

# **KÄLTESPEICHERUNG FÜR GLEICHBLEIBENDEN KLIMAKOMFORT IM STOP-START-BETRIEB**

Guyonvarch, Gwenaël; Haller, Régine; Lepetit, Loïc; Loup, Didier; Ostad, Mostafa  
Alle Valeo Climate Control, Frankreich

**SCHÜSSELWÖRTER**– Klimagerät, Stop-Start-Funktion, Kältespeicherung, Phasenübergangsmaterialien, Kompressor

**ZUSAMMENFASSUNG** – Die sogenannte Stop-Start-Funktion trägt deutlich zur Verringerung des Kraftstoffverbrauchs von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor bei. Nachteil dabei ist, dass beim Motorstillstand der Kompressor der Klimaanlage nicht mehr angetrieben wird. Es muss also eine Wahl zwischen den Vorteilen des Stop-Start-Betriebes (Verringerung von Kraftstoffverbrauch, Emissionen und Geräuschbelastung) und der Aufrechterhaltung des Klimakomforts getroffen werden. Zum Erreichen der Nutzung des Stop-Start-Betriebes ohne Abstriche beim Klimakomfort liegt es nahe das Konzept der Klimaanlage zu überarbeiten.

Verschiedene Lösungsansätze sind untersucht worden, insbesondere elektrisch angetriebene Klimaanlage. Diese sind durchaus geeignet für Fahrzeuge mit ausreichend verfügbarer elektrischer Leistung, im Bereich von 6kW zum Beispiel bei 42V. Für Fahrzeuge mit konventioneller 14V Technik sind sie jedoch nicht geeignet.

Eine genaue Untersuchung der auftretenden Nutzungs- und Klimasituationen zeigt, dass eine bei Motorstillstand arbeitende Klimatisierungsmassnahme die Aufrechterhaltung des Klimakomforts bei 35°C Aussentemperatur während 45 Sekunden gewährleisten sollte. Mit diesem Leistungsziel können mehr als 90% der real auftretenden Situationen abgedeckt werden.

Beim Vergleich von verschiedenen Lösungsansätzen stellt sich die Kältespeicherung als die günstigste Lösung heraus. Gegenüber den elektrischen Konzepten ist sie leichter und energieeffizienter. Das dargestellte Prinzip speichert Kälte dank der Verwendung von Phasenübergangsmaterialien (PCM). Bei normalem Betrieb der Klimanlage wird Kälte gespeichert und dann während des Motorstillstands wieder abgegeben.

Das entwickelte System besteht aus zwei Hauptteilen, dem Klimagerät mit integriertem Kältespeicher und der angepassten Kontrollstrategie.

Bei Versuchen im Klimawindkanal konnte die Leistungsfähigkeit des neuen Systems nachgewiesen werden. Im Vergleich zu herkömmlichen Anlagen konnten die sonst beim Abschalten des Motors üblichen Temperaturanstiege vermieden werden und die Fahrzeuginnenraumtemperatur war während des gesamten Fahrzyklus niedriger.

**HAUPTABSATZ** – Die Fahrzeughersteller und ihre Zulieferer versuchen stets neue, innovative Systeme auf den Markt zu bringen, die zur Verringerung des Kraftstoffverbrauchs beitragen. Beträchtliche Fortschritte sind im Bereich der Motorenentwicklung gemacht worden, trotzdem genügen sie zum Erreichen des EU-Ziels von 120g CO<sub>2</sub> Emissionen pro Kilometer ab 2012 wahrscheinlich nicht aus.

Dieses Ziel könnte jedoch mit Hybridfahrzeugen erreicht werden, da viele neue Funktionen zum Einsatz kommen können : Stop-Start-Betrieb, regeneratives Bremsen, Boosterbetrieb und bei den fortgeschrittenen Konzepten sogar ein rein elektrischer Antrieb. Die Stop-Start-Funktion ist heute im Bezug auf die mögliche Kraftstoffeinsparung an erster Stelle. Je nach den Fahrbedingungen wird der Kraftstoffverbrauch durch diese Funktion um 5 bis 10% verringert.

Die Stop-Start-Funktion entspricht dem zeitweiser Abschalten des Motors bei Stillstand des Fahrzeugs. Zur gleichen Zeit wird der Kompressor der Klimaanlage nicht mehr angetrieben. Im Sommer muss also eine Wahl getroffen werden: entweder Verringerung des Klimakomforts (Anstieg der Innenraumtemperatur bei Abschalten des Motors) oder Verzicht auf die positive Auswirkung des Stop-Start-Betriebes auf Kraftstoffverbrauch, Emissionen und Geräuschbelästigung . Im Winter besteht die zusätzliche Gefahr, dass die Windschutzscheiben beschlagen wenn die Klimaanlage ausser Betrieb gesetzt wird, da sie wesentlich zur Entfernung des Scheibenbeschlages beiträgt.

Dieser Artikel beschreibt wie mit Hilfe eines leistungsfähigen Systems beide Ziele erreicht werden können. Zuerst werden allgemein verschiedene technische Lösungen dargestellt.

Da elektrische und thermische Systeme die am besten angepassten Lösung darstellen, werden sie miteinander verglichen. Das letztlich entwickelte Konzept wird genauer dargestellt.

#### ZEITLICHE AUSWEITUNG DES BETRIEBS DER KLIMAANLAGE

Fahrzeugklimaanlagen sollten bezüglich drei Achsen verbessert werden (Figur 1)

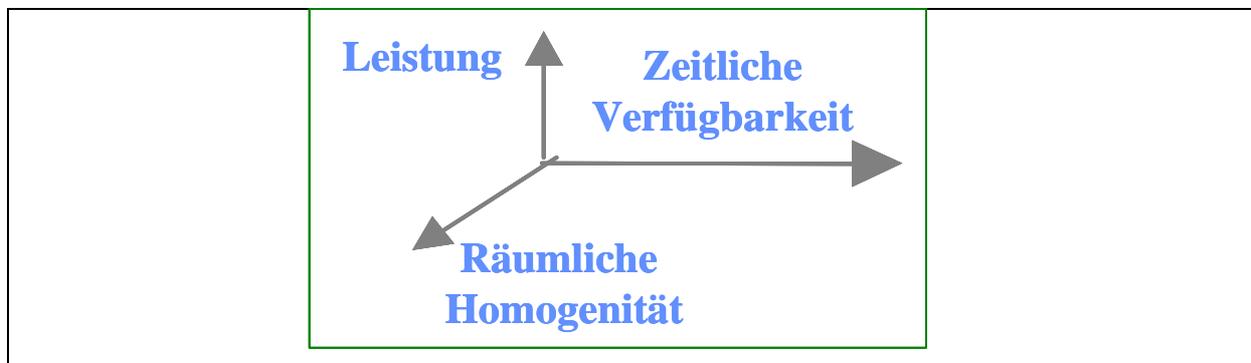


Figure 1: Drei Achsen der Verbesserung des Klimakomforts in Fahrzeugen

Allgemein sollte die Leistung der Klimaanlage bei bestimmten Bedingungen wie zum Beispiel der Fahrzeugabkühlung oder im Leerlaufbetrieb erhöht werden. Dies erlaubt den Klimakomfort schneller zu erreichen und im auch bei Fahrzeugstillstand im Leerlaufbetrieb zu erhalten.

Weiter sollte eine bessere räumliche Verteilung des Klimakomforts erreicht werden. Heute sind noch einige Bereiche der Fahrzeugkabine unzureichend gekühlt, selbst wenn die Kopfraumtemperatur als befriedigend beurteilt wird. In der zweiten oder dritten Sitzreihe werden die optimale Komforttemperatur oft nicht erreicht. Zudem bedarf es oft lange Zeit bis die Oberflächen der Fahrgastzelle ausreichend abgekühlt sind um die radiative Wärmeübertragung an die Fahrzeuginsassen zu vermeiden.

Andere Oberflächen insbesondere die Sitze, das Lenkrad und der Gangwahlhebel sind in direktem Kontakt mit den Fahrzeuginsassen. Zum Erreichen eines optimalen Klimakomforts sollten sie gekühlt werden.

Eine weitere wichtige Achse ist die zeitliche Ausdehnung der Verfügbarkeit der Klimaanlage zum Beispiel wenn der Fahrmotor abgestellt wird. Normalerweise steigt in diesem Falle die Temperatur im Fahrzeuginnenraum auf unakzeptable Werte an, da der mechanische Kompressor nicht mehr angetrieben wird. Die Vermeidung solcher Zustände ist anzustreben. Andererseits ist klar, dass hierfür eine gewisse Energiemenge bereitzustellen ist.

In Figur 2 werden vier verschiedene Szenarien einer erweiterten Verfügbarkeit der Kühlfunktion unter Abschätzung der benötigten Verfügbarkeitsdauer dargestellt.

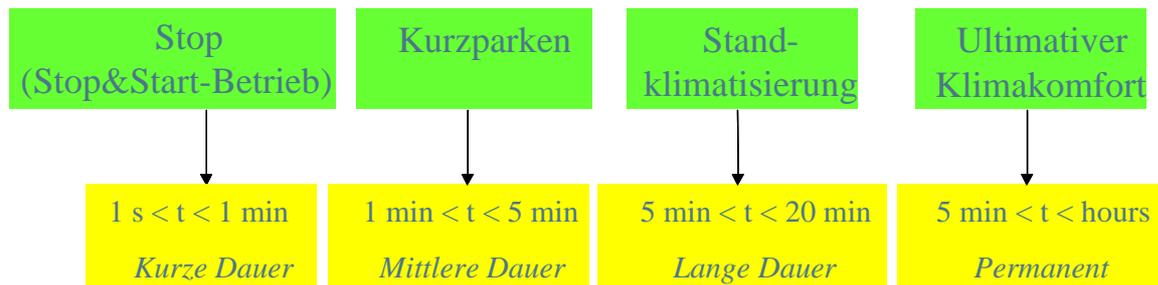


Figure 2: Vier Stufen erweiterter zeitlicher Verfügbarkeit der Klimaanlage

Stops im Stop-Start-Betrieb dauern selten länger als eine Minute. Kurzparken, zum Beispiel um einen kleinen Einkauf zu tätigen, wird mit einer Dauer von bis zu fünf Minuten veranschlagt. Bei diesen beiden Ereignissen sollte der Klimakomfort im Fahrzeuginnenraum aufrecht erhalten werden. Die Vor- oder Standklimatisierung benötigt zwischen 5 bis 20 Minuten um den Fahrzeuginnenraum auf ein komfortables Temperaturniveau zu bringen. Extremfall wäre eine Klimaanlage die das Fahrzeug kontinuierlich auf einem akzeptablen Komfortniveau hält. In Tabelle 1 werden die angesprochenen Situation näher beschrieben.

	<b>Start-Stop-Funktion</b>	<b>Kurzes Abstellen des Fahrzeuges</b>	<b>Standklimatisierung</b>	<b>Kontinuierliche Klimatisierung</b>
<b>Kriterien Dauer t</b>	<i>1 sec &lt; t &lt; 1 min</i>	<i>1 min &lt; t &lt; 5 min</i>	<i>5 min &lt; t &lt; 20 min</i>	<i>5 min &lt; 600 min</i>
<b>Typische Situation</b>	<i>Stadtfahrt</i>	<i>Kurzer Einkauf</i>	<i>Parken</i>	<i>Parken</i>
<b>Erwartung des Benutzers</b>	<i>Aufrechterhaltung des Klimakomforts</i>	<i>Keine oder nur geringe Beeinträchtigung des Komforts</i>	<i>Klimakomfort bei Antritt der Fahrt (programmierter Zeitpunkt des Fahrtantritts)</i>	<i>Keine oder nur geringe Beeinträchtigung des Komforts bei beliebigem Fahrtantritt</i>
<b>Extreme Häufigkeit während der Fahrzeuglebensdauer</b>	<i>500,000</i>	<i>50,000</i>	<i>5,000</i>	<i>2,000</i>
<b>Typische vom Klimakompressor benötigte Leistung / Energie (COP = 2)</b>	<i>1000 W 60 kJ</i>	<i>1000 W 300 kJ</i>	<i>2000 W 2400 kJ</i>	<i>1000 W 36000 kJ</i>

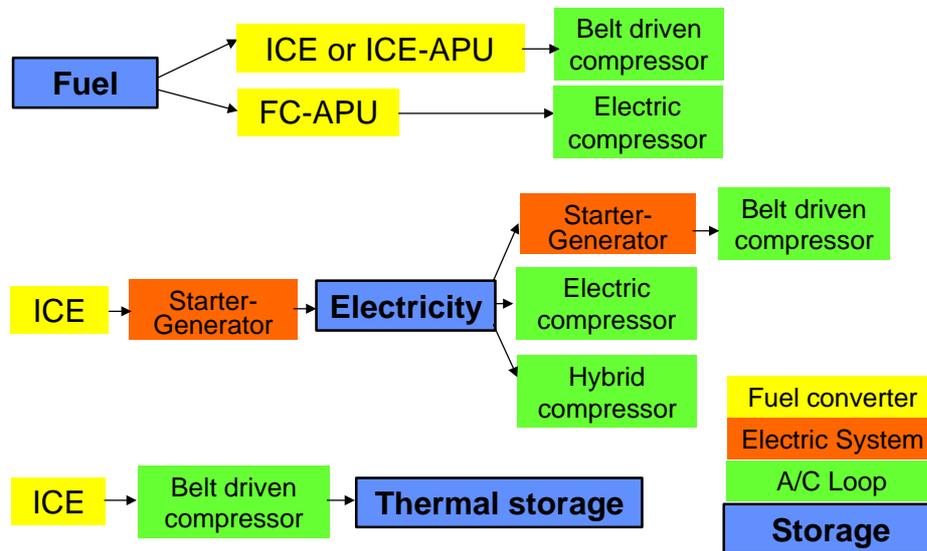
Tabelle 1: Verschiedene Betriebszustände der Klimaanlage bei Motorstop

## DIE ERSTE HERAUSFORDERUNG ZUR ERREICHUNG VON PERMANENTEM THERMISCHEN KOMFORT : DER STOP-START-MODUS

Im folgenden soll nur noch auf den Klimakomfort bei Stop-Start-Betrieb eingegangen werden.

Aus Tabelle 1 wird die Dauer des Motorstops im Stop-Start-Modus mit bis zu einer Minute angegeben. Dieser Wert geht aus einer Studie [2] hervor, bei der standardisierte Fahrzyklen und Statistiken aus dem realen Leben untersucht wurden. Aus diesen Daten geht hervor, dass Fahrzeugstops selten länger als 45 Sekunden sind. Standzeiten von bis zu einer Minute können an Ampeln erreicht werden. Längere Stops sind nicht auszuschliessen, zum Beispiel bei sehr hohem Verkehrsaufkommen, sie sind jedoch eher selten.

Bei einer Aussentemperatur von 35°C beträgt die zur Aufrechterhaltung des Klimakomforts in einem Mittelklassewagen benötigte Kühlleistung etwa 2kW [2]. Über eine Zeitspanne von 45 Sekunden ergibt dies 90kJ Energieaufnahme. Figur 3 zeigt drei mögliche Lösungen dies zu erreichen.



ICE=Internal Combustion Engine; FC=Fuel Cell; APU= Autonomous Power Unit

Figur 3: Lösungen zur Aufrechterhaltung der Klimakomforts bei Motorstillstand

## VERGLEICH ZWISCHEN ELEKTRISCHEN LÖSUNGEN UND SPEICHERUNG THERMISCHER ENERGIE

Die Stop-Start-Funktion muss kostengünstig, leicht sein. Lösungen die auf der Verwendung von "Autonomous Power Units" (APU) basieren können diese Kriterien heute noch nicht erfüllen.

In Fahrzeugen mit 14V-Netz sind rein elektrische Kompressoren nicht realistisch, da zur Erbringung der notwendigen Leistung extrem hohe Ströme auftreten würden. Eine elektrische Leistung von 6kW bei 42V Bordspannung scheint realistischer [3].

Zwei Lösungen scheinen realistisch, die Verwendung von Hybridkompressoren (mechanischer Riementrieb und integrierter elektrischer Antrieb) und Systeme mit denen „Kälteenergie“ gespeichert werden kann [4].

Elektrische Lösungen haben einige Nachteile :

- 1) Der Gesamtwirkungsgrad ist niedrig, bedingt durch zahlreiche Umwandlungen der Energie
- 2) Eine überarbeitete oder gar zusätzliche Batterie ist notwendig. Das Mehrgewicht ist hoch, insbesondere um die hohen Anforderungen an die Lebensdauer zu erfüllen (Lade- und Entladezyklen)
- 3) Die Systemkosten sind hoch, vor allem verursacht durch die elektrische Antriebseinrichtung

Bei Kältespeichern treten diese Probleme nicht auf. Sie haben eine sehr hohe Lebensdauer, können nahezu 100% entladen werden und weisen einen hohen Gesamtwirkungsgrad auf. Tabelle 2 zeigt eine vereinfachte Analyse des Gesamtwirkungsgrades für drei verschiedenen Lösungen zur Aufrechterhaltung des Klimakomforts bei Fahrzeugstillstand.

<b>Verbrennungsmotor + riemengetriebener Kompressor (Referenz)</b>	0.15 ICE im Leerlauf	0.95 Riemen- trieb	2.7 COP				<b>0.38</b> Total
<b>Starter Generator + elektrischer Kompressor</b>	0.35 ICE	0.7 SG	0.9 Laden Batterie	0.9 Entladen Batterie	0.9 EC Elektro- nik	2.7 COP	<b>0.48</b> Total
<b>Mechanisch angetriebener Kompressor + Kältespeicherung</b>	0.35 ICE	0.95 Riemen- trieb	2.2 COP	0.95 Kälte- speicher- ung	0.95 Kälte- abgabe		<b>0.66</b> Total

Tabelle 2: Vergleich des Gesamtwirkungsgrades zwischen Seriensystem (bei laufendem Motor), Systemen mit elektrisch angetriebenem Kompressor und Systemen mit Kältespeicher. Die grau unterlegten Felder signalisieren den Stillstand des Fahrzeuges

Bei der Serienlösung treibt der Verbrennungsmotor den Kompressor im Leerlauf bei geringem Wirkungsgrad (etwa 15%) an. Bei der zweiten Lösung kommt ein elektrischer Kompressor zur Anwendung. Die benötigte elektrische Energie wird während des normalen Fahrbetriebes bei einem günstigen Motorwirkungsgrad erzeugt. Doch bei der Speicherung und Umwandlung der Energie sinkt der Gesamtwirkungsgrad. Er ist um etwa 10% höher im Vergleich zum Seriensystem.

Die Abkühlung des Kältespeichers erfolgt während des normalen Fahrbetriebes bei günstigem Motorwirkungsgrad. Die Leistungszahl des Klimakreislaufs ist etwas geringer,

bedingt durch die höhere Kompressordrehzahl, das Laden und Entladen des Kältespeichers erfolgt bei einem guten Wirkungsgrad. Der Gesamtwirkungsgrad des Systems beträgt 66%, was im Vergleich den höchsten Wert darstellt.

Für die Speicherung elektrischer Energie könnte man Batterien mit sehr hoher Speicherdichte verwenden. Litium Batterien zum Beispiel überschreiten Energiedichten von 100Wh/kg. Diese Kapazität kann jedoch nicht voll ausgenutzt werden, da dies die Lebensdauer der Batterie deutlich verringern würde. Um hundertausende von Zyklen zu erreichen (Tab.1) darf dies Kapazität nur zu etwa 5% genutzt werden. Die praktisch nutzbare Energiedichte sinkt also auf 5Wh/kg. Superkapazitäten weisen übrigens etwa diese Energiedichte auf. Im Vergleich ist die Energiedichte bei Wärmespeichern unter Verwendung von PCM etwa 40Wh/kg. Eine solche Anwendung kann also deutlich leichter ausfallen als elektrische Lösungen. Elektrisch angetriebene Klimaanlage sollten also Fahrzeugen mit einer hohen Verfügbarkeit von elektrischer Energie vorbehalten sein [5]. Für die anderen Anwendungen stellt sich die Wärmespeicherung als gute Lösung dar.

## BESCHREIBUNG DES REALISIERTEN KÄLTESPEICHERS

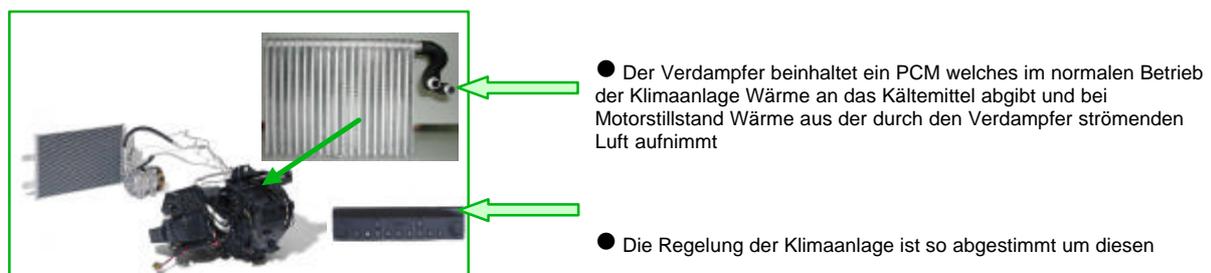
Bei der Einbindung des Kältespeichers in das Fahrzeug wurden folgende Kriterien berücksichtigt :

- 1) Der Wärmeübergang zwischen dem im Klimakreislauf zirkulierenden Kältemittel und dem Kältespeicher muss schnell erfolgen um kurze Zykluszeiten zu erreichen
- 2) Der Wärmeübergang zwischen dem Kältespeicher und der in den Fahrzeuginnenraum strömenden Luft muss ebenfalls schnell erfolgen um eine kurze Ansprechzeit bei Abschaltung des Klimakompressors zu erreichen

Unter den oben genannten Anforderungen liegt es nahe den Kältespeicher direkt in den Verdampfer integrieren. Hierzu wird ein PCM in den Verdampfer eingelagert.

Ergänzt wird das System durch eine abgestimmte Regelung. Sie ermöglicht es den Kältespeicher in den Phasen wo die Klimaanlage in Betrieb ist in optimaler Weise aufzuladen, die Luft während des Motorstillstandes in optimaler Weise zu kühlen und veranlasst im extremen Bedingungen den Start des Motors wenn der Klimakomfort nicht mehr gewährleistet werden kann.

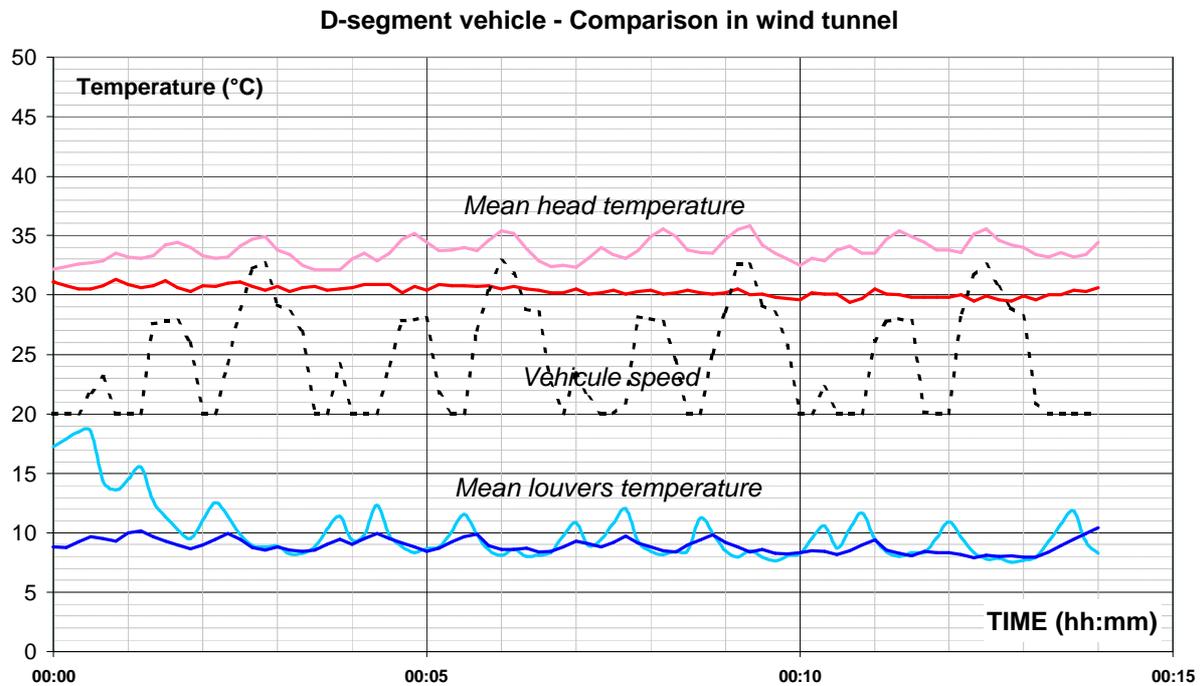
Das vorgeschlagene System erhielt den Namen "StopStayCool".



Figur 4: Im Verdampfer integrierter Kältespeicher und optimierte Regelung des Systems.

## SYSTEMBEWERTUNG IM FAHRZEUGVERSUCH

Das "StopStayCool" System wurde in verschiedenen Fahrzeugen getestet, unter anderen in einem Fahrzeug des D-Segments. Figur 5 zeigt die im Klimawindkanal erhaltenen Versuchsergebnisse. Bei einem NEDC Fahrzyklus im Stop-Start-Betrieb wird die Serienklimaanlage mit dem Kältespeicher-System verglichen.



Figur 5: Vergleich der Lufttemperaturen im Stop-Start-Betrieb mit und ohne Kältespeicher

Die hellblaue Kurve zeigt die Luftaustrittstemperatur am Mannanströmer mit dem Seriensystem. Bei jedem Motorstop steigt sie stark an. Als Folge nimmt die mittlere Kopfraumtemperatur auch deutlich zu (hellrote Kurve). Dieser Temperaturanstieg wird von den Fahrzeuginsassen als unkomfortabel empfunden. Durch den deutlichen Temperaturanstieg des Verdampfers kommt es auch zur Verdampfung von auf dem Verdampfer befindlichem Kondenswasser, was zu einer Geruchsbelästigung führen kann.

Die dunkelblaue Kurve zeigt die Luftaustrittstemperatur am Mannanströmer mit Kältespeicher. Das Temperaturniveau bleibt nahezu konstant. Der Einfluss auf die mittlere Kopfraumtemperatur tritt in zwei Weisen auf :

- keine Temperaturspitzen
- das mittlere Temperaturniveau ist niedriger, da die Luftaustrittstemperatur konstant gehalten wird

## KONKLUSION

Ein System zur Aufrechterhaltung des Klimakomforts während der Phasen des Motorstillstandes im Stop-Start-Betrieb muss hohe Anforderungen hinsichtlich Leistung und Kosten erfüllen. Nach der vorliegenden Analyse bietet die Kältespeicherung entscheidende Vorteile. Sie stellt einen befriedigenden Klimakomfort bereit, bei gleichzeitig geringem Gewicht und vertretbaren Kosten.



Figur 6: "StopStayCool"

## LITERATUR

- [1] Plasse C., Chemin M., Lacamoire G., Von Westerholt E., "L'alternateur, du stop&go au groupe motopulseur hybride", SIA, 11/2001
- [2] Guyonvarch G., Haller R., Lepetit L., "Air conditioning operation in stop-start mode", EVS19, 2002
- [3] "Electric heating and air conditioning", Automotive Engineering International, May 2002, p. 84-87
- [4] Guyonvarch G. et al., "A comparison between climate control systems providing thermal comfort during vehicle stops", SAE 2003-01-1073
- [5] Guyonvarch G. et al., "Air Conditioning Systems Adapted to Vehicle Electrification Range", EVS20, 2003