

Standklimaanlage mit Brennstoffzellen-APU

Robert Höppler, Hermann Zenker

1 Einleitung

Fahrzeugklimaanlagen haben sich in den letzten Jahren rasant zur Standardausrüstung in nahezu allen Fahrzeugklassen entwickelt. Die unbestrittenen Komfortvorteile im sommerlichen Fahrbetrieb haben aber immer noch eine Lücke. Nach Fahrtantritt mit einem unter Sonneneinstrahlung aufgeheizten Fahrzeug ist immer noch eine unkomfortable Phase zu überbrücken während der Fahrzeuginneraum auf angenehme Temperaturen abgekühlt wird.

Standklimatisierung, analog der Standheizung, ist eine äußerst attraktive kundenwertige Funktion. Aus diesem Grund untersucht BMW seit Jahren unterschiedliche Lösungsansätze.

Der Einsatz einer Brennstoffzelle als Energiequelle für diese Anwendung bildet die Basis für ein besonders vielversprechendes Konzept.

2 Standklimaanlagenkonzepte

Grundsätzlich lassen sich die Konzepte für eine Standklimatisierung in 3 Gruppen unterteilen:

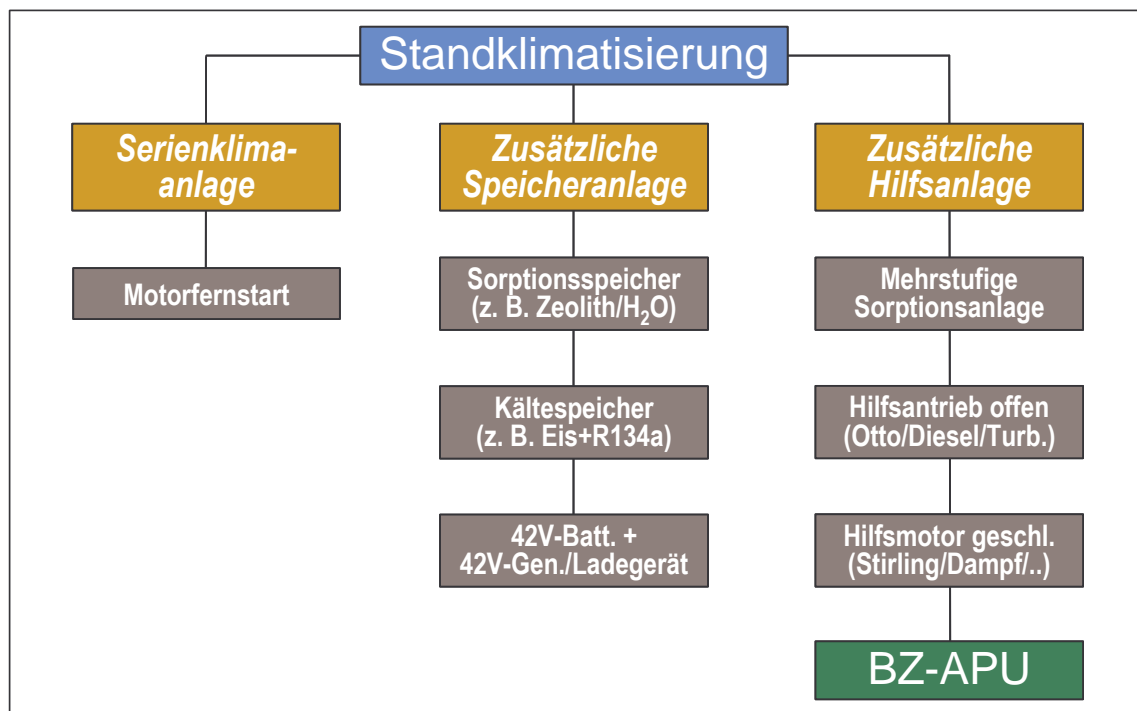


Bild 1: Standklimaanlagenkonzepte

2.1 Motorfernstart

Das einfachste, kostengünstigste und packageverträglichste (aber auch primitivste!) SKA-Konzept ist sicher die Nutzung der Serienklimaanlage im Zusammenspiel mit einer Motorfernstarteinrichtung. Diese Art der Standklimatisierung ist aber in wichtigen Zielmärkten nicht erlaubt.

In Deutschland und angrenzenden Ländern wie Österreich, Schweiz und Polen sowie in Großbritannien ist längerer Motorleerlauf im Stand, sprich Idling, verboten.

In Ländern wie Rußland, Türkei, aber auch Niederlande und Dänemark ist es dagegen erlaubt. In vielen anderen europäischen Ländern ist aber die Gesetzeslage noch unklar.

Aber auch in einem klassischen Klimaanlagenmarkt wie USA ist die Gesetzeslage uneinheitlich. Etliche Staaten an der Ost- und Westküste der USA erlauben kein Idling mehr. In den übrigen Staaten wird Idling jedoch noch geduldet und ist durchaus gängige Praxis. Unabhängig davon sollte aber in einer Zeit da weltweit die ökologischen Aspekte der Fahrzeugklimatisierung diskutiert werden, allein aus Umweltgesichtspunkten eine derartige Lösung nicht akzeptabel sein.

2.2 Energiespeichersysteme

Kälte- oder Energiespeicheranlagen haben den großen Vorteil, dass sie im Betrieb keinerlei Emissionen verursachen. Problematisch ist aber ihre deutlich begrenzte Wirkungsdauer und die notwendige schnelle Wiederaufladung.

Ein Beispiel hierfür ist die Zeolith-Kältespeicheranlage wie sie im Rahmen eines vom BMFT geförderten Projektes 1992 bei BMW untersucht wurde.

Die Adsorption von Wasserdampf durch Zeolith führt zu verstärkter Wasserverdampfung im Verdampferbehälter, der dabei stark abkühlt und damit Kälte liefert. Die Wiederbeladung des Speichers erfolgt durch Austreiben des Wassers aus dem Zeolith über Wärmezufuhr.

Praktisch dargestellt wurde dies in Form einer ca. 40kg schweren Speicheranlage mit 2,5kWh Kältespeicherkapazität im Kofferraum eines 3er BMW. Sie erlaubte eine Standklimatisierung über ca. 40min und füllte mit 60l einen Großteil des Gepäckraumes aus. Dieser große Bauraumbedarf und die ungünstigen Wiederaufladezyklen im Fahrbetrieb waren schließlich das Aus für dieses Konzept.

Ein anderes Beispiel für die Nutzung eines Energiespeichers bildet die Elektroklimateanlage im 1995 entwickelten BMW-Elektrofahrzeug, die, dank der großen Traktionsbatterie, auch als Standklimaanlage genutzt werden konnte.

Die große Speicherkapazität der Traktionsbatterie erlaubte hier auch längere Standklimatisierungsphasen. Kritische Punkte sind die zeitraubende Wiederbeladung, die Kosten und das Gewicht der Traktionsbatterie.

Überlegungen eine Standklimaanlage in einem konventionellen Fahrzeug mittels zusätzlichem Elektrokompresseur und zusätzlicher Batterie darzustellen scheitern schnell an Package, Gewicht und Kosten, sowie an den auch hier problematischen Wiederaufladezyklen.

2.3 Nutzung von Hilfsenergie

Die Standklimatisierung mit Hilfsantrieb (Otto, Diesel, Stirling, etc.) ist prinzipiell technisch darstellbar und energetisch durchaus interessant /1/. Allerdings sind die gegenwärtig auf dem Markt verfügbaren Hilfsantriebe durchgängig nicht Pkw-tauglich und der Entwicklungsaufwand für diese Applikation, insbesondere für Akustik und Kühlung, ist entsprechend hoch. Noch dazu ist das Innovationspotential eher bescheiden und dementsprechend eine geringe Kundenakzeptanz zu erwarten.

Eine Standklimaanlage mit BZ-APU hat BMW schon 1999 auf der IAA in Frankfurt in einem sogenannten CleanEnergy-Fahrzeug mit Wasserstoffantrieb gezeigt /2/.

Ziel war zu demonstrieren, dass eine BZ im Pkw durchaus Sinn macht, aber nicht für die Antriebsversorgung, sondern für die Bordnetz-plus-Versorgung. Das „plus“ steht für neuartige Applikationen wie z. B. die Standklimatisierung. Im CE Fahrzeug mit SKA wurde der mechanische Serienverdichter durch einen Elektroverdichter ersetzt. Das war hier problemlos möglich, weil die in diesem Fahrzeug eingesetzte PEM-FC-APU im Bedarfsfall innerhalb weniger Sekunden leistungsbereit ist. Voraussetzung für diese Lösung ist die Verfügbarkeit von Wasserstoff an Bord.

Bei Fahrzeugen mit konventionellem Kraftstoff muß zum Betrieb einer Brennstoffzelle aus dem Kraftstoff zunächst ein sog. Reformergas erzeugt werden. Der dafür geeignete Brennstoffzellentyp sind die SOFCs. Diesem Vorteil der SOFCs steht aber ein großer Nachteil gegenüber: Die SOFCs zeigen erst bei sehr hohen Betriebstemperaturen Leistungsbereitschaft. In der Aufheizphase, die einige Minuten dauert, kann keine Leistung abgegeben werden.

Dieses verzögerte Abkühlverhalten der Klimaanlage wäre im Kundenbetrieb auf keinen Fall akzeptabel. Aus diesem Grund, aber auch aus Effizienzgründen kann auf den mechanischen abgetriebenen Serienverdichter nicht verzichtet werden.

3 Systemkonfiguration

Bild 2 zeigt die von BMW aktuell untersuchte Systemkonfiguration.

Das Herzstück der Anlage, die Brennstoffzelle, wurde im Kofferraum untergebracht. Aufgrund der benötigten elektrischen Leistungen von mehreren Kilowatt macht es Sinn ein 2-Spannungsbordnetz vorzusehen in welchem der Kompressor (Leistungsaufnahme bis 3kW) mit 42 Volt betrieben wird.

Im Kältekreislauf sitzt ein zusätzliches Rückschlagventil in der Druckleitung zum Elektrokältemittelverdichter. Dieses Rückschlagventil verhindert beim Betrieb der Klimaanlage über den Serienverdichter einen Kältemittelentzug aus dem Hauptkältekreislauf (= Serienkreislauf) durch Kondensation in dieser Leitung und sorgt damit für die Aufrechterhaltung des optimalen Kältemittelfüllstandes im Hauptkreislauf.

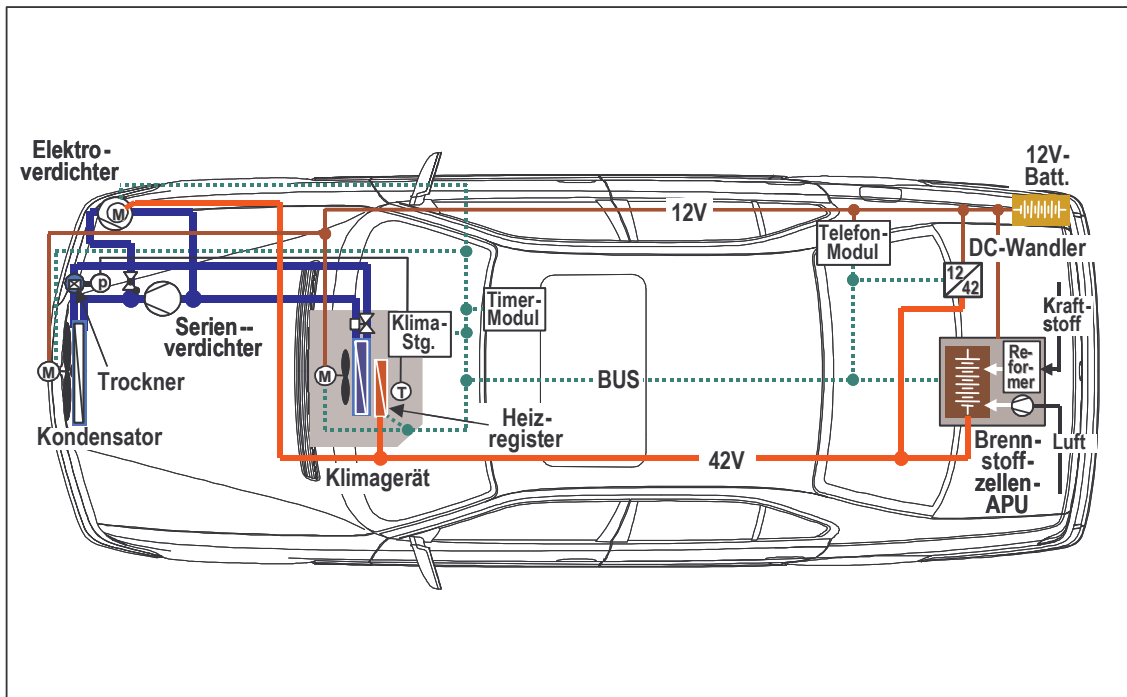


Bild 2: Systemkonfiguration

Die Steuerung und Regelung der Standklimaanlage erfolgt über die Controller der beteiligten Komponenten (Klimasteuergerät, APU, DC/DC-Wandler, Elektroverdichter, s. Bild 2), die dazu über CAN oder Hilfsbus miteinander kommunizieren.

Wie bei einer Standheizung kann der Start der Standklimatisierung über Timer, Timer- Direktstart, Funkhandsender oder Telefon erfolgen.

4 Schlüsselkomponenten

4.1 Brennstoffzellen-APU

Die Brennstoffzelle, schon 1839 von Sir William Robert Grove entdeckt, wandelt chemische Energie direkt in elektrische Energie um.

Sie besteht aus zwei Elektroden mit dazwischengeschobenem Elektrolyten. Eine der Elektroden (Anode bzw. Minus-Pol) wird mit dem Brennstoff, die andere (Kathode bzw. Plus-Pol) mit Sauerstoff oder Luft beaufschlagt. Von der Kathode aus wandern Sauerstoffionen durch den Elektrolyten zur Anode. Hier wird der Brennstoff unter Elektronenabgabe oxidiert. Die Elektronen fließen über den äußeren Stromkreis, in dem der Verbraucher sitzt, zur Kathode, an der neue Sauerstoffionen generiert werden. Bei stetiger Brennstoff- und Sauerstoffzufuhr kann damit der Brennstoffzelle kontinuierlich elektrische Energie entnommen werden.

Eine wie oben beschrieben arbeitende Brennstoffzelle liefert eine Gleichspannung von unter einem Volt. Für Applikationen, die eine höhere Versorgungsspannung erfordern, werden entsprechend viele Brennstoffzellen hintereinandergeschaltet und in einem sogenannten Stack zusammengefasst.

Als Brennstoff wird je nach Brennstoffzellenart Wasserstoff, Methan, Methanol oder Kohlegas eingesetzt. Im Pkw sind diese Brennstoffe nicht direkt verfügbar. Sie müssen aus dem Kraftstoff gewonnen werden. Dazu setzt man einen sogenannten Mikroreformer ein, der den Kraftstoff bei 800 °C partiell oxidiert und ein heißes Mischgas liefert, das überwiegend aus N_2 , CH_4 , CO_2 , CO und H_2 besteht. Dieses heiße sogenannte Reformergas wird in der BMW-Brennstoffzellen-APU zusammen mit einem über einen Abgaswärmetauscher vorerhitzten Sauerstoffanteil direkt in die mit Solid Oxid Fuel Cells (SOFC = Brennstoffzellen mit Feststoffelektrolyt) bestückten Stacks geleitet und dort bei 800 °C Betriebstemperatur oxidiert.

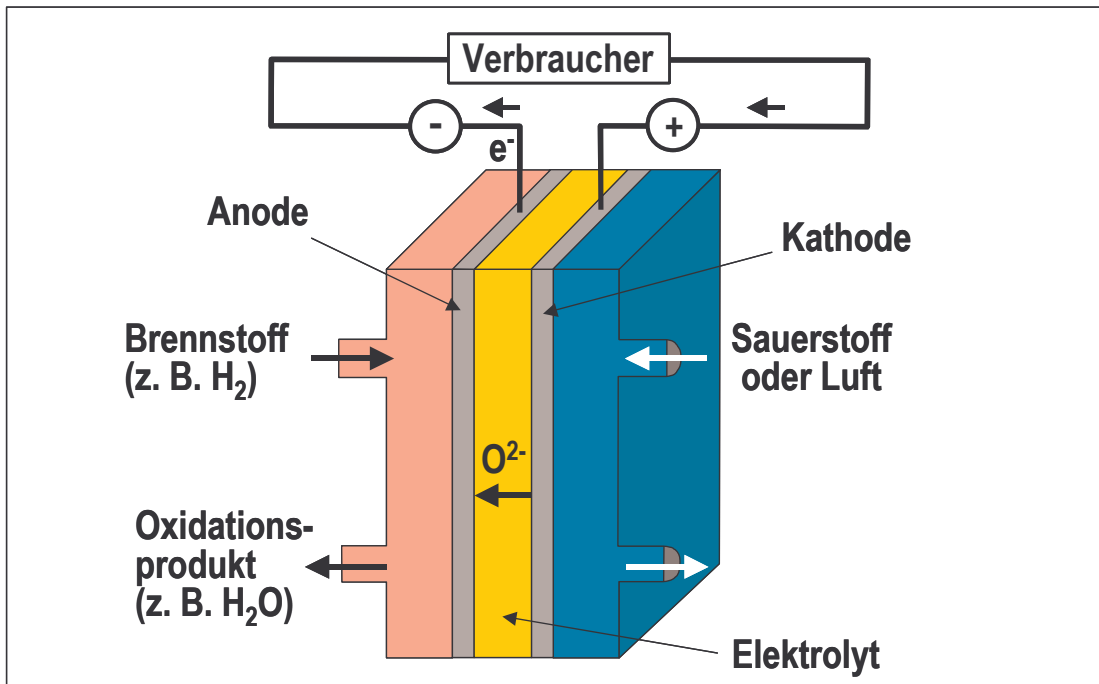


Bild 2: Funktionsschema SOFC-Brennstoffzelle

Im Gegensatz zu den bei Raumtemperatur arbeitenden Brennstoffzellen (z. B. PEMFC = Polymer Elektrolyt Membrane Fuel Cells) sind SOFC wesentlich unempfindlicher gegenüber Brennstoffverunreinigungen und sie arbeiten auf dem Temperaturniveau des Reformergases

Allerdings wirkt sich die hohe Betriebstemperatur der SOFC nachteilig auf das Hochlaufverhalten der Brennstoffzellen- APU aus. Die Stacks müssen erst auf eine Betriebstemperatur von 800 °C gebracht werden, bevor sie die volle elektrische Leistung abgeben können. Die Aufheiz- und damit Hochlaufgeschwindigkeit hängt von der Heizleistung des Mikroreformers, der Wärmekapazität der Stacks und der Wärmeableitung ab. Die Stacks müssen daher möglichst leicht und thermisch sehr gut isoliert sein. Die Vorwärmung der Prozessluft über einen Abgas/Luft-Wärmetauscher verkürzt zusätzlich die Aufheizzeit und steigert den Wirkungsgrad der APU.

Neben dem Mikroreformer und den Stacks sind für die Funktion der Brennstoffzellen-APU noch eine Kraftstoffpumpe, ein Luftfördergebläse, ein Spannungskonstanter und ein APU- Steuergerät notwendig.

Die Pkw- Applikation stellt harte Anforderungen an diese APU:

- Hohe Leistungsdichteanforderung ($\geq 0,1 \text{ kW/kg}$ und $\geq 0,1 \text{ kW/l}$),
- Hohe Zyklier-, Vibrations- und Stoßfestigkeit
- Hohe Funktions- und Crashesicherheit
- Hohe Emissionsarmut und akustische Unauffälligkeit
- Hohe Effizienz bzw. niedriger Kraftstoffverbrauch

4.2 Elektroverdichter

Elektrische Kältemittelverdichter werden heute millionenfach in der Haushalt-, Gewerbe- und Raumkühlung eingesetzt. Diese Aggregate arbeiten auf Grund der kontinuierlichen Weiterentwicklung mittlerweile in der Regel sehr leise und sehr zuverlässig.

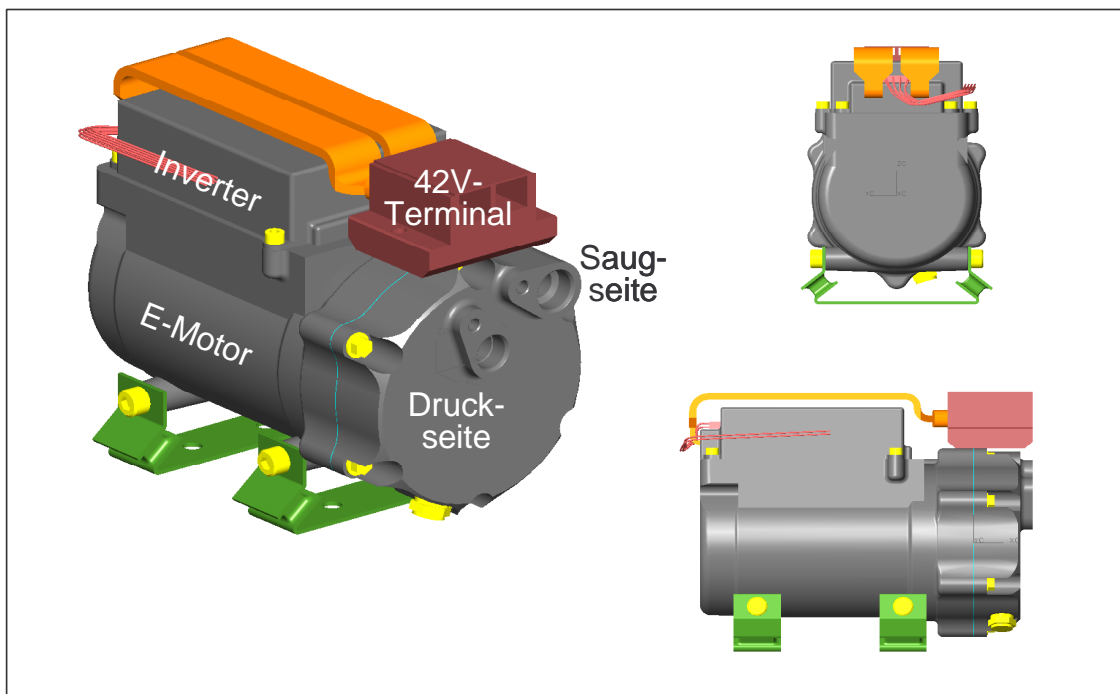


Bild 3: Elektrokältemittelverdichter

Die ersten Pkw-tauglichen Elektrokältemittelverdichter wurden für Elektrofahrzeuge entwickelt. Dazu wurden Kühlaggregate der „Weißen Ware“ entsprechend den neuen Anforderungen modifiziert. Die Aggregate wurden mit hocheffizienten Synchronmotoren ausgestattet und mit Hilfe sogenannter Inverter betrieben, die den Gleichstrom der Elektrofahrzeug-Traktionsbatterie in Drehstrom konvertieren und damit eine kontinuierliche bedarfsorientierte Drehzahlregelung erlauben. Die Inverter waren dabei noch separate Einheiten. Die Versorgungsspannung lag zwischen 200 und 400 V. Das Gewicht inklusive Inverter betrug 12 bis 13 kg und als Kälteöl im Aggregat wurde Esteröl verwendet.

Inzwischen hat eine Weiterentwicklung dieser Aggregate in Richtung 42V-Bordnetz und SKA-Applikation stattgefunden. Die neuesten Entwicklungsmuster sind

Scroll-Verdichter mit Hubräumen zwischen 20 und 35 ccm, Synchronmotoren mit Permanentmagnet-Rotoren und integrierte Invertern, die weitgehend den Anforderungen eines künftigen 42V- Bordnetzes genügen. Sie wiegen knapp über 7 kg, haben grob die Abmessung eines Standheizaggregates und können mit dem Pkw-Serienkälteöl (PAG-Öl) gefahren werden. Abhängig vom jeweiligen Hubvolumen können Drehzahlen von minimal 500..1000 Upm bis maximal 5000..9000 Upm gefahren werden.

Bei BMW sind Entwicklungsmuster von verschiedenen Lieferanten auf dem Kompressorleistungsprüfstand untersucht worden:

Die maximale Kälteleistung der Elektrokältemittelverdichter ist mittlerweile absolut vergleichbar mit der Kälteleistung mechanischer Serienkältemittelverdichter unter Idle-Bedingungen (Motorleerlauf und Windstille). Die maximale elektrische Leistungsaufnahme liegt bei ca. 3,5 kW.

5 Systemauslegung und Systemfunktion

Basis für die Konzeptionierung und Auslegung eines Standklimasystems ist die Definition von Anforderungen u.a. mit der Klärung der Frage „Was erwartet der Kunde von seiner Sonderausstattung SKA?“.

Eine Minimalanforderung stellt aus unserer Sicht die Leistungsfähigkeit der „Primitivlösung“ Motorfernstart dar.

Diagramm 1 zeigt die mit einem Motorfernstart erzielbare Abkühlkurve im Vergleich zur Leistung einer Standklimaanlage mit BZ-APU sowie die benötigte elektrische Leistung.

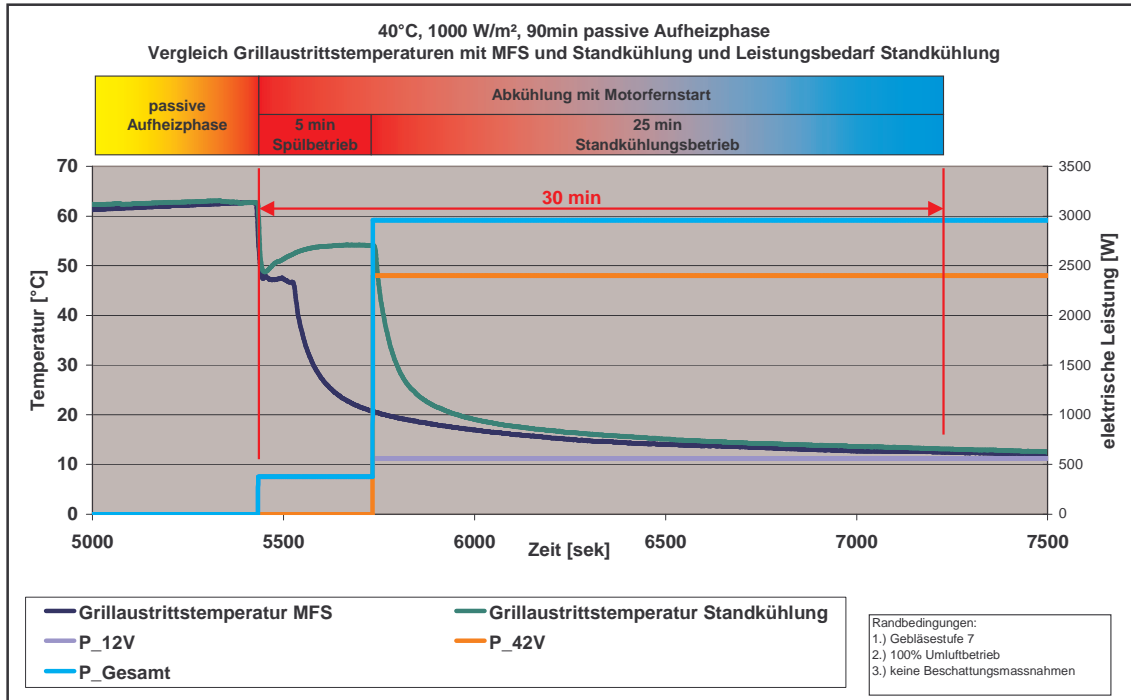


Diagramm 1: Abkühlkurve / Leistungsbedarf Standklimatisierung

Auffallend ist die verzögerte Bereitstellung der Kälteleistung aufgrund der typischen Aufheizverzögerung des Reformers. Wesentlich für eine Akzeptanz ist aber die Erreichung eines akzeptablen Temperaturniveaus nach angemessener Zeit. Bereits nach ca. 10 min liefert die Standklimaanlage die gleichen Ausblastemperaturen wie ein per Motorfernstart betriebenes Fahrzeug. Um die erforderliche Kälteleistung und damit auch den elektrischen Leistungsbedarf zu minimieren erfolgt während der (simulierten) Startzeit der Brennstoffzelle für 5 min ein Spülen des Innenraums bei maximalem Luftdurchsatz. Für die restliche Dauer der Standklimatisierungsphase wurde die elektrische Leistung konstant gehalten. Eine Optimierung der Leistungsverteilung wird noch Gegenstand weiterer Untersuchungen sein.

Neben dieser zusätzlichen Komfort-Funktion „Standklimatisierung“ bietet eine elektrische Klimatisierung auf Basis einer BZ-APU noch Potential für weitere Funktionen. Auch die Erhaltungskühlung wie sie bei Abschalten des Verbrennungsmotors in Verbindung mit MSA-Systemen oder Hybridfahrzeugen benötigt wird lässt sich damit unschwer darstellen. Das folgende Diagramm zeigt, daß dafür erwartungsgemäß grundsätzlich geringere Leistungen benötigt werden.

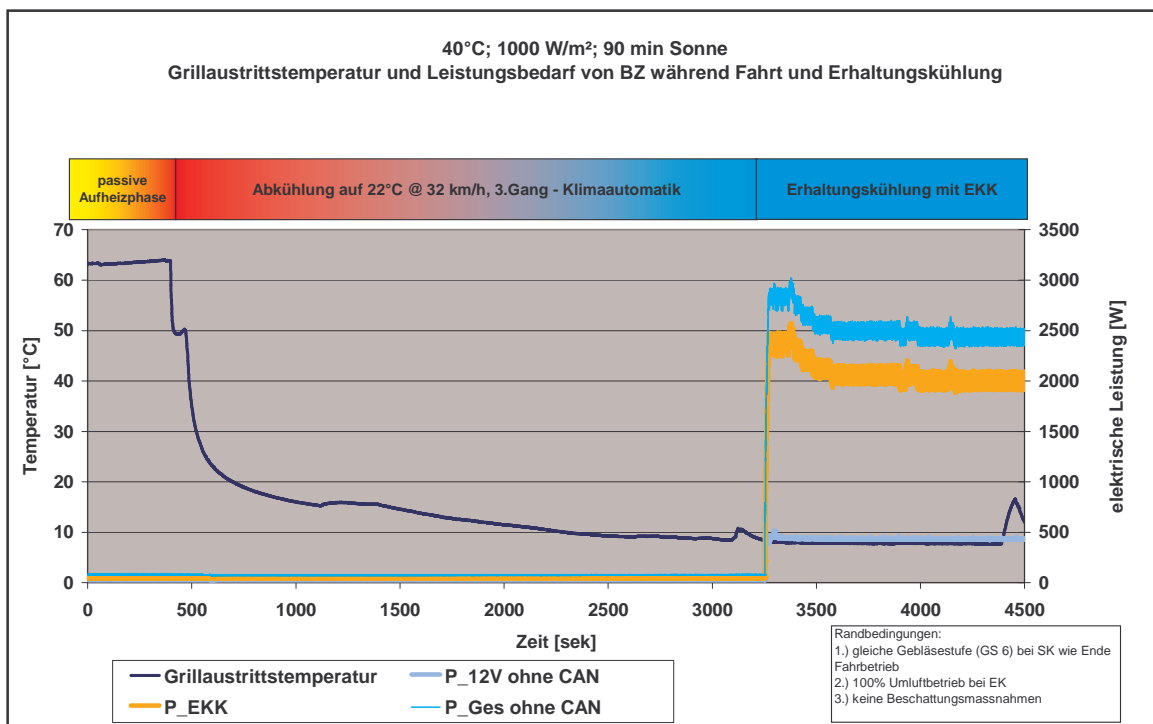


Diagramm 2: Abkühlkurve / Leistungsbedarf Erhaltungskühlung

Bis dahin müssen allerdings noch erheblich Anstrengungen unternommen werden, um die kritischen Aspekte der Standklimaanlage, i. e. Mehrgewicht, Package, Kosten, Kraftstoffverbrauch und Emission, zu entschärfen.

Literaturverzeichnis

- [1] A. Bunzl: „Aufbau und Untersuchung einer PKW- Standklimaanlage“, Diplomarbeit, FH München, FB 06, Techn. Physik, 1998
- [2] M. Bambach, J. Tachtler, K. Wandel: „Brennstoffzellen-Systeme für die motorunabhängige Stromversorgung von Fahrzeug-Bordnetzen“, VDI-Berichte Nr. 1646, 2001