

Bachelorarbeit

Michael Eßl

32666

Analyse des Mehrverbrauchs von Klimaanlage- systemen in Brennstoffzellenfahrzeugen unter ver- schiedensten klimatischen Bedingungen

08/2023 – 01/2024

Referent/in: Prof. Dr.-Ing. Robert Bjekovic

Korrefe- M.Sc. Fabius Epple

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Titel „Analyse des Mehrverbrauchs von Klimaanlageanlagen in Brennstoffzellenfahrzeugen unter verschiedensten klimatischen Bedingungen“ selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Alle Informationen in der genannten Arbeit, die anderen Quellen im Wortlaut oder auch dem Sinn nach entnommen wurden, habe ich durch eindeutige Angaben der Herkunft kenntlich gemacht. Zu diesen Informationen zählen auch Zeichnungen, einzelne Zahlenwerte, Skizzen oder bildliche Darstellungen.

Ich versichere, dass die o.g. Arbeit weder in gleicher noch in ähnlicher Form – auch nicht in Teilen – an dieser oder einer anderen Hochschule oder Prüfungsstelle vorgelegt wurde.

Datum und Unterschrift

18.01.2024  _____

Sperrvermerk

Die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Titel:

„Analyse des Mehrverbrauchs von Klimaanlageanlagen in Brennstoffzellenfahrzeugen unter verschiedensten klimatischen Bedingungen“

beinhaltet interne und vertrauliche Informationen des Unternehmens:

DLR Stuttgart

Pfaffenwaldring 38-40, 70569 Stuttgart

Eine Einsicht in diese Bachelorarbeit ist nicht gestattet. Ausgenommen davon sind die betreuenden Dozenten sowie die befugten Mitglieder des Prüfungsausschusses. Eine Veröffentlichung und Vervielfältigung der Bachelorarbeit – auch in Auszügen – ist nicht gestattet.

Ausnahmen von dieser Regelung bedürfen einer Genehmigung des Unternehmens:

DLR Stuttgart

Pfaffenwaldring 38-40, 70569 Stuttgart

Abteilung Fahrzeugkonzepte

Kurzfassung

Das Ziel der vorliegenden Bachelorarbeit war es, zu untersuchen, wie der Wasserstoffverbrauch eines Brennstoffzellenfahrzeuges beeinflusst wird, wenn das Klimaanlage-System als Nebenverbraucher eingeschaltet wird. Zur Bewertung des Einflusses des Klimaanlage-Systems wurden Umgebungsbedingungen wie Temperatur und Luftfeuchtigkeit variiert. Hierfür wurde der WLTC als Prüfzyklus für die Verbrauchsmessung und ein eigens entwickelter Zyklus namens 'konstante Geschwindigkeit' für die Leistungsaufnahme der Einzelkomponenten verwendet. Das für die Testfahrten gewählte Prüffahrzeug war ein Hyundai Nexo Baujahr 2019. Mit 6,2 kg Wasserstoff welcher in drei Tanks zwischengespeichert wird kann eine Reichweite, laut Hersteller von bis zu 756 km erreicht werden. Angetrieben wird der Hyundai Nexo über einen permanenterregten Asynchronmotor welcher von der 95 kW Brennstoffzelle gespeist wird. Im Prüffahrzeug selbst wurde eine Vielzahl an Sensoren verbaut um z.B Temperaturen im Innenraum oder Strom- und Spannungsmessungen an der Leistungselektronik, Elektromotor oder Brennstoffzelle vorzunehmen. Mithilfe eines Klimarollenprüfstands konnten Umgebungsbedingungen kontrolliert werden, zuzüglich lieferte dieser Messdaten bezüglich der Geschwindigkeit des Prüffahrzeugs, Temperatur und Luftfeuchtigkeit der Klimakammer. Durch die Auswertung und Analyse der Messdaten konnte festgestellt werden, dass es durch den Einsatz des Klimaanlage-Systems zu einer Reichweitenminderung kommt. Bei einer theoretischen Reichweite von 756 km wird diese um 6,892 km reduziert, bei -7 °C Umgebungstemperatur. Diese Minderung der Reichweite ist minimal, weshalb auf ein effizientes Klimaanlage-System geschlossen werden kann. Zuzüglich der Reichweite wurden die Einzelkomponenten der Klimaanlage und deren Verhalten bei unterschiedlichsten Umgebungsbedingungen untersucht. So weist der PTC-Heizer bei negativen Temperaturen eine höhere Leistungsaufnahme als der Klimakompressor auf da letzterer ausschließlich für die Kühlung zuständig ist und somit bei negativen Temperaturen nicht verwendet wird. Umgekehrt agieren die beiden Komponenten bei positiven Temperaturen. Des Weiteren werden in dieser Bachelorarbeit der Aufbau und die Funktionsweise des Klimaanlage-Systems sowie Unterschiede zu konventionellen Fahrzeugen beschrieben. Für diese Arbeit wurden praktische Arbeiten am Prüffahrzeug durchgeführt und die Messergebnisse im Anschluss an die Messkampagne ausgewertet.

Abstract

The aim of this bachelor thesis was to investigate how the fuel consumption of a fuel cell vehicle is affected when the air conditioning system is switched on as a secondary consumer. To evaluate the influence of the air conditioning system, ambient conditions such as temperature and humidity were varied. For this purpose, the WLTC was used as the test cycle for measuring consumption and a specially developed cycle called 'constant speed' for the power consumption of the individual components. The test vehicle chosen for the test drives was a 2019 Hyundai Nexa. 6.2 kg of hydrogen stored in three tanks can achieve a range of up to 756 km, according to the manufacturer. The Hyundai Nexa is powered by a permanently excited asynchronous motor which is fed by the 95 kW fuel cell. A large number of sensors were installed in the test vehicle itself, e.g. to measure temperatures in the interior or current and voltage measurements on the power electronics, electric motor or fuel cell. With the help of a climate roller test bench, environmental conditions could be controlled, plus this provided measurement data regarding the speed of the test vehicle, temperature and humidity of the climate chamber. By evaluating and analyzing the measurement data, it was possible to determine that the use of the air conditioning system leads to a reduction in range. With a theoretical range of 756 km, this is reduced by 6,892 km at -7 °C ambient temperature. This reduction in range is minimal, which is why it can be concluded that the air conditioning system is efficient. In addition to the range, the individual components of the air conditioning system and their behavior under a wide range of ambient conditions were examined. For example, the PTC heater has a higher power consumption at negative temperatures than the air conditioning compressor as the latter is only responsible for cooling and is therefore not used at negative temperatures. Conversely, both components operate at positive temperatures. Furthermore, this bachelor thesis describes the structure and function of the air conditioning system as well as differences to conventional vehicles. For this thesis, practical work was carried out on the test vehicle and the measurement results were evaluated following the measurement campaign.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Zielsetzung und Vorgehen	1
1.2	Motivation	1
1.3	DLR/FK	2
2	Stand der Technik	3
2.1	Einblick Innenraumklimatisierung	3
2.2	Klimaanlagensystem	6
2.2.1	Aufbau und Funktionsweise	6
2.2.2	Kältemittel	12
2.3	Spezifikationen des Klimakonzepts Hyundai Nexo	14
2.4	Datenlage	17
3	Messtechnik	21
3.1	Rollenprüfstand	21
3.1.1	Grundsätzliche Informationen: Klimarollenprüfstand	21
3.1.2	Coriolis-Sensor	23
3.2	On-Board-Diagnosetool	24
3.3	Sensorik und Prüffahrzeug	25
4	Testphase	28
4.1	Testszenarien	28
4.1.1	WLTC	28
4.1.2	Konstante Geschwindigkeit	30
4.1.3	Vorbereitungen für die Testphase	31
5	Datenanalyse	32
5.1	IMC Famos Enterprise 2021	32
5.2	Hyundai Nexo	33
5.2.1	Innenraumtemperatur	33
5.2.2	Verbräuche	37
5.2.3	Verbräuche mit und ohne Klimaanlage	39
5.3	Verbräuche der Einzelkomponenten	42
5.3.1	Lüfter	42
5.3.2	Klimakompressor	46
5.3.3	PTC-Heizer	49

6	Resümee	52
6.1	Zusammenfassung	52
6.2	Fazit	52
6.3	Ausblick	54
7	Literaturverzeichnis	57

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1 DLR Stuttgart [1]	2
Abb. 2-1 Mittlere Lufttemperatur Fahrzeuginnenraum/Außenlufttemperatur [2]	3
Abb. 2-2 lokale Luftgeschwindigkeit über Lufttemperatur [2]	4
Abb. 2-3 Herzfrequenz über Zeit [2]	5
Abb. 2-4 Scrollkompressor [4]	7
Abb. 2-5 Aufbau Kondensator [3]	8
Abb. 2-6 Aufbau Sammelbehälter [3]	9
Abb. 2-7 Expansionsventil mit Bauteilbeschreibung [5]	10
Abb. 2-8 Rundrohr-Verdampfer [7]	11
Abb. 2-9 Aufbau Innerer Wärmetauscher [9]	12
Abb. 2-10 log p-h Diagramm	13
Abb. 2-11 Kältemittelkreislauf	15
Abb. 2-12 Aufbau und Funktion Plattenwärmetauscher [12]	16
Abb. 2-13 Reichweite über AC mit verschiedenen Einstellungen [13]	18
Abb. 2-14 Alterungseffekt über Verbrauch [13]	19
Abb. 3-1 Klimarollenprüfstand [16]	22
Abb. 3-2 Coriolis-Sensor	24
Abb. 3-3 On Board Diagnose Tool X32 Pro 4 [19]	25
Abb. 3-4 Sensorplan Hyundai Nexo [20]	25
Abb. 4-1 Verlauf WLTC-Zyklus [26]	28
Abb. 4-2 Stufenform konstante Geschwindigkeit	30

Abb. 5-1 IMC Famos Overlay	32
Abb. 5-2 Innenraumtemperaturverlauf bei -7 °C.....	33
Abb. 5-3 Innenraumtemperaturverlauf bei -25 °C.....	34
Abb. 5-4 Innenraumtemperatur bei 23 °C.....	35
Abb. 5-5 Innenraumtemperatur bei 40 °C.....	36
Abb. 5-6 Vergleich aller Verbräuche eines WLTC's	37
Abb. 5-7 Gesamtverbrauch WLTC, -7 °C und 70% Luftfeuchte	39
Abb. 5-8 Gesamtverbrauch WLTC, -25 °C und 70% Luftfeuchte	40
Abb. 5-9 Gesamtverbrauch WLTC, 23 °C und 70% Luftfeuchte	41
Abb. 5-10 Lüfterstrom bei 23 °C und -7 °C.....	43
Abb. 5-11 Lüfterstrom bei 40 °C und -25 °C.....	44
Abb. 5-12 Klimakompressorstrom bei -25 °C und 40 °C	46
Abb. 5-13 Klimakompressorstrom bei -7 °C und 23 °C	48
Abb. 5-14 Strom PTC bei -7 °C und 23 °C	49
Abb. 5-15 Strom PTC bei -25 °C und 40 °C	50

Tabellenverzeichnis

Tab. 2-1 Unterscheidungsmerkmale	19
Tab. 2-2 Unterschied WLTC zu NYCC [5]	20
Tab. 3-1 Daten Rollenprüfstand	21
Tab. 3-2 Sensorik Klimarollenprüfstand	23
Tab. 3-3 Informationen Hyundai Nexo [24]	27
Tab. 4-1 Unterscheidungsmerkmale RDE zu WLTC	29
Tab. 5-1 Absoluter Verbrauch auf 100 km, aller Testfahrten	38
Tab. 5-2 Mehrverbrauch von H ₂ durch Verwendung des Klimaanlageansystems	41
Tab. 5-3 Reichweitenminderung	42
Tab. 5-4 Verbrauch [W] Lüfter	45
Tab. 5-5 Verbrauch [kW] Klimakompressor	48
Tab. 5-6 Verbrauch [kW] PTC-Heizer	51
Tab. 6-1 Zusammenfassung der Ergebnisse	53
Tab. 6-2 Reichweitenminderung auf 756 km Reichweite	53

Abkürzungsverzeichnis

WLTC	Worldwide harmonized light vehicle test cycle
H ₂	Wasserstoff
HVAC	Heating, Ventilation and Air Conditioning
MEA	Membran Elektroden Einheit
GWP	Global warming potential
COP	Coefficient of performance
WLTP	Worldwide harmonized light vehicle test procedure
CAN	Controller Area Network
OBD	On-Board-Diagnose
AC	Air condition
HV	Hochvolt (bei Fahrzeugen mit el. Antriebsstrang, 400V System)
BZ	Brennstoffzelle
RDE	Real drive emissions
PEMS	Portable emission measurement system
SOC	State of charge
BEV	Battery Electric Vehicle
FCEV	Fuel cell electric vehicle

1 Einleitung

1.1 Zielsetzung und Vorgehen

Ein Ziel dieser Arbeit ist es, die Eigenschaften des Kältekreislaufs und des Klimakonzeptes eines Brennstoffzellenfahrzeug zu identifizieren und darzustellen. Durch Zusammenarbeit mit einer Hyundai Vertragswerkstatt konnten spezifische Informationen ausgetauscht und durch Arbeiten am Versuchsfahrzeug vertieft werden. Ein weiteres Ziel dieser Arbeit ist es, den Einfluss der Klimaanlage auf den Verbrauch und die Reichweite von Brennstoffzellenfahrzeugen zu untersuchen. Dabei dient ein Hyundai Nexo, mit elektrischem Antrieb durch eine Brennstoffzelle und Wasserstofftanks als Versuchsfahrzeug. Es wird analysiert, wie Umgebungsbedingungen wie Temperatur und Luftfeuchtigkeit die Leistungsaufnahme der Klimaanlage beeinflussen und somit den Wasserstoffverbrauch des Fahrzeugs erhöhen können. Daher werden verschiedene Umgebungsbedingungen auf dem Klimarollenprüfstand simuliert. Die Datensätze werden später in der Testphase mithilfe der Software IMC Famos ausgewertet und verglichen, während auch die Reichweitenminderung aufgrund der erhöhten Leistung der Klimaanlage betrachtet wird. Die Änderungen der Reichweite können mithilfe des WLTC-Zyklus reproduzierbar ermittelt werden. Das Prüffahrzeug ist mit entsprechender Messtechnik ausgestattet. Somit können Daten bezüglich dem Kraftstoff- bzw. des Stromverbrauchs sowie der Einzelkomponenten gesammelt und eine Analyse der Ergebnisse durchgeführt werden.

1.2 Motivation

Durch den fortschreitenden Klimawandel müssen in Zukunft extremere Temperaturen erwartet werden, welche verschiedene Komponenten von Fahrzeugen, darunter die Klimaanlage, stärker belasten werden. Die größeren Temperaturunterschiede zwischen dem Innenraum und der Umgebung führen zu einem erhöhten Energiebedarf den die Klimaanlage benötigt, um die gewünschte Innenraumtemperatur zu erreichen oder zu halten. Dieser zusätzliche Energiebedarf hat einen negativen Einfluss auf die Reichweite des Fahrzeugs, weshalb zukünftige Klimaanlage systeme effizienter gestaltet werden müssen. Mit der Elektrifizierung des PKW-Sektors hat die Reichweite einen entscheidenden Einfluss auf das Kaufverhalten potenzieller

Kunden. Ein weiterer wichtiger Faktor ist die verbrauchsoptimierte Nutzung der Klimaanlage, da hier das Potenzial zur Energieeinsparung liegt. Es soll ein Verständnis dafür vermittelt werden, wie die Klimaanlage-Konfiguration unter Berücksichtigung der Außentemperatur die Reichweite beeinflussen kann.

1.3 DLR/FK

Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt in Stuttgart ist ein Forschungszentrum der Bundesrepublik Deutschland. In Stuttgart arbeiten mehr als 700 Mitarbeiter*innen in 6 Instituten an verschiedensten Themen der Zukunft. Das Institut für Fahrzeugkonzepte beschäftigt sich mit emissionsfreien Antrieben, dazu gehören Hybridantriebe, Brennstoffzellensysteme oder rein elektrische Antriebe. Auf dem Allrad-Klimarollenprüfstand können, alle oben genannten Antriebskonzepte unter verschiedensten Bedingungen getestet und hinsichtlich ihrer Funktionsfähigkeit oder Effizienz bewertet werden. Ein weiteres Themenfeld ist das Thermomanagement, welches beispielsweise bei der Sektorenkopplung eine zentrale Rolle spielt. Hierbei wird eine Verbindung von Haus zu Fahrzeug geschaffen, was es ermöglicht den im Fahrzeug gespeicherten Wasserstoff zum Beheizen des Hauses zu verwenden. Das DLR forscht bereits an Themen im Bereich des Energieverbrauchs von Klimaanlagen. Um die mit der Nutzung der Klimaanlage einhergehende Reichweitenreduzierung zu lösen, soll die potenzielle Energie, die ungenutzt als Druckenergie im Wasserstofftank gespeichert ist, mittels eines wasserstoffbasierten Klimatisierungsgeräts (H₂-A/C) nutzbar gemacht werden [1].



Abb. 1-1 DLR Stuttgart [1]

2 Stand der Technik

2.1 Einblick Innenraumklimatisierung

Die Innenraumklimatisierung oder in der Fachsprache „Raumluftechnische Anlage“ mit thermodynamischen Luftbehandlungsfunktionen ist ein wichtiger Bestandteil heutiger Fahrzeuge. Der Nutzer muss in der Lage sein, die Temperatur im Fahrzeuginnenraum unabhängig von der Fahrgeschwindigkeit zu regulieren. Die Fahrzeugklimatisierung beeinflusst nicht nur den Komfort, sondern auch die Sicherheit des Fahrzeugs und seiner Passagiere vor und während der Fahrt. Enteisen der Scheiben im Winter, Entfeuchtung der Luft und Reduktion der Schweißbildung im Sommer sind weitere Aufgaben der Fahrzeugklimatisierung. Im Gegensatz zur Klimatisierung von Gebäuden, welche eine optimale Temperatur von 22 °C vorgibt, kann die Temperatur in Fahrzeugen nicht mit einer konstanten Temperatur beschrieben werden. Verschiedene Faktoren wie Luftströmung, Sonneneinstrahlung, Luftfeuchtigkeit, Bekleidung und Aktivitätsgrad sind dynamisch und haben somit einen schwankenden Einfluss auf die als angenehm empfundene Temperatur.

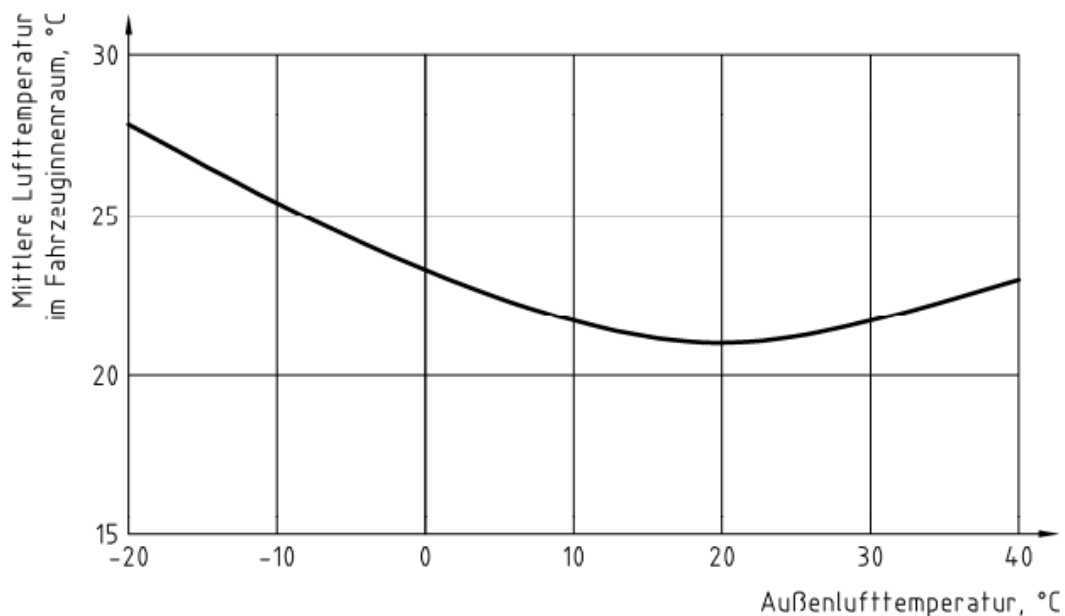


Abb. 2-1 Mittlere Lufttemperatur Fahrzeuginnenraum/Außenlufttemperatur [2]

Die Temperaturkurve in der beigefügten Abb. 2-1 zeigt die bestmögliche Lufttemperatur im Fahrzeug in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur. Der auf der x-Achse angegebene Temperaturbereich entspricht dem üblichen Bereich für mitteleuropäische Außentemperaturen, wie er in der DIN 1946-3:2006-07 beschrieben wird. Bei niedrigeren Außentemperaturen wird eine Innenraumtemperatur über 22 °C empfohlen, da die Wärmeabstrahlung umliegender Flächen ausgeglichen werden muss. Bei hohen Außentemperaturen sollte die Innenraumtemperatur ebenfalls über 22 °C betragen, da die vom Fahrer abgegebene Konvektion und die Sonneneinstrahlung berücksichtigt werden müssen. Zudem sollte die Luft im Kopfbereich des Innenraums um 2 K bis 10 K kühler sein als im Fußbereich, um den Klimakomfort zu erhöhen [2].

Weiterhin gibt es noch andere Faktoren, die das Behaglichkeitsgefühl beeinflussen. Die Strömungsgeschwindigkeit und Temperatur sollten entsprechend der nachfolgenden Abbildung eingestellt werden, um einen möglichst hohen Klimakomfort zu erreichen.

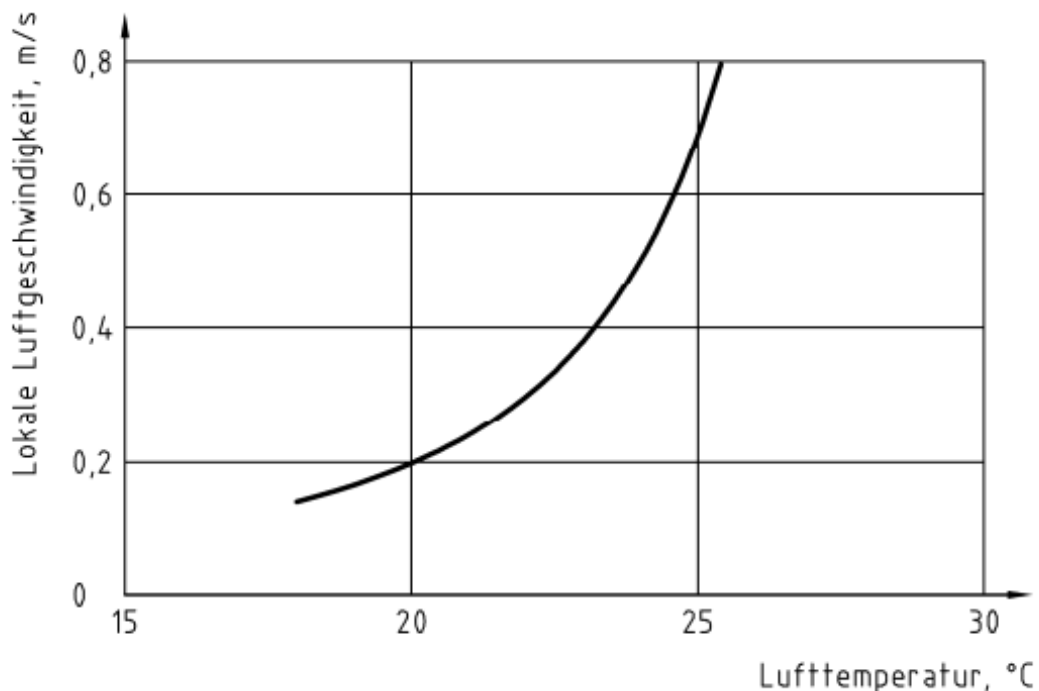


Abb. 2-2 lokale Luftgeschwindigkeit über Lufttemperatur [2]

Das Innenraumklima hat auch einen physiologischen Einfluss. Der Einstieg in ein Fahrzeug, das von der Sonne aufgeheizt wurde, kann eine starke Belastung für das Herz-Kreislauf-System darstellen und Folgen wie eine Senkung der Reaktionszeit

und veränderte Wahrnehmung mit sich bringen. In der folgenden Abb. 2-3 sind unterschiedliche Herzfrequenzen in Abhängigkeit von der Zeit nach dem Einsteigen in ein Fahrzeug, das von der Sonne aufgeheizt wurde, dargestellt.

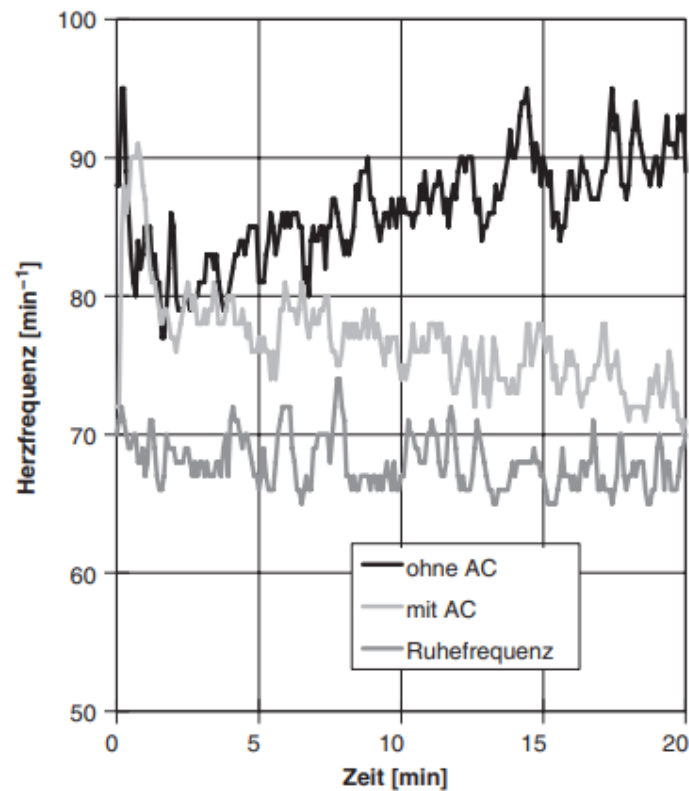


Abb. 2-3 Herzfrequenz über Zeit [2]

Nach etwa 20 Minuten nähert sich die Herzfrequenz bei eingeschalteter Klimaanlage der Ruheherzfrequenz an. Bei ausgeschalteter Klimaanlage steigt die Herzfrequenz kontinuierlich an, bis der Testfahrer nach 45 Minuten abbrechen muss, als seine Herzfrequenz maximal 105 Schläge/min erreicht hat [2]. Die oben genannten Informationen bezüglich der Innenraumtemperatur sowie der lokalen Luftgeschwindigkeit bilden die Grundlagen für die Einstellungen der durchgeführten Tests, nachzulesen im Kapitel 5.2.1.

2.2 Klimaanlage

2.2.1 Aufbau und Funktionsweise

Die grundlegende Aufgabe einer Kfz-Klimaanlage besteht darin, die zugeführte Luft aufzubereiten und im Inneren des Fahrzeuges ein angenehmes Klima zu schaffen. Dies geschieht mittels unterschiedlicher Komponenten und dem Kältemittel, welches einen Kreisprozess durchläuft. Es wird nach drei Betriebsweisen unterschieden.

- Kühlen (durch Verdampfer)
- Heizen (durch PTC-Heizer)
- Entfeuchten (durch einen Mischbetrieb)

Da sich Klimaanlage von verschiedenen Herstellern unterscheiden können muss hier erwähnt werden, dass sich der folgende Abschnitt explizit auf das Testfahrzeug bezieht. Das Kältemittel wird in einem Scrollkompressor verdichtet und somit auf ca. 60 °C bis 100 °C erhitzt. Durch die Erhitzung des Kältemittels R1234yf verdampft dieses und wird nun durch einen zusätzlichen Wärmetauscher geleitet, dort wird ein geringer Anteil der Wärmeenergie an das Kühlmittel abgegeben um den Brennstoffzellenstack, bei niedrigen Außentemperaturen auf Betriebstemperatur zu temperieren. Im Kondensator wird dem Kältemittel die zugeführte Wärme wieder entzogen. Im inneren Wärmetauscher werden das Kondensatorseitig abgekühlt und das Verdampferseitig erhitzte Kältemittel aneinander vorbeigeführt, hierdurch kann die Effizienz (COP) des Systems geringfügig gesteigert werden. Eine Vermischung, der unterschiedlich temperierten Kältemittel ist hierbei nicht möglich, dies wird durch den Aufbau des inneren Wärmeübertragers verhindert. Im Unterpunkt „innerer Wärmeübertrager“ wird dies genauer beschrieben. Über eine Druckabsenkung mittels Expansionsventil erfährt das Kältemittel eine Zustandsänderung welche für den nächsten Schritt benötigt wird. Die Wärmeaufnahme der zu kühlenden Luft ist die Grundlage für den Verdampfungsprozess. Das nun gasförmige Kältemittel, mit geringer Temperatur wird nun weiter Richtung Kompressor geleitet und von dort an beginnt der Kreislauf erneut [3].

Scrollverdichter:

Die Funktionsweise des Scrollverdichters beruht auf dem Verdrängerprinzip, hierfür sind zwei Spiralen verbaut. Eine stationäre Spirale mit der Auslassöffnung und einer zweiten Spirale welche sich auf einer kreisförmigen Bahn exzentrisch bewegt. Durch diese Bewegungen werden Gastaschen Richtung Mittelpunkt geschoben und zugleich komprimiert. Die folgende Abb. 2-4 veranschaulicht den Bewegungsablauf bis hin zum Ausströmen des komprimierten Kältemittels.

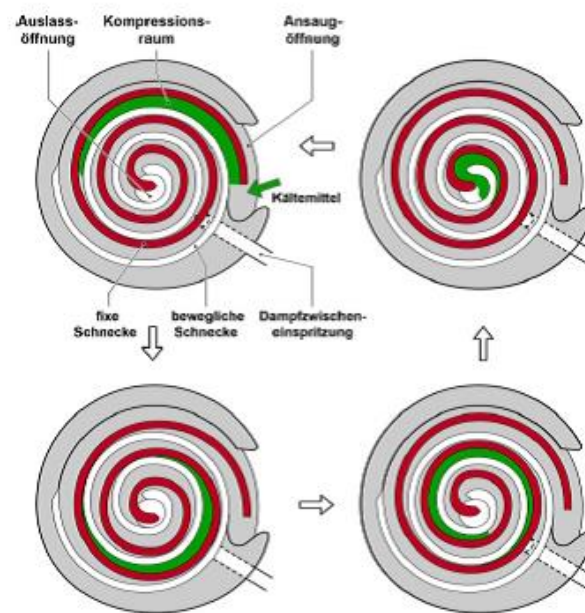


Abb. 2-4 Scrollkompressor [4]

In herkömmlichen Kraftfahrzeugen werden die Verdichter/Kompressoren über den Riementrieb angetrieben, da der Hyundai Nexso aber über einen rein elektrischen Antrieb verfügt wird dieser mittels eines Elektromotors mit entsprechender Leistungselektronik betrieben. Dies bietet Vorteile wie der exakten Einstellung der Verdichterfrequenz auf wechselnde Lastprofile. Um diese Effizienzsteigerung nicht zu beeinflussen, wird das Kältemittel vor dem Verdichtungsprozess um den Elektromotor und die Leistungselektronik geleitet um eine optimale Betriebstemperatur zu gewährleisten [3].

Kondensator/Verflüssiger

Die Hauptaufgabe des Kondensators ist, die im Verdichter und Verdampfer zugeführte Wärmemenge an die Umgebungsluft abzugeben. Hierzu werden in PKWs meist Flachrohrkondensatoren verwendet. Das Heißgas, welches vom Verdichter Richtung Kondensator geleitet wird, fließt über Flachrohre in horizontaler Richtung durch den Kondensator hindurch. Zwischen den untereinander liegenden Flachrohren sind lamellenförmige Strukturen angebracht welche die Aufgabe haben dem Kältemitteldampf die Wärmemenge zu entziehen. Dies geschieht über den Fahrtwind, in gewissen Situationen kann dieser nicht ausreichen und der Zusatzlüfter muss zugeschaltet werden. Durch Stege, die an den Außenseiten angebracht sind, kann das Kältemittel von oben nach unten durch den Kondensator geführt werden. Des Weiteren kann somit eine Unterteilung in gewisse Zonen erfolgen.

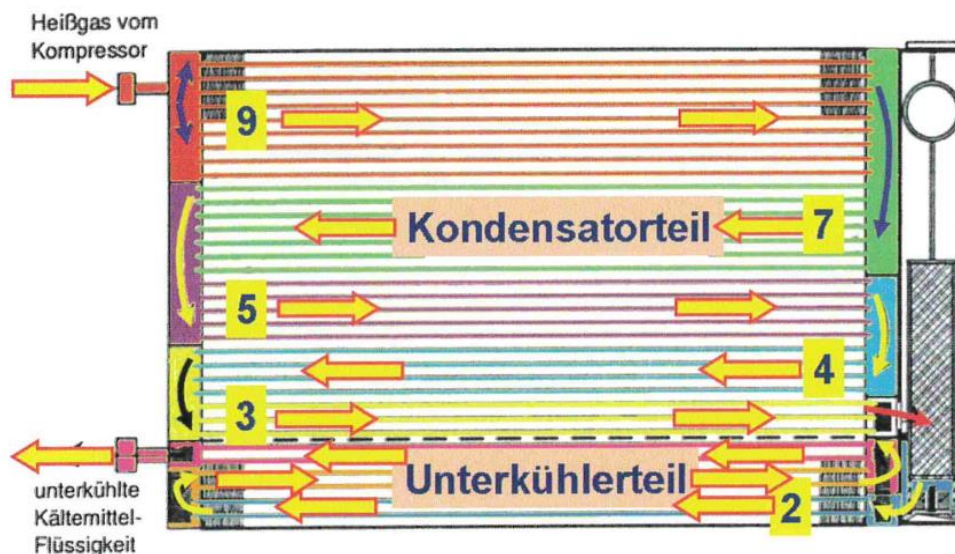


Abb. 2-5 Aufbau Kondensator [3]

Ein weiterer wichtiger Bestandteil ist der an der Hochdruckseite befestigte Sammelbehälter. Dieser hat die Aufgabe, das nachfolgende Expansionsventil vor Dampfblasen zu schützen da nur mit reiner Flüssigkeit ein optimaler Betrieb garantiert werden kann. Verschiedenste Filtermaterialien in Form von Matten und Kugeln reinigen das Kältemittel von Verschmutzungen und eventuellen Wasseransammlungen. Der Sammelbehälter kann grundsätzlich wie folgt aufgebaut werden [3].

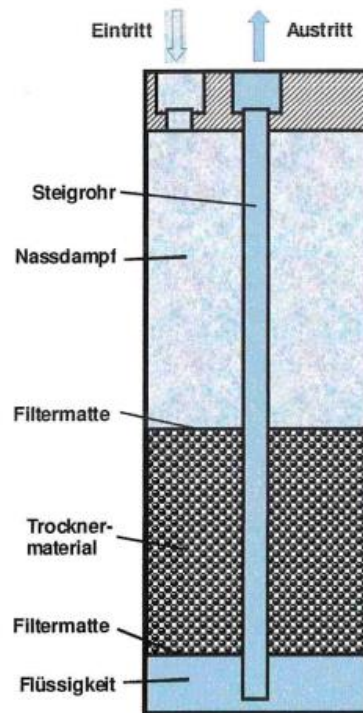


Abb. 2-6 Aufbau Sammelbehälter [3]

Expansionsventil

Die Hauptaufgabe des Expansionsventils besteht darin, das Kältemittel auf der Hochdruckseite auf den Verdampferdruck zu reduzieren. Dies geschieht durch einen sehr engen Querschnitt, der über eine Ventalnadel variabel verändert werden kann. Durch die Druckabsenkung verdampft bereits ein Teil des Kältemittels, bevor es in den Verdampfer gelangt. Das Expansionsventil dient dazu, das Kältemittel vor dem Eintritt in den Verdampfer zu dosieren, da die Kältemittelmenge einen Einfluss darauf hat, ob die gesamte Menge verdampft und am Ausgang noch überhitzt wird. Der genaue Aufbau des Expansionsventils wird in Abb. 2-7 veranschaulicht.

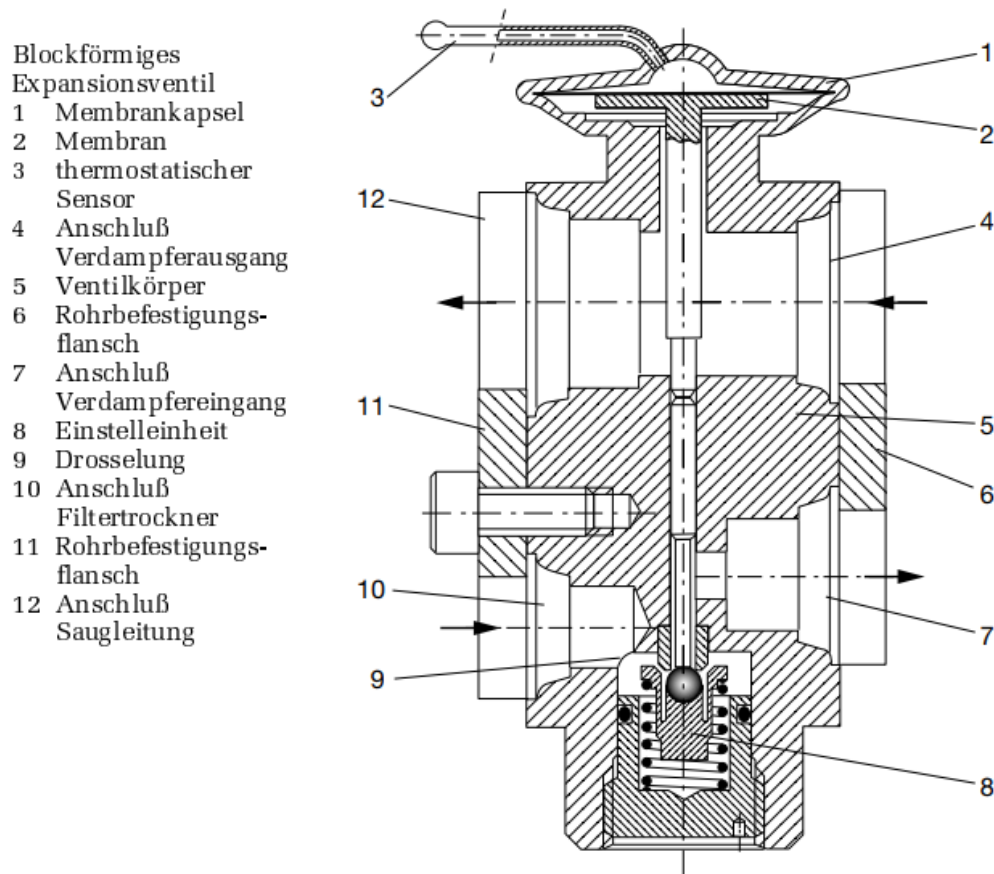


Abb. 2-7 Expansionsventil mit Bauteilbeschreibung [5]

Mittels des Drucks und der Temperatur des Kältemittels wird die Überhitzung geregelt. Der Saugdruck drückt die Membran nach oben hingegen der Fühlerdruck die Membran nach unten drückt. Erzeugt wird der Fühlerdruck mittels Kältemittelnassdampf im Fühler. Diese erwärmt sich durch die Saugdampf Temperatur, hierbei entsteht eine Volumenvergrößerung was zu einem erhöhten Druck oberhalb der Membran führt.

Steigt nun die Überhitzung an so erwärmt sich auch der Fühler und der Fühlerdruck, oberhalb der Membran steigt. Die Folge ist eine Abwärtsbewegung der Membran was zu einer höheren Menge an Kältemittel führt und somit der Erhitzung entgegenwirkt. Durch die Senkung der Fühler Temperatur sinkt auch der Fühlerdruck und der Membran erfährt eine Aufwärtsbewegung, was eine Senkung der Kältemittelmenge zur Folge hat [6].

Verdampfer

Der Verdampfer ist für die Kühlung des Fahrgastraums zuständig. Hierbei wird unter niedrigem Druck stehendes Kältemittel in den Verdampfer eingespritzt. Da das Kältemittel eine niedrigere Temperatur hat als die Umgebung, wird das Kältemittel im Verdampfer erwärmt. Da die zum Verdampfer geleitete Luft nun Wärmeenergie entzogen wurde kann diese als Kühlung Richtung Fahrgastraum geleitet werden.

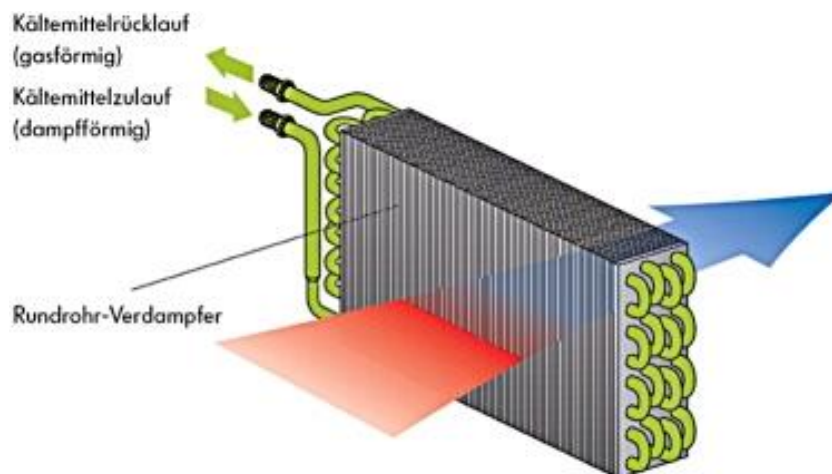


Abb. 2-8 Rundrohr-Verdampfer [7]

Durch das Expansionsventil verdampft bereits eine geringe Menge Kältemittel, der Rest wird in den Verdampfer eingespritzt sodass dieser sich an den Rohrwänden absetzt. Der Kältemitteldampf kann nun durch den Hohlraum der Rohre strömen. Die Verrohrungen sind mit Lamellen umschlossen damit sich die nutzbare Fläche, zum Wärmeaustausch vergrößert. Ein wichtiger Parameter für eine optimale Verdampfung ist die Überhitzung. Ist diese zu klein gewählt kann der nachfolgende Kompressor, durch Wasserschläge beschädigt werden. Ist die Überhitzung zu hoch gewählt, sinkt die Effektivität des Systems [3].

Innerer Wärmetauscher

Der innere Wärmeübertrager führt das Kältemittel vom Kondensator- und Verdampferaustritt aneinander vorbei. Dabei wird dem Kältemittel, nach dem Kondensator Wärmeenergie entzogen und somit weiter heruntergekühlt. Entgegengesetzt wird dem Kältemittel nach dem Verdampfer Wärmeenergie hinzugefügt und somit weiter

erhitzt. Dies dient zur Steigerung der Leistungszahlen (COP) und somit auch der Effizienz des Gesamtsystems [8].

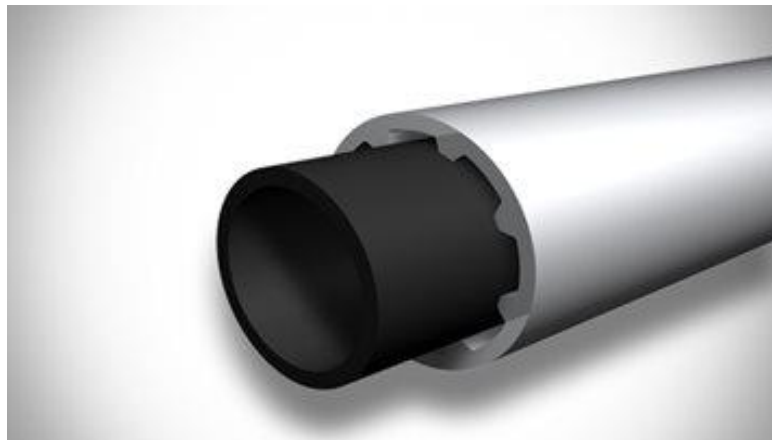


Abb. 2-9 Aufbau Innerer Wärmetauscher [9]

Abb. 2-9 zeigt den Aufbau eines inneren Wärmeübertragers. Eines der Medien fließt durch den inneren Kanal zugleich das zweite Medium, in entgegengesetzter Richtung in den äußeren Kammern fließt. Durch verschiedene Materialien wie Kupfer oder Aluminium und die Anzahl der außen liegenden Kammern kann die Effektivität des IWT beeinflusst werden [7].

2.2.2 Kältemittel

Ein wichtiger Bestandteil einer optimal funktionierenden Klimaanlage ist das Kältemittel. Im Hyundai Nexso Baujahr 2019 wird das in Europa zugelassene Kältemittel R-1234yf eingesetzt. Aufgrund Restriktionen hinsichtlich der Klimaverträglichkeit wurden Vorgängerversionen wie z.B. R134a in Neufahrzeugen verboten. Die Kältemittel werden anhand ihres GWP (global warming potential) eingestuft. Aufgrund seines hohen GWP-Wertes von 1430 wurde das Kältemittel im Jahr 2011 verboten und durch R1234yf ersetzt, das mit einem GWP-Wert von 4 weniger klimaschädlich ist [10].

Um die Zuluft zu temperieren, muss das Kältemittel seinen Aggregatzustand ändern. Dieser Prozess erfolgt durch den Kompressor, Verdampfer und Kondensator. Wichtige Faktoren im Kältemittelkreislauf sind der Druck und die resultierende Enthalpie. Falls diese Parameter nicht entsprechend der Umgebung angepasst wer-

den, sinkt der COP ("coefficient of performance"), der die Effizienz des Kreisprozesses angibt und sich aus dem Verhältnis der Kälteleistung zur Verdichterleistung errechnet.

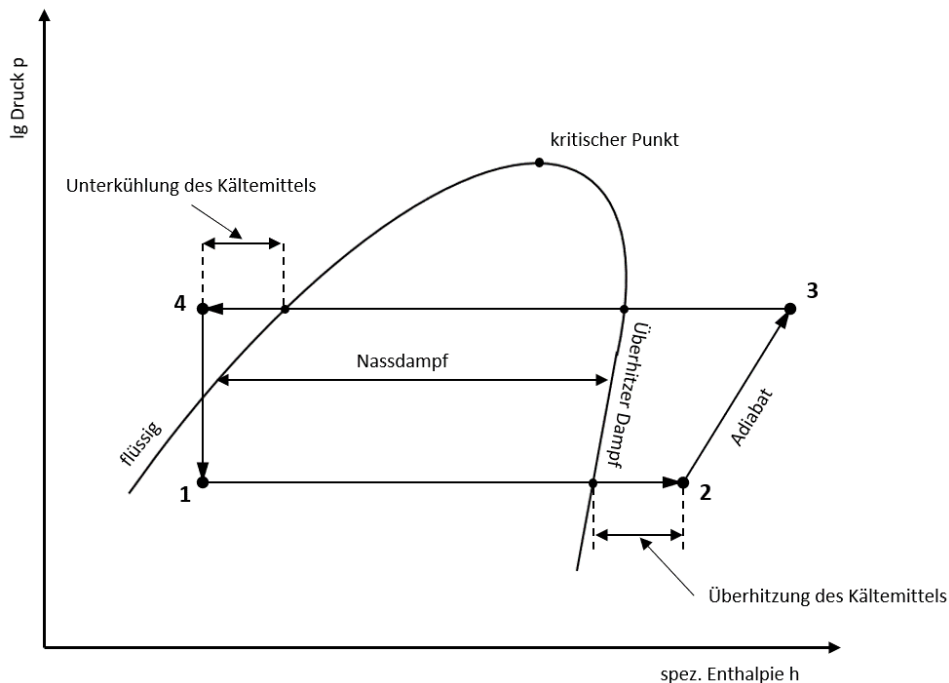


Abb. 2-10 log p-h Diagramm

Mithilfe des logarithmisch-p-h Diagramms kann der Kältemittelkreislauf und somit die Temperierung nachvollzogen werden.

In der Ausgangslage befindet sich das Kältemittel, bei niedrigem Druck und niedriger Enthalpie, im Punkt 1, es entsteht Nassdampf. Nassdampf ist ein Gemisch aus der flüssigen und dampfförmigen Phase des Mediums. Das Kältemittel nimmt durch den Verdampfungsprozess Wärme auf, welche als Kälteleistung bezeichnet wird. Mit steigender Enthalpie und gleichbleibendem Druck erreicht das Kältemittel Punkt 2 im überhitzten Dampfbereich. Das Kühlmittel wird absichtlich überhitzt, um mögliche Flüssigkeitsschläge auf das Verdichterrad zu verhindern. Durch den Verdichtungsprozess entsteht ein erhöhter Druck, welcher mit einer adiabatischen Erhöhung der Enthalpie einhergeht. Es wird angenommen, dass während des Verdichtungsprozesses keine Wärme an den Verdichter abgegeben wird und somit eine adiabate Erhöhung stattfindet. Bei der Unterkühlung des Kältemittels wird diesem zusätzliche Energie entzogen, die im Verdampfungsprozess wieder als Wärme hin-

zugefügt werden kann. Ein bedeutender Faktor während des Kühl- und Verdichtungsprozesses ist der kritische Punkt, welcher nicht überschritten werden darf, da ansonsten eine Verflüssigung des gasförmigen Stoffs nicht mehr möglich ist.

In der Entspannungsphase des Kältemittelkreislaufs findet der letzte Schritt statt, bei dem Punkt 4 auf Punkt 1 abgesenkt wird. Die Senkung auf den Verdampferdruck erfolgt bei konstanter Enthalpie (Wärmeinhalt). Während dieser Absenkung verdampft bereits ein Teil des Kältemittels, da Punkt 1 bereits im Nassdampfbereich liegt. Der Abschnitt zwischen Punkt 1 und der Flüssigkeitslinie wird als Drosselgas oder Flashgas bezeichnet [3].

2.3 Spezifikationen des Klimakonzepts Hyundai Nexo

Der Hyundai Nexo unterscheidet sich nicht nur in seinem Antriebskonzept von herkömmlichen Fahrzeugen, sondern auch durch sein spezielles Thermomanagement. Um diese Spezifikation besser nachvollziehen zu können, wird der Kältemittelkreislauf in der nachfolgenden Abb. 2-11 veranschaulicht.

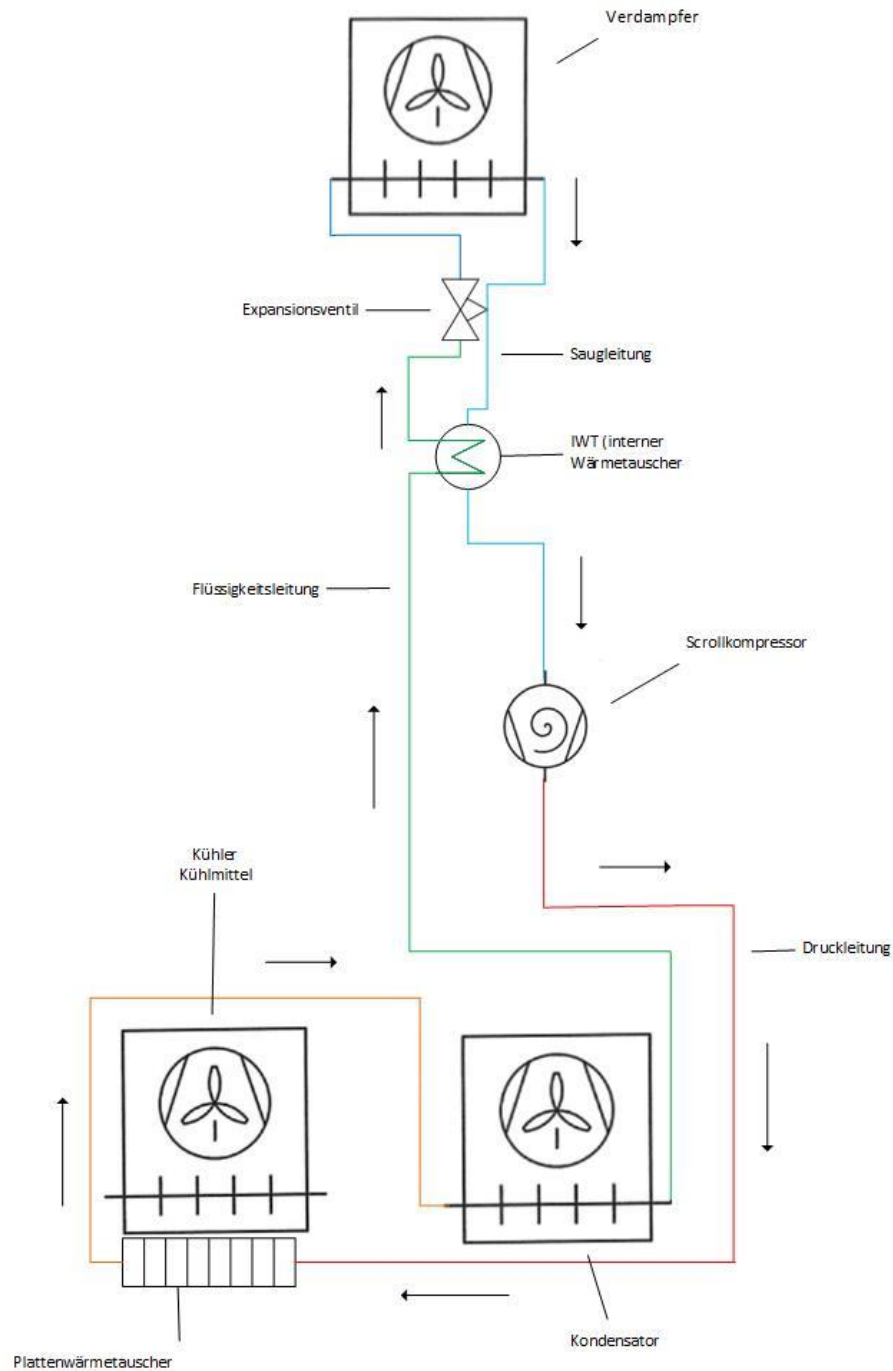


Abb. 2-11 Kältemittelkreislauf

Das Kältemittel das durch den Verdichter komprimiert wurde, strömt zuerst durch einen Plattenwärmetauscher, der einen weiteren Anschluss für das Kühlmittel bietet. Die Arbeitstemperatur von Membran-Brennstoffzellen liegt in der Regel zwischen 20 °C und 80 °C und sollte im Idealfall möglichst schnell erreicht werden, um einen Wirkungsgrad zwischen 50% und 70% zu erzielen [11]. Um dies zu realisieren wird, dass bereits erwärmte Kältemittel dazu verwendet den Kühlkreislauf der

Brennstoffzelle zu temperieren. Im Plattenwärmetauscher gibt das erhitzte Kältemittel ein Teil seiner Wärmeenergie an das Kühlmittel ab, um die gewünschte Temperatur und somit den Arbeitsbereich, der Brennstoffzelle zu erreichen. Sobald sich der Kühlkreislauf ausreichend erwärmt hat und somit die beiden Medien annähernd die gleiche Temperatur aufweisen, bietet dieser zusätzliche Wärmetauscher keine Funktion mehr.

Die nachfolgende Abb. 2-12 veranschaulicht den Aufbau und die Funktionsweise eines Plattenwärmetauschers.

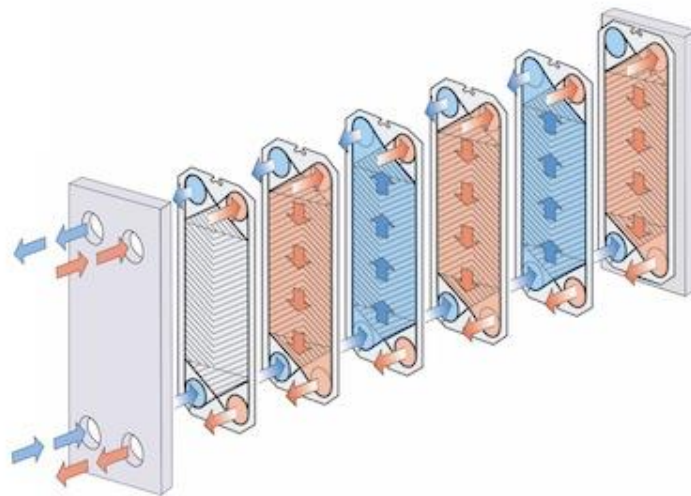


Abb. 2-12 Aufbau und Funktion Plattenwärmetauscher [12]

Der Plattenwärmetauscher besteht aus zahlreichen Einzelplatten welche über Kühlkanäle miteinander verbunden sind. Diese Platten werden wechselweise von dem kühleren Kühlmittel und dem erhitzten Kältemittel durchflossen. Durch diese Wechselwirkung kann die Wärmeübertragung optimal ablaufen [12].

2.4 Datenlage

Mit den im Folgenden durchgeführten Versuchsreihen wird der Mehrverbrauch an Wasserstoff welcher bei Inbetriebnahme des Klimaanlage systems entsteht, untersucht. Um diese Fragen zu beantworten wurden Fahrzyklen herangezogen welche sich gut hinsichtlich des Verbrauches vergleichen lassen. Zudem wurden unterschiedliche Umgebungstemperaturen eingestellt, welche sich im Bereich von -25 °C bis +55 °C bewegen. Da die Luftfeuchtigkeit auch auf die Kühlleistung des Testfahrzeugs einen Einfluss hat wurde diese ebenso bei den Versuchsreihen variiert und zwar mit hoher Luftfeuchtigkeit über 70% und geringer Luftfeuchtigkeit unter 30%. Um im späteren Verlauf der Versuchsreihen, die Vergleichbarkeit zu gewährleisten wurden alle Zyklen mit allen Umgebungsbedingungen und jeweils mit und ohne Klimaanlage gefahren.

Bei der Recherche nach ähnlichen oder gleichen Versuchsreihen ist aufgefallen, dass es bezüglich dieses Themas noch Forschungslücken gibt, die durch die Beendigung dieser Arbeit geschlossen werden können. Zwar gibt es vereinzelt Analysen, die sich mit Brennstoffzellenfahrzeugen beschäftigen, jedoch nicht in dem hier durchgeführten Umfang. Die im folgenden Abschnitt beschriebene Studie kommt dieser Arbeit am nächsten. Die Umfänge unterschieden sich jedoch und zwar bezüglich der Anzahl an durchgeführten Tests, dem verwendeten Prüfzyklus, den Umgebungstemperaturen sowie der eingestellten Innenraumtemperatur, die Unterscheidungsmerkmale werden in Tab 2-1 aufgeführt. Im nachfolgenden Abschnitt wird die Studie genauer betrachtet und die Unterscheidungsmerkmale hervorgehoben.

"Analysis of air conditioning system impact on a fuel cell vehicle performance based on a realistic model under actual urban conditions" ist eine gemeinsame Forschungsarbeit von vier technischen Universitäten aus Guangdong, den USA, dem Iran und Kuwait. Untersucht wurde der Einfluss der Sonneneinstrahlung, der Fahrzeugfarbe, der Nutzung der Klimaanlage, der Innenraumtemperaturen sowie der Alterungseffekte des Brennstoffzellen-Stacks auf den zusätzlichen Wasserstoffverbrauch. Die Prüfparameter wurden anhand der Höchsttemperatur ausgewählt, die 2021 in New York City herrschte. Dadurch erfolgten die Testfahrten sowie Simulationen bei 35 °C und 43% Luftfeuchtigkeit. Als Prüfzyklus wurde der New York City

urban cycle verwendet, der sich deutlich vom europäischen Prüfzyklus WLTC unterscheidet [13].

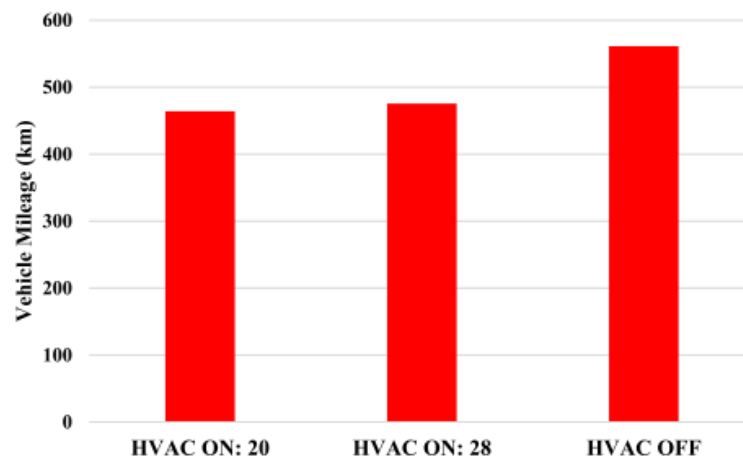


Abb. 2-13 Reichweite über AC mit verschiedenen Einstellungen [13]

Abb. 2-13 veranschaulicht die Variation der berechneten Reichweite des Prüffahrzeugs bei verschiedenen Klimaeinstellungen. Die errechnete Reichweite des Fahrzeugs verringert sich von 561 km (HVAC OFF) auf 464 km (HVAC ON:20) was einer Reduktion um 17,3 % entspricht. Dieser Wert konnte durch unsere Testfahrten nicht bestätigt werden. Wir konnten eine Reichweitenminimierung von 0,347% nachweisen bei einer vergleichbaren Umgebungstemperatur von 23 °C. Dies kann mehrere Gründe haben, einerseits wird in der angegebenen Studie ein anderer Zyklus gefahren welcher deutlich mehr Standzeiten sowie niedrigere Geschwindigkeiten aufweist. Zuzüglich kann die Alterung der Brennstoffzelle einen erheblichen Effekt auf den Wasserstoffverbrauch haben.

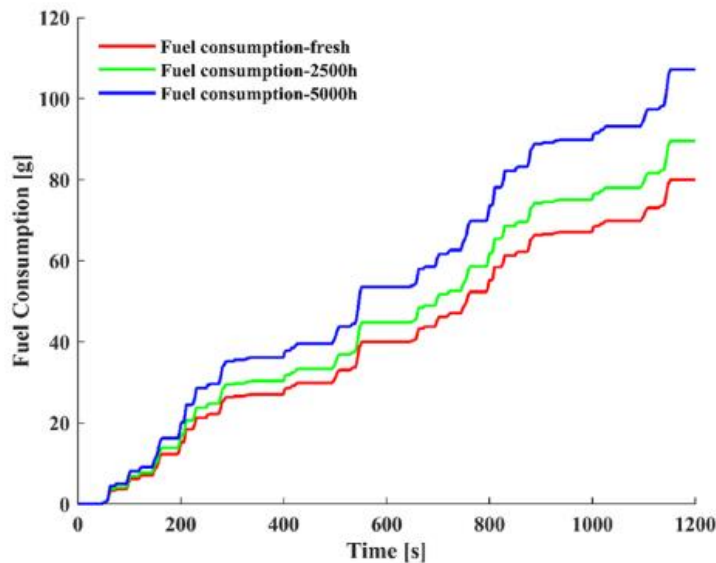


Abb. 2-14 Alterungseffekt über Verbrauch [13]

Abb. 2-14 veranschaulicht die Alterungseffekte und den daraus resultierenden Mehrverbrauch an Wasserstoff. Die Alterungseffekte werden wie folgt beschrieben:

- Lochbildung der Membran
- Katalysatorbeschichtung wird abgebaut
- MEA verunreinigt
- Dichtung zwischen Bipolarplatte und Membran kann versagen

Der Alterungseffekt einer Brennstoffzelle hat einen deutlich höheren Einfluss auf die Reichweite als der Betrieb der Klimaanlage [14]. So reduziert sich die errechnete Reichweite von 561 km (neuwertig) auf 419,43 km (5500 Betriebsstunden) was einer Minderung der Reichweite von 25,31% entspricht.

Parameter	DLR	Universitäten
Anzahl Messfahrten	13	1
Prüfzyklus	WLTC, *kG	New York City urban cycle
Temperaturen [°C]	-30, -7, 23, 40, 55	35
Luftfeuchte [%]	< 30, > 70	43
Sonneneinstrahlung	Nein	Ja
Prüffahrzeug	Hyundai Nexö	Toyota Mirai
Simulation	Nein	Ja
Temperatur Innenraum [°C]	23	20, 28

Tab. 2-1 Unterscheidungsmerkmale

*konstante Geschwindigkeit

Um den Unterschied zwischen einem WLTC und New York City urban cycle zu verstehen, kann die nachfolgende Tabelle herangezogen werden.

WLTC	New York City urban cycle
1750 [s]	598 [s]
2300 [km]	1,89 [km]
Ø47 [km/h]	Ø11,4 [km/h]
max. 130 [km/h]	max. 44,6 [km/h]

Tab. 2-2 Unterschied WLTC zu NYCC [5]

Jedes Fahrzeug, welches in der EU neu zugelassen wird, muss Reglementierung bezüglich Emissionen und Kraftstoffverbrauch erfüllen. Um diese Reglementierungen zu überprüfen wird der WLTC bzw. WLTP verwendet. Es ist anzumerken, dass der WLTC-Zyklus für alle EU-Mitgliedsstaaten verbindlich ist und somit ein breites Spektrum an Fahrparametern abdecken muss. Im Gegensatz dazu wurde der New York City urban cycle speziell für den Raum New York City entwickelt [15].

3 Messtechnik

3.1 Rollenprüfstand

3.1.1 Grundsätzliche Informationen: Klimarollenprüfstand

Das Institut für Fahrzeugkonzepte des Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt verfügt über einen hochmodernen Allrad-Klimarollenprüfstand. Hier können alle gängigen PKW und Kleintransporter hinsichtlich des Kraftstoffverbrauchs (flüssige und gasförmige Kraftstoffe) und Emissionen unter verschiedensten Umgebungsbedingungen untersucht werden.

Die folgende Tabelle enthält einige Spezifikationen des Klimarollenprüfstandes.

Größe	9,5m x 5,5m x 2,8m
Fahrzeugmassen	450kg – 4500kg
Anzahl Rollen	4
Größe Rollen	48"
Randstand	1,6m – 4m
Klimatisierung	-40°C... + 60°C
Feuchte	Regelbar bis zu 80% bei 40°C
Max. Geschwindigkeit	200 km/h

Tab. 3-1 Daten Rollenprüfstand

Darüber hinaus ist es möglich, spezifisch definierte Fahrzyklen zu realisieren, z.B. Zyklen mit konstanter Last oder konstanter Geschwindigkeit. Um reale Testbedingungen zu realisieren, können sowohl Steigungen als auch Fahrwiderstände eingestellt werden. Auch Beschleunigungs- und Kaltstartverhalten gehören zu den umfangreichen Anwendungsmöglichkeiten, darüber hinaus sind Abgasanalysen mittels WLTP möglich. Alle Messdaten laufen in der Steuereinheit des Klimarollenprüfstands zusammen und können über Schnittstellen wie CAN auch an externe Messtechnik weitergeleitet werden.



Abb. 3-1 Klimarollenprüfstand [16]

Da am Klimarollenprüfstand unter anderem mit Gefahrstoffen gearbeitet wird, ist er mit einer umfangreichen Sensorik ausgestattet, um austretende Gase frühzeitig zu erkennen. Durch die Ex-Schutz-Zertifizierung für Zone 2 ist das Arbeiten mit Erdgas und Wasserstoff möglich.

* Ex-Zonen werden, je nach Wahrscheinlichkeit einer explosionsfähigen Atmosphäre in unterschiedliche Zonen eingeteilt welche dann unterschiedlichen Sicherheitsanforderungen unterliegen. Die Ex-Zone zwei ist wie folgt definiert: Das Auftreten explosionsfähiger Atmosphären im Normalbetrieb ist, wenn überhaupt, nur selten und kurzzeitig [17] [16].

Für dieses Projekt wurde eine Vielzahl an Funktionen des Rollenprüfstandes verwendet. Um im späteren Verlauf die Unterschiede der Verbräuche aufzeigen zu können wurde bei allen Testfahrten eine Verbrauchsmessung durchgeführt. Die hierfür benötigten Zyklen wie der WLTC oder die konstanten Geschwindigkeiten konnten in das Prüfstandssystem implementiert und gefahren werden. Da Wasserstoff ein hochentzündliches Gas ist, war die Verwendung des Ex-Schutzes, aus Sicherheitsgründen relevant.

Die nachfolgende Tab. 3-2 beinhaltet alle Sensorik des Klimarollenprüfstands welche für die Datenauswertung verwendet wurden.

Sensor	Zuordnung
Coriolis	Verbrauchsmessung
Geschwindigkeitges	Gesamtgeschwindigkeit
rF_Fahrtwindgebläse_K21	Luftfeuchtigkeit Fahrtwindgebläse
T_Fahrtwindge_K22	Temperatur Fahrtwindgebläse
Temp_Kammer	Umgebungstemperatur Kammer

Tab. 3-2 Sensorik Klimarollenprüfstand

Es muss angemerkt werden, dass dies nicht alle verfügbaren Sensoren sind. Es kann zusätzlich die Geschwindigkeiten der einzelnen Räder, die anliegende Kraft der Räder, der Umgebungsdruck sowie eine anliegende Steigung gemessen werden.

3.1.2 Coriolis-Sensor

Die praktische Anwendung des Coriolis-Effekts ist der Massendurchflussmesser, ein Instrument, das den Massendurchfluss und die Dichte der Flüssigkeit und des Gases misst. Das Funktionsprinzip besteht darin, dass ein Erreger die Rohre, künstlich in Schwingung versetzt, sobald das Medium durch die Rohre fließt erfährt dieses die Schwingung des Rohres. Während des Betriebs stimuliert die Antriebsspule die Rohre entgegengesetzt zueinander mit der natürlichen Resonanzfrequenz der Rohre.

Wenn sich die Flüssigkeit durch die Rohre des Sensors bewegt, werden in beiden Durchflussrohren Corioliskräfte induziert. Diese Kräfte bewirken, dass sich die Strömungsrohre gegeneinander verdrehen. Infolge der Verdrehung der Strömungsrohre sind die Sinuswellen nun gegeneinander phasenverschoben und asynchron. Die Zeitverzögerung zwischen zwei Sinuswellen wird in Mikrosekunden gemessen und Delta T genannt. Je größer das durch den Coriolis-Effekt erzeugte Δt , desto größer ist der Massendurchfluss. Eine größere Masse hat eine niedrigere Schwingungsfrequenz und eine geringere Masse hat eine höhere Schwingungsfrequenz. [18].

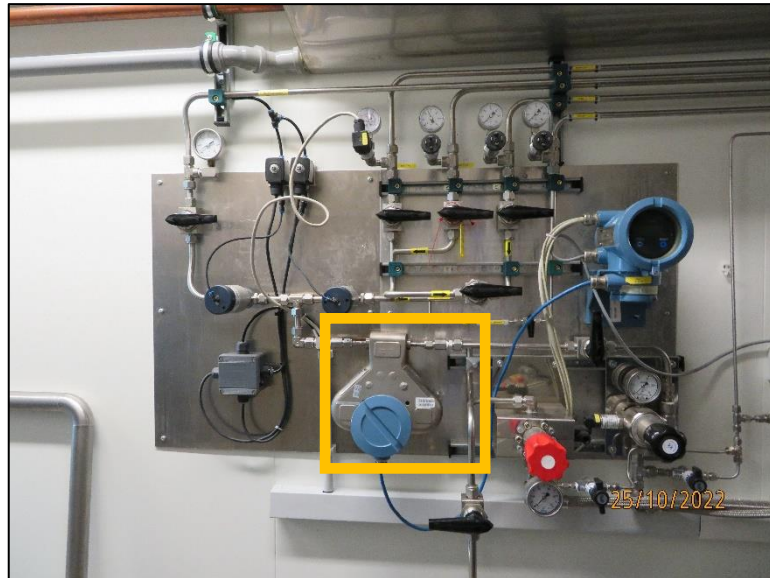


Abb. 3-2 Coriolis-Sensor

Die Abb. 3-2 zeigt den Coriolis-Sensor und dessen Aufbau welcher an der Außenseite der Klimakammer montiert ist.

3.2 On-Board-Diagnosetool

Um den Parameterumfang zu erweitern, wurde zusätzlich zu den im Versuchsfahrzeug verbauten Sensoren das On-Board-Diagnose-Tool X-432 Pro 4 der Firma Lanch eingesetzt. Dies sollte ein detaillierteres Verständnis des Verhaltens der Klimaanlagenkomponenten liefern. Über die OBD-Schnittstelle kann via Bluetooth eine Verbindung zwischen Fahrzeug und Diagnosetool hergestellt werden. Unter dem Reiter „Intelligente Diagnose“ werden alle messbaren Parameter, logisch nach Units sortiert, angezeigt. Eine Unit beschreibt die Hauptgruppe ausgewählter Parameter, z.B. sind unter der Unit AC (Klimaanlage) alle Datenströme der Klimaanlage zu finden. Um tiefere Eingriffe in das Fahrzeugsystem und damit Missbrauch oder Fehlbedienung mit Schäden zu verhindern, können bestimmte Bereiche gesperrt werden, auf die nicht zugegriffen werden kann.

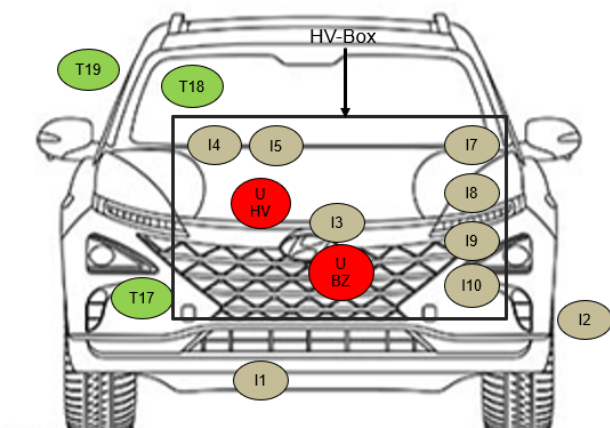


Abb. 3-3 On Board Diagnose Tool X32 Pro 4 [19]

Die obere Abb. 3-3 zeigt das Diagnosewerkzeug mit allen verfügbaren Anwendungen, wie das Auslesen spezifischer Datenströme sowie Diagnose- und Serviceanwendungen für das Fahrzeug [19].

3.3 Sensorik und Prüffahrzeug

Der Hyundai Nexu wurde mit einer Vielzahl von Sensoren ausgestattet, die Daten in Echtzeit an den Messcomputer übertragen können. Um die Verteilung der Sensoren besser zu verstehen, kann Abb. 3-4 herangezogen werden.



Sensor	Zuordnung
T17	Temperatur Beifahrer Fußraum
T18	Temperatur Beifahrer Kopfhöhe
T19	Temperatur Außen

Sensor	Zuordnung
I3	Brennstoffzellenstack Strom
I4	Innenraumheizung
I5	HVC-BPUC-Strom
I7	Klimakompressor Strom
I8	HVC-Kühlmittelpumpen Strom
I9	COD-Heizer Strom
I10	Lüftereinheit Strom

Sensor	Zuordnung
I11	HV-Batterie Strom
I12	BHDC Strom

Sensor	Zuordnung
U HV	Spannung HV-System
U BZ	Spannung BZ

Abb. 3-4 Sensorplan Hyundai Nexu [20]

Alle genannten Temperaturmessstellen sind Thermoelemente des Typs K. Dieser Typ wird allgemein als Nickel-Chrome-Nickel Thermoelement bezeichnet und hat ein breites Temperaturspektrum von -250K bis 1100K. Bei steigender Temperatur treten jedoch Messfehler und Abweichungen auf. Da die zu erwartenden Temperaturen bei -25 °C bis +45 °C liegen, ist die Verwendung unproblematisch [21].

Die in der Strommessung eingesetzten Sensoren basieren alle auf dem Hall-Effekt, bei dem in einem stromdurchflossenen Leiter eine elektrische Spannung in einem stationären Magnetfeld entsteht. Dieser Effekt wird genutzt, um die Stärke von Magnetfeldern oder Ladungsträgern zu bestimmen. Die verbauten Sensoren stammen aus den Baureihen HTR, HAL und HTB der Marke LEM [22].

Für die Messung der Spannung an der Brennstoffzelle und der Hochvoltbatterie wurde das IMC-CANSAS-L-HVCI8 verwendet. Dieses Modul ermöglicht auf verschiedenen Kanälen die Messung von Spannungen im Niedrigbereich von 50 mV bis 60 mV sowie im Grenzbereich von 800 V. Außerdem sind Anschlüsse für Thermoelemente und Strommessungen im Bereich von 10 mA bis 20 mA vorhanden [23].

Für die Testfahrten kam der Hyundai Nexo Baujahr 2018 des DLR zum Einsatz. Dieses Fahrzeug hat einen Elektroantrieb, der durch eine Brennstoffzelle mit Energie versorgt wird. Der Hyundai Nexo ist mit umfangreicher Messtechnik ausgestattet worden, sodass Nutzer aus vielen Messdaten die für ihre Messkampagne relevanten auswählen können. Alle relevanten Daten des Hyundai Nexo sind in der folgenden Tab. 3-3 zusammengefasst.

Parameter	Angabe
Motor/Leistung/Getriebe	
Motor	Permanentmagnet- Synchronmotor
Elektrische Leistung [kW/PS]	120 / 163
Max. Drehmoment [Nm]	395
Antriebsart	Frontantrieb
Position der Brennstoffzelle	Vorne
Brennstoffzelle	
Leistung [kW]	95
System Effizienz [%]	60
Anzahl der Zellen	440
Batterie	
Art der Batterie	Lithium polymer
Kapazität [kWh]	2
Batterie Spannung [V]	240
Allgemeine Informationen	
Zeit für die Befüllung der Tanks [min]	5
Reichweite nach WLTP [km]	666
Beschleunigung 0-100 km/h [s]	9.2
Einkaufspreis [€]	77.290
Max. Geschwindigkeit [km/h]	177

Tab. 3-3 Informationen Hyundai Nexo [24]

4 Testphase

4.1 Testszenarien

4.1.1 WLTC

Der WLTP (Worldwide Harmonised Light-Duty Test Procedure) ist ein Prüfverfahren welches speziell für die Verbrauchsmessung und Abgasanalyse von PKW und leichtgewichtigen Nutzfahrzeugen entwickelt wurde. Einschränkungen bezüglich alternativer Antriebe gibt es hierbei nicht. Um alltägliche Fahrten wie den Arbeitsweg unter Laborbedingungen simulieren zu können, mussten zu Beginn erst einmal Real-fahrdaten gesammelt werden. Weltweit wurden, in 14 Ländern Prüffahrzeuge un-terchiedlichster Konzeption mit Messtechnik ausgestattet um Parameter wie Ver-brauch und Geschwindigkeit zu ermitteln. Diese Messwerte wurden dazu verwendet um einen einheitlichen Zyklus, den WLTC zu entwerfen. Der WLTP beinhaltet den Prüfzyklus WLTC (Worldwide Harmonised Light-Duty Test Cycle) sowie den Real-fahrzyklus RDE (Real drive emissions) welche im Verlauf des Kapitels noch genauer beschrieben werden [25].

WLTC

Dieser Testzyklus wird unter Laborbedingungen auf einem Rollenprüfstand durch-geführt. Der Testfahrer hat visuell einen Geschwindigkeitsverlauf im Blickfeld wel-chem er durch kontrolliertes Beschleunigen und Verzögern folgt.

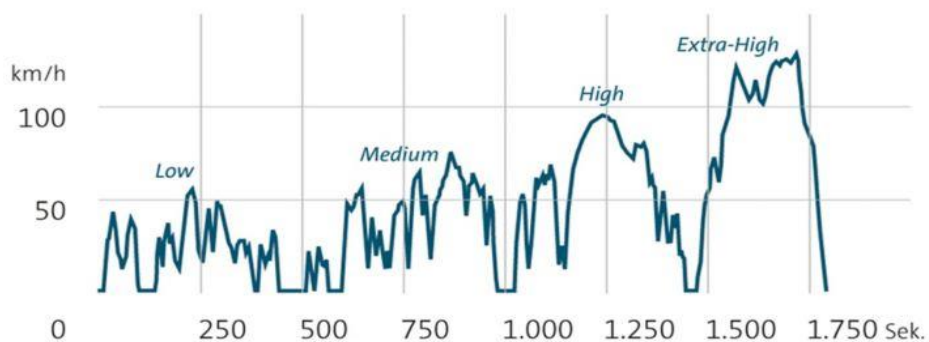


Abb. 4-1 Verlauf WLTC-Zyklus [26]

Der WLTC wurde so entwickelt, dass dieser reale Fahrten im Alltag möglichst gut abbildet. So wurden vier Geschwindigkeitszonen definiert welche die wesentlichen Verkehrssituationen (Landstraße, Autobahn, Stadtverkehr und Stillstand) widerspiegeln soll. Mithilfe des Zyklusses werden Verbrauchsmessungen und die Abgasanalyse durchgeführt [26].

RDE

Der RDE soll die tatsächlichen ausgestoßenen Emissionen, im laufenden Straßenverkehr widerspiegeln. Die Durchführung von Abgasanalysen, während eines WLTC finden unter Laborbedingungen statt, also konstanten Temperaturen und ohne Verkehrsfluss. Diese Parameter weichen von real Fahrten ab weshalb diese später unter realen Bedingungen getestet werden. Dies ist ein Teil der WLTP-Zertifizierung. Mithilfe eines portablen Emissionsmessgeräts (PEMS) welches direkt an das Ende der Abgasanlage montiert wird, werden die Schadstoffemissionen gemessen. Da die Testfahrten auf dem Klimarollenprüfstand simuliert werden und die Emissionsmessung kein Teil dieser wissenschaftlichen Arbeit ist wurde das PEMS nicht verwendet [26].

Die nachfolgende Tab. 4-1 soll die Unterscheidungsmerkmale zwischen RDE und WLTC verdeutlichen.

Testparameter RDE / WLTC		
Parameter	WLTC	RDE
Temperatur [°C]	23	-7 und 35
Streckenlänge [m]	23000	-
Zyklusdauer [min]	30	90 - 120
Durchschnittsgeschwindigkeit [km/h]	47	-
Standzeitanteil [%]	13	-
Höchstgeschwindigkeit [km/h]	130	160 kurzzeitig
Aufteilung nach Gesamtstrecke	-	Landstraße $\frac{1}{3}$
	-	Stadt $\frac{1}{3}$
	-	Autobahn $\frac{1}{3}$

Tab. 4-1 Unterscheidungsmerkmale RDE zu WLTC

4.1.2 Konstante Geschwindigkeit

Als weiteren Zyklus wurde die Fahrt mit konstanten Geschwindigkeiten herangezogen. In Stufenform werden 10 Geschwindigkeiten zwischen 10 km/h und 180 km/h jeweils für drei Minuten gehalten. Durch das Halten der Geschwindigkeiten über drei Minuten können sich konstante Zustände in ihrem Wert einpendeln, was eine gute Vergleichbarkeit schafft. Ein weiterer Aspekt, welcher die Vergleichbarkeit fördert ist, dass im Vergleich zum WLTC recht statische Verhalten. Dies ermöglicht, im späteren Verlauf das gezielte Auswählen verschiedener Abschnitte mit anderen Messfahrten der gleichen Reihe.

Wie in Abb. 4-2 dargestellt, verläuft der Zyklus nicht in aufsteigender Geschwindigkeitsreihenfolge, sondern beginnt direkt bei 70 km/h.

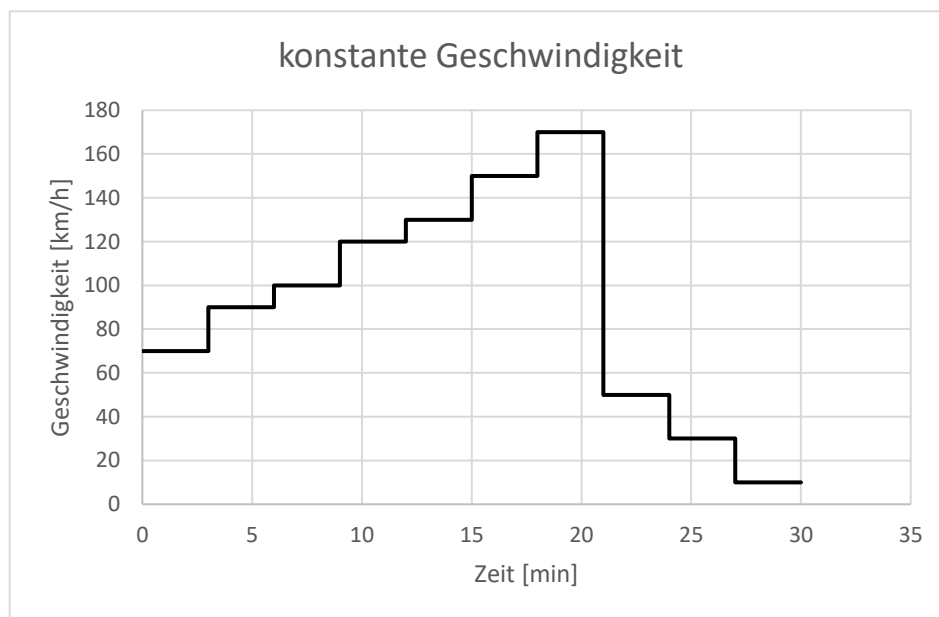


Abb. 4-2 Stufenform konstante Geschwindigkeit

Dies hat folgenden Grund: Bei niedrigen Geschwindigkeiten ist die Leistungsanforderung so gering, dass sich das hybride System zwischen Batterie und Brennstoffzelle nicht einpendeln kann. Deshalb wurde die Batterie, bevor die eigentlichen Testfahrten starteten entleert um im späteren Verlauf die Leistungsanforderung nur durch die Brennstoffzellen zu decken. Der Zyklus beginnt mit einer Fahrtgeschwindigkeit von 70 km/h aus den oben beschriebenen Gründen. Nach Maximalgeschwindigkeit wurde die Fahrgeschwindigkeit deutlich reduziert, um das Verhalten der Brennstoffzelle bei niedrigen Leistungsanforderungen zu verstehen.

4.1.3 Vorbereitungen für die Testphase

Bevor die Testfahrten starten können, muss das Prüffahrzeug sowie der Rollenprüfstand vorbereitet werden. Am Prüffahrzeug müssen die Reifen gewechselt werden, da diese nach dem Gebrauch auf dem Rollenprüfstand nicht mehr im Straßenverkehr zugelassen sind. Des Weiteren müssen die Wasserstofftanks geschlossen werden, da das Prüffahrzeug über die hauseigene Wasserstoffversorgung gespeist wird. Um die Wasserstoffversorgung zu garantieren muss vor jedem Testtag der Füllstand des Bündels überprüft werden. Ein zu geringer Wasserstoffdruck kann zu Beschädigungen sowie verfälschten Messdaten führen weshalb bei Drücken unter 50 Bar Testfahrten frühzeitig beendet werden. Um das Prüffahrzeug auf dem Rollenprüfstand zu fixieren, muss im Vorhinein der Radstand eingestellt sowie ein Testlauf mit geringer Geschwindigkeit durchgeführt werden um das Prüffahrzeug auf den Rollen zu zentrieren. Nach Abschluss aller vorhergehenden Abläufe kann das Prüffahrzeug auf dem Rollenprüfstand fixiert werden. Sobald das Windfahrtgebläse ausgerichtet ist und das Fahrerdisplay vor der Windschutzscheibe platziert sowie den richtigen Winkel zum Fahrer hat können die Testfahrten beginnen.

5 Datenanalyse

5.1 IMC Famos Enterprise 2021

Für die Datenauswertung wurde das Analyse- und Datenverarbeitungsprogramm IMC Famos Enterprise 2021 verwendet. Dieses Tool bietet eine große Palette an Funktionen für die grafische Darstellung von Messdaten. Geladene Messdaten können per Drag and Drop Prinzip übereinander gelegt werden um diese zu vergleichen. Mithilfe des Daten-Editors kann jede einzelne Messstelle eingesehen und verändert werden, um z.B. Anfangs- und Endsequenzen zu kürzen. Über das Eingabefenster können Programme implementiert werden, welche bei großen Datenmengen helfen diese zu Verwalten und auszuwerten [27].

In Abb. 5-1 ist das Overlay von IMC Famos dargestellt. Die farblich markierten Bereiche wurden für die Auswertung und grafische Darstellung verwendet und können in der nachfolgenden Legende nachgelesen werden.

- Kurvenfenster
- Variablenliste
- Browser
- Funktionenauswahl

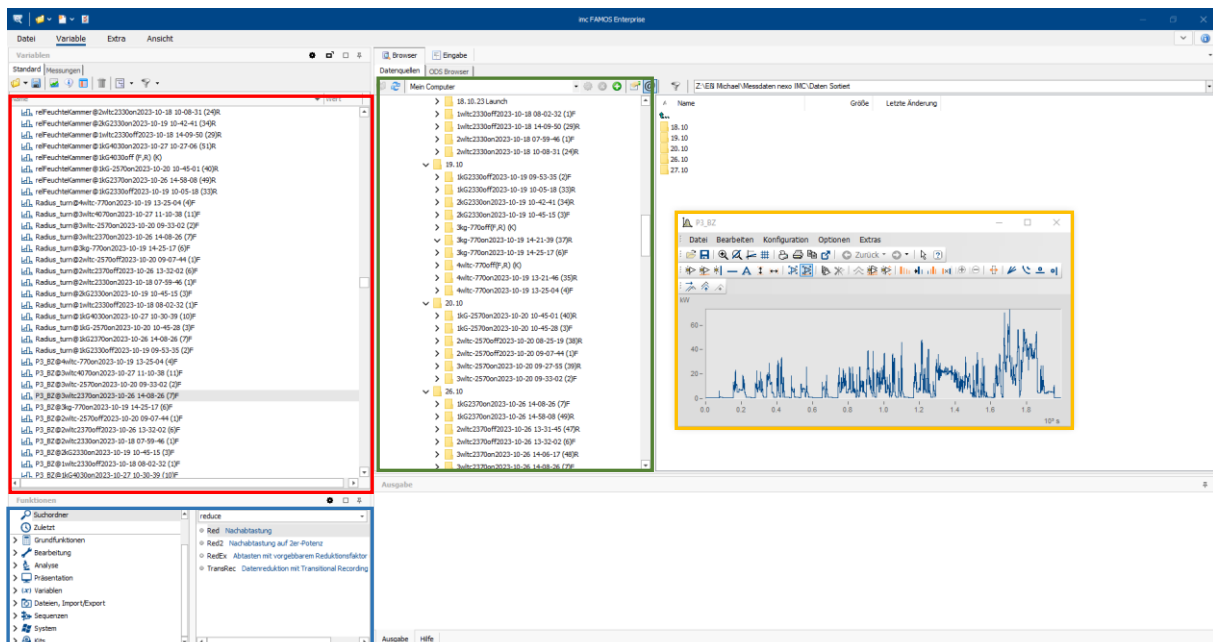


Abb. 5-1 IMC Famos Overlay

5.2 Hyundai Nexso

5.2.1 Innenraumtemperatur

Im Kapitel Innenraumtemperatur wurde untersucht ob die Klimaanlage die eingestellte Zieltemperatur erreicht. Folgende Einstellungen wurden an der Klimaanlage vorgenommen:

- 23°C Zieltemperatur
- Gebläsestufe 4
- Driver side only

Des Weiteren muss darauf hingewiesen werden, dass während der Testfahrten das hintere linke Fenster 1,5 cm offenstand. Sicherheitsregularien verpflichteten uns dazu einen Not-Aus-Schalter, in Fahrernähe zu platzieren welcher über ein Kabel vom Beifahrersitz zur außenliegenden Schnittstelle verläuft. Zusätzlich verlaufen dort Kabel für die Sprechverbindung und die OBD Verbindung.

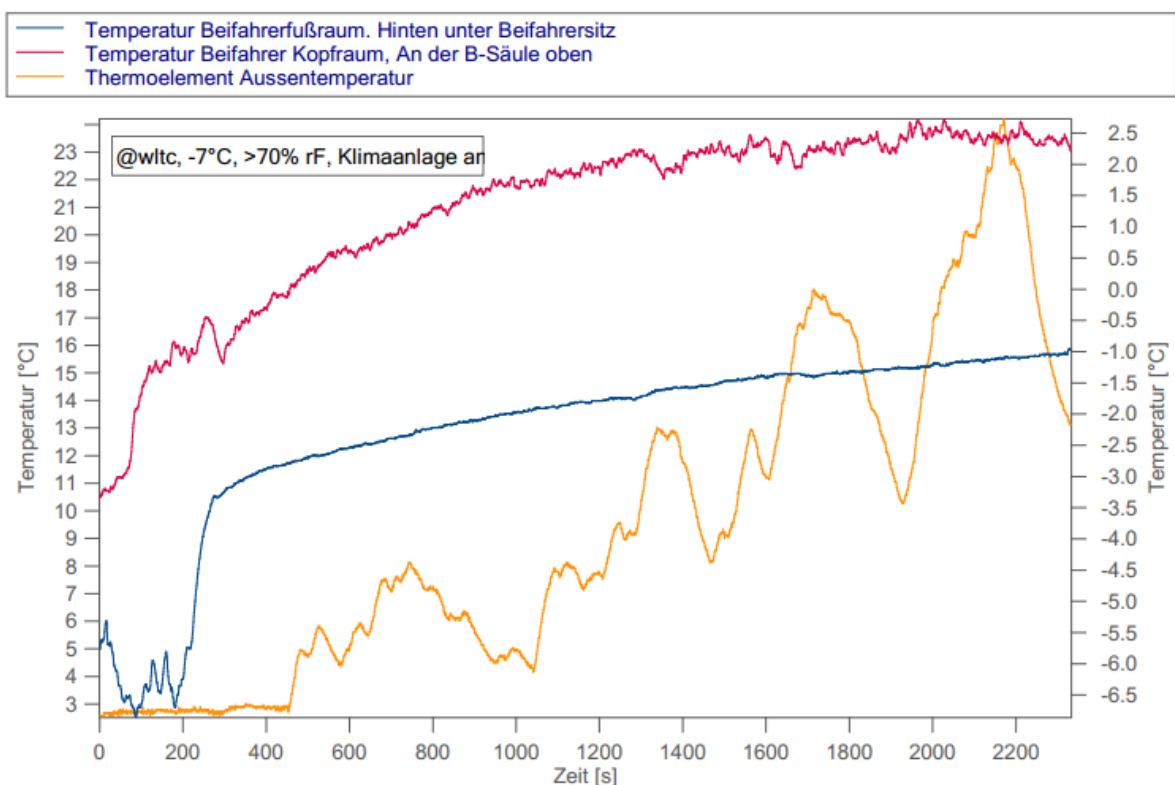


Abb. 5-2 Innenraumtemperaturverlauf bei -7 °C

Die Abb. 5-2 zeigt einen WLTC bei $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$, 70% Luftfeuchtigkeit sowie der eingeschalteten Klimaanlage. Die Außenlufttemperatur liegt zu Beginn bei $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ und steigt mit zunehmender Motorabwärme an. Die entstehende Abwärme des Prüffahrzeugs lässt eine konstante Prüftemperatur von $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ nicht zu. Dieser Störfaktor kann durch Einstellungen am Rollenprüfstand bezüglich umgewälzte Luftmenge gedämpft aber nicht verhindert werden.

Es ist deutlich zu erkennen das die Innenraumtemperatur, im Bereich des Kopfraumes bei 1285 s das erste Mal erreicht wird bevor die Klimaanlage anfängt einzugreifen. Die Zeitspanne bis zum Ende des Testlaufes regelt die Klimaanlage immer wieder auf die eingestellte Zieltemperatur von $23\text{ }^{\circ}\text{C}$. Im Kapitel 2.1 Einblick Innenraumtemperatur wird darauf hingewiesen, dass die Temperatur im Fußraum, um einen möglichst hohen thermischen Komfort zu bieten immer 2 K bis 10 K niedriger sein sollte als die Temperatur im Kopfraum. Dieser Temperaturunterschied spiegelt sich über die ganze Zeitspanne wider.

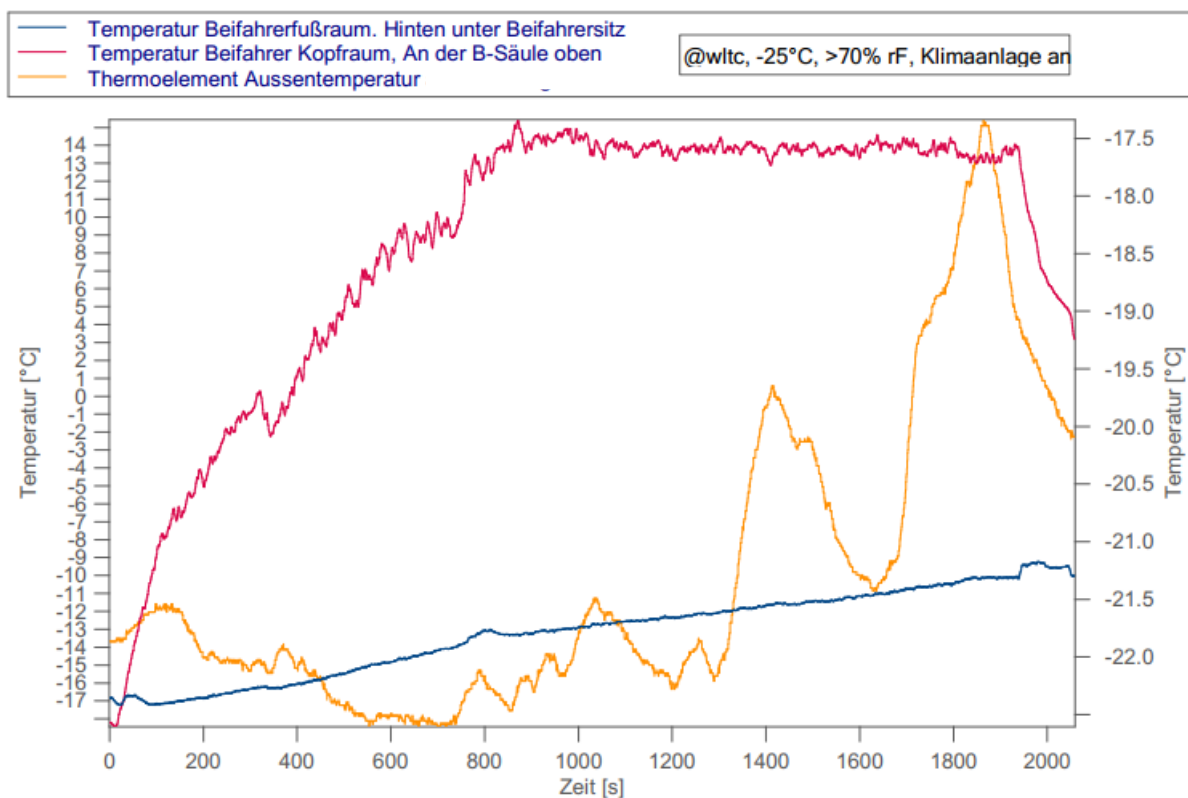


Abb. 5-3 Innenraumtemperaturverlauf bei $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$

Die vorausgehende Abb. 5-3 zeigt den Temperaturverlauf im Innen und Außenbereich, während eines WLTC bei $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ und einer Luftfeuchtigkeit von 70%. Die Innenraumtemperatur im Kopfbereich weist einen deutlich steileren Anstieg als der Verlauf bei $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$. Hinzukommt, dass sich die maximale Temperatur im Kopfbereich

bei 13,5 °C einpendelt. Die Zieltemperatur von 23 °C wird also nicht in der Testzeit von 30 Minuten erreicht. Durch den, ab Sekunde 800 stetigen Verlauf der Innenraumtemperatur ist eine Steigerung dieser nicht mehr anzunehmen. Grund hierfür könnte die Vermeidung eines zu hohen Temperaturunterschiedes sein. Ist der Innenraum auf 23 °C temperiert und die Außentemperatur liegt bei -7 °C, trifft der Fahrer auf einen Temperaturunterschied von 30 °C was eine Belastung für das Herz-Kreislaufsystem sein kann. Allerdings herrschen hier Extrembedingungen die vereinzelt bis selten im europäischen Raum auftreten.

Die nachfolgende Abb. 5-4 zeigt den Verlauf der Innenraumtemperatur während eines WLTC bei 23 °C Umgebungstemperatur.

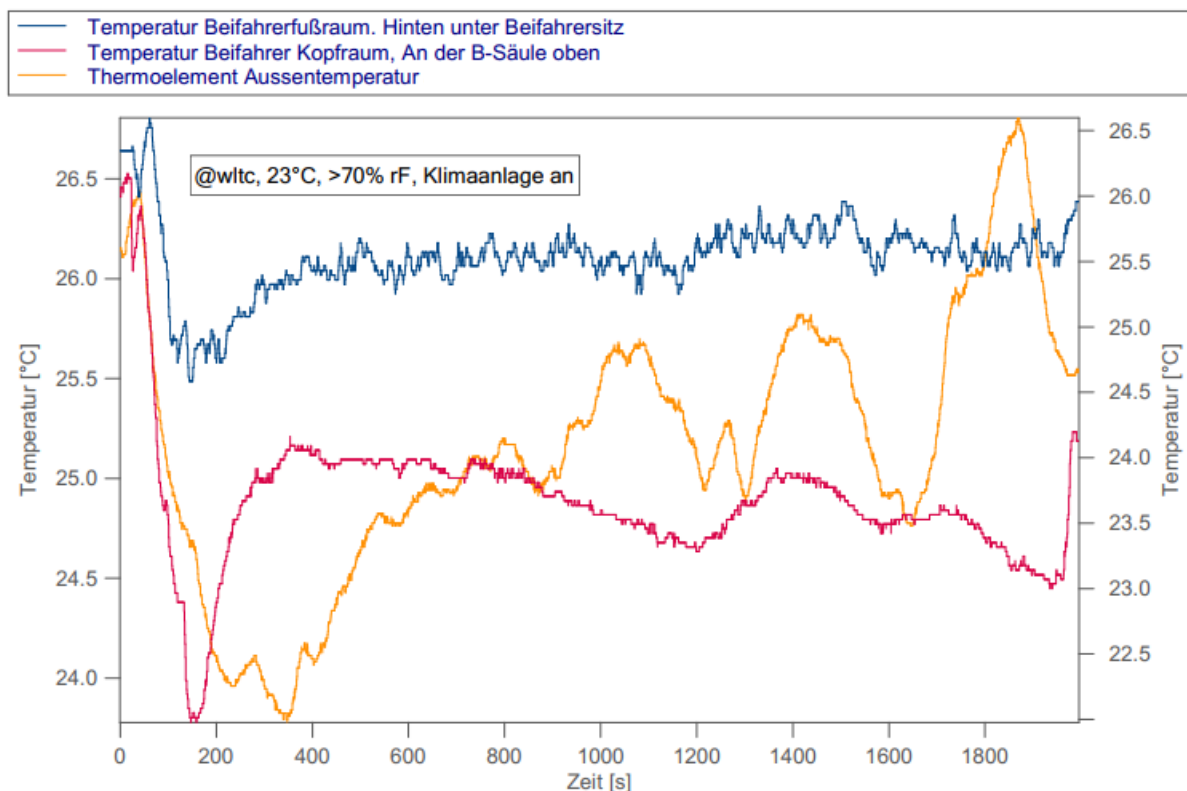


Abb. 5-4 Innenraumtemperatur bei 23 °C

Wie oben bereits erwähnt schwankt die Außentemperatur mit +3,5 °K um den Sollwert von 23 °C, Grund hierfür ist die Abwärme der Brennstoffzelle. Wie in Kapitel 2.1 beschrieben, weist der Kopfraum eine niedrigere Temperatur auf als der Fußraum. Auch der Temperaturunterschied von Kopf zu Fußraum welcher bei 2 K bis 10 K liegt wird eingehalten. Durch die Gebläse entstehen nun Verwirbelungen im Fahrzeuginnenraum, sodass der Kopfraum eine geringere Temperatur aufweist.

In der nachfolgenden Abb. 5-5 wurde ein WLTC bei einer Außentemperatur von 40 °C mit 70% Luftfeuchtigkeit gefahren. Beide Temperaturkurven, Kopf- und Fußraum verlaufen fast über den ganzen Zeitraum parallel zueinander. Auch hier ist,

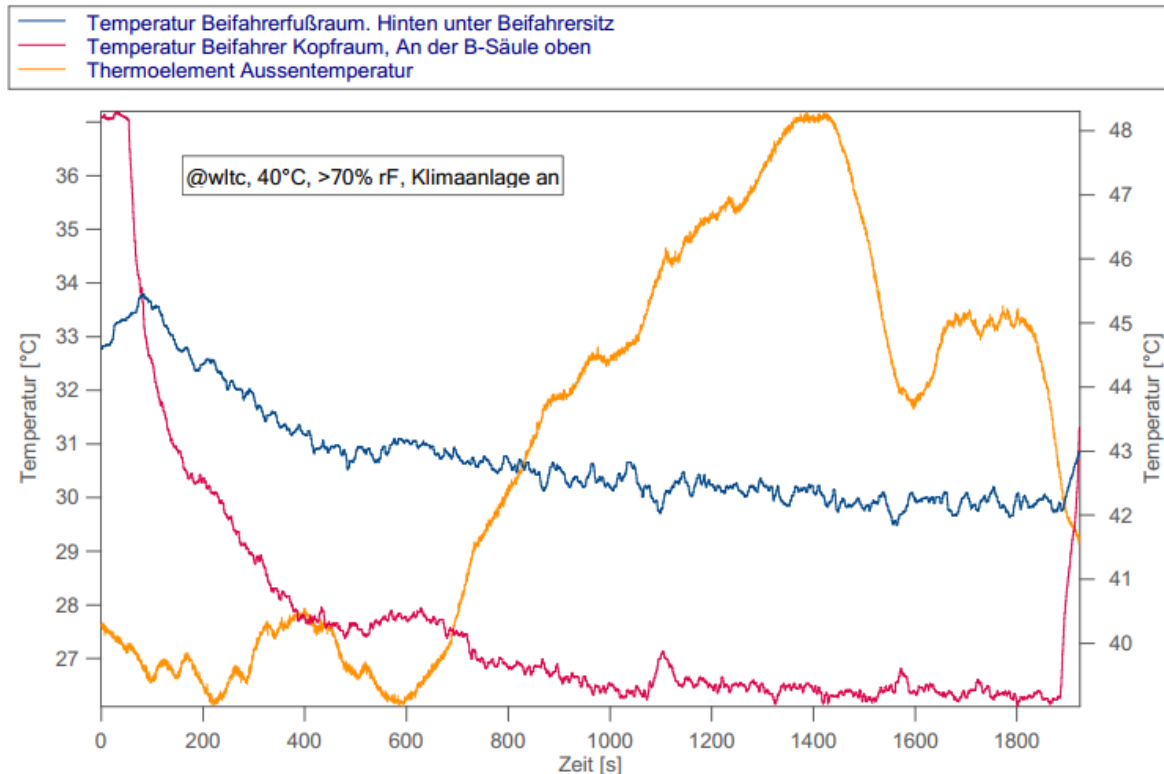


Abb. 5-5 Innenraumtemperatur bei 40 °C

wie in Kapitel 2.1 beschrieben der Kopf- kühler als der Fußraum. Mit durchschnittlich 3,5 K Unterschied, ist auch hier der angestrebte Temperaturunterschied zwischen Kopf- und Fußraum eingehalten worden. Die Kühlleistung des Klimakompressor reicht hierbei nicht aus um den Innenraum auf die eingestellte Zieltemperatur von 23 °C zu temperieren. Auch hier pendelt sich die Innenraumtemperatur bei ca. 38,5 °C ein was eine Verfehlung der Zieltemperatur darstellt. Durch die Verläufe der beiden Temperaturkurven ist nicht anzunehmen, dass die Innenraumtemperatur verstärkt absinken wird. Wie oben bereits erwähnt, könnte dies an der Vermeidung eines zu hohen Temperaturunterschieds zwischen Fahrzeuginnenraums und Außentemperatur liegen.

5.2.2 Verbräuche

In der nachfolgenden Abb. 5-6 werden sämtliche Verbräuche während eines WLTC's dargestellt. Hierbei wurde für alle Prüftemperaturen die gleiche Luftfeuchtigkeit von 70% eingestellt. Hierbei muss erwähnt werden, dass aufgrund der unterschiedlichen Prüftemperaturen auch unterschiedliche Startverbräuche entstehen. Der Grund hierfür ist die Startroutine des Brennstoffzellensystems. Bei niedrigen Temperaturen soll die Brennstoffzelle möglichst schnell auf Betriebstemperatur gebracht werden. Hierfür wird das Brennstoffzellensystem vermehrt mit Wasserstoff versorgt, welche die Brennstoffzelle in Wärmeenergie umwandelt. Diese Wärmeenergie wird für das Erreichen der Betriebstemperatur verwendet. Die bei der chemischen Reaktion von Wasser und Sauerstoff freigesetzte Wärme kann ebenfalls genutzt werden.

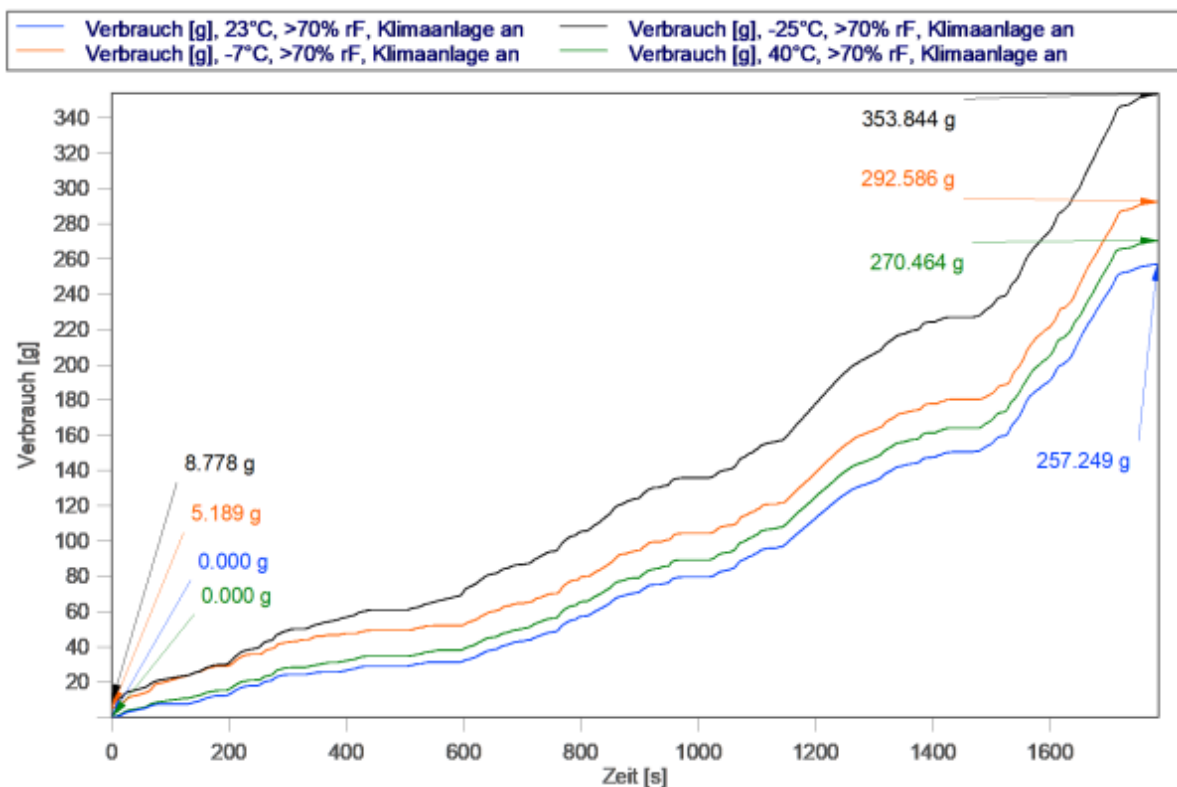


Abb. 5-6 Vergleich aller Verbräuche eines WLTC's

Je kälter die Umgebungstemperatur ist, desto höher ist der tatsächliche Wasserstoffverbrauch. Dies liegt aber nicht nur an dem Betrieb der Klimaanlage bzw. des Heizsystems, sondern an einer Vielzahl von Komponenten die eine deutliche Mehrleistung haben. Ebenso müssen elektrische Komponenten wie die Hochvolt-Batterie beheizt werden um die Funktionalität zu gewährleisten. Ein weiterer Grund für die

Temperierung der HV-Batterie ist die Kapazität. Bei negativen Temperaturen kann diese bis zu 20% sinken was enorme Auswirkungen auf die Reichweite hat. Der Mehrverbrauch wird von beiden Testfahrten im negativen Temperaturbereich bestätigt. Bei steigenden Temperaturen >40 °C kann dies ebenfalls beobachtet werden. Nun wird die Mehrleistung nicht durch Heizen, sondern durch Kühlen, wichtiger Komponenten erbracht.

Das Testfahrzeug verbraucht laut Herstellerangabe 0,94 kg Wasserstoff pro 100 km. Dieser Annahme zufolge müsste der Verbrauch bei einem WLTC bei 0,2166 kg pro 23 km liegen und zwar bei Normaltemperatur (23 °C).

Die nachfolgende Tabelle veranschaulicht den Mehrverbrauch in kg bei den einzelnen Testfahrten.

Prüftemperatur	Verbrauch auf 100 km
-25 °C	1,53 kg
-7 °C	1,27 kg
40 °C	1,17 kg
23 °C	1,11 kg

Tab. 5-1 Absoluter Verbrauch auf 100 km, aller Testfahrten

Die Testfahrt bei 23 °C weist einen deutlich höheren Verbrauch auf als die vom Hersteller angegebenen 0,94 kg pro 100 km. Diese Angaben wurde bei idealen Testbedingungen erzeugt, die Rollwiderstände sowie das Fahrzeuggewicht wurden auf ein Minimum reduziert. Ebenso werden alle Nebenerbraucher abgeschaltet um den Verbrauch zusätzlich zu senken. Des Weiteren kann das Alter des Testfahrzeuges den Verbrauch zusätzlich beeinflussen, im Kapitel 2.2 Datenlagen wird das Thema Brennstoffzellenalterung näher beschrieben.

In den folgenden Kapiteln wird der Verbrauch näher analysiert und zwar hinsichtlich einer eingeschalteten Klimaanlage sowie der näheren Betrachtung einzelner Komponenten.

5.2.3 Verbräuche mit und ohne Klimaanlage

Die Abb. 5-7 veranschaulicht einen WLTC bei $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ Umgebungstemperatur. Die Verbrauchskurven starten hier nicht bei null, dies hat folgenden Grund. Bei negativen Temperaturen startet die Brennstoffzelle mit einem Kaltstartprogramm, hierbei

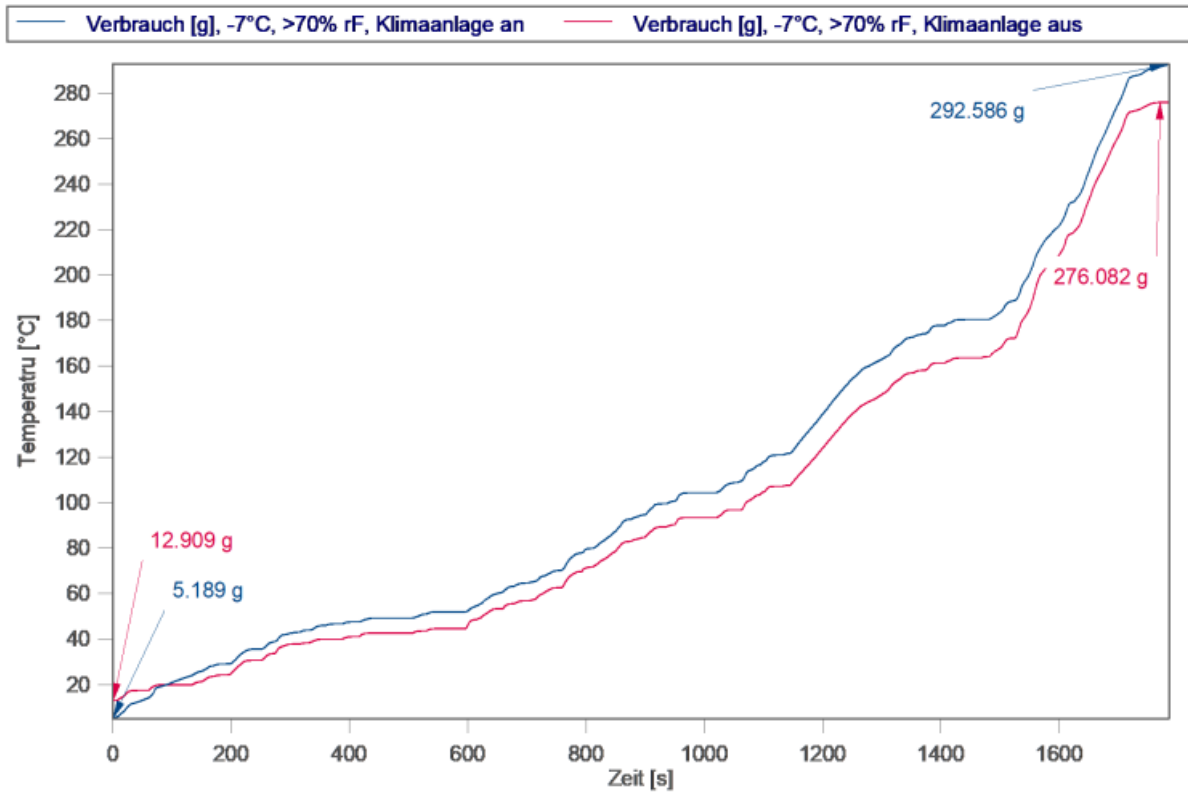


Abb. 5-7 Gesamtverbrauch WLTC, $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ und 70% Luftfeuchte

wird diese direkt mit Wasserstoff versorgt um möglichst schnell Wärmeenergie zu erzeugen. Bei wärmeren Umgebungsbedingungen werden die ersten Kilometer mit Energie aus der Batterie gefahren. Erst wenn der SOC unter 35 % sinkt wird die Brennstoffzelle hinzugeschaltet. Je nach Temperatur des Brennstoffzellensystems vor dem Start kann die Wasserstoffmenge variieren. Aus diesem Grund gibt es unterschiedliche Startpunkte bezüglich des Verbrauchs. Berechnet man den reinen Wasserstoffverbrauch während eines WLTC, ohne Kaltstart bekommt man einen Mehrverbrauch von 8,76 g Wasserstoff.

Betrachtet man nun die Abb. 5-8, einen WLTC bei $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ Umgebungstemperatur erkennt man einen deutlich höheren Verbrauch beim Kaltstart. Wie oben bereits erwähnt richtet sich die Menge an Wasserstoff welche bei einem Kaltstart durch das System geleitet wird an der Temperatur des Brennstoffzellensystems. Rechnet man

hier nun wieder den reinen Wasserstoffverbrauch über den WLTC Zyklus aus erhält man einen Mehrverbrauch von 8,256 g.

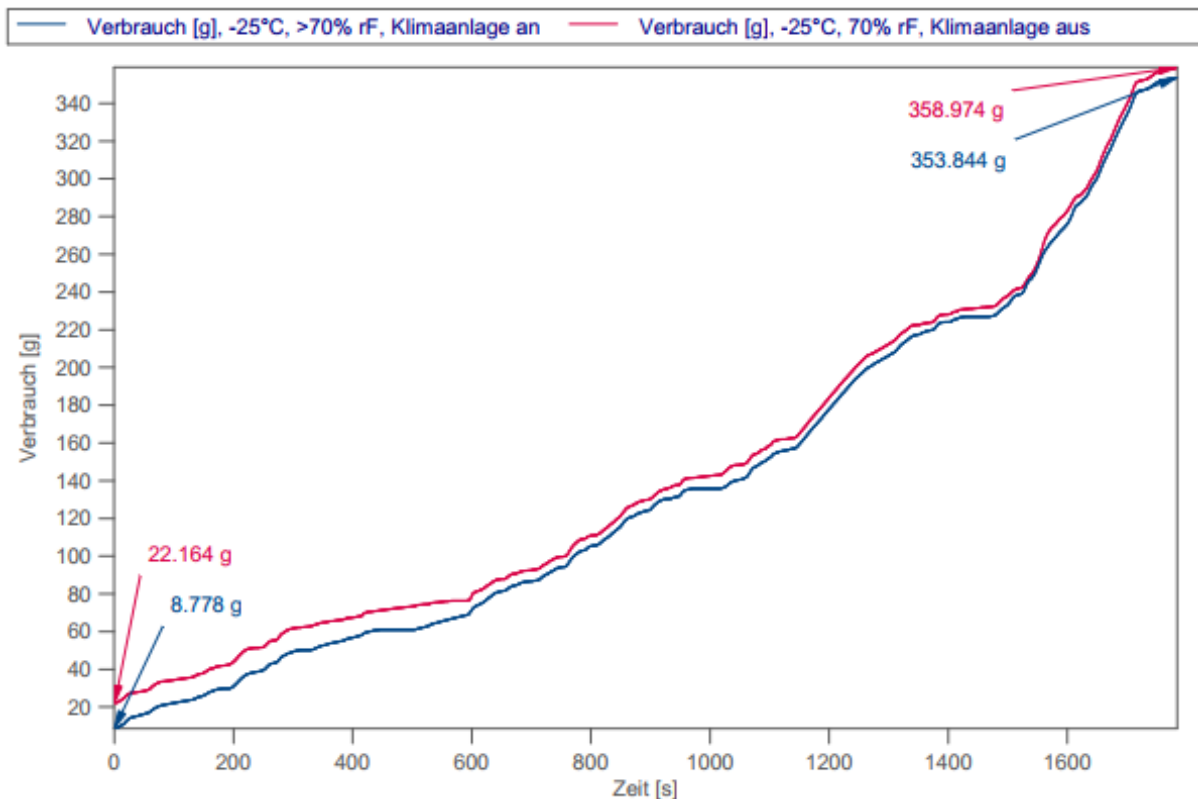


Abb. 5-8 Gesamtverbrauch WLTC, -25 °C und 70% Luftfeuchte

Hierbei muss erwähnt werden, dass mögliche Schwankungen im Mehrverbrauch auch anderweitige Gründe haben kann. Hierzu zählt der Fahrer, hat dieser einen aggressiven Fahrstil mit erhöhten Gaspedalstellungen kann dies Auswirkungen auf den Verbrauch haben. Bewegt sich der Fahrer eher an der unteren Geschwindigkeitstoleranz, beeinflusst dies den Verbrauch ebenfalls.

Abb. 5-9 zeigt einen WLTC bei 23 °C Umgebungstemperatur. Durch die warmen Umgebungsbedingungen ist hier keine Kaltstartroutine notwendig. Die 0,008533 g Wasserstoff welche durch das System fließen sind zurückzuführen auf einen Systemtest der Wasserstoffventile. Durch diese Tests sollen mögliche Defekte frühzeitig erkannt werden um größere Beschädigungen zu verhindern. Berechnet man hier nun den Mehrverbrauch an Wasserstoff aus ergibt sich ein Wert von 3,342 g. Dieser fällt deutlich geringer aus als bei den Testfahrten bei negativen Temperaturen, Grund hierfür ist das Einsatzgebiet von deutlich energieärmeren Komponenten wie dem Klimakompressor.

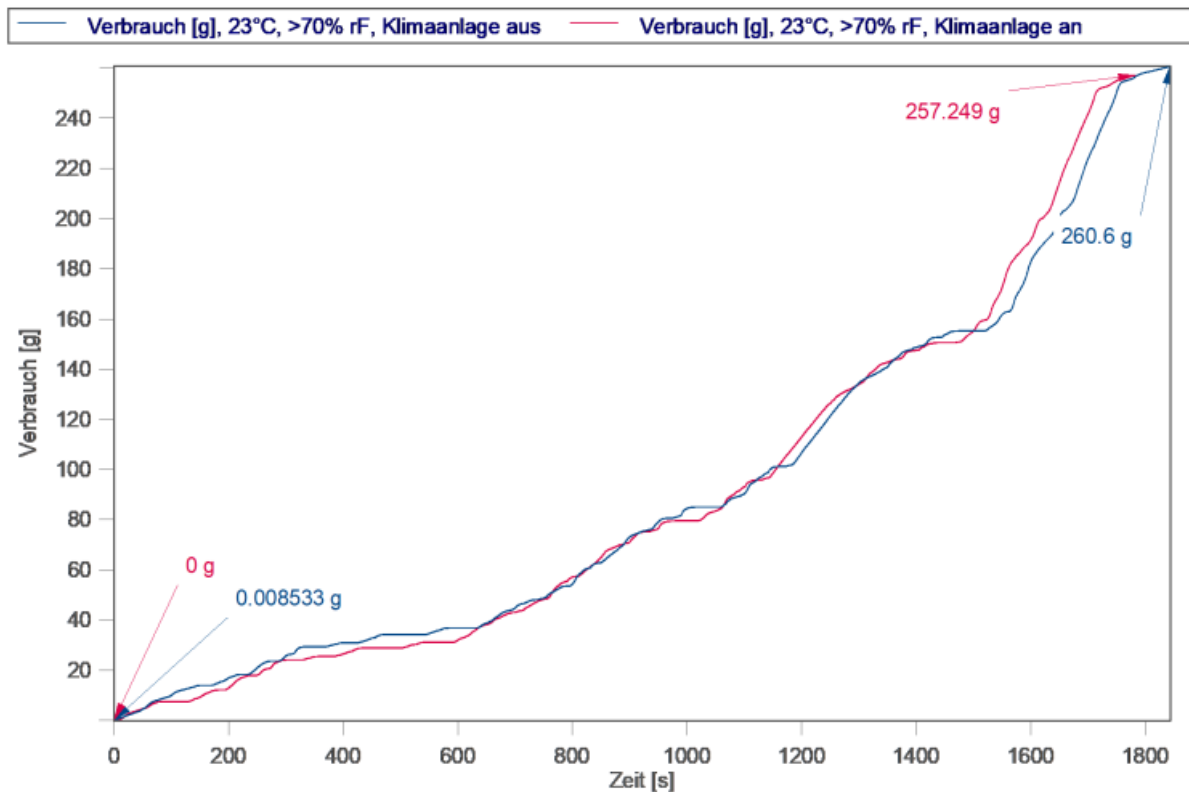


Abb. 5-9 Gesamtverbrauch WLTC, 23 °C und 70% Luftfeuchte

Die Tab. 5-2 zeigt nochmal alle Mehrverbräuche, der einzelnen Testfahrten auf. Die Analyse der Einzelkomponenten wird im folgenden Kapitel 5.3 beschrieben. Hierdurch kann ein besseres Verständnis gewonnen werden, wie der Mehrverbrauch aufgebaut ist und warum dieser bei verschiedenen Umgebungsbedingungen unterschiedlich ausfällt.

Prüftemperatur	Mehrverbrauch [g]	Abweichung zur Basis [%]
-25 °C	8,256	2,33
-7 °C	8,76	2,99
23 °C	3,342	1,29

Tab. 5-2 Mehrverbrauch von H₂ durch Verwendung des Klimaanlage-systems

Um den Mehrverbrauch in Reichweitenminderung auszudrücken wird, der von Hyundai angegebenen Verbrauch von 0,95 Kg H₂ pro 100 km herangezogen. Tab. 5-2 veranschaulicht nun die entstandene Reichweitenminderung pro 100 km durch die Verwendung der Klimaanlage.

Prüftemperatur	Reichweitenminderung pro 100 km [km]
-25 °C	0,866
-7 °C	0,919
23 °C	0,350

Tab. 5-3 Reichweitenminderung

Auffällig ist hierbei, die leicht erhöhte Reichweitenminimierung bei -7 °C. Durch die verschiedenen Arbeitspunkte der Klimaanlagekomponenten kommt es zu Schwankungen der Reichweitenminimierung. Ebenfalls kann der Fahrer durch seine Fahrweise die Minimierung der Reichweite beeinflussen. Dies geschieht durch starkes beschleunigen, spätes und starkes Abbremsen. Auch vorausschauendes Fahren kann den Verbrauch senken.

5.3 Verbräuche der Einzelkomponenten

5.3.1 Lüfter

Bevor die einzelnen Verbräuche der Lüftereinheit analysiert werden, muss darauf hingewiesen werden, dass die Testläufe der konstanten Geschwindigkeiten bei -7 °C und 40 °C eine verkürzte Laufzeit aufweisen.

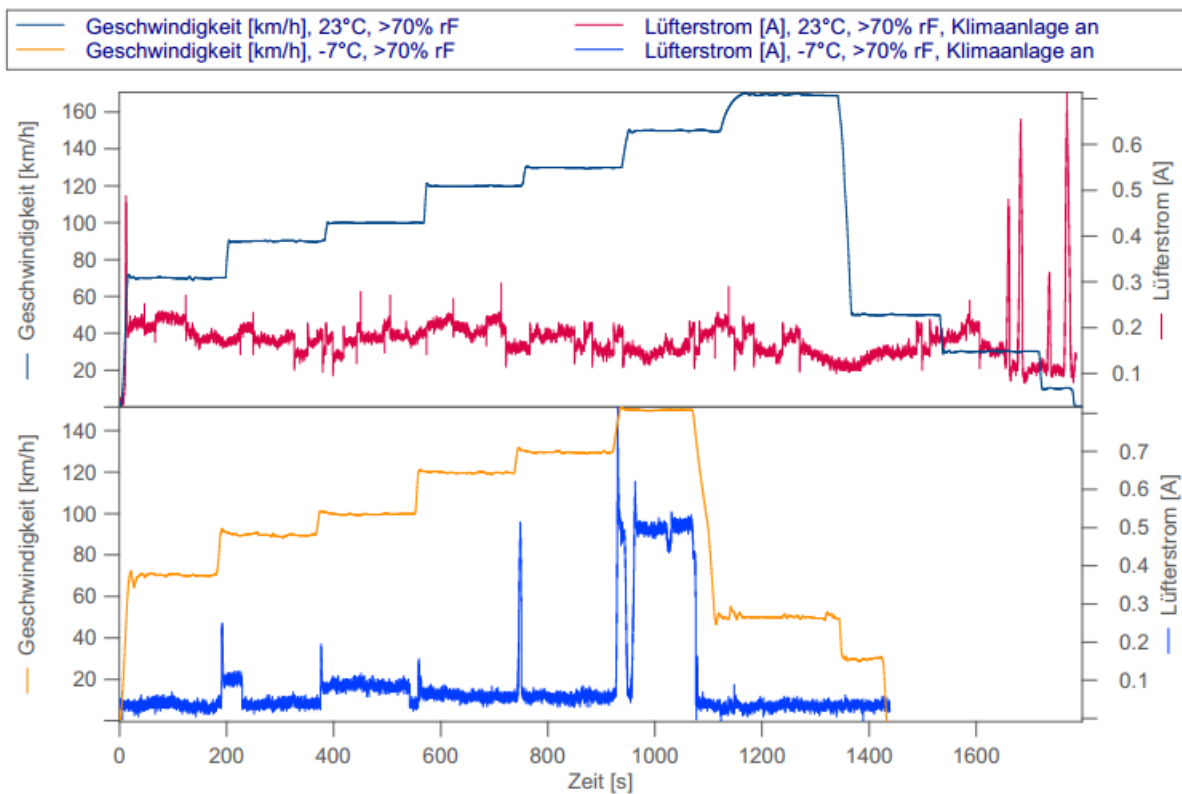


Abb. 5-10 Lüfterstrom bei 23 °C und -7 °C

Betrachtet man den Stromverlauf des Lüfters bei 23 °C und dessen recht statischen Verlauf kann man daraus schließen, dass die Umgebungstemperatur ausreicht um die entstehende Brennstoffzellenabwärme durch Kühlung auszugleichen und genug Luftmenge liefern kann. Die am Ende der Testfahrt vorkommenden Leistungssteigerungen der Lüfter, sind eine zusätzliche Kühlfunktion um die Abwärme der Brennstoffzelle zu kompensieren. Da im Testlauf die Geschwindigkeit, in kurzer Zeit auf niedrigere Geschwindigkeitsverhältnisse reduziert wird und somit sich auch der Fahrtwind verringert, kann die entstandene Abwärme des Brennstoffzellensystems nicht oder nur schlecht abgeführt werden. Was diesen Punkt weiter beeinflusst ist die für die Untersuchung verbaute Messtechnik im Motorraum. Durch die Vielzahl an verbauten Sensoren, Messboxen und deren Verkabelungen wird der Luftstrom im Motorraum beeinträchtigt bzw. behindert was zu einer zusätzlichen Erwärmung des Motorraums und Brennstoffzellensystem führt.

* durch eine Fehlermeldung des Brennstoffzellensystems wurde die Testfahrt bei -7°C frühzeitig abgebrochen

Betrachtet man nun den Testlauf bei -7 °C fällt schnell auf, dass dieser einen deutlich konstanteren Verlauf aufweist. Bei den einzelnen Geschwindigkeitsschritten wird im Vergleich zu 23 °C Umgebungstemperatur weniger Energie benötigt. Durch die allgemein niedrigere Umgebungstemperatur erwärmen sich die einzelnen Komponenten weniger schnell was zu einem geringeren Energiebedarf seitens des Lüfters führt. Erst bei 150 km/h steigt der Lüfterstrom stark an, da hier übermäßig Energie von der Brennstoffzelle umgesetzt wurde um das System zu erwärmen und eine Kühlleistung erforderlich zu machen.

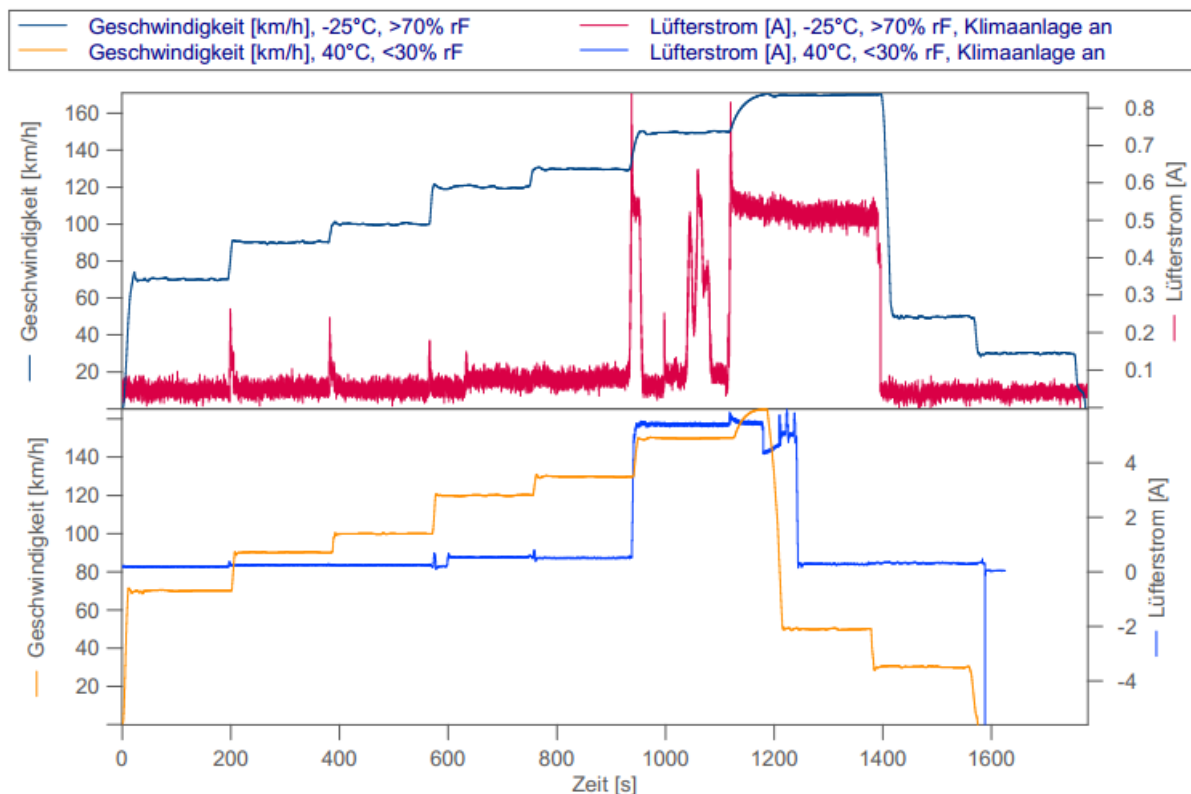


Abb. 5-11 Lüfterstrom bei 40 °C und -25 °C

Der Verlauf des Lüfterstroms bei 40 °C Umgebungstemperatur weist ebenfalls einen ähnlichen Verlauf zu den vorherigen Testläufen auf. Bei Geschwindigkeiten unter 120 km/h bleibt der Lüfter inaktiv, erst bei 140 km/h steigt der Lüfterstrom an. Grund hierfür ist einerseits die produzierte Abwärme der Brennstoffzelle und die begrenzte Luftgeschwindigkeit des Fahrtwindgebläses. Dieses hat eine Maximalgeschwindigkeit von 135 km/h was zur Folge hat, dass bei Geschwindigkeiten $> 135\text{ km/h}$ der Bezug zu Realfahrten reduziert wird. Bei 23 °C Umgebungstemperatur kann dieser Verlauf und Anstieg bei 140 km/h nicht beachtet werden. Hier reicht die Umgebungstemperatur aus um das Brennstoffzellensystem im Arbeitsbereich zu temperieren.

Der Lüfterstrom bei 40 °C Umgebungstemperatur ist deutlich höheren im Vergleich zu den restlichen Testfahrten. Grund dafür ist die zusätzliche Erwärmung des Brennstoffzellensystem durch die Umgebungstemperatur.

Prüftemperatur	Verbrauch [W]
-25 °C	7,2
-7 °C	6
40 °C	57
23 °C	0,015

Tab. 5-4 Verbrauch [W] Lüfter

Betrachtet man nun die einzelnen Verbräuche, ist zu erkennen, dass der Lüfter sehr geringe Leistungen benötigt. Dies liegt an seinem Einsatzbereich in dem der Lüfter agieren muss, zudem ist die Betriebsspannung von 12 V sowie der niedrige Strombedarf relativ gering. Dies macht die Lüftereinheit zu einem Verbraucher mit untergeordneter Rolle.

5.3.2 Klimakompressor

Die nachfolgenden Abbildungen 5-12 und 5-13 veranschaulichen den Klimakompressorstrom über den Zyklus „konstanten Geschwindigkeit“. Wie oben bereits beschrieben, haben die Testläufe bei -7 °C und 40 °C eine verkürzte Laufzeit.

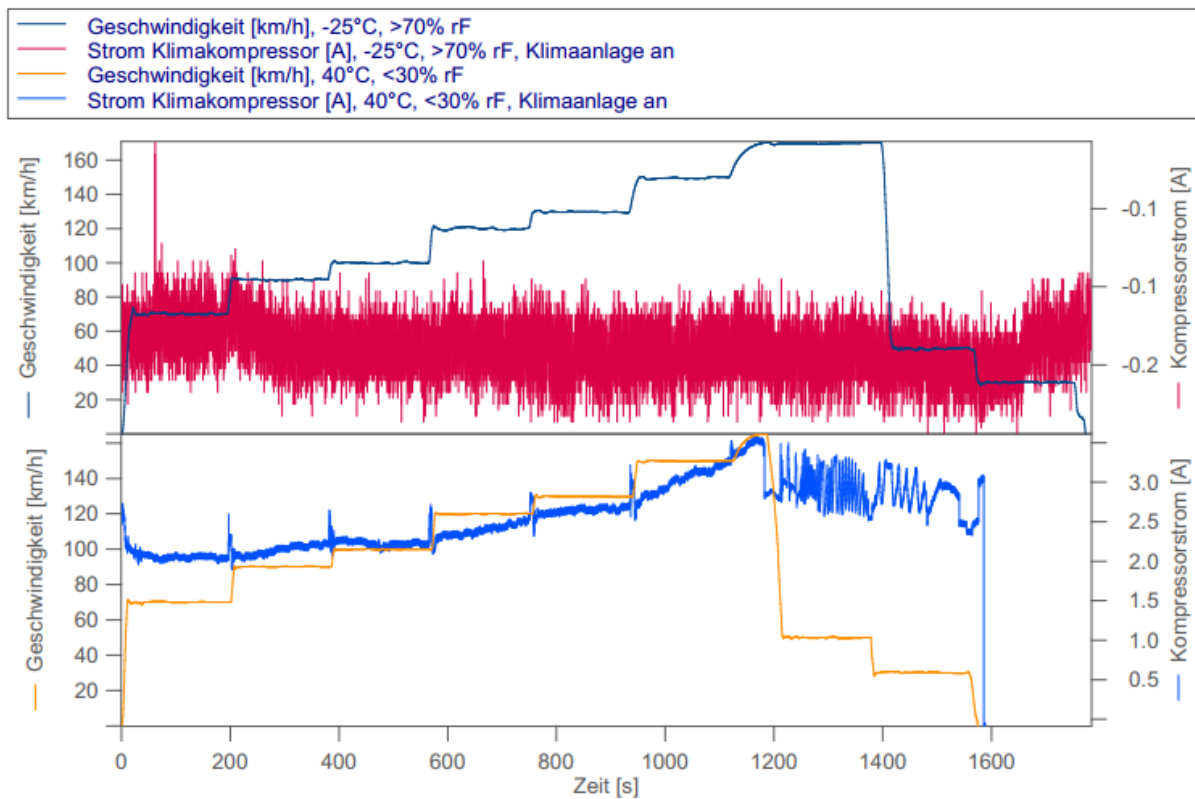


Abb. 5-12 Klimakompressorstrom bei -25 °C und 40 °C

Betrachtet man nun den Verlauf des Klimakompressorstroms bei -25 °C Umgebungstemperatur ist zu erkennen, dass dieser sich bei nahezu null bewegt. Dieses Verhalten kann als Messrauschen interpretiert werden und gibt die Inaktivität des Klimakompressors wieder. Aus der Analyse der Messdaten hat sich ergeben, dass der Klimakompressor bzw. das ganze Klimaanlage system einen Temperaturbereich besitzt in welchem dieser operiert. Im positiven Temperaturbereich ist der Klimakompressor aktiv, sinkt die Umgebungstemperatur wird der Klimakompressor inaktiv, da dieser ausschließlich für die Kühlung zuständig ist. Ist, durch die Umgebungstemperatur eine beheizen des Innenraums erforderlich wird dies vom PTC-Heizer übernommen. Diese Behauptung wird von den Verläufen bei 40 °C und -7 °C im Kapitel 5.3.2 sowie den Verläufen -7 °C und 40 °C im Kapitel 5.3.3 gestützt.

Bei 23 °C Umgebungstemperatur ist über den ganzen Verlauf eine Regelung des Systems zu erkennen. Durch die, ebenfalls auf 23 °C eingestellte Innenraumtemperatur regelt das System immer wieder bis zur Solltemperatur. Der stark ansteigende Klimakompressorstrom, am Anfang der Messung ist die Regelung des Systems auf eine möglichst schnelle Temperierung des Innenraums. Fast über den gesamten Verlauf stellt sich ein Strom von ca. 1,5 A ein, mit der Betriebsspannung von 450 V ergibt dies eine Leistungsaufnahme von 675 W.

Die Erhöhung der Umgebungstemperatur auf 40 °C erhöht den Klimakompressorstrom auf max. 3 A. Da der Temperaturunterschied im Innenraum zur Umgebung gestiegen ist, muss auch die Kühlleistung erhöht werden. Mit einem durchschnittlichen Strom von 2,5 A ergibt sich eine Leistung von 1,125 kW, also eine Verdoppelung der Leistungsaufnahme bei einer Temperatursteigerung von 15 °C.

Betrachtet man nun die Abb. 5-13, speziell den Verlauf des Klimakompressorstroms bei -7 °C erkennt man ein Regelverhalten. Der Klimakompressor wird erst ab einer Geschwindigkeit von 120 km/h aktiv. Grund hierfür ist das Einsatzgebiet des Klimakompressors. Dieser hat die Aufgabe den Fahrzeuginnenraum zu kühlen wohingegen der PTC-Heizer den Innenraum aufheizt. Diese Stromspitzen sind also ein Regelverhalten des Klimakompressors. Sobald die Innenraumtemperatur den Grenzbereich von 23 °C überschreitet, müsste der Klimakompressor beginnen zu arbeiten. Die Temperaturkurve in Abb. 5-13 kann solch ein Regelverhalten nicht bestätigen. Hierbei muss hinzugefügt werden, dass die Lage des von Hyundai verbauten Temperatursensors nicht bekannt ist. Ein Einbauort hinter dem Armaturenbrett könnte den Temperaturunterschied erklären, welcher mit der verbauten Sensorik nicht erfasst werden könnte.

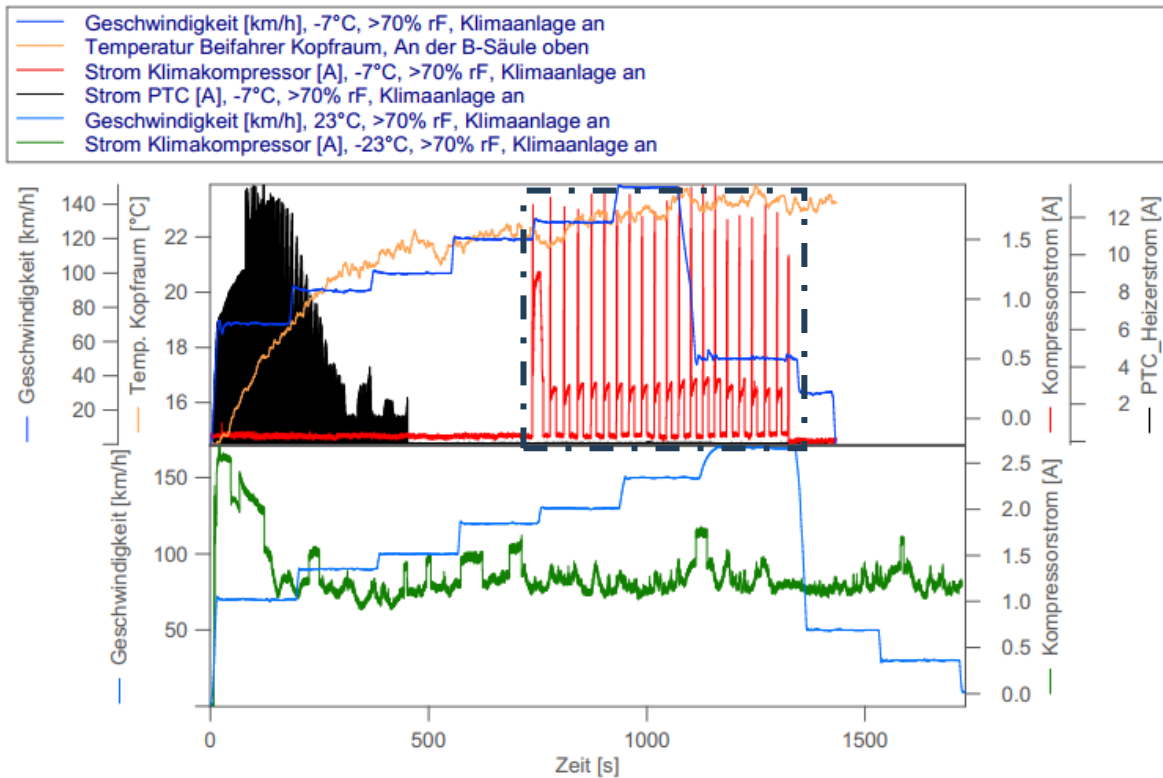


Abb. 5-13 Klimakompressorstrom bei -7 °C und 23 °C

Betrachtet man Abb. 5-13, erkennt man ein Eingreifen (Strich Punkt Linie) des PTC-Heizers zu Beginn der Testfahrt. Jedoch flacht dieser nach ca. 480 s wieder ab, die nächsten 270 s ist weder der Klimakompressor noch der PTC-Heizer aktiv. Der PTC-Heizer erwärmt den Innenraum bis zur Solltemperatur von 23 °C, danach schält sich dieser ab. Durch den Nachlauf der Lüfter und temperierten Luft, erwärmt sich der Innenraum noch einige Sekunden weiter. Hierbei schreitet die Innenraumtemperatur über die eingestellten 23 °C was ein Eingreifen des Klimakompressors zur Folge hat. Dieser kühlt kurzzeitig den Innenraum herunter bis sich der Klimakompressor wieder abschält. Dieses Zyklus wiederholt sich 21-mal bevor der Klimakompressorstrom, kurz vor Ende der Testfahrt zusammenbricht.

Prüftemperatur	Verbrauch [kW]
-25 °C	-
-7 °C	0,315
40 °C	1,125
23 °C	0,675

Tab. 5-5 Verbrauch [kW] Klimakompressor

Betrachtet man nun die Tab. 5-5 ist zu erkennen, dass der Klimakompressor bei hohen positiven Umgebungstemperaturen die höchste Leistungsabgabe hat. Mit einer Maximalleistung von 95 kW der Brennstoffzelle bedeutet dies, dass der Klimakompressor 1,18 % der gesamten, verfügbaren Leistung benötigt.

5.3.3 PTC-Heizer

Betrachtet man in der Abb. 5-14 den PTC Heizerstrom bei 23°C und in Abb. 5-15 bei 40 °C bestätigen diese die Behauptung von Kapitel 5.3.2. Bei positiven Umgebungstemperaturen ist das Klimaanlage system für die Temperierung des Innenraums zuständig. Die oben genannten Verläufe zeigen eindeutig ein inaktives Verhalten auf welches auch als Messrauschen beschrieben werden kann.

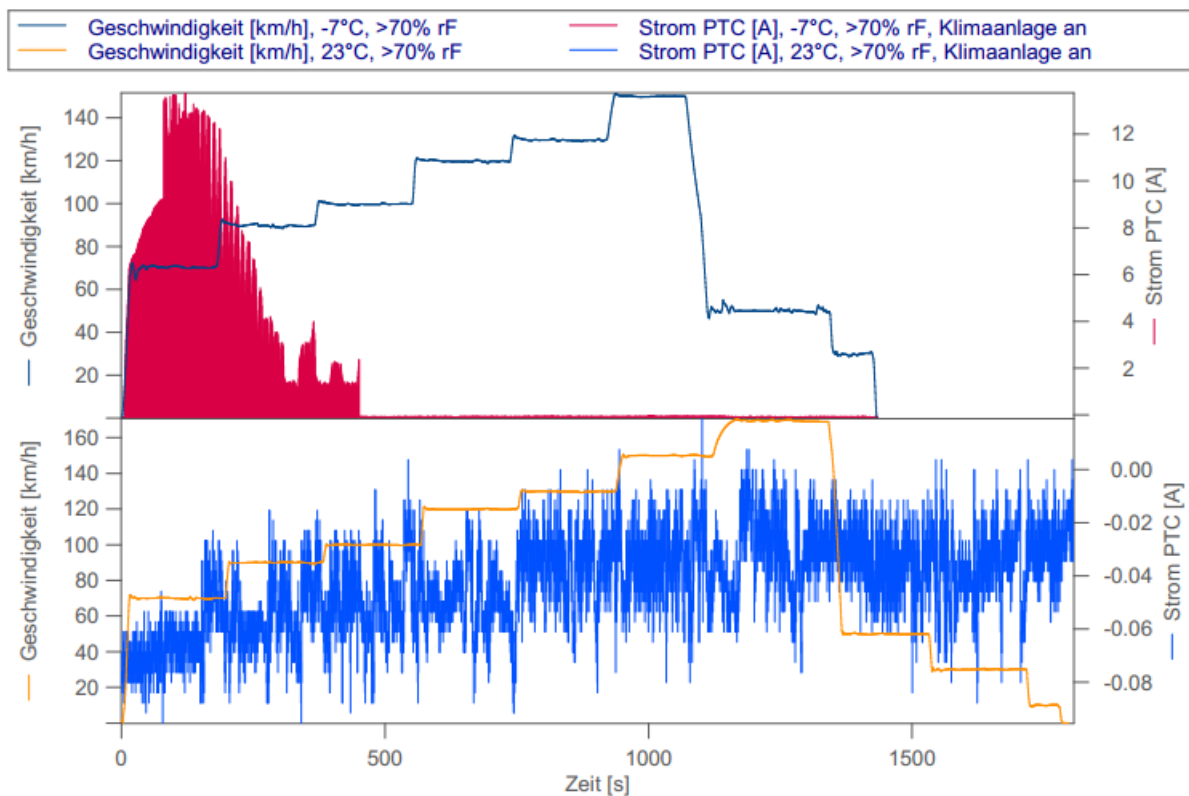


Abb. 5-14 Strom PTC bei -7 °C und 23 °C

Der PTC Heizerstrom bei -7 °C in Abb. 5-14 weist zu Beginn des Testlaufes einen stark ansteigenden Stromverlauf auf. Dieses Verhalten kann mehrere Gründe haben, einerseits ist der Innenraum des Testfahrzeuges im negativen Temperaturbereich was ein schnelles Eingreifen des Klimaanlage systems erfordern würde. Der Klimakompressor kann die Temperierung des Innenraums in kurzer Zeit nicht so schnell und effektiv umsetzen wie der PTC-Heizer. Über den restlichen Verlauf

bleibt der PTC-Heizer inaktiv. Wie in Kapitel 5.3.2 schon beschrieben wurde, ist dieses Verhalten unlogisch.

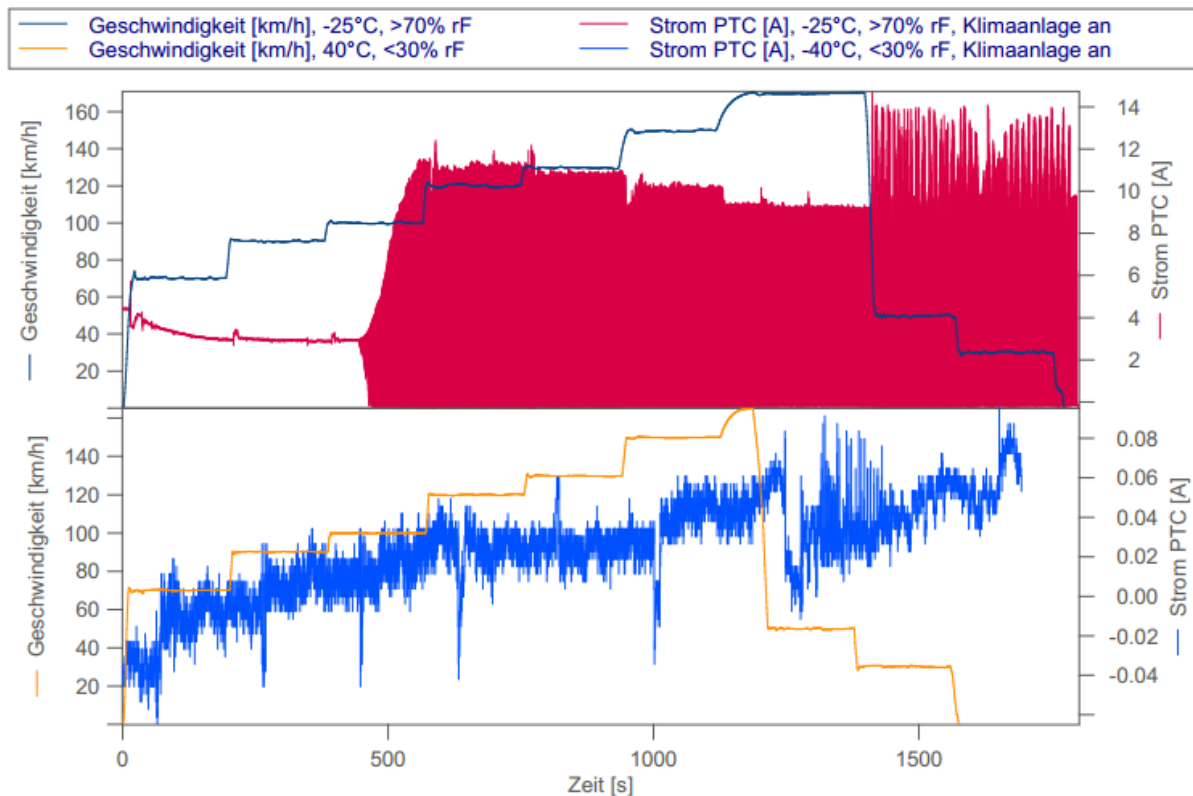


Abb. 5-15 Strom PTC bei $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $40\text{ }^{\circ}\text{C}$

In Abb. 5-15 erkennt man den PTC-Heizerstrom Verlauf bei $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ Umgebungstemperatur. Auch hier gibt es bestimmte Abschnitte im Verlauf welche nicht logisch erscheinen. Bei solch negativen Temperaturen übernimmt der PTC-Heizer die gesamte Temperierung des Innenraumes, Abb. 5-12 bestätigt dies, durch die Inaktivität des Klimakompressors. Zu Beginn des Testlaufes ist der Strombedarf in Relation gesehen gering. Es werden über 500 s durchschnittlich nur 4 A benötigt. Erst nach diesem Zeitintervall steigt der benötigte Strom auf ca. 11 A. Hieraus könnte man schließen, dass die entstehende Abwärme des Brennstoffzellensystems Auswirkungen auf die Temperatur im Innenraum hat. Betrachtet man den Zeitintervall von 500 s bis 1450 s kann man erkennen, dass sich mit zunehmender Geschwindigkeit, also mit zunehmender Abwärme der Brennstoffzelle, der PTC-Heizerstrom reduziert.

Prüftemperatur	Verbrauch [kW]
-25 °C	5,04
-7 °C	4,2
40 °C	-
23 °C	-

Tab. 5-6 Verbrauch [kW] PTC-Heizer

Die Tab. 5-6 veranschaulicht alle Verbräuche des PTC-Heizers. Die grafisch dargestellten Stromverbräuche werden mit der Betriebsspannung von 420 V verrechnet um die Gesamtleistung zu erhalten. Hierbei ist klar zu erkennen, dass dieser den höchsten Energiebedarf im Klimaanlage-System aufweist. Nimmt man die Leistung bei -25 °C Umgebungstemperatur entspricht dies 5,292 % der gesamten verfügbaren Leistung der Brennstoffzelle.

6 Resümee

6.1 Zusammenfassung

Zu Beginn dieses Projekts wurden Überlegungen angestellt welche Umwelteinflüsse eine Auswirkung auf den Verbrauch von Wasserstoff haben können. Als einstellbare Umgebungsparameter des Klimarollenprüfstands wurde die Temperatur im Bereich von -25 °C bis $+40\text{ °C}$ und Luftfeuchtigkeit im Bereich von $<30\%$ bis $>70\%$ ausgewählt. Im Zuge der Umbauarbeiten am Prüffahrzeug wurden sämtliche Sensoren überprüft um das Risiko von Fehlmessungen oder unbrauchbare Messdaten zu minimieren. Zusätzlich wurden weitere Sensoren eingebaut. Verwendet Messsensoren sind Temperatursensoren, Strom/-Spannungssensoren sowie Drucksensoren. Der Prüfplan wurde mit möglichst wenigen Fahrten geplant um das Projekt wirtschaftlich rentabel zu halten. Hierfür wurden die Umgebungsparameter sowie Zyklen sinnvoll in einem Prüfplan zusammengefasst. Angeregt wurde dies von der Methodik der statistischen Versuchsplanung welche die Minimierung von Versuchsdurchführungen beschreibt. Die erhaltenen Messdaten wurden im Anschluss mithilfe von IMC Famos Enterprise, einem Datenverarbeitungsprogramm analysiert und ausgewertet. Im Zuge der dieser wissenschaftlichen Arbeit wurden die Ergebnisse zusätzlich visualisiert und komprimiert wiedergegeben.

6.2 Fazit

In Tab 6-1 sind alle gesammelten Daten zusammengefasst. Wie bereits im Vorhinein vermutet, ist der Verbrauch von Wasserstoff sowie die benötigte Leistung bei negativen Temperaturen am höchsten. Die Analyse der Daten ergab, dass der PTC-Heizer für diese hohen Leistungen bzw. Verbräuche verantwortlich ist. Dieser arbeitet ausschließlich bei negativen Temperaturen was in Kapitel 5.3.3 belegt wird. Seine maximale Leistung von $5,04\text{ kW}$ erreicht dieser bei einer Umgebungstemperatur von -25 °C .

Prüftemperatur	Verbrauch
-25 °C	5,047 kW / 8,256 g
-7 °C	4,521 kW / 8,76 g
40 °C	- / 1,182 g
23 °C	0,675 kW / 3,342 g

Tab. 6-1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Betrieht man die Klimaanlage bei positiven Temperaturen, setzt sich der Mehrverbrauch aus den Leistungen des Klimakompressors und der Lüfter zusammen. Mit steigender Temperatur und benötigter Kühlung des Innenraums wird der Klimakompressor aktiver was zu einer erhöhten Leistungsaufnahme führt. Jedoch ist eine maximale Abgabe von 1,125 kW, bei 40 °C Umgebungstemperatur deutlich unter der Leistungsaufnahme des PTC-Heizers. Die Lüfter haben einen sehr geringen Einfluss auf den Verbrauch von Wasserstoff. Zwar ist der Arbeitsbereich der Lüfter temperaturunabhängig was eine dauerhafte Leistungsaufnahme erfordert, jedoch ergab sich ein Leistungsmaximum bei 40 °C Umgebungstemperatur von 0,057 kW. Im Vergleich zu den anderen Klimaanlagekomponenten ist der Verbrauch der Lüfter verschwindend gering.

Betrachtet man nun in Kapitel 5.2.3 die Tab 5-2 Reichweitenminimierung ist schnell klar, dass die Verwendung der Klimaanlage einen geringen Einfluss auf die Reichweite hat, in Hinsicht auf die mitteleuropäischen Temperaturen. Den größten Einfluss auf die Reichweite hat der PTC-Heizer welcher eine Maximalleistung von 5,04 kW aufweist. Bei -25 °C Umgebungstemperatur entsteht durch die Verwendung der Klimaanlage ein Verlust an Reichweite von 0,866 km pro 100 km. Rechnet man dies, auf die von Hyundai angegebene Reichweite von 756 km entsteht ein Reichweitenverlust von 6,496 km. In Tab. 6-2 sind sämtliche Reichweitenminderung dargestellt.

Prüftemperatur	Reichweitenminderung [km]
-25 °C	6,495
-7 °C	6,892
23 °C	2,625

Tab. 6-2 Reichweitenminderung auf 756 km Reichweite

Im Verlauf dieses Projekts sind unvorhergesehene Probleme aufgetreten, die zu einer verringerten Vergleichbarkeit der Daten geführt haben. Während eines Testlaufes bei 23 °C Umgebungstemperatur ist ein Defekt der Blowersicherung aufgetreten. Die Identifikation des Fehlers und die Bestellung der benötigten Ersatzteile haben zu einer Verzögerung der nachfolgenden Testfahrten geführt. Aus zeitlichen Gründen wurden Testfahrten ausgesetzt. Daher steht keine Messung zur Reichweitenminderung bei +40 °C Umgebungstemperatur zur Verfügung. Für zukünftige Projekte empfiehlt es sich, die relevantesten Testfahrten in einem Kernprogramm abzarbeiten, bevor weniger relevante Testfahrten absolviert werden. Dabei sollte die Wirtschaftlichkeit berücksichtigt werden, da das unnötige Temperieren der Klimakammer viel Energie benötigt. Das Verhalten des Klimakompressors bei einer Umgebungstemperatur von -7 °C konnte nicht vollständig erklärt werden. Dieser weist, bei steigender Innenraumtemperatur ein Regelverhalten auf. Durch den Nachlauf warmer Luft steigt, die Innenraumtemperatur trotz abgeschaltetem PTC-Heizer weiter an und zwar bis zur Regelgrenze des Klimakompressors. Sobald diese überschritten wird, beginnt der Klimakompressor, kurzzeitig damit den Innenraum zu kühlen. Durch den nur kurzen Zeitraum hat dies jedoch nur einen temporären Effekt was zu einem Wiedereinschalten des Klimakompressors führt. Dieser Zyklus wiederholt sich 21-mal bis kurz vor Ende der Testfahrt. Um dieses Problem bei zukünftigen Projekten in Bezug auf die Klimaanlage zu lösen, wäre es notwendig, dass CAN-Signal des Klimakompressors einzusehen. Daher könnte ein besseres Verständnis dafür erlangt werden, warum der Klimakompressor dieses ungewöhnliche Verhalten aufweist. Es wird empfohlen, sich mit einem Hyundai-Händler in Verbindung zu setzen, um weitere Informationen zum Klimakompressor zu erhalten.

6.3 Ausblick

Bei der Abgrenzung von wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen zu rein elektrisch angetriebenen Fahrzeugen ist zu beachten, dass bei FCEV die elektrische Energie durch einen chemischen Prozess entsteht und nicht direkt verwendet werden kann. Die Batterie in FCEV dient lediglich als Puffer, bis die Brennstoffzelle die benötigte Leistung abgeben kann. Aus diesem Grund ist die Batterie wesentlich kleiner als bei rein elektrischen Fahrzeugen. Bei BEV muss die, zum Antrieb benötigte Leistung immer gespeichert werden, was zu einer Vergrößerung der Batterie führt. Hier liegt die Problematik, da die Speicherung von elektrischer Energie von bestimmten

Einflussfaktoren abhängt. Bei negativen Temperaturen muss die Batterie beheizt werden, da sich die Kapazität mit sinkender Temperatur ebenfalls verringert. Gleiches gilt für Temperaturen im positiven Bereich. Die Temperierung der Batterie verbraucht viel Energie und kann sich negativ auf die Reichweite auswirken. Ein weiterer wichtiger Faktor ist das Gewicht der Batterie, die je nach Reichweite zwischen 250 kg und 700 kg variieren kann. Daher ist es für zukünftige Elektrofahrzeuge von großer Bedeutung, einen effizienten Energiehaushalt zu implementieren, um unnötigen Energieverbrauch zu vermeiden und die Reichweite zu maximieren.

Um den Hyundai Nexso bezüglich seines Klimaanlage-System noch effizienter zu gestalten, müsste der größte Verbraucher und dessen Leistungsaufnahme reduziert werden. Durch diese Arbeit wurde der PTC-Heizer als größten Verbraucher identifiziert, nun gilt es diesen effizienter zu gestalten oder komplett durch energieärmere Komponenten oder Lösungen zu ersetzen. Der PTC-Heizer ist ausschließlich für die Beheizung des Innenraums zuständig. Daher werden nach Komponenten oder Systemen gesucht, die lediglich die Funktion des Heizens erfüllen. Hierfür würde sich eine Wärmepumpensystem empfehlen. Durch das Verdichten und den somit entstehenden Phasenwechsel wird Wärme erzeugt, welche wiederum zum Heizen des Innenraums genutzt wird. Darüber hinaus kann das nun kalte Medium für die Kühlung des Innenraums eingesetzt werden. Durch diesen Kältemittelkreislauf und durch Verwendung energiesparender Komponenten könnte der Reichweitenminimierung entgegengewirkt werden.

Für zukünftige Projekte, mit Bezug auf das Klimaanlage-System könnten Dauerlauf Erprobungen durchgeführt werden. Die Testfahrten dieser Arbeit hatten eine maximale Laufzeit von 30 min, was eine Abschätzung der Daten für längere Fahrten zu Folge hat. Wie verhalten sich die Klimaanlage-Komponenten bei längeren Laufzeiten, gibt es eine Veränderung der Leistungsaufnahme, schalten sich die Komponenten in eine Art Ruhezustand bei längerer nicht Nutzung. Diese Fragen könnten durch Dauererprobungen beantwortet werden. Ein weiterer Punkt wäre eine genauere Betrachtung des Kältemittelkreislaufs. Wie agiert der Kältemittelkreislauf bei unterschiedlichen Kühlleistungen. Hat der Kältemitteldruck eine Auswirkung auf die Effizienz des Systems bzw. kann mit geringeren Drücken die gleiche Kühlleistung erreicht werden? Bei welchen Kältemitteltemperaturen arbeitet das Gesamtsystem

am effizientesten? Durch Verwendung geeigneter Thermoelemente und Drucksensoren könnte ein besseres Verständnis des Kältemittelkreislaufs sowie dessen Verhalten auf die Verwendung der Klimaanlage erlangt werden.

7 Literaturverzeichnis

- [1] „Landesportal,“ [Online]. Available: <https://wm.baden-wuerttemberg.de/de/innovation/wirtschaftsnahe-forschung>. [Zugriff am 6 10 2024].
- [2] Deutsches Institut für Normung, *Raumlufttechnik*, Berlin: Beuth, Juli 2006, p. 17.
- [3] R. Burger, *Schulung*, Stuttgart: TWK, 2017.
- [4] SBZ Monteur, „Scrollkompressor,“ 2020.
- [5] U. Deh, *Kfz-Klimaanlagen*, Magdeburg: Vogel Buchverlag, 2011.
- [6] Cold.world, „Thermostatische Expansionsventile Aufbau und Funktion,“ Berlin, 2021.
- [7] J. Wiesinger, „Hauptbauteile der Kfz Klimaanlage“.
- [8] H. Großmann und C. Böttcher, *Pkw-Klimatisierung*, Berlin; Heidelberg: Springer Vieweg, 2020.
- [9] Continental, „Interner Wärmetauscher,“ 2022.
- [10] D.-I. H. Großmann, „Kältemittel R1234yf und CO2 im Vergleich,“ Springer.
- [11] TÜV Nord, „TÜV Nord,“ [Online]. Available: <https://www.tuev-nord.de/de/unternehmen/energie/wasserstoff/wasserstoff-brennstoffzelle/>.
- [12] A. Rosenkranz, „Plattenwärmetauscher: Funktion und Aufbau,“ 2020.

- [13] L. F. ,. S. C. ,. M. R. H. A. Shenyu Wu, „Analysis of air conditioning system impact on a fuel cell vehicle performance based on a realistic model under actual urban conditions,“ International journal of hydrogen , 2021.
- [14] D.-W. S. Bonitz, „Zur Lebensdauerabschätzung von Brennstoffzellen,“ Papierflieger Verlag, Bad Harzburg, 2016.
- [15] DieselNet, „EPA New York City Cycle (NYCC)“.
- [16] P. Franz, „Der Vier-Motoren- Allradrollenprüfstand mit Klimatisierung und Abgasanalyse am DLR – Institut für Fahrzeugkonzepte, Stuttgart,“ Stuttgart, 2022.
- [17] P. Franz, „Klimatisierter Allrad-Rollenprüfstand mit Abgasanalyse,“ DLR Stuttgart, Stuttgart, 2022.
- [18] ALICAT Scientific, „Funktionsprinzip des Coriolis-Durchflussmessers“.
- [19] Launch Europe GmbH, „X-432-euro-pro-4,“ Launch Europe GmbH.
- [20] F. Epple, H. Hellstern und T. Schneider, „Sensorplan Hyundai Nexo,“ Stuttgart , 2023.
- [21] TC Mess-& Regeltechnik GmbH, „Thermoelement Typ K - Technische Informationen,“ 2021.
- [22] IMC, „imc CANSAS Bedienerhandbuch,“ Berlin , 2013.
- [23] RS, „RS,“ [Online]. Available: <https://de.rs-online.com/web/p/stromwandler/0497299>. [Zugriff am 23 8 2023].
- [24] T. Kashyap, „18.07.2022_Comparison_FCEV,“ Stuttgart, 2022.

- [25] K. Felix, „Entwicklung einer neuen harmonisierten Testprozedur im Rahmen der Fahrzyklusentwicklung (WLTP) für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge in der UNECE – Evaluierungsphase,“ Umweltbundesamt, 2019.
- [26] VW, [Online]. Available: <https://www.volkswagen.de>. [Zugriff am 2 10 2023].
- [27] IIMC, „IMC,“ [Online]. Available: https://www.imc-tm.de/Public/Downloads/imc_FAMOS/TD_imc_FAMOS_2023.de.pdf. [Zugriff am 12 9 2023].