



Schlussbericht

Zuwendungsgeber:	Bundesministerium für Bildung und Forschung
Zuwendungsempfänger	AURORA Konrad G. Schulz GmbH & Co. KG
Förderkennzeichen:	16EMO0281
Vorhabensbezeichnung:	SiCNV
Projektlaufzeit:	01.09.2018 bis 28.02.2022
Berichtslaufzeit:	01.09.2018 bis 28.02.2022

Projektleitung: Herr Stefan Wetzstein

Inhaltsverzeichnis

1.	Kurzdarstellung	3
1.1.	Aufgabenstellung	3
1.2.	Wissenschaftlicher und technischer Stand an den angeknüpft wurde	3
1.3.	Planung und Ablauf des Vorhabens.....	4
1.4.	Wesentliche Ergebnisse und Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	4
2.	Eingehende Darstellung des Projektes	5
2.1.	Erzielte Ergebnisse.....	5
2.2.	Zahlenmäßiger Nachweis.....	19
2.2.1.	Übersicht über alle Positionen	19
2.2.2.	Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	19
2.3.	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	19
2.4.	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse.....	20
2.5.	Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	20
2.6.	Veröffentlichungen	20
2.6.1.	Diplomarbeiten, Bachelorarbeiten, Belegarbeiten	20
2.6.2.	Tagungsbeiträge	20
2.6.3.	Messen	20
2.6.4.	Zeitschriftenartikel	20

Kurzdarstellung

1.1. Aufgabenstellung

Im Projekt SiCNV werden Antriebe für Nebenverbraucher mit direktem Anschluss am Traktionsbordnetz elektrischer Fahrzeuge (750 V DC Nutzfahrzeuge) entwickelt. Besonders hervorzuheben ist, dass die Verwendung von Siliziumcarbid (SiC) Halbleitern in der Leistungselektronik der Antriebe weitere Effizienzvorteile erschließen soll. Zu Demonstrations- und Testzwecken werden die SiC-Antriebe in einer Wärmepumpe auf einem Stadtbus integriert. Des Weiteren soll die Sicherheit in Bezug auf das Kältemittel R290 überprüft werden und ob die SiC-Leistungselektronik darauf einen relevanten Einfluss hat. Auch zu prüfen, gilt es welche Veränderungen im Bereich der Fertigung vorzunehmen sind.

1.2. Wissenschaftlicher und technischer Stand an den angeknüpft wurde

Bisher werden in vollelektrischen Fahrzeugen Nebenaggregate über eine separate Leistungselektronik an den Hochvoltzwischenkreis angeschlossen, was die Energieeffizienz mindert und gleichzeitig Komplexität, Fehleranfälligkeit und Kosten der Systeme erhöht. Mit jeder zusätzlichen Spannungsebene nehmen auch die Anforderungen hinsichtlich der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) drastisch zu. Darüber hinaus führt die Nutzung des Niederspannungsnetzes für Hochleistungsverbraucher zu sehr hohen Strömen, sodass weder geeignete Motoren verfügbar sind noch die Verbraucher sinnvoll betrieben werden können. Bisherige Forschungen¹ beschäftigten sich daher unter anderem mit der Bereitstellung dynamischer Bordnetze sowie der Optimierung insbesondere der MMC-Bauteile.

Über den Einsatz von SiC-Halbleitertechnologie in Traktionsantriebssystemen war zu Projektbeginn bekannt, dass diese Effizienzvorteile gegenüber herkömmlichen leistungselektronischen Schaltern erzielen. So führte Toyota beispielsweise eine Testreihe eines Hybridantriebs mit integrierten SiC-Halbleiterelementen durch². Verringerte Verlustleistungen um den Faktor 10 wurden hierbei erzielt. Kraß, et al.³ entwickelten bereits 2013 eine motorintegrierten Umrichter auf Basis von SiC-MOSFETs und erzielten somit eine Gesamtverlustreduktion um 80%, verglichen mit einer Si-IGBT Halbbrücke.

Im Bereich Energiemanagement von Fahrzeugen gab es zu Projektbeginn Forschungsvorhaben⁴ mit dem Ziel in mehreren Demonstrations-Städten eine energetische Optimierung von Hilfsantrieben vorzunehmen. Hierbei soll neben der Verringerung der Energieaufwände zur Klimatisierung und der Erhöhung der Effizienz von Hilfsantrieben auch durch die Analyse der Fahrstrecken ein vorausschauendes Energiemanagement umgesetzt werden.

¹ DYNASPA - Serielles EMV-optimiertes Bordnetz mit dynamischer Spannungsanpassung <https://www.bmbf.de/files/VIP-PSB-Ingenieurwissenschaften-barrierefrei.pdf>

² Toyota beginning on-road testing of new SiC power semiconductor technology; hybrid Camry and fuel cell bus <http://www.greencarcongress.com/2015/01/20150129-toyotasic.html>, Stand 12.06.17

³ Besonders energieeffizienter, motorintegrierter Umrichter mit SiC-MOSFETs https://www.f07.th-koeln.de/imperia/md/content/personen/kraß_jens/sps_2013_kraß.pdf, Köln 2013, Stand 12.06.17

⁴ Europa Bus System of the Future 2 – EBFS 2 <http://ebsf2.eu>, Stand 12.06.2017

1.3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Der umgesetzte Arbeitsplan zum Vorhaben ist in der folgenden Abbildung dargestellt und bildet die gesamte Entwicklungskette von der Grundlagenermittlung bis hin zur Demonstration und Evaluierung des Gesamtsystems ab.

Arbeitsplan Arbeitspakete	2018		2019				2020				2021				2022		
	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	
AP 1 Projektmanagement																	
AP 2 Grundlagenermittlung																	
AP 3 Kompakte Motorentechnik mit integrierter SiC-Leistungselektronik																	
AP 4 Optimierung einer Wärmepumpe für den Einsatz der neuen Motorentechnik																	
AP 5 Energiemanagement																	
AP 6 Integration ins Gesamtfahrzeug																	
AP 7 Demonstration und Evaluierung																	

Abbildung 1: Umgesetzter Projektzeitplan SiCNV

Eine Projektverlängerung von 6 Monaten sowie eine Verzögerung der Arbeitspakete 3, 4, 6 und 7 waren bedingt durch Kurzarbeit, aufgrund der Covid19-Pandemie, und der verspäteten Fertigstellung der Demonstrationsmuster notwendig.

1.4. Wesentliche Ergebnisse und Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Wesentliche Ergebnisse des Projektes:

- Sicherheitsstudie, zum Betrieb des Kältemittels R290 und SiC Bauteilen, mit dem TÜV Süd, siehe Anhang
- Analyse bzgl. Produktionsabläufe und Sicherheit in der Produktion mit R290 und SiC, siehe Anhang
- Datenauswertetools für Heiz und Kühlleistungen von Wärmepumpensystemen konnten anhand eines aktuellen vollelektrischen Busses entwickelt und getestet werden

Für den Einbau des Wärmepumpensystems auf das Demonstrationsfahrzeug wurde die Firma Bus Trailer Service GmbH beauftragt. Der Umbau fand mit intensiver Absprache und dem Mitwirken von ebm und dem Fraunhofer IVI statt.

2. Eingehende Darstellung des Projektes

2.1. Erzielte Ergebnisse

Die im Projektverlauf nötigen Zuarbeiten der AURORA wurden planmäßig abgearbeitet. Bei Erstellung der Lastenhefte (Gesamtfahrzeug sowie kältetechnische Anlage) wurden in enger Zusammenarbeit mit ebm die Anforderungen der im Projekt nötigen Komponenten definiert. Wesentlicher Teil des Projektes war hier die konstruktive Integration und Definition der nötigen Schnittstellen zu einer bestehenden AURORA-Wärmepumpe.

Die zu entwickelnden Systeme und Komponenten wurden in speziell aufgebaute Versuchsträger und komplexe Funktionsmuster integriert. Die Entwicklung und Aufbau des Wärmepumpenaggregates als Funktionsmuster auf Basis der neu konzipierten SiC-HV-Motorentechnik wurde erfolgreich abgeschlossen und in eigens hierfür konzipierten Testständen erfolgreich getestet und evaluiert. Hierbei werden sowohl das Gesamtsystem als auch die Einzelaggregate durch das ganzheitliche Energiemanagement hocheffizient bedarfsgerecht geregelt. Dafür wird die u.a. gute Drehzahlregelbarkeit der Antriebe genutzt.

Im Zuge dieser Entwicklung stellte sich heraus, dass im Markt kein den Anforderungen entsprechenden Kältemittel-Verdichter verfügbar ist. Daher wurde dieser prototypisch umgesetzt. Die Anforderungen an solch einen Verdichter können im Nachgang zum Projekt in ein Lastenheft zusammengefasst werden und Herstellern für eine Weiterentwicklung zur Verfügung gestellt werden.

Parallel wurde der Demonstrator auf den Betrieb mit R290 vorbereitet. Da R290 besondere Anforderungen an die Sicherheit beim Betrieb stellt, wurde auf Basis der vom TÜV Süd erstellten Risikoanalyse ein entsprechendes Sicherheitskonzept entwickelt und erfolgreich im Projekt umgesetzt. Parallel wird dies durch eine von AUROA umgesetzte FMEA-Analyse gestützt.

Durch einen externen Dienstleister wurde in Zusammenarbeit mit AURORA eine Analyse für die geänderten Anforderungen in der Produktion erstellt. Diese berücksichtigt die Sicherheitsanforderungen, welche bzgl. R290 entstanden sind.

Die im Projekt geplante Selbstüberwachung wurde konzeptionell entwickelt und teilweise in einer Simulationsumgebung bereits abgebildet und virtuell erprobt.

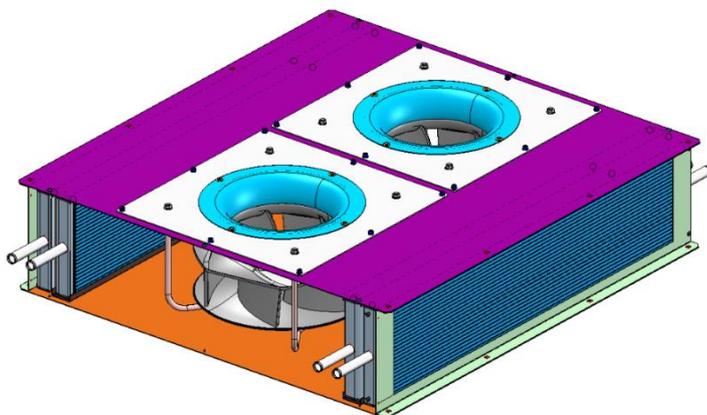


Abbildung 2: 3D-Modell Einbausituation



Abbildung 3: Versuchsträger (A-Muster) mit Gebläsemotoren inkl. integrierter Leistungselektronik

Lasten- und Pflichtenheft zur Wärmepumpe

Im Laufe der Planung und Entwicklung der neuen Wärmepumpengeneration wurde von der Fa. Aurora hierfür ein Lasten- und Pflichtenheft erstellt, welches die Anforderungen des in AP 2.2 erstellten Lastenheftes erfüllt und umsetzt. In diesem sind alle Spezifikationen, Dimensionen, Aufbauten und Einzelkomponenten der Wärmepumpe Borealis 3.0 erfasst und aufgeführt.

AURORA [9]	Lastenheft Borealis 2.2	Nr. 971-180-XXXX	Seite 14/23
-------------------	------------------------------------	-----------------------------	------------------------

2.2.2 Außenwärmetauscher

- U-durchströmte Wärmetauscher
- Volumenstrom Wasser: 3600 l/h
- Leistung: 58KW
- Maximaleingangsdruck des Fluids: max.p1 = 4 bar relativ
- Nenntemperatur des Fluids: T = 80°C
- Maximale Temperatur des Fluids: T = 120°C
- Minimale Temperatur des Fluids: T = -40°C
- Schlauchanschlußmaße: Ø22



Abb 4. Aussenwärmetauscher

2.2.3 Kühlmittelkreislauf

Der Kühlmittelkreislauf besteht aus zwei Kühlkreisläufen einem Nieder-Temperatur-Kreislauf und einem Hoch-Temperatur-Kreislauf.

Der Nieder-Temperatur-Kreislauf ist an den Platten-Verdampfer und an den Außenwärmetauscher angeschlossen. Mit einer regelbaren Wasserpumpe im Vorlauf der Plattenwärmetauscher wird der Massenstrom des Wasser-Glykol-Gemisch geregelt. Um die Wasserströme intern zu steuern werden 3/2-Wege-Ventile und 2/2-Wege-Ventile verwendet. Das Volumina des Wasser-Glykol-Gemisch wird mittels eines Ausgleichsbehälters, der als Bypass oder durchströmt angeordnet sein kann, reguliert.

Der Hoch-Temperatur-Kreislauf ist an den Platten-Verflüssiger angeschlossen. Mit einer regelbaren Wasserpumpe im Vorlauf der Plattenwärmetauscher wird der Massenstrom des Wasser-Glykol-Gemisch geregelt. Um die Wasserströme intern zu steuern werden 3/2-Wege-Ventile und 2/2-Wege-Ventile verwendet. Das Volumina des Wasser-Glykol-Gemisch wird mittels eines Ausgleichsbehälters, der als Bypass oder durchströmt angeordnet sein kann, reguliert.

Abbildung 4: Auszug aus dem editierbaren Lasten- und Pflichtenheft der Wärmepumpe mit SiC-Komponenten

Konzeption der Schnittstellen innerhalb der Anlage

In AP 4.3 hat Aurora ein Packaging-Konzept für die einzelnen neuen, im Projekt entwickelten Komponenten erarbeitet. Hierbei wurden bereits die Anforderungen hinsichtlich vorhandenem Bauraum, Gewichtsverteilung, Leitungsverlegung, möglicher Fahrzeugschnittstellen und den besonderen Sicherheitsvorkehrungen bei Verwendung von R290 als Kältemittel berücksichtigt.

Im Fall eines Unfalls oder einer Leckage darf das brennbare Kältemittel Propan unter keinen Umständen Kontakt zu nicht isolierten Stromleitern bekommen. Zudem ist das Eindringen des Kältemittels in den Fahrgastraum zu unterbinden. Auf Basis dieser Konzeption wurden der Aufbau und die Dimension der Kühlmittel- und Kältemittelverrohrung, die Kabelquerschnitte und Leitungsverlegungswege sowie die Luftführungen umgesetzt.

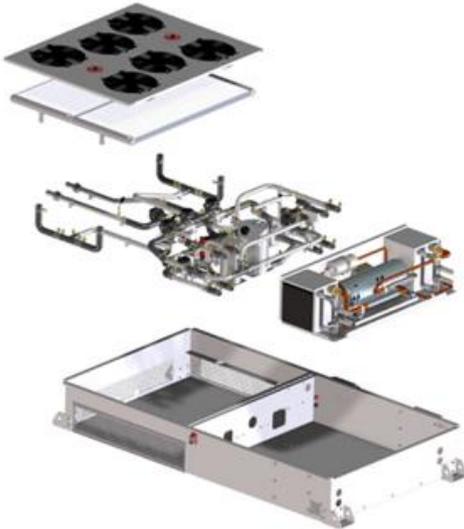


Abbildung 5: Modularer Aufbau der Wärmepumpe mit getrennten Kühlmittel- und Kältemittelkreisläufen

Die neu konzipierte Wärmepumpe wird aus folgenden kompakten Einzelmodulen bestehen:

- Hermetisch abriegelter Kältemittelkreislauf mit Emerson Verdichter
- Kühlmittelkreislauf bestehend aus zwei Wasserkreisläufen (Niedertemperatur- / Hochtemperaturkreislauf)
- Außenluft-Wärmetauscher mit zwei ebm-papst Axialgebläsemodulen
- Wärmepumpengehäuse (Leichtbauvariante in Planung)

Sicherheitskonzept

AURORA hat die Anforderungen an das Wärmepumpensystem mit dem im Projekt definierten Kältemittel R290 im Rahmen einer technischen Beschreibung definiert. Anhand dieser Beschreibung erstellte der TÜV Süd in Zusammenarbeit mit Aurora das hierfür nötige Sicherheitskonzept.

R290 Sicherheitskonzept EN 378



Minimale Menge Kältemittel

- Füllmenge von 1,5 kg R290



Hermetisch geschlossener Kältemittelkreislauf

- Kältemittelleitungen aus einem Stück gebogen, ohne lösbare Verbindungen

Abgeschlossene Kältemittelzone







- Keine Zündquellen in der Kältemittelzone
- Automatische Dauerentlüftung in der Kältemittelzone
- Ausgestattet mit Druck- und Temperatursensoren sowie Druckschaltern, nach ATEX-Norm
- Hochdruck-Sicherheitsventil, kontrolliertes Ableiten in Brandfall
- Indirektes Kühlsystem ohne direkten Kontakt zwischen Kältemittelbereich und Fahrzeuginnenraum



Abbildung 6: R290 Sicherheitskonzept EN 378

Die erreichten Ziele aus dem Workshop zwischen Aurora und dem TÜV Süd sind:

- Gefährdungen durch die Nutzung des Kältemittels R290 auf Elektrobussen zu identifizieren
- mögliche Konsequenzen abzuschätzen und
- vorgesehene Gegenmaßnahmen systematisch zu erfassen.

Verwendete Methode: HAZID Study

Eine Hazard Identification Study (HAZID) ist eine Methode zur Identifizierung von Gefährdungen, um nachteilige Auswirkungen zu verhindern und zu reduzieren, die zu Verletzungen von Personen, Schäden oder Verlusten von Eigentum, Umwelt und Produktion führen oder zu einer Haftung führen könnten. Die relevanten Gefährdungen durch R290 sollen über den gesamten Lebenszyklus der Elektrobuse für folgende Betriebszustände festgestellt und beurteilt werden:

Entwicklung → Produktion → Befüllung → Einbau beim Kunden → Inbetriebnahme → Betrieb → Stillstand → Wartung → Außerbetriebnahme und Entsorgung

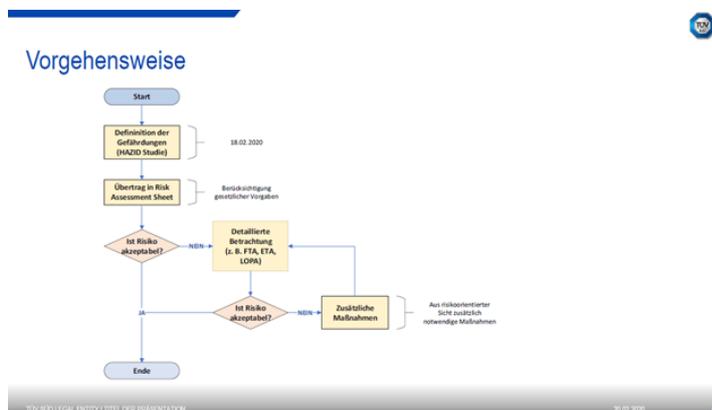


Abbildung 7: Vorgehensweise

Hieraus ergab sich folgende Vorgehensweise. Es beginnt mit der Erstellung eines Risk Assessment Sheets mit der Bewertung der Gefährdungen anhand der vorher festgelegten Risikokriterien. Jede Gefährdung, die nach der Bewertung im Risk Assessment Sheet als hoch eingestuft wird oder mindestens eine schwere Verletzung nach sich zieht, wird genauer untersucht, z. B. mittels Fehlerbaumanalyse, Ereignisablaufanalyse oder LOPA (Layer of Protection Analysis).

AURORA hat die Anforderungen an das Wärmepumpensystem mit dem im Projekt definierten Kältemittel R290 im Rahmen einer technischen Beschreibung definiert. Anhand dieser Beschreibung erstellte der TÜV Süd das hierfür nötige Sicherheitskonzept.

Anhand der Ausgangssituation, den gesetzlichen Randbedingungen und den Risiko- und Risikoakzeptanzkriterien wurde die Vorgehensweise festgelegt und durch Verwendung einer Risikomatrix eine mehrstufige Risikoanalyse erstellt. Da es keine einschlägigen Regelwerke für den Einsatz von Propan in mobilen Klimaanlage gibt, kam der Risikoanalyse eine hohe Bedeutung zu.

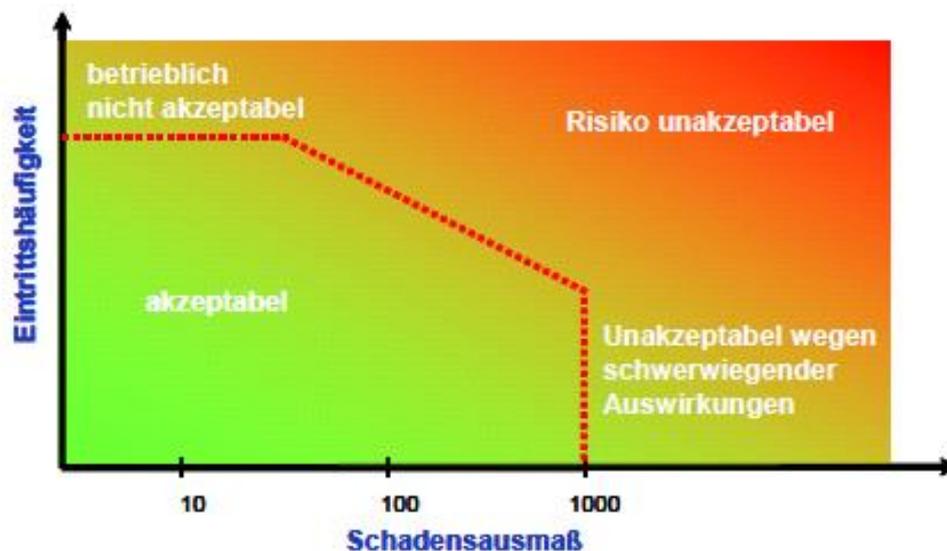


Abbildung 8: Akzeptanzgrenzen im Risikodiagramm

Dieses Diagramm macht bereits deutlich, dass neben der „absoluten Risikobewertung“ einer Anlage auch die relative Risikobetrachtung von Bedeutung ist, d.h. die vergleichende Risikobetrachtung mit üblicherweise akzeptierten Risiken der Gesellschaft.

Aus der ausgiebigen Risikoanalyse ergab sich eine ausführliche Bewertung der Risiken in folgenden verschiedenen Bereichen:

- Risiken, die ausreichend beherrscht werden und für die keine weitere Betrachtung notwendig ist
- Risiken, die mit zusätzlichen Maßnahmen noch nicht beherrscht werden. Ereignisse werden im Rahmen einer LOPA (Layers Of Protection Analysis) detaillierter betrachtet
- Risiken, die sich dadurch auszeichnen, dass sie als Schadensausmaß einen Todesfall nach sich ziehen können, jedoch hinreichend unwahrscheinlich sind, dass sie ggf. dennoch toleriert werden können

Eine große Risikominimierung wird durch die vorgenommene Trennung von Kältemittel und

Innenraum maximal erreicht. Eine weitere Risikoreduzierung bzw. eine detaillierte Betrachtung der verbleibenden Risiken wird in der nächsten Stufe der Risikoanalyse behandelt und geprüft.

Bei der Begutachtung und Analyse von insgesamt 97 betrachteten Ereignissen nach Berücksichtigung aller diskutierten und zusätzlich empfohlenen Maßnahmen bleiben noch 2 Ereignisse im Bereich des hohen Risikos vorhanden. Bei diesen beiden Ereignissen handelt es sich um:

- Beschädigung der Anlage durch zu niedrige Brücke (Fehler Busfahrer)
- Beschädigung der Anlage durch Überschlag des Fahrzeugs

Beide Ereignisse liegen im Bereich des hohen Risikos und können nach dem Bewertungsmaßstab nicht ohne Weiteres akzeptiert werden. Wird jedoch berücksichtigt, dass die Ereignisse außerhalb des Einflussbereiches von Aurora liegen, sinnvolle Maßnahmen gegen beide Ereignisse nicht getroffen werden können, und die Risiken beider Ereignisse im Bereich normaler Verkehrsrisiken liegen, müssen diese beiden Ereignisse letztendlich zu den nicht besser beherrschbaren Restrisiken gezählt werden.

Dies ist das Fazit aus der umfangreichen Risikoanalyse des TÜV Süd, die in einem gesonderten Abschlussbericht eingesehen werden kann.

Im Zuge der Erstellung des Sicherheitskonzeptes wurde von Aurora eine Fehlermöglichkeits- und einflussanalyse (FMEA) erstellt. Im Rahmen des Qualitätsmanagements bzw. Sicherheitsmanagements wird die FMEA zur Fehlervermeidung und Erhöhung der technischen Zuverlässigkeit vorbeugend eingesetzt. Aurora ist sehr daran gelegen, Fehler von vornherein zu vermeiden, statt sie nachträglich zu entdecken und zu korrigieren. Bereits in der Entwurfsphase sollen potenzielle Fehlerursachen identifiziert und bewertet werden. Damit werden Kontroll- und Fehlerfolgekosten in der Produktion oder gar beim Kunden vermieden. Durch die dabei gewonnenen Erkenntnisse wird zudem die Wiederholung von Entwurfsmängeln bei neuen Produkten und Prozessen vermieden. Hierbei wurde der Kältekreislauf, der Kühlmittelkreislauf und die elektrischen Komponenten gesondert betrachtet und bewertet. Zudem wurde ein Beurteilungskatalog erstellt.

Fehler-Möglichkeits- und Einflussanalyse									
Produkt-FMEA									
Prozess-FMEA									
Projekt Nr.:		Teilnehmer:							
Systeme, Merkmale	Potentielle Fehler	Potentielle Folgen des Fehlers	D	Potentielle Fehlerursachen	vorgesehene Prüfmaßnahmen	derzeitiger Zustand			RPZ
						Auffrisch	Behaltung	Entwicklung	
Baugruppe / Prozess 1									
Wasserpumpen	Wasserleck	Kühlmittelverlust		Lecktage an Verbindung	Dichtheitsprüfung	3	9	2	54
	Blockade/Trockenlauf	Pumpe defekt		Luft im Kühlmittel	Kühlmittelmenge muß definiert sein	6	8	3	144
	Verschmutzung im Kühlmittel	keine Förderung		Schmutz im Kühlmittel	Evtl. Filter am Einfüllstutzen	3	7	5	105
	Elektrische Fehlfunktion	keine Förderung		Kabelbruch	Test der Pumpe	3	10	2	60
Baugruppe / Prozess 2									
Ausgleichsbehälter mit Schwimmerschalter und Wasserstandsanzeige	Kühlmittelleckage	Kühlmittelverlust		Falsche bearbeitung	Dichtheitsprüfung	3	8	2	48
	Sensor defekt	Falsche Anzeige		Kabelbruch	Inbetriebnahme	1	7	3	21
Baugruppe / Prozess 3									
Umgebungs Wärmetauscher	Kühlmittelleckage	Kühlmittelverlust		Lötverbindung fehlerhaft	Prüfung beim Lieferant	1	8	1	8
	Verschmutzung in den Lamellen	zu geringe Leistung		Verschmutztes Umgebung	Im Betrieb Luftdruck überwachen	5	8	3	120
Baugruppe / Prozess 4									
Wasserventile	Kühlmittelleckage	Dichtung defekt		falsche Montage	Dichtheitsprüfung	4	8	2	64
	Elektrische Fehlfunktion	Vor-/Rücklauf vertauscht		falsche Steckverbindung	Inbetriebnahmeprüfung	4	8	1	32
	Mechanisch Blockade	geringer Durchfluss		falsche Montage	Sichtkontrolle	2	8	1	16
		Verschmutzung in der Mechanik		Dichtung fehlerhaft		4	8	2	64
Baugruppe / Prozess 5									
Temperatursensor	Kühlmittelleckage	Kühlmittelverlust		falsche Montage	Dichtheitsprüfung	4	8	2	64
	Elektrische Fehlfunktion	Falsche Werte		Stecker nicht richtig angesteckt	Sichtprüfung	4	8	2	64
Baugruppe / Prozess 6									
Partiellwärmetauscher (Kühlmittel Kühlmittel)	Kühlmittelleckage	Kühlmittelverlust		Lötverbindung fehlerhaft	Dichtheitsprüfung Lieferant/ System	1	8	4	32
	Partiell verstopfte die Lamellen	zu geringe Leistung		Verschmutztes Kühlmittel	Hinweis/ bzw. Filter am Einfüllst.	1	8	4	32

Abbildung 9: Auszug aus der FMEA (Failure Mode and Effects Analysis)

Detaillierte Konzeption und Entwicklung der Anlage

Die Anlage ist modulbasierend aufgebaut, das heißt jede Einheit ist für sich ein Modul. Die Vorteile sind, dass bei einem Service die Zugänglichkeit sehr gut ist. Der Kältekreislauf komplett entnehmbar ist. Er basiert auf einem Plug and Play System mit einer Trennung der Kühlwasserschläuche (4Stück), Hochvolt- und Niedervoltleitungen. Somit kann der Service am Kältemittelkreislauf extern erfolgen und am Fahrzeug kann die Servicezeit gering gehalten werden, da ein Ersatzkreislauf eingebaut werden kann.

Die Wärmeenergie aus dem Antriebsstrang (E-Motor, Inverter, Batterie, usw.) wird über einen Kühlwasser-Kühlwasser Plattenwärmetauscher aufgenommen. Durch den Kunden muss vorgegeben werden, welche Wärmesenken im Fahrzeug zur Verfügung stehen, bzw. von der Wärmepumpe genutzt werden können. Serienmäßig wird ein Plattenwärmetauscher zur Aufnahme der Wärmeenergie aus dem Antriebsstrang vorgesehen. Auf Basis der Entwicklung eines neuen modularen Gesamtkonzepts der Wärmepumpe in AP 4.3 entstanden die bereits benannten Einzelmodule.

Kältekreis

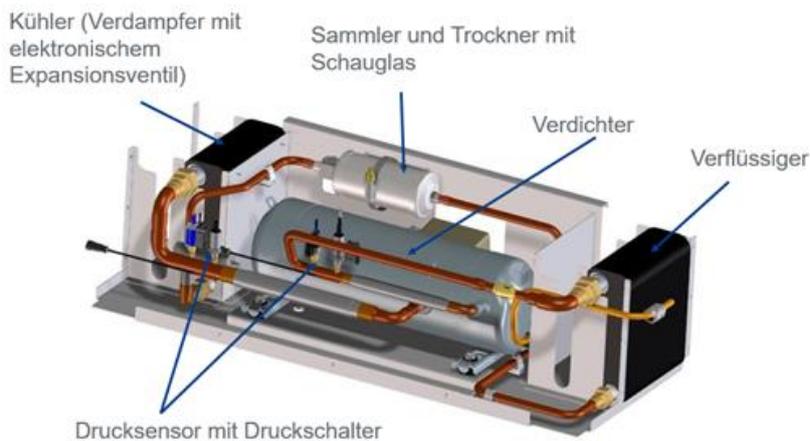


Abbildung 10: Modularer Aufbau des hermetisch abgeriegelten Kältemittelkreislauf

Wasserkreisläufe

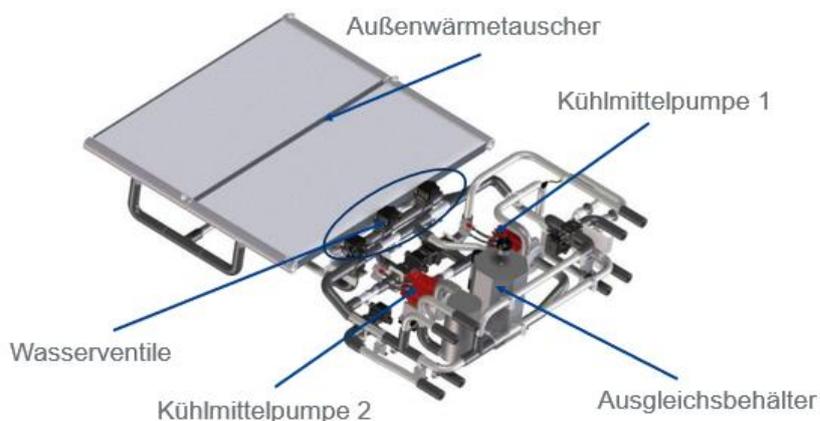


Abbildung 11: Modularer Aufbau der Kühlmittelkreisläufe

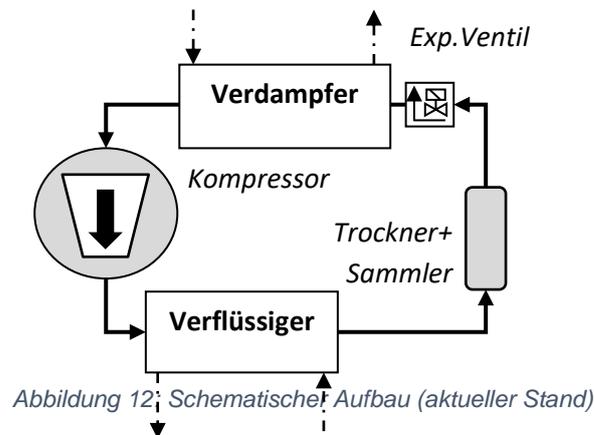
Schnittstellenintegration der neuen Hardware-Komponenten

Der Kühlmittelkreislauf besteht aus zwei Kühlkreisläufen einem Nieder-Temperatur- und einem Hoch-Temperatur-Kreislauf.

Der Nieder-Temperatur-Kreislauf ist an den Platten-Verdampfer und an den Außenwärmetauscher angeschlossen. Der Hoch-Temperatur-Kreislauf ist an den Platten-Verflüssiger angeschlossen. Mit regelbaren Wasserpumpen im Vorlauf der Plattenwärmetauscher werden die Massenströme des Wasser-Glykol-Gemisch geregelt. Um die Wasserströme intern zu steuern, werden 3/2-Wege-Ventile und 2/2-Wege-Ventile verwendet. Die Volumina der Wasser-Glykol-Gemische werden mittels Ausgleichsbehältern, die als Bypass genutzt oder durchströmt angeordnet sein können, reguliert.

Der Kältemittelkreislauf besteht aus kompakt und hermetisch abgeriegelt folgenden Komponenten:

- Kältemittel Kompressor
- Platten-Verflüssiger
- Trockner
- Sammler
- Elektrisches Expansionsventil
- Plattenverdampfer



In die oben beschriebenen Kreisläufe sowie in das Außenwärmetauschermodul wurden die neu entwickelten Komponenten nach den aufgeführten Schemata integriert. Das gesamte Elektrosystem der Wärmepumpe wurde neu entwickelt und an die gegebenen Anforderungen angepasst. Die endgültige detaillierte Auslegung wird auf Schaltplänen und Kabelstrangzeichnungen dargestellt. Die Einbindung der Hochvoltanlage sowie die neue Antriebstechnik wurden durch umfassende Untersuchungen wie Leistungs- und EMV-Messungen getestet. Die mechanischen Hauptkomponenten wie Rahmen und Konsolen der Wärmepumpe zur Aufnahme der neuen Antriebssysteme wurden ebenfalls neu entwickelt und konstruiert. Diese müssen Schwingungen dämpfen, Lärmemissionen reduzieren und möglichst in der kompakten Gesamtanlage integriert werden. Sämtliche Module und Einzelkomponenten wurden im Laufe des Arbeitspakets durch Zeichnungen dokumentiert und in Baugruppen und Stücklisten zusammengefasst. Die durchgeführten Entwicklungs- und Dokumentationsleistungen in diesem AP bilden die Grundlage für die Realisierung einer prototypischen Fertigung die wiederum als Basis für eine Serienfertigung dienen wird. Nach der Zusammenführung aller Einzelkomponenten in ein Funktionsmuster, wurden im folgenden Arbeitspaket alle erforderlichen Tests auf einem Versuchsprüfstand durchgeführt.

Aufbau Funktionsmuster und Test

Die Arbeiten gliederten sich in folgende vier Unterarbeitspakete:

- AP 4.7.1 Konzeption und Aufbau eines Hochvolt-Teststands für Klimatechnik
- AP 4.7.2 Aufbau und Test des Funktionsmusters eines Wärmepumpenaggregates
- AP 4.7.3 Aufbau des modularen und skalierbaren Gesamtsystems
- AP 4.7.4 Umfassende Tests des Gesamtsystems



Abbildung 13: Versuchsaufbau der Messanlage (Kältemittelkreis)



Abbildung 14: Versuchsaufbau Außenluft-Wärmetauscher

In diesem Arbeitspaket entstand ein Funktionsmuster der Wärmepumpenanlage für grundlegende Tests und Analysen an Einzelkomponenten sowie dem Gesamtsystem.

Es wurde neben dem Funktionsmuster ein individueller HV-Prüfstand konzeptioniert und aufgebaut der für die grundlegenden Untersuchungen des Gesamtsystemtests benötigt wurde. Es wurden sämtliche HV-Komponenten im Verbund mit der Steuerung des Wärmepumpensystems getestet und optimiert.

Modellbildung Komponenten

Für die Modellierung eines Gesamtfahrzeuges mit der Wärmepumpenanlage Borealis von Aurora auf Basis der SiC-Technik wurden die neu entwickelten Komponenten in das Simulationstool IVision aufgenommen. Dieses Tool wurde vom Fraunhofer IVI für solche Simulationen entwickelt. Konkret für das aktuelle Projekt wurden folgende Komponenten neu entwickelt. Der Aufbau des Simulationsmodells basiert auf dem modular erstellten Konzept des Wärmepumpensystems von Aurora und den von ebm-papst entwickelten Komponenten in der SiC-Technik. Der Arbeitsinhalt von Aurora beinhaltet in AP 5.2 die Zuarbeit und die Unterstützung von IVI beim Erstellen des Simulationsmodells.

Aufbau und Inbetriebnahme der Demonstrationsmuster aller Antriebe

Um den Buseinbau zu realisieren und die Inbetriebnahme zu gewährleisten, wurde zunächst eine Variante mit Axialgebläsen aufgebaut.

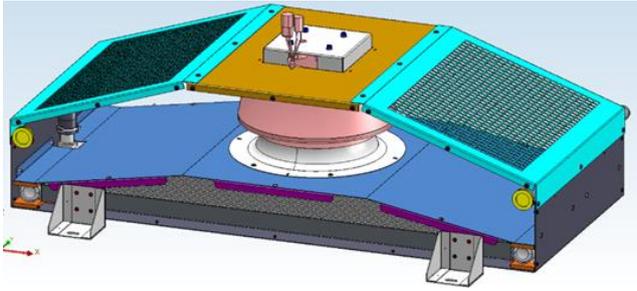


Abbildung 15: Versuchsträger mit überarbeiteten Gebläsemotoren

Nach dem Aufbau der Demonstrationsmuster erfolgte die Inbetriebnahme des Versuchsträgers. Hierbei wurden die grundlegenden Funktionstests aller Einzelkomponenten der Wärmepumpe durchgeführt.

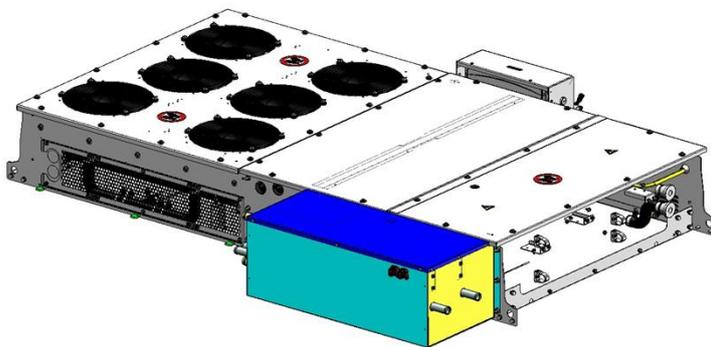


Abbildung 16: Schematische Übersicht zum Gesamtaufbau der Wärmepumpe

Detaillierte Konzeption der Anlage inkl. Selbstüberwachung

Die Anlage ist, wie schon beschrieben, modulbasierend aufgebaut worden. Somit kann der Service am Kältemittelkreislauf extern erfolgen und am Fahrzeug kann die Servicezeit gering gehalten werden, da ein Ersatzkreislauf eingebaut werden muss.

Die auf einem Traggestell aufgebaute Wärmepumpe kann mit einer kundenspezifischen Abdeckung ausgestattet werden und vom Kunden selbst fahrzeugspezifisch angepasst werden.

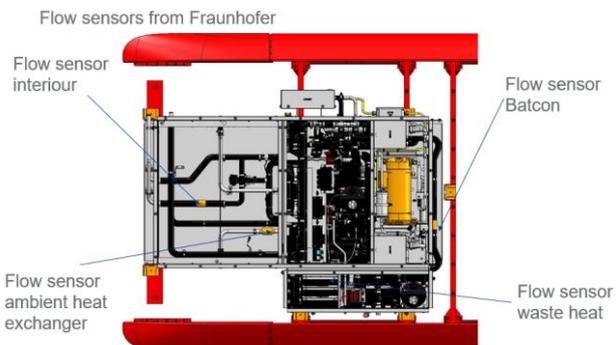


Abbildung 17: Überblick der Durchflusssensoren zur Selbstüberwachung der Wärmepumpe

Additional temperature sensors

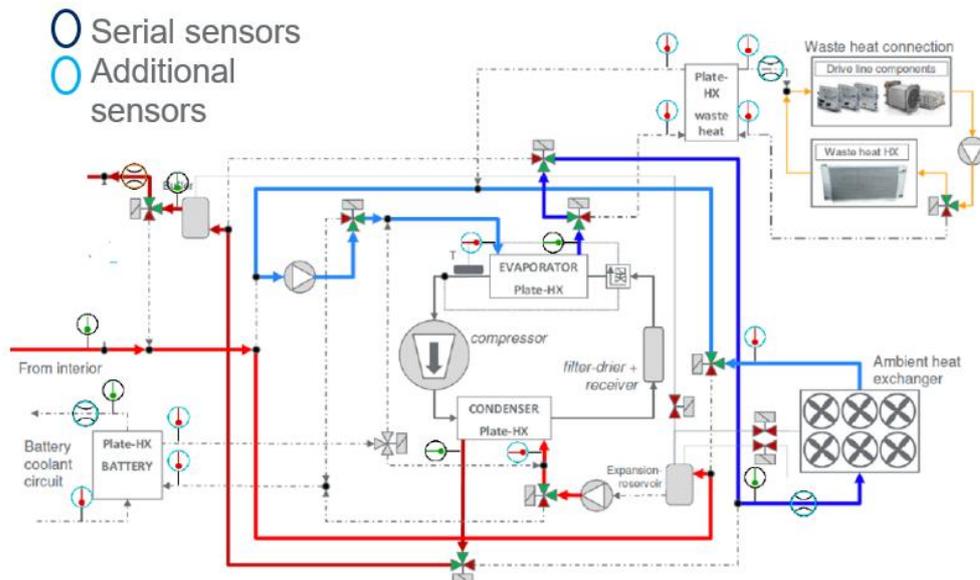


Abbildung 18: Überblick der Temperatursensoren zur Selbstüberwachung der Wärmepumpe

Schnittstellenintegration der neuen Hardware-Komponenten

In diesem Arbeitspaket wurden sämtliche Schnittstellen für die spätere Installation der Anlage in das Versuchsfahrzeug detailliert, konstruiert und gefertigt.

Die Schnittstellenintegration teilt sich auf in drei Hauptgruppen:

- Mechanische Einbindung der Hauptkomponenten wie Rahmen und Konsolen auf dem Versuchsfahrzeug
- Einbindung und Schaffung eines hydraulischen Netzwerks zwischen Wärmepumpe und dem Kühlmittelkreislauf des Versuchsfahrzeuges
- Einbindung des Elektrosystems in das Bordnetzsystem des Versuchsfahrzeuges inkl. der erstmaligen Anbindung der Hochvolt-Spannungslage sowie der neuen Antriebstechnik

Die mechanischen Komponenten wie Rahmen und Konsolen der Wärmepumpe zur Aufnahme der neuen Antriebssysteme wurden neu entwickelt und konstruiert. Diese müssen Schwingungen dämpfen, Lärmemissionen reduzieren und möglichst in der kompakten Gesamtanlage integriert werden. Sämtliche Module und Einzelkomponenten wurden im Laufe des Arbeitspakets durch Zeichnungen dokumentiert und in Baugruppen und Stücklisten zusammengefasst.

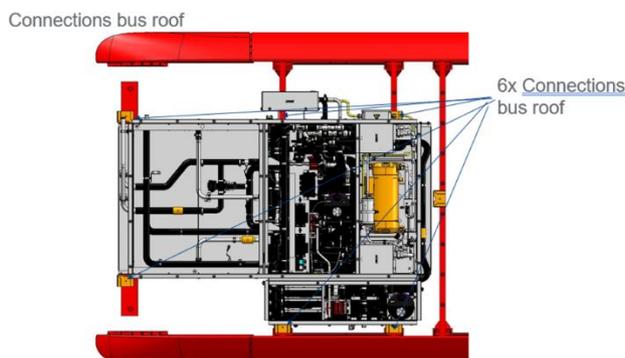


Abbildung 19: Mechanische Anbindung und Befestigung der Anlage auf dem Versuchsfahrzeug

Schlussbericht SiCNV – AURORA

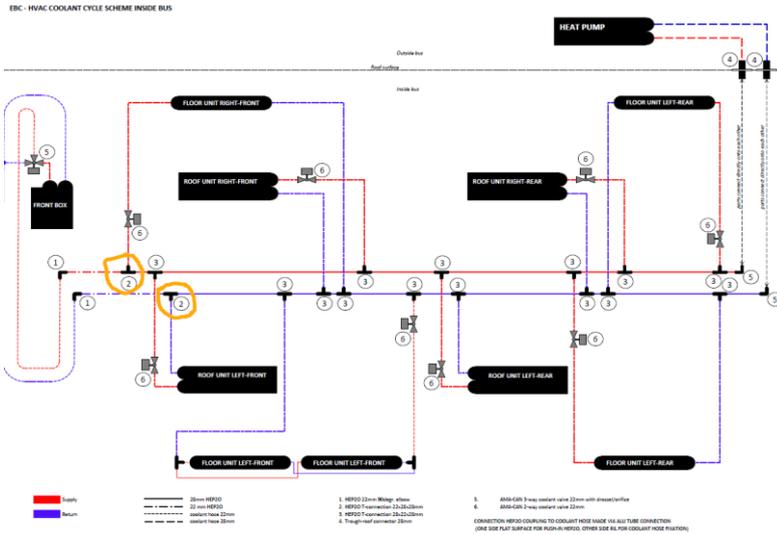


Abbildung 20: Hydraulische Einbindung der Wärmepumpe in den Kältemittelkreislauf

Das gesamte Elektrosystem der Wärmepumpe wurde neu entwickelt und an die gegebenen Anforderungen angepasst. Die gesamte Dokumentation der elektrischen Anlage wurde auf Schaltplänen und Kabelstrangzeichnungen dargestellt. Die Einbindung der Hochvoltanlage sowie die neue Antriebstechnik wurden durch umfassende Untersuchungen wie Leistungs- und EMV-Messungen getestet.

Die größte und aufwändigste Herausforderung ist die Softwareentwicklung und -anpassung für das Komplettsystem. Sie ist die Gesamtheit aller Programme und Dateien, die sämtliche Abläufe bei Betrieb der Wärmepumpe steuert. Sie stellt eine Verbindung zur Hardware her und steuert auch die Verwendung aller Sensoren und Aktoren im Versuchsfahrzeug, die in Verbindung mit dem Thermomanagement stehen. Die Software ist im Steuergerät der Wärmepumpe und dem Bedienteil Aranea integriert. Diese steuern die Unterstationen im Sinne eines Multiplexsystems.



Abbildung 21: CAN-Controller AC HCP



Abbildung 22: Bedienteil ARANEA

Am Ende dieses Arbeitspaketes war die konzipierte Anlage als Funktionsmuster aufgebaut und es wurde fließend in **AP 4.8 Evaluierung und Optimierung** übergegangen. Sämtliche Testzyklen der Anlage wurden durchlaufen und dokumentiert. Aus den erlangten Ergebnissen während des Versuchsablaufs konnten und können ohne zeitaufwendige Änderungen notwendige Anpassungen an den Prüfeinrichtungen und der Wärmepumpe vorgenommen werden. Das Funktionsmuster verblieb parallel zu der sich in Produktion befindlichen Wärmepumpe für das Versuchsfahrzeug im Klimacontainer für weitere Tests und Optimierungen in Betrieb.

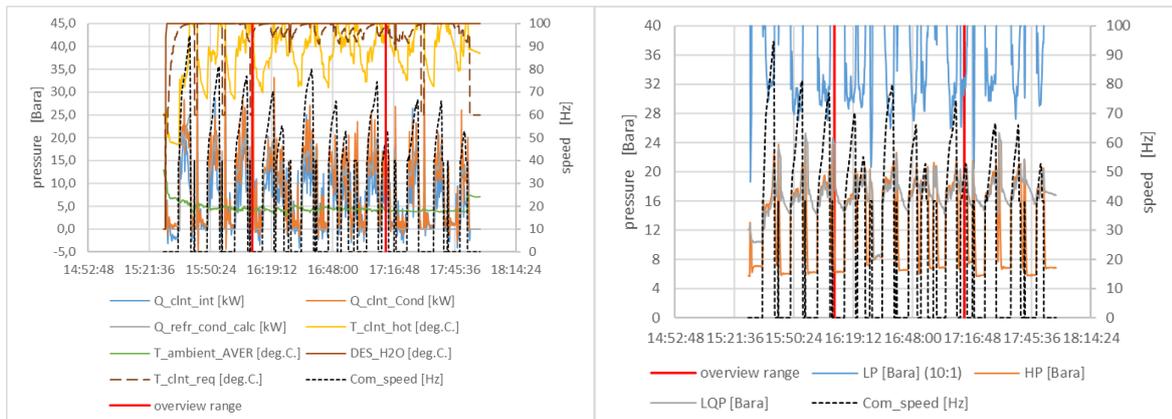


Abbildung 25: Graphische Auszüge aus Testläufen

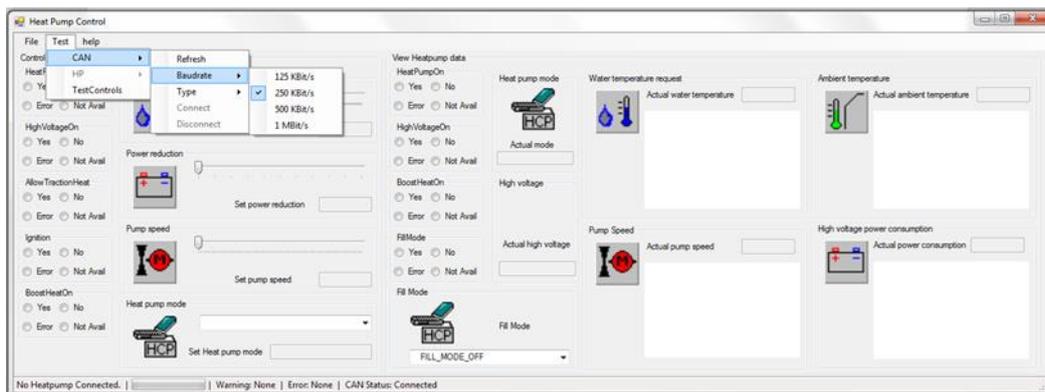


Abbildung 26: Hardware Testmode über das Programm VCD2 (mittels CAN und Peak-Module)

Betriebsstrategien

Mit der Zuarbeit und Unterstützung von Aurora wurde das modular erstellte Konzept des Wärmepumpensystems und die von ebm-papst neu entwickelten Komponenten auf Basis der SiC-Technik von Fraunhofer IVI in das Simulationstool *IVision* aufgenommen. Hierdurch entstand eine Modellierung eines Gesamtfahrzeuges mit der Wärmepumpenanlage Borealis von Aurora. Durchgeführt wurden die Simulationen von Fraunhofer IVI. Für die Entwicklung der selbstlernenden Betriebsstrategie aller Aggregate wurde die Abbildung der Regelung des Wärmepumpensystems vom Fraunhofer IVI in das Simulationsmodell *IVision* überführt. In der realitätsnahen Simulation werden die Wärmeströme und elektrischen Leistungen erfasst und ausgewertet. Hierbei unterstützt Aurora mit der Bereitstellung sämtlicher benötigter Daten, die bereits aus der Konzeption und den durchgeführten Tests vorliegen. Die Simulation ist notwendig für die Erlernung der Betriebszyklen und der daraus entstehenden Effizienzsteigerung.

Integration ins Gesamtfahrzeug / Demonstration und Evaluierung

Durch die bereits beschriebenen Verzögerungen wurden folgende Arbeitspakete noch nicht begonnen und ins Projektjahr 2021 verschoben:

- AP 4.9 Konzeption geeigneter Fertigungsmethoden
- AP 6 Integration ins Gesamtfahrzeug
- AP 7 Demonstration und Evaluierung

2.2. Zahlenmäßiger Nachweis

2.2.1. Übersicht über alle Positionen

Aus dem beim BMBF eingereichten Förderantrag ergab sich nachfolgend angeführter Kostenplan für die Aufwendungen der Fa. AURORA bei einer angestrebten Förderquote von 40 %

	1. Jahr	2. Jahr	3. Jahr	Summe	angestrebte Förderquote	angestrebte Förderung
AURORA Konrad G. Schulz GmbH & Co. KG				656,8	40%	262,7
Personal	69,3	106,1	106,0	281,4	40%	112,6
Material	10,0	37,5	0,0	47,5	40%	19,0
Invest	12,3	16,8	0,0	29,1	40%	11,7
sonst. Vorhabenskosten	118,7	100,8	66,2	285,8	40%	114,3
Reisen	4,3	4,3	4,3	13,0	40%	5,2

Tabelle 1

Nach Prüfung und Genehmigung des Projekts SiCVNV durch das BMBF und dem Projektträger VDI/VDE/IT ergab sich folgender Zuwendungsbescheid (Vorkalkulation in Euro) mit einer Förderquote von 40 %.

Position	Benennung	Vorkalkulation Gesamt (€)	Gesamt
0813	Material	47.500,00 €	32.658,74 €
0823	FE-Fremdleistungen	198.650,00 €	212.039,58 €
0837	Personalkosten	208.670,00 €	240.799,14 €
0838	Reisekosten	13.000,00 €	- €
0847	vorhabensspezifische Abschreibungen	27.900,00 €	- €
0848	AFA sonstige	- €	- €
0850	sonstige unmittelbare Vorhabenskosten	43.500,00 €	43.500,00 €
0856	Kosten innerbetrieblicher Leistungen	34.633,00 €	34.633,00 €
0860	Verwaltungskosten	72.808,00 €	84.014,75 €
0899	summarisch	- €	
0881	Selbstkosten des Vorhabens	646.661,00 €	647.645,21 €
0882	Eigenmittel des Antragstellers	387.997,00 €	
0883	Mittel Dritter/Einnahmen	- €	
0884	Zuwendung	258.664,00 €	

Tabelle 2

2.2.2. Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die größten Kostenpositionen waren Personalkosten und FE-Fremdleistung.

Vorhabensspezifische Abschreibungen und Reisekosten wurden außerhalb des Förderprojektes abgerechnet.

2.3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die von Aurora geleisteten Umfänge waren notwendig, um eine Plattform zu bieten (Wärmepumpe) um zu prüfen, ob der Einsatz von SIC-Technik in mobilen Anwendungen leistungsfähig und zuverlässig möglich ist. Zudem wurde im Projekt der sichere und zuverlässige Einsatz von R290 als umweltfreundliche Alternative zu Kältemitteln wie z.B. CO₂ überprüft. Bisher war der Einsatz von umweltfreundlichem R290 als Kältemittel in mobilen Anwendungen trotz hoher Leistungsfähigkeit nicht am Markt verfügbar.

2.4. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

SIC:

Aus den Ergebnissen dieses Projektes kann ein Lastenheft abgeleitet werden, das alle Anforderungen für einen Einsatz von SIC in Bauteilen, z.B. Verdichtern abbildet. Derzeit sind solche Bauteile für mobilen Einsatz im Markt nicht verfügbar. Das SiCNV-Projekt hat ergeben, dass ein Einsatz von SIC künftig durchaus möglich und energieeffizient ist, sofern die Hersteller entsprechende Bauteile anbieten.

Einsatz von Kältemittel R290 in mobilen Wärmepumpensystemen:

Grundsätzlich hat sich gezeigt, dass der Einsatz von R290 thermodynamisch eine deutliche Verbesserung aufweist und die Effizienz und Umweltfreundlichkeit von Klimaanlage im Vergleich zu Co2-Kältemittel nochmals deutlich erhöht.

Aufgrund der guten Ergebnisse im Förderprojekt SiCNV konnte AURORA bereits erste Projekte mit zwei namhaften Herstellern der Busbranche generieren, die im Rahmen eines Vorserien-Einsatz einer auf den jeweiligen Anwendungsfall adaptierter Wärmepumpe mit R290 Kältemittel vorsehen.

2.5. Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Aurora sind keine anderen Stellen bekannt, in denen SIC oder R290 mobil vergleichbar eingesetzt wird.

2.6. Veröffentlichungen

Bisher nicht geplant

2.6.1. Diplomarbeiten, Bachelorarbeiten, Belegarbeiten

keine

2.6.2. Tagungsbeiträge

S.Hütter, R.Kratzing, D.Scholz, S.Wetzstein, *SiC power electronics for auxiliaries in electric vehicles*, Poster, CIPS Int. Conference on Integrated Power Electronics, Berlin, 2020

J.Hickel, S.Hütter, R.Kratzing, D.Scholz, S.Wetzstein, *Projekt SiCNV Hochvoltantriebe mit integrierter SiC-Leistungselektronik für Nebenverbraucher in Elektrofahrzeugen*, Fachtagung Leistungselektronik BMBF VDIVDE-IT, Online, 2022

2.6.3. Messen

Aufgrund der aktuellen Situation (Covid-19-Pandemie) und dem ungewissen Fortgang bzw. der Wiederaufnahme des Messebetriebes in der EU, insbesondere in der Bundesrepublik Deutschland, gibt es zum jetzigen Zeitpunkt keine geplanten Messeauftritte seitens der Fa. Aurora in Bezug auf die Wärmepumpe mit R290 Kältemittel.

2.6.4. Zeitschriftenartikel

Fachbeiträge in der entsprechenden Fachpresse werden vermutlich erfolgen, sind aber zum Zeitpunkt des Berichtes noch nicht geplant.



Abbildung 27: Bus mit Wärmepumpe



Abbildung 28: Wärmepumpe mit neuen Gebläsen

Anhang A

Sicherheitsstudie R290 TÜV Süd (vertraulich)

Anhang B

Analyse Produktionsablauf (vertraulich)

Anhang C

Lastenheft Wärmepumpe (vertraulich)