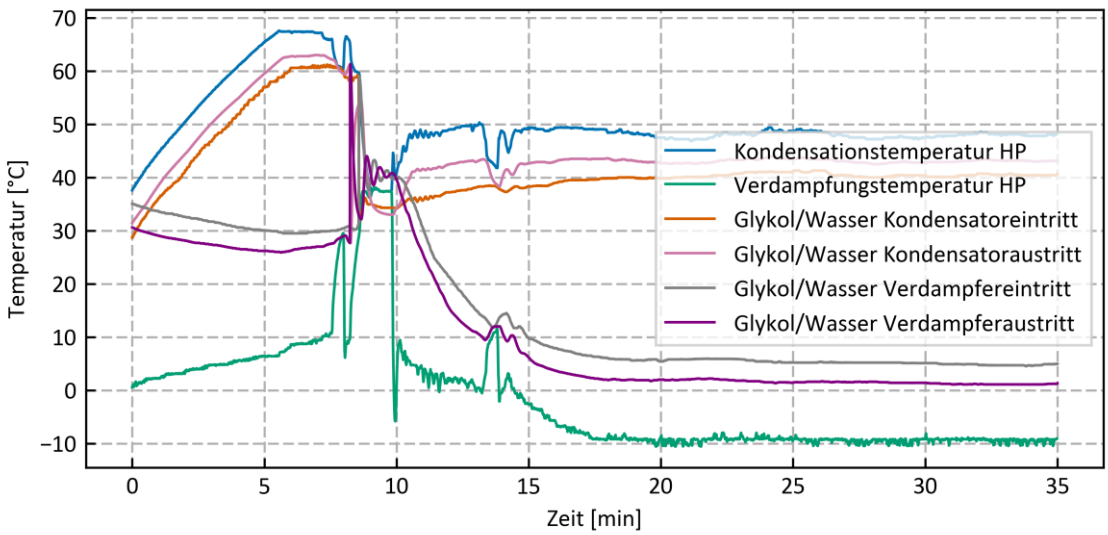

Abbildung 18: Temperaturen WP/KA-Modul beim Wechsel vom Betriebsfall «Aktiv heizen» zu «Aktiv kühlen».

Die maximale Kondensationstemperatur von 68°C wird durch die Begrenzung des Kondensationsdruckes auf 20 bar(a) erreicht (vgl. Abbildung 19, grüne Kurve). Um höhere Drücke zu vermeiden, muss die Drehzahl des Kompressors reduziert werden (vgl. Abbildung 20). Nachdem der Wechsel des Betriebsfalls vollzogen ist, stellt sich im Mittel ein Kondensations- und Verdampfungsdruck von 12.5 bar(a) bzw. 2.4 bar(a) ein.

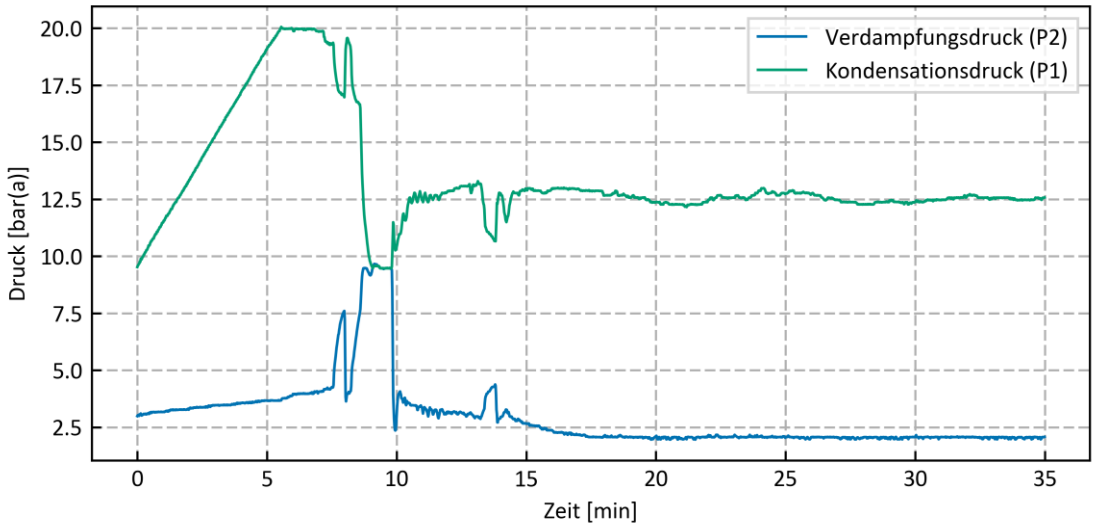

Abbildung 19: Druckverläufe des WP/KA-Moduls beim Wechsel vom Betriebsfall «Aktiv heizen» zu «Aktiv kühlen».

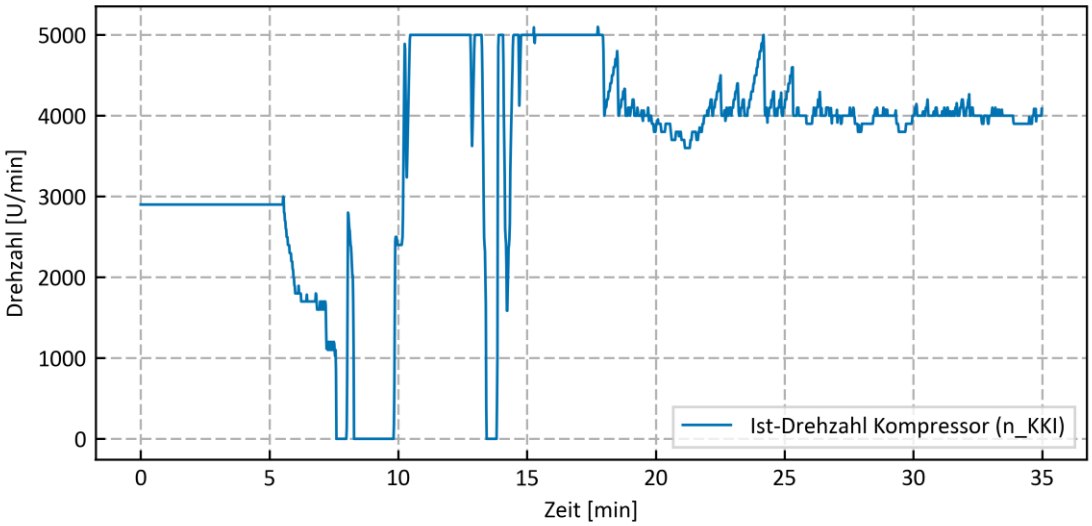

Abbildung 20: Drehzahl des Kompressors beim Wechsel vom Betriebsfall «Aktiv heizen» zu «Aktiv kühlen».

Fazit zu den Messungen unter Sommerbedingungen: Die Notwendigkeit der zuvor durchgeführten Labormessungen hat sich bestätigt. Die Randbedingungen für die Messungen sind einfacher und genauer zu erfassen und gewisse Einflüsse müssen nicht berücksichtigt werden (bspw. Unregelmässige Belastungen, ändernde Umgebungstemperaturen, Sonneneinstrahlung usw.). Weiter weisen die wasserseitigen Temperaturmessungen in den Feldmessungen grosse Messunsicherheiten auf, welche die Berechnung der massgebenden Kennzahlen verunmöglichen. Bestimmt man die Wärmeleistungen und Kennzahlen über den Kältemittelkreislauf, ist die Vergleichbarkeit von Feld- und Labormessungen gegeben.

4.3.2 Messungen unter Winterbedingungen

Aufgrund des sehr milden Winters 2022/23 konnten die Feldmessungen nicht unter den angedachten Betriebsbedingungen (gemäss Betriebspunkten in Tabelle 4) durchgeführt werden. Stattdessen wurde das Aufwärmen der Fahrzeugkabine bei winterlichen Bedingungen einmal über das PTC-Heizelement sowie einmal über das WP/KA-Modul gemessen und gegenübergestellt.

Randbedingungen beim Aufwärmen der Kabine mit PTC-Heizelement: Der Elektrotraktor stand in der vorangehenden Nacht draussen, um vollständig auszukühlen. Während der Messung am nächsten Morgen herrschte im Mittel eine Umgebungstemperatur von 1.7°C. Die Sicherungen der Wasserpumpen wurden entfernt, sprich es gab keinen Durchfluss und die Temperaturdaten sind für diese Messung nicht zu verwenden. Um den Einfluss von Sonneneinstrahlung zu eliminieren, wurde der Elektrotraktor im Schatten platziert.

Randbedingungen beim Aufwärmen der Kabine über das WP/KA-Modul: Wiederum stand das Fahrzeug in der vorangehenden Nacht draussen. Für die Messung wurde jedoch nicht darauf geachtet, dass das Fahrzeug komplett im Schatten stand. Es wurde nicht notiert, aus welchem Winkel das Fahrzeug exakt bestrahlt wurde (die Heckscheibe dürfte allerdings in Richtung Sonne geragt haben). Um genügend Abwärme für das WP/KA-Modul zu erzeugen, wurde der Traktor am Zapfwellenprüfstand mit einer mittleren Leistung von 10 kW belastet. Zusätzlich zur Fahrzeugkabine wurde auch die Batterie über das Modul erwärmt.

Problematik der Messunsicherheit (Temperatursensoren): Nachfolgend sind die für den Aufwärmvorgang relevanten Temperaturen, der Wassermassenstrom im Kabinenkreis sowie die erzielte Wärmeleistung der beiden Messungen abgebildet (vgl. Abbildung 21 und Abbildung 22). Wie bereits erwähnt sind die Wassertemperaturen bei der PTC-Messung für die Auswertung nicht verwendbar und daher nicht dargestellt.

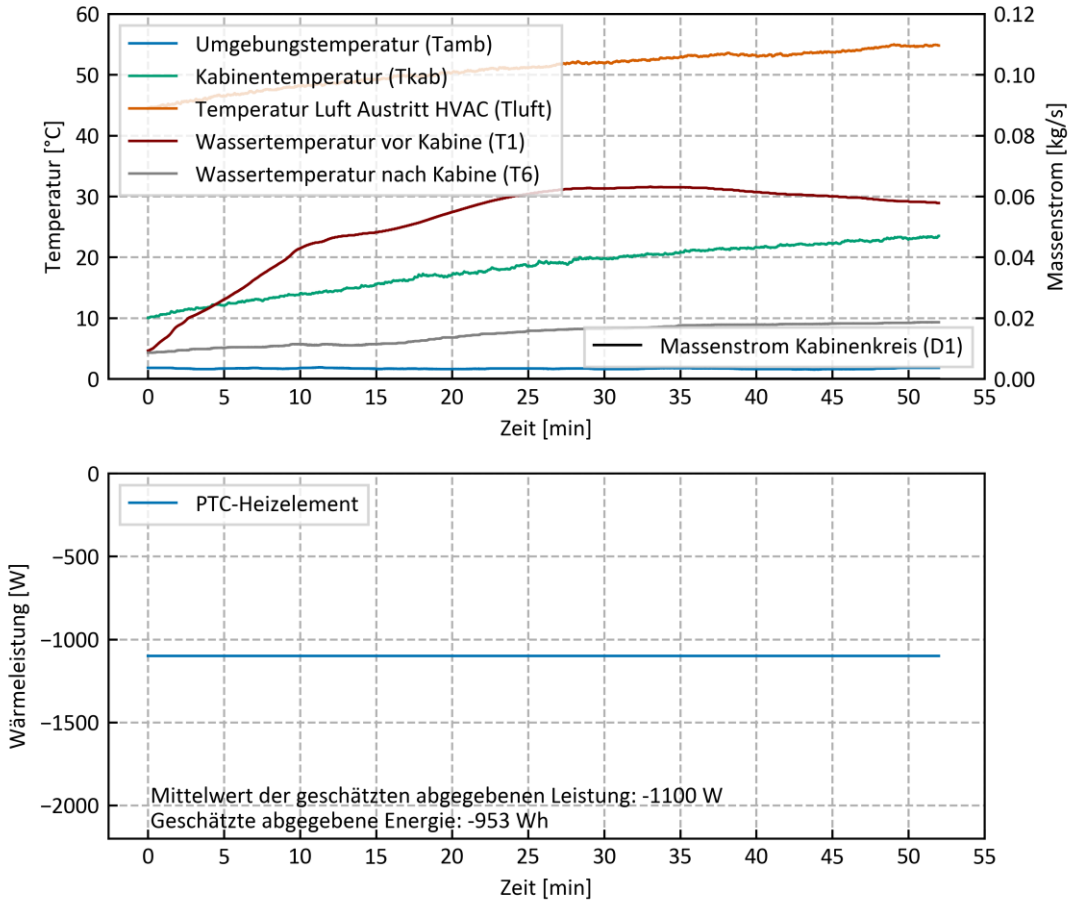

Abbildung 21: Temperaturen sowie abgegebene Wärmeleistung beim Aufwärmen mit dem PTC-Heizelement.

Der konstante Wert von 1'100 W Wärmeleistung bei der PTC-Messung ist kein Messresultat, sondern eine Angabe des Herstellers. Es fällt auf, dass das Aufwärmen der Kabine mit dem PTC-Heizelement rund 52 min, mit dem WP/KA-Modul rund 27 min dauert. Da sich die Dauer so stark unterscheidet, kann nicht davon ausgegangen werden, dass dieselbe Wärmeabgabe an die Umgebung stattfindet. Dennoch würde man erwarten, dass die an die Kabine abgegebene Energie bei den beiden Aufwärmvorgängen näher zusammen liegen würde (PTC 953 Wh, WP/KA-Modul 414 Wh).

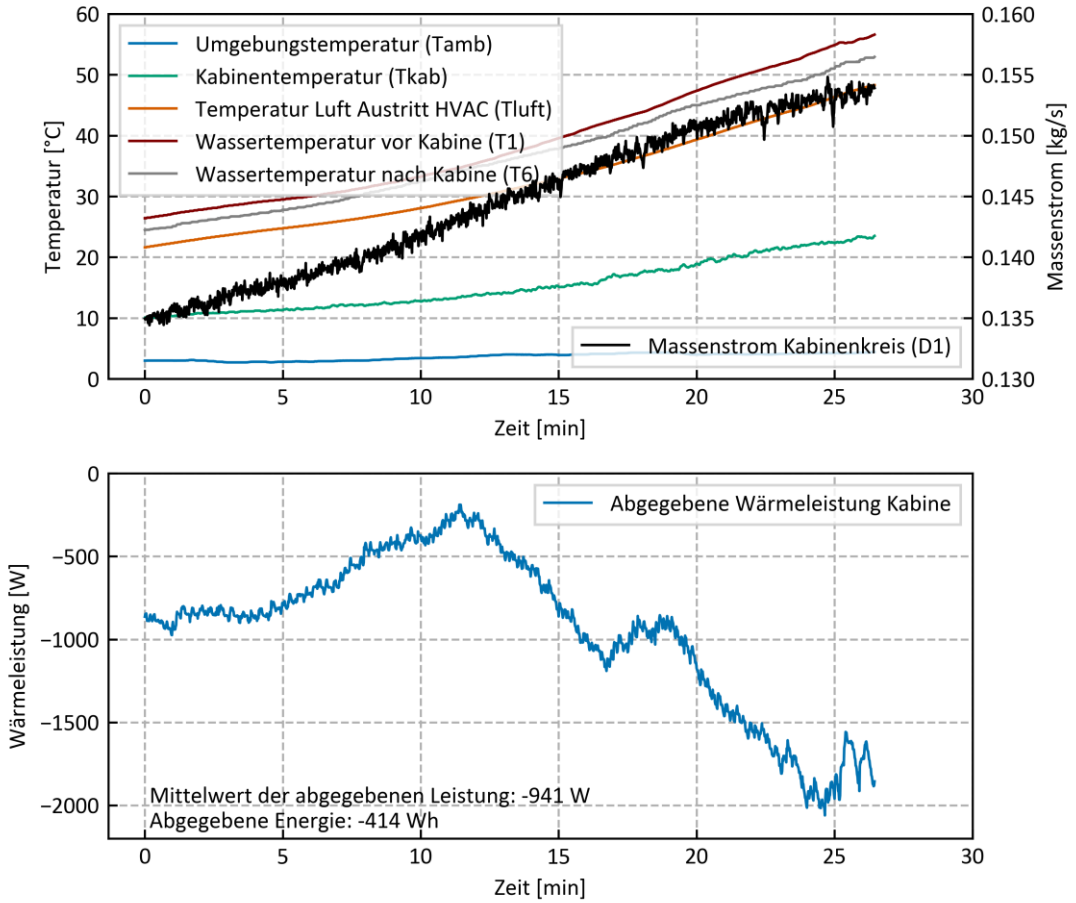

Abbildung 22: Temperaturen sowie abgegebene Wärmeleistung beim Aufwärmen mit dem WP/KA-Modul.

Das Problem liegt, wie bereits in Abschnitt 4.3.1 aufgezeigt, an der relativ grossen Messunsicherheit der in den Feldmessungen verwendeten Temperatursensoren. Eine exakte Bestimmung der geringen Temperaturdifferenzen und damit der Wärmeleistungen im Wasserkreislauf ist schwierig. So ist es beispielsweise möglich, dass die resultierende Wärmeleistung beim Aufwärmvorgang mit dem WP/KA-Modul über 10 min stark zurückgeht und danach wieder ansteigt (vgl. Abbildung 22). Erwarten würde man jedoch eine konstante bzw. über die Messdauer sogar leicht ansteigende Wärmeleistung. In Abbildung 23 sind zur Übersicht die aus den Wassertemperaturen resultierenden Wärmeleistungen von Kondensator und Verdampfer des WP/KA-Moduls abgebildet.

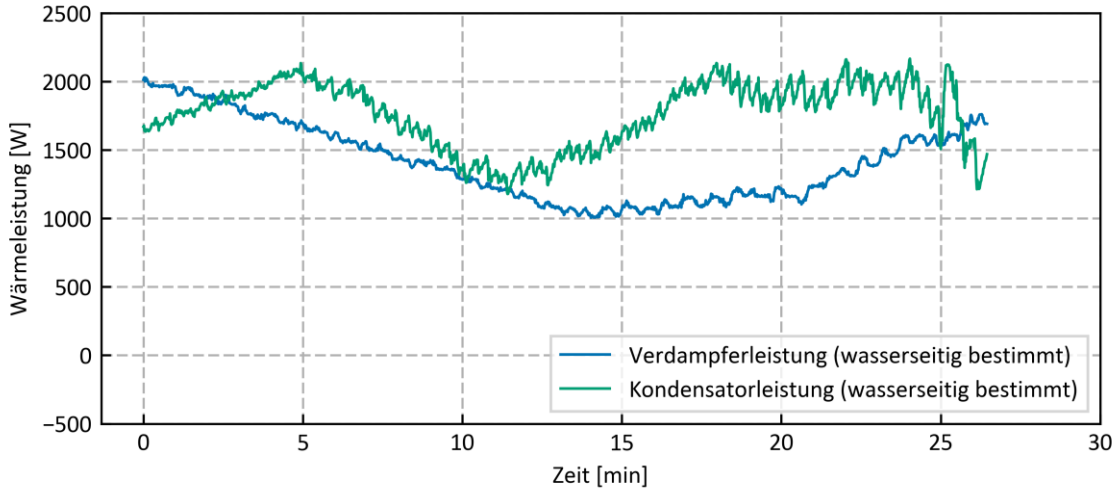

Abbildung 23: Verdampfer- und Kondensatorleistung des WP/KA-Moduls über den Wasserkreislauf ausgewertet.

Damit die beiden Aufwärmvorgänge (PTC-Heizelement versus WP/KA-Modul) trotzdem verglichen werden können, wird ein anders Vorgehen gewählt. Das System «Kabine» wird dabei über folgende Grundgleichung betrachtet:

$$\frac{\mathrm{d}E_{Kab}}{\mathrm{d}t} = CP_{Kab} \cdot \frac{\mathrm{d}T_{Kab}}{\mathrm{d}t} = \dot{Q}_{zu} - \dot{Q}_{ab}$$

Die Wärmekapazität der Kabine (Gehäuse, Fenster, Armaturen, Sitz, usw. und Kabinenluft) wird in einer totalen Wärmekapazität CP_{Kab} zusammengefasst.

Als zugeführte Wärmeleistung gilt die Leistung des PTC-Elements bzw. die Kondensatorleistung des WP/KA-Moduls. Solareinstrahlung wird zur Vereinfachung nicht berücksichtigt. Die abgeführte Leistung ist jene Wärmeleistung, welche durch Transmission über die Kabinenfenster, das Dach usw. an die Umgebung abgegeben wird.

Berechnung des Aufwärmvorgangs mit dem PTC-Heizelement: In einem ersten Schritt wird die Wärmekapazität CP_{Kab} als Konstante bestimmt. Dazu wird ein Messbereich betrachtet, in welchem die Kabinentemperatur möglichst linear verläuft und die Temperaturdifferenz zur Umgebung noch gering ist (Annahme: keine Abwärme). Der in Abbildung 24 dargestellte Messbereich zwischen 10°C und 12°C Kabinentemperatur eignet sich dazu.

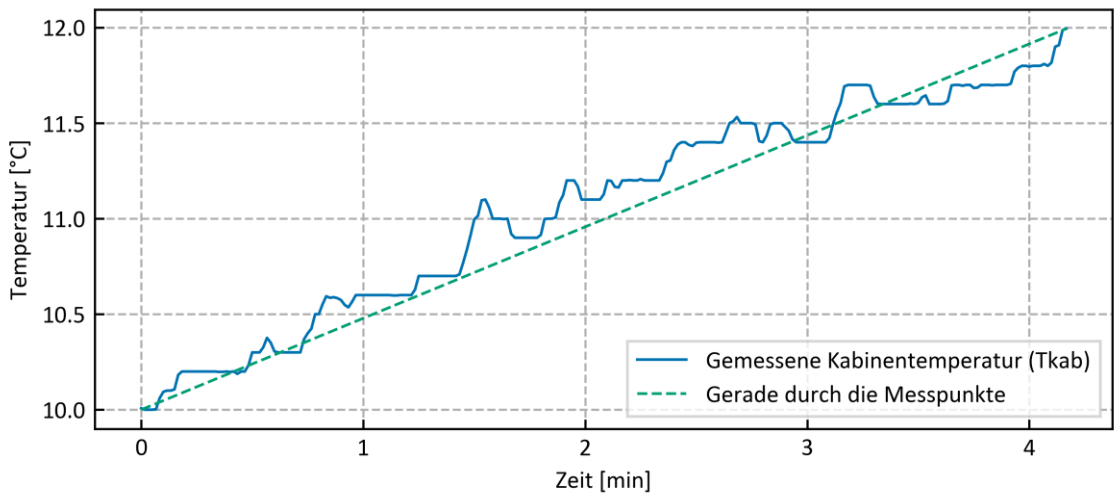

Abbildung 24: Temperaturverlauf im gewählten Ausschnitt des Messbereichs für die Bestimmung der Wärmekapazität CP.

Über die eingebrachte Wärmeleistung (bei der PTC-Messung entspricht die Wärmeleistung der elektrischen Leistung von 1'100 W) sowie die Temperaturdifferenz von 2 K kann die Wärmekapazität CP_{Kab} bestimmt werden. Obige Gleichung vereinfacht sich zu:

$$CP_{Kab} \cdot \frac{\mathrm{d}T_{Kab}}{\mathrm{d}t} = P_{el,PTC}$$

Die resultierende Wärmekapazität CP_{Kab} beträgt 38.3 Wh/K. Mit dieser kann nun der Abwärmeterm in berechnet werden. Dazu wird die Grundgleichung wieder erweitert zu:

$$CP_{Kab} \cdot \frac{\mathrm{d}T_{Kab}}{\mathrm{d}t} = P_{el,PTC} - k_V \cdot A_V \cdot \left(T_{Kab}(t) - T_{Umg}\right)$$

Die Konstante $k_V \cdot A_V$ beträgt 30.4 W/K. Mit den nun bekannten Konstanten CP_{Kab} und $k_V \cdot A_V$ können die beiden Aufwärmvorgänge mit dem PTC-Heizelement und mit dem WP/KA-Modul simuliert werden.

Abbildung 25 zeigt den Vergleich zwischen Messung und Simulation für den Aufwärmvorgang mit dem PTC-Heizelement. Der Aufwärmvorgang dauert gemäss Simulation rund 50 min, wobei 917 Wh der Kabine zugeführt werden. 400 Wh davon gehen durch Transmission an die Umgebung verloren. 517 Wh werden für die Erhöhung der inneren Energie des Systems Kabine benötigt. Für das Halten einer konstanten Kabinentemperatur bei 23.5°C und einer mittleren Umgebungstemperatur von 1.7°C muss eine Wärmeleistung von 663 W zugeführt werden.

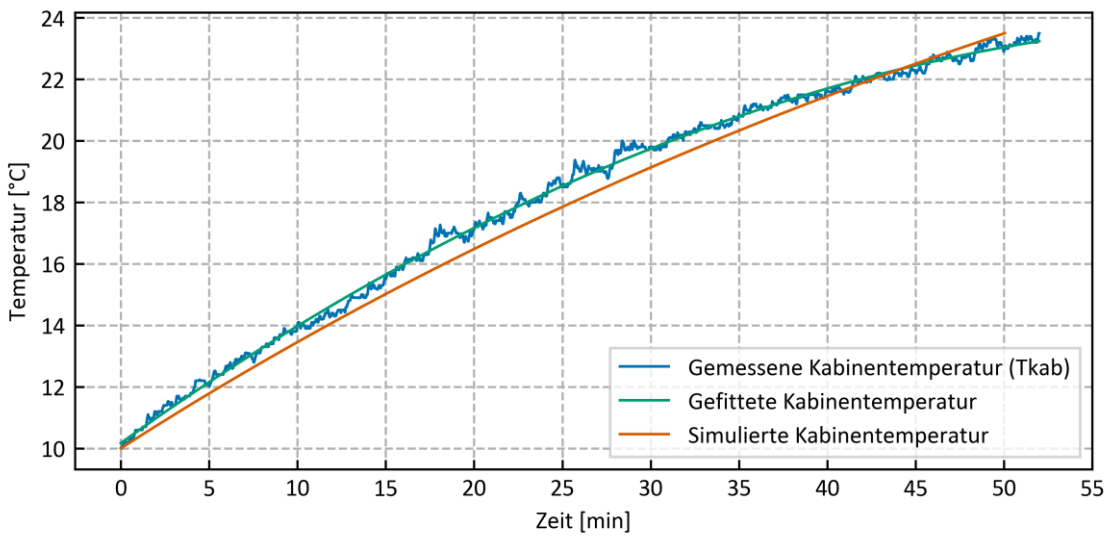

Abbildung 25: Aufwärmen der Kabine mit PTC-Heizelement, Simulation vs. Messung.

Simulation des Aufwärmvorgangs mit dem WP/KA-Modul: Die aus der Messung mit dem PTC-Heizelement bestimmten Konstanten CP_{Kab} und $k_V \cdot A_V$ können auch für die Simulation des Aufwärmvorganges mit dem WP/KA-Modul verwendet werden. In der zuvor Bilanzgleichung muss lediglich die elektrische Leistung durch die Kondensatorleistung ersetzt werden:

$$CP_{Kab} \cdot \frac{\mathrm{d}T_{Kab}}{\mathrm{d}t} = \dot{Q}_{Kond}(t) - k_V \cdot A_V \cdot \left(T_{Kab}(t) - T_{Umg}\right)$$

In dieser Gleichung steckt die Annahme, dass die komplette Kondensatorleistung für das Aufwärmen der Kabine verwendet werden kann (in Realität müsste allenfalls die Batterie zeitgleich ebenfalls erwärmt werden). Um die Kondensatorleistung in der Simulation abbilden zu können, wird ein entsprechender Fit in die Messdaten (vgl. Abbildung 26) gelegt.

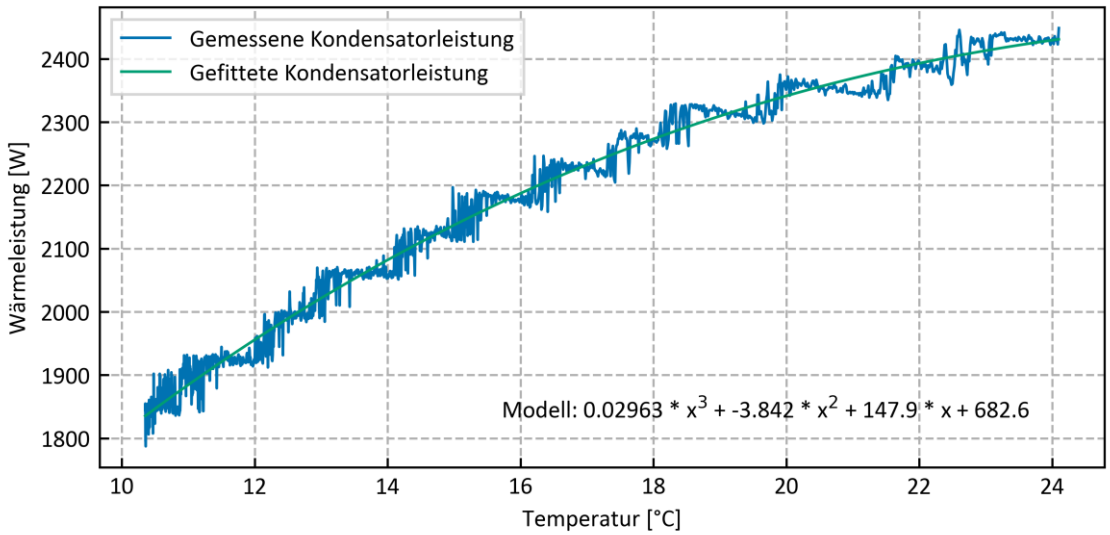

Abbildung 26: Kondensatorleistung vs. Kabinentemperatur beim Aufwärmen mit dem WP/KA-Modul.

Damit kann der Aufwärmvorgang der Kabine mittels WP/KA-Modul simuliert werden. In Abbildung 27 sind der gemessene und der simulierte Verlauf der Kabinentemperatur ersichtlich. In der Simulation werden die 23.5°C in der Kabine deutlich schneller erreicht als in der Messung, da die komplette Kondensatorleistung für das Aufheizen der Kabine zur Verfügung steht (kein Aufwärmen der Batterie).

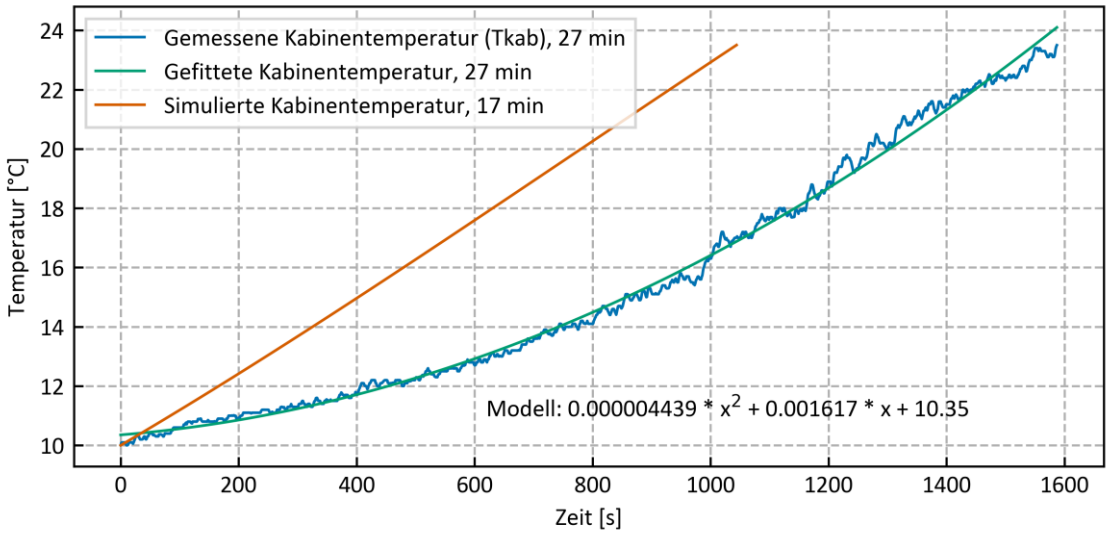

Abbildung 27: Aufwärmen der Kabine mit WP/KA-Modul, Simulation vs. Messung

Mit der vom Kondensator zur Verfügung gestellten Wärme kann die Fahrzeugkabine innerhalb von rund 17 min von 10°C auf 23.5°C erwärmt werden. Total werden 631 Wh an thermischer Energie benötigt, wovon 115 Wh durch Transmission verloren gehen. Über den COP umgerechnet (vgl. Abbildung 28) resultiert ein elektrischer Energiebedarf von 231 Wh (im Vergleich zum PTC-Heizelement, welches gemäss Simulation 917 Wh benötigt).

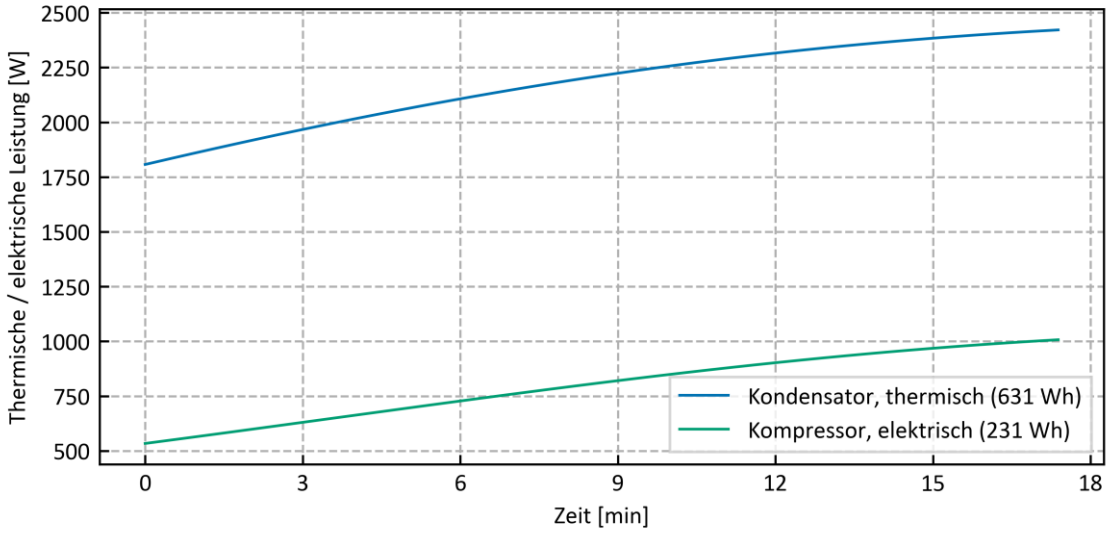

Abbildung 28: Kondensatorleistung und elektrische Kompressorleistung beim Aufwärmen mit dem WP/KA-Modul.

Fazit: Das Aufwärmen der Fahrzeugkabine mit dem WP/KA-Modul ist deutlich energieeffizienter und schneller als mit dem PTC-Heizelement. Es wird nur rund ein Viertel der elektrischen Energie und ein Drittel der Zeit benötigt. Neben dem erhöhten Komfort kann also eine Steigerung der Einsatzdauer erzielt werden. Diese wird im nachfolgenden Abschnitt näher betrachtet.

4.3.3 Steigerung der Einsatzdauer durch den Einsatz des WP/KA-Moduls

Betrachtetes Szenario: Die nutzbare Batteriekapazität des Elektrotraktors beträgt gemäss Rigitrac 46.4 kWh. Es wird eine konstant tiefe Aussentemperatur von 2°C sowie eine gewünschte Kabinentemperatur von 23.5°C angenommen. Es wird sowohl eine eher tiefe (5 kW) als auch eine mittlere Belastung (10 kW) des Traktors angenommen. Während des Einsatzes wird die Fahrzeugkabine viermal geöffnet, wodurch diese bis auf eine Temperatur von 10°C auskühlen soll.

Bei mittlerer Belastung des Traktors: Es soll die mögliche Einsatzdauer ohne das Aufwärmen der Kabine, mit der resultierenden Einsatzdauer unter Einsatz der beiden Heizvarianten verglichen werden.

- ohne Beheizung der Kabine
  - nur Hauptantrieb/Hydraulik — 46.4 kWh / 10 kW = **4.64 h**
- mit Beheizung über PTC-Element:
  - Kabine aufwärmen (4 x 50 min = 3.33 h) — bei 1.1 kW, ergibt 3.666 kWh
  - Kabinentemperatur konstant halten — 0.663 kW
  - Dauer bei konstanter Kabinentemperatur — (46.4 kWh - 37.0 kWh) / 10.663 kW = 0.88 h
  - Total Einsatzdauer (Aufwärmen/Halten) — 3.33 h + 0.88 h = **4.21 h (- 9.3%)**
- mit Beheizung über WP/KA-Modul:
  - Kabine aufwärmen (4 x 17 min = 1.13 h) — bei 0.815 kW, ergibt 0.924 kWh
  - Kabinentemperatur konstant halten — 0.663 kW / 2.88 = 0.230 kW
  - Dauer bei konstanter Kabinentemperatur — (46.4 kWh - 12.26 kWh) / 10.23 kW = 3.34 h
  - Total Einsatzdauer (Aufwärmen/Halten) — 1.13 h + 3.34 h = **4.47 h (- 3.7%)**

Unter der Annahme einer mittleren Belastung des Traktors reduziert sich die Einsatzdauer beim Beheizen der Fahrzeugkabine über das PTC-Heizelement um fast 10%. Wird hingegen das WP/KA-Modul verwendet, kann die Reduktion unter 4% gehalten werden. Das Modul erlaubt in anderen Worten eine um 6.2% längere Einsatzdauer als mit einer rein elektrischen Beheizung. Bei einer tieferen Belastung des Traktors ist die prozentuale Steigerung noch höher.

Bei tiefer Belastung des Traktors: Wiederum soll die mögliche Einsatzdauer des Traktors ohne das Aufwärmen der Kabine, mit der resultierenden Einsatzdauer unter Einsatz der beiden Heizvarianten verglichen werden.

- ohne Beheizung der Kabine
  - nur Hauptantrieb/Hydraulik — 46.4 kWh / 5 kW = **9.28 h**
- mit Beheizung über PTC-Element:
  - Kabine aufwärmen (4 x 50 min = 3.33 h) — bei 1.1 kW, ergibt 3.666 kWh
  - Kabinentemperatur konstant halten — 0.663 kW
  - Dauer bei konstanter Kabinentemperatur — (46.4 kWh - 20.33 kWh) / 5.663 kW = 4.60 h
  - Total Einsatzdauer (Aufwärmen/Halten) — 3.33 h + 4.60 h = **7.94 h (- 14.4%)**
- mit Beheizung über WP/KA-Modul:
  - Kabine aufwärmen (4 x 17 min = 1.13 h) — bei 0.815 kW, ergibt 0.924 kWh
  - Kabinentemperatur konstant halten — 0.663 kW / 2.88 = 0.230 kW
  - Dauer bei konstanter Kabinentemperatur — (46.4 kWh - 6.59 kWh) / 5.23 kW = 7.61 h
  - Total Einsatzdauer (Aufwärmen/Halten) — 1.13 h + 7.61 h = **8.75 h (- 5.7%)**

Unter der Annahme einer tiefen Belastung des Traktors reduziert sich die Einsatzdauer beim Beheizen der Fahrzeugkabine über das PTC-Heizelement um fast 15%. Wird hingegen das WP/KA-Modul verwendet, kann die Reduktion unter 6% gehalten werden. Das Modul erlaubt in anderen Worten eine um 10.2% längere Einsatzdauer als mit einer rein elektrischen Beheizung.

Fazit: Je nach Zielgrösse / Priorität von Rigitrac und deren Kunden kann bei Verwendung des WP/KA-Moduls also entweder die Batteriekapazität bei gleichbleibender Einsatzdauer reduziert oder die Einsatzdauer bei gleichbleibender Batteriekapazität verlängert werden.

Das aufgezeigte Vorgehen zur einfachen Simulation der verschiedenen Aufwärmvorgänge liefert eine gute Grundlage, um weitere Untersuchungen durchführen zu können und hilft bei der Auslegung zukünftiger Fahrzeuge.

4.4 Wirtschaftlichkeit

Um die Wirtschaftlichkeit des WP/KA-Moduls zu beurteilen, wird die Anlage mit einer verglichen, ohne die Möglichkeit der Abwärme-Rückgewinnung (Heizbetrieb) mittels Wärmepumpe. Dies kann erzielt werden, wenn im Schema auf Abbildung 3 die Umschaltventile V1-V4 weggelassen werden und der Kühlkreislauf wie dargestellt fest verschlaucht wird. Dadurch entfällt die Möglichkeit des hydraulischen Umschaltens zwischen Kühl- und Heizbetrieb.

Die Wirtschaftlichkeit der Abwärme-Rückgewinnung wird unter folgenden Kriterien beurteilt:

- Einsatzdauer im Heizbetrieb: 50%
- Batteriekapazität Brutto: 46.4kWh
- Batteriepreise: 200-500 CHF/kWh
- Kosten pro Ventil (V1-V4): 50 CHF
- Effizienzsteigerung durch Wärmerückgewinnung im Heizbetrieb: 6-10%

Um aus obengenannten Kriterien das Potential der Kosteneinsparungen abzuschätzen, wird nun das Minimum und Maximum berechnet:

Minimale Kosteneinsparung: 6% * 50% * 46.4 kWh * 200 CHF/kWh = 278.4 CHF
Maximale Kosteneinsparung: 10% * 50% * 46.4 kWh * 500 CHF/kWh = 1’160 CHF

Zudem wird der Mehraufwand berechnet, welcher für die Abwärme-Rückgewinnung aufgewendet werden muss. Dieser besteht aus materiellen Kosten der 4 Umschaltventile (V1-V4).

Mehrkosten: 4 * 50CHF = 200 CHF

Daraus ergibt sich ein Einsparpotential von 78.4 CHF bis 916 CHF pro Fahrzeug für den Fahrzeughersteller. Die Kosteneinsparung ist dabei stark vom Batteriepreis abhängig, weshalb bei obenstehender Annahme bewusst eine grosse Spannweite gewählt wurde.
Zusätzlich zum Einsparpotential des Herstellers ergibt sich auch ein Kostenvorteil für den Fahrzeugbetreiber.

- Betriebsstunden pro Jahr: 500 h/J
- Durchschnittliche Leistung: 5-10 kW
- Strompreis: 0.27 CHF/kWh

Einsparpotential Fahrzeugbetreiber:
Kosteneinsparung mittlere Belastung: 500 h/J * 10 kW * 6% * 50% * 0.27 CHF/kWh = 40.5 CHF/J
Kosteneinsparung tiefe Belastung: 500 h/J * 5 kW * 10% * 50% * 0.27 CHF/kWh = 67.5 CHF/J

5 Schlussfolgerungen und Fazit

Im Konzeptreview wurden mögliche Problemstellen des Thermomanagement-Systems aufgezeigt. Auf Basis der durchgeführten Untersuchungen kann jedoch davon ausgegangen werden, dass keine dieser Problemstellen die grundsätzliche Funktionsweise des Thermomanagement-Systems gefährdet. Nachfolgend sind die wichtigsten Erkenntnisse aus dem Konzeptreview zusammengefasst:

Der Kompressor des WP/KA-Moduls ist nicht in jedem Betriebspunkt vollständig regeltechnisch abgesichert. Dieses Problem kann mit einer Anpassung der Regelung und der Verwendung eines Expansionsventils mit MOP-Funktion behoben werden. Die hydraulische Verschaltung der Komponenten wird einer weiteren Überprüfung unterzogen, damit im Betrieb keine hydraulischen Probleme auftreten. Des weiteren sollte die Möglichkeit der Implementierung eines Mischkreises um den Kondensator geprüft werden, damit sichergestellt ist, dass die Wärmepumpe durchgehend betrieben werden kann. Die Anordnung und Reihenfolge der Komponenten im bestehenden Konzept ist sinnvoll und muss nicht weiter überprüft werden.

Im Rahmen des Projekts wurde zusätzlich eine Bachelor Thesis [6] an der Hochschule Luzern durchgeführt, in welcher insbesondere die kritischen Betriebsfälle betrachtet wurden. Für diese Betriebsfälle wurde umfassendes Regelkonzept erarbeitet.

Mit den Messreihen am WP/KA-Modul im Labor konnte gezeigt werden, dass eine Anpassung der Einstellung des Expansionsventils notwendig ist, damit der Kompressor in jedem Betriebsfall vor Flüssigkeitsschlägen geschützt ist. Da das Modul über einen relativ grossen Leistungsbereich betrieben werden muss, stellt die korrekte Auslegung und Einstellung des thermostatischen Expansionsventils eine Herausforderung dar. Nach Rücksprache mit dem Modulhersteller wurde das Ventil neu eingestellt. Die notwendige Sauggasüberhitzung ist nun auch bei kleineren Verdampferleistungen sichergestellt, womit der Kompressor vollständig vor Flüssigkeitsschlägen geschützt ist.

Die Messreihen im Feld bei Sommer- und Winterbedingungen bestätigten die Erkenntnisse aus den Labormessungen. Es konnte unter sämtlichen geprüften Bedingungen ein stabiler Betrieb des WP/KA-Moduls nachgewiesen werden. Eine Herausforderung bei den Auswertungen stellte neben den äusseren Einflüssen (ändernde Umgebungstemperatur, solare Einstrahlung usw.) die Messunsicherheit der Temperatursensoren im Wasserkreislauf dar, da nur kleine Temperaturdifferenzen zur Bestimmung der Wärmeleistungen vorliegen. Die Berechnung über den Kältemittelkreislauf zeigt jedoch, dass die Kennwerte aus den Feldmessungen gut mit den Labormessungen übereinstimmen.

Abschliessend wurde das Beheizen der Fahrzeugkabine bei winterlichen Bedingungen über das PTC-Heizelement und das WP/KA- Modul verglichen. Erwartungsgemäss schneidet das WP/KA-Modul deutlich besser ab, wodurch eine Steigerung des Einsatzdauer (oder eine Reduktion der Batteriekapazität bei gleichbleibender Einsatzdauer) realisiert werden kann.

Durch die Effizienzsteigerung des WP/KA-Moduls konnte auch der wirtschaftliche Aspekt beleuchtet werden. Hierbei hat sich herausgestellt, dass es sowohl für den Fahrzeughersteller als auch für den Betreiber des Fahrzeugs lohnenswert ist, das WP/KA-Modul zur Wärmerückgewinnung einzusetzen.

Das Projekt lieferte insgesamt wichtige Erkenntnisse für die Weiterentwicklung des Elektrotraktors SKE40 sowie für die Neuentwicklung weiterer Fahrzeuge bei Rigitrac. Das verbesserte Thermomanagement-System liefert einen wichtigen Beitrag an den robusten und effizienten Betrieb des Traktors und damit einem nachhaltigen und umweltfreundlichen Einsatz in der Praxis.

Die Entwicklung des Thermomanagements-System in Kombination mit dem WP/KA-Modul hat gezeigt, dass die Integration gesamtheitlich betrachtet werden muss. Der Einsatz einer Wärmepumpe zum Beheizen anstelle einer reinen elektrischen Heizung bringt zwar bereits eine Reduktion des elektrischen Energiebedarfs. Das nahezu ganze Potenzial kann aber erst ausgenutzt werden, wenn die Kühl- und Heizanforderungen integral betrachtet werden. Dies bedeutet, dass im Heizbetrieb die anfallende Abwärme aus den zu kühlenden Komponenten für die direkte Beheizung der Kabine oder anderen Komponenten genützt wird. Falls die anfallende Abwärme und/oder das Temperaturniveau für die direkte Abwärmenutzung nicht ausreichend ist, kann diese Abwärme als Wärmequelle für das WP/KA-Modul (indirekte Abwärmenutzung) zur Verfügung gestellt werden. Sinnvollerweise wird die Abwärme von Komponenten eingebunden, welche stetig im Betrieb anfallen (z.B. Inverter). Diese Erkenntnisse konnten in anderen Projekten ebenfalls abgeleitet werden (z.B. in [1]). Der integrale Ansatz hat gezeigt, dass

der Mehraufwand verhältnismässig zum Nutzen ist. Nebst zusätzlichen Komponenten ist insbesondere der Entwicklungsaufwand für die Steuerung zu beachten.

Da auf Grund der Nutzung des Fahrzeugs oftmals auch bei tiefen Aussentemperaturen Abwärme anfällt, kann auf eine Nutzung der Aussenluft als Wärmequelle des WP/KA-Moduls verzichtet werden. Somit entfällt die Gefahr der Vereisung von Wärmeübertragern. Falls im Betrieb zu wenig Abwärme anfallen sollte, können die Kabine und die Batterien mit einer elektrischen Heizung erwärmt werden. Zudem kann eine beheizbare Frontscheibe eingebaut werden, um das Beschlagen zu verhindern. Sobald genügend Abwärme mit dem entsprechenden Temperaturniveau anfällt, kann in den effizienteren Wärmepumpenbetrieb oder direkten Abwärmenutzung umgeschaltet werden.

Dieser integrale Ansatz des Thermomanagement-Systems weist für diverse Fahrzeuge ein grosses Potenzial auf. Wie Erfahrungen aus anderen Projekten (z.B. in [1]) gezeigt haben, können solche Systeme nicht nur für «Spezialfahrzeuge» (z.B. Traktoren, Lastwagen oder Baumaschinen), sondern auch für Automobile eingesetzt werden. Bei der Entwicklung solcher Fahrzeuge ist es wichtig, die Integration des Thermomanagement-Systems bereits zu Beginn des Projektes einzubeziehen. So können den speziellen Bedürfnissen (z.B. Platzbedarf, Verrohrung, Steuerung) entsprochen werden.

Limitierender Faktor für die Umsetzung solcher Konzepte sind die gegebenen Platzverhältnisse, da der Komfort und möglichst grosse Fahrgasträume bzw. Kabinen sichergestellt werden müssen. Zudem ist zurzeit die Auswahl von robusten Hochvolt-Komponenten (u.a. Kältemittelverdichter) auf dem freien Markt eingeschränkt.

6 Ausblick und zukünftige Umsetzung

Die Integration eines kombinierten Wärmepumpen/Kälteanlagen-Systems in den Elektrotraktor Rigitrac SKE40 ist eine geeignete Lösung, um den Energieverbrauch zu reduzieren und damit die Einsatzdauer zu verlängern. Basierend auf den Untersuchungen in diesem Projekt kann dieses nun in die Serienproduktion des Traktors implementiert werden.

Das Thermomanagement-System ermöglicht die effiziente Nutzung der vorhandenen Energiequellen, indem es die Abwärme verschiedener Komponenten auskoppelt und zum Heizen der Fahrerkabine sowie der Hochvoltbatterie verwendet. Durch diese effiziente Technologie wird der Energieverbrauch des SKE40 deutlich reduziert, was zur Verringerung der CO2-Emissionen beiträgt und gleichzeitig die Einsatzdauer des Traktors erheblich verlängert.

Die Messungen im Labor sowie im Feldbetrieb des SKE40 ermöglichte, die Leistungsfähigkeit und Effizienz unter realen Einsatzbedingungen zu untersuchen und optimieren. Die wissenschaftliche Herangehensweise gewährleistet eine präzise Analyse der Effizienz, der Betriebsdauer und der Leistungsfähigkeit der Wärmepumpensystems im Hinblick auf die spezifischen Anforderungen der Landwirtschaft und von Kommunalbetrieben.

Die gewonnenen Erkenntnisse aus dem Betrieb des SKE40 mit der integrierten Wärmepumpentechnologie dienen nicht nur der Optimierung des aktuellen Traktormodells, sondern werden auch als Grundlage für zukünftige Entwicklungen von elektrischen Traktoren verwendet. Die Daten ermöglichen eine gezielte Verbesserung des gesamtem Thermomanagements, um die Betriebsdauer und die Leistungsfähigkeit zukünftiger Elektrotraktoren für vielfältige Anwendungen zu erhöhen.

Die erfolgreiche Integration des kombinierten Wärmepumpen/Kälteanlagen-Systems macht den Traktor SKE40 und zukünftige Traktoren zu einer umweltfreundlichen und nachhaltigen Lösung für landwirtschaftliche und kommunale Anwendungen. Die Wärmepumpentechnologie wird einen massgeblichen Beitrag zu umweltfreundlichen Fahrzeugen im Allgemeinen und zu effizienten elektrisch angetriebenen Traktoren im Speziellen leisten.

Bis zum Ende dieses Projekts wurden bereits 10 Fahrzeuge des Typs SKE40 mit dem untersuchten WP/KA-Moduls produziert und teilweise an Kunden ausgeliefert. Weitere Fahrzeuge sind bereits für die Produktion eingeplant.

Aus den Resultaten der verschiedenen Untersuchungen können folgende Optimierungsmassnahmen abgeleitet werden, welche hinsichtlich der Weiterentwicklung geprüft werden:

- Wärmenutzung aus Umgebungsluft zur Kabinenklimatisierung (Mögliche Vereisungsprobleme). Für Situationen mit geringer Systemleistung und entsprechend wenig Abwärme.
- Effizienzoptimierung durch zusätzliche Isolierung der Kältemittelleitungen, Kühlmittelleitungen oder Kabine.
- Elektronisches Expansionsventil zur Reduktion der Überhitzung
- Einsatz eines zukunftsfähigen Kältemittels
- Steuerungsoptimierung (z.B. Berücksichtigung der solaren Einstrahlung etc.)
- Eindämmung der Sonneneinstrahlung in Kabine (Reduktion der nötigen Kühlleistung)
- Effizientes Entfeuchten der Kabinenluft (Ohne Verwendung von PTC Heizelement)
- Effizienzsteigerung HVAC (Luftströmungsoptimierung bzw. Wärmeübertrager Optimierung) evtl. Zusätzliche Wärmeübertrager in Kabine
- Einbeziehen von Partikel-Schutzklassen in Gesamtsystem (Filter und Druckkabine)

7 Nationale und internationale Zusammenarbeit

Die Firma Rigitrac hat einen bedeutenden Schritt in Richtung einer verstärkten nationalen und internationalen Zusammenarbeit unternommen, um der wachsenden Nachfrage nach dem Elektrotraktor gerecht zu werden. Rigitrac ist mit den Unternehmen Goldoni-Keestrack eine Kooperation eingegangen, die es ermöglicht, den Elektrotraktor in Italien zu fertigen. Diese strategische Zusammenarbeit eröffnet neue Perspektiven für die Produktion und Vertrieb des Rigitrac SKE40 auf internationaler Ebene. Im Rahmen dieser Zusammenarbeit wird der Elektrotraktor unter den Bezeichnungen Rigitrac SKE40 und Keestrack B1e vertrieben.

Durch die Nutzung der Produktionskapazitäten und der Expertise von Goldoni-Keestrack kann die Fertigung des Elektrotraktors optimiert werden. Die Synergien, die durch diese Partnerschaft geschaffen werden, tragen einerseits dazu bei, die Produktionskapazitäten zu steigern und andererseits die Herstellungskosten zu senken. Mit den bestehenden Händlernetzwerken beider Partner ist europaweit eine optimale Abdeckung vorhanden. Dies ermöglicht es den beiden Unternehmen, dem wachsenden Interesse an elektrischen Traktoren gerecht zu werden und den Elektrotraktor einer internationalen Kundschaft zum Verkauf anzubieten.

Die grenzüberschreitende Zusammenarbeit zwischen Rigitrac und Goldoni-Keestrack markiert einen wichtigen Meilenstein in der Weiterentwicklung nachhaltiger Technologien für die Landwirtschaft und andere Einsatzbereiche. Die Fertigung in Italien ermöglicht es, den Elektrotraktor in neuen Märkten auf der ganzen Welt anzubieten. Durch die Verfügbarkeit auf europaweiter Ebene können Landwirte und Kommunalbetriebe weltweit von den Vorteilen dieser effizienten und umweltfreundlichen Arbeitsmaschinen profitieren und einen Beitrag zur Reduktion der CO2-Emissionen leisten. Die nationale und internationale Zusammenarbeit trägt somit massgeblich dazu bei, die Vision einer zukunftsfähigen und umweltbewussten Nutzung von Elektrotraktoren weltweit Realität werden zu lassen.

8 Publikationen

[1] P. Schärli, L. Hediger, S. Flück und B. Wellig , «Kombiniertes Wärmepumpen- und Klimakälte-anlagensystem mit Turbokompressor für Elektrofahrzeuge,» Hochschule Luzern, Horw, 2018.

[2] C. Dietze, «EFAHRER,» 19. Dezember 2022. [Online]. Available: https://efahrer.chip.de/news/bio-bauernhof-sagt-dem-diesel-ab-hier-arbeitet-der-erste-e-traktor-von-fendt_1010545. [Zugriff am 20. Juli 2023].

[3] O. Bünte, «heise online,» 5. Mai 2023. [Online]. Available: https://www.heise.de/news/Erster-autonomer-Elektro-Traktor-CNH-T4-Electric-Power-kommt-aufs-Feld-8987863.html. [Zugriff am 20. Juli 2023].

[4] Mahle Aftermarket GmbH, Thermomanagement in Elektro- und Hybridfahrzeugen, Stuttgart, 2021.

[5] W. Breu und B. Pichlmaier, «Electrified Utility Tractor,» AGCO GmbH, Marktoberdorf, 2017.

[6] R. Bischof, «Untersuchung und Optimierung des Thermomanagement- und Wärmpumpen/Kälteanlagens-Systems von Elektrotraktoren,» Hochschule Luzern, Horw, 2022.

[7] EnergieSchweiz, «Leitfaden mit Massnahmen zur Optimierung von Kälteanlagen,» 2015.

[8] S. Rebsamen, P. Zimmermann, S. Hochuli, S. Flück und B. Wellig, «Zwischenbericht: Effiziente Wärmepumpenheizung für elektrische Landwirtschafts- und Kommunalfahrzeuge,» Rigitrac Traktorenbau AG, Küssnacht, 2022.

9 Anhang

9.1 Schema zum Betriebsfall «Aktiv heizen»

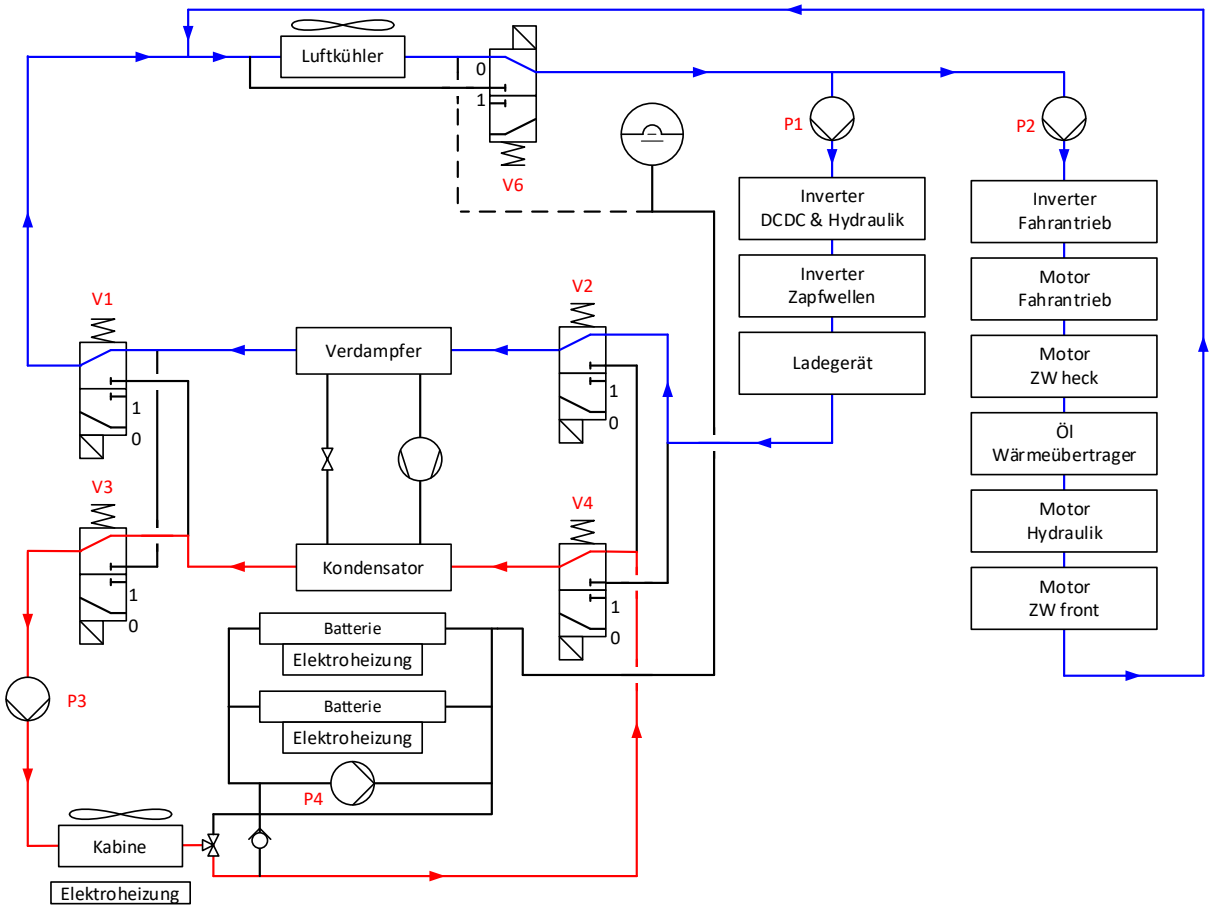

Abbildung 29: Schematische Darstellung des Betriebsfalles "Aktiv heizen" mit eingezeichneter Strömungsrichtung

9.2 Serieller Betriebsfall

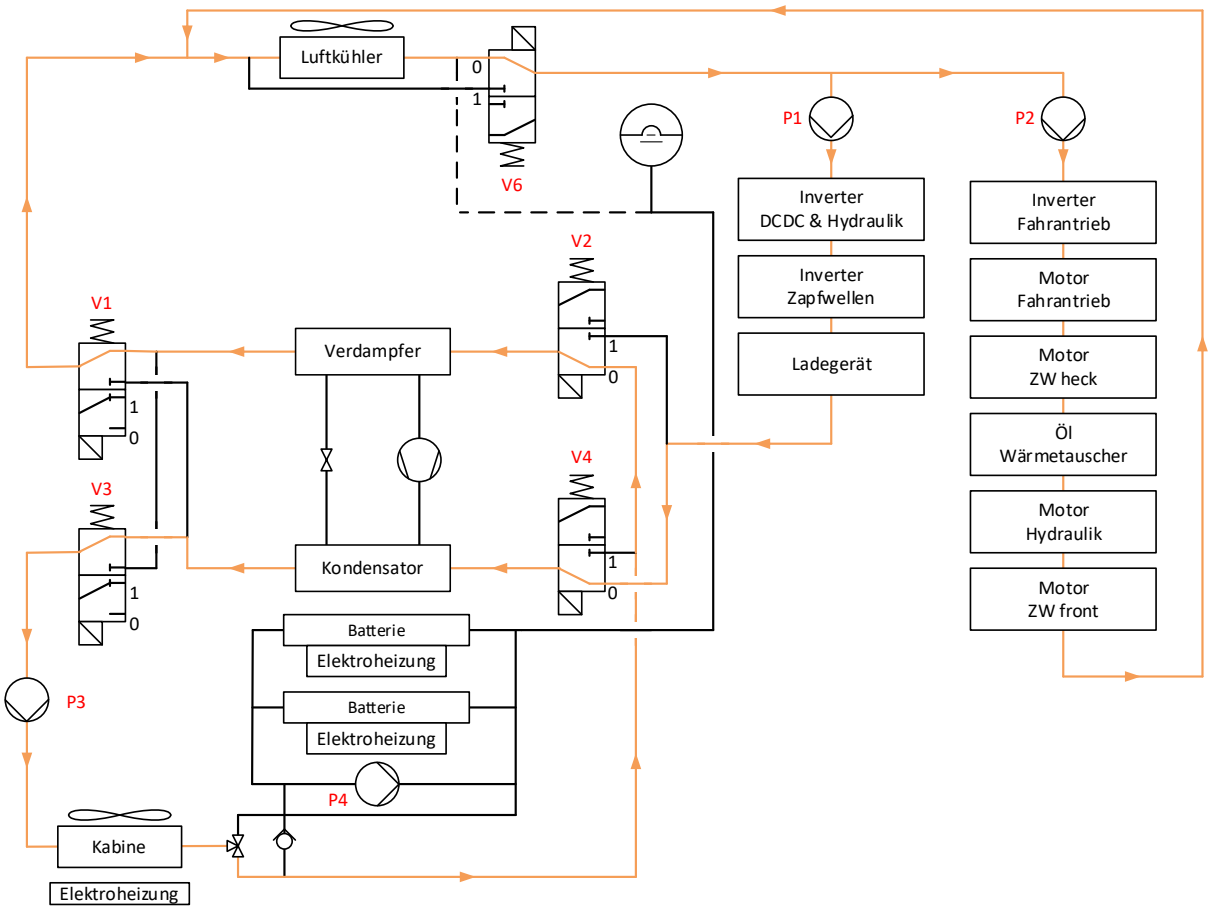

Abbildung 30: Schematische Darstellung des seriellen Betriebsfalles mit eingezeichneter Strömungsrichtung

9.3 Prinzipschema einer hydraulischen Weiche

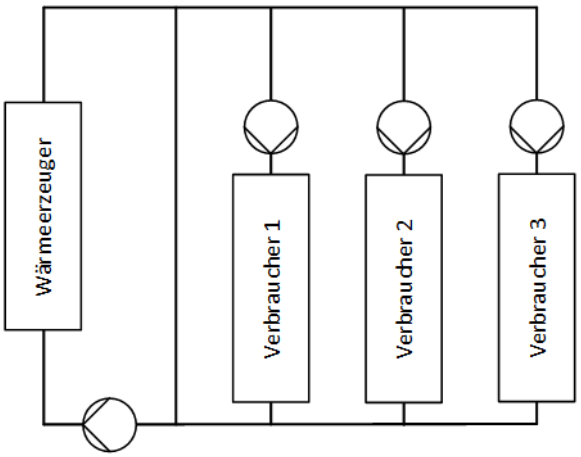

Abbildung 31: Prinzipschema eines Systems mit hydraulischer Weiche