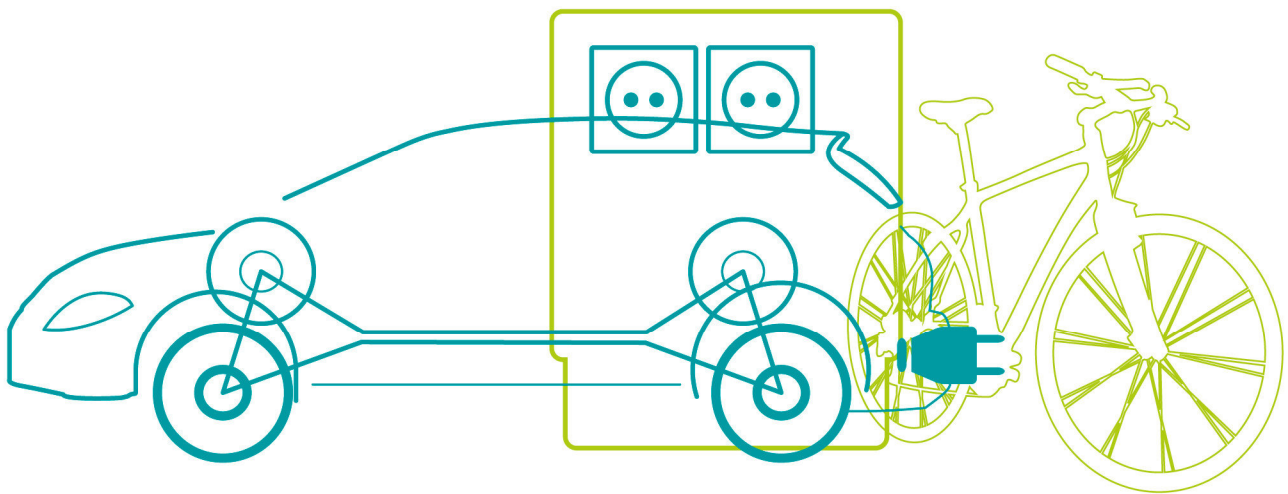




## KARKUHL

Karosserieintegrierte KFZ  
Klimaanlage mit hoher  
Energieeffizienz



## VORWORT

Die Publikationsreihe **BLUE GLOBE REPORT** macht die Kompetenz und Vielfalt, mit der die österreichische Industrie und Forschung für die Lösung der zentralen Zukunftsaufgaben arbeiten, sichtbar. Strategie des Klima- und Energiefonds ist, mit langfristig ausgerichteten Förderprogrammen gezielt Impulse zu setzen. Impulse, die heimischen Unternehmen und Institutionen im internationalen Wettbewerb eine ausgezeichnete Ausgangsposition verschaffen.

Jährlich stehen dem Klima- und Energiefonds bis zu 150 Mio. Euro für die Förderung von nachhaltigen Energie- und Verkehrsprojekten im Sinne des Klimaschutzes zur Verfügung. Mit diesem Geld unterstützt der Klima- und Energiefonds Ideen, Konzepte und Projekte in den Bereichen Forschung, Mobilität und Marktdurchdringung.

Mit dem **BLUE GLOBE REPORT** informiert der Klima- und Energiefonds über Projektergebnisse und unterstützt so die Anwendungen von Innovation in der Praxis. Neben technologischen Innovationen im Energie- und Verkehrsbereich werden gesellschaftliche Fragestellung und wissenschaftliche Grundlagen für politische Planungsprozesse präsentiert. Der **BLUE GLOBE REPORT** wird der interessierten Öffentlichkeit über die Homepage [www.klimafonds.gv.at](http://www.klimafonds.gv.at) zugänglich gemacht und lädt zur kritischen Diskussion ein.

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm „Neue Energien 2020“. Mit diesem Programm verfolgt der Klima- und Energiefonds das Ziel, durch Innovationen und technischen Fortschritt den Übergang zu einem nachhaltigen Energiesystem voranzutreiben.

Wer die nachhaltige Zukunft mitgestalten will, ist bei uns richtig: Der Klima- und Energiefonds fördert innovative Lösungen für die Zukunft!



Theresia Vogel  
Geschäftsführerin, Klima- und Energiefonds



Ingmar Höbarth  
Geschäftsführer, Klima- und Energiefonds

## Inhalt

Kurzfassung .....	2
Abstract .....	3
1. Einleitung .....	4
1.1. Aufgabenstellung .....	4
2. Inhaltliche Darstellung .....	4
2.1. Kurzbeschreibung des Projektes: .....	4
2.2. Ausgangssituation/Motivation des Projektes .....	5
2.3. Theoretische Grundlagen - Adiabate Verdunstung .....	7
2.4. Schwerpunkte des Projektes – thermisches Modell .....	9
2.4.1. Wärmeübergangszahl bei erzwungener Konvektion .....	10
2.4.2. Wärmeübergangszahl bei erzwungener Konvektion und berippter Wärmeaustauschfläche .....	11
2.5. Schwerpunkte des Projektes – Versuchsreihen an zwei Modellen .....	12
2.5.1. Versuchsreihe ohne Rückkühlung .....	12
2.5.2. Versuchsreihe mit Rückkühlung .....	12
2.5.3. Schwerpunkte des Projekts – Analyse unterschiedlicher Oberflächen .....	13
2.6. Einordnung in das Programm .....	13
2.7. Verwendete Methoden .....	14
3. Ergebnisse und Schlussfolgerungen .....	15
4. Ausblick und Empfehlungen .....	15
5. Literaturverzeichnis .....	17

## Kurzfassung

Der Mehrverbrauch an Treibstoffen für den Betrieb von Klimaanlage in Fahrzeugen mit fossilen Brennstoffen beträgt in Österreich rund 380 Millionen Liter/Jahr, der dadurch bedingte Schadstoffausstoß 0,9 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>. bzw. 8 % des Gesamtschadstoffausstoßes von Fahrzeugen. Der Handelswert dieses Mehrverbrauchs beträgt rund 400 Millionen Euro.

Neben den Kosten und Umweltnachteilen von bekannten Fahrzeugklimaanlagensystemen besteht auch noch ein gesundheitlicher Nachteil. Insbesondere bei hohen Außentemperaturen muss die Kühlluft mit hoher Strömungsgeschwindigkeit in den Fahrgastraum eingeblasen werden, um eine ausreichende Temperaturabsenkung des Innenraums zu erreichen. Die dabei entstehende Zugluft kann neben einem geringen Komfortgefühl auch zu Erkältungen, Muskelverspannungen, Kopf- und Gliederschmerzen führen. Volkswirtschaftlich relevante Kosten für Krankenstand und Behandlungstage sind die Folge.

Für Elektrofahrzeuge bedeutet die Klimatisierung von Fahrzeugen ein weiteres Problem. Bei einer Speicherkapazität von wirtschaftlich und umweltpolitisch vertretbaren Fahrzeugbatterien von derzeit rund 18 kWh reduziert der Energiebedarf der Klimaanlage die geringe Reichweite der meisten Fahrzeuge von rund 100 – 150 km um nahezu 20%.

Die Anwendung von karosserieintegrierter adiabatischer Kühlung könnte eine deutliche Verbesserung der Energie und Umweltbilanz für Kraftfahrzeuge und zusätzlich eine signifikante Reichweitenverbesserung für Elektrofahrzeuge erreichen. Berechnungen ergaben, dass eine Energieeinsparung für die KFZ Klimatisierung von über 80% und damit eine Einsparung von 0,72 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>, 304 Millionen Liter Treibstoff und damit gleichzeitig eine deutliche Verbesserung der Außenhandelsbilanz möglich sein sollte (Grundlage PKW und Klein LKW). Ein weiteres Energieeinsparungspotential besteht bei Bussen, LKW und Frachttemperierung.

Mit dem vorliegenden Projekt konnte ein vertieftes Wissen über die Effizienz unterschiedlicher Systemausprägungen erzielt werden und die Machbarkeit einer Klimaanlage in Fahrzeugen auf der vorgeschlagenen Basis nachgewiesen werden. Ebenso konnte mit dem Projekt der Bereich, der noch zu lösenden Aufgabenstellungen, deutlich eingegrenzt und die noch notwendigen Entwicklungsschritte bis zur Verfügbarkeit eines produktfähigen Prototypens inklusive Lösungsansätzen aufgezeigt werden. Die eingegrenzten und im Projekt bereits in Konzepten behandelten Themenbereiche sind vor allem eine spezielle Geometrie und Oberflächenbeschaffenheit des Kühlbereiches, um einen optimierten Wärmeübergang, Luft- und Wasserverteilung zu erreichen.

## Abstract

The energy consumption of air conditions in cars results in a usage of additional 380 million litres of fuel and an impact on pollution of 0.9 million tons CO<sub>2</sub> per year. A new device with a potential to save 80% of the energy and air pollution is capable of cooling car cabins using the car body.

Replacing all air conditioning systems in Austria alone with this system would lead to savings of 300 million litres of fuel and 0.72 million tons of CO<sub>2</sub>.

For electric vehicles the air conditioning is an important issue as the capacity of the battery is usually limited to about 20 kWh which is just 100-150 km and the power need of a electrical air condition is about 3 kW which would lead to a reduction of the distance to go without recharging of 20% less. The project has shown the feasibility of the concept itself and has opened up much more in depth understanding of issues that have to be solved on the path to a marketable prototype.

Those issues where general concepts where already covered in this project are mainly in the area of a lightweight specially designed heat exchanger including a special geometry and surface to support optimized liquid flow, heat exchange and hydrophilicity.

# 1. Einleitung

## 1.1. Aufgabenstellung

Aufgabenstellung des Projektes war die industrielle Forschung zur Erarbeitung der Grundlagen für eine besonders energieeffiziente Fahrzeugkühlanlage auf Basis der Verdunstungskälte unter Einbindung der Karosseriefächen für den Wärmeaustausch.

## 2. Inhaltliche Darstellung

### 2.1. Kurzbeschreibung des Projektes:

Der Betrieb von Klimaanlage in Fahrzeugen bedingt für Österreich einen jährlichen Mehrverbrauch von rund 380 Millionen Liter Treibstoff und 0,9 Mio Tonnen CO<sub>2</sub> Ausstoß. Ein neuartiges System mit einem Energie- und Schadstoffeinsparungspotential von rund 80% kühlt Kraftfahrzeuginnenräume unter Einbindung der Karosserie. Das Projekt dient der Erforschung der Grundlagen und dem experimentellen Nachweis der Funktionsfähigkeit.

Im Folgenden ist die prinzipielle Funktionsweise der Klimaanlage kurz an Hand einer Skizze dargestellt.

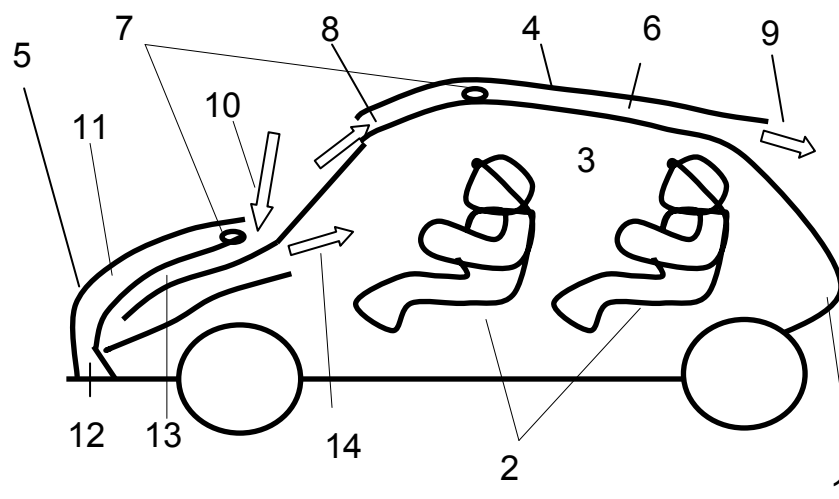


Abbildung 1: Schema KARKUHL

Die Abbildung zeigt einen schematischen Querschnitt durch ein Fahrzeug (1) mit Passagieren (2) im Fahrzeuginnenraum (3), bei dem sowohl das Dach (4) als auch die Kühlerhaube (5) in Form von Kühlvorrichtungen ausgeführt sind. Dabei wird bei der Kühlvorrichtung am Dach (4) in Form eines Kühlhohlkörpers (6) über ein Schlauchsystem Flüssigkeit, beispielsweise an den Stellen (7) in den

Kühlhohlkörper (6) eingebracht und durch ein Gebläse Außenluft an der Eintrittsöffnung (8) eingeblasen. Die an der Unterseite des Kühlhohlkörpers (6) stehende Flüssigkeit wird durch die Zirkulation ungesättigter Luft zur Verdunstung gebracht. Beim Durchströmen des Kühlhohlkörpers (6) wird die Luft befeuchtet, wodurch sie an der Austrittsöffnung (9) eine höhere Luftfeuchtigkeit als bei der Eintrittsöffnung (8) hat. Die zur Verdunstung benötigte Energie wird dabei der Umgebung insbesondere an den zuvor befeuchteten Stellen entzogen, wodurch sowohl die dem Innenraum zugewandte Oberfläche und damit in Folge der Innenraum (3) gekühlt wird. Bei der Kühlvorrichtung in der Kühlerhaube (5) wird das gleiche Prinzip angewendet und die Außenluft an der Eintrittsöffnung (10) in den Kühlhohlkörper (11) eingeblasen. An der dem Fahrzeuginnenraum zugewandten, befeuchteten Seite des Kühlhohlkörpers (11) wird durch die Zirkulation ungesättigte Luft getrocknet. Beim Durchströmen des Kühlhohlkörpers (11) wird die Luft befeuchtet, wodurch sie an der Austrittsöffnung (12) eine höhere Luftfeuchtigkeit als bei der Eintrittsöffnung hat. Die zur Verdunstung benötigte Energie wird dabei der Umgebung insbesondere an den zuvor befeuchteten Stellen entzogen. Im Gegensatz zur Kühlvorrichtung (4), bei welcher die Wärmeübertragung direkt aus dem Fahrgast- oder Transportraum (3) kommt, wird jedoch bei der Kühlvorrichtung (5) die Luft im Kanal (13) gekühlt, dabei tw. getrocknet (kondensierende Flüssigkeit kann wieder verwendet werden) und an der Austrittsöffnung (14) in den Fahrgast- oder Transportraum (3) eingeblasen.

## 2.2. Ausgangssituation/Motivation des Projektes

Der Treibstoffmehrbedarf durch Klimaanlage von Kraftfahrzeugen beträgt, je nach Bauart und Außenfarbe des Fahrzeugs, bereits bei einer Außentemperatur von 28°C und einer Fahrgastraumzieltemperatur von 22°C im städtischen Verkehr zwischen 0,7 bis 2,1 Liter je 100km. Daraus resultiert ein durchschnittlicher Energieaufwand für die Kühlung in der Höhe von rund 8 %. Der Mehrausstoß von CO<sub>2</sub> je Fahrzeug beträgt damit für den Kühlbetrieb rund 20% und somit in Summe rund 200 kg CO<sub>2</sub> pro Jahr. Für eine Fahrzeugflotte von 4,5 Millionen Fahrzeugen, wie sie 2008 bspw. in Österreich im Einsatz war, bedeutet dies – summiert – einen durch die Fahrzeugklimaanlagen bedingten Schadstoffausstoß von 0,9 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>, bzw. 8 % des Gesamtschadstoffausstoßes von Fahrzeugen mit fossilen Brennstoffen (nur PKW). Der Mehrverbrauch durch Fahrzeugklimaanlagen von 8% über das gesamte Jahr bedingt für Österreich einen Mehrverbrauch von 378 Millionen Liter Treibstoff und damit einen Handelswert (für 2011) von rund 500 Millionen Euro.

Fahrzeuge mit Start-Stop Automatik zur Einsparung von Energie können unter heißen Umgebungsbedingungen Ihr Energiesparpotential nicht ausnutzen, da der Motor nicht abgeschaltet werden kann, ohne auch den Betrieb der Klimaanlage zu unterbrechen. Alternativ kann ein Einsatz elektrischer Klimaanlagen erwogen werden um eine Abschaltung zu ermöglichen. Diese haben jedoch derzeit einen schlechten Gesamtwirkungsgrad, da die elektrische Energie wiederum durch den Motor produziert und über den Umweg eines Aggregats produziert werden muss.

Neben den Kosten- und Umweltnachteilen von bekannten Fahrzeugklimaanlagen besteht bei diesen auch noch ein gesundheitlicher Nachteil. Insbesondere bei hohen Außentemperaturen und starker Sonneneinstrahlung muss die Zuluft mit hoher Strömungsgeschwindigkeit und geringer Temperatur in den Fahrgastraum eingeblasen werden, um eine ausreichende Temperaturabsenkung im Innenraum zu bewirken. Die dabei entstehende Zugluft kann zu Erkältungen, Muskelverspannungen, Kopf- und Gelenkschmerzen führen. Das Komfortgefühl ist dadurch auch stark reduziert.

Bei Elektrofahrzeugen, deren Anzahl sich in den kommenden Jahren stark erhöhen wird, stellt die Klimatisierung mit konventionellen Systemen ein weiteres Problem dar. Die Speicherkapazität derzeit wirtschaftlich vertretbarer Fahrzeugbatterien beträgt lediglich rund 18-20 kWh womit eine Reichweite ohne Berücksichtigung der Klimaanlage von rund 100 – 150 km möglich ist. Daher bedeutet der Mehrbedarf an Energie für klassische Klimaanlagen in der Höhe von rund 3 kWh eine Reduktion der Reichweite um rund 20%.

Mit der Anwendung von adiabatischer Kühlung kann eine deutliche Verbesserung der Energie- und Umweltbilanz für Kraftfahrzeuge, eine Verringerung der gesundheitlichen Nachteile durch Zugluft sowie eine signifikante Reichweitenverbesserung für Elektrofahrzeuge erreicht werden.

Das durchgeführte Projekt hat die physikalischen Grundlagen, thermodynamische Berechnungen und Versuchsreihen zur Evaluierung der Machbarkeit einer auf Verdunstung von Wasser beruhenden Klimaanlage untersucht. Dabei wird das zu verdunstende Medium Wasser im Gegensatz zur konventionellen Klimaanlage nicht komprimiert sondern einfach in Form von gesättigter Luft in die Umwelt abgegeben. Dieses Prinzip der sogenannten adiabatischen Kühlung wird bereits bei der Kühlung von Gebäuden eingesetzt. Damit können bis zu 80% Energieeinsparung im Vergleich zu konventionellen Klimaanlagen erzielt werden. So wird zum Beispiel der Deutsche Bundestag in dieser Weise energieoptimiert gekühlt.

Die adiabatische Kühlung nutzt die Verdunstungsenergie von Wasser, die 4,2 MJ je Liter beträgt. Theoretisch kann daher, unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Wirkungsgrade mit rund 5 – 7 Liter Wasser die Energiemenge kompensiert werden, für die bei der klassischen Klimaanlage 1 Liter fossiler Treibstoff eingesetzt wird. Die Kosten für 7 Liter Wasser betragen derzeit im europäischen Schnitt rund 1 Cent. Daher ist der Kostenfaktor für die Produktion der Energiemenge im Vergleich zu Herstellung derselben Energiemenge mit konventionellem Treibstoff oder elektrischer Energie unter Berücksichtigung der erzielbaren Wirkungsgrade bei diesen Anlagen rund 1:70. Der umweltpolitische Nutzen eines adiabatischen Kühlsystems ist überaus groß. Bei der Verdunstung von Wasser entstehen keinerlei Schadstoffe oder Klimagase, womit mit 5 Liter Wasser rund 3000 g CO<sub>2</sub> vermieden werden.

Die Nutzung der Verdunstungskühlung wurde bereits in den 30er Jahren des vorigen Jahrhunderts im Fahrzeugbau versucht und findet auch heute noch Anwendung in speziellen Bussen. Die bisherigen Verfahren konnten sich jedoch, soweit nachvollziehbar auf Grund unzulänglicher Flüssigkeits- und Luftverteilung sowie dem Risiko der Keimentstehung, nicht durchsetzen. Darüber hinaus war die Forschungstätigkeit in diesem Bereich vermutlich auch auf Grund der geringen Energiekosten und Reichweitenprobleme gering.

Das vorliegende Projekt hat den theoretischen und praktischen Nachweis in Versuchsanlagen erbracht, dass die Verdunstungskühlung geeignet ist, den Gesamtenergieaufwand für die Fahrzeugkühlung in Kombination mit herkömmlichen Kühlsystemen deutlich zu verringern. Unter vielen klimatischen Rahmenbedingungen kann sie auch die herkömmliche Klimaanlage vollkommen ersetzen.

Um eine effiziente Kühlung mit der vorgeschlagenen Kühlanlage zu erreichen, sind besondere Methoden für die Einbringung der Flüssigkeit, spezielle Oberflächen und Luftführung erforderlich, die neben der Grundlagenforschung und Berechnung Gegenstand des Projektes waren, jedoch auch noch in Folgeprojekten weiter untersucht werden sollten.



## 2.3. Theoretische Grundlagen - Adiabate Verdunstung

Verdunstung ist ein Vorgang mit Wärme- und Stoffaustausch. Wärme geht von der Luft ins Wasser, Wassermoleküle verdunsten in die Luft.

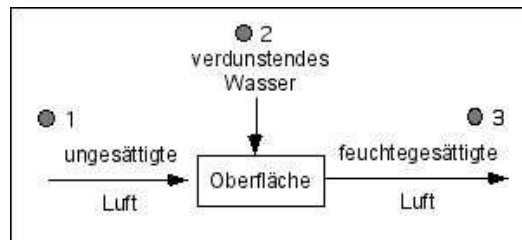


Abbildung 2: Verdunstung

Es soll das Prinzip der Verdunstungskühlung zur Kühlung des Fahrgastraums eines Automobils untersucht werden. Herkömmliche Kompressor-Klimaanlagen sollen ersetzt oder zumindestens unterstützt bzw. deren Leistungsbedarf gesenkt werden, was vor allem bei Elektrofahrzeugen in Hinblick auf die damit erhöhte Reichweite ihrer Batterien von großer Bedeutung ist.

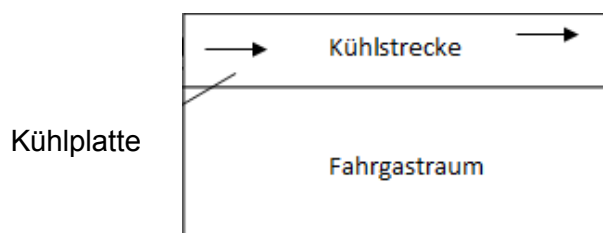


Abbildung 3: Fahrgastraum - Kühlstrecke

Die Dachkonstruktion eines Fahrzeugs soll dabei so verändert werden, dass anstelle des bisherigen Dachblechs ein schmaler Luftkanal als Kühlstrecke vorgesehen ist, in dem die Außenluft über einen dünnen Wasserfilm streichen und dieser zufolge der Verdunstung des Wassers eine wesentlich tiefere Temperatur als die Außenluft erreichen soll. In weiterer Folge sollte dann die Wärme vom Fahrgastraum, in dem zufolge Strahlung auch eine wesentlich höhere Temperatur als die Außenlufttemperatur herrschen kann, über diesen Luftkanal abgeführt werden.

In weiterer Folge wird zwischen monovalentem und bivalentem Betrieb der Kühlanlage unterschieden. Im monovalenten Betrieb erfolgt die Kühlung des Fahrgastraums ausschließlich über die Dachkühlung, im bivalenten Betrieb wird die bestehende Klimaanlage des Autos bei der Kühlung unterstützt.

Den größten Einfluss auf die grundsätzliche Durchführbarkeit der oben angeführten Aufgabenstellung hat der Zustand der Außenluft, die wichtigsten Zustandsgrößen sind dabei ihre Temperatur und Feuchte.

In der Kühlstrecke strömt die Außenluft über eine Wasseroberfläche. Es stellen sich sowohl für die Geschwindigkeit, die Temperatur und die absolute Feuchte  $x$  Grenzschichten ein.

Direkt an der Oberfläche herrscht Sättigung, also  $x = x_s$ . Bei der Verdunstung tritt Abkühlung auf. Aus der Erfahrung ist bekannt, dass nasse Haut stark abkühlt, wenn man sie in einem Luftstrom hält.

Zur näheren Untersuchung der Kühlung bei Verdunstung geht man zunächst von stationären Verhältnissen aus, die sich nach einer gewissen Übergangszeit eingestellt haben. Der Wasserbehälter sei wärmeisoliert (adiabat), so dass Wärme nur mit der darüber streichenden Luft ausgetauscht werden kann, Wärmeleitung durch feste Verbindungen werde vernachlässigt. Das Wasser nimmt bei diesem Vorgang die sogenannte Kühlgrenztemperatur  $t_k$  an.

Im  $h,x$ -Diagramm erhält man  $t_k$  in dem man vom Anfangszustand einen Strahl in Richtung der Nebelisoothermen auf die Sättigungslinie zieht.

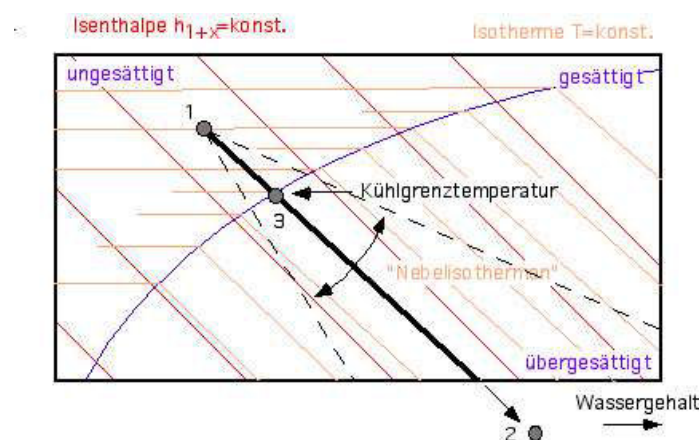
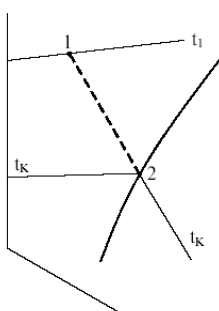


Abbildung 4: Verdunstung im  $h,x$ -Diagramm

Je trockener die Ausgangsluft bei gegebener Temperatur ist, desto tiefer ist die erreichbare Kühlgrenztemperatur  $t_k$ . Die Kühlgrenze ist unabhängig von der Luftgeschwindigkeit (ab ca. 1,5 m/s) und von der Verdunstungsgeschwindigkeit.

Die Bestimmung der Zustandspunkte mithilfe der Mischgeraden gilt für turbulente Mischvorgänge und bei laminarer Mischung (= Diffusion) für den Fall, dass der Diffusionskoeffizient  $D$  und die Temperaturleitfähigkeit  $a$  gleich groß sind  $a/D = 1$ . Für Diffusion von Wasserdampf in Luft ist  $a/D = 0,84$  also nur fast 1. Turbulente Mischung erhält man ab einer Mindest-Anblasegeschwindigkeit von 1,5 m/s.

Zeichnerische Bestimmung der Kühlgrenztemperatur:



Das Diagramm zeigt, dass der Luftzustand 1 auf der Verlängerung der Nebelisootherme  $t_k$  in das Gebiet der ungesättigten Luft liegt.

Geht man davon aus, dass der Zustand 1 der Luft vorgegeben ist, dann nimmt das Wasser als Kühlgrenztemperatur genau die Temperatur an, für die die Verlängerung der Nebelisoothermen durch den Luftzustand 1 geht.

Abbildung 5: Kühlgrenztemperatur im  $h,x$ -Diagramm

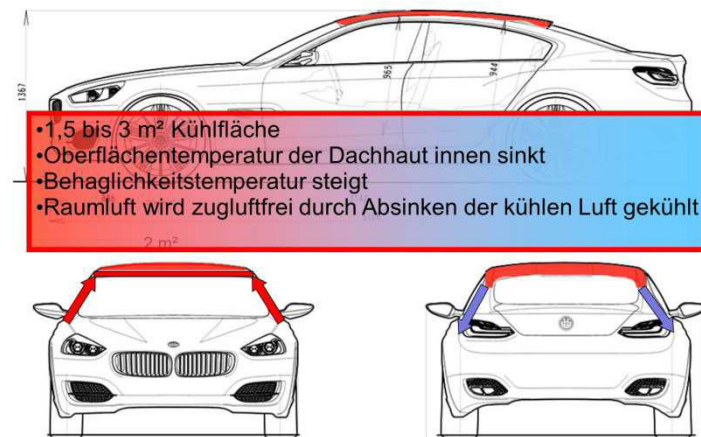


Abbildung 6: Beispielhafte Anordnung der Kühlflächen mit Zu- und Abluftkanälen (rote und blaue Pfeile) anhand eines BMW

## 2.4. Schwerpunkte des Projektes – thermisches Modell

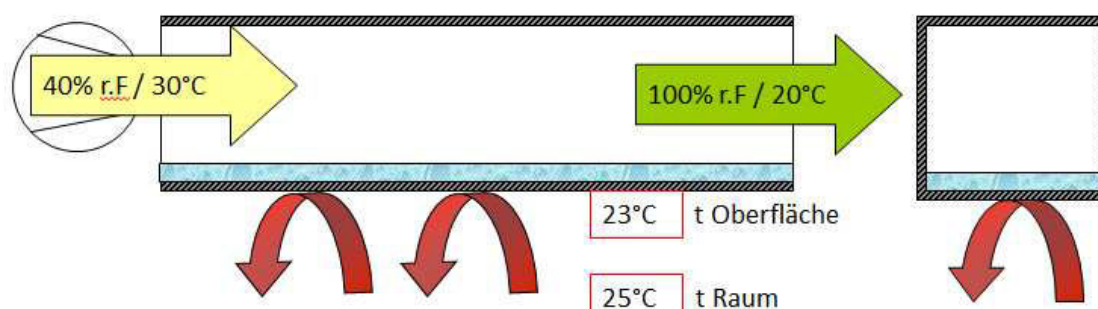


Abbildung 7: Zustandsgrößen der Luft in der Kühlstrecke und im Fahrgastraum

Bei der **thermodynamischen Untersuchung** der „adiabaten Autodachkühlung“ wurden folgende Teilaspekte berücksichtigt.

- Thermodynamisches Verhalten von Gasen (trockene Luft) und Gasmischungen (Feuchte Luft)
- Thermodynamisches Verhalten von Wasserdampf
- Mechanismen der Wärmeübertragung: Wärmeleitung und Konvektion
- Wärmedurchgang
- Instationäre Wärmeleitung

In dieser Zusammenfassung soll nur die Berechnung für die erzwungene Konvektion mit berippter Oberfläche dargestellt werden, da diese zu den benötigten Wärmeübertragungsraten und Leistungen führt.

### 2.4.1. Wärmeübergangszahl bei erzwungener Konvektion

In diesem Fall sorgt im Fahrgastraum ein Ventilator für eine erzwungene Luftströmung, die Nusseltzahl kann in diesem Fall als Funktion von zwei ebenfalls dimensionslosen Größen, der Prandtlzahl  $Pr$  und der Reynoldszahl  $Re$  bestimmt werden:  $Nu = f(Re, Pr)$ .

Die Reynoldszahl berechnet man mit der Anströmgeschwindigkeit  $w$ , der Überströmlänge  $L$  und der kinematischen Zähigkeit.

$$Re = \frac{w \cdot L}{\nu}$$

Für eine längsangeströmte ebene Platte mit laminarer Grenzschicht kann man die mittlere Nusseltzahl wie folgt berechnen.

$$Nu_{lam} = 0.64 \cdot \sqrt{Re} \cdot \sqrt[3]{Pr}$$

Hierbei muss für die Reynoldszahl  $Re < 10^5$  und für die Prandtlzahl  $0,6 < Pr < 1000$  gelten.

Bei der Umströmung einer Platte bildet sich von der Plattennase an eine laminare Grenzschicht aus, wenn die Plattennase strömungsgünstig ausgebildet ist. Nach einer bestimmten Lauflänge der Strömung schlägt die laminare in eine turbulente Grenzschicht um. Die kritische Reynoldszahl ist u.a. vom Turbulenzgrad der Anströmung und von der Rauigkeit der Plattenoberfläche abhängig.

Für die Berechnung der mittleren Nusseltzahl einer längsangeströmten ebenen Platte mit turbulenter Grenzschicht gilt bei konstanter Wandtemperatur, konstanten Stoffwerten und mit folgendem Gültigkeitsbereich:

$$5 \cdot 10^5 < Re < 10^7 \quad 0,6 < Pr < 2000$$

$$Nu_{turb} = \frac{0.037 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr}{1 + 2.443 \cdot Re^{-0.1} \cdot \left( \frac{2}{Pr^3} - 1 \right)}$$

Bei einer Platte mit stumpfer oder vorspringender Vorderkante (Stolperkante) bildet sich von der Plattennase an eine turbulente Grenzschicht aus. Für die Nusseltzahl erhält man dann:

$$Nu = \frac{\frac{\xi}{8} \cdot Re \cdot Pr}{1 + 12.7 \cdot \sqrt{\frac{\xi}{8}} \cdot \left( \frac{2}{Pr^3} - 1 \right)}$$

wobei für den mittleren Widerstandswert einer Platte bei turbulenter Grenzschicht folgendes einzusetzen ist:

$$\frac{\xi}{8} = 0.037 \cdot \text{Re}^{-0.2}$$

In den meisten praktischen Fällen wird sich schon bei mittleren Reynoldszahlen infolge stumpfer Plattenränder und der Turbulenz des zuströmenden Mediums keine laminare Grenzschicht über die gesamte Plattenlänge ausbilden. Es kann mit einer gemittelten Nusseltzahl gerechnet werden:

$$\text{Nu}_{l_o} = \sqrt{\text{Nu}_{\text{lam}}^2 + \text{Nu}_{\text{turb}}^2}$$

Einfluss der Temperaturabhängigkeit der Stoffwerte:

$$\text{Nu}_l = \text{Nu}_{l_o} \cdot \left( \frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_w} \right)^{0.25}$$

Die Richtung des Wärmestromes (Heizung oder Kühlung) beeinflusst bei temperaturabhängigen Stoffwerten die Wärmeübertragung. Dieser Einfluss kann durch einen Faktor berücksichtigt werden.

Pr ... Prandtlzahl bei mittlerer Temperatur

Pr<sub>w</sub> ... Prandtlzahl bei Wandtemperatur

Für die oben angegebenen Temperaturwerte ergibt sich die Prandtlzahl Pr = 0,713. Mit der Dachlänge von 2m als charakteristischer Länge und einer Strömungsgeschwindigkeit der Luft im Fahrgastraum von z.B. 2 m/s erhält man für die Reynoldszahl einen Wert von Re = 2,34 x 10<sup>5</sup>. Mit der Nusseltzahl von Nu = 680 wird der Wärmeübergangskoeffizient α=9,2 W/m<sup>2</sup>K berechnet.

#### 2.4.2. Wärmeübergangszahl bei erzwungener Konvektion und berippter Wärmeaustauschfläche

Die Berechnung der Wärmeübergangszahl einer berippten Oberfläche bei erzwungener Konvektion erfolgte nach dem Vogel Fachbuch Wärmeübertragung nach Walter Wagner (S. 83).

Wärmeleitfähigkeit der Rippe:

$$\lambda_R = 20 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

Mit dem Faktor

$$m_{\text{Rfg}} = \sqrt{\frac{2 \cdot \alpha_{\text{fg}}}{\delta_{\text{Rfg}} \cdot \lambda_R}}$$

berechnet man den Rippenwirkungsgrad:

$$\eta_{Rfg} = \frac{1}{m_{Rfg} \cdot h_{Rfg}} \cdot \tanh(m_{Rfg} \cdot h_{Rfg})$$

und den scheinbaren Wärmeübergangskoeffizienten im Fahrgastraum:

$$\alpha_{Rfg} = m_{Rfg} \cdot \lambda_R \cdot \tanh(m_{Rfg} \cdot h_{Rfg})$$

Der mittlere äquivalente Wärmeübergangskoeffizient im Fahrgastraum ergibt sich dann zu:

$$\alpha_{mfg} = \alpha_{Rfg} \cdot \frac{\delta_{Rfg}}{t_{Rfg}} + \alpha_{fg} \cdot \left(1 - \frac{\delta_{Rfg}}{t_{Rfg}}\right)$$

Die Auswertung der obigen Angaben führt bei einer Strömungsgeschwindigkeit im Fahrgastraum von 4 m/s und einen Wärmeübergangskoeffizienten von  $\alpha_{mfg} = 40 \text{ W/m}^2\text{K}$  und in weiterer Folge zu einer erforderlichen Wärmeaustauschfläche von ca.  $4 \text{ m}^2$ , die in einem Fahrzeug positionierbar ist.

## 2.5. Schwerpunkte des Projektes – Versuchsreihen an zwei Modellen

### 2.5.1. Versuchsreihe ohne Rückkühlung

Die von der FH Joanneum Kapfenberg und FH Joanneum Graz durchgeführten Versuchsreihen wurden mit besonderer Berücksichtigung der Luftströmung, Rückkühlung und ohne Wärmetauschrippen durchgeführt.

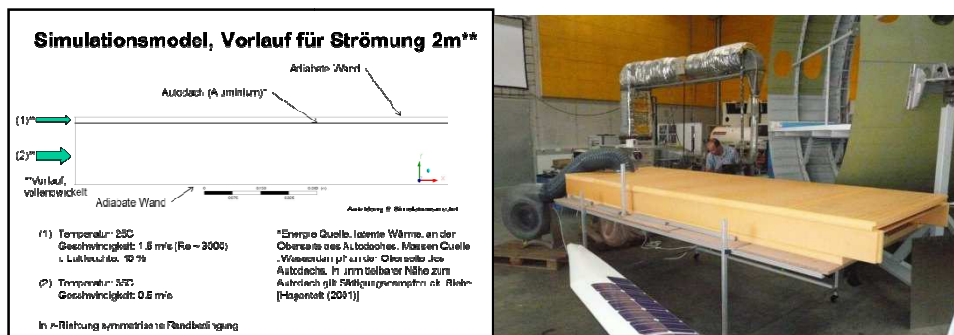


Abbildung 8: Testaufbau - FH Joanneum, Rechts Foto des kompletten Versuchsaufbaus.

### 2.5.2. Versuchsreihe mit Rückkühlung

Der Versuchsaufbau der HTL Mödling wurde zu Vergleichszwecken mit integrierter Rückkühlung der Luft und damit Nutzung der Abluft durchgeführt.

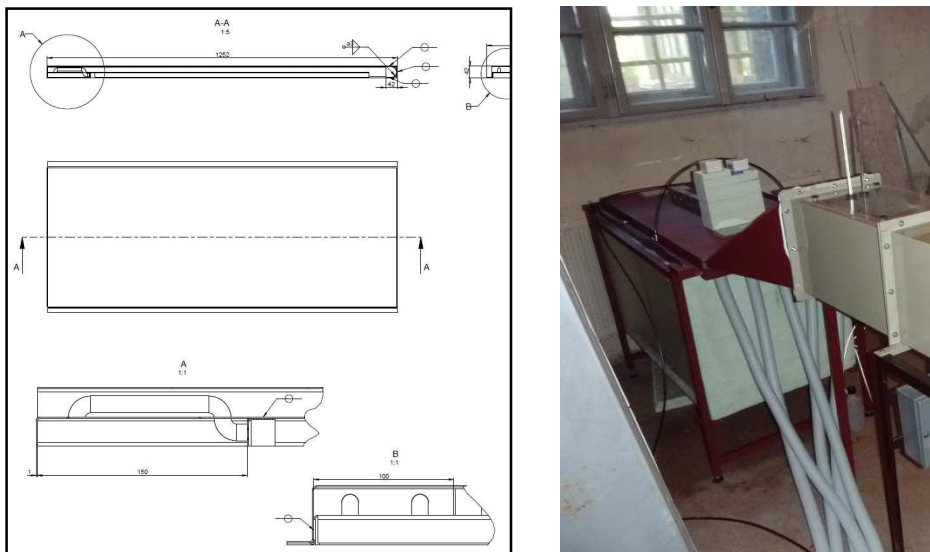


Abbildung 9: Schematische Darstellung des Testaufbaus und Foto

### 2.5.3. Schwerpunkte des Projekts – Analyse unterschiedlicher Oberflächen

Einer der wesentlichen Einflussfaktoren zur Effizienz der Kühlanlage ist die Möglichkeit die zu verdunstende Flüssigkeit (Wasser) möglichst gleichmäßig und mit einer möglichst geringen Schichtdicke zu verteilen.

In Versuchsreihen wurde eine definierte Wassermenge (2 mL) auf unterschiedliche Flächen aufgebracht. Die Verteilung erfolgte durch einen Luftstrom oder manuell. Die Bewertung der Flächen erfolgte nach folgenden Kriterien:

- Fläche auf die die definierte Wassermenge ohne trockene Zwischenräume verteilt werden kann. Aufnahmefähigkeit für Wasser („Hydrophilität“)
- Erforderliche Schichtdicke für die Beschichtung
- Erforderliche Schichtdicke des Trägermediums
- Mechanische Stabilität
- Reibfestigkeit für Reinigungsvorgänge
- Aufwand zur Reinigung
- Isolierung eventueller Beschichtungen und damit Reduktion der Leistungsfähigkeit (Wärmeübergang)

## 2.6. Einordnung in das Programm

Der Forschungsschwerpunkt „Energieeffiziente Fahrzeugkomponenten und –systeme“ ist Schwerpunkt im Programm Neue Energien 2020.

Das Projekt unterstützt bei einer zu erwartenden Umsetzung im Praxisbetrieb massiv die Bestrebungen, um mittelfristig eine signifikante Steigerung der Energieeffizienz aller Oberflächen-Verkehrsträger im derzeitigen Straßenverkehrssystem zu erreichen. Durch das dem Projekt zugrunde



liegende Systeminnovationspotential könnte der Energieverbrauch des Verkehrssektors optimiert und damit auch die CO<sub>2</sub>-Bilanz des Verkehrssektors verbessert werden.

Das mit dem Forschungsprojekt aufgezeigte Ergebnis im Bereich der energiesparenden Subsysteme kann unabhängig vom Antrieb bei jedem modernen Fahrzeug eingesetzt werden, fokussiert sich allerdings auf Elektrofahrzeuge. Die Ergebnisse des Projektes sind auch auf den Energieverbrauch von Schienenfahrzeugen und Autobussen anzuwenden.

Das vorliegende Projekt ist in die Bereiche „Energieeffizienzsteigerung bei Subsystemen & Nebenaggregaten“ sowie „Konstruktives Fahrzeugdesign und Materialtechnologie“ einzugliedern.

## 2.7. Verwendete Methoden

Die verwendeten Methoden wurden im Kapitel Schwerpunkte des Projektes bereits weitgehend beschrieben. Daher soll im Folgenden nur noch eine Zusammenfassung erfolgen.

### Theoretische Vorarbeiten

- Vertiefung der Anforderungen an Fahrzeugklimaanlagen insbesondere unter Berücksichtigung der Benutzerfreundlichkeit, des Komforts und der Alltagstauglichkeit in verschiedenen klimatischen Regionen und unter verschiedenen Wettergegebenheiten
- Erarbeitung der thermischen Grundlagen einer Fahrzeugkarosserie- integrierten adiabatischen Klimaanlage, Ermittlung der notwendigen Wärmeaustauschflächen, Luftgeschwindigkeiten und des Wasserbedarfs
- Berechnung und Simulation unterschiedlicher Zustände unter Verwendung des kommerziellen Softwareprogrammes Matlab, Version 2011a, und unter Anwendung von aus der Literatur bekannten analytischen Formeln bezüglich Abkühlung der Luft aufgrund der Verdunstung, abhängig von der Ermittlung der Nusselt-Zahl und Reynolds-Zahl.

### Numerische Berechnung

- Mit dem kommerziellen CFD-Strömungslöser ANSYS CFX, Version 13, wurden, ausgehend von den Dimensionen des experimentellen Versuchsaufbaues, unter Verwendung eines 2D blockstrukturierten Hexaeder-Netzes (erstellt mit dem kommerziellen Vernetzungstools ANSYS ICEM, Version 13), numerische Berechnungen des Strömungsfeldes durchgeführt. Hierfür wurden zusätzliche User Fortran Routinen implementiert, um den Verdunstungsvorgang modellieren zu können. Die Randbedingungen entsprechen jenen des experimentellen Versuchsaufbaues, wobei die Außenwände wie auch bei der analytischen Berechnung als adiabatisch angenommen wurden.

### Oberflächenanalysen

- Verschiedene Oberflächen wurden in Versuchsreihen auf ihre Hydrophilität getestet. Dabei wurden einheitlich dimensionierte Testfelder mit einer definierten Wassermenge beaufschlagt und die Gleichmäßigkeit der Verteilung optisch analysiert. Für die Verteilung wurden sowohl die „Verspachtelung“ als auch eine Verteilung mittels Luftstrom geprüft. Weiters wurde auch die Variante einer Sprühdüse im Luftstrom getestet.



### 3. Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Adiabate Kühlung könnte einen bedeutenden Beitrag zur Reduktion des Energieverbrauchs der Nebenaggregate von Fahrzeugen liefern.

Mit rund 5 Liter Wasser kann bei deutlich verbesserter Umweltbilanz der Einsatz von 1 Liter fossilen Treibstoff oder rund 2,5 kWh elektrische Energie kompensiert werden.

Voraussetzungen für die Erreichung einer effizienten Kühlung im Fahrzeug sind die Berücksichtigung konstruktiver Maßnahmen wie die Ausführung der Kühlrippengestaltung, das Gewicht der Kühlrippenstruktur (des Wärmetauschers), Oberflächenstrukturen und die Einbringung der Flüssigkeit.

Einschränkungen für den Einsatz der adiabaten Klimaanlage sind unter feuchten aber trotzdem heißen Wetterbedingungen gegeben. Daher wird eine Kombination mit konventionellen Klimaanlagen empfohlen. Für den Einsatz in gemäßigten (Mitteleuropa) oder heißen und trockenen Regionen (Südeuropa, Nordafrika) ist die Form der Kühlung daher mit wenigen zeitlichen Ausnahmen sehr geeignet. Nicht geeignet ist diese Form der Kühlung in tropischen feuchten Klimaregionen.

Eine weitere Einschränkung der Kühlmethode ist die limitierte Kühlgeschwindigkeit, die jedoch wiederum durch den kombinierten Einsatz mit konventionellen Kühlanlagen ausgeglichen werden kann. Um den nicht energieeffizienten Einsatz der konventionellen Kühlanlagen zu vermeiden, kann auch die Anwendung der Vortemperierung bzw. deren Voraktivierung über SMS oder sonstige Funksysteme den Nachteil der relativen Trägheit des Kühlsystems ausgleichen. In Kombination mit Photovoltaikanlagen auf dem Fahrzeugdach kann hier auch ein Optimum an Systemeffizienz erzielt werden: Die die Fahrzeuginnenraumtemperatur erhöhende Sonneneinstrahlung wird über die PV Anlage für den kühlenden Lüfter eingesetzt.

Besonderen Nutzen stiftet die adiabate Kühlanlage im Elektrofahrzeug, da bei diesen die Reichweite verbessert oder Batteriegewicht eingespart werden kann. Die derzeit noch sehr hohen Kosten für die Speicherung von elektrischer Energie können daher deutlich reduziert werden. Dabei liegen die dafür notwendigen Investitionen in die adiabatische Kühlanlage deutlich unter dem Einsparungspotential. Die adiabatische Kühlung hat auch ein sehr hohes Nachhaltigkeitspotential.

### 4. Ausblick und Empfehlungen

Neue Werkstoffe und Oberflächenbehandlungsmethoden sowie verbesserte Verarbeitungsmethoden ermöglichen den Einsatz eines bereits seit langem bekannten Grundprinzips der Kühlung. Aufbauend auf den vorliegenden Ergebnissen erscheint die Entwicklung eines funktionsfähigen Prototyps sinnvoll. Das immense Energieeinsparungspotential, der hohe Umweltnutzen und die positive Auswirkungen auf Reichweiten bei Elektrofahrzeugen lässt es sinnvoll erscheinen, die bereits erarbeiteten Konzepte der Gestaltung der Wärmetauschflächen, der Oberflächenstrukturen und der Flüssigkeitseinbringung weiter zu führen. Ziel sollte es sein ein Demonstrationsfahrzeug zu entwickeln, das breitenwirksam die Vorzüge des Systems zeigt und einen Anstoß für die Fahrzeugindustrie gibt, auf Basis der Ergebnisse ihre eigenen Fahrzeugtypen entsprechend auszustatten.



## 5. Literaturverzeichnis

1. Meyer G., Schiffner E.: Technische Thermodynamik, Leipzig: VEB Fachbuchverlag, 1986
2. Achim Trumpler: Diplomarbeit der Fachhochschule Giessen Friedberg; Planung, Aufbau und Inbetriebnahme eines Versuchsstandes für Verdunstungskühler und messtechnische Untersuchung an einem Prototyp
3. Rietschel H.: Raumklimotechnik, Band 1 Grundlagen, 16. Auflage: herausgegeben von Horst Esdorn
4. Wagner W.: Wärmeübertragung, Würzburg: Vogel Buchverlag, 1991
5. Wagner W.: Wärmeaustauscher, Würzburg: Vogel Buchverlag, 1993
6. Berliner P.: Psychrometrie, Karlsruhe, Verlag C.F. Müller, 1979
7. Böswirth L. und Plint M. A. :Technische Wärmelehre
8. Bosnjakovic F.: Technische Thermodynamik, Darmstadt Steinkopff Verlag, Teil2. –6. vollst. überarb. und erw. Aufl. 1997
9. VDI-Wärmeatlas: Berechnungsblätter für den Wärmeübergang  
Hrsg. Verein Deutscher Ingenieure, 9.Auflage – Berlin, Springer, 2002
10. Baehr H.D., Stephan K.: Wärme- und Stoffübertragung, Stuttgart, Springer, 2008

## IMPRESSUM

### **Verfasser**

Everynear GmbH

Friedrichstraße 56,

2500 Baden

Tel: +43(0)2252 209411

E-Mail: [info@everynear.eu](mailto:info@everynear.eu)

Web: [www.everynear.eu](http://www.everynear.eu)

### **Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber**

Klima- und Energiefonds

Gumpendorfer Straße 5/22

1060 Wien

[office@klimafonds.gv.at](mailto:office@klimafonds.gv.at)

[www.klimafonds.gv.at](http://www.klimafonds.gv.at)

### **Disclaimer**

Die Autoren tragen die alleinige Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts. Er spiegelt nicht notwendigerweise die Meinung des Klima- und Energiefonds wider.

Der Klima- und Energiefonds ist nicht für die Weiternutzung der hier enthaltenen Informationen verantwortlich.

### **Gestaltung des Deckblattes**

ZS communication + art GmbH