

---

DAIMLERBENZ

# **Konzepte zur Klimatisierung von Fahrzeuginnenräumen**

## **Studienarbeit**

von

cand. kyb. André Manfred STROBEL

Universität Stuttgart

Institut A für Mechanik

Durchgeführt bei der Daimler-Benz AG, Stuttgart

Forschung 1, Abteilung FT1/AK Klimatisierung

Juni 1998

---

DAIMLERBENZ

# Konzepte zur Klimatisierung von Fahrzeuginnenräumen

## Studienarbeit

von

cand. kyb. André Manfred STROBEL

Universität Stuttgart

Institut A für Mechanik

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. Arnold KISTNER

Durchgeführt bei der Daimler-Benz AG, Stuttgart

Forschung 1, Abteilung FT1/AK Klimatisierung

Betreuer: Dipl.-Ing. Jürgen MAUÉ

Juni 1998

---

# Vorwort

Im Rahmen meines Studiums der Technischen Kybernetik habe ich diese Studienarbeit geschrieben. Es war das Ziel dieser Arbeit, sowohl den aktuellen Stand der Fahrzeugklimatisierung als auch die aktuelle Entwicklung auf diesem Gebiet übersichtlich zusammenzustellen.

Ich hatte die Möglichkeit, sehr viel Literatur zu diesem Thema zu lesen. Es zeigte sich sehr schnell, daß eine Klimatisierung des Innenraums mit relativ einfachen Mitteln erreicht werden kann. Für eine komfortablere Klimatisierung sind aber sehr viele zusätzliche Komponenten erforderlich. Meistens ist der Aufwand zur Verbesserung der Anlage viel größer als der Nutzen, den der Insasse im Innenraum wahrnehmen kann. Die besondere Herausforderung liegt also darin, ein möglichst einfaches und billiges Konzept zu entwerfen, das gleichzeitig eine spürbare Verbesserung des Innenraumklimas hervorruft.

Als Student der Technischen Kybernetik ist man gewohnt, zunächst ein Modell der Regelstrecke zu erstellen. Bei der automatischen Fahrzeugklimatisierung wird dies weder für den Innenraum noch für den Insassen gemacht. Es gibt zwar Ansätze zur Modellierung bestimmter Zusammenhänge, doch es wäre sehr aufwendig, das Gesamtsystem aus Regler, Aktuatoren, Regelstrecke und Sensoren zu modellieren.

Es wird in Zukunft eine Reihe neuer Aktuatoren und Sensoren zur automatischen Klimatisierung des Innenraums geben. Wie diese neuen Komponenten in das Regelungskonzept eingebunden werden, ist noch nicht geklärt. Es gibt zwar Ansätze dafür, doch meistens fehlen Vergleiche zwischen unterschiedlichen Varianten.

Für mich ist das Gebiet der Fahrzeugklimatisierung deshalb so interessant, weil man es mit sehr vielen Phänomenen zu tun hat, die man mit relativ begrenzten Mitteln einigermaßen in den Griff bekommen kann. Gleichzeitig sind aber enorme Anstrengungen notwendig, um unter den gegebenen Rahmenbedingungen eine wirklich komfortable Klimatisierung des Innenraums zu ermöglichen.

Zum Schluß möchte ich mich noch bei Professor KISTNER bedanken, der mir diese Studienarbeit angeboten hat und mir auch während der Zeit bei Daimler-Benz mit Rat und Tat zur Seite stand. Außerdem gilt mein besonderer Dank Herrn MAUÉ. Mit seinen Fachkenntnissen und seiner Erfahrung auf dem Gebiet der Fahrzeugklimatisierung war er ebenso wie alle anderen Mitglieder der Abteilung FT1/AK eine unerschöpfliche Quelle für Antworten zu Fragen, die sich während der Studienarbeit ergaben. Ganz zum Schluß möchte ich mich noch bei meinem Mentor Herrn Dr. FRÜHAUF bedanken, der sich dafür eingesetzt hat, daß ich dieses Thema u.a. in einem Praktikum in den USA weiterverfolgen darf.

André Manfred Strobel, Juni 1998

# Inhaltsverzeichnis

<b>Formelzeichen</b> .....	<b>8</b>
<b>Begriffslexikon</b> .....	<b>10</b>
<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>13</b>
<b>1. Einleitung</b> .....	<b>15</b>
<b>2. Fahrzeugklimatisierung</b> .....	<b>18</b>
2.1 Anforderungen .....	18
2.1.1 Sicherheit.....	20
2.1.2 Technische Anforderungen und Umweltaspekte.....	21
2.1.3 Komfort .....	22
2.1.4 Kosten.....	27
2.2 Funktionsweise .....	28
2.3 Komponenten einer Klimatisierungsanlage .....	30
2.3.1 Umluftklappe und Luftansaugung.....	30
2.3.2 Gebläse .....	30
2.3.3 Kälteanlage .....	30
2.3.4 Heizanlage .....	31
2.3.5 Luftverteilungsklappen und Luftkanäle.....	34
2.4 Fahrzeuginnenraum.....	34
2.4.1 Luftaustrittsöffnungen .....	34
2.4.2 Innenraum.....	35
2.4.3 Luftauslaßöffnungen.....	36
2.4.4 Bedienteil.....	36
<b>3. Automatische Klimaregelung</b> .....	<b>39</b>

3.1 Vorteile .....	39
3.1.1 Komfort .....	39
3.1.2 Sicherheit .....	39
3.1.3 Umwelt .....	40
3.1.4 Kosten .....	40
3.2 Komponenten des Regelkreises .....	40
3.2.1 Regelstrecke .....	40
3.2.2 Regelgrößen .....	42
3.2.3 Sollwerte .....	42
3.2.4 Störgrößen .....	42
3.2.5 Sensoren .....	43
3.2.6 Regler .....	44
3.2.7 Aktuatoren .....	47
3.2.8 Stellgrößen .....	48
3.3 Anforderungen .....	49
3.3.1 Klimaregelung .....	49
3.3.2 Sollwerte .....	49
3.3.3 Regler .....	50
3.3.4 Aktuatoren .....	51
3.3.5 Sensoren .....	51
3.4 Innenraumtemperaturregelung .....	51
3.4.1 Regelungsstrategien .....	52
3.4.2 Korrektur der Sollwerte .....	56
3.4.3 Steuereingriffe .....	57
3.4.4 Luftaustrittstemperatur .....	58
3.4.5 Mehrzonenklimatisierung .....	58
<b>4. Neue Klimatisierungskonzepte .....</b>	<b>61</b>

4.1 Motivation.....	61
4.1.1 Komfortablere Klimatisierung.....	61
4.1.2 Erschwerte Rahmenbedingungen .....	67
4.2 Aktuatoren .....	70
4.2.1 Zusätzliche Heizung und Kühlung .....	70
4.2.2 Luftführung.....	72
4.2.3 Umschließungsflächen .....	73
4.2.4 Beeinflussung der Feuchtigkeit .....	74
4.3 Sensoren.....	74
4.3.1 Temperatursensoren .....	74
4.3.2 Feuchtigkeitssensoren.....	77
4.3.3 Multifunktionssensoren für die Luftqualität.....	78
4.3.4 Sitzbelegungssensoren.....	80
4.3.5 Spezielle Sensoren.....	80
4.3.6 Fusion von Sensordaten.....	80
<b>5. Neue Regelungskonzepte .....</b>	<b>83</b>
5.1 Konzepte zur Komfortregelung: .....	83
5.1.1 Kennfeldregelung .....	84
5.1.2 Feuchtigkeitsregelung.....	84
5.1.3 Regelgröße Komfortindex .....	86
5.1.4 Insassenklimatisierung .....	87
5.2 Konzepte aus der Regelungstechnik .....	92
5.2.1 Optimale Regelung.....	92
5.2.2 Modellbasierte Regelung.....	93
5.2.3 Adaptive und lernende Regelungssysteme .....	94
5.2.4 FUZZY-Regelung.....	95
5.3 Kombination von Regelungskonzepten .....	100

---

<b>Schlußfolgerungen.....</b>	<b>102</b>
<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>103</b>
<b>Sachwortregister.....</b>	<b>110</b>

# Formelzeichen

$a$	Absorption der Strahlung an den Umschließungsflächen
$T_{Eq}$	Äquivalenztemperatur
$\underline{Y}$	Ausgangsvektor
$T_{L,e}$	Außentemperatur
$\underline{\underline{C}}$	Beobachtungsmatrix
$t$	Durchlässigkeit der Scheiben für Strahlung
$T_H$	Hauttemperatur
$\dot{T}_H$	Zeitliche Änderung der Hauttemperatur
$T$	Innenraumtemperatur
$T_{soll}$	Sollwert der Innenraumtemperatur
$\Delta T$	Regelabweichung der Innenraumtemperatur
$T_{L,a}$	Luftaustrittstemperatur
$s_B \quad s_G$	Oberfläche der Umschließungsflächen und der Scheiben
$T_r$	Referenztemperatur
$I$	Sonneneinstrahlung
$\underline{\underline{B}}$	Steuermatrix
$\underline{U}$	Steuervektor
$\underline{\underline{D}}$	Störungsmatrix
$\underline{\underline{A}}$	Systemmatrix
$T_B \quad T_G$	Temperaturen der Umschließungsflächen und der Scheiben



$\dot{T}_B$ $\dot{T}_G$	Zeitliche Temperaturänderungen der Umschließungsflächen und der Scheiben
$\underline{w}$	Vektor des weißen Rauschens
$c_B$ $c_G$ $c$	Wärmekapazitäten der Umschließungsflächen, der Scheiben und des Innenraums
$G_B$ $G_G$	Wärmeleitfähigkeiten der Umschließungsflächen und der Scheiben
$G_{eq}$	äquivalente Wärmeleitfähigkeit
$W$	Wärmequelle
$Q$	Wärmestrom
$\alpha$	Wärmeübergangskoeffizient
$\underline{T}$	Zustandsvektor
$\underline{\dot{T}}$	Zeitliche Änderung des Zustandsvektors

# Begriffslexikon

Die nachfolgend gegebenen Erläuterungen sind nicht allgemein gültig, sondern beschreiben, in welchem Zusammenhang und mit welcher Bedeutung sie im folgenden benutzt werden.

A-Säule	Verbindung zwischen Dach und Fahrzeugruppf links und rechts von der Windschutzscheibe
Aktuatoren	Stellglieder
Anzeigeelement	Sichtbare Darstellung eines Parameters des Innenraumklimas oder der Klimatisierungsanlage
Außentemperatur	Lufttemperatur der Umgebung
Bedienelement	Möglichkeit, einen Parameter des Innenraumklimas oder der Klimatisierungsanlage manuell vorzugeben
Bedienteil	Mensch-Maschine-Dialogschnittstelle der Klimatisierung, umfaßt die zentralen Bedien- und Anzeigeelemente
Belüftungsanlage	Anlage zum Belüften des Innenraums, die aus einem oder mehreren Gebläsen, der Luftansaugung, den Luftkanälen und den Luftaustritts- und Luftauslaßöffnungen besteht
B-Säule	Verbindung zwischen Dach und Fahrzeugruppf links und rechts in der Mitte des Fahrzeugs
CAN-Bus	Controller Area Network Bussystem, das z.B. zum Austausch von Sensordaten in Fahrzeugen eingesetzt wird
C-Säule	Verbindung zwischen Dach und Fahrzeugruppf links und rechts von der Heckscheibe
Face-Level-Düsen	Luftaustrittsöffnungen, die in Kopfhöhe angebracht sind, meist Mittel- und Seitendüsen
Fahrleistungen	Grenzwerte physikalischer Größen, die das dynamische Verhalten eines Fahrzeugs beschreiben
Fond	Hinterer Bereich des Innenraums

Freiheitsgrad	Zustand oder Prozeß, der beliebig festgelegt werden kann
Frischlufte	Luft aus der Umgebung des Fahrzeugs zur Klimatisierung des Innenraums
Front	Vorderer Bereich des Innenraums
Heizanlage	Anlage zum Erwärmen der Innenraumzuluft, die aus einem oder mehreren Heizgeräten besteht
Heizgerät	Einzelnes Gerät zum Erwärmen der Innenraumzuluft
Innenraum	Der Raum, in dem sich die Insassen eines Fahrzeugs aufhalten und der in den meisten Fällen von der Umgebung durch Wände oder Glasscheiben getrennt ist
Innenraumklima	Klima im Innenraum, abhängig von den Klimaparametern wie Innenraumtemperatur, Feuchtigkeit, Luftgeschwindigkeit und Sonneneinstrahlung
Innenraumtemperatur	Lufttemperatur im Innenraum
Innenraumzuluft	In einer Heiz-, Belüftungs- und Klimaanlage klimatisierte Luft, die durch die Luftaustrittsöffnungen in den Innenraum eintritt
Insasse	Person, die sich im Innenraum eines Fahrzeugs aufhält
Klimaanlage	Anlage zum Kühlen und Entfeuchten der Innenraumzuluft, die aus einem oder mehreren Klimageräten besteht
Klimagerät	Einzelnes Gerät zum Kühlen der Innenraumzuluft.
Klimaparameter	Physikalische und physiologische Größen, die das Klima beeinflussen
Klimaregelung	Automatische Regelung der Heiz-, Belüftungs- und Klimaanlage mit dem Ziel, das Innenraumklima zu beeinflussen
Klimatisierung	Heizen, Belüften, Kühlen und Entfeuchten der Innenraumzuluft
Klimatisierungsanlage	Heiz-, Belüftungs- und Klimaanlage, die aus einem oder mehreren Klimatisierungsgeräten besteht
Klimatisierungsgerät	Einzelnes Gerät zum Klimatisieren der Innenraumzuluft
Kälteanlage	siehe Klimaanlage
Lastfall	Exakt beschriebene Vorgabe einer Folge von bestimmten Betriebszuständen des Fahrzeugs und des Umgebungszustands
Luftauslaßöffnungen	Luftöffnungen, durch die die Luft den Innenraum verläßt

Luftaustrittsöffnungen	Luftöffnungen, aus denen die klimatisierte Luft in den Innenraum eintritt
Luftaustrittstemperatur	Lufttemperatur an einer Luftaustrittsöffnung
Luftfeuchtigkeit	Relative Luftfeuchtigkeit im Innenraum
Luftkanal	Geschlossene Leitung, welche Luft in den Innenraum oder aus dem Innenraum herausführt
Luftmassenstrom	Luftmenge, die pro Zeiteinheit durch die Luftaustrittsöffnungen in den Innenraum eintritt
Mehrzonenklimatisierung	Aufteilung des Innenraums in Bereiche, deren Klima möglichst getrennt beeinflußt werden kann
Mischkammer	Kammer, in der kalte und warme Luft völlig durchmischt wird, so daß Luft mit einer vorgegebenen Temperatur entsteht
Mitteldüse	Luftaustrittsöffnung in der Mitte des Armaturenbretts
R134a	1,1,1,2-Tetrafluorethan, zur Zeit meistverwendetes Kältemittel in Fahrzeugkälteanlagen
Sensoren	Meßglieder
Seitendüsen	Luftaustrittsöffnung auf den Seiten des Armaturenbretts
Sommerbedingung	Umgebungsbedingung, bei der ein Kühlvorgang erforderlich ist
Sonneneinstrahlung	Sonnenstrahlung, die in den Innenraum eintritt
Umgebung	Gebiet unmittelbar außerhalb des Fahrzeugs
Umluft	Luft, die dem Innenraum entnommen und nach einer Aufbereitung anschließend wieder zugeführt wird
Umschließungsflächen	Scheiben, Türen, Wände, Decke und Boden des Innenraums
Wärmeeinstrahlung	Wärmestrahlung, die in den Innenraum eintritt
Winterbedingung	Umgebungsbedingung, bei der ein Heizvorgang erforderlich ist

---

# Zusammenfassung

Es ist das Ziel dieser Arbeit, im Rahmen einer Literatur- und Patentrecherche neue Ansätze und Trends bei der Klimatisierung von Fahrzeugen aufzuzeigen. Der Schwerpunkt lag dabei auf der Klimatisierung von Personenkraftwagen.

Die automatische Klimatisierung des Fahrzeuginnenraums hat schon ein sehr hohes Niveau erreicht, doch speziell im Hinblick auf die Komfortbedürfnisse der Insassen sind noch Verbesserungen möglich. Dies beinhaltet sowohl die Verbesserung des thermischen Komfort als auch die einfachere Bedienbarkeit einer Klimatisierungsanlage.

Generell können aus den ausgewerteten Unterlagen die folgende Aussagen abgeleitet werden:

- Das Klima im Innenraum eines Fahrzeugs wird wesentlich durch den Zustand der Luft bestimmt. Deshalb wird auch fast ausschließlich die Innenraumzuluft klimatisiert.
- Der Anteil der Regelung ist bei einer automatischen Klimatisierungsanlage bisher extrem gering.
- Es gibt neue Aktuatoren und Sensoren, mit denen man das Innenraumklima zusätzlich beeinflussen kann.
- Außerdem gibt es eine Reihe von Möglichkeiten, den Anteil der Regelung bei der automatischen Fahrzeugklimatisierung zu steigern. Einige dieser neuen Regelungskonzepte werden vorgestellt.
- Aufgrund der hohen Komplexität wird meist nur die Innenraumtemperatur geregelt. Ein klassischer P-Regler ist einfach, günstig und deshalb besonders gut geeignet.
- Die Eingriffe der Klimatisierungsanlage sollten sich noch viel stärker am Energiebedarf und am Komfort der Insassen orientieren.
- Es gibt keine Patentlösung, mit der sich die Probleme der Fahrzeugklimatisierung ganz einfach lösen lassen.
- Immer mehr Aktuatoren und Sensoren werden bei der Klimatisierung von Fahrzeuginnenräumen eingesetzt.
- Nicht für jeden neuen Aktuator muß ein neuer Sensor installiert werden. Neue Regelungskonzepte erlauben die Fusion von Sensordaten, d.h. aus den Daten vorhandener Sensoren können zusätzliche Informationen gewonnen werden, die man nicht direkt messen kann.

- Der Anteil der Regelung sollte dann erhöht werden, wenn z.B. weitere Größen im Innenraum gemessen werden. Es sollten Untersuchungen durchgeführt werden, die verschiedene Regelungskonzepte für neue Aktuatoren und Sensoren vergleichen.
- Modelle für den Insassen oder den Innenraum ermöglichen die Beobachtung nicht meßbarer Größen wie z.B. des thermischen Komforts.
- Die Insassen beschreiben den thermischen Komfort z.B. mit „zu kalt“, „zu trockene Luft“ oder „sehr unbehaglich“. FUZZY-Regelung bietet die Möglichkeit, diese Aussagen mit Hilfe von Regeln in entsprechende Stelleingriffe umzusetzen.

# 1. Einleitung

*In diesem Kapitel wird eine kurze Einführung in das Thema Fahrzeugklimatisierung gegeben. Außerdem werden die nachfolgenden Kapitel kurz vorgestellt. Zum Schluß wird noch das Vorgehen beim Erstellen dieser Arbeit erläutert.*

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit Konzepten zur Klimatisierung von Fahrzeuginnenräumen. Bei allen Fahrzeugen müssen die ausreichende Belüftung und die Beschlagfreiheit der Scheiben garantiert sein. Abhängig von den klimatischen Bedingungen sind Heiz- und Klimaanlage erforderlich. Um auch bei sehr unterschiedlichen und wechselnden Witterungsbedingungen für alle Insassen ein komfortables Innenraumklima bereitzustellen, ist eine Kombination der drei Komponenten einer Heiz-, Belüftungs- und Klimaanlage sinnvoll (siehe *Abbildung 1: Unterschiedliche Klimaeinflüsse auf ein Fahrzeug*).



**Abbildung 1: Unterschiedliche Klimaeinflüsse auf ein Fahrzeug**

Beinahe jedes Fahrzeug besitzt eine Heiz- und Belüftungsanlage. Dies ist eine ausreichende Voraussetzung für ein erträgliches Innenraumklima im Winter. Immer mehr Fahrzeuge besit-

zen zusätzlich eine Klimaanlage, um auch im Sommer ein erträgliches Innenraumklima zu ermöglichen. So werden in den USA 80 Prozent aller Neuwagen mit einer Klimaanlage verkauft. In Japan hat sich dieser Trend fortgesetzt, und auch in Europa werden immer mehr Fahrzeuge mit einer Klimatisierungsanlage ausgestattet.

Aufgrund des weitgehend gemäßigten Klimas in Mitteleuropa ist es nicht zwingend erforderlich, eine Klimatisierungsanlage zu installieren. Deshalb ist der Anspruch der Europäer an eine Heiz-, Belüftungs- und Klimaanlage ein völlig anderer. Es geht nicht darum, die Mobilität unter erschwerten klimatischen Bedingungen überhaupt erst zu ermöglichen. Vielmehr wird ein höherer thermischer Komfort gefordert, der nicht zu Lasten des übrigen Fahrzeugverhaltens führen darf. Außerdem möchte der Kunde ein System, das ihm zu jeder Zeit ein wirklich gesundes, angenehmes und komfortables Klima bieten kann.

Während die Klimatisierung von Gebäuden relativ einfach und unkompliziert ist, gibt es bei der Fahrzeugklimatisierung große Probleme. Z.B. läßt sich eine zugfreie Klimatisierung in einem Fahrzeug nur mit großem Aufwand realisieren.

Dies liegt hauptsächlich an den ständig wechselnden Randbedingungen und den inhomogenen klimatischen Zuständen. Die starke Sonneneinstrahlung durch die zum Teil schräg angestellten Scheiben, ständig wechselnde äußere Bedingungen, die Wärmekapazitäten der Inneneinrichtung, die beschränkte Bewegungsmöglichkeit der Insassen und ihr geringer Abstand zu den Außenwänden sind hauptsächlich dafür verantwortlich.

Es ist schwierig, das Klima im Innenraum mit einer Klimatisierungsanlage von Hand einzuregeln. Die einzelnen Komponenten reagieren nur verzögert auf Stelleingriffe. Auch die großen Zeitkonstanten und Totzeiten des Systems tragen dazu bei, daß nur eine automatische Klimaregelung eingreifen kann, bevor sich das Klima im Innenraum für den Insassen spürbar verschlechtert hat.

In Zukunft wird eine automatische Klimaregelung zum Standard gehören, da diese nicht nur einen gesteigerten Komfort verspricht, sondern auch zur energiesparenden Klimatisierung beitragen kann. Eine bedarfsgerechte Klimatisierung des Innenraums kann den Komfort erhöhen und gleichzeitig den Energieverbrauch senken.

### **Aufbau der Arbeit**

Diese Arbeit ist in zwei Teile gegliedert. In den *Kapiteln 2 (Fahrzeugklimatisierung) und 3 (Automatische Klimaregelung)* wird der Stand der Technik beschrieben. Die *Kapitel 4 (Neue Klimatisierungskonzepte) und 5 (Neue Regelungskonzepte)* beschreiben neue Ansätze für eine komfortablere Klimatisierung.

In *Kapitel 2* wird der grundlegende Aufbau einer Heiz- und Klimaanlage für Fahrzeuge beschrieben. In *Kapitel 3* werden Regelungskonzepte vorgestellt, die sich in modernen Fahrzeugen befinden. *Kapitel 4* befaßt sich mit neuen Hardwarekonzepten, mit denen ein besserer thermischer Komfort erreicht werden kann. *Kapitel 5* stellt neue Regelungskonzepte vor, mit denen ebenfalls ein besserer thermischer Komfort erreicht werden soll.



Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine ausführliche Literatur- und Patentrecherche durchgeführt. Die Literaturrecherche bezog sich hauptsächlich auf die SAE Technical Paper Series, da hier eine CD-Datenbank bereitstand. Es konnte nach Stichworten im Titel und in der kurzen Zusammenfassung gesucht werden. Die Suchbegriffe waren dieselben wie bei der Patentrecherche (siehe *Tabelle 1: Suchbegriffe bei der Patentrecherche*). Für die Patentrecherche stand eine umfangreiche Datenbank zur Verfügung. Es konnte ebenfalls nicht nur nach Begriffen im Titel, sondern auch nach Begriffen in der kurzen Zusammenfassung gesucht werden. Es wurden die in *Tabelle 1: Suchbegriffe bei der Patentrecherche* aufgeführten Suchbegriffe benutzt.

<b>deutsche Suchbegriffe in DE, EU</b>	<b>englische Suchbegriffe in EU, US, WO</b>
klima*, regel*, fahrzeug*, komfort*, sensor*, fuzzy*	air conditioning, HVAC, control, vehicle, comfort, climate, sens*, fuzzy
mindestens zwei erfüllt	mindestens drei erfüllt

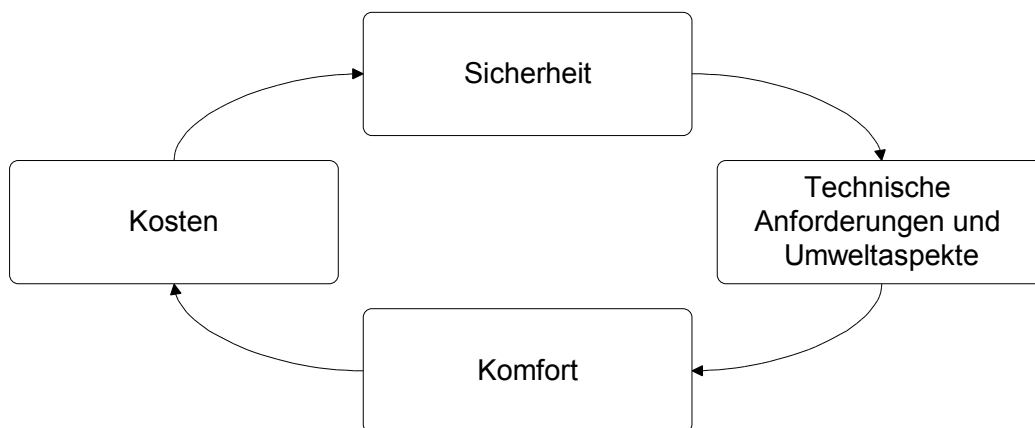
**Tabelle 1: Suchbegriffe bei der Patentrecherche**

## 2. Fahrzeugklimatisierung

*In diesem Kapitel wird der grundlegende Aufbau einer Heiz-, Belüftungs- und Klimaanlage für Fahrzeuge beschrieben. Nähere Beschreibungen der einzelnen Komponenten werden nur dann gegeben, falls es für die nachfolgenden Kapitel von Interesse ist.*

### 2.1 Anforderungen

Eine Heiz-, Belüftungs- und Klimaanlage hat die Aufgabe, ein komfortables Innenraumklima zu gewährleisten. Dies kann durch die weitgehende Trennung des Innenraumklimas von dem der Umgebung geschehen. Daraus ergeben sich eine Reihe von Anforderungen, die sich in Sicherheit, technische Anforderungen und Umweltaspekte, Komfort und Kosten aufspalten lassen.



**Abbildung 2: Anforderungen an eine Heiz- und Klimaanlage**

Da sich diese Anforderungen gegenseitig beeinflussen, ergibt sich ein iterativer Entwicklungsprozeß, bei dem der oben dargestellte Zyklus mehrfach durchlaufen wird (siehe *Abbildung 2: Anforderungen an eine Heiz- und Klimaanlage*). Die Sicherheit steht zentral

über allem. Der Komfort der Insassen befindet sich ebenfalls im Mittelpunkt der Betrachtung. Zusammen geben sie die Funktionalität der Heiz-, Belüftungs- und Klimaanlage vor, während die technischen Anforderungen und Umweltaspekte, sowie die Kosten den Rahmen des Entwicklungsprozesses bilden. Die Reihenfolge der einzelnen Anforderungen ist nicht festgelegt. Es ist sogar sinnvoll, mehrere Anforderungen gleichzeitig zu berücksichtigen. Im optimalen Fall überprüft der Ingenieur bei jeder Veränderung, ob noch alle vier Anforderungen eingehalten werden.

Die oben formulierten Anforderungen lassen sich nach [WEI00] auch noch anders ausdrücken:

- Sicherheit
- Komfort
- Betriebskosten
- Zuverlässigkeit
- Ergonomie
- Ökobilanz
- Anschaffungskosten

Die Eigenschaften einer Klimatisierungsanlage beeinflussen alle Fahrzeugkerneigenschaften:

- Design
- Innovation
- Wirtschaftlichkeit
- Agilität
- Sicherheit
- Qualität
- Komfort
- Umwelt

Häufig sind nur Kompromisse zwischen Technik und Design möglich. So können sich z.B. auch bei der Klimatisierung des Innenraums Konflikte zwischen Technik und Design ergeben.

Auch bei der Klimatisierung des Innenraums ergeben sich viele Konflikte zwischen Technik und Design. Um das Klima möglichst schnell und überall beeinflussen zu können, sind u.a. viele und große Luftaustrittsöffnungen erforderlich, die in das Innenraumdesign integriert werden müssen. Andererseits führt der Trend zu immer flacheren Scheiben, die zu einer immer stärkeren Sonneneinstrahlung führen. Dieser Einfluß muß durch entsprechende Maßnahmen kompensiert werden.

Eine Klimatisierungsanlage beeinflusst aber nicht nur das Design. Sie wirkt sich auf Gewicht, Platzangebot, Leistung, Verbrauch und Kosten des Fahrzeugs aus.

Die vorangegangenen Erläuterungen zeigen, daß das absolut optimale Klima aufgrund der unterschiedlichsten Begrenzungen und Zusammenhänge nicht erreichbar ist. Für eine gegebene Anwendung kann unter bestimmten Rahmenbedingungen nur eine möglichst optimale Lö-

sung entwickelt werden. Dabei steht der thermische Komfort der Insassen im Mittelpunkt der Betrachtung.

### 2.1.1 Sicherheit

Die Sicherheit läßt sich in Gesundheit der Insassen, Verkehrs- und Betriebssicherheit aufspalten.

#### **Gesundheit der Insassen**

Funktionen zum Schutz der Gesundheit der Insassen werden bei [HIL00] aufgeführt:

- Aufwuchshemmende Oberflächen zum Schutz vor Mikroorganismen, die sich in der Klimatisierungsanlage einnisten,
- Verringerung der Ansteckungsgefahr bei Großraumkabinen in Bus, Bahn, und Flugzeug durch geeignete Gestaltung der Luftzirkulation,
- Filtersysteme zum Schutz vor Luftkeimbelastungen wie Pollen, Viren, Bakterien und Pilzen.

#### **Verkehrssicherheit**

Ein Fahrer kann nur dann völlig konzentriert am Verkehr teilnehmen, wenn er sich ausgeglichen und behaglich fühlt. Ein angenehmes Innenraumklima ist ein bedeutender Faktor der aktiven Sicherheit. Im Winter und in der Übergangszeit sind Vereisung und Beschlagen der Scheiben zu verhindern, da dadurch Sicht und Verkehrssicherheit stark beeinträchtigt werden. Dies kann z.B. durch ein schnell und einfach wählbares Defrost-Programm geschehen.

#### **Betriebssicherheit**

Bei einem Ausfall der Elektronik muß die maximale Heiz- und Kühlleistung im Innenraum zur Verfügung stehen. Zusätzlich zu in Extremsituationen erfahrbaren Sicherheitsmerkmalen gibt es auch solche, die im Hintergrund ablaufen. Eine Selbstdiagnose und Selbstüberwachung kann frühzeitig Fehler erkennen und den Gang zur Werkstatt vorschlagen. Die gespeicherten Fehlerdaten können dann von der Werkstatt über eine Diagnoseschnittstelle abgerufen werden. Mit Hilfe von Prüfprogrammen wird der Fehler lokalisiert und behoben. Ist es nicht mehr möglich, eine Werkstatt unbeschadet zu erreichen, so müssen Notprogramme zur Verfügung stehen, die weitere Ausfälle z.B. durch Überhitzung verhindern und die Fahrt zur Werkstatt so angenehm wie möglich gestalten.

#### **Sicherheit ist nicht erlebbar**

Sicherheit ist beim Kauf des Fahrzeugs nicht erlebbar. Erst wenn das System versagt oder keinen ausreichenden Schutz bietet, vermißt man sie. Wenn man in ein völlig überhitztes Auto einsteigt und nach 10 Minuten trotz eingeschalteter Klimaanlage immer noch keine Besserung verspürt, wird man sich über die gesamte automatische Klimatisierungsanlage ärgern.

Es kann aber auch nur daran liegen, daß die Automatik ausgefallen ist und alle Luftaustrittsöffnungen geschlossen sind.

### 2.1.2 Technische Anforderungen und Umweltaspekte

Da die Karosserie nicht vollkommen dicht ist und Störungen durch die Anwesenheit und das Zu- und Aussteigen von Passagieren auftreten, ist eine kontinuierliche Klimatisierung erforderlich.

Die Gesetzliche Vorschriften zur Belüftung und zur Enteisung der Scheiben müssen berücksichtigt werden. Außerdem sind firmeninterne Spezifikationen einzuhalten. Daraus ergeben sich für ein spezielles Fahrzeug die maximale Heiz- und Kühlleistung, sowie der maximale Luftmassenstrom. Die Spezifikationen können Lastfälle festlegen, durch die extreme Heiz- und Kühlvorgänge und die Anforderungen an die Leistung berücksichtigt werden. In *Tabelle 2: Beschreibung eines extremen Kühlvorgangs* wird ein spezieller instationärer Lastfall beschrieben.

Umgebungsbedingungen	40 °C Außentemperatur 40 % Luftfeuchtigkeit 1000 W/m <sup>2</sup> Sonneneinstrahlung
Einstellungen des Klimatisierungssystems	Temperatureinstellung auf MIN Mittel- und Seitendüsen offen Maximale Gebläseleistung
Anfangsbedingungen im Innenraum	52 °C Innenraumtemperatur im Sitzbereich 60 °C Innenraumtemperatur im Kopfbereich
Anforderungen	Nach 30 Minuten Fahrt im 2. Gang muß die Innenraumtemperatur im Kopfbereich bei 22 °C und die Luftaustrittstemperatur bei 10 °C sein.  Im Stand muß nach 30 Minuten die Innenraumtemperatur im Kopfbereich bei 32 °C und die Luftaustrittstemperatur bei 22 °C sein.

**Tabelle 2: Beschreibung eines extremen Kühlvorgangs**

Im Idealfall steigt der Insasse in ein thermisch komfortables Fahrzeug ein. In der Realität benötigt die Klimatisierungsanlage eine gewisse Zeit, bis ein komfortabler Zustand erreicht wird. Unter normalen Sommerbedingungen sollte ein überhitztes Fahrzeug nach maximal 20 Minuten eine angenehme Innenraumtemperatur annehmen. Allerdings fällt der Kompromiß,

der zwischen thermischem Komfort und technischem Aufwand geschlossen wird, bei Fahrzeugen der Luxusklasse ganz anders aus als bei einfacheren Produkten der Kompaktklasse.

Neben den Anforderungen, die sich für spezielle Lastfälle ergeben, gibt es auch technische Rahmenbedingungen, die man für einen sicheren Betrieb einhalten muß.

Die Heiz-, Belüftungs- und Klimaanlage muß sich in das Gesamtsystem Fahrzeug integrieren lassen. Außerdem muß sie alle Vorgaben für Gewicht, Größe und Form, Leistungsaufnahme und Verbrauch einhalten.

Der Entwurf einer Klimatisierungsanlage muß sich an Standards orientieren. Die Bedienung darf sich nicht zu sehr von anderen Systemen unterscheiden. Speziell die Bedienelemente sollten eine allgemein anerkannte Symbolik verwenden. Das Verhalten sollte nachvollziehbar sein. Wenn ein Bedienelement zur Einstellung der Innenraumtemperatur verändert wird, sollte sich nicht unmittelbar darauf ein hörbares Gebläse einschalten. Außerdem können durch die Benutzung von Standardkomponenten und -bauteilen die Kosten gesenkt werden.

Es ist nicht sinnvoll, alles technisch Denkbare umzusetzen. Ziel ist die Realisierung der Leistungsvorgabe mit einem minimalen technischen Aufwand, um Kosten zu sparen und Fehlfunktionen aufgrund von Komplexität zu vermeiden. Dies kann durch eine begrenzte Anzahl von Aktuatoren und Sensoren geschehen. Dies bedeutet nicht, daß Neuerungen generell auszuschließen sind, sondern daß sie eine spürbare Verbesserung hervorrufen müssen. Außerdem können herkömmliche Hardwarekonzepte mit Hilfe von neuen Softwarekonzepten verbessert werden. Beispiele hierfür sind neue Bedienkonzepte, die Fehleingaben unterdrücken, oder neue Regelungskonzepte, welche die vorhandenen Sensordaten effektiver nutzen.

Neue Informations- und Kommunikationssysteme müssen auch mit der Heiz-, Belüftungs- und Klimaanlage verbunden werden. Für die Klimaregelung benötigte Daten können so z.B. auf dem CAN-Bus zur Verfügung gestellt werden. Sensoren liefern dann nicht mehr nur eine Spannung, die von der Klimaregelung z.B. als Außentemperatur interpretiert wird, sondern der Sensor stellt auf einem Bussystem z.B. die Information „Außentemperatur 23 °C“ zur Verfügung.

### **Umweltaspekte**

Die Schonung der Umwelt ist speziell bei Klimaanlagen ein heißes Thema. Die Substitution des Kältemittels R134a durch CO<sub>2</sub> ermöglicht eine Klimatisierung ohne Schädigung unserer Ozonschicht. Neue Ansätze wie die Wärmerückgewinnung aus der Abluft sollen den Energiebedarf einer Klimatisierungsanlage senken. In elektrisch betriebenen Fahrzeugen sollen kraftstofffreie Heiz-, Belüftungs- und Klimaanlagen eingesetzt werden. Dies ermöglicht ein klimatisiertes Zero-Emission-Fahrzeug. Ein weiterer Beitrag zur Schonung der Umwelt ist ein weitreichendes Recycling der benutzten Materialien.

#### **2.1.3 Komfort**

Sehr viele Menschen verbringen einen Großteil ihres Tages in einem Fahrzeug. Für z.B. LKW-Fahrer, Taxifahrer und Busfahrer stellt der Fahrzeuginnenraum einen Arbeitsplatz dar.

Deshalb muß der Innenraum dieser Fahrzeuge ganz spezielle Voraussetzungen erfüllen, um die Gesundheit und Leistungsfähigkeit der Insassen nicht zu beeinträchtigen und ein komfortables Fahren zu ermöglichen. Auch aus Gründen einer erhöhten Verkehrssicherheit ist dies unbedingt erforderlich.

Für die Klimatisierung eines Fahrzeuginnenraums bedeutet dies, daß im Winter geheizt, im Sommer gekühlt und das ganze Jahr über Frischluft zugeführt werden muß. Im Gegensatz zur Klimatisierung von Gebäuden steht man bei der Fahrzeugklimatisierung vor großen Schwierigkeiten, diese Bedingungen sicherzustellen.

### Thermischer Komfort

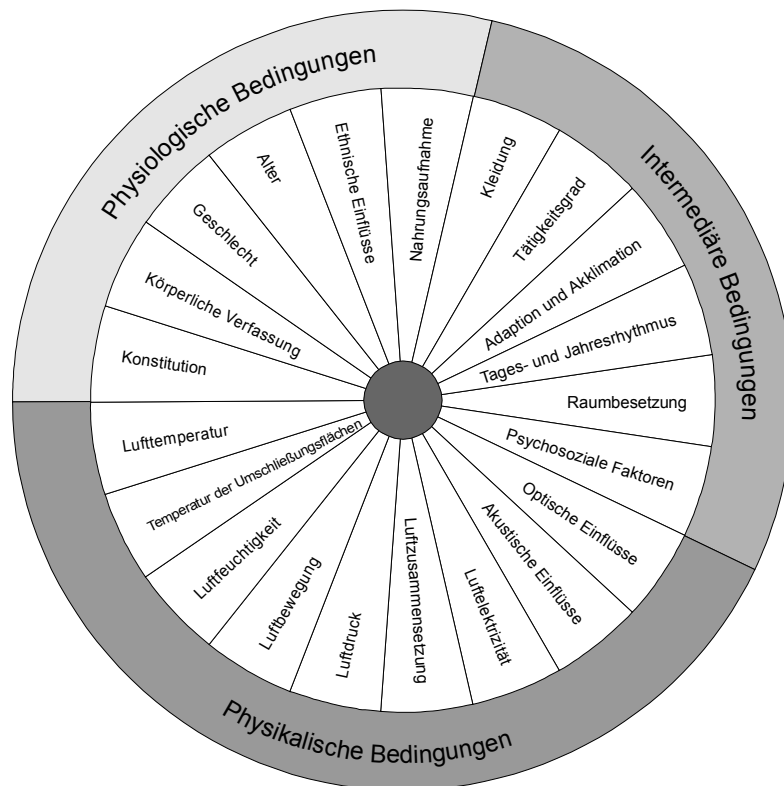
Die thermische Behaglichkeit der Insassen steht bei Fragen zur Klimatisierung eines Fahrzeuginnenraums im Mittelpunkt der Betrachtung. Das thermische Empfinden ist jedoch eine höchst subjektive Wahrnehmung. Die folgenden Faktoren beeinflussen diese Wahrnehmung in einem Fahrzeug:

- |                         |                  |                     |
|-------------------------|------------------|---------------------|
| • Persönlichkeit        | • Geräusch       | • Verkehrssituation |
| • Tagesform             | • Vibration      | • Witterung         |
| • Erfahrung             | • Geruch         | • Straßenzustand    |
| • Gesundheitszustand    | • Beleuchtung    | • Terminalsituation |
| • Psychische Verfassung | • Innenraumklima |                     |

Die Faktoren der linken und rechten Spalte kann man nur berücksichtigen, während man Geräusch, Vibration, Geruch, Beleuchtung und Innenraumklima zumindest teilweise beeinflussen kann. Eine Klimatisierungsanlage berücksichtigt nach [FRA87] und [WEI84] folgende Größen, um das Innenraumklima zu beeinflussen:

- |                  |                     |                                       |
|------------------|---------------------|---------------------------------------|
| • Luftbewegung:  | • Luftfeuchtigkeit  | • Temperatur der Umschließungsflächen |
| • Lufttemperatur | • Wärmeeinstrahlung |                                       |

Ganz allgemein hängt die thermische Behaglichkeit von physikalischen, physiologischen und intermediären Bedingungen ab, d.h. vom Zustand der Umgebung und vom Zustand der Person. Dieser Zusammenhang wird in *Abbildung 3: Thermische Behaglichkeit in Abhängigkeit von physiologischen, intermediären und physikalischen Einflüssen nach [GRO88]* dargestellt.



**Abbildung 3: Thermische Behaglichkeit in Abhängigkeit von physiologischen, intermediären und physikalischen Einflüssen nach [GRO88]**

Die physiologischen und intermediären Bedingungen kann man nur berücksichtigen, während die physikalischen Bedingungen beeinflusst werden können.

Die Begriffe thermisches Empfinden, thermische Behaglichkeit und thermischer Komfort unterscheiden sich kaum. Alle drei haben die Einschränkung thermisch, d.h. sie beschreiben Eigenschaften, die sich auf Wärme oder Temperatur beziehen. Das thermische Empfinden ist die Wahrnehmung eines thermischen Zustands. Die thermische Behaglichkeit bewertet das thermische Empfinden. Da für einen komfortablen Zustand auch ein komfortables Klima erforderlich ist, hängt der Komfort direkt von einem thermischen Komfort, nämlich der thermischen Behaglichkeit, ab.

Den Unterschied zwischen thermischem Empfinden und thermischer Behaglichkeit bzw. thermischem Komfort kann man leicht an einem Beispiel erklären. Jemand wird in einem gemütlichen Restaurant ein Teller köstlich duftender Suppe serviert. Der Teller ist warm, und während er den ersten Löffel zu seinem Mund führt, stellt er fest, daß die Suppe wirklich heiß ist. Voller Genuß schlürft er trotzdem den ersten Löffel. Kurze Zeit später stellt er fest, daß die Suppe fürchterlich heiß war. Plötzlich ist ihm diese wunderbare Suppe unangenehm, und er lassen sie erst einmal ein bißchen abkühlen.



Die reine thermische Empfindung, daß die Suppe heiß ist, sagt noch nichts darüber aus, wie groß die Schmerzen sind, wenn man sich an ihr verbrennt. Die Tatsache, daß die Person nicht auf die Gefahr achtete, läßt sich auf die angenehme Situation zurückführen, die sie abgelenkt hat. Ein Restaurant, tolle Düfte, gedämpftes angenehmes Licht, ein angenehmer Geräuschpegel, etwas Musik und eine schicke Einrichtung. Einfach ein angenehmes Ambiente.



**Abbildung 4: Komforthierarchie in Anlehnung an [\*\*\*00?MAUÉ00?\*\*\*]**

Wieder zurück zur Klimatisierung von Fahrzeuginnenräumen. In *Abbildung 4: Komforthierarchie in Anlehnung an [\*\*\*00?MAUÉ00?\*\*\*]* wird dargestellt, welche Bedingungen erfüllt sein müssen, um einen komfortablen Zustand zu erhalten. Dabei ist die Reihenfolge entscheidend. Erst wenn die vorangegangene Bedingung erfüllt ist, nimmt man den Zustand der darauffolgenden wahr. Es reicht also nicht aus, nur ein ästhetisch perfektes Fahrzeug zu bauen. Wenn die benutzten Materialien einen unangenehmen Geruch verbreiten, wird der Kunde das Design kaum wahrnehmen.

Die Parameter, die den Komfort beschreiben, beeinflussen sich gegenseitig. Wenn man die Fenster und das Schiebedach öffnet, wird zwar frische Luft in den Innenraum gelangen, doch der Lärm der Umgebung kann zu einer erhöhten Lärmbelastigung führen.

Nach [CLA00] werden folgende Störungen in etwa gleich empfunden: Eine um 1 °C erhöhte Temperaturabweichung vom thermisch komfortablen Zustand entspricht einer um 3,9 dB erhöhten Lärmbelastigung, und dies entspricht einer Verschlechterung der Luftqualität um 2,4 decipol (perceived air quality).

Um den thermischen Komfort im Fahrzeuginnenraum verbessern zu können, muß zuvor noch geklärt werden, wo sich die Faktoren der thermischen Behaglichkeit im Innenraum wiederfinden lassen.

Nach [FAN\*\*\*00?MAUÉ00?\*\*\*] ist der thermische Komfort eines Menschen dann erreicht, wenn er sich im thermischen Gleichgewicht befindet, d.h. im Bereich einer komfortablen Hauttemperatur ist seine Wärmeabgabe gleich seiner Wärmeproduktion. Dies definiert einen stationären Zustand.

Ein Indiz für einen unkomfortablen stationären Zustand ist Schweißbildung. Z.B. bei einer hohen thermischen Belastung gibt der Körper auf diese Weise Wärme an die Umgebung ab. Aber auch speziell an den Kontaktflächen zwischen Insasse und Sitz sowie Insasse und Lenkrad ist die Gefahr der Schweißbildung groß.

Ebenfalls unkomfortabel ist zu trockene Luft. Dies kann zu einer unangenehmen Austrocknung der Bindehaut führen.

Besonders empfindlich für Abweichungen vom komfortablen stationären Zustand sind Kopf und Füße. Nach [FRA87] ist die korrekte Temperierung des Kopfbereichs besonders wichtig. Zum Schutz vor Erkältungen ist ein lang anhaltender kalter Luftstrom zu vermeiden. Luft, die in Kopfhöhe ausgeblasen wird, darf deshalb auch eine untere Temperaturschranke nicht unterschreiten. Generell ist die Belastung durch zu hohe Strömungsgeschwindigkeiten der Luft ein großes Problem. Die Vermeidung von Zugbelastungen sollte schon bei der Entwicklung berücksichtigt werden. Durch konstruktive Methoden kann auch ein zugfreies Klima mit einer unauffälligen Luftströmung erreicht werden. Dies ist aber nur auf Kosten von Platzangebot und Design im Innenraum möglich. Manchmal reicht es schon, die Zugbelastungen im Genick der vorderen und hinteren Insassen zu verhindern. Im Winter wird bewegte Luft angenehmer empfunden, wenn sie wärmer ist. Im Sommer sollte bewegte Luft kälter sein. Da auch eine automatische Klimatisierungsanlage nicht genau feststellen kann, welcher Zustand für den jeweiligen Passagier im Augenblick komfortabel wäre, muß zumindest die Innenraumtemperatur in weiten Bereichen manuell einstellbar sein.

Eine hohe Belastungsintensität durch die Klimatisierungsanlage z.B. aufgrund eines sehr kalten und zugigen Luftstroms sollte schnellstmöglich abgebaut werden, um den Komfort zu halten.

### **Innenraumklima**

Der Begriff Klima beschreibt nach [MEY93] die Gesamtheit der meteorologischen Erscheinungen, die den mittleren Zustand einer Atmosphäre kennzeichnen, und die Gesamtheit der Witterungen eines Zeitabschnitts innerhalb eines Jahres. Zur Beschreibung des klimatischen Zustands abgeschlossener Räume benutzt man eigentlich den Begriff Mesoklima. In dieser Arbeit wird mit Klima immer das Mesoklima des Fahrzeuginnenraums bezeichnet. Die Klimafaktoren, die den Zustand der Luft im Innenraum beschreiben, sind nach [HUC81]:

- Lufttemperatur
- Luftfeuchtigkeit
- Luftbewegung
- Strahlung
- Luftdruck
- Luftionisation
- Sauerstoffdruck
- elektrostatische Felder
- Radioaktivität

Auch im Innenraum eines Fahrzeugs herrscht ein bestimmtes Klima, das idealerweise unabhängig von den Umgebungsbedingungen für jeden Insassen individuell eingestellt werden kann. Lebensmöglichkeit ist unter irdischen Bedingungen nur eine Frage des technischen Aufwands. Das Wohlbefinden der Insassen kann man unter den erschwerten Bedingungen im Fahrzeuginnenraum speziell bei einer Mehrzonenklimatisierung nur bedingt oder mit sehr großem Aufwand erreichen. Dabei werden i.a. die Klimafaktoren Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftbewegung und Strahlung berücksichtigt.

### **Mensch-Maschine-Schnittstelle**

Nur eine Klimatisierungsanlage, die sich einfach bedienen läßt, wird auf Dauer akzeptiert. Es ist nicht sinnvoll, die Bedienung hardwarenah vorzusehen. Der Insasse ist nicht daran interessiert, spezielle Anlagengrößen einstellen zu können. Er möchte dem System nur mitteilen, daß es ihm im Augenblick zu kalt, zu warm oder zu zugig ist.

Es ist nicht auszuschließen, daß der Benutzer bei einer größeren Anzahl manueller Einstellmöglichkeiten Bedienfehler macht. Möchte er im Sommer z.B. eine kühlere Innenraumtemperatur, so wählt er eine kältere Temperaturstellung aus. Anschließend schließt er alle Luftaustrittsöffnungen, da er die entgegenströmende kühle Luft als noch unangenehmer empfindet. Ein Klimatisieren des Innenraums ist in diesem Fall nicht mehr möglich. Als Gegenmaßnahme muß verhindert werden, daß alle Luftaustrittsöffnungen gleichzeitig absperren sind. Ein Bedienteil sollte also möglichst so konstruiert sein, daß Fehler überhaupt nicht gemacht werden können.

Für den Fall, daß dies nicht möglich ist, sollte die Bedienung fehlertolerant sein. Fehler müssen nicht immer angezeigt werden oder zu Fehlfunktionen führen. Wenn ein Benutzer in ein völlig überhitztes Fahrzeug einsteigt, die Klimaanlage einschaltet und nach 10 Minuten ungeduldig nochmals an den Bedienelementen herumspielt, da sich die gewünschte Temperatur noch nicht eingestellt hat, ist dies ein Anzeichen für eine Fehlbedienung. Vielleicht hat er nur vergessen, das Gebläse einzuschalten. Ein fehlertolerantes Bedienteil erhöht in diesem Fall automatisch die Gebläseleistung.

#### **2.1.4 Kosten**

Ein komfortables Innenraumklima ist mit Kosten verbunden. In der Vergangenheit führte dies dazu, daß man beim Kauf des Fahrzeugs zwischen mehreren Varianten wählen konnte. Serienmäßig war in Europa fast ausschließlich eine Heiz- und Belüftungsanlage eingebaut. Eine

Klimaanlage konnte als Sonderzubehör ausgewählt werden. Immer häufiger wurden auch automatische Klimatisierungsanlagen angeboten.

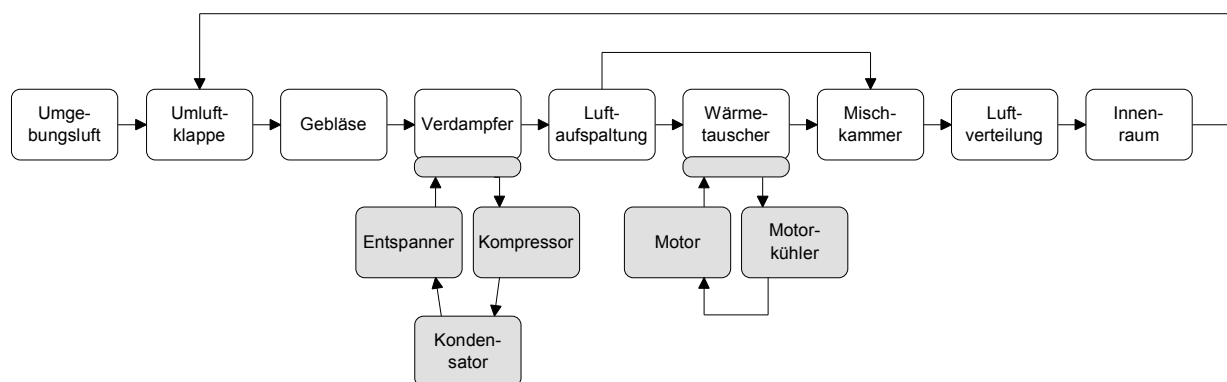
Der Trend führt eindeutig zu einer serienmäßigen Heiz-, Belüftungs- und Klimaanlage. Allerdings gibt es auch hier eine Vielzahl von Erweiterungsmöglichkeiten. Für große Fahrzeuge wird optional ein zweites zusätzliches Klimatisierungsgerät angeboten. Auch bei der Bedienung gibt es weiterhin Unterschiede. Neben der manuellen Klimatisierungsanlage werden automatische Systeme in unterschiedlichen Ausbaustufen angeboten.

Trotzdem ist es wünschenswert, auch automatische Heiz-, Belüftungs- und Klimaanlagen in der Serie mitzuliefern. Dies senkt zum einen die Kosten für Aktuatoren, Sensoren und die Klimaregelung und erhöht zum anderen den Fahrzeugkomfort. Dadurch wird das Fahrzeug für den Kunden bei einem angemessenen Preis noch attraktiver.

Bei der Unterscheidung in Entwicklungs- und Herstellungskosten stellt man fest, daß sich gerade bei der Klimaregelung ein hoher Entwicklungsaufwand bezahlt macht, wenn das System anschließend in großer Stückzahl verkauft wird, da die Herstellungskosten verhältnismäßig gering sind.

## 2.2 Funktionsweise

Das Klima im Innenraum eines Fahrzeugs wird wesentlich durch den Zustand der Luft bestimmt. Deshalb bietet es sich an, zur Klimatisierung des Fahrzeuginnenraums die zuströmende Luft zu verwenden. In *Abbildung 5: Schematischer Aufbau einer Heiz-, Belüftungs- und Klimaanlage* wird ein möglicher Weg der Luft durch die Klimatisierungsanlage und den Innenraum beschrieben.



**Abbildung 5: Schematischer Aufbau einer Heiz-, Belüftungs- und Klimaanlage**

Frischluft wird zusammen mit einem festgelegten Umluftanteil über ein Gebläse angesaugt. Am Verdampfer wird die Luft gekühlt. Ein Teil der Luft wird am Wärmetauscher erwärmt. In

der Mischkammer wird der warme mit dem kalten Luftstrom gemischt. Über unterschiedliche Öffnungen gelangt die klimatisierte Luft in den Innenraum.

Meistens werden integrierte Klimatisierungsgeräte eingebaut, die aus einem Heiz-, Belüftungs- und Klimagerät bestehen. Dies ermöglicht eine kompakte Bauweise. Das Klimatisierungsgerät wird in den meisten Fällen zwischen Armaturenbrett und Motorraum montiert. Da die meisten Fahrzeuge als Link- und Rechtslenker ausrüstbar sind, ist ein symmetrischer Aufbau des integrierten Klimatisierungsgeräts von Vorteil. Es müssen dann keine zwei unterschiedliche Varianten entwickelt werden.

### **Mehrzonenklimatisierung**

Da sich im Innenraum mehrere Insassen befinden können, ist es zweckmäßig, den Innenraum in mehrere Klimazonen zu unterteilen. Dies hat den Vorteil, daß das Klima abhängig von den individuellen physiologischen und intermediären Anforderungen eingestellt werden kann.

Die Mehrzonenklimatisierung erfordert aber getrennte Luftwege für die einzelnen Klimazonen, d.h. daß auch die Heiz-, Belüftungs- und Klimaanlage getrennte Luftwege besitzen muß. Dadurch vergrößert sich der benötigte Bauraum. Deshalb können bei einer Vierzonenklimatisierung zwei Klimatisierungsgeräte installiert werden. Das erste klimatisiert die beiden vorderen Zonen, das zweite die beiden hinteren. Aus [HIL] ist eine Klimatisierungsanlage bekannt, die mit einem einzigen Klimatisierungsgerät eine Vierzonenklimatisierung erlaubt. Kalte und warme Luft wird zentral vom Klimatisierungsgerät zur Verfügung gestellt. Für jede Zone existiert eine eigene Mischkammer, in der die gewünschte Temperatur erzeugt werden kann. In den Luftkanälen für den Fondraum ist ein zusätzliches Gebläse installiert, so daß auch der Luftmassenstrom relativ unabhängig einstellbar ist. Bei [GIA] wird ebenfalls nur ein Gerät eingesetzt. Dieses Klimatisierungsgerät mit getrennten Luftwegen für alle vier Zonen ist der Lösung mit zwei getrennten Klimatisierungsgeräten in den Punkten Gewicht, Platz und Kosten überlegen. Gegenüber einer einfachen Zweizonenklimatisierung wird bei [GIA] eine geringere Gebläseleistung als Vorteil angeführt. Es ist einfacher, die Zuluft über spezielle Luftkanäle in den Fondraum zu führen, als dazu den teilweise turbulenten Innenraum zu verwenden. Die im Fond gewünschte Temperatur kann dann auch wirklich erreicht werden. Außerdem stellt sich das gewünschte Klima viel schneller ein. Es wäre auch denkbar, eine Dreizonenklimatisierung einzurichten, bei der der Fond als eine Zone betrachtet wird. Dies spart einen Luftweg und somit Kosten. Wenn die Luftwege zu lang sind, kann man Heiz- und Klimagerät trennen.

## 2.3 Komponenten einer Klimatisierungsanlage

### 2.3.1 Umluftklappe und Luftansaugung

Die Frischluft wird an einer Stelle angesaugt, an der eine geringe Schadstoffbelastung durch vorausfahrende Fahrzeuge zu erwarten ist. Abhängig von der Aerodynamik des Fahrzeugs ist es günstig, die Luft bei stationärer Fahrt in einem Überdruckgebiet anzusaugen, um das Gebläse zu unterstützen. Deshalb wählt man meistens ein Gebiet auf der Kühlerhaube in der Nähe der Windschutzscheibe. Dort sind beide Bedingungen erfüllt.

Mit Hilfe der Umluftklappe wird das Verhältnis zwischen Frisch- und Umluft bestimmt. Die Umluft wird dem Innenraum entnommen.

Mit Hilfe von Filtersystemen können die Frischluft, die Umluft und die mit dem Verhältnis der Umluftklappe gemischte Luft gereinigt und aufbereitet werden. Je nach Anwendungsfall ergeben sich sinnvolle Anordnungen der Filter und Aufbereitungsanlagen. Die Frischluft enthält alle Verunreinigungen der Umgebung wie Geruch, Pollen, Schmutz, Staub, Abgase und andere Giftstoffe. Außerdem ist sie für die Sauerstoffzufuhr in den Innenraum zuständig. Die Umluft kann durch Geruch, Schmutz und Staub verunreinigt sein. Ihr Sauerstoffgehalt nimmt ab, wenn keine Frischluft zugeführt wird. Außerdem ist zu berücksichtigen, daß bei geöffneten Türen und Fenstern alle Verunreinigungen der Frischluft auch in der Umluft enthalten sind.

### 2.3.2 Gebläse

Das Gebläse steuert den Luftmassenstrom an den Luftaustrittsöffnungen. Abhängig von der Fahrgeschwindigkeit stellt sich auch ohne Gebläse i.a. aufgrund von Druckunterschieden zwischen Luftein- und -auslaß ein Luftmassenstrom ein. Ein elektrisch angetriebenes und abhängig von der Fahrgeschwindigkeit drehzahlgeregeltes Gebläse ermöglicht eine von der Fahrgeschwindigkeit unabhängige Wahl des Luftmassenstroms.

Da das Gebläse meistens nicht mit maximaler Leistung betrieben wird, kann es über einen Taktregler angesteuert werden. Dadurch sinkt seine Leistungsaufnahme und damit sein Energieverbrauch bei gleichem Luftmassenstrom.

### 2.3.3 Kälteanlage

Eine typische Kälteanlage besteht nach *Abbildung 5: Schematischer Aufbau einer Heiz-, Belüftungs- und Klimaanlage* aus Kompressor, Kondensator, Entspanner und Verdampfer. Das Kältemittel, meist R134a, liegt vor dem Kompressor gasförmig vor und wird am Kompressor auf einen hohen Druck gebracht. Dadurch erwärmt es sich. Am Kondensator wird dem Kältemittel Wärme entzogen und es wechselt dabei den Aggregatzustand. Anschließend wird das flüssige Kältemittel am Entspanner, einer Blende oder Düse, auf den Verdampfungsdruck expandiert. Schließlich kann es am Verdampfer wieder Wärme aus der durchströmenden Luft aufnehmen und es wechselt erneut den Aggregatzustand. Dies führt zur Kühlung der durchströmenden Luft.

### **Kompressorleistung**

Die Kompressorleistung beeinflusst unmittelbar die Leistung der Klimaanlage. Da der Kompressor meist direkt durch den Motor angetrieben wird, ist dadurch die Leistung der Klimaanlage abhängig von der Motordrehzahl. Dieser Abhängigkeit kann man auf zwei Arten begegnen. Zum einen kann man den Kompressor immer nur so lange einkuppeln, bis am Verdampfer die benötigte Kälte erzeugt wurde. Durch Ein- und Auskuppeln wird die erforderliche Kälteleistung erzeugt. Dadurch entstehen störende Geräusche und der schlagartige Belastungsabfall des Motors kann sich auch auf das Fahrverhalten negativ auswirken. Außerdem pendelt die Verdampferaustrittstemperatur ständig zwischen zwei Werten hin und her und erreicht nur im Mittel die gewünschte Temperatur. Eine andere Möglichkeit besteht darin, einen Kompressor mit variablem Hub zu verwenden. Die Kälteleistung ist dann unabhängig von der Motordrehzahl und es entstehen auch keine störenden Geräusche durch ständiges Ein- und Ausschalten. Die Motorlast ändert sich ebenfalls nicht mehr schlagartig und alle Bauteile werden weniger dynamisch beansprucht, was zu einer größeren Zuverlässigkeit führt.

Durch z.B. einen elektrischen Antrieb kann man ebenfalls die Kopplung der Motordrehzahl mit der Kälteleistung vermeiden. Die Klimaanlage ist dann auch bei ausgeschaltetem Motor einsatzbereit.

### **Reheat-Betrieb**

Wird der Verdampfer der Klimaanlage im Luftweg vor dem Heizungswärmetauscher der Heizanlage installiert, ist ein sogenannter Reheat-Betrieb möglich. Die Luft wird am Verdampfer so weit gekühlt, daß sie ausreichend entfeuchtet wird. Anschließend wird die Luft am Heizungswärmetauscher wieder auf eine angenehme Temperatur erwärmt.

### **2.3.4 Heizanlage**

Beim Betrieb eines Verbrennungsmotors entsteht normalerweise sehr viel Wärme, die zur Aufrechterhaltung einer bestimmten Betriebstemperatur abgeführt werden muß. Durch den Einsatz eines Wärmetauschers kann ein Teil dieser Energie zur Erwärmung der Innenraumzuluft genutzt werden. Es gibt zwei unterschiedliche Möglichkeiten, mit denen die Innenraumzuluft auf eine vorhersagbare Ausblastemperatur gebracht werden kann. Diese werden in *Abbildung 6: Luftmischprinzip* und *Abbildung 7: Heizmittelventilmethode* beschrieben.

### **Luftmischprinzip**

Beim Luftmischprinzip wird nur ein Teil der Luft über den Wärmetauscher geführt. Der andere strömt unverändert daran vorbei. Anschließend wird aus der kalten und warmen Luft über eine Luftmischklappe in einer Luftmischkammer ein homogener Luftstrom erzeugt. Die Lufttemperatur ist über die Luftmischklappe einstellbar.

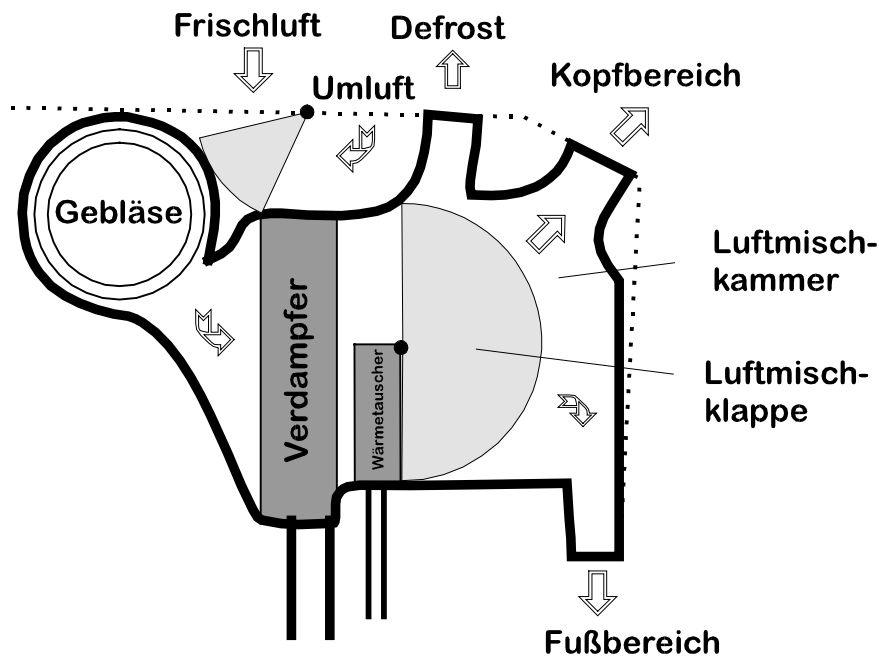


Abbildung 6: Luftmischprinzip

Das Motorkühlwasser fließt ständig durch den Wärmetauscher. Die Temperatur des Wärmetauschers ist also abhängig von der Kühlwassertemperatur.

Um zu verhindern, daß im Kühlbetrieb trotzdem noch warme Luft aus dem Wärmetauscher rückwärts in den kalten Luftstrom gelangt, kann vor dem Wärmetauscher eine zusätzliche Lufttrennklappe eingebaut werden. Im Kühlbetrieb ist der Wärmetauscher dann vorne und hinten geschlossen.

*Vorteile des Luftmischprinzips:*

- Schnelle Reaktion auf Änderungen
- Im Kühlbetrieb kann kalte Luft direkt in den Innenraum geführt werden

*Nachteile des Luftmischprinzips:*

- Homogene Luftmischung ist schwierig und benötigt viel Platz
- Nichtlinearer Zusammenhang zwischen Position der Luftmischklappe und Lufttemperatur

### Heizmittelventilmethode

Bei der Heizmittelventilmethode wird der gesamte Luftstrom über den Wärmetauscher geführt. Das Motorkühlwasser wird getaktet durch den Wärmetauscher geleitet. Die Menge des Kühlwassers die pro Zeiteinheit durch den Wärmetauscher fließt, bestimmt die Temperatur des Wärmetauscher und damit indirekt auch die Lufttemperatur. Eine Luftmischkammer ist nicht notwendig. Das nicht benötigte Kühlwasser wird am Wärmetauscher vorbeigeführt.



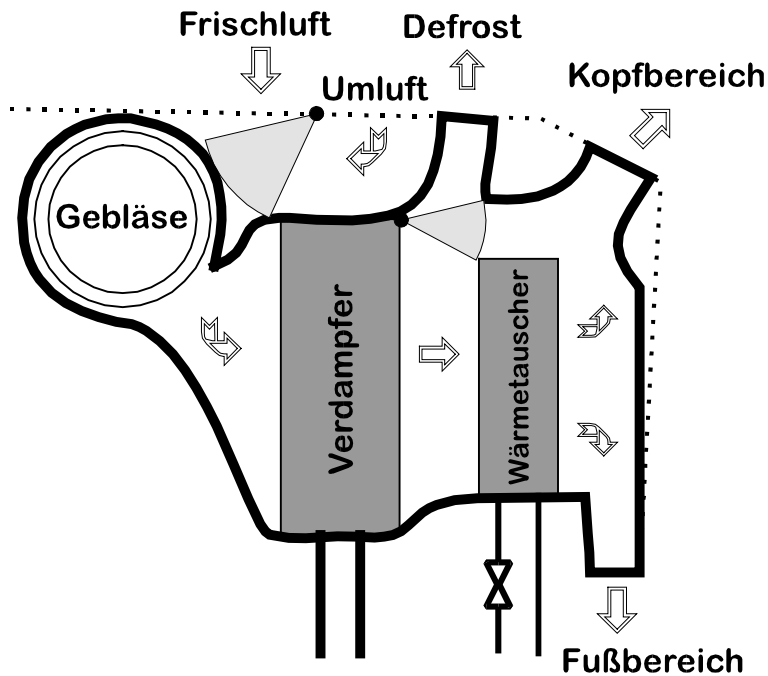


Abbildung 7: Heizmittelventilmethode

Über die Taktmagnetventile wird das Kühlmittel von unten nach oben in den Wärmetauscher geführt. Dadurch wird die tiefere Luft stärker erwärmt als die höhere. Dieser Effekt ermöglicht ohne großen Aufwand, daß die Ausblastemperatur an den Luftaustrittsöffnungen im Fußbereich immer etwas höher ist als an den Luftaustrittsöffnungen im Kopfbereich.

*Vorteile der Heizmittelventilmethode:*

- Im Heizbetrieb kann die Lufttemperatur sehr genau eingestellt werden
- Temperaturschichtung möglich

*Nachteil der Heizmittelventilmethode:*

- Langsame Reaktion auf Änderungen

### Motorkühlwasser

Die Hauptaufgabe des Kühlwassers ist nicht die Erwärmung der Innenraumzuluft, sondern die Kühlung des Motors auf eine optimale Betriebstemperatur. Das bedeutet auch, daß das Kühlwasser in der Regel nicht kälter als ca. 60 °C sein darf. Nach oben ist die Kühlwassertemperatur durch die Siedetemperatur begrenzt. Eine Unter- oder Überschreitung dieser Grenzen kann zur Beschädigung des Motors führen.

Die Kühlung des Kühlwassers übernimmt der Motorkühler. Die Heizanlage kann zuvor dem Kühlwasser einen Teil der Wärme entziehen, wenn dadurch die Mindesttemperatur von ca. 60 °C nicht unterschritten wird. Bei ausgeschaltetem Motor kann bei manchen Fahrzeugen die Motorrestwärme genutzt werden. Das Kühlwasser wird dann z.B. beim Warten an einem Bahnübergang weiterhin durch den Wärmetauscher gepumpt.

Eine zusätzliche Standheizung erwärmt das Kühlwasser beim Stand des Fahrzeugs. Dadurch wird zum einen die Betriebstemperatur des Kühlwassers vor dem Start des Motors erreicht und zum anderen kann die Innenraumzuluft im Wärmetauscher erwärmt werden.

Bei tiefen Außentemperaturen erzeugt der Motor im Leerlauf nicht unbedingt genug Wärme, um den Innenraum komfortabel zu heizen. Deshalb wird bei manchen Fahrzeugen die Leerlaufdrehzahl abhängig von der Außentemperatur angehoben.

### **Zusatzheizungen**

Speziell bei verbrauchsoptimierten Dieselmotoren tritt ebenfalls das Problem auf, daß zu wenig Wärme erzeugt wird, um komfortabel zu heizen. In diesen Fällen wird eine elektrische Zusatzheizung installiert, um auch bei niedrigen Außentemperaturen und geringer Motordrehzahl eine angenehme Temperatur im Innenraum zu erreichen.

### **Sicherheit**

Die Heizanlage muß so ausgelegt sein, daß auch bei einem Ausfall der elektrischen Energieversorgung eine Erwärmung des Innenraums möglich ist. So müssen z.B. bei der Heizmittelventilmethode die Taktmagnetventile stromlos offen sein.

Bei alternativen Antrieben, bei denen kein Kühlwasser zur Erwärmung der Innenraumzuluft zur Verfügung steht, sind u.a. elektrische Zuheizkonzepte notwendig, um z.B. die gesetzlichen Vorschriften zur Enteisung einzuhalten.

### **2.3.5 Luftverteilungsklappen und Luftkanäle**

Die klimatisierte Luft wird über Luftverteilungsklappen in verschiedene Luftkanäle gelenkt. Diese führen zu den Luftaustrittsöffnungen. Beim Entwurf der Luftkanäle können Simulationen helfen, die Luftführung möglichst ohne Druckverlust und geräuscharm zu gestalten.

In vielen Fahrzeugen ist nur eine Heiz- und Belüftungsanlage eingebaut. In diesem Fall ist es günstig, die Frischluft direkt auf die Mitteldüse zu lenken, da dadurch sämtliche Einflüsse der Heizanlage umgangen werden. Dies ist sinnvoll, da die Mitteldüse hauptsächlich zur Kühlung eingesetzt wird.

## **2.4 Fahrzeuginnenraum**

### **2.4.1 Luftaustrittsöffnungen**

Die folgenden Luftaustrittsöffnungen befinden sich in den meisten Personenfahrzeugen:

- Defrostdüsen an der Windschutzscheibe
- Mitteldüse im Armaturenbrett
- Seitendüsen links und rechts im Armaturenbrett
- Öffnungen im Fußbereich vorne
- Öffnungen im Fußbereich hinten
- Mitteldüse im Fond

Die folgenden Luftaustrittsöffnungen verbessern zusätzlich den Komfort im Innenraum:

- Öffnungen hinter der B-Säule links und rechts
- Sitzbelüftung
- Lenkradbelüftung

Alle Luftaustrittsöffnungen sind manuell absperrbar. Manchmal läßt sich die Temperatur einzelner Luftaustrittsöffnungen manuell einstellen. Dies ist meist an der Mitteldüse möglich, da hier sowieso ein Frischluftkanal ankommt, der sich in der Temperatur von der klimatisierten Luft unterscheidet. Ein zusätzlicher Kaltluftkanal in den Fond ermöglicht nach [FRA87] auch dort eine manuelle Temperatureinstellung. Je höher die Kaltluftdüsen angebracht werden, desto besser ist die Klimatisierung des Innenraums. Kaltluftdüsen sind hauptsächlich Mittel- und Seitendüsen.

Nach [CUR00] ermöglicht eine große Mitteldüse eine geringere Luftgeschwindigkeit. Somit lassen sich Zugscheinungen verhindern. Zusätzliche Luftaustrittsöffnungen hinter der B-Säule links und rechts sorgen für eine laminare Strömung und verhindern dadurch Zugscheinungen im Kopfbereich der vorderen Insassen. Ein zusätzlicher Kaltluftkanal zu den Öffnungen im Fußbereich verhindert zu warme Füße. Dies kann bei wasserseitigen Heizanlagen erforderlich sein, da dort aufgrund der Temperaturschichtung sehr hohe Fußraumtemperaturen auftreten können.

Eine große Mitteldüse vermindert zusätzlich die Geräuschentwicklung der Klimatisierungsanlage. Die Sitzbelüftung kann wie in der neuen S-Klasse von Mercedes-Benz an die Gebläseleistung gekoppelt sein.

## 2.4.2 Innenraum

Der Innenraum ist eine hochkomplexe inhomogene Regelstrecke mit vielen Nichtlinearitäten und Phänomenen. Deshalb ist eine Modellierung entweder viel zu ungenau oder ebenfalls

hochkompliziert. Der Innenraum besteht aus der in ihm enthaltenen Luft, der Inneneinrichtung, den Insassen und den Umschließungsflächen.

Es ist möglich, den durch die Umschließungsflächen begrenzten Raum in kleine Volumenelemente zu zerlegen. Anschließend kann sein Verhalten für bestimmte Rahmenbedingungen numerisch simuliert werden. Eine Simulation geht aber immer von festgelegten Rahmenbedingungen und somit von Einzelfällen aus.

Es existieren noch keine Ansätze, einen Fahrzeuginnenraum als verteiltes System zu modellieren, um anschließend geschlossene Lösungen zu erhalten. So könnten systematisch neue Möglichkeiten zur automatischen Klimatisierung entdeckt werden. Mit Hilfe einer geschlossenen Lösung kann das Gesamtverhalten eines Systems untersucht werden und man kann die Rahmenbedingungen entsprechend den gewonnenen Erkenntnissen festlegen.

Im folgenden wird der Innenraum als vorhandene Regelstrecke betrachtet. Eine Modellierung findet nur in ganz einfacher Form bei einigen Regelungskonzepten in *Kapitel 5 (Neue Regelungskonzepte)* statt.

### 2.4.3 Luftauslaßöffnungen

Luft wird aus dem Innenraum über einen Luftkanal zur eigentlichen Luftauslaßöffnung am Fahrzeug geführt. Diese liegt im Gleichgewichts- oder Unterdruckgebiet. Der Bereich unter der hinteren Stoßstange bietet sich dafür an. Auf jeden Fall ist es günstig, eine Luftauslaßöffnung im hinteren Bereich des Fahrzeugs zu wählen. Dadurch ist allein durch die Fahrgeschwindigkeit eine Durchströmung des Innenraums gewährleistet, weil die Luft im vorderen Bereich in einem Überdruckgebiet angesaugt wird.

Außerdem wird im Innenraum entweder durch entsprechende Wahl der Luftaustritts- und Luftauslaßöffnungen oder durch ein zusätzliches Gebläse für einen ständigen Überdruck gegenüber der Umgebung gesorgt. Dies verhindert das Eindringen von Schmutz, Staub und sonstigen Verunreinigungen. Ein Rückschlagventil im Luftkanal zwischen Innenraum und Luftauslaßöffnung verhindert zum einen ebenfalls das Eindringen von Verunreinigungen und zum anderen lästige Zugscheinungen, wenn die Scheiben oder das Schiebedach geöffnet sind.

Die Luftkanäle beginnen im Innenraum sinnvoller Weise auf der Heckablagefläche und nicht unter der Rückbank. Dadurch wird ein Hitzestau unterhalb der Heckscheibe vermieden.

### 2.4.4 Bedienteil

Das Bedienteil ermöglicht mit seinen Bedienelementen die manuelle Vorgabe von Parametern. Bedienelemente müssen griffgünstig sein und können z.B. als Schalter, Drehknöpfe oder Schiebeleisten ausgeführt sein (siehe *Abbildung 8: Typisches Bedienteil einer automatischen Klimatisierungsanlage*).



**Abbildung 8:** Typisches Bedienteil einer automatischen Klimatisierungsanlage

Folgende Einstellungen können normalerweise manuell vorgegeben werden:

- Innenraumtemperatur
- Gebläsestärke
- Luftverteilung (Fußbereich, Kopfbereich, Defrost)
- Umluftschalter
- Economy-Schalter zum Ein- und Ausschalten des Kompressors
- Motorrestwärmenutzung
- Automatikbetrieb Ein- und Ausschalten

In [CAR92] ist ein Bedienteil beschrieben, das anstelle der Innenraumtemperatureinstellung nur eine Wärmer-Kälter-Taste besitzt. Ein Normalzustand kann um  $\pm 7$  K verändert werden. Dies ist sinnvoll, da der Insasse sein Unbehagen nicht durch „Ich möchte eine Temperatur von 23 °C.“ ausdrückt. Er wird das, was er möchte, immer auf den aktuellen Zustand beziehen. Seine Aussage wäre also z.B.: „Es ist mit etwas zu heiß.“

Die Luftverteilung kann in vorgegebenen Schritten zwischen Fuß- und Kopfbereich eingestellt werden. Jederzeit muß ein Umschalten auf reinen Defrost-Betrieb möglich sein.

Um z.B. die Defrost-Taste blitzschnell zu finden, müssen die Bedienelemente verständlich, eindeutig und eventuell schon bekannt sein. Speziell bei einer Mehrzonenklimatisierung stößt man hier an die Grenzen der Bedienbarkeit. Nur durch eine eindeutige Links/Rechts-Trennung und ein eigenes Bedienteil für ein eventuell vorhandenes Klimatisierungsgerät im Fond bleibt die Klimatisierungsanlage bedienbar.

Im Automatikbetrieb ist nur eine Auswahl der Einstellungen wählbar. Die Forderung, alles müsse manuell einstellbar bleiben, ist bei der obigen Anzahl von Einstellungsmöglichkeiten gerechtfertigt, so lange sich die Automatik noch nicht individuell an den Insassen anpassen

kann. Da die Heiz-, Belüftungs- und Klimaanlage aber immer komplexer wird, müssen neue Bedienkonzepte gefunden werden, die mit derselben Anzahl von Bedienelementen eine höhere Funktionalität verwalten. Auf manche Funktionen muß dann im manuellen Betrieb einfach verzichtet werden. Es sollten eher weniger als mehr Bedienelemente werden.

Die Bedienelemente müssen zu jeder Tages- und Nachtzeit erkennbar und die Anzeige gut lesbar sein. Dies kann durch ein Umschalten von Tag- auf Nachtbetrieb oder eine automatische Anpassung der Anzeigehelligkeit geschehen.

Das Bedienteil ist die einzige Dialogkomponente zwischen Mensch und Maschine. Wenn sich ein Insasse über eine Klimatisierungsanlage beklagt, kann das auch daran liegen, daß er Probleme damit hat, dem System seine Wünsche mitzuteilen. Wenn eine Eingabe gemacht wird, auf die keine direkte Antwort gegeben wird, führt dies zu einer unnötigen Unsicherheit des Benutzers. Die möglichen Dialogschritte zwischen Mensch und Maschine müssen eindeutig festgelegt und für beide Seiten leicht verständlich sein.

Die Einstellungen des Bedienteils sollten auch bei längerem Stillstand des Fahrzeugs im Speicher gehalten werden, so daß sie bei der nächsten Fahrt sofort wieder verfügbar sind.

Eine einfache und sinnvolle Ergänzung des Bedienteils ist ein Anzeigeelement für die Außentemperatur. Dies ist z.B. im Winter wichtig, um den Zustand der Straße vorhersagen zu können. So ist bei 0 °C Außentemperatur und nasser Fahrbahn eine verminderte Fahrgeschwindigkeit und größere Vorsicht sinnvoll.

## 3. Automatische Klimaregelung

*In diesem Kapitel werden Regelungskonzepte vorgestellt, die sich in modernen Fahrzeugen befinden. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Regelung einer vorgegebenen Innenraumtemperatur.*

### 3.1 Vorteile

#### 3.1.1 Komfort

Da der Mensch immer erst dann reagiert, wenn er die Auswirkungen einer Klimaverschlechterung spürt, schwingt das manuell geregelte System wie in [ROH79] beschrieben weit über. Eine automatische Klimaregelung kann frühzeitiger reagieren, da die meisten Sensoren schon kleinste Abweichungen vom Idealzustand registrieren.

Zudem kann ein automatisches System sehr viele Regelgrößen berücksichtigen. Problemlos kann die Innenraumtemperatur an mehreren Stellen gleichzeitig geregelt werden. Außerdem existieren Regelungskonzepte, bei denen eine automatische Regelung Vorhersagen über den zukünftigen Klimazustand treffen kann. Ein solches System ist dem Menschen bei der Klimaregelung weit überlegen. Der Mensch muß nur noch ganz selten eingreifen. Er kann sich auf wichtigere Dinge wie z.B. den Verkehr konzentrieren.

Das Innenraumklima ist an die Aerodynamik des Fahrzeugs gekoppelt, da Umströmung und Durchströmung voneinander abhängen. Mit Hilfsmitteln wie einem drehzahlgeregelten Gebläse für den Luftmassenstrom läßt sich diese Kopplung regelungstechnisch beseitigen.

#### 3.1.2 Sicherheit

Bei einer Fahrt unter wechselnden Witterungsbedingungen variieren Sonneneinstrahlung und Außentemperatur. Der Fahrer wäre bei einer manuellen Klimatisierungsanlage gezwungen, den Sollwert für die Innenraumtemperatur ständig anzupassen. Zum einen ist das auf Dauer recht lästig, zum andern geht das auch zu Lasten der Verkehrssicherheit. Eine automatische Klimaregelung nimmt ihm diese Aufgabe ab.

Da die Anzahl der manuellen Einstellmöglichkeiten bei einer automatischen Klimaregelung stark eingeschränkt ist, reduziert ein solches System auch Fehlbedienungen der Benutzer.

Unter extremen Bedingungen kann eine ausreichende Klimatisierung des Innenraums manchmal nur dann erfolgen, wenn genaue Regeln eingehalten werden. Eine automatische Klimaregelung schaltet dazu meistens bis zum Erreichen des Betriebszustandes in einen Steuerbetrieb.

Im Falle eines Ausfalls der Regelung muß sich das System in einem Zustand befinden, in dem die maximale Kühl- und Heizleistung immer noch zur Verfügung steht.

### 3.1.3 Umwelt

Bei einer automatischen Klimaregelung werden sehr viele Betriebsparameter der Heiz-, Belüftungs- und Klimaanlage berücksichtigt. Dies kann nicht nur zur Steigerung des Komforts genutzt werden. Das System läßt sich auch durch bedachten und sinnvollen Einsatz der vorhandenen Wärme energieoptimal betreiben.

### 3.1.4 Kosten

Die Kosten können durch die Benutzung von Standardkomponenten reduziert werden. Regelungen lassen sich heutzutage auf sogenannten Embedded-Chips realisieren. Dies sind Minirechner, die sich einfach programmieren lassen.

Bei der Entwicklung der benötigten Software können ebenfalls Kosten gespart werden. Die Benutzung einer einheitlichen Entwicklungsumgebung für Spezifikation, Entwurf, Erstellung, Test und Integration verhindert Kompatibilitätsprobleme und reduziert so die benötigte Zeit.

## 3.2 Komponenten des Regelkreises

### 3.2.1 Regelstrecke

Die Regelstrecke ist der Innenraum des Fahrzeugs. Eigentlich wäre es sinnvoll, den Insassen als Regelstrecke zu betrachten. Dies ist aber nicht möglich, da zum einen nur die Innenraumtemperatur und nicht die Temperatur unmittelbar am Insassen gemessen wird und zum anderen kein handhabbares Modell für den Übergang der Innenraumtemperatur zur Temperatur in der unmittelbaren Umgebung des Insassen existiert.

*Abbildung 9: Regelstrecke Innenraum* zeigt einen Regelkreis für eine reine Innenraumtemperaturregelung. *Abbildung 10: Regelstrecke Insasse* beschreibt die Möglichkeit einer modellgestützten Regelung des Komforts eines Insassen. Das Übertragungsglied Innenraum-Insasse enthält ein Modell, das mit Hilfe der meßbaren Zustände im Innenraum den Komfort des Insassen beobachtet.



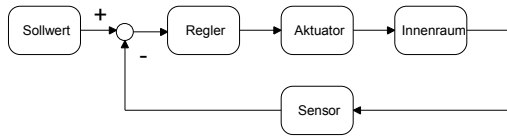


Abbildung 9: Regelstrecke Innenraum

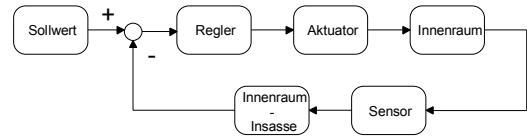


Abbildung 10: Regelstrecke Insasse

Der Innenraum ist aufgrund der veränderlichen Sonneneinstrahlung, des begrenzten Volumens, der thermischen Trägheit der Inneneinrichtung und des ständig benötigten Luftmassenstroms eine hochkomplexe inhomogene Regelstrecke (siehe *Abbildung 11: Darstellung der Temperaturverteilung als Horizontalschnitt des Innenraums im Kopfbereich (Ergebnis der Simulation eines typischen Lastfalls mit TEKOS)*).

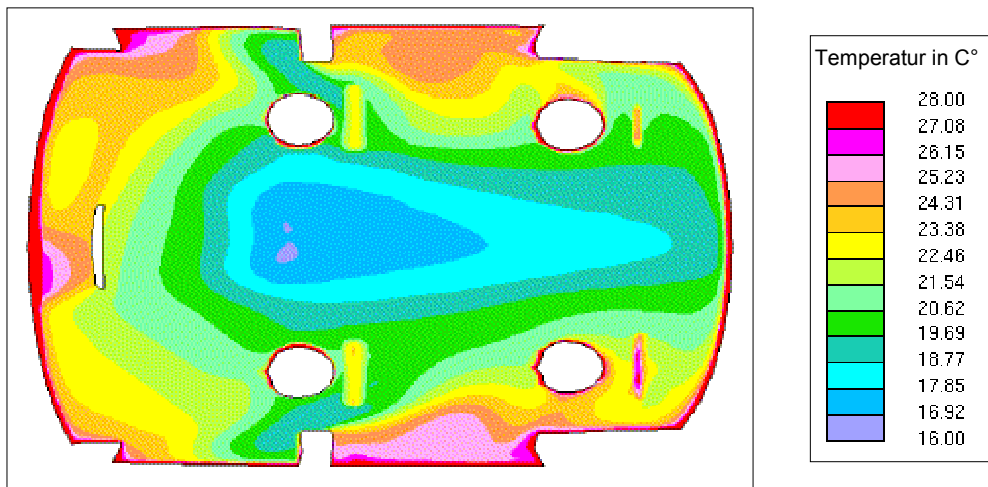


Abbildung 11: Darstellung der Temperaturverteilung als Horizontalschnitt des Innenraums im Kopfbereich (Ergebnis der Simulation eines typischen Lastfalls mit TEKOS<sup>1</sup>)

Die ständig wechselnden Bedingungen führen dazu, daß sich das System nie wirklich stationär verhalten kann. Der geringe Abstand der Insassen zu den Scheiben bedingt, daß auch Änderungen außerhalb des Fahrzeugs den Komfort der Insassen beeinflussen.

<sup>1</sup> TEKOS ... Rechenverfahren zur Ermittlung der Strömungs- und Temperaturverteilung, der Bauteiltemperaturen in Fahrzeugkabinen und des thermischen Komforts der Insassen

### 3.2.2 Regelgrößen

Der Auswahl der Regelgrößen kommt besonders große Bedeutung zu. In Frage kommen nicht nur physikalische Größen, die das Klima im Innenraum beschreiben, sondern vermehrt auch Kenngrößen, die weitere Klimaaspekte in den Regelvorgang einbringen. Trotzdem bleibt die Innenraumtemperatur die wichtigste Regelgröße.

Nach [BOE80] werden folgende Regelgrößen gewählt:

- Innenraumtemperatur
- Luftmassenstrom im Innenraum

Wird die Innenraumtemperatur an mehreren Stellen gemessen, kann auch eine Innenraumtemperaturverteilung geregelt werden. Dies ist speziell bei einer Mehrzonenklimatisierung erforderlich. Die Verteilung der Innenraumtemperatur kann z.B. durch Fahrer- und Beifahrerseite, Front- und Fondbereich, Tür- und Bodenflächen erfaßt werden.

Bei [HAR] existieren neben den oben aufgeführten Regelgrößen eines ersten Regelkreises weitere Hilfsregelkreise. Die Umluft- und die Luftmischklappe werden in ihrer Lage geregelt. Außerdem werden ein drehzahlgeregeltes Gebläse und ein leistungsgeregelter Kompressor eingesetzt. In [BRA89] wird auch die Luftfeuchtigkeit geregelt.

### 3.2.3 Sollwerte

Die Sollwerte für die oben aufgeführten Regelgrößen können am Bedienteil oder direkt an den Luftaustrittsöffnungen vorgegeben werden. Die Elektronik des Bedienteils korrigiert einige dieser Vorgaben und bildet daraus die eigentlichen Sollwerte für die automatische Klimaregelung. So wird z.B. der Innenraumtemperatursollwert an die Außentemperatur und die Sonneneinstrahlung angepaßt.

### 3.2.4 Störgrößen

Die Störgrößen beeinflussen die Funktionstüchtigkeit des Reglers, die Genauigkeit der Aktuatoren, natürlich die Regelstrecke Innenraum, aber auch die Genauigkeit der Sensoren.

- Fahrgeschwindigkeit
- Außentemperatur
- Kühlwassertemperatur
- Luftfeuchtigkeit
- Sonneneinstrahlung
- Abwärme des Motors und der Abgasanlage
- Strahlungswärme des Fahrbahnbelags

- Insassenanzahl
- spezielle Phänomene wie Ein- und Aussteigen

Die Fahrgeschwindigkeit wirkt sich nichtlinear auf den Luftmassenstrom aus. Der Unterschied zwischen der Außen- und Innenraumtemperatur führt zu einem Wärmestrom über die Umschließungsflächen. Die Luftfeuchtigkeit beeinflusst ebenfalls das Empfinden der Insassen.

Bei einigen Regelungen wird die Kühlwassertemperatur gemessen. Ihr Einfluß kann somit kompensiert werden.

Durch die Sonneneinstrahlung, die Abwärme des Motors und der Abgasanlage, die Strahlungswärme des Fahrbahnbelags und die Körperwärme der Insassen wird der Innenraum zusätzlich aufgeheizt.

Durch das Ein- und Aussteigen von Personen wird Luft mit der Umgebung ausgetauscht und die Anzahl der Insassen kann sich verändern. Das Innenraumklima kann sich dadurch so verschlechtern, daß die automatische Klimaregelung gezwungen ist, in den Steuerbetrieb umzuschalten.

### 3.2.5 Sensoren

#### Temperatursensoren

Die Innenraum- und Außentemperaturfühler können z.B. NTC-Temperatursensoren sein. Bei [BOE80] wird eine einfache Innenraumtemperaturregelung beschrieben, die den Sollwert in Abhängigkeit der Außentemperatur anpaßt. Der Innenraumtemperatursensor ist meist ins Bedienteil integriert. Immer öfter wird zusätzlich ein zweiter Sensor im Rückspiegel eingebaut. Über ein Miniaturgebläse wird Luft aus dem Innenraum angesaugt. Dies stellt sicher, daß nicht versehentlich die Temperatur der Begrenzungsflächen gemessen wird.

Luftaustrittstemperatursensoren sind deshalb schwierig, da sie entweder an den Luftverteilungsklappen im Klimatisierungsgerät oder direkt an den Luftaustrittsöffnungen installiert werden müssen. Speziell an der Mitteldüse ist ein Luftaustrittstemperatursensor sinnvoll. Dort kann die Luftaustrittstemperatur über den zusätzlichen Frisch- oder Kaltluftkanal nochmals variiert werden.

Die Kühlwassertemperatur wird bei einer wasserseitigen Heizanlage für die Dosierung des durch den Wärmetauscher fließenden Kühlwassers benötigt. Bei einer luftseitigen Heizanlage kann sie als Störgröße berücksichtigt werden. Werden unterlagerte Regelkreise zur Temperierung der Heizgeräte eingesetzt, müssen auch die Temperaturen an den Heizgeräten gemessen werden.

Die Verdampfertemperatur wird nicht nur benötigt, um die mittlere Kälteleistung der Klimaanlage zu regeln. Sie wird hauptsächlich gemessen, um eine Vereisung des Verdampfers zu verhindern. Wird die Luft sehr stark gekühlt, kondensiert ein Teil des in ihr enthaltenen Wasserdampfs am Verdampfer. Wird die Luft zu stark gekühlt, verliert die Luft zum einen zu viel

Wasser und wird sehr trocken, zum anderen gefriert das am Verdampfer kondensierte Wasser. Dies kann zur Zerstörung der Klimaanlage führen. Die Verdampferemperatur darf deshalb nicht unter 0 °C sinken. Die Verdampferemperatur ist abhängig von der Kompressorleistung, der Fahrgeschwindigkeit und der Luftfeuchtigkeit. Durch ein frühzeitiges Ausschalten des Kompressors kann eine Vereisung verhindert werden.

### **Sonnensensoren**

Bei [CAR92] wird ein Sonnensensor eingesetzt. Im Prinzip ist es ein Infrarotsensor, der die Wärme und damit die Strahlungsintensität der Sonne mißt. Er wird hinter der Windschutzscheibe im Spiegelfuß oder auf dem Armaturenbrett montiert.

Man kann die Daten des Sonnensensors zur Regelung der Heiz-, Belüftungs- und Kühlleistung einsetzen. In der neuen S-Klasse von Mercedes-Benz wird nach [HAN00] die Gebläseleistung unter anderem mit Hilfe eines Sonnensensors geregelt.

### **Taupunktsensoren**

Ein Taupunktsensor in der Frischluftansaugung wird als Referenz für den Taupunkt auf der Außenseite der Windschutzscheibe benutzt. Normalerweise werden unter Sommerbedingungen die Defrostdüsen geschlossen, da durch die kalte Luftaustrittstemperatur ein Beschlag auf der Außenseite der Windschutzscheibe entstehen kann. Die Daten des Taupunktsensors werden dazu benutzt, die Luft nur so stark aus den Defrostdüsen ausströmen zu lassen, daß die Windschutzscheibentemperatur nicht unter den Taupunkt der Umgebungsluft sinkt.

### **Schadgassensoren**

Die Belastung der Luft mit CO und NO<sub>x</sub> kann mit einem Schadgassensor gemessen werden. In Abhängigkeit von der Änderung der Schadgasbelastung wird auf Umluftbetrieb umgeschaltet.

### **Drucksensoren**

In [ORL88] wird der Druck nach dem Kompressor als Referenzgröße für die Luftfeuchtigkeit benutzt. Da Drucksensoren in jeder Ausführung aufgrund der großen Stückzahl kostengünstig zu haben sind, ist dies eine billige Möglichkeit, zu trockene Luft zu verhindern.

### **Sensordaten aus anderen Systemen**

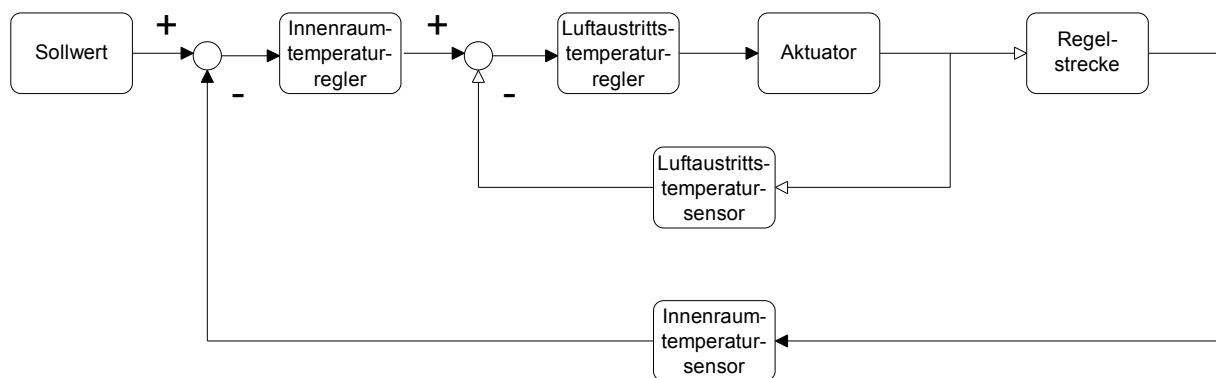
Zur Regelung des Luftmassenstroms muß die Fahrgeschwindigkeit bekannt sein. Diese kann am Tachometer abgegriffen oder auf dem CAN-Bus zur Verfügung gestellt werden.

### **3.2.6 Regler**

Das zentrale Element der Klimaregelung ist der Regler. Er vergleicht die Sollwerte mit den Istwerten der Sensoren und generiert daraus ein Signal, das die Aktuatoren dazu veranlaßt, die Stellgrößen der Regelung zu verändern. Die Strecke reagiert entsprechend ihrer Dynamik auf

diesen Stelleingriff und verändert dadurch die Regelgrößen. Ziel der Regelung ist es, die Regelgrößen den Sollwerten nachzuführen.

Bei der Fahrzeugklimatisierung werden hauptsächlich P-Regler und PI-Regler eingesetzt. Ein P-Regler liefert ein Signal, das der Regelabweichung proportional ist. Eine große Regelabweichung hat also auch einen großen Stelleingriff zur Folge. Um bleibende Regelabweichungen zu verhindern, wird ein I-Anteil hinzugezogen. Der Regler kann den Sollwert dann tatsächlich erreichen. D-Anteile, die auf schnelle Änderungen reagieren, sind bei den großen Zeitkonstanten und Totzeiten der Fahrzeugklimatisierung nicht sinnvoll. Bei zu großen Regelabweichungen wird die Regelung ausgesetzt und eine Steuerung bringt die Regelgrößen wieder in den Bereich der Sollwerte. Anschließend wird wieder auf die Regelung umgeschaltet. Der klassische Regelkreis aus *Abbildung 9: Regelstrecke Innenraum* wird meist durch eine kompliziertere Verschachtelung von P-Reglern und PI-Reglern ersetzt. Der Trend geht aber wieder weg vom PI-Regler und zurück zum P-Regler. Das liegt daran, daß ein PI-Regler z.B. bei geöffneten Scheiben versuchen würde, die Luftaustrittstemperatur ständig nachzuführen. Wird das Fenster wieder geschlossen, braucht er recht lange, um die aufgelaufene Stellgröße langsam wieder abzubauen. Ein Anti-Windup-Reset hält den Regler im Falle eines geöffneten Fensters fest. Für jeden Fall, in dem der PI-Regler davonlaufen kann, muß eine solche Blockade installiert werden. Bei verschachtelten Reglerstrukturen ist dies sehr aufwendig und ab einem gewissen Punkt nicht mehr sinnvoll. Man nimmt dann gerne den Nachteil des P-Reglers in Kauf, daß die Temperatur nur beinahe erreicht werden kann. Die Insassen nehmen diese geringe bleibende Regelabweichung sowieso nicht wahr.

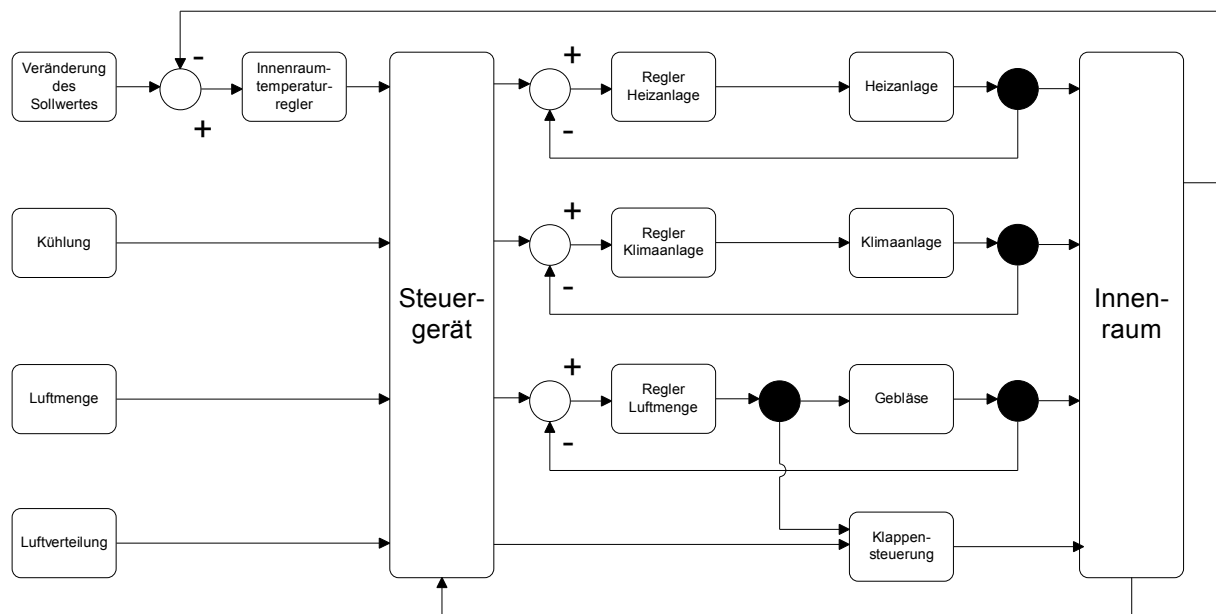


**Abbildung 12: Innenraumtemperaturregler mit unterlagertem Regelkreis für die Luftaustrittstemperatur**

*Abbildung 12: Innenraumtemperaturregler mit unterlagertem Regelkreis für die Luftaustrittstemperatur* zeigt einen kaskadierten, d.h. verschachtelten Regler, der die Luftaustrittstemperatur sehr genau halten kann. Die Innenraumtemperaturregelung ist somit relativ unabhängig von Schwankungen der Aktuatoren der Heiz- und Klimaanlage.

Die Parameter der Regelung werden im Heizbetrieb anders gewählt als im Kühlbetrieb. Auch das Verhalten der zeitweisen Steuerung unterscheidet sich im Heizbetrieb von dem des Kühlbetriebs.

Der automatischen Klimaregelung können entweder direkt die Signale der Sensoren zugeführt werden oder schon aufbereitete Daten. Bei Minimallösungen ist die direkte Übertragung der Signale besser. Bei komplexen Systemen wie einem Fahrzeug können die Daten in Informationen gewandelt und auf einem Bussystem mit gemeinsamem Zugriff (z.B. CAN-Bus) zur Verfügung gestellt werden. Der Regler kann dann standardisiert sein. Im äußersten Fall ist eine FUZZY-Regelung denkbar, die ohne Änderung von Fahrzeug auf Fahrzeug übertragen werden kann, wenn Fahrzeugdaten in einem vorgegebenen Speicher niedergelegt sind.



**Abbildung 13: Innenraumtemperaturregelung mit Steuergerät nach [BOE80]**

Da die Klimaregelung mehrere Stellgrößen besitzt, handelt es sich streng genommen um eine Mehrgrößenregelung. Dieses Problem umgeht man, indem man in den äußeren Innenraumtemperaturregelkreis ein Steuergerät einbaut, das die Sollwerte für unterlagerte Regelkreise vorgibt (siehe *Abbildung 13: Innenraumtemperaturregelung mit Steuergerät nach [BOE80]*). Die Innenraumtemperatur taucht in den unterlagerten Regelkreisen nicht mehr explizit als Regelgröße auf. Die unterlagerten Regelkreise besitzen genau eine Regel- und eine Stellgröße. Das Mehrgrößenproblem wurde also mit einem Steuergerät auf mehrere Standardregelkreise verteilt.

Während die Regler früher durch analoge Schaltungen realisiert wurden, benutzt man heute ausschließlich Mikroprozessoren. Der Regler wird in einer höheren Programmiersprache ent-

worfen. Das fertige Reglerprogramm wird dem Mikroprozessor in einem Speicherbaustein zur Verfügung gestellt.

### 3.2.7 Aktuatoren

Als Aktuatoren werden alle Geräte bezeichnet, die in Abhängigkeit eines Reglersignals den Innenraum beeinflussen können. In den *Kapiteln 2.3 (Komponenten einer Klimatisierungsanlage) und 2.4 (Fahrzeuginnenraum)* wurde die Hardware einer Heiz-, Belüftungs- und Klimaanlage beschrieben. Die folgenden Komponenten kann man zu den Aktuatoren zählen:

- Umluftklappe
- Gebläse
- Kälteanlage
- Heizanlage inkl. Lufttrenn- und Luftmischklappe
- Luftverteilungsklappen

Diese Komponenten sind aus verschiedenen Bauteilen aufgebaut. So besteht ein Gebläse unter anderem aus einem Gehäuse und einem Rotationsantrieb. Das Gehäuse hat nur passive Aufgaben. Es beherbergt den Rotationsantrieb. Dieser ist das eigentliche Stellglied. *Tabelle 3: Stellglieder und ihre Anwendung* listet weitere Stellglieder einer Klimatisierungsanlage auf:

Art der Stellglieder	Bezeichnung	Anwendung
Elektrisch	Dehnstoffelemente	Luftklappen
Elektromagnetisch	Magnetventile	Wasserseitige Heizanlagen
Elektromechanisch	Schrittmotoren	Luftklappen
	Rotationsantriebe	Gebläse, Wasserpumpen
Pneumatisch	Unterdruckdosen	Luftklappen

**Tabelle 3: Stellglieder und ihre Anwendung**

Unterdruckdosen können eine Luftklappe schließen oder öffnen. Man kann sie so konstruieren, daß die Luftklappe bei Ausfall der Luftversorgung geöffnet ist. Für die Luft ist nur eine Zuleitung erforderlich. Die Abluft wird einfach an die Umgebung abgegeben. Leider können Unterdruckdosen nur geringe Kräfte und Momente aufnehmen.

Schrittmotoren ermöglichen eine Vielzahl unterschiedlicher Öffnungsweiten. Beim Ausfall der Stromversorgung bleiben sie in ihrer aktuellen Stellung. Sie können große Kräfte und Momente aufnehmen.

Bei einer manuellen Klimatisierungsanlage mit luftseitiger Heizanlage kann die Stellung eines Temperaturschiebers am Bedienteil direkt mechanisch in eine Verstellung der Luftmischklappe umgesetzt werden. Bei einer automatischen Klimaregelung wird dafür auf jeden Fall ein Aktuator benötigt. Dazu werden üblicherweise Schrittmotoren eingesetzt. Die Luftaustrittstemperatur hängt in beiden Fällen nichtlinear von der Stellung der Luftmischklappe ab.

Eine weitere nichtlineare Beziehung liegt zwischen Luftmassenstrom und Gebläseleistung vor. Die Temperatur am Wärmetauscher hängt ebenfalls nichtlinear von der Kühlmitteltemperatur ab. Werden die Stellungen der Aktuatoren sprunghaft verändert, so wirken sich diese Nichtlinearitäten besonders stark aus und es können unvorhergesehene Effekte auftreten. Möchte man z.B. den stark unterkühlten Innenraum eines Fahrzeugs im Winter nach längerem Stillstand heizen, so wird möglichst viel Kühlwasser durch den Wärmetauscher gepumpt oder die Luftmischklappe auf maximales Heizen gestellt. Außerdem wird die höchste Gebläsestufe ausgewählt. Während das Gebläse relativ zügig auf diesen Sprung reagiert, dauert es einige Zeit, bis das Kühlwasser vom Motor erwärmt wird und diese Wärme am Wärmetauscher an die Luft abgegeben werden kann. Kurzzeitig wird der Innenraum also gekühlt statt geheizt. Derartige Nichtlinearitäten werden unterdrückt, indem man bei niedriger Kühlmitteltemperatur und niedriger Innenraumtemperatur eine Steuerung einschaltet, die erst einmal eine gewisse Zeit wartet, bis sie langsam die Gebläseleistung erhöht. Dies kann aber nur dann geschehen, wenn die Nichtlinearitäten im Vorfeld z.B. durch Versuche oder eine Modellierung der Klimatisierungsanlage inkl. Aktuatoren erkannt wurden.

### 3.2.8 Stellgrößen

Die Wirkungsweise der Aktuatoren wird durch die Stellgrößen beschrieben. Bei einer Luftmischklappe ist das die Position als Winkelangabe, bei einem Gebläse der erzeugte Luftmassenstrom und bei einer Wasserpumpe die Fördermenge pro Zeiteinheit. Bei der Klimatisierung eines Fahrzeuginnenraums kommen nach [BOE80] folgende Stellgrößen in Frage:

- Umluftanteil
- Luftverteilung
- Luftmassenstrom an den Luftaustrittsöffnungen
- Luftaustrittstemperatur
- Luftausströmrichtung



## 3.3 Anforderungen

### 3.3.1 Klimaregelung

Die Aufgabe einer automatischen Klimaregelung ist das schnelle Erreichen und anschließende Konstanthalten einer vorgewählten Innenraumtemperatur unabhängig vom Fahrzustand und den Umgebungsbedingungen. Weitere wichtige Anforderungen sind die Enteisung und die Beschlagfreihaltung der Scheiben. Die Regelung sollte aber mit möglichst geringem Aufwand, d.h. mit möglichst wenig Aktuatoren und Sensoren und mit einfachen Regelungskonzepten, erfolgen.

Ein großes Problem bei einer automatischen Klimatisierung eines Fahrzeuginnenraums ist das Auftreten von langsamen und schnellen Änderungen. Während die Sensoren und Aktuatoren relativ schnell auf Änderungen reagieren können, ist der Innenraum thermisch sehr träge und z.B. durch die Luftkanäle werden zusätzliche Totzeiten verursacht. Auch in der nichtlinearen Dynamik sind derartige Probleme bekannt und es existieren Lösungsverfahren wie z.B. die singuläre Störungsrechnung. Dabei werden die schnellen Bewegungen von den langsamen getrennt.

Eine immer wichtigere Aufgabe der Klimaregelung ist der energieoptimale Betrieb einer Heiz-, Belüftungs- und Klimaanlage. Dieser kann aber nur dann erreicht werden, wenn die Klimatisierung als Teil des gesamten Fahrzeugs betrachtet wird. So lassen sich alle Ressourcen, die beim Betrieb eines Fahrzeugs zur Verfügung stehen, mit einer übergeordneten Fahrzeugregelung optimal verteilen. Dies steht im Widerspruch zu der Anforderung, daß eine Klimaregelung möglichst einfach und durchschaubar sein sollte. In diesem Fall wäre es sinnvoll, viele kleine und einfache Regelungssysteme für die einzelnen Komponenten eines Fahrzeugs einzusetzen.

Für Heiz-, Belüftungs- und Klimaanlage, die eine Mehrzonenklimatisierung erlauben, bestehen besondere Anforderungen an die Regelung. Allen Insassen muß ein optimales Klima geboten werden. Deshalb sollten alle Klimazonen, d.h. die unterschiedlichen Bereiche im Innenraum, individuell geregelt werden.

Da eine automatische Klimaanlage nicht alle Größen des thermischen Komforts eines Insassen beeinflussen bzw. berücksichtigen kann, ist eine manuelle Feinabstimmung erforderlich. Außerdem sollte eine Klimatisierungsanlage immer in einem bestimmten Umfang manuell bedienbar sein. Die Automatik kann in Form von unterschiedlichen Programmen zugeschaltet werden.

### 3.3.2 Sollwerte

Die Sollwerte müssen in sinnvollen Grenzen frei wählbar sein. Je weniger Sollwerte manuell eingestellt werden müssen, desto einfacher ist die Bedienung der automatischen Klimatisierungsanlage. Die restlichen Sollwerte werden dann von der Klimaregelung selbst gewählt. Bei

der Mehrzonenklimatisierung können für alle Zonen unterschiedliche Sollwerte festgelegt werden.

### 3.3.3 Regler

Der ideale Regler ist führungs- und störungsoptimal und erreicht die Sollwerte schnell und ohne Überschwingen. Er beherrscht die Regelstrecke also sowohl im stationären Betrieb als auch im Übergangsbereich.

Eine Regelung macht aber überhaupt nur dann Sinn, wenn der geschlossene Regelkreis aus Regler, Aktuatoren, Regelstrecke und Sensoren asymptotisch stabil ist. Anders ausgedrückt heißt das, daß die Differenz zwischen Soll- und Istwerten bei konstanten Sollwerten immer kleiner werden muß. Oder noch anders ausgedrückt, daß sich die Regelgrößen den Sollwerten immer mehr annähern müssen.

Aber allein die Bedingung der Stabilität läßt sich theoretisch nur schwer überprüfen, da man dazu die Aktuatoren, die Regelstrecke und die Sensoren modellieren muß. Wählt man einfache Modelle, so kann man für stationäre Zustände Aussagen über die Stabilität machen. Für den Übergangsbereich muß man komplexe Modelle wählen, die alle Zeitkonstanten, Totzeiten und Hysteresen, die Stellgrößenbegrenzung der Stellglieder und deren nichtlineare Auswirkungen berücksichtigen. Eine Stabilitätsuntersuchung ist dann, wenn man es realistisch betrachtet, einfach nicht mehr möglich. Es ist also berechtigt, bekannte nichtlineare Effekte durch zusätzliche Steuerungen zu umgehen.

Da allein schon die Grundvoraussetzung der Stabilität nicht in allen Fällen gewährleistet werden kann, ist der ideale Regler sehr schwer zu realisieren. Es existieren aber viele Möglichkeiten, aus einem schlechten Regler einen akzeptablen Regler zu machen. Einige dieser Möglichkeiten werden im folgenden aufgeführt:

Bei kleinen Regelabweichungen sorgt eine Unempfindlichkeitszone für eine gemäßigte Reaktion des Reglers. Dies verhindert, daß sich der Abstand zwischen Regelgröße und Sollwert aufgrund einer Überreaktion wieder vergrößert.

Eine Sollwertverstellung wird durch kurzes Absenken der Reglerverstärkung eingespeist. Dies führt zu einer schnelleren Reaktion auf eine Führungsänderung.

Um ein Vereisen des Verdampfers zu verhindern, wird eine untere Grenze für die Verdampfer-temperatur festgelegt. Der Kompressor wird ausgeschaltet, wenn diese Grenze erreicht wird. Danach wird er sofort wieder eingeschaltet. Die Verdampfer-temperatur beginnt, über der unteren Grenze zu schwingen. Der Kompressor wird ständig ein- und ausgeschaltet. Um dies zu verhindern, werden der Ein- und Ausschalt- punkt über eine Zweipunktkennlinie mit Hysterese festgelegt. Dies beseitigt das Ein- und Ausschalten in geringen Zeitintervallen. Bei Kompressoren mit variablem Hub kann auf die Hysterese verzichtet werden. Die untere Grenze für die Verdampfer-temperatur bleibt aber aus Sicherheitsgründen bestehen.

Nach [WOL83] ist ein Überschwingen der Innenraumtemperatur beim Öffnen einer Fahrzeugtüre sinnvoll. Wird der Sollwert verändert, sollte die Innenraumtemperatur nicht überschwingen.

Störgrößen können über eine sogenannte Störgrößenaufschaltung bei der Regelung berücksichtigt werden. Sie sind dann nicht mehr unbekannt und die Regelung kann sie bei der Berechnung der Stellgrößen mit einschließen. Als Beispiel sei hier eine Standheizung angeführt, die das Kühlwasser zusätzlich erwärmt.

Sinkt die Kühlwassertemperatur unter 40 °C werden die Steuerung und Regelung mit speziellen Parametern betrieben.

### 3.3.4 Aktuatoren

Die Aktuatoren besitzen sehr oft unterlagerte Regelkreise, um Effekte wie nichtlineare Reibung und Hysterese sofort zu kompensieren. Bei einer Luftmischklappe ist die Lageregelung sinnvoll, bei einer Luftverteilungsklappe reicht auch eine präzise Steuerung.

Bei einer luftseitigen Heizanlage ist außerdem ein möglichst linearer Zusammenhang zwischen der Position der Luftmischklappe und der Luftaustrittstemperatur wünschenswert. Eine Verstellung des Temperaturwahlschalters hat dann eine ähnliche Temperaturänderung zur Folge.

Bei einer wasserseitigen Heizanlage wirken sich kleine Änderungen im Kühlwasserfluß sehr stark auf die Luftaustrittstemperatur aus. Deshalb muß die Kühlwassermenge sehr genau dosiert werden. Dies kann mit einem unterlagerten Regelkreis oder weniger aufwendig mit einer sehr präzisen Steuerung geschehen. Die Temperatur des Kühlwassers ist sehr stark von der Motordrehzahl und der Motorlast abhängig. Nur bei einem sehr kleinen Kühlwasserfluß ist eine Temperaturschichtung möglich.

Beim Einschalten des trockenen Verdampfers entsteht eine unangenehme Geruchsbelästigung. Der Verdampfer sollte möglichst schnell Feuchtigkeit annehmen und immer ausreichend naß sein, da dadurch das Entstehen dieser Geruchsbelästigung verhindert werden kann.

### 3.3.5 Sensoren

Nach [BRA89] müssen in Fahrzeugen hochgenaue Temperaturmeßglieder benutzt werden, da das Störungsrauschen durch andere Komponenten sehr groß ist. Diese Anforderung läßt sich auf alle Sensoren übertragen.

## 3.4 Innenraumtemperaturregelung

Die denkbar einfachste Anordnung einer Innenraumtemperaturregelung ist durch den folgenden Standardregelkreis gegeben. Diesen kann man einsetzen, wenn ausschließlich die Innen-

raumtemperatur geregelt wird und ein Modell für die Regelstrecke existiert. Der Regler kann bei einfachen Modellen mit Hilfe der linearen Regelungstechnik unter bestimmten Gütekriterien entworfen werden.

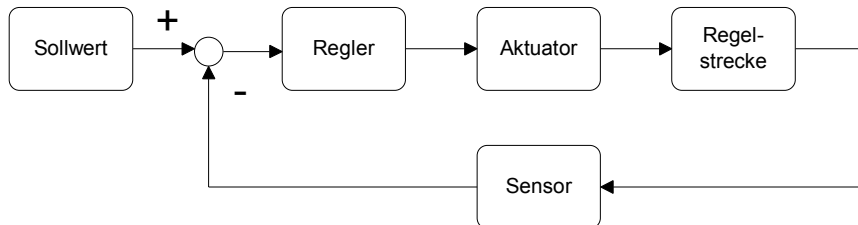


Abbildung 14: Einfacher Regelkreis für Innenraumtemperaturregelung

Bei der automatischen Fahrzeugklimatisierung existiert kein einfaches Modell für die Regelstrecke. Außerdem wird nicht nur die Innenraumtemperatur geregelt. Deshalb wird der Standardregelkreis (siehe *Abbildung 14: Einfacher Regelkreis für Innenraumtemperaturregelung*) aufgeschnitten und, wie in *Kapitel 3.2.6 (Regler)* in *Abbildung 13: Innenraumtemperaturregelung mit Steuergerät nach [BOE80]* beschrieben, ein Steuergerät eingefügt. Die Hauptregelung ist immer noch die Regelung der Innenraumtemperatur. Sie erfolgt mit einem P-Regler oder PI-Regler. Das Steuergerät beeinflusst die Sollwerte der unterlagerten Regelkreise. Nebeneffekte durch bekannte Nichtlinearitäten werden ebenfalls durch das Steuergerät unterdrückt. Die Luftverteilungsklappen werden nur gesteuert, d.h. abhängig von der Innenraumtemperatur und anderen Parametern legt das Steuergerät den Sollwert fest. Die Klappen nehmen diese Position ein, ohne daß eine Rückmeldung an einen Regler oder das Steuergerät erfolgt.

### 3.4.1 Regelungsstrategien

Grundlage der Regelung ist die Regelabweichung, die aus einem Soll- und Istwert gebildet wird. Das Eingangssignal des Reglers ist die negative Regelabweichung. Für die Regelabweichung der Innenraumtemperatur gilt:

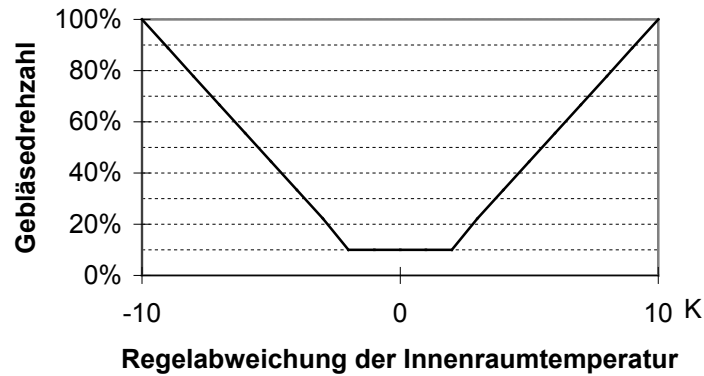
$$\Delta T = -(T_{soll} - T)$$

$\Delta T$  ..... Regelabweichung der Innenraumtemperatur

$T_{soll}$  ..... Sollwert der Innenraumtemperatur

$T$  ..... Innenraumtemperatur

Abhängig von der Regelabweichung bildet der Regler ein Ausgangssignal. Im einfachsten Fall, einem P-Regler, wird der Wert der negativen Regelabweichung einfach mit einer konstanten Verstärkung  $K$  multipliziert. Häufig werden aber auch Kennfelder eingesetzt, die abhängig von der Regelabweichung ein spezielles Ausgangssignal liefern.



**Abbildung 15: Gebläsedrehzahl in Abhängigkeit der Regelabweichung der Innenraumtemperatur nach [BRA89]**

In *Abbildung 15: Gebläsedrehzahl in Abhängigkeit der Regelabweichung der Innenraumtemperatur nach [BRA89]* wird die Gebläsedrehzahl abhängig von der Regelabweichung der Innenraumtemperatur festgelegt. Durch den horizontalen Verlauf im Bereich, in dem die Regelabweichung ungefähr Null ist, wird ein ständiger Luftaustausch gewährleistet. Für große Werte verhält sich das Kennfeld wie ein P-Regler. Eine Erhöhung des Luftmassenstroms ermöglicht nach [BOE80] den schnelleren Abbau der Regelabweichung. Andererseits können Zugbelästigungen vermieden werden, indem so lange wie möglich ein minimaler Luftmassenstrom aufrecht erhalten wird. Erst wenn die Heiz- bzw. Kühlleistung nicht mehr ausreicht, wird er erhöht. Es ist also nicht einfach, einen Kompromiß zwischen Zugfreiheit und schneller Innenraumklimatisierung zu finden.

Auch die Luftverteilung kann in Abhängigkeit der Regelabweichung der Innenraumtemperatur festgelegt werden. Dies ist aber nur dann eine Regelung, wenn der Luftmassenstrom an den verschiedenen Luftaustrittsöffnungen gemessen und zur Regelung der Luftverteilungsklappen benutzt wird.

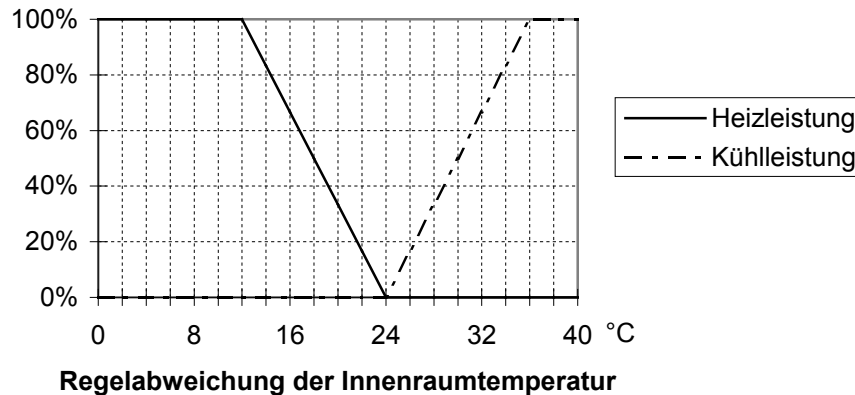


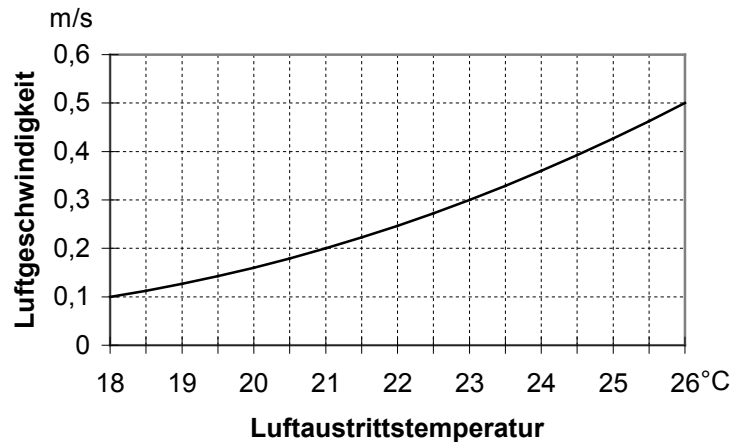
Abbildung 16: Heiz- und Kühlleistung in Abhängigkeit der Regelabweichung der Innenraumtemperatur in Anlehnung an [CAN92] bei einer Innenraumsolltemperatur von  $T_{soll} = 24\text{ °C}$  und einer Außentemperatur von  $T_{L,e} = 10\text{ °C}$

Die abhängig von der Regelabweichung der Innenraumtemperatur benötigte Heiz- oder Kühlleistung kann *Abbildung 16: Heiz- und Kühlleistung in Abhängigkeit der Regelabweichung der Innenraumtemperatur in Anlehnung an [CAN92] bei einer Innenraumsolltemperatur von  $T_{soll} = 24\text{ °C}$  und einer Außentemperatur von  $T_{L,e} = 10\text{ °C}$*  entnommen werden. Es handelt sich um einen P-Regler mit Stellgrößenbegrenzung, der zwischen Heiz- und Kühlbetrieb unterscheidet.

Bei luftseitig gesteuerten Heizanlagen muß die Verstellung der Luftmischklappe im Automatikbetrieb gedämpft werden. Eine ruckartige Verstellung könnte von den Insassen als ungewollt schnelle Temperaturänderung empfunden werden. Wasserseitige Heizanlagen reagieren schon aufgrund ihrer thermischen Trägheit verzögert.

### Luftverteilung

Für die Luftverteilung gilt ganz allgemein: „Kühler Kopf und warme Füße!“ Diese Aussage verträgt sich nicht mit der physikalischen Erkenntnis, daß warme Luft immer von unten nach oben steigt. Für die Klimatisierung eines Fahrzeugs bedeutet dies, daß warme Luft von unten und kalte Luft von möglichst weit oben in den Innenraum einströmen sollte. Nach [CAN92] hat dies eine optimale Durchmischung der Luft zur Folge. Bei sehr tiefen Außentemperaturen variiert nach [PET89] die Temperatur zwischen Kopf- und Fußbereich sehr stark, da die Wärme des Innenraums sehr schnell durch die Scheiben entweicht. Zusätzliche warme Luft aus der Mitteldüse hebt die Temperatur im Kopfbereich wieder an.



**Abbildung 17: Zulässige Luftgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Innenraumtemperatur bei direkter Anströmung einer Person nach [KRA80]**

Wird ein Insasse über eine Luftaustrittsöffnung direkt angeströmt, darf die Strömungsgeschwindigkeit abhängig von der Lufttemperatur über längere Zeit einen bestimmten Wert nicht überschreiten (siehe *Abbildung 17: Zulässige Luftgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Innenraumtemperatur bei direkter Anströmung einer Person nach [KRA80]*). Allerdings wird wärmere Luft nur im Winter komfortabel empfunden, während im Sommer kältere Luft gewünscht wird. Aus gesundheitlichen Gründen, d.h. zum Schutz vor Zug und Erkältung, darf ein kalter Luftstrom nur kurzzeitig mit überhöhter Strömungsgeschwindigkeit ausströmen. Speziell im Sommer kann die Mitteldüse zur Kühlung der Insassen eingesetzt werden. Nach [FRA87] sollen aber Temperatur und Richtung der ausströmenden Luft manuell einstellbar sein, so daß die Insassen selbst entscheiden können, wie lange der kalte Luftstrom direkt auf sie gelenkt ist.

In der Übergangszeit bei moderatem Heizbetrieb kann bei einer Fahrt, die mehrere Stunden dauert, die Temperatur im Fußraum langsam abgesenkt werden. Dies ist bei einer wasserseitigen Heizanlage z.B. durch eine Erhöhung des Kühlwasserflusses durch den Wärmetauscher möglich, da dadurch die Temperaturschichtung verringert wird. Gleichzeitig wird die Kälteleistung erhöht und der Reheat-Betrieb verstärkt. Man muß nur darauf achten, daß die Luft nicht zu trocken wird.

Durch eine ungünstige Verteilung der ausströmenden Luft entstehen Strömungswalzen an der Windschutzscheibe und im Fond. Dieser Effekt verschlechtert besonders den Komfort im Fond, da frische Luft erst einmal vorne bleibt und sich lästige Zugscheinungen im Nacken der hinteren Insassen ausbilden.

Nach [DAVc] beeinflußt die Luftverteilung den Luftwiderstand der Luftkanäle. Auch die Öffnungsweite der Luftaustrittsöffnungen spielt in diesem Zusammenhang eine Rolle. Wenn alle manuell absperbaren Luftaustrittsöffnungen geschlossen wurden, kann keine komfortable Klimatisierung des Innenraums erfolgen, da dieser nur noch über die Öffnungen im Fußbe-

reich klimatisiert werden kann. Wurde die Luftverteilung auf die oberen Luftaustrittsöffnungen gestellt, ist weder eine Klimatisierung noch eine ausreichende Belüftung des Innenraums möglich.

Nur ein großer Luftmassenstrom sorgt für eine ausreichende Klimatisierung des Fonds. Dies führt aber zu starken Zugbelästigungen der vorderen Insassen. Abhilfe schaffen zusätzliche Luftaustrittsöffnungen oder ein zusätzliches Heiz- und Klimagerät im Fond.

### **Entfeuchtung im Reheat-Betrieb**

Eine Entfeuchtung der Luft kann erfolgen, indem die Lufttemperatur am Verdampfer unter den Taupunkt abgesenkt wird. Die mit Wasserdampf gesättigte Luft verliert dabei einen Teil ihrer Flüssigkeit. Die Heizanlage bringt die Luft anschließend auf die erforderliche Luftaustrittstemperatur. Die maximale Stärke des Reheat-Betriebs wird durch eine minimale Verdampfer Temperatur festgelegt. Diese liegt oberhalb des Gefrierpunkts von Wasser, um ein Vereisen des Verdampfers zu verhindern. Es ergeben sich zwei mögliche Entfeuchtungsstrategien. Zum einen kann man die Verdampfer Temperatur konstant bei 1-3 °C halten. Zum anderen kann man ein sogenanntes Split-Range-Verfahren einsetzen. Die Luft wird dann nur so weit gekühlt, daß sich im Innenraum eine vordefinierte Luftfeuchtigkeit einstellt. Dadurch wird der Energieeinsatz optimiert und die Luft nicht zu stark getrocknet. Allerdings erfordert das Split-Range-Verfahren einen extern geregelter Kompressor<sup>2</sup> und einen Sensor für die Luftfeuchtigkeit entweder direkt nach dem Verdampfer oder im Innenraum.

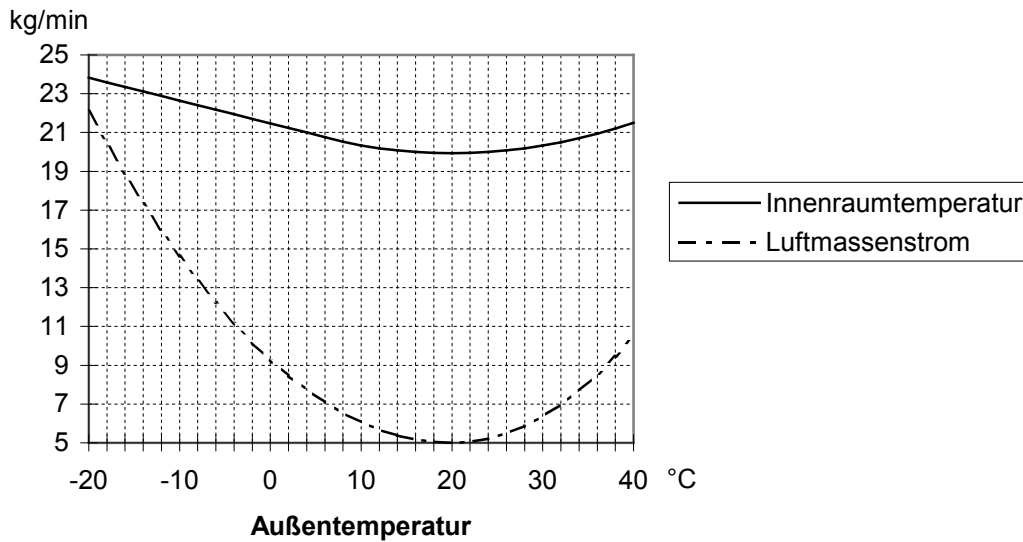
### **3.4.2 Korrektur der Sollwerte**

Die wichtigsten Größen einer automatischen Klimaregelung sind die Innenraumtemperatur und der Luftmassenstrom im Innenraum. Diese beiden Größen werden bei einer Innenraumtemperaturregelung als Referenz für den thermischen Komfort der Insassen benutzt. Es reicht daher nicht aus, nur den am Bedienteil vorgegebenen Temperaturwert als Sollwert zu betrachten. Vielmehr wird die am Bedienteil eingestellte Temperatur dazu verwendet, Abweichungen der persönlichen Verfassung und der Kleidung der Insassen zu kompensieren. Die übrigen Komfortparameter drücken sich entweder ebenfalls in der Temperatur am Bedienteil aus oder sie werden über zusätzliche Sensoren in die Innenraumtemperaturregelung mit eingebunden.

---

<sup>2</sup> extern geregelter Kompressor ... Die Leistung des Kompressors kann z.B. durch eine automatische Klimaregelung unabhängig von der Motordrehzahl vorgegeben werden





**Abbildung 18:** Behagliche Innenraumtemperatur und Luftmassenstrom als Funktion der Außentemperatur nach [BOE80]

Über einen Außentemperatursensor wird die behagliche Innenraumtemperatur ermittelt (siehe *Abbildung 18: Behagliche Innenraumtemperatur und Luftmassenstrom als Funktion der Außentemperatur nach [BOE80]*). Anschließend kann der Innenraumtemperatursollwert an die äußeren Bedingungen angepaßt werden. Analog kann man den Sollwert des Luftmassenstroms an die Außentemperatur angleichen.

Die Innenraumtemperatur und der Luftmassenstrom können zusätzlich an die Sonneneinstrahlung und nach [HOF91] auch an die Tageszeit angepaßt werden. Die Tageszeit kann man über die Sonneneinstrahlung ermitteln. Schlechtes Wetter oder eine Fahrt in einem Tunnel stellen kein Problem dar, da in diesen Fällen sowieso keine zusätzliche Erwärmung des Innenraums stattfindet und eine Kompensation nicht notwendig ist.

Da der Komfort außerdem vom Staubgehalt und von Gasen, Dämpfen, Gerüchen und Lärm abhängig ist, sind weitere Korrekturen der Sollwerte für Innenraumtemperatur und Luftmassenstrom denkbar.

### 3.4.3 Steuereingriffe

Bei zu großen Regelabweichungen und in Übergangsphasen wird die Regelung unterbrochen und eine Steuerung aktiviert. Die Steuerung versucht, das System möglichst schnell, d.h. mit maximaler Heiz- und Kühlleistung, in den regelbaren Bereich zu führen. So wird z.B. beim Start der Heizanlage im Winter überprüft, ob die Kühlwassertemperatur noch zu kalt ist. Dann wird die Luft nach [RIV89] erst verzögert auf die Füße geleitet und nach Bedarf zunächst ein Defrost-Programm aktiviert.

Der Kompressor kann abhängig von der Außentemperatur eingeschaltet werden. Es ist nicht zu erwarten, daß ein Insasse bei 10 °C Außentemperatur eine noch tiefere Luftaustrittstempe-

ratur wünscht. Sind mehrere Klimageräte vorhanden, so werden abhängig von der Außentemperatur nicht immer alle eingesetzt, um Energie zu sparen.

Bei Wahl des Umluftbetriebs könnten nach [HAN00] aufgrund der CAN-Bus-Vernetzung Schiebedach und Scheiben automatisch geschlossen werden.

### 3.4.4 Luftaustrittstemperatur

Die Luftaustrittstemperatur weicht i.a. von der Innenraumtemperatur ab. Auf dem Weg zu den Insassen gibt der Luftmassenstrom Wärme ab oder nimmt Wärme auf. Im Winter ermöglicht eine Erhöhung der Luftaustrittstemperatur einen schnelleren Abbau der Regelabweichung. Im Sommer wird dies analog durch eine Absenkung der Luftaustrittstemperatur erreicht.

Die Luftaustrittstemperatur kann zur Regelung der Heizanlage benutzt werden. Dies hat den Vorteil, daß man die Heizanlage nicht in das Modell der Regelstrecke einbinden muß. Bei [MOEa] werden zwei unterlagerte Regelkreise für die Luftaustrittstemperaturen im Kopf- und Fußbereich eingesetzt. Während die Innenraumtemperaturregelung unverändert bleibt, hängt die Gewichtung der unterlagerten Regelkreise von der Stellung der Luftverteilungsklappen ab. Wird die Luft ausschließlich in den Fußbereich geleitet, bleibt der Regelkreis für die Luftaustrittstemperatur im Kopfbereich ohne Wirkung.

Nach [PET] kann bei einem Cabrio bei offenem Verdeck von Innenraumtemperaturregelung auf die Regelung der Luftaustrittstemperatur umgeschaltet werden. Wenn kein Luftaustrittstemperatursensor vorhanden ist, kann die Luftaustrittstemperatur nur gesteuert werden. Die Umschaltung erfolgt mit Hilfe eines Verdeckschalters oder softwaremäßig in Abhängigkeit von Temperatursprüngen oder starken Temperaturschwankungen. Die zweite Möglichkeit kann auch bei offenen Fensterscheiben und offenem Schiebedach bei Bedarf auf eine Regelung der Luftaustrittstemperatur umschalten.

### 3.4.5 Mehrzonenklimatisierung

Für die Mehrzonenklimatisierung sind spezielle Regelungen erforderlich. Zum einen soll das Klima jeder Zone getrennt geregelt werden. Zum anderen beeinflussen sich die verschiedenen Zonen gegenseitig sehr stark. Deshalb wird ein Hauptregler gewählt, der das mittlere Klima im Innenraum bestimmt. Unterlagerte Regelkreise übernehmen die Feineinstellung des Klimas in den unterschiedlichen Klimazonen (siehe *Abbildung 19: Innenraumtemperaturregelung der aktuellen E-Klasse aus [DAI00]*).

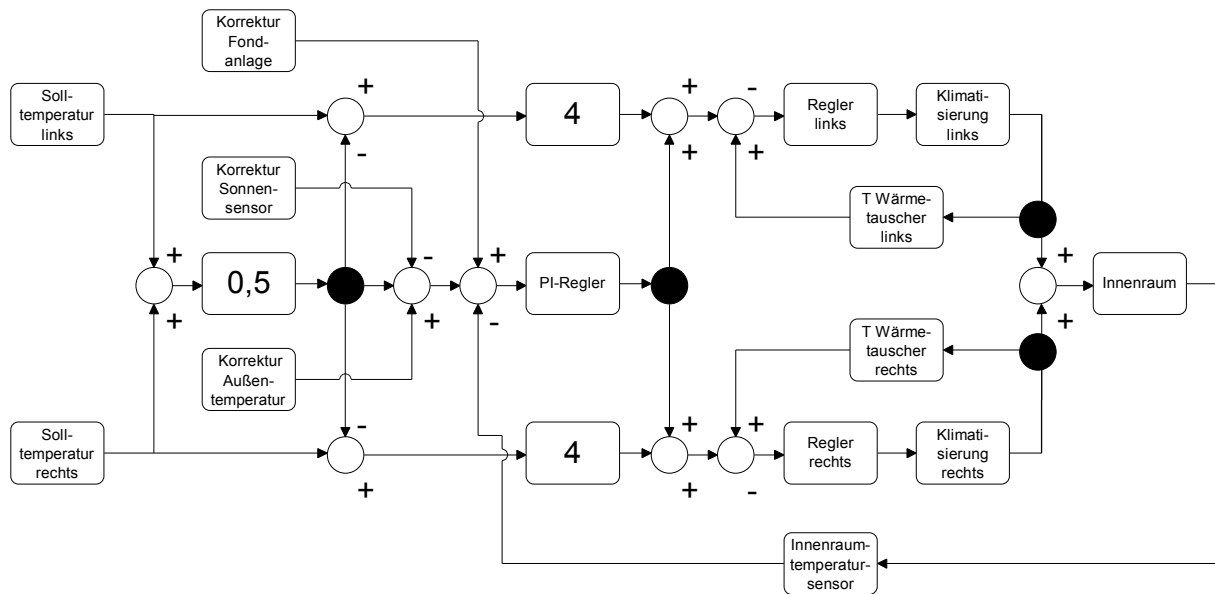


Abbildung 19: Innenraumtemperaturregelung der aktuellen E-Klasse aus [DAI00]

Ein verzögerter Hauptregelkreis für die durchschnittliche Innenraumtemperatur greift erst dann ein, wenn alle unterlagerten Regelkreise auf dieselbe Weise versuchen, die Innenraumtemperatur zu verändern. Innerhalb ihrer Zone sollten die unterlagerten Regelkreise die Innenraumtemperatur möglichst schnell ausregeln. Manchmal wird der Temperaturunterschied auch ausschließlich durch eine unterschiedlich hohe Gebläseleistung erreicht. In der aktuellen E-Klasse von Mercedes-Benz ist der Hauptregler ein PI-Regler. Er reagiert verzögert auf Änderungen. Die einzelnen Klimazonen werden direkt mit P-Reglern geregelt.

Mehrzonenklimatisierung bedeutet, daß mehrere Zonen des Fahrzeugs unterschiedlich klimatisiert werden. Für die Klimaregelung reicht es nicht aus, einfach ein zusätzliches Gerät im Fond zu installieren, da das Fondklima sehr stark von dem im vorderen Bereich des Fahrzeugs mitbestimmt wird. Bei [MOEb] wird das hintere Klimatisierungsgerät mit Hilfe der vorderen Regelabweichung und dem hinteren Sollwert gesteuert. Die Steuerung berechnet, welche Temperatur die Luft haben muß, die zu der aus dem vorderen Bereich des Innenraums nach hinten strömenden Luft hinzugefügt wird, so daß sich im hinteren Bereich die gewünschte Temperatur einstellt.

### Eingeschränkte Mehrzonenklimatisierung mit minimalem Aufwand

Bei [SCHa] wird eine Zweizonenklimatisierung beschrieben, die nur einen Luftweg besitzt. Auf der Fahrer- und Beifahrerseite ist je ein Temperatursensor installiert. Abhängig von den Soll- und Istwerten der beiden Seiten wird die Klimatisierungsanlage so geregelt, daß sich beide Insassen möglichst komfortabel fühlen. Der Innenraumtemperatursollwert kann entweder der Sollwert der Fahrerseite oder das Maximum der Sollwerte der Fahrer- und Beifahrerseite sein. Die Fußraumklappe bleibt meist weit geöffnet und läßt Luft mit einer Temperatur von etwa 29 °C ausströmen. Dies ermöglicht einen großen Luftdurchsatz ohne Zugschei-

nungen und verhindert, daß die Temperatur im Fußbereich zur Regelung der Innenraumtemperatur benutzt wird. Aufgrund der unterschiedlichen Einstellungen der Öffnungsweiten der Luftaustrittsöffnungen auf der Fahrer- und Beifahrerseite kann das Klima ebenfalls unterschiedlich beeinflusst werden.

# 4. Neue Klimatisierungskonzepte

*In diesem Kapitel werden neue Hardwarekonzepte vorgestellt, mit denen ein besserer thermischer Komfort erreicht werden kann. Zunächst wird im Abschnitt Motivation dargestellt, welche Ziele bei der Verbesserung einer Heiz- und Klimaanlage verfolgt werden. Anschließend werden Möglichkeiten der technischen Umsetzung in Aktuatoren und Sensoren aufgeführt.*

## 4.1 Motivation

Klimaanlagen sollen komfortabel sein und einen möglichst geringen Energieverbrauch haben. Diese beiden Hauptanforderungen widersprechen sich in vielen Fällen. Aber nicht immer muß ein zusätzlich gewonnener Komfort auf der Energieseite neue Probleme hervorrufen. Gerade dann, wenn man den Komfort mit Hilfe von neuen Sensoren und Regelungskonzepten gewinnt, schlägt sich das im Energieverbrauch weniger stark nieder bzw. spart eventuell sogar noch Energie. Bei der Entwicklung neuer Klimatisierungsanlagen steckt in der Verbesserung der Sensorik und der Wahl neuer Regelungskonzepte ein großes Potential zur Steigerung des Komforts und zur Verringerung des Energiebedarfs.

Im folgenden werden nicht nur die einzelnen Bauelemente erklärt, sondern auch Anwendungsmöglichkeiten gegeben und die Möglichkeiten zur Einbindung in ein Regelungssystem beschrieben. Diese Innovationen sollen zu einer höheren Kundenakzeptanz beitragen.

### 4.1.1 Komfortablere Klimatisierung

#### Erlebnisklimatisierung

Die Klimatisierung des Innenraums sollte nicht nur das vorgegebene optimale Klima erzeugen können, sondern auch die individuellen Wünsche der Insassen berücksichtigen. So könnte man z.B. im Winter bei Schneefall und Außentemperaturen weit unter 0 °C im Innenraum eines geschlossenen Fahrzeugs das Gefühl wecken, man befände sich auf Hawaii und fahre in

einem Cabrio. Dazu ist es notwendig, daß die äußeren Einflüsse auf das Innenraumklima so weit wie möglich kompensiert werden.

Die Klimatisierung könnte sich selbst in Szene setzen. Es reicht sicher nicht aus, das Gefühl einer Strandfahrt auf Hawaii ausschließlich mit den Mitteln einer Klimatisierungsanlage zu erzeugen. Erst wenn man auch das Meeresrauschen hört und die Palmen im Bedienteil tanzen, kann man das, was man aufgrund der Luftbewegung, der Temperatur und Luftfeuchtigkeit wahrnimmt, einer Strandfahrt auf Hawaii zuordnen.

### **Offene Fahrzeuge**

Auch bei offenen Scheiben, einem offenen Schiebedach oder einer Fahrt im Cabrio bei geöffnetem Verdeck sollte eine komfortable Klimatisierung der Insassen möglich sein. Bei [WAT95] wird die automatische Verstellung eines Schiebedachs beschrieben.

In diesen Fällen ist es günstig, nicht mehr von einer Innenraumklimatisierung zu sprechen, da dieser zu stark an die Umgebung gekoppelt ist. Vielmehr sollte direkt der Insasse klimatisiert werden.

### **Trennung von Klimatisierung und Belüftung**

Da die Klimatisierung des Innenraums mit der Belüftung gekoppelt ist, ergeben sich Probleme, die man ohne Klimatisierungsanlage überhaupt nicht hätte. Ist der Innenraum z.B. zu warm und man möchte ihn möglichst schnell abkühlen, so ist ein größerer Luftdurchsatz im Innenraum erforderlich. Es kann zu Zugerscheinungen kommen.

Mit Hilfe von Heiz- und Kühleinrichtungen, die den Innenraum nicht über den Luftmassenstrom klimatisieren, sondern z.B. mit Hilfe erwärmter oder gekühlter Umschließungsflächen, könnte die Innenraumluft erwärmt oder gekühlt werden, ohne den Luftmassenstrom im Innenraum zu verändern. Eventuell könnte sogar der Insasse direkt klimatisiert werden. Zur Entfeuchtung der Innenraumluft müßte weiterhin die Frisch- und Umluft getrocknet werden.

Ansätze für die Trennung der Temperierung von der Belüftung findet man in Omnibussen. Dort können die Insassen ganz individuell den Luftmassenstrom aus den Deckenausströmern einstellen.

Mit zusätzlichen Luftaustrittsöffnungen kann verhindert werden, daß die Wege für die klimatisierte Luft von den Luftaustrittsöffnung zu den Insassen zu weit werden. Man trennt also die Klimatisierung von der Durchströmung. Die Wärme wird weiterhin über einen Luftmassenstrom in den Innenraum geführt. Dieser wird aber von den Insassen nicht so stark wahrgenommen. Ein zentrales Leitungssystem mit kalter und warmer Luft ermöglicht es, an beliebigen Stellen im Fahrzeug Luftaustrittsöffnungen anzubringen, deren Temperatur an Ort und Stelle aus kalter und warmer Luft zusammengesetzt werden kann. Problematisch ist der dafür erforderliche Energie- und Platzbedarf.

### **Zusätzliche Geräte**

Durch zusätzliche Heiz- und Klimageräte können die Luftwege verkürzt werden. Die Klimatisierungsanlage kann dadurch schneller auf Änderungen reagieren.

Oft wird bei größeren Fahrzeugen ein zusätzliches Klimatisierungsgerät für den Fond angeboten. Dadurch lassen sich auch zusätzliche Funktionen wie z.B. ein in das zweite Klimagerät integriertes Kühlfach realisieren.

### **Standklimatisierung**

Da sowohl das Heizen über das Kühlwasser als auch das Kühlen i.a. an den eingeschalteten Motor gekoppelt sind, ist eine Klimatisierung des Innenraums bei ausgeschaltetem Motor nicht unmittelbar möglich. Für die Standklimatisierung sind also zusätzliche Wärme- und Kältequellen erforderlich.

Einige Fahrzeuge besitzen schon eine Standheizung. Diese kann zur Erwärmung des Kühlwassers und damit indirekt auch zur Erwärmung des Innenraums genutzt werden. Es sind auch andere Zuheizkonzepte denkbar, die entweder das Kühlwasser oder direkt die Innenraumluft erwärmen. Dies kann zum einen elektrisch oder über eine zusätzliche Verbrennungsheizung geschehen. Außerdem kann Wärme gespeichert werden. Die Energie für die Speicher wird entweder während der Fahrt erzeugt oder kontinuierlich aus der Umgebung aufgenommen.

Zum einen könnte das Fahrzeug ununterbrochen klimatisiert werden, wobei sicherzustellen wäre, daß immer ausreichend Wärme und Kälte zur Verfügung steht. Zum anderen könnte man den Einsatz der Klimatisierungsanlage über eine Zeitschaltuhr oder eine Fernbedienung planen. Besonders geschickt wäre die Möglichkeit, die Klimatisierungsanlage über ein Handy fernzubedienen. Auch andere Fahrzeugfunktionen könnten über diese Schnittstelle betätigt werden.

Außerdem gibt es unterschiedliche Strategien, wie der Innenraum im Stand klimatisiert werden soll. Im Sommer reicht es eventuell schon aus, wenn sich der Innenraum nicht noch zusätzlich aufheizt, sondern einfach nur die Temperatur der Umgebung annimmt. Bei kurzem Halt könnte über kleine Wärme- und Kältespeicher eine Minimalklimatisierung erfolgen. Andererseits könnte die Klimatisierung so erfolgen, daß immer etwas zu extrem klimatisiert wird, da beim Einsteigen ein Teil der klimatisierten Luft mit der Umgebungsluft ausgetauscht wird.

### **Aus- und Einsteigen**

Für die Regelung einer Klimatisierungsanlage macht es einen großen Unterschied, ob der Insasse ohne Pause von Hamburg nach München fährt oder ob ein Postausträger alle zwei Minuten aussteigt, um ein Päckchen abzuliefern. Im letzten Fall wird ständig sehr viel Luft mit der Umgebung ausgetauscht, d.h. es wird sich kein stationärer Zustand einstellen. Eine klassische Regelung, die auf linearen Gesetzen beruht, wird so ausgelegt, daß sie das System in

einem stationären Zustand hält. Im Falle des Postausträgers wird die automatische Klimaregelung ständig versuchen, das System in einen stationären Zustand zu steuern, d.h. die eigentliche Regelung wird nicht einsetzen.

Die Störung, die ein Insasse beim Einsteigen in das Fahrzeug hineinträgt, ist ein Maß für seine bisher empfundene thermische Behaglichkeit. Aus den Änderungen der meßbaren Größen im Innenraum kann man somit Rückschlüsse darauf ziehen, welchen Bedingungen er zuvor ausgesetzt war. Eine automatische Klimaregelung kann diese Information dazu benutzen, das Innenraumklima langsam an die Bedürfnisse des neu zugestiegenen Insassen anzupassen. Dadurch wird er keinem zusätzlichen Streß durch eine zu schlagartige Klimaänderung ausgesetzt.

### **Sonstige Verbesserung**

Nach [SOM91] kann bei einem extern geregelten Kompressor mit variablem Hub das Hubvolumen zur Regelung der Feuchtigkeit und Defrosterdüsen benutzt werden. Das Innenraumklima läßt sich also besser an die Bedürfnisse der Insassen anpassen.

Sensoren, die einen Thermoscan der Insassen durchführen, liefern Temperaturkarten und Daten über die Schweißbildung.

Wenn die Luft im Innenraum optimal durchmischt werden könnte, d.h. die Luft überall im Innenraum dieselben Parameter und Eigenschaften hätte, könnte man sich frei im Innenraum bewegen, ohne unerwünschte Klimaänderungen wahrzunehmen. Dieses Konzept ist speziell für größere Fahrzeuge, Busse, Züge und Flugzeuge sinnvoll.

### **Bordrechner**

Wenn die Sensoren ihre Daten auf einem zentralen Bussystem zur Verfügung stellen und auch die Aktuatoren daran angeschlossen sind, könnte wie in *Abbildung 20: Steuerung und Regelung mit einem zentralen Bordrechner* gezeigt, ein zentraler Bordrechner das Klima im Innenraum regeln. Diesem stünden u.a. auch die Daten des Motors zur Verfügung. Er wäre also in der Lage, eine für das Gesamtsystem Fahrzeug optimale Klimaregelung durchzuführen.



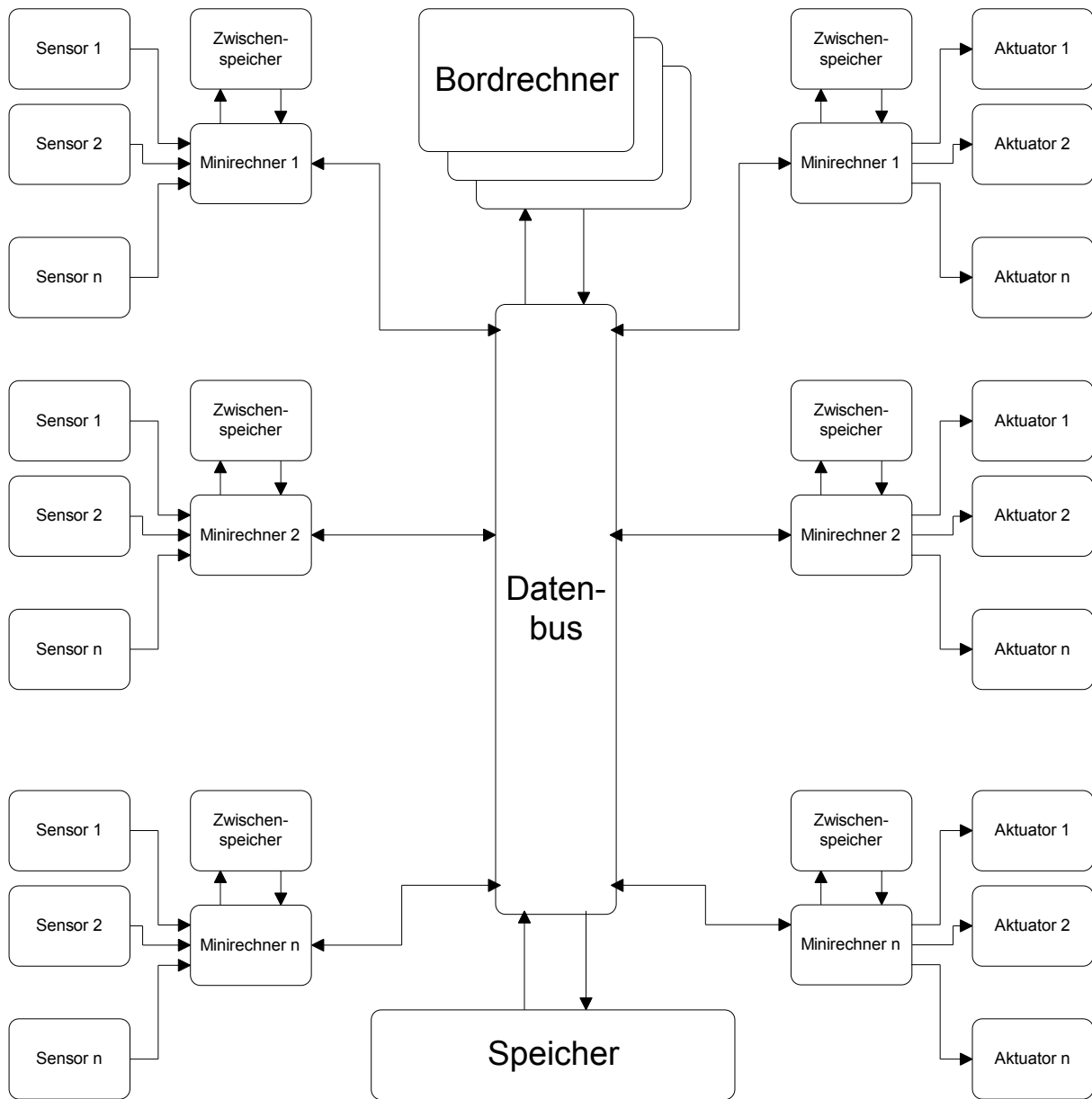


Abbildung 20: Steuerung und Regelung mit einem zentralen Bordrechner

Außerdem sollten die Sensoren auch direkt Daten mit den Aktuatoren austauschen können, um bei einem Ausfall des z.B. dreifach redundanten Bordrechners trotzdem eine ausreichende Klimatisierung zu ermöglichen.

Die Teilsysteme der Sensoren und Aktuatoren können ihrerseits wieder einen speziellen Datenbus zum Datenaustausch benutzen. Es entsteht eine fraktale<sup>3</sup> Struktur, die dann besonders störungsempfindlich ist, falls die Daten innerhalb der Bussysteme mehrere Möglichkeiten haben, um von der Quelle zum Ziel zu gelangen.

### **Bedienteil**

Die Insassen sollten die Klimatisierungsanlage bedienen können, indem sie ihren eigenen thermischen Zustand beschreiben. Die Transformation dieses Empfindens in entsprechende Stelleingriffe sollte von der automatischen Klimaregelung vorgenommen werden. Dies erfordert u.a. neue Konzepte für die Ausführung des Bedienteils. Die Vorgabe einer Innenraum-solltemperatur reicht dann nicht mehr aus. Neue Möglichkeiten ergeben sich durch einen Wärmer-Kälter-Schieber oder einer Möglichkeit, mit der die Insassen direkt den von ihnen empfundenen thermischen Komfort mitteilen können. Diese Information kann z.B. in einen Sollwert für die Äquivalenztemperatur umgerechnet werden. Außerdem sollte die Elektronik Bedienfehler erkennen, die z.B. zu Erkältungen führen würden.

Die Kombination des Bedienteils der Klimatisierungsanlage mit einem Navigationssystem, dem Autoradio usw. bietet die Möglichkeit, ein einheitliches Bedienkonzept zu entwerfen. Auf einem zentralen, multifunktionalen Display sollte nur das angezeigt werden, was im Augenblick wirklich von Interesse ist. Manuelle Einstellungen könnten über drucksensitive Flächen des Displays vorgenommen werden. Die Bedienelemente könnte man sogar individuell und abhängig von der Situation anordnen. Aber auch Möglichkeiten der Spracheingabe sollten genutzt werden. Die direkte Projektion von Daten in den Sichtbereich des Fahrers über z.B. ein Head-Up-Display ist für die Klimatisierung von untergeordneter Bedeutung.

Neben den bekannten Bedienelementen für

- Innenraumtemperatur,
- Gebläsestufe,
- Luftverteilung (Fußbereich, Kopfbereich, Defrost),
- Umluftschalter,
- Economy-Schalter zum Ein- und Ausschalten des Kompressors,
- Motorrestwärmenutzung und
- Automatikbetrieb Ein- und Ausschalten

sind zusätzlich Einstellmöglichkeiten für

- Öffnungsweite und Ausblasrichtung der Luftaustrittsöffnungen und

---

<sup>3</sup> fraktal ... hier im Sinne von selbstähnlich gebraucht

- Luftfeuchtigkeit (Stärke des Reheat-Betriebs)

denkbar.

### **Nutzung der Klimadaten**

Die Messungen der Klimadaten im Innenraum und außerhalb des Fahrzeugs liefern Daten, die man am Bedienteil anzeigen, an stationäre Wetterstationen übertragen oder auch z.B. in einem Begrüßungstext einbinden kann. Außerdem können die Daten mit externen Daten, z.B. einer Wettervorhersage, kombiniert werden:

*„Guten Morgen Herr Müller! Es ist Montag, der 11. Mai 1998 8:30 Uhr. Die Außentemperatur beträgt 10 °C. Heute Nachmittag werden 22 °C bei wunderschönem Wetter erwartet. Die Luftfeuchtigkeit liegt im Augenblick bei 30 Prozent. Innerhalb von 14 Minuten wird ihr Fahrzeug auf Ihre Standardvorgabe von 23 °C bei 50 Prozent Luftfeuchtigkeit gebracht. Falls Sie wie fast an jedem Montag morgen um diese Zeit zur Arbeit fahren, meldet die Polizei auf der B10 Richtung Stuttgart einen 2 Kilometer langen Stau. Fahren Sie Ausfahrt Esslingen ab. Dort melde ich mich wieder für weitere Weghinweise. Bis dann und gute Fahrt.“*

#### **4.1.2 Erschwerte Rahmenbedingungen**

Unter erschwerten Rahmenbedingungen stellen sich die Fragen, wie die Energie optimal eingesetzt werden kann und wie komfortabel eine Klimatisierung unter diesen Bedingungen wirklich sein kann. Man möchte zum Teil trotz der erschwerten Rahmenbedingungen denselben Komfort erreichen wie in einem Fahrzeug der Luxusklasse.

#### **Kompaktklasse**

Bei Fahrzeugen der Kompaktklasse bestehen besondere Anforderungen an Bauraum, Kosten, Energie- und Leistungsbedarf. Abhängig von der Anzahl der Insassen kann eine Regelung derart erfolgen, daß möglichst alle zur Verfügung stehenden Mittel zur Klimatisierung der Insassen eingesetzt werden. Je weniger Insassen mitfahren, desto besser der thermische Komfort. Außerdem bietet es sich an, standardisierte Komponenten zu verwenden, die in großer Stückzahl und in unterschiedlichen Modellen eingesetzt werden können. Auch der Innenraum bietet weniger Platz. Dadurch sind die Insassen noch näher an den Umschließungsflächen.

Ein großer Umluftanteil hat den Vorteil, daß die angesaugte Luft schon beinahe den gewünschten Zustand hat. Allerdings ist ein Frischluftanteil notwendig, um den notwendigen Sauerstoffgehalt im Innenraum sicherzustellen. Außerdem muß die Umluft getrocknet werden, da sie von den Insassen zusätzliche Feuchtigkeit aufnimmt.

Bei Fahrzeugen der Kompaktklasse steht meist eine geringere Motorleistung zur Verfügung. Deshalb ist es sinnvoll, einen leistungsregelbaren Kompressor einzusetzen, der den Motor nur mit der zur komfortablen Klimatisierung des Innenraums erforderlichen Leistung belastet. Dadurch wird u.a. ein übertriebener Reheat-Betrieb vermieden. Wenn ein Kompressor mit variablem Hub direkt an den Motor gekoppelt wird, ist der Leistungsverlust des Motors unge-

fähr gleich der Leistungsaufnahme des Klimatisierungsgeräts. Abhängig von der Gaspedalstellung und einem Dynamik-Schalter kann nach [DAVa] die Leistungsaufnahme festgelegt werden, d.h. entweder kann schnell und dynamisch gefahren werden oder thermisch komfortabel. So wird z.B. bei einer Fahrt auf einer Landstraße die volle Antriebsleistung immer nur kurzzeitig zum Überholen benötigt. Ansonsten kann über längere Zeit komfortabel klimatisiert werden. Bei verbrauchsarmen Dieselmotoren ist eine Zusatzheizung erforderlich, da das Motorkühlwasser nicht ausreichend Wärme liefert.

Im Sommer möchte man verhindern, daß der Fahrzeuginnenraum im Stand durch die Sonneneinstrahlung aufgeheizt wird. Dies kann mit automatisch verdunkelbaren Scheiben, UV- und IR-hemmender Verglasung oder automatischen Rundumrollos geschehen. Im Winter sollte der Innenraum einen möglichst geringen Wärmeverlust haben. Mit Hilfe von wärmedämmenden Scheiben wie z.B. IR-reflektierender Verglasung oder Doppelglasscheiben kann dies erreicht werden. Insgesamt ist es also günstiger, völlig isolierende Scheiben einzubauen als völlig durchlässige. Das Optimum ist abhängig vom augenblicklichen Zustand außerhalb und im Innern des Fahrzeugs. Außerdem ist es günstig, die Wärmekapazitäten des Innenraums so gering wie möglich zu halten, um die Trägheit der Regelstrecke Innenraum zu verringern.

Um im Sommer ein Aufheizen des Innenraums zu vermeiden, können z.B. die Fenster, Türen und das Schiebedach automatisch geöffnet werden, falls keine Person in der Nähe ist. Abhängig von einem Regen- und einem Bewegungssensor werden die Öffnungen wieder geschlossen.

### **Elektrische Fahrzeuge**

Die Gesetze einiger Bundesstaaten der USA fordern das Fahrzeug ohne Emissionen. Außerdem gibt es staatliche Förderungen für derartige Projekte. Deshalb besteht ein Bedarf an elektrischen Fahrzeugen, die im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen keine Einbußen bei der Klimatisierung aufweisen und deren Klimatisierungsanlage die Reichweite und das Fahrverhalten möglichst wenig beeinflusst. Auf der anderen Seite benötigen Klimatisierungsanlagen nach [DIE91] mehr Energie als jedes andere Standardzubehör. Deshalb möchte man eine Klimatisierungsanlage mit minimalem Energieverbrauch bei gleichbleibendem Komfort.

Nach [LOE00] gibt es folgende Möglichkeiten für eine Klimatisierung ohne Betankung mit Kraftstoff:

- Nutzung aller Abwärmen mit integriertem System
- Rückwärmegewinnung aus der Abluft
- feuchteabhängige Regelung bzw. adsorptiver Umlufttrockner
- PTC-Zusatzheizung oder elektrische Wärmepumpe
- zeitgesteuerte Vorklimatisierung

- intelligente Regelung
- Wärme- und Strahlungsdämmung
- drehzahlregelbarer elektrischer Kompressor

Bei [BUR00] werden verschiedene Möglichkeiten zur effektiveren Energienutzung genauer beschrieben:

Eine Wärmepumpe kann speziell beim Kaltstart des Fahrzeugs im Winter dazu benutzt werden, den Innenraum zu erwärmen, so lange die Kühlwassertemperatur noch zu niedrig ist.

Die Verwendung von Wärmepumpen, die Nutzung der Abwärme und der Einsatz von Widerstandsheizungen können im Vergleich zu kraftstoffbetriebenen Heizungen Vorteile in den Bereichen Platzbedarf, Gewicht, Kosten, Abgase und Kraftstoffverbrauch bringen. Eine andere Möglichkeit besteht darin, daß alle abwärmeerzeugenden Komponenten von einem Kühlmittel umströmt werden. Über einen Wärmetauscher kann die rückgewonnene Wärme an die Innenraumzuluft weitergegeben werden. Allerdings erfordert dies einen erheblich größeren Bauraum der betroffenen Komponenten.

Durch eine Vorkonditionierung des Fahrzeugs an der Steckdose kann die Energie, die erforderlich ist, um den Innenraum in einen stationären Zustand zu führen, aus dem Stromnetz entnommen werden. Eingeschränkte Lastenheftanforderungen ermöglichen leichtere, einfachere und billigere Heiz-, Belüftungs- und Klimaanlage. Allerdings müssen dann in Extremsituationen Einbusen beim Komfort hingenommen werden.

Zusätzlich zu den bei [BUR00] beschriebenen Möglichkeiten gibt es noch weitere, interessante Ansätze:

Wird das Fahrzeug mit einer Batterie angetrieben, so kann diese zusätzlich als thermischer Speicher und als Wärmequelle eingesetzt werden. Ein elektrisch angetriebener Kompressor ermöglicht zum einen eine extern regelbare Kompressorleistung und zum anderen die Möglichkeit, das Fahrzeug abhängig vom Ladestand der Batterie im Stand zu klimatisieren.

### **Sonnenenergienutzung**

Ein Teil der Energie, die das Auto erwärmt, wird dazu benutzt, das Auto zu belüften oder zu kühlen. Da die Sonneneinstrahlung sowieso zur Erwärmung des Innenraums beiträgt, kann man beim Heizen nur versuchen, noch mehr Wärme in den Innenraum zu leiten oder den Erwärmungsvorgang geregelter ablaufen zu lassen.

Bei [SHU] wird eine Klimaanlage durch Solarzellen auf dem Dach angetrieben. Man erhält also quasi einen geschlossenen Regelkreis mit der Sonne. Auch beim Stillstand des Motors ist somit eine Klimatisierung möglich. Es gibt außerdem schon Ansätze zur batteriegestützten Klimatisierung mit PELTIER-Elementen. Allerdings sollte eine Klimatisierung möglichst

unabhängig von einer Batterie sein. Vorhandene Solarzellen können aber dazu benutzt werden, die Batterie wieder aufzuladen.

## 4.2 Aktuatoren

### 4.2.1 Zusätzliche Heizung und Kühlung

#### Luftmischprinzip mit Jalousieklappen

Die Luftmischklappe kann durch Jalousieklappen ersetzt werden. Dies soll zum einen den Platzbedarf dieses Prinzips verringern und zum anderen die ausreichende Durchmischung der kalten und warmen Luft gewährleisten.

#### Latentwärmespeicher

Die Batterien von elektrischen Fahrzeugen haben zum Teil Betriebstemperaturen von mehreren 100 °C. Diese Wärme kann im Betrieb und im Stand des Fahrzeugs zur Erwärmung des Innenraums genutzt werden. Auch andere Wärmespeicher sind für eine Standklimatisierung denkbar. Ein Flüssigkeitsgemisch, das während der Fahrt gekühlt wird, kann bei ausgeschaltetem Motor langsam aufgetaut werden, um den Innenraum zu kühlen. Dies führt aber zu einer konstanten Erhöhung des Fahrzeuggewichts um ca. 50 kg.

#### Heißgaspumpe als Zusatzheizung

Nach [SAL00] ermöglichte ein zusätzlich in den Kältekreislauf eingebrachtes Ventil in einem Versuch die Halbierung der Aufheizzeit von -20 °C bis zur komfortablen Innenraumtemperatur. Dieses Prinzip ist speziell bei verbrauchsgünstigen Dieselmotoren interessant.

#### Elektrische PTC-Zusatzheizung

PTC<sup>4</sup>-Elemente erwärmen sich beim Anlegen einer Spannung auf einer Seite. Dadurch kann elektrische Energie in Wärme umgesetzt werden. Gleichzeitig kann durch Umpolen der Spannung die vorher erwärmte Seite des Elements gekühlt werden.

#### Strahlungsheiz- und -kühlkörper

Über Strahlungsheiz- und -kühlkörper kann der Innenraumluft bzw. den Insassen zusätzlich Wärme zugeführt werden. Dadurch wird die bestehende Heiz-, Belüftungs- und Klimaanlage entlastet. Außerdem ist ein geringerer Luftdurchsatz möglich, ohne die Aufheiz- bzw. Ab-

---

<sup>4</sup> PTC ... Positive Temperature Coefficient

kühlungszeit zu erhöhen. Allerdings muß das Kältemittel, z.B. eine Mischung aus Wasser und Glykol, zentral erwärmt bzw. gekühlt werden. Dies erfordert Zu- und Ableitungen, die in das Fahrzeugkonzept integriert werden müssen. Auch das zusätzliche Gewicht des Fahrzeugs ist nicht zu vernachlässigen.

Bei [TAN] werden Strahlungsheizkörper in den Begrenzungsflächen montiert. Diese sorgen dafür, daß die Türen nicht die Außen-, sondern die Innenraumtemperatur annehmen. Strahlungskühlkörper werden ebenfalls installiert, so daß die Türen auch im Sommer die Innenraumtemperatur erreichen können. Der Temperaturunterschied zwischen Insasse und Wand wird gemessen. Dieser Unterschied wird mit einer Regelung betragsmäßig minimiert. Die Seitenfenster sind in ihrer Strahlungsdurchlässigkeit anpaßbar. Das Umschalten von Heizen auf Kühlen geschieht über eine Hystereseckennlinie. Jeder Insasse kann aber für seine Türe eine Feineinstellung vornehmen.

### **Flächenbeheizung**

Neben den Strahlungsheiz- und -kühlkörpern sind vor allem elektrische Heizdecken geeignet, um größere Flächen zu erwärmen. Heizdecken im Fußbereich, auf den Sitzen, und integriert in die Türen und ins Fahrzeugdach ermöglichen eine gezielte Erwärmung bestimmter Stellen der Umschließungsflächen und damit der Insassen.

### **Infrarotheizung für Fußbereich**

Mit einer Infrarotheizung kann z.B. der Fußbereich erwärmt werden. Speziell, wenn die Insassen bei Schnee oder Regen feuchte Füße haben, kann mit diesem System schnell Abhilfe geschaffen werden.

Eventuell ist auch an den Einsatz von Mikrowellen zu denken. Diese haben aber den Nachteil, daß sie hauptsächlich flüssige Stoffe erwärmen, d.h. die Innenraumluft wird dadurch wenig beeinflusst. Diesen Effekt kennt man aus der Mikrowelle.

### **Windschutzscheibenheizung**

Nach [TAK00] könnte zur Enteisung der Windschutzscheibe eine spezielle Windschutzscheibenheizung eingesetzt werden. Für den Enteisungsvorgang wäre aber eine Spannung von ca. 60 V erforderlich, die zur Zeit normalerweise nicht vorhanden ist. Eine andere Möglichkeit besteht darin, daß man die Vereisung im Vorfeld durch Heizen der Windschutzscheibe verhindert. Dies erfordert eine wesentlich geringere Spannung. Außerdem kann es energetisch günstiger sein, die Scheibe die ganze Nacht über leicht zu heizen, als morgens für kurze Zeit die maximal mögliche Leistung einer Windschutzscheibenheizung auszunutzen.

Zusätzlich zum Schutz vor Vereisung können die Windschutz- und Heckscheibenheizung auch zur Beschlagfreihaltung eingesetzt werden. Über einen Feuchtigkeitssensor kann die Steuerung oder Regelung der Heizleistung an eine Taupunktberechnung gekoppelt werden.

### **Sitzklimatisierung**

Bei [GAL] wird Luft, die mit Hilfe von PELTIER-Elementen beheizt oder gekühlt wurde, an verschiedene Stellen der Sitze geleitet. Diese Art der Klimatisierung ist sinnvoll, da dadurch ganz speziell die Insassen klimatisiert werden können. Die Sitztemperatur kann in verschiedenen Zonen beliebig eingestellt werden. Die Regelung könnte dies dazu benutzen, den thermischen Komfort der Insassen zu verbessern. Sie könnte sich erst dann einschalten, wenn der Sitz von einer Person belegt wird. Es ist sicherzustellen, daß Fehl- und Überfunktionen wie z.B. ein zu heißer Sitz vollständig ausgeschlossen sind. Schläft ein Insasse ein und hat er zuvor seine Sitzheizung auf maximale Heizleistung gestellt, muß eine Sicherheitsabschaltung dafür sorgen, daß er keine Verbrennungen erhält. Die Sitzheizung ist energetisch günstiger als eine konventionelle Widerstandsbeheizung, d.h. sie ist speziell für elektrische Fahrzeuge sinnvoll. Erst die Verbindung von Sitztemperierung mit Sitzbelüftung führt zu einer echten Sitzklimatisierung.

Für eine individuelle Klimatisierung eines Insassen könnte ein Klimasitz installiert werden. Dieser wäre wie eine Kapsel aufgebaut und könnte über sehr viele Luftaustrittsöffnungen genau diejenigen Stellen des Körpers beeinflussen, an denen sich der Insasse unbehaglich fühlt.

#### **4.2.2 Luftführung**

##### **Deckenausströmer**

Eine Form einer Sitzklimatisierung ist die Installation von Deckenausströmern. Speziell bei Großraumkabinen mit vielen Insassen wie z.B. in einem Reisebus bieten sie jedem Insassen die Möglichkeit, die Belüftung ganz individuell anzupassen.

##### **Großflächige Luftaustrittsöffnungen**

Die Decke des Fahrzeuginnenraums könnte viele kleine Poren enthalten, aus denen Luft ausströmen kann. Dadurch wäre eine zugfreie und fast unbemerkbare Belüftung des Innenraums möglich.

Vergrößerte Luftaustrittsöffnungen sorgen dafür, daß die Ausblasgeschwindigkeit bei gleichem Luftmassenstrom abgesenkt werden kann. Simulationen haben nach [CUR00] gezeigt, daß die verminderte Luftgeschwindigkeit ausreicht, den gesamten Innenraum komfortabel und schnell zu klimatisieren.

##### **Aktiv verstellbare Luftleitgitter**

Es ist üblich, die Ausblasrichtung der Face-Level-Düsen manuell festzulegen. Über elektrische Schrittmotoren könnten die Luftleitgitter dieser Luftaustrittsöffnungen von der automatischen Klimaregelung so verstellt werden, daß zum einen bestimmte Körperteile der Insassen angeströmt werden und sich zum anderen eine optimale Durchströmung des Innenraums einstellt. Dies erfordert Kenntnisse der Regelung über die Fahrzeuggeometrie und über die unbehaglichen Körperstellen der Insassen.



Die Verstellung der Luftleitgitter und des Luftmassenstromes kann außerdem abhängig von der Sonneneinstrahlung, der Sitzbelegung, der Außen- und der Innenraumtemperatur erfolgen. Bei tiefen Außentemperaturen kann die warme Luft auf die kalten Körperstellen speziell in Fensternähe geleitet werden. Umgekehrt kann im Sommer die kalte Luft gezielt auf heiße Körperbereiche gelenkt werden. Bei großen Regelabweichungen sollten besonders Oberkörper und Kopfbereich angeblasen werden.

Über Fahrzeuggeometriedaten und eine Sitzpositionssensorik kann eine exakt erforderliche Anströmung berechnet werden. Wenn z.B. nur der Fahrer im Wagen sitzt, können alle Luftleitgitter so verstellt werden, daß nur an seiner Position ein komfortables Klima entsteht. Das Flattern der Luftleitgitter kann z.B. durch eine Hysterese Kennlinie verhindert werden.

Bei [HAR] wird ein System mit automatischer Verstellung der Luftleitgitter beschrieben, das auch die Öffnungsweite der Luftaustrittsöffnungen automatisch einstellen kann. Wird die Ausblasrichtung manuell verstellt, stoppt die Automatik so lange, bis eine größere Änderung einer Stör- oder Führungsgröße auftritt. Die Stärke des Eingriffs ist proportional zur Stärke der Änderung.

Auch ein Deckenausströmer z.B. in einem Reisebus könnte automatisch in Stärke und Richtung geregelt werden.

### **Aktiv verstellbare Luftauslaßklappe**

Durch eine automatisch verstellbare Luftauslaßklappe könnte unabhängig von der Stellung eines Schiebedachs eine relativ gleichmäßige Durchströmung des Innenraums aufrecht erhalten werden. Eventuell könnte man auch die Durchströmung bei geöffneten Scheiben verbessern.

### **4.2.3 Umschließungsflächen**

#### **Glas mit steuerbarer Transmission**

Während die Sonneneinstrahlung im Sommer möglichst durch die Scheiben abgehalten werden sollte, um den Innenraum nicht noch zusätzlich aufzuheizen, möchte man im Winter, daß möglichst wenig Wärme den Innenraum verläßt. Idealerweise sollte die Transmission der Scheiben von innen nach außen und außen nach innen unabhängig voneinander einstellbar sein. Die Scheiben können Energie durchlassen, reflektieren und in Wärme umwandeln.

Da für die Windschutzscheibe gesetzliche Vorschriften für die Durchlässigkeit der Strahlung im sichtbaren Solarspektrum bestehen, ist es sinnvoll, zwischen Fahr- und Standbetrieb zu unterscheiden. Im Stand kann auch die Windschutzscheibe verdunkelt werden.

#### **Automatisches Windschutzscheibenrollo**

Wird das Fahrzeug abgestellt, können automatisch Fensterrollos hinter den Scheiben entfaltet werden. Dies ist speziell bei der Windschutzscheibe sinnvoll, da diese gesetzliche Vorgaben für ihre Durchlässigkeit erfüllen muß und nicht von vornherein verdunkelt sein darf.

Allerdings wäre es noch sinnvoller, die Rollos vor den Scheiben, d.h. außen, anzubringen. Dadurch wird die Aufheizung des Innenraums besser verhindert, während im ersten Fall hauptsächlich eine schnelle Aufheizung des Innenraums durch direkte Sonneneinstrahlung unterbunden wird.

### **Entfrostung und Beschlagfreihaltung**

Beschlaghemmende Scheiben können zum Schutz vor Scheibenbeschlag und -vereisung eingesetzt werden. Da sie nur die Anlagerung hemmen, bieten sie alleine keinen generellen Schutz.

#### **4.2.4 Beeinflussung der Feuchtigkeit**

##### **Luftbefeuchtung**

Speziell in der Luftfahrt ist eine Luftbefeuchtung erwünscht, da die Luftfeuchtigkeit der Außenluft in großen Höhen sehr stark abnimmt.

Bei der Fahrzeugklimatisierung kann das zur Befeuchtung erforderliche Wasser z.B. aus gespeichertem Regenwasser oder aus bei der Entfeuchtung abgeschiedenem Wasser gewonnen werden.

##### **Lufttrocknung**

Die Luft kann z.B. durch starkes Kühlen oder mit einem adsorptiven Filter entfeuchtet werden.

##### **Sitztrockner**

Die Feuchtigkeit, die sich am Sitz durch Schwitzen der Insassen sammelt, kann entweder abgeleitet oder dort, wo sie entsteht, verdunstet werden.

## **4.3 Sensoren**

### **4.3.1 Temperatursensoren**

Zusätzliche Temperatursensoren z.B. im Fußbereich ermöglichen die Messung der Temperaturverteilung. Nach [FRE] verändern herkömmliche Innenraumtemperatursensoren aber mit der Zeit ihre Eigenschaften. Diese Einflüsse können über zeitabhängige Kennlinien zum Teil kompensiert werden. Zum anderen können die Sensoren auch bei der Inspektion ausgetauscht werden. Viel besser ist allerdings der Einsatz neuer Temperatursensoren, die langsamer oder überhaupt nicht altern.

## Infrarotsensoren

Ein Infrarotsensor mißt die Wärmestrahlung einer Oberfläche. Die Messung erfolgt berührungslos aus der Ferne. Werden mehrere Infrarotsensoren in einem zweidimensionalen Infrarotsensorarray angeordnet, kann man eine Temperaturkarte der beobachteten Oberfläche erhalten. Ein einziger Infrarotsensor, der die Oberfläche abtastet ist aufgrund der anfälligen und teuren mechanischen Nachführung nicht sinnvoll. Ein Infrarotsensor könnte den vorhandenen Innenraumtemperaturfühler oder andere herkömmliche Temperatursensoren nur dann ersetzen, wenn eine Referenztemperatur auf der beobachteten Oberfläche bekannt wäre. Dies liegt daran, daß die Temperatur nicht nur von der abgestrahlten Wärme, sondern auch vom Material der Oberfläche abhängt.

Das Verhalten des Infrarotsensors muß dem langsamen Änderungsverhalten der Regelstrecke Innenraum angepaßt werden. Seine Ausgangsspannung liegt zwischen zehn und mehreren hundert  $\mu\text{V}$ , d.h. für das Meßsignal ist ein präziser Verstärker erforderlich. Er muß unter allen Betriebsbedingungen eines Fahrzeugs einsatzbereit sein. Die Auflösung und damit die Anzahl der Pixel muß ausreichen, um z.B. das thermische Empfinden der Insassen über deren Temperaturverteilung im Gesicht zu bestimmen.

Die Möglichkeit, örtlich aufgelöste Temperaturkarten zu messen, macht den Infrarotsensor speziell für eine Regelung des thermischen Komforts interessant. Die Messung dieser Temperaturverteilung mit herkömmlichen Sensoren, die möglichst direkt am Insassen angebracht werden müssen, ist viel zu aufwendig bzw. nicht möglich.

Die automatische Verstellung der Luftleitgitter kann abhängig von den Signalen eines Infrarotsensorarrays erfolgen. Die Sitzbelegung kann in Kombination mit einem Sitzbelegungssensor ermittelt werden. Die Nackenstützen, Spiegel und Sonnenblenden könnten abhängig von der Position der Insassen automatisch eingestellt werden. Die Kleidung der Insassen kann erkannt werden, indem man die Kanten in den Temperaturkarten dazu benutzt, die Oberfläche der Insassen in Bereiche mit gleichem Isolationsgrad einzuteilen. Der Aktivitätsgrad der Insassen kann teilweise bestimmt werden, indem man den Infrarotsensor als Bewegungssensor einsetzt.

Nach [TUR] ersetzt ein Infrarotsensor den Temperaturfühler und den Sonnensensor, da er direkt die Haupttemperatur und somit direkt eine zum thermischen Komfort korrelierte Größe mißt. Die Störgrößenaufschaltung der Sonneneinstrahlung über eine Korrektur des Innenraumtemperatursollwertes wäre nicht mehr erforderlich. Bei ausgeschaltetem Motor kann sich abhängig von der vom Infrarotsensor gemessenen Wärmebelastung im Innenraum automatisch das Gebläse einschalten, um den Innenraum mit frischer, kälterer Luft zu versorgen.

Bei [GEN] wird die Entfernung und die Position eines Insassen mit einem Infrarotversatzsensor gemessen. Diese Informationen werden hauptsächlich dazu benutzt, um zu entscheiden, ob der Airbag ausgelöst werden darf. Die Position wird ermittelt, indem sich der Sensor von einer optimalen Position langsam nach außen tastet. Er sucht nicht das Maximum in seinem Sichtfeld, sondern er tastet sich nur bis zu einer vorgegebenen Schwelle der vom Insassen abgegebenen Wärmestrahlung vor.

Bei [RUE] wird ein Sonnensensor beschrieben, der aus einem Tageslicht- und einem Infrarotsensor aufgebaut ist. Tageslicht mit niedrigen Infrarotanteilen deutet auf keine direkte Sonnenstrahlung hin. Direkte Sonnenstrahlung enthält hohe infrarote Anteile. Deshalb legt man für beide Sensorelemente Kennlinien für Tageslicht mit geringem Infrarotanteil und Tageslicht bei direkter Sonneneinstrahlung an. Die Messung des kombinierten Sonnensensors, die sich zwischen diesen Linien befindet, kann mit einer weiteren Kennlinie einer Sonnenstärke zugeordnet werden. Dieses Verfahren mißt somit eine für den Insassen bewertete Sonnenstärke. Gleichzeitig ist es weitgehend unabhängig von unterschiedlichen Innenraumdekors und -farben im Bereich des Armaturenbretts, wo der Sonnensensor installiert wird.

### **Sonnensensoren**

Im Sommer wird die Wirkung der Sonneneinstrahlung teilweise durch leichtere Bekleidung verstärkt. Bei [REI] wird eine Klimatisierungsanlage beschrieben, die den Innenraum abhängig von der Sonneneinstrahlung kühlt. Dazu wird ein Sonnensensor installiert, der seine Daten über ein serielles Bussystem an viele Anwendungen weitergibt. So wird die Messung des Sonnensensors außerdem dazu benutzt, die Innenraumbeleuchtung tageszeitabhängig zu regeln.

Soll nur die Intensität der Sonneneinstrahlung gemessen werden, kann mit Hilfe einer Fish-Eye-Linse ein möglichst großer Teil der Sonneneinstrahlung an den Sensor geführt werden. Die Richtung der Sonne kann z.B. mit mehreren Sonnensensoren bestimmt werden, die die Sonneneinstrahlung aus verschiedenen Richtungen messen..

Nach [SAM] wird ein Sonnensensor meist unter einer FRESNEL-Linse angebracht, so daß die Richtung des einfallenden Lichts keine große Auswirkung auf die Messung der Intensität hat. Wenn nun auf beiden Fahrzeugseiten jeweils ein Sonnensensor mit FRESNEL-Linse angebracht ist und die Sonne sehr tief und seitlich steht, messen beide Sensoren trotzdem eine hohe Sonnenintensität. Auch dem auf der sonnenabgewandten Seite sitzenden Insassen wird ein kühler Luftstrom zugeführt, obwohl er nicht direkt von der Sonne bestrahlt wird. Man kann dieses Problem umgehen, indem man die Differenz der beiden Sonnensensoren mit einer Kennlinie verstärkt, so daß der wahrgenommene tiefe und seitliche Sonnenstand zur passenden Reaktion der automatischen Klimaregelung führt.

Bei [STR] wird der Fahrzeuginnenraum in Zonen eingeteilt und die Luftaustrittsöffnungen werden diesen Zonen zugeteilt. Außerdem besitzt die Heiz-, Belüftungs- und Klimaanlage für jede Zone einen Sonnensensor und getrennten Luftwege. Die Luftparameter an den Luftaustrittsöffnungen dieser Zone werden nun abhängig vom Sonnensensor geregelt. Die Sonnensensoren für die einzelnen Zonen können z.B. bei einer Vierzonenklimatisierung in einem Sensor zusammengefaßt werden. Die vier Sonnensensoren sind so angeordnet, daß sie jeweils die Strahlung messen, die auf ihre Zone hauptsächlich einwirkt.

Auch die Ausblasrichtung der Luftaustrittsöffnungen könnte nach [HEI] über eine automatische Verstellung der Luftleitgitter abhängig von den Signalen mehrerer Sonnensensoren erfolgen. Somit könnten Insassen bei starker Sonneneinstrahlung direkt angeströmt werden.

Ein Sonnensensor sollte seine Werte mit einer bestimmten Verzögerung liefern, da sein Signal durch kurzfristige Abdeckungen durch z.B. Bäume verfälscht sein kann. Bei [WAL] wird der Sonnensensor in den Innenrückspiegel montiert. Dadurch ist er für die Insassen unsichtbar und erfüllt aber trotzdem seine Aufgabe. Der Sensor sollte im Spiegelfuß montiert werden, so daß er nicht verstellbar ist.

Nach [BEY] kann die Sonnenposition speziell für eine Mehrzonenklimatisierung auch aus Datum, Zeit, Position und Lage des Fahrzeugs bestimmt werden. Diese Informationen kann man von einem Navigationssystem, z.B. dem Satellitennavigationssystem GPS, erhalten. Die Geometrie oder ein Versuch liefert für jede Kombination von Azimuth und Elevationswinkel Werte für jede Zone, die in einer Tabelle abgelegt werden. Der Azimuth legt fest, welche Zone bestrahlt wird. Der Elevationswinkel bestimmt, wie stark die Belastung der Sonneneinstrahlung für die unterschiedlichen Zonen ist. Ein Sonnensensor mißt die Intensität der Sonne. Die automatische Klimaregelung kann diese Informationen nutzen, um das Innenraumklima komfortabler zu gestalten.

### **Äquivalenztemperatursensoren**

Die Äquivalenztemperatur ist eine Größe, die direkt proportional zum thermischen Komfort ist. Eine genaue Definition wird in *Kapitel 5.1.4 (Insassenklimatisierung)* gegeben. Die Äquivalenztemperatur kann indirekt gemessen werden. Eine Kugel, die beheizt werden kann, enthält einen Temperatursensor. Aus der Heizleistung und der gemessenen Temperatur erhält man die Äquivalenztemperatur.

#### **4.3.2 Feuchtigkeitssensoren**

Feuchtigkeitssensoren messen die relative Luftfeuchtigkeit. Dies ermöglicht eine Feuchterege- lung, die den thermischen Komfort und damit die Behaglichkeit und Sicherheit der Insassen verbessern würde.

Die Position des Feuchtigkeitssensors ist nach [TAK00] entscheidend, wenn damit ein Beschlagen der Scheiben verhindert werden soll. Wird er zu nahe oder zu weit entfernt von den Luftaustrittsöffnungen angebracht, ist seine Messung nicht repräsentativ für die gesamte Scheibe.

Die Luft wird frischer empfunden, wenn Temperatur und Feuchtigkeit abnehmen. Durch Be- feuchten und Heizen kann verhindert werden, daß die Luft als zu kalt oder frisch wahrgenommen wird. Umgekehrt wird bei konstanter Temperatur ein Klima wärmer empfunden, wenn die Luftfeuchtigkeit zunimmt, d.h. es muß entweder entfeuchtet oder gekühlt werden, so daß sich der thermische Komfort nicht verschlechtert. Eine gezielte Feuchtigkeitserhöhung ist nur begrenzt möglich, da die Luftfeuchtigkeit im Innenraum sonst so hoch sein kann, daß die Scheiben beschlagen, wenn die Temperatur der Scheiben unter der Innenraumtemperatur liegt. Allerdings darf die Luft auch nicht zu stark entfeuchtet werden, da die Luft dann zu trocken wird, was ebenfalls unkomfortabel ist.

Nach [DAVc] kann die Kompressorleistung abhängig von der Luftfeuchtigkeit und der Temperatur der Umgebung festgelegt werden. Die Luft wird dann nur so stark entfeuchtet, daß bei einer angenommenen Feuchtigkeitszufuhr durch die Insassen kein Beschlag an den Scheiben auftreten kann. Dies spart Energie, da der Kompressor so geregelt werden kann, daß er nur so viel Energie verbraucht, wie zur Beschlagfreihaltung unbedingt erforderlich ist.

Bei [SCHb] wird ein Regensensor beschrieben, der gleichzeitig den Beschlag der Scheibe messen kann. Dazu wird Infrarotlicht aus mehreren Quellen schräg auf die Scheibe gelenkt, zweimal gebrochen, reflektiert und an mehreren Stellen detektiert.

### **Taupunktsensor**

Der Taupunktsensor ist eine Kombination von Temperatur- und Feuchtigkeitssensor. Zur Beschlagfreihaltung ist es wichtig, den Taupunkt zu kennen. Abhängig von den Werten eines Taupunktsensors kann z.B. die Verdampferaustrittstemperatur und -feuchtigkeit geregelt und die Stärke des Defrostbetriebs bestimmt werden. Dadurch kann auch ein Beschlag der Scheiben von außen verhindert werden. Dieser Fall tritt auf, wenn im Fahrzeuginnenraum stark gekühlt wird und außerhalb des Fahrzeugs ein tropisches Klima mit hoher Luftfeuchtigkeit herrscht.

Bei [TAK00] wird eine Windschutzscheibenheizung beschrieben, die ständig eingeschaltet ist, um ein Vereisen der Windschutzscheibe zu verhindern. Nur wenn der Taupunkt z.B. in der Nacht kurzfristig sinkt, wird die Scheibe nicht beheizt. Dieser generelle Antifrostbetrieb benötigt weniger Energie als ein allmorgendlicher Defrostbetrieb.

### **Schweißsensor**

Schweißsensoren messen die Feuchtigkeit, die von den Insassen zur eigenen Kühlung speziell an Kontaktflächen wie Lenkrad und Sitz abgegeben wird. Sie registrieren also eine mögliche Abweichung des Körpers vom komfortablen Zustand. Dabei ist zu berücksichtigen, daß leichtes Schwitzen unter bestimmten Bedingungen auch als angenehm empfunden wird.

### **4.3.3 Multifunktionssensoren für die Luftqualität**

Nach [HOE00a] kann eine einfache und reproduzierbare Bewertung von Gerüchen mit Hilfe chemischer Sensoren bzw. mit einer elektronische Nase geschehen. Dazu werden komplexe Geruchsmuster mit Erfahrungsmustern verglichen:

Sensorarray → Musterextraktion → Klassifikation

Elektronische Nasen können als intelligente Brandmelder, zur Qualitätskontrolle und Gefahrenerkennung oder wie auf der Internationalen Raumstation zur Erkennung von Personen eingesetzt werden. Die Regelung des Geruchs ist erst dann möglich, wenn geeignete Aktuatoren zur Verfügung stehen, die z.B. den Geruch in einem Fahrzeuginnenraum künstlich beeinflussen können.

Bei [ADL] wird ein spezielles Multifunktionssensorsystem beschrieben:

Normalerweise wird von Sensoren entweder ein kontinuierliches Signal ausgesendet oder ein Warnsignal gegeben, wenn ein bestimmter Grenzwert überschritten wurde. Ein Multifunktionsensorsystem ist in der Lage mit Hilfe unscharfer Schlüsse (FUZZY-Logik) und zu lernenden bzw. gelernten Regeln (Neuronale Netze) ein Signal auszusenden, wenn ein Zustand eintritt, der sich aus den unterschiedlichsten unscharfen Teilbedingungen ergibt. Ein Beispiel für die Art einer solchen Schlußfolgerung ist die folgende Argumentation: Es ist warm und es scheint die Sonne, d.h. es ist schönes Wetter.

Zu Beginn wird die Art und die Anzahl der notwendigen Sensoren festgelegt. Meist handelt es sich bei einem Multifunktionsensorsystem um ein heterogenes Sensorarray im Gegensatz zu einem homogenen Infrarotsensorarray, das aus gleichartigen Infrarotsensoren aufgebaut ist. Das Multifunktionsensorsystem wird dann mit Neuronalen Netzen auf verschiedene Stoffe trainiert, d.h. es wird eine Art Musterdatenbank aufgebaut bzw. es entsteht ein Modell für die Geruchserkennung. Das Modell ist funktionstüchtig, wenn alle Lerndaten richtig interpretiert werden und nicht schon dann, wenn nur der Ausgangsfehler minimiert wurde. Im Merkmalsraum der Musterdatenbank entstehen Cluster, die Eigenschaften bilden. Diese Cluster können sich überlappen. Die Farbe Grün enthält z.B. Blau- und Gelbanteile.

Multifunktionsensoren messen z.B. Temperatur, pH-Wert, Leitfähigkeit und Trübung. Diese Merkmale werden durch FUZZY-Clusterung in Zugehörigkeiten zu Objekten, d.h. Stoffen, umgewandelt. FUZZY-Logik ermöglicht es, Trends zu erkennen. Daraus lassen sich Aussagen bzw. unscharfe Erwartungsoperatoren herleiten. Ein Beispiel hierfür ist die folgende Aussage: „Dies ist sehr wahrscheinlich ein Gemisch aus Sauerstoff, Stickstoff und Helium.“

### **Schadstoffsensor**

Nach [FAN00] wird verschmutzte Luft bei zunehmender Temperatur und Feuchtigkeit immer unangenehmer empfunden. Bei manchen Chemikalien steigt außerdem die Emissionsrate. Zum einen kann man also bewußt die Temperatur und die Luftfeuchtigkeit verringern, wenn eine zu hohe Schadstoffbelastung gemessen wird. Zum anderen kann man versuchen, regelnd auf die Schadstoffbelastung einzugreifen, wenn ein Schadstoffsensor zur Verfügung steht.

Abhängig von der Änderung des Schadstoffgehalts der Frischluft kann kurzzeitig in einen Umluftbetrieb gewechselt werden. Nach einer festgelegten Zeit muß aber wieder ein Umschalten auf teilweise Frischluftbetrieb erfolgen, da sonst der Sauerstoffgehalt der Innenraumluft unter ein notwendiges Minimum sinken würde. Ein solches System, das nur auf Änderungen des Schadstoffgehalts reagiert, ist nach [HAN00] schon im Einsatz. Bei [HOE] wird bei einer erhöhten Schadstoffkonzentration z.B. an einer Ampel oder im Stau automatisch auf Umluftbetrieb umgeschaltet.

Eine Verschlechterung des Sauerstoffgehalt wird nur verzögert wahrgenommen. Deshalb ist es besonders wichtig, daß eine Automatik eingreift, bevor die Insassen eine Verschlechterung wahrnehmen.

#### 4.3.4 Sitzbelegungssensoren

Die Sitzbelegung kann über Drucksensoren, einfache Schalter oder einen Gurtsensor erkannt werden. Ein Gurtsensor alleine reicht nicht aus, da man nicht davon ausgehen kann, daß sich alle Insassen anschnallen. Mit einem Schalter kann man nur erkennen, ob sich etwas auf dem Sitz befindet. Die Kombination von Gurtsensor und Schalter ist schon relativ aussagekräftig. Noch besser ist eine kontinuierliche Druckmessung und eine Messung der Druckverteilung. Hiermit können Aussagen über Gewicht, Bewegung und belastete Fläche herangezogen werden, um zu entscheiden, wer oder was sich auf diesem Sitz befindet. Auch die Informationen eines Infrarotsensorarrays können mit den oben beschriebenen Sitzbelegungssensoren kombiniert werden.

Die Erkennung der Sitzbelegung und der Sitzposition eines Insassen ist speziell für die Auslösung der Airbags und die komfortable Klimatisierung der Insassen sinnvoll. Bei [MUE] wird der Luftstrom auf nicht belegte Sitze geleitet. Dadurch kann ein erhöhter Luftmassenstrom den Innenraum schneller klimatisieren, ohne lästige Zugserscheinungen hervorzurufen. Es wird also zwischen Innenraum- und Insassenklimatisierung unterschieden.

#### 4.3.5 Spezielle Sensoren

##### Wärmelastsensoren

Die Wärmemenge, die von der Innenraumeinrichtung, z.B. den Sitzen und dem Armaturenbrett, und den Umschließungsflächen aufgenommen wird, soll von einem Wärmelastsensor gemessen werden.

##### Wärmestromsensoren

Der Wärmestrom, der aufgrund des Unterschieds zwischen Außen- und Innenraumtemperatur entsteht, soll von einem Wärmestromsensor gemessen werden.

##### Herzfrequenzsensoren

Die Herzfrequenz des Insassen soll sich nicht aufgrund von Klimazuständen verändern, d.h. die Messung der Herzfrequenz gibt an, ob z.B. die Änderung des Innenraumklimas zu schnell erfolgt. Der Herzfrequenzsensor könnte in das Gurt integriert sein. Natürlich kann sich die Herzfrequenz auch durch andere Ursachen wie z.B. kritische Verkehrssituationen oder Aufregung verändern. Deshalb sollte ein Herzfrequenzsensor immer nur als Zusatzinformation hinzugezogen werden.

#### 4.3.6 Fusion von Sensordaten

Bei der Beschreibung der Sensoren in *Kapitel 4.3 (Sensoren)* wurden schon oft Kombinationen von Sensoren angesprochen. Meist wurde nur erwähnt, daß man die Daten von zwei Sensoren verknüpfen kann. Im folgenden wird näher darauf eingegangen, wie man die Daten unterschiedlicher Sensoren benutzen kann, um zusätzliche Informationen zu gewinnen. Dabei kann man zwei unterschiedliche Möglichkeiten zur Fusion der Sensordaten unterscheiden:



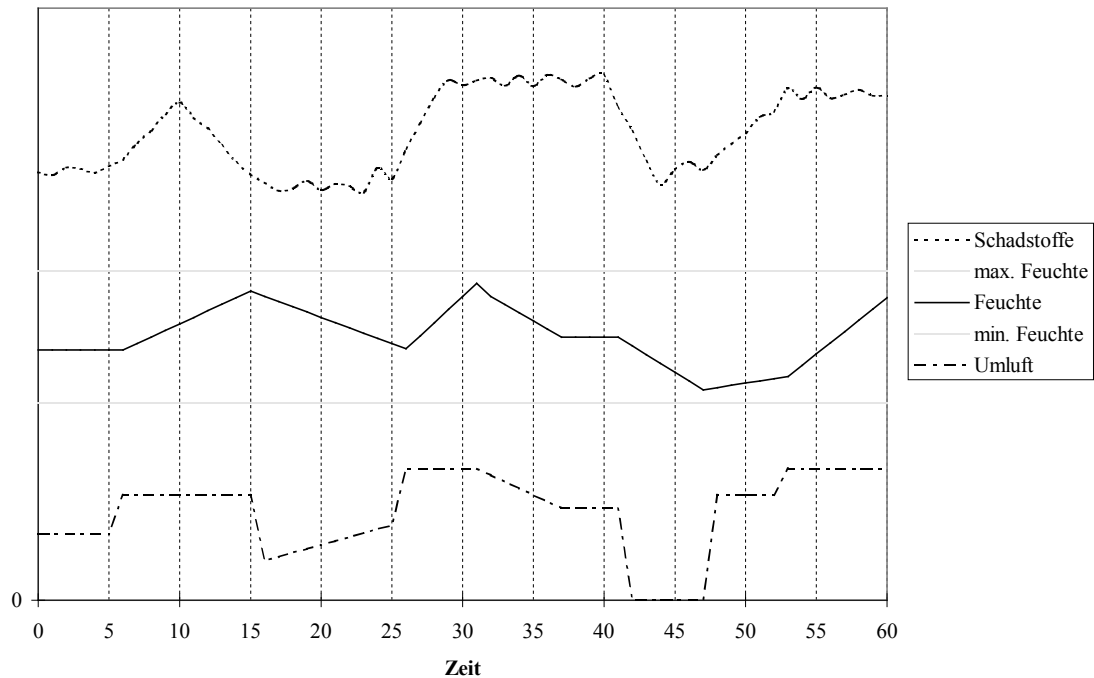
selektiv	Abhängig von äußeren Bedingungen wie der Zeit wird z.B. von Temperatur- auf Feuchteregelung umgeschaltet oder statt dem Innenraumtemperatursensor ein Infrarotsensor als Referenz herangezogen. Eine Möglichkeit, dies zu realisieren, bietet die KALMAN-Filtertechnik.
gleichberechtigt	Es werden immer alle Sensoren berücksichtigt.
kombinierend	Es werden neue Regelgrößen gebildet. So führen Temperatur und Feuchtigkeit zur Enthalpie und die Messung der Komfortparameter zum Komfort. Man kann Modelle benutzen, aus denen Formeln für die neuen Regelgrößen abgeleitet werden können.

Um immer mehr physikalische Größen zu erfassen, werden immer neue Sensoren eingesetzt. Wenn man statt vieler Standardregelkreise zu einer Mehrgrößenregelung übergeht, benötigt nicht mehr jeder Aktuator seinen speziellen Sensor. Um Sensoren vielseitiger einzusetzen, kann man ihre Daten z.B. über ein Bussystem den unterschiedlichsten Informations- und Regelungssystemen zur Verfügung stellen. In der Fusion von Sensordaten liegt ein großes Potential für Innovationen und Verbesserungen. In der Luft- und Raumfahrt ist dieser Trend schon lange verbreitet.

Im folgenden sollen zwei Beispiele zeigen, wie man durch gleichberechtigte oder selektive Fusion der Daten unterschiedlicher Sensoren den Komfort der Insassen steigern kann.

### **Schadstoff- und Feuchtigkeitssensor**

Bei [BAR] wird abhängig von einem maximalen Schadstoffgehalt und einer maximalen Feuchtigkeit im Innenraum versucht, den Umluftstrom so mit einem Frischluftanteil zu versorgen, daß die maximale Feuchte nicht überschritten und bei verschmutzter Außenluft so lange wie möglich im Umluftbetrieb verharrt wird. Dabei erfolgt die Mischung der Frischluft mit der Umluft in einem kontinuierlich einstellbaren Mischverhältnis. Ist die Außenluft schadstoffarm, wird im Innenraum ein Feuchtesollwert eingeregelt, so daß sich für den Insassen ein komfortables Klima ergibt.



**Abbildung 21: Zeitverläufe einer Feuchteregelung mit schadstoffabhängigem Frischluftanteil nach [BAR]**

### Sonnen- und Infrarotsensor

Der Sonnensensor liefert zusammen mit Geometriedaten und einer Sitzpositionssensorik eine genaue Information über die sonnenbestrahlten Körperteile. Da die Sonne manchmal verdeckt wird, ist es sinnvoll, hauptsächlich die Information eines Infrarotsensors zur Erkennung der Sonnenbestrahlung heranzuziehen. Dieses Signal ist stark verrauscht, bietet aber auch Informationen über Aktivität, Kleidung, Größe und Position der Insassen. Immer wieder kann mit Hilfe des Sonnensensors eine Stützmessung erfolgen, die den Bereich der Sonnenbestrahlung wieder exakt festlegt und eine genauere Bewertung des Infrarotsensorsignals ermöglicht.

## 5. Neue Regelungskonzepte

*In diesem Kapitel werden neue Regelungskonzepte vorgestellt, mit denen ein besserer thermischer Komfort erreicht werden kann. Es werden sowohl neue Konzepte zur Komfortregelung als auch bekannte Konzepte aus der Regelungstechnik angeführt.*

### 5.1 Konzepte zur Komfortregelung:

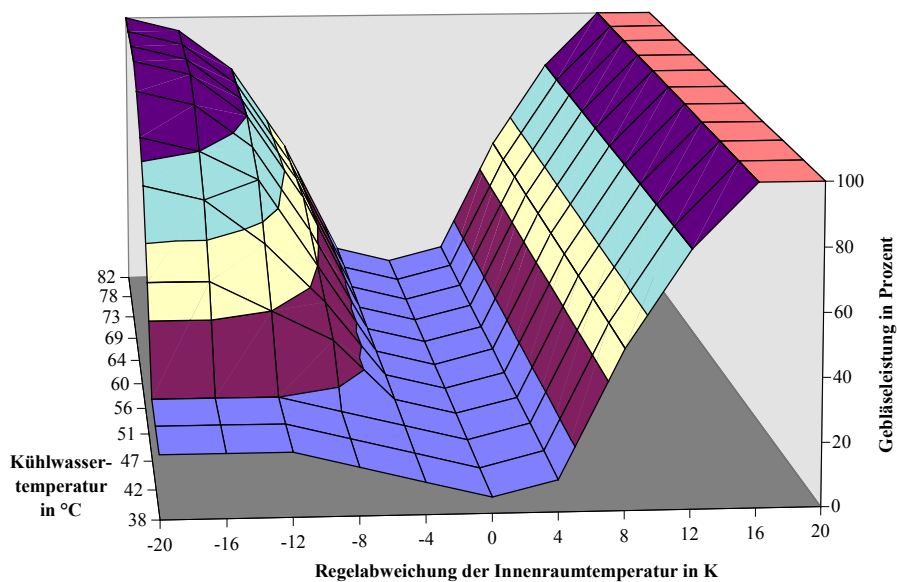
Bei der Regelung des Komforts bietet es sich an, den Insassen als Regelstrecke zu wählen. Die Beschreibung der Regelstrecke Innenraum oder Insasse sollte mit einem möglichst einfachen Modell erfolgen. Aufgrund der zahlreichen Phänomene wie Ein- und Aussteigen, der nichtlinearen Zusammenhänge und anderen Einflüssen dürfen die Modelle aber auch nicht zu einfach sein, da sie sonst nur unter ganz speziellen Rahmenbedingungen gelten würden. Um dies zu umgehen, kann man das Gesamtsystem auch in einfachere Teilsysteme zerlegen, die anschließend wieder miteinander verknüpft werden.

Aus einer physikalischen Herleitung erhält man meist nichtlineare Differentialgleichungen, die physikalische Parameter enthalten. Nach [GIO93] können viele dieser Größen nicht gemessen werden. Aus nicht ausschließlich physikalischen Herleitungen erhält man Gleichungen, die auch nicht physikalische Parameter enthalten können. Diese Größen sind überhaupt nicht direkt meßbar, sondern müssen beobachtet werden. Die Tatsache, daß man nicht alle Größen direkt bzw. nur mit sehr großem Aufwand messen kann, berechtigt die Verwendung von Modellen, die meßbare und nicht meßbare Größen enthalten und mit denen die nicht meßbaren Größen berechnet werden. Deshalb enthalten die meisten Konzepte zur Komfortregelung Modelle oder modellhafte Vorstellung vom Verhalten der Regelstrecke.

Eine echte Komfortregelung erhält man z.B. dann, wenn man anstelle der Regelabweichung der Innenraumtemperatur eine Abweichungen vom komfortablen Zustand als Eingang des Reglers wählt. Dies könnte z.B. der Abstand eines Punktes von einer Komfortgeraden sein. Als Achsen der Ebene kann man Innenraumtemperatur und Sonneneinstrahlung wählen.

### 5.1.1 Kennfeldregelung

Die Eingangswerte des Reglers legen über Kennfelder die Ausgangswerte eindeutig fest. In der Menge der Eingangsgrößen sind auch die dem Regler zugeführten Regelabweichungen enthalten. Die Kennfelder bilden die Regelgesetze ab und enthalten somit die gesamte Information über den Regler. Existiert wie z.B. bei einem klassischen Regler nur ein Kennfeld, so kann der Regler ganz einfach durch sein Kennfeld dargestellt werden. Kennfelder sind meist mathematisch schwer beschreibbare Funktionen, die man intuitiv gewonnen, modellgestützt berechnet oder versuchsgestützt festgelegt hat (siehe *Abbildung 22: Reglerkennfeld, das nach [DAVa] in Abhängigkeit von der Regelabweichung der Innenraum- und Kühlmitteltemperatur die Gebläseleistung vorgibt*).



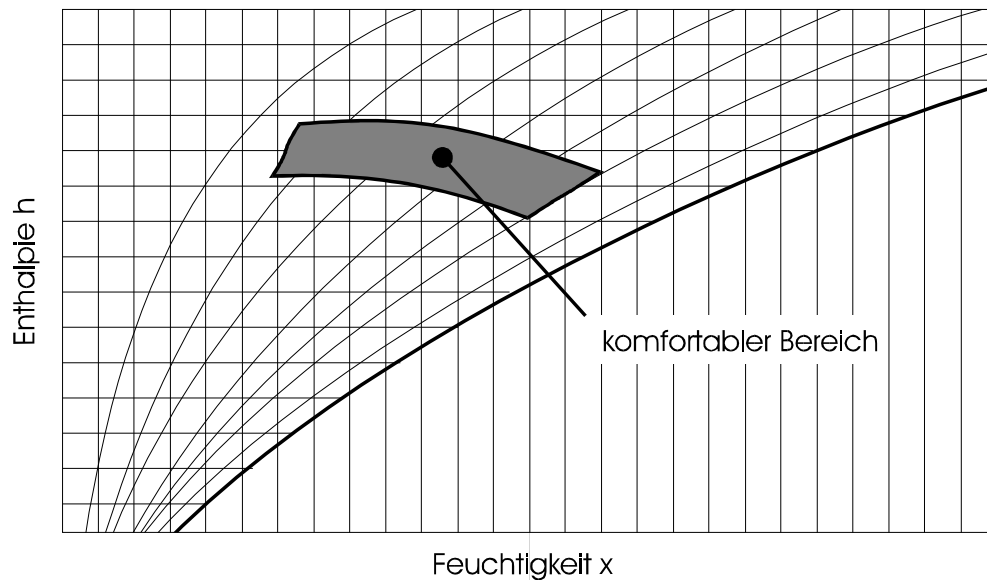
**Abbildung 22: Reglerkennfeld, das nach [DAVa] in Abhängigkeit von der Regelabweichung der Innenraum- und Kühlmitteltemperatur die Gebläseleistung vorgibt**

Wenn sich die Regelabweichung in der Nähe von Null befindet, muß nur ein minimaler Luftmassenstrom aufrecht erhalten werden. Bei sehr tiefen Kühlwassertemperaturen verhindert der Regler, daß zu kalte Luft in den Innenraum einströmt. In allen anderen Fällen wird eine hohe Gebläseleistung gewählt, um die Regelabweichung der Innenraumtemperatur möglichst schnell abzubauen.

### 5.1.2 Feuchtigkeitsregelung

#### Behaglichkeit im hx-Diagramm

Nach [KRA80] läßt sich das menschliche Behaglichkeitsempfinden in Abhängigkeit von Außentemperatur und Jahreszeit im hx-Diagramm darstellen (siehe *Abbildung 23: Schematische Darstellung des komfortablen Bereichs im hx-Diagramm*).



**Abbildung 23: Schematische Darstellung des komfortablen Bereichs im hx-Diagramm nach [KRA80]**

Die optimale Luftfeuchtigkeit ist abhängig von der Sonneneinstrahlung und der Außentemperatur. Mit zunehmender Außentemperatur sollte die Luftfeuchtigkeit abnehmen. Deshalb erhält man im hx-Diagramm je ein Behaglichkeitsfeld für Sommer und Winter.

### Enthalpie als Regelgröße

Nach [FAN00] besteht ein linearer Zusammenhang zwischen der Akzeptanz der Luft durch die Insassen und der Enthalpie der Luft. Da die Klimatisierung des Innenraums hauptsächlich auf dem Austausch von Luft beruht, ist eine Enthalpiebetrachtung sinnvoll. Möchte man zusätzlich den Wärmeaustausch des Innenraums mit der Umgebung berücksichtigen, könnte man eine Entropiebilanz heranziehen.

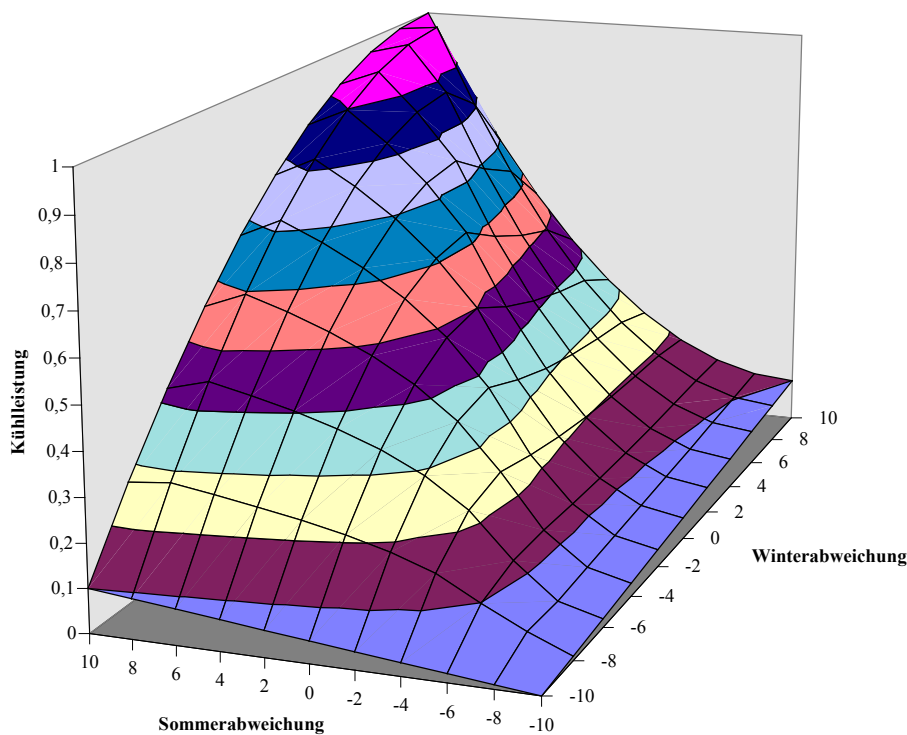
Bei [SHAa] wird die Innenraumtemperatur mit einem kugelförmigen Temperatursensor gemessen. Eine Messung der Feuchtigkeit erfolgt ebenfalls. Daraus erhält man die Enthalpie durch eine kombinierende Fusion dieser Sensordaten. Aus den Sollwerten für Innenraumtemperatur und Feuchtigkeit erhält man einen Enthalpiesollwert. Die Differenz zwischen Soll- und Istwert der Enthalpie wird einem Regler zugeführt. Der durch den Enthalpiesollwert festgelegte Punkt im hx-Diagramm muß vom Regler erreicht und anschließend gehalten werden. Es wird ein PID-Regler mit einem nachgeschalteten nichtlinearen Glied eingesetzt. Das nichtlineare Element ist ein Zweipunktglied mit Hysterese und einer Rückführung über ein PT1-Glied. Dadurch erhält man als Ausgangswert eine binäre Schaltfolge.

Nach [SHAb] kann ein Temperatur- und Feuchtigkeitsregler in Gebäuden leicht zum Komfortregler werden, indem man aus Innenraumtemperatur und Feuchtigkeit eine scheinbare

Temperatur ermittelt, die den Grad des Hitzestresses angibt und somit eine Aussage über den thermischen Komfort macht. Dies liegt daran, daß der Luftmassenstrom und die Sonneneinstrahlung bei der Klimatisierung von Gebäuden einen geringeren Einfluß auf den thermischen Komfort haben und somit nicht berücksichtigt werden müssen.

### 5.1.3 Regelgröße Komfortindex

Bei [ASO] wird aus den Komfortparametern Luftmassenstrom, Luftaustrittstemperatur, Sonneneinstrahlung, Außen- und Innenraumtemperatur eine gewichtete Summe, ein Komfortindex, gebildet. Die Gewichtungsfaktoren lassen sich an den augenblicklichen Zustand anpassen, d.h. sie sind adaptiv. Es existieren unterschiedliche Sätze von Gewichtungsfaktoren für Sommer- und Winterbedingungen. *Abbildung 24: Intuitiv erstelltes Reglerkennfeld für die Kühlleistung, das von einem Komfortindex abhängig ist, der für Sommer- und Winterbedingungen unterschiedlich berechnet wird zeigt ein Kennfeld, das die Stellgröße abhängig von den Regelabweichungen für den Sommer- und Winterkomfortindex angibt.*



**Abbildung 24: Intuitiv erstelltes Reglerkennfeld für die Kühlleistung, das von einem Komfortindex abhängig ist, der für Sommer- und Winterbedingungen unterschiedlich berechnet wird**

Unter Sommerbedingungen versteht man Umgebungsbedingungen, bei der ein Kühlvorgang erforderlich ist. Winterbedingungen sind Umgebungsbedingungen, bei denen ein Heizvorgang erforderlich ist. Die Sommerabweichung erhält man als Differenz von Sommerkomfortindex und Sommersollkomfortindex. Analog erhält man die Winterabweichung. Steigt z.B. die In-

nenraumtemperatur über die Innenraumsolltemperatur, so wird sich dies im Sommer- und Winterkomfortindex durch eine Erhöhung der Sommer- bzw. Winterabweichung niederschlagen. Allerdings ist ein kühler Luftstrom im Sommer komfortabler. Deshalb wird die Kühlleistung ihr Maximum bei einer Erhöhung der Sommerabweichung schneller erreichen als bei einer Erhöhung der Winterabweichung. Die Koeffizienten im Sommer- bzw. Winterkomfortindex müssen so gewählt werden, daß sie das typische Komfortempfinden unter diesen Bedingungen ausdrücken.

Das oben dargestellte Kennfeld ist zwar qualitativ anschaulich, doch die intuitive Festlegung der einzelnen Werte ermöglicht meist keine wirklich komfortable Klimaregelung. Da man speziell in den Übergangsbereichen keine genauen Angaben über das ideale Verhalten des Reglers machen kann, sind relativ harte Übergänge zwischen den minimalen und maximalen Stellgrößen sinnvoll. Auch die Luftverteilung könnte abhängig von einer Sommer- und einer Winterabweichung angegeben werden.

#### 5.1.4 Insassenklimatisierung

Die Hauttemperatur ist ein Maß für den thermischen Komfort der Insassen. Frösteln, Zittern, Schwitzen, kalte Hände und Füße oder eine kalte Nase sind Indikatoren für die thermische Unbehaglichkeit. Es gibt unterschiedliche Ansätze, die thermische Behaglichkeit in Zahlen zu fassen:

- mean skin temperature ..... mittlere Hauttemperatur
- equivalent temperature ..... Äquivalenztemperatur
- predicted mean vote ..... vorhergesagtes mittleres Votum
- predicted percentage of dissatisfied ..... vorhergesagter Prozentsatz der unzufriedenen  
Personen
- mean thermal vote ..... mittlere thermische Bewertung
- temperature sensation value ..... Temperaturempfindungsmaß
- standard effective temperature ..... einheitlich wirkende Temperatur

Die Temperatur an der Körperoberfläche sollte zwischen 32 und 33 °C liegen. Sie variiert aber von Körperbereich zu Körperbereich. Die optimale Hauttemperatur beträgt nach [ROH79] 33,3 °C. Nach [BRO97] ist die Haupttemperatur die Schlüsselvariable für die komfortable Klimatisierung in Übergangsphasen.

Bei [DAVd] wird eine Temperaturbewertung in Abhängigkeit der Luftfeuchtigkeit vorgenommen. Für eine Umgebung mit 50 Prozent Luftfeuchtigkeit wird eine neue Temperatur eingeführt, bei der derselbe Wärmeverlust der Haut auftritt wie in der echten Umgebung. Dies ist die „standard effective temperature“.

### Temperaturempfindungsmaß

Nach [TAN92a] ist die Hauttemperatur des Gesichts ein Maß für thermischen Komfort der Insassen. Untersuchungen haben gezeigt, daß das thermische Empfinden auch von der Änderung der Hauttemperatur im Gesicht abhängt:

$$\dot{T}_H = \frac{T_H(\text{jetzt}) - T_H(\text{jetzt} - 30s)}{30s}$$

$\dot{T}_H$  ..... Änderung der Hauttemperatur im Gesicht  
 $T_H(\text{jetzt})$  ..... Hauttemperatur im Gesicht  
 $T_H(\text{jetzt} - 30s)$  ..... Hauttemperatur im Gesicht vor 30 Sekunden

Mit dem folgenden Temperaturempfindungsmaß kann mit der Hauttemperatur im Gesicht und ihrer Änderung eine Bewertung des thermischen Komforts erfolgen:

$$TSV = 0,81(T_H - 33,9) + 39,1 \cdot \dot{T}_H$$

$TSV$  ..... Temperaturempfindungsmaß  
 $T_H$  ..... Hauttemperatur im Gesicht  
 $\dot{T}_H$  ..... Änderung der Hauttemperatur im Gesicht

Obwohl die warme Luft im Fußbereich in den Innenraum eintritt, korreliert besonders die Gesichtstemperatur mit dem thermischen Empfinden der Insassen. Deshalb sollte die Gesichtstemperatur in die Formel für das Temperaturempfindungsmaß TSV eingesetzt werden.

Bei [TAN92b] wird der Zusammenhang zwischen dem Temperaturempfindungsmaß TSV und der Innenraumtemperatur mit einem Modell beschrieben. Demzufolge ist die Hauttemperatur gleich der Innenraumtemperatur vermindert um die Wärmeabgabe bzw. -aufnahme des Insassen:

$$T = T_H + \frac{Q}{\alpha}$$

$T$  ..... Innenraumtemperatur  
 $T_H$  ..... Hauttemperatur  
 $Q$  ..... Wärmestrom  
 $\alpha$  ..... Wärmeübergangskoeffizient

In das Modell können noch Korrekturfaktoren für Bekleidung, Jahreszeit und Wetter eingebaut werden.



## PMV-Index

Der PMV<sup>5</sup>-Index wurde in ISO 7730 festgelegt und beschreibt ein vorhergesagtes mittleres Votum einer größeren Personengruppe und ist ein Maß für den globalen thermischen Komfort der Insassen. Bei PMV-Werten von  $-0,5 < \text{PMV} < 0,5$  sind ca. 90 Prozent mit dem Klima zufrieden.

Nach [OLE00] können Übergangsphasen (instationäre Vorgänge) und lokale Effekte nicht mit dem PMV-Index erfaßt werden. Es sind weitere Bedingungen notwendig. Einige davon werden im folgenden aufgeführt:

- Die Differenz zwischen Innenraum.- und Fenstertemperatur sollte kleiner als 10 K sein.
- Die Differenz zwischen der Temperatur im Kopf- und der im Fußbereich sollte kleiner als 3 K sein.
- Bei einer Innenraumtemperatur von unter 23 °C sollte die Luftgeschwindigkeit kleiner 0,15 m/s sein. Bei einer Innenraumtemperatur von über 23 °C sollte die Luftgeschwindigkeit kleiner 0,25 m/s sein.

## Äquivalenztemperatur

Die Äquivalenztemperatur ist die Temperatur eines gedachten Bezugsraumes mit geringer Luftbewegung und gleicher Temperatur der Luft und der Umschließungsflächen, in der eine Person denselben trockenen Wärmeverlust hat wie im ursprünglichen Raum. Die Äquivalenztemperatur hängt somit von der Temperatur und dem trockenen Wärmestrom am Körper ab.

Die Abhängigkeit zwischen Temperatur und trockenem Wärmestrom am Körper und Äquivalenztemperatur kann bestimmt werden. In einem Äquivalenzraum, d.h. einem Raum mit geringer Luftbewegung und gleicher Temperatur der Luft und der Umschließungsflächen, installiert man eine Kugel, die beheizt werden kann und einen Temperatursensor enthält. Für eine feste Heizleistung wird diejenige Raumtemperatur, d.h. Äquivalenztemperatur, bestimmt, für die die Kugel eine vorgegebene Temperatur annimmt. Dies kann für alle gewünschten Kombinationen von Kugeltemperatur und Heizleistung durchgeführt werden.

Die Äquivalenztemperatur ist proportional zum thermischen Komfort und kann in andere Metriken für die thermische Behaglichkeit wie z.B. den PMV-Index umgerechnet werden. Die Messung der Äquivalenztemperatur kann mit einem Äquivalenztemperatursensor erfolgen.

Bei [MIN95] wird ein Modell vorgestellt, das die Äquivalenztemperatur mit Hilfe einer Referenztemperatur bestimmt. Im folgenden wird das grundlegende Vorgehen bei diesem Verfah-

---

<sup>5</sup> PMV ... Predicted Mean Vote

ren dargestellt. Das Zusammenwirken von Referenztemperatur und Äquivalenztemperatur wird mit einem Wärmeübergangsgesetz beschrieben:

$$T_{Eq} = T_r + \frac{Q}{G_{eq}}$$

$T_{Eq}$ .....	Äquivalenztemperatur
$T_r$ .....	Referenztemperatur
$Q$ .....	Wärmestrom
$G_{eq}$ .....	äquivalente Leitfähigkeit

Als Referenztemperatur kann z.B. die komfortable Hauttemperatur gewählt werden. Ist dies nicht möglich, sollte die Referenztemperatur nicht direkt am Bedienteil einstellbar sein. Vielmehr sollte das Signal eines Wärmer-Kälter-Schiebers in einen Wert für die Referenztemperatur umgewandelt werden. Die Regelstrecke Innenraum und die Umschließungsflächen werden folgendermaßen modelliert:

$$\dot{T}_B = \frac{[G_B(T_{L,e} - T_B) + G_B(T - T_B) + a s_B I]}{c_B}$$

$$\dot{T}_G = \frac{[G_G(T_{L,e} - T_G) + G_G(T - T_G) + (1-t)s_G I]}{c_G}$$

$$\dot{T} = \frac{[G_B(T_B - T) + G_G(T_G - T) + t s_G I + W]}{c}$$

$\dot{T}_B$ $\dot{T}_G$ $\dot{T}$ .....	Temperaturänderungen der Umschließungsflächen und der Scheiben und Innenraumtemperaturänderung
$T_B$ $T_G$ $T$ $T_{L,e}$ .....	Temperaturen der Umschließungsflächen und der Scheiben, Innenraum- und Außentemperatur
$c_B$ $c_G$ $c$ .....	Wärmekapazitäten der Umschließungsflächen, der Scheiben und des Innenraums
$G_B$ $G_G$ .....	Leitfähigkeiten der Umschließungsflächen und der Scheiben
$s_B$ $s_G$ .....	Oberfläche der Umschließungsflächen und der Scheiben
$a$ $t$ .....	Absorption der Umschließungsflächen und Durchlässigkeit der Scheiben für die Sonneneinstrahlung

$I$   $W$  ..... Sonneneinstrahlung, Wärmequelle

In Zustandsraumdarstellung mit  $\underline{T} = [T_B \quad T_G \quad T \quad T_{L,a} \quad T_{eq}]^T$  ergibt sich, wenn man zusätzliche Abhängigkeiten der Äquivalenztemperatur nach [MIN95] berücksichtigt und alles ineinander einsetzt:

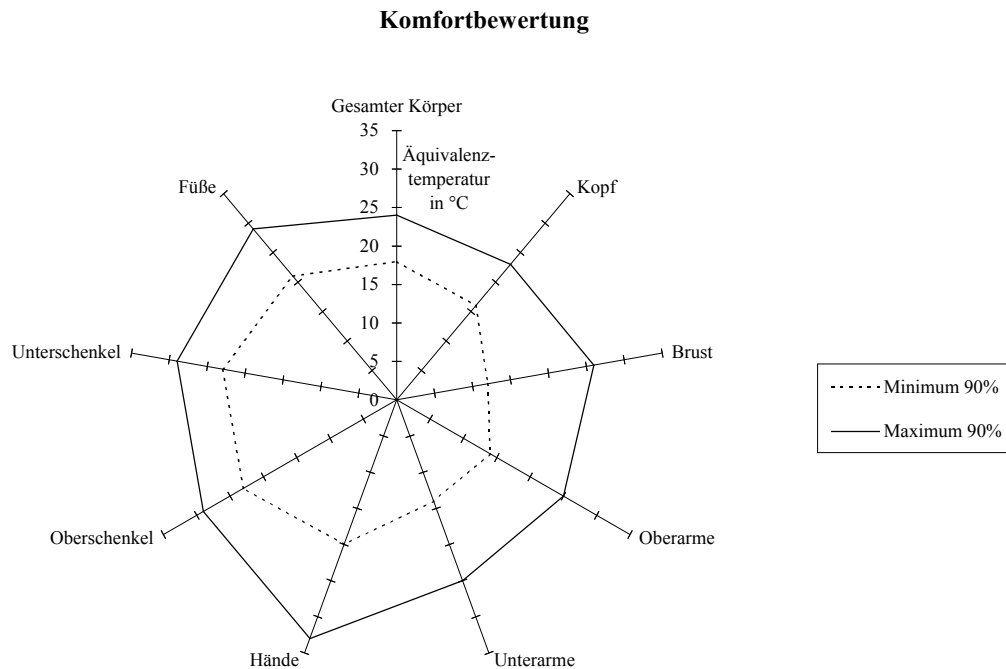
$$\begin{aligned} \underline{\dot{T}} &= \underline{A}\underline{T} + \underline{B}\underline{U} + \underline{D}\underline{W} \\ \underline{Y} &= \underline{C}\underline{T} \end{aligned}$$

$\underline{\dot{T}}$  ..... Änderung des Zustandsvektors  
 $\underline{A}$  ..... Systemmatrix  
 $\underline{T}$  ..... Zustandsvektor  
 $T_B \quad T_G \quad T \quad T_{L,a} \quad T_{eq}$  .... Komponenten des Zustandsvektors: Temperaturen der Umschließungsflächen und der Scheiben, Innenraum-, Luftaustritts- und Äquivalenztemperatur  
 $\underline{B}$  ..... Steuermatrix  
 $\underline{U}$  ..... Steuervektor  
 $\underline{D}$  ..... Störungsmatrix  
 $\underline{w}$  ..... Vektor des weißen Rauschens  
 $\underline{Y}$  ..... Ausgangsvektor  
 $\underline{C}$  ..... Beobachtungsmatrix

Die ersten vier Komponenten des Zustandsvektors und die Sonneneinstrahlung müssen gemessen werden. Die Äquivalenztemperatur  $T_{eq}$  kann mit diesem Modell beobachtet werden. Außer der Äquivalenztemperatur kann man auch noch weitere Größen beobachten bzw. schätzen. So ermöglicht die Schätzung der Benutzergewohnheiten die individuelle Anpassung des Innenraumklimas an den Benutzer. Den Sollwert für die Äquivalenztemperatur kann man aus einem jahreszeit- und wetterabhängigen Bekleidungsfaktor, den Benutzereingaben und weiteren Parametern, die für wichtig erachtet werden, erhalten. Ein Regler wirkt im Idealfall so auf den Innenraum ein, daß die Regelabweichung der Äquivalenztemperatur verschwindend klein wird. Dazu ist es erforderlich, daß die Regelung zwischen stationärem und instationärem Betrieb unterscheiden kann. Eventuell ist es sinnvoller, zusätzlich den Zusammenhang zwischen der Äquivalenztemperatur und dem thermischen Komfort zu nutzen, um direkt den Komfort der Insassen zu regeln.

Bei [HOL92] wird den einzelnen Körperbereichen der Insassen ein komfortabler Bereich der Äquivalenztemperatur zugeordnet. *Abbildung 25: Komfortbewertung mit Hilfe der Äquivalenztemperatur* (innerhalb der beiden Linien fühlen sich ca. 90 Prozent einer größeren Personengruppe wohl stellt eine Möglichkeit zur Visualisierung des Komfortbereichs vor. Nach [MAU97] und [MAU00] kann die Äquivalenztemperatur aus Simulationsergebnisse ermittelt

werden. Dadurch kann man durch einen Vergleich der Komfortbereiche mit den berechneten Äquivalenztemperaturen sehr schnell erkennen, welche Körperstellen voraussichtlich komfortabel klimatisiert sind und welche nicht. Durch die Einbindung der automatischen Klimaregelung in die Simulation wäre somit die Möglichkeit zur frühzeitigen Optimierung z.B. des Reglers gegeben.



**Abbildung 25: Komfortbewertung mit Hilfe der Äquivalenztemperatur (innerhalb der beiden Linien fühlen sich ca. 90 Prozent einer größeren Personengruppe wohl)**

## 5.2 Konzepte aus der Regelungstechnik

### 5.2.1 Optimale Regelung

Zur optimalen Regelung des Innenraums muß zunächst ein geeignetes Regelungskonzept ausgewählt werden. Mit den frei wählbaren Reglerparametern wird ein Gütekriterium erstellt. Anschließend wird dieses Gütekriterium optimiert. Daraus ergeben sich die Werte für die freien Reglerparameter. Das Gütekriterium kann z.B. zeitoptimale und verbrauchsoptimale Aspekte beinhalten.

Bei der Fahrzeugklimatisierung möchte man die Luft, die zur Klimatisierung eingesetzt wird, optimal ausnutzen. Es sollte verhindert werden, daß die Luft, die aus den Luftaustrittsöffnungen strömt, den Innenraum unverändert durch die Luftauslaßöffnungen verläßt. Das Klimatisierungspotential der Innenraumzuluft sollte vollständig erschöpft sein, wenn sie wieder an die Umgebung abgegeben wird. Wenn z.B. die Luft im Innenraum zu heiß ist und durch die Klimatisierungsanlage kalte Luft in den Innenraum geführt wird, dann sollte die Temperatur der Luft, die den Innenraum über die Luftauslaßöffnungen verläßt, gleich der Innenraumtemperatur sein.

### 5.2.2 Modellbasierte Regelung

Bei einer modellbasierten Regelung besitzt der Regler ein Modell der Regelstrecke und der Aktuatoren, so daß er verschiedene Stelleingriffe ausprobieren kann. Anschließend wählt der Regler den seines Erachtens besten Stelleingriff aus.

Da die Modellierung u.a. der Klimatisierungsanlage, des Innenraums und der Insassen sehr schwierig ist, macht es Sinn, nicht das gesamte System zu modellieren, sondern nur kleine, überschaubare Teilsysteme. Diese werden dann verknüpft oder stehen dem Regler direkt zur Verfügung. Je einfacher das Modell ist, desto besser läßt es sich anschließend in den Regler integrieren. Deshalb lohnt sich auch ein großer Aufwand bei der Erstellung, wenn dadurch unnötige Aspekte entfernt und alle wichtigen berücksichtigt werden. Eventuell können unterschiedliche Modelle für den stationären und den Übergangsbetrieb erstellt werden. Viele Größen, die in den Modellen auftreten und die man nicht messen kann, können beobachtet werden. Benutzermodelle können eingesetzt werden, um z.B. die Wünsche der Insassen vorhersagen zu können.

Bei [GIO93] werden die Heiz- und Klimaanlage modelliert. Somit ist das Übertragungsverhalten zwischen Regler und Regelstrecke bekannt. Eventuell kann dann auf einen unterlagerten Regelkreis für die Luftaustrittstemperatur verzichtet werden.

Bei [GIO93] wird der Innenraum in vier isotherme Zonen eingeteilt, die getrennt modelliert und berechnet werden. Der Wärmeaustausch zwischen den Zonen wird als umgekehrt proportional zum Luftmassenstrom angenommen.

Ein Modell für die Außentemperaturverteilung bietet z.B. die Möglichkeit, mit einem weiteren Modell für den Wärmeübergang zwischen Innenraum und Umgebung auf den an verschiedenen Stellen auftretenden Wärmestrom zu schließen.

Bei [PAL] wird ein kleines Modell des Fahrzeugs auf dem Dach desselben angebracht. Im Innern befindet sich ein Temperatursensor. Aus den Messungen des Temperatursensors werden Rückschlüsse auf die im tatsächlichen Innenraum einfallende Sonnenstrahlung gezogen.

Bei [BRO97] wird ein Modell für den thermischen Komfort der Insassen beschrieben, das sich in Übergangsphasen besser verhält als das von [FAN82]. So wurde der Einfluß der Kleidung mitmodelliert. Die Realität liegt irgendwo zwischen diesen beiden Modellen.

Bei [PIN97] wird für den Fahrer ein Modell mit dem Namen MATHER erstellt. Alle thermophysiologicalen Reaktionen eines Menschen fließen in das Modell ein. Das Ziel ist die Berechnung und Ausgabe des thermischer Komfort über eine linguistische Wärmeempfindungsskala. Die Modellparameter werden durch Versuche angepaßt. Das MATHER-Modell reagiert immer gleich, während ein Insasse aufgrund seiner komplexen Persönlichkeit nicht immer dieselbe Reaktion zeigt.

Nach [HER97] ist das MATHER-Modell zu kompliziert, um im Fahrzeug eingesetzt zu werden. Deshalb findet mit PCA<sup>6</sup> eine Reduktion auf die wesentlichen Komponenten statt. Anschließend werden Neuronale Netze trainiert, die das Verhalten von MATHER mit den wichtigsten meßbaren Komponenten widerspiegeln. Man erhält eine Vorhersage für die Empfindung des Fahrers und kann durch das Ausprobieren verschiedener Stelleingriffe den günstigsten auswählen. Die Neuronale Netze werden hier als nichtlineares Näherungsverfahren eingesetzt. Es werden Feedforward-Netze eingesetzt, die aus einer Eingabe-, Verarbeitungs- und Ausgabeschicht bestehen. Der maximale Fehler gegenüber MATHER tritt in Sonderfällen auf und ist nicht größer als 5 Prozent.

### 5.2.3 Adaptive und lernende Regelungssysteme

Adaptive Systeme können sich u.a. an den Benutzer, das Verhalten der Regelstrecke oder die Änderung einer Führungsgröße anpassen. Dazu werden die Parameter der Regelung verändert. Eventuell kann auch das Regelungskonzept an die veränderten Bedingungen angepaßt werden. In Übergangsphasen könnte z.B. eine Hauttemperaturregelung erfolgen, während im stationären Fall eine einfache Innenraumtemperatur ausreicht.

Lernende Systeme verändern ihre Eigenschaften abhängig von Fehlern und neuen Erkenntnissen. Sie erweitern ihr Wissen über die Regelstrecke, indem sie z.B. aus Fehlern lernen oder aus dem Verhalten eines Benutzers Schlüsse auf seine Wünsche ziehen. Es bietet sich an, zur Realisierung adaptiver und lernender Systeme Neuronale Netze einzusetzen, da sie das menschliche Lernverhalten am besten repräsentieren.

Um adaptiv auf Benutzereingaben reagieren zu können, müssen diese z.B. zusammen mit den augenblicklichen Klimadaten in einem Speicher abgelegt werden. Ein Syntaxanalytiker (besser unter dem Begriff Parser bekannt) kann diese Daten durchforsten, um unnötige, sinnlose oder falsche Benutzereingaben zu erkennen. Anschließend kann eine adaptive Klimaregelung die richtigen Eingaben selbst vornehmen. Eventuell kann sich die Klimaregelung auch an verschiedene Benutzer anpassen, d.h. jeder Insasse muß der Regelung seine individuellen Klimawünsche nur einmal mitteilen. Diese kann dann immer entsprechende Einstellungen vornehmen, egal auf welchem Sitz sich der Insasse gerade befindet. Die Regelung könnte auch

---

<sup>6</sup> PCA ... Principal Component Analysis

Konklusion ... Aussage, die in einer Regel auf DANN folgt

einmal beim Insassen nachfragen, ob er sich schon wohlfühlt oder ob er noch etwas verändert haben möchte: „Die Klimaregelung hat den von Ihnen vorgegebenen Zustand erreicht. Wenn Sie damit nicht zufrieden sind, sollten sie jetzt weitere Einstellungen verändern.“ Dadurch wird die Klimatisierung erfahrbarer und besser.

Bei [RIV89] wird die Gebläseleistung an den Benutzer angepaßt. Bei [WUE00] ist von einer insassenadaptiven Klimaregelung die Rede, wobei die Daten eines Infrarotsensorarrays benutzt werden, um zu erkennen, wo sich der Insasse noch nicht komfortabel fühlen kann. Eine adaptive Regelung könnte den Anteil der Motorleistung festlegen, der zur Klimatisierung des Innenraums eingesetzt wird. Dies kann zum einen abhängig vom thermischen Komfort im Innenraum geschehen. Zum anderen könnte die Antriebsleistung auch dann bewußt verringert werden, wenn der Fahrer einen offensichtlich unsicheren Fahrstil besitzt.

#### **5.2.4 FUZZY-Regelung**

In diesem Abschnitt werden die Grundlagen einer FUZZY-Regelung vorgestellt und unterschiedliche Einsatzmöglichkeiten bei der automatischen Klimatisierung von Fahrzeuginnenräumen beschrieben.

##### **Einführung in FUZZY-Logik**

Logik beschreibt nach [MEY93] ganz allgemein das nach bestimmten Regeln verfahrenende Denken, Argumentieren und Handeln. In der klassischen Logik können Aussagen entweder wahr oder falsch sein. Aussagen werden mit Hilfe von Operatoren aus elementaren Aussagen hergeleitet. Die Sprache benutzt ebenfalls logische Aussagen, um Bedingungen auszudrücken: „Wenn es heute heiß ist, dann gehe ich bestimmt ins Freibad.“ Anders als in der klassischen Logik werden nach [MIN95a] in der Sprache linguistische Aussagen benutzt, die ein bißchen wahr, aber auch ein bißchen falsch sein können. Nach [MIN95b] sollten auch rechnergestützte Modelle diese vagen Aussagen und statistischen Ungenauigkeiten enthalten. FUZZY-Logik bietet die Möglichkeit, diese vagen Aussagen zu modellieren, indem der Wahrheitswert für jedes Element der Definitionsmenge als Zahl zwischen 0 und 1 festgelegt wird. In *Abbildung 26: Modellierung der linguistischen Variablen „heiß“* wird gezeigt, wie z.B. die linguistische Variable „heiß“ mit einer Zugehörigkeitsfunktion modelliert werden kann.

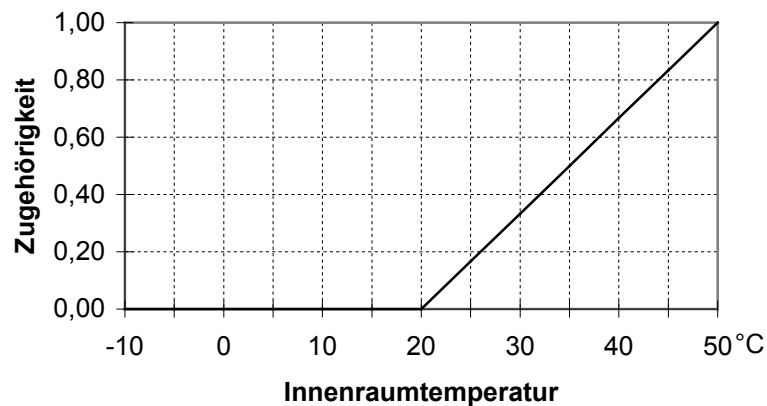


Abbildung 26: Modellierung der linguistischen Variablen „heiß“

Nach [MIN95b] sind FUZZY-Mengen eine Verallgemeinerung der gewöhnlichen Mengentheorie. Sie können durch die entsprechende Zugehörigkeitsfunktion beschrieben werden.

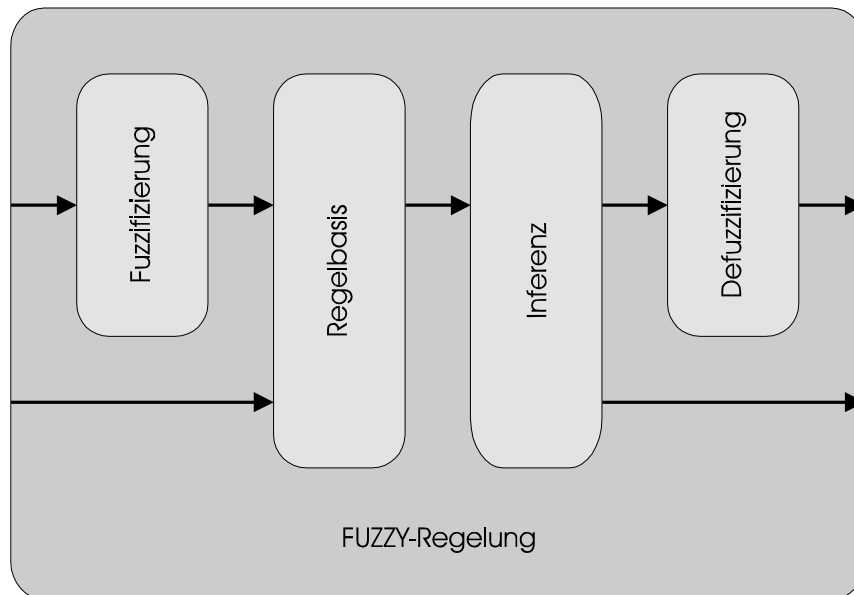
Es gibt unterschiedliche Möglichkeiten, wie die bekannten logischen Operatoren wie z.B. UND, ODER, NICHT auf FUZZY-Mengen angewandt werden können, da es auch in der klassischen Logik unterschiedliche Möglichkeiten gibt, diese Operatoren zu berechnen. Während die unterschiedlichen Verfahren in der klassischen Logik auf dasselbe Ergebnis führen, ergeben sich für die resultierenden FUZZY-Mengen teilweise unterschiedliche Ergebnisse.

### Funktionsweise einer FUZZY-Regelung

Bei [KIE97] wird die Funktionsweise einer FUZZY-Regelung sehr anschaulich beschrieben. Eine FUZZY-Regelung kann zu den nichtlinearen Verfahren der modernen Regelungstheorie gezählt werden, die ohne eine Modellierung der Strecke auskommen. Eine FUZZY-Regelung kann sehr einfach und sehr schnell erstellt werden. Aufgrund der Vielzahl der Freiheitsgrade ist eine Optimierung einer FUZZY-Regelung schwierig.

Nach [MIN95a] vereinfachen modellbasierte Ansätze das Systemverhalten noch zu stark. Eine FUZZY-Regelung benötigt nach [GAC97a] kein Modell der Regelstrecke. Trotzdem können nicht meßbare Größen geschätzt werden.





**Abbildung 27: Schematischer Aufbau einer FUZZY-Regelung**

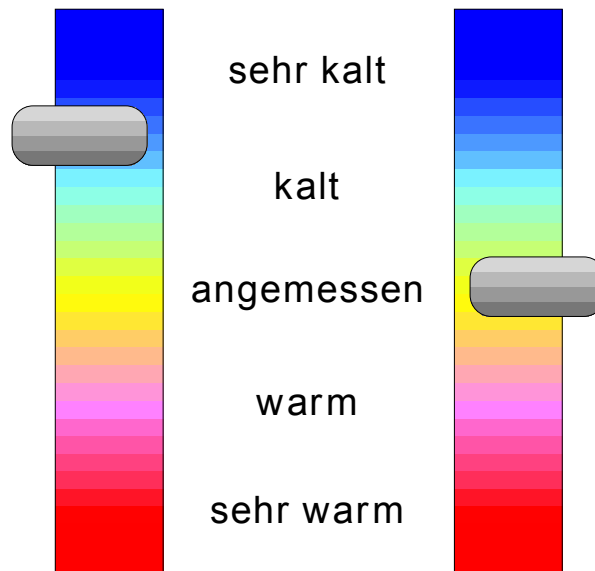
Eine FUZZY-Regelung kann nach *Abbildung 27: Schematischer Aufbau einer FUZZY-Regelung* in eine Einheit zur Fuzzifizierung der Eingabegrößen, eine Regelbasis, eine Einheit zur Inferenzbildung und eine Einheit zur Defuzzifizierung der Ausgangsgrößen untergliedert werden.

Bei [GAC97b] werden Außen-, Innen-, Verdampfer- und Kühlmitteltemperatur als Eingangsgrößen für eine automatische Klimaregelung gewählt. Als Ausgangsgrößen werden Gebläseleistung, Mischventilstellung, Luftverteilung, Kompressor EIN/AUS und Umluftanteil festgelegt.

### **Fuzzifizierung**

Nach [MIN95b] muß zunächst eine Definition der linguistischen Werte und der Definitionsbereiche erfolgen. Den linguistischen Werten werden Zugehörigkeitsfunktionen zugeordnet. Diesen Vorgang nennt man Fuzzifizierung.

Zum einen können z.B. Vorgaben einer Innenraumsolltemperatur fuzzifiziert werden. Zum anderen möchte man aber, daß die Insassen der Klimaregelung direkt eine linguistische, d.h. ungenaue, Aussage über ihre thermische Behaglichkeit liefern können. Dazu kann z.B. das Bedienelement aus *Abbildung 28: Einfaches Bedienelement für eine FUZZY-Regelung einer Heiz- und Klimaanlage mit Links-Rechts-Trennung* eingesetzt werden. Das Bedienelement wird benötigt, um z.B. Einflüsse der Kleidung zu kompensieren. Eine FUZZY-Regelung ist besonders geeignet, wenn Benutzereingaben auftreten, da in diesem Fall die Fuzzifizierung vereinfacht wird. Nach [MIN95a] können Benutzereingaben mit Methoden der FUZZY-Logik auch interpretiert werden.



**Abbildung 28: Einfaches Bedienelement für eine FUZZY-Regelung einer Heiz- und Klimaanlage mit Links-Rechts-Trennung**

Nach [GAC97a] kann eine Modifikationen der linguistischen Werte erfolgen. Aus „groß“ wird z.B. „sehr groß“, indem man die Zugehörigkeitsfunktion verschiebt oder auf eine andere Art verändert. In *Abbildung 28* sollte man deshalb besser die folgenden Zugehörigkeitsfunktionen auswählen können: heiß, warm, angenehm, kühl, kalt.

Die Wünsche der Benutzer könnte die automatische Klimaregelung auch per Spracheingabe erhalten. Eine unscharfe Aussage wie „mir ist es zu kalt“ könnte direkt von der FUZZY-Regelung verarbeitet werden..

### **Regelbasis**

Ein Experte handelt nach Regeln, die er u.a. aus seiner Erfahrung im Umgang mit dem System ableitet. Dieses Erfahrungswissen wird der FUZZY-Regelung zugänglich gemacht, indem die Regeln des Experten in der Regelbasis der FUZZY-Regelung aufgenommen werden. Nach [DAVa] können auch solche Regeln aufgenommen werden, die das Verhalten des Benutzers, d.h. im Falle einer Klimaregelung des Insassen, beschreiben. Dadurch kann die Anzahl der notwendigen Bedieneingriffe verringert werden. Nach [MIN95a] verhält sich ein FUZZY-Regler wie ein Mensch, der versucht, das System zu regeln. Um die Übersichtlichkeit der FUZZY-Regelung nicht zu gefährden, wird bei [DAVa] für jeden Ausgang ein eigener Regelsatz erstellt.

## Inferenz und Defuzzifizierung

Abhängig von den Eingangsgrößen sind die Prämissen<sup>7</sup> der Regeln mehr oder weniger stark erfüllt. Dies führt zu einer entsprechend starken Aktivierung der Regeln. Nach den Methoden der FUZZY-Logik werden mit den aktiven Regeln die Ausgangsgrößen bestimmt. Nach [MIN95b] kann durch eine Defuzzifizierung ein fester Ausgabewert erzeugt werden.

## Einsatzmöglichkeiten

Bei [DAVa] wird die Abhängigkeit zwischen Außen- und Innenraumtemperatur mit FUZZY-Regeln beschrieben. Bei [DAVb] und [DAVe] wird eine FUZZY-Regelung zur Regelung des Windschutzscheibenbeschlags eingesetzt. Dazu werden Temperatur-, Sonnen- und Feuchtigkeitssensoren verwendet. Die Beschlagswahrscheinlichkeit wird als relative Feuchte minus Grenzwert der relativen Feuchte für Scheibenbeschlag modelliert. Diese Beschlagswahrscheinlichkeit wird durch Zugehörigkeitsfunktion ausgedrückt. Es werden Regeln formuliert, die das Beschlagen der Scheiben möglichst verhindern sollen. Ein striktes Verhindern von Beschlag wäre unökonomisch. Weil der Regler nichtlinear ist, ist er in manchen Situationen besser als ein herkömmlicher Regler.

## Bewertungen

Nach [GAC97a] kann durch den Einsatz einer FUZZY-Regelung die Entwicklungszeit einer automatischen Klimaregelung bei ähnlicher Leistung verringert werden. Es wurde nur der Heizvorgang verglichen. Der Programmcode des Klimareglers wurde in C geschrieben und war wesentlich kürzer als der für einen herkömmlicher Regler. Neue Regeln können ganz einfach hinzugefügt werden. Somit kann die Regelung an unterschiedliche Varianten desselben Modells angepaßt werden. Das Feintuning des FUZZY-Systems erfolgt im Versuch. Nach [GAC97b] ist auch die Übertragung auf ein anderes Fahrzeug möglich.

Bei [MEY92] werden u.a. die zuvor beschriebenen Vorteile bestritten. Eine FUZZY-Regelung sollte demnach zunächst nur in Teilsystemen eingesetzt werden. Der Austausch des normalen Innenraumtemperaturreglers gegen einen FUZZY-Regler sei u.a. deshalb nicht sinnvoll, weil es sehr schwierig sei, einen FUZZY-Regler zu optimieren und seine Stabilität zu beweisen.

## Instationäre Vorgänge

Im folgenden werden zwei Regeln beschrieben, mit denen ein Regler bei großen Regelabweichungen in den stationären Zustand zurückgeführt werden kann. Die Prämissen der Regeln enthalten linguistische Werte, während in den Konklusionen Steuerfolgen aktiviert werden.

**WENN** (Betriebsart **IST** Winter) **UND** (Innenraumtemperatur **IST** sehr kalt)

---

<sup>7</sup> Prämisse ... Aussage, die in einer Regel auf WENN folgt

**DANN** (Steuerfolge **IST** *Aufheizvorgang*)

*Aufheizvorgang:*

- maximale Heizleistung
- DEFROST → UNTEN AUF → ALLES AUF → *stationärer Zustand*

**WENN** (Betriebsart **IST** Sommer) **UND** (Innenraumtemperatur **IST** sehr warm)

**DANN** (Steuerfolge **IST** *Abkühlvorgang*)

*Abkühlvorgang:*

- maximale Kühlleistung
- OBEN AUF → ALLES AUF → *stationärer Zustand*

*stationärer Zustand:*

- geregelte Heiz- bzw. Kühlleistung
- ALLES AUF → {OBEN AUF; UNTEN AUF} → ALLES AUF usw.

## 5.3 Kombination von Regelungskonzepten

In der Praxis werden oft Kombinationen verschiedener Regelungs- und Steuerungskonzepte eingesetzt. Manchmal hat man auch den Eindruck, daß den Entwicklern gar nicht so richtig bewußt ist, was sie da eigentlich entworfen haben. Es gibt Regelungs- und Steuerungskonzepte, die sich nur schwer auf Verfahren der klassischen oder modernen Regelungstheorie zurückführen lassen und bei denen man die Regelung nur äußerst schwer von der Steuerung unterscheiden kann. Dies ist speziell bei Regelungen der Fall, bei denen die Regelstrecke nicht modelliert wurde. Dort wird oft einfach nur ein industrieller Regler gekauft, der anschließend mit Steuergesetzen erweitert wird, um die Stabilität der Regelung garantieren zu können.

Dies soll nicht heißen, daß Kombinationen von unterschiedlichen Regelungskonzepten und Kombinationen zwischen Regelungen und Steuerungen generell schlecht sind. Meistens ist dies sogar äußerst sinnvoll, da man dann alle Vorzüge der unterschiedlichen Verfahren nutzen kann. Manchmal ist keine hohe Regelgüte erforderlich und eine einfache und billige Steuerung erfüllt das gewünschte Ziel. Andererseits können moderne Regelungskonzepte dort ein-

gesetzt werden, wo Nichtlinearitäten auftauchen und zusätzlich hohe Anforderungen an die Regelung bestehen.

Bei [KOK] werden sehr viele Konzepte gleichzeitig angewandt. Die beschriebene Regelung besitzt eine Möglichkeit, den zukünftigen Wert der Regelgröße vorherzusagen. Außerdem wird die Regelgröße gemessen. Zusätzlich liegen gespeicherte Informationen vor, die ebenfalls zur Berechnung des Reglerausgangs herangezogen werden können. Unterscheidet sich der vorhergesagte Wert zu sehr von dem gemessenen, wird ein Algorithmus gestartet, der aus allen drei Datenquellen mit Hilfe von FUZZY-Logik einen neuen Schätzwert erzeugt. Man könnte behaupten, daß es sich um eine modellbasierte Kennfeldregelung mit FUZZY-Beobachter handelt.

# Schlußfolgerungen

Die folgenden Erkenntnisse ergaben sich bei der Zusammenstellung der Ergebnisse dieser Arbeit:

- Aufgrund der hohen Komplexität wird meist nur die Innenraumtemperatur geregelt. Ein klassischer P-Regler ist einfach, günstig und deshalb besonders gut geeignet.
- Die Eingriffe der Klimatisierungsanlage sollten sich noch viel stärker am Energiebedarf und am Komfort der Insassen orientieren.
- Es gibt keine Patentlösung, mit der sich die Probleme der Fahrzeugklimatisierung ganz einfach lösen lassen.
- Immer mehr Aktuatoren und Sensoren werden bei der Klimatisierung von Fahrzeuginnenräumen eingesetzt.
- Nicht für jeden neuen Aktuator muß ein neuer Sensor installiert werden. Neue Regelungskonzepte erlauben die Fusion von Sensordaten, d.h. aus den Daten vorhandener Sensoren können zusätzliche Informationen gewonnen werden, die man nicht direkt messen kann.
- Der Anteil der Regelung sollte dann erhöht werden, wenn z.B. weitere Größen im Innenraum gemessen werden. Es sollten Untersuchungen durchgeführt werden, die verschiedene Regelungskonzepte für neue Aktuatoren und Sensoren vergleichen.
- Modelle für den Insassen oder den Innenraum ermöglichen die Beobachtung nicht meßbarer Größen wie z.B. des thermischen Komforts.
- Die Insassen beschreiben den thermischen Komfort z.B. mit „zu kalt“, „zu trockene Luft“ oder „sehr unbehaglich“. FUZZY-Regelung bietet die Möglichkeit, diese Aussagen mit Hilfe von Regeln in entsprechende Stelleingriffe umzusetzen.

# Literaturverzeichnis

## Klimatisierung von Fahrzeuginnenräumen

- [BOE80] BOELKE, Klaus; FRANK, Wolfgang (1980): „Automatische Steuerung und Regelung von Heizungs-, Belüftungs- und Klimaanlage“. Automobiltechnische Zeitschrift 82; Artikel 12; Seiten 20-24.
- [BRA89] BRATTON, Timothy R. (1989): „Development of a Fully Electronic Dual Climate Zone HVAC System“. SAE Technical Papers Series 890575; Seiten 1-6.
- [BRO97] BROWN, J. Steven; JONES, Byron W. (1997): „A New Transient Passenger Thermal Comfort Model“. SAE Technical Papers Series 970528, Seiten 143-148.
- [BUR00] BURK, Roland; KRAUSS, Hans-Joachim; LÖHLE, Michael: „Integrales Klimasystem für Elektroautomobile“. Technische Akademie Esslingen 1996, Klimatisierung von Kraftfahrzeugen.
- [CAN92] CANTORE, G.; GROTTI, R.; LOTTI, P. (1992): „Study, Development and Construction of a HVAC System for Monospace Vehicle“. Universität Bologna; 2<sup>nd</sup> International Conference Vehicle Comfort, Ergonomic, Vibrational, Noise and Thermal Aspects 1992; Seiten 839-852.
- [CAR92] CARIGNANO, M.; BARTSCH, E. (1992): „Climatization System For Industrial Vehicles With Automatic Temperature Control“. IVECO-FIAT - Universität Bologna; 2<sup>nd</sup> International Conference Vehicle Comfort, Ergonomic, Vibrational, Noise and Thermal Aspects 1992, Volume 2; Seiten 1055-1062.
- [CLA00] CLAUSEN, Geo; CARRICK, Linda; FANGER, P. Ole; KIM, Sun Woo; POULSEN, Torben; RINDEL, Jens Holger: „A Comparative Study Of Discomfort Caused By Indoor Air Pollution, Thermal Load And Noise“. Technische Akademie Esslingen 1996, Klimatisierung von Kraftfahrzeugen.
- [CUR00] CURRLE: „Einfluß verschiedener Parameter auf den thermischen Komfort in PKW-Kabinen“. Daimler-Benz Konzern-Technologie-Workshop, Klimatisierung - Technologien und Behaglichkeit III.
- [DAI00] Daimler-Benz AG: „Lastenschrift Klimasteuergerät W210“. Kapitel 3 und 4.
- [DIE91] DIECKMANN, John; MALLORY, David (1991): „Climate Control for Electric Vehicles“. SAE Technical Papers Series 910000; Seiten 101-110.

- 
- [FAN00] FANG, L.; CLAUSEN, G.; FANGER, P.O.: „Impact Of Temperature And Humidity On Perception And Emission Of Indoor Air Pollutants“. Technische Akademie Esslingen 1996, Klimatisierung von Kraftfahrzeugen.
- [FAN82] FANGER, P. O. (1982): „Thermal Comfort: Analysis And Applications In Environmental Engineering“. R. E. Krieger Publishing Co.
- [FRA87] FRANK, WOLFGANG; OESS, Dieter (1987): „Mehr Klimakomfort im Personenwagen“. Automobiltechnische Zeitschrift 89, Artikel 9, Seiten 505-508.
- [GAC97a] GACH, Béatrice; LANG, Michael; RIAT, Jean-Christophe (1997): „Fuzzy Controller For Thermal Comfort In A Car Cabin“. SAE Technical Papers Series 970107, Seiten 9-16.
- [GAC97b] GACH, B.; LANG, M.; LEVY, P. (1997): „Fuzzy Temperature Controller For Thermal Comfort: Integration On Classical Micro-Controller And Transfer Between Vehicles“. 4<sup>th</sup> International Congress And Exhibition, Comfort In The Automotive Industry, Recent Developments And Achievements.
- [GIO93] GIOLITTI, Riccardo; VAULATO, Alberto; MINGRINO, Fabio (1993): „Real Time Internal Climate Simulation of a Vehicle for Control Strategy Testing“. SAE Technical Papers Series 930000.
- [GRO88] GROHMANN, Kurt; KESS, Winfried; EGLE, Siegfried (1998): „Klimautomatik der neuen 7er Baureihe von BMW“. Automobiltechnische Zeitschrift 90, Artikel 3.
- [HAN00] HANSELMANN: „Klimatisierung in der neuen S-Klasse“. Daimler-Benz Konzern-Technologie-Workshop, Klimatisierung - Technologien und Behaglichkeit III.
- [HER97] HERNANDEZ-GRESS, Neil; PINIEC, Sabine; ESTEVE, Daniel; BONIN, Jean-Louis (1997): „Thermal Sensations And Artificial Neural Networks: Application To Automotive Car Comfort“. 4<sup>th</sup> International Congress And Exhibition, Comfort In The Automotive Industry, Recent Developments And Achievements; Seiten 119-128.
- [HIL00] HILPERT: „Luftkeimbelastungen in klimatisierten PKW-Innenräumen“. Daimler-Benz Konzern-Technologie-Workshop, Klimatisierung - Technologien und Behaglichkeit III.
- [HOE00a] HÖGER, Sascha: „Raumluftüberwachung mit intelligenten Multi-Sensor-Systemen“. Daimler-Benz Konzern-Technologie-Workshop, Klimatisierung - Technologien und Behaglichkeit III.
- [HOF91] HOFMANN, Ernst; HILLMER, Christian (1991): „Automatische Klimaregelung CLIMATronic im VW Passat“. Automobiltechnische Zeitschrift 93, Artikel 1, Seiten 12-17.



- [HOL92] HOLMÉR, Ingvar; NILSSON, Håkan; BOHM, Mats; BROWÉN, Alf; NORÉN, Olle: „Evaluation Of Thermal Environment In Automotive Vehicles“. Universität Bologna; 2<sup>nd</sup> International Conference Vehicle Comfort, Ergonomic, Vibrational, Noise and Thermal Aspects 1992; Seiten 295-302.
- [HUC81] HUCHO, Heinrich (1981): „Aerodynamik des Automobils“. Vogel; 1. Auflage; ISBN 3-8023-0642-2.
- [KRA80] KRÄMER, Willi; HAASE, Hans-Martin; SCHANZER, Hans-Peter (1980): „Heizungs- und Lüftungssysteme mit automatischer Temperaturregelung im Omnibus“. Automobiltechnische Zeitschrift 82, Artikel 5, Seiten 269-276.
- [LOE00] LÖHLE, Michael: „Klimatisierung von Elektro- und Hybridfahrzeugen“. Technische Akademie Esslingen 1996, Klimatisierung von Kraftfahrzeugen.
- [MAU97] MAUÉ, Jürgen; WAHL, Dietrich, CURRLE, Joachim (1997): „Computation Of The Thermal Environment In Passenger Compartments And Evaluation Of Thermal Comfort“. 4<sup>th</sup> International Congress And Exhibition, Comfort In The Automotive Industry, Recent Developments And Achievements; Seiten 147-162.
- [MAU00] MAUÉ, Jürgen: „Methoden und Tools zur Klimatisierung - ein Überblick“. Daimler-Benz Konzern-Technologie-Workshop, Klimatisierung - Technologien und Behaglichkeit III.
- [MEY92] MEYER-GRAMANN, Klaus Dieter; JÜNGST Ernst-Werner (1992): „Fuzzy Control - eine Positionsbestimmung“. Technischer Bericht Daimler-Benz AG F2/S-92-009.
- [MIN95] MINGRINO, Fabio; RIVALTA, Toscano (1995): „An Automatic Climate Control Based On The Concept Of Equivalent Temperature“. SAE Technical Papers Series 950022, Seiten 31-45.
- [OLE00] OLESEN, B. W.: „Measurement Of Thermal Comfort In Vehicles“. Brüel & Kjør application notes: Evaluation On The Thermal Environment In Vehicles.
- [ORL88] ORLANDO, Ronald E.; TRUONG, Thuc D. (1988): „Development Of A Light Duty Truck Electronic-Based Climate Control HVAC System“. SAE Technical Papers Series 88051.
- [PET89] PETRUCCILO, D.; GAMARRA, G. (1989): „Automatic Control Of The Air Conditioning System For A Medium/High Class Car“. Universität Bologna; International Congress: Technology Status And Prospects About The Thermal Vehicle Comfort 1989, Seiten 151-172.
- [PIN97] PINIEC, S.; THELLIER, F.; DUVEAU, H.; DEFFIEUX, J. C. (1997): „MATHER - Model Of Local Thermal Sensations Of A Car Driver“. 4<sup>th</sup> International Congress And Exhibition, Comfort In The Automotive Industry, Recent Developments And Achievements.

- 
- [RIV89] RIVALTA, Giovanni Toscano (1989): „The Automatic Temperature Control For A Modern Climatization System“. Universität Bologna; International Congress: Technology Status And Prospects About The Thermal Vehicle Comfort 1989, Seiten 143-150.
- [ROH79] ROHLES Jr., Frederick H.; WALLIS, Stan B. (1979): „Comfort Criteria For Air Conditioned Automotive Vehicles“. SAE Technical Papers Series 790122, Seiten 1-10.
- [SAL00] SALZER: „Thermodynamisches Heizsystem und alternative Zuheizsysteme“. Daimler-Benz Konzern-Technologie-Workshop, Klimatisierung - Technologien und Behaglichkeit III.
- [SOM91] SOMME, Jean-François (1991): „Optimized Air Conditioning Control“. Automotive Engineer June/July 1991; Seiten 28-29
- [TAK00] TAKADA, H.: „Antifrost System of Windshield“. SAE Technical Papers Series 890024; Seiten 171-178.
- [TAN92a] TANIGUCHI, Yousuke; AOKI, Hiroshi; FUJIKAKE, Kenji; TANAKA, Hisashi; KITADA, Motohiro (1992): „Study On Car Air Conditioning System Controlled By Car Occupants' Skin Temperatures - Part 1: Research On A Method Of Quantitative Evaluation Of Car Occupants' Thermal Sensations By Skin Temperatures“. SAE Technical Papers Series 920169; Seiten 13-19.
- [TAN92b] TANAKA, Hisashi; KITADA, Motohiro; TANIGUCHI, Yousuke; OHNO, Yumi; SHINAGAWA, Tutomu; AOKI, Hiroshi (1992): „Study On Car Air Conditioning System Controlled By Car Occupants' Skin Temperatures - Part 2: Development Of A New Air Conditioning System“. SAE Technical Papers Series 920170; Seiten 21-27.
- [WAT95] WATZLAWICK, Robert; GANZ, Thomas (1995): „The Electronics of Sunroofs As Comfort Elements in Vehicles“. SAE Technical Papers Series 951062; Seiten 499-508.
- [WEI84] WEIBLE, R.; KERN, J. (1984): „Steuerungs- und Regelungssysteme für Heizungs- und Klimaanlage in Kraftfahrzeugen“. VDI Berichte Nr. 515; Seiten 167-173.
- [WEI00] WEIBLE, R.: „Automatische Klimasysteme: Elektronik und Ergonomie“. Technische Akademie Esslingen 1996, Klimatisierung von Kraftfahrzeugen.
- [WOL83] WOLSDORF, Peter; HAASE, Hans-Martin; SCHANZER, Hans-Peter (1983): „Automatische Temperaturregelung des Heizungs- und Lüftungssystems von Lastkraftwagen“. Automobiltechnische Zeitschrift 85, Artikel 9, Seiten 569-572.
- [WUE00] WÜNSCHE: „Innovationen und Trends zur Behaglichkeit im Fahrzeuginnenraum“. Daimler-Benz Konzern-Technologie-Workshop, Klimatisierung - Technologien und Behaglichkeit III.

## Sonstige

- [KIE97] KIENDL, Harro (1997): „Fuzzy Control methodenorientiert“. Oldenbourg. ISBN 3-486-23554-0.
- [MEY93] (1993): „Meyers Lexikon - Das Wissen A-Z“. Meyers Lexikonverlag.

## Patente

- [ADL] ADLER, Bernhard; WINTERSTEIN, Michael; BRÜCKNER, Georg: „Verfahren zur Zustandserkennung gasförmiger und flüssiger Medien mittels Multisensorsystemen“. Offenlegungsschrift DE 4227727.
- [ASO] ASOU, Hiroshi; UKITA, Eiji; ENNO, Yasuhiro; TSUCHIDA, Takaski; ISHIKAWA, Toshikazu: „Verfahren zur Regelung einer Fahrzeug-Klimaanlage“. Offenlegungsschrift DE 4419873.
- [BAR] BARUSCHKE, Wilhelm; KÄFER, Oliver; KAMPF, Hans; LOCHMAHR, Karl: „Vorrichtung und Verfahren zur Steuerung von Luftführungselementen eines Fahrzeugs“. Offenlegungsschrift DE 19637232.
- [BEY] BEYERLEIN, David G.; ROHN, Bruce D.: „Solar Position Correction For Climate Control System.“. Patent US 5553661.
- [DAVa] DAVIS, Leighton Ira; SIEJA, Thomas Francis; DAGE, Gerhard Allan; MATTESON, Robert Wayne: „Method And System For Controlling An Automotive HVAC System“. Patent WO 95/01592, Patent WO 95/01593, Patent WO 95/01594.
- [DAVb] DAVIS, Leighton Ira; MATTESON, Robert Wayne; DAGE, Gerhard Allan: „Method And Control System For Controlling An Automatic HVAC System To Prevent Fogging“. Patent US 5516041.
- [DAVc] DAVIS, Leighton Ira; MATTESON, Robert Wayne; DAGE, Gerhard Allan: „Method And Control System For Economically Controlling An Automatic HVAC System“. Patent US 5553776.
- [DAVd] DAVIS, Leighton Ira; MATTESON, Robert Wayne; DAGE, Gerhard Allan: „Method And Control System For Controlling An Automatic HVAC System For Increased Occupant Comfort“. Patent US 5570838.
- [DAVe] DAVIS, Leighton Ira; MATTESON, Robert Wayne; DAGE, Gerhard Allan: „Verfahren und Vorrichtung zur Steuerung des Heizungs-, Belüftungs- und Klimatisierungssystems eines Kraftfahrzeugs“. Offenlegungsschrift DE 19540566.
- [FRE] FREIBERGER, Ronald D.: „Infra-Red Comfort Sensor“. Patent US 5400964.
- [GAL] GALLUP, David F.; NOLES, David R.; WILLIS, Richard R.: „Variable Temperature Seat Climate Control System“. Patent US 5524439.

- 
- [GEN] GENTRY, Scott B.; MAZUR, Joseph F.; BLACKBURN, Brian K.: „Method And Apparatus For Detecting An Out Of Position Occupant“. Patent US 5330226.
- [HAR] HARA, Kiyoshi; KOJIMA, Yasufumi; NABETA, Teiichi: „Air-Conditioner Control System For Automobiles“. Patent US 4434932.
- [HEI] HEINLE, Dieter; MAUÉ, Jürgen; RÖSSNER, Wolfgang; WAHL, Dietrich: „Fahrzeugklimatisierungseinrichtung mit sonnenstrahlungsabhängig verstellbarer Luftleitvorrichtung“. Patent DE 19617562.
- [HIL] HILDEBRAND, Reinhard: „Heiz- und Klimagerät für ein Kraftfahrzeug“. Patent EU 0397997.
- [HOE] HÖLTER, Heinz; RUMP, Hanns; LIEDTKE, Jochen: „Verfahren zur Steuerung einer Fahrzeuglüftungseinrichtung“. Patentschrift DE 3731745.
- [KOK] KOKAWA, Masasumi; ONARI, Mikihiro; SASAKI, Ryoichi: „Analogical Inference Method And Apparatus For A Control System“. Patent US 4777585.
- [MOEa] MOERSCH, Volker; KNITTEL, Otto: „Verfahren zur Regelung der Innenraumtemperatur eines Fahrzeuges bei gleichzeitiger Ausblastemperaturregelung und Klimaanlage mit Ausblastemperaturregelung für den Innenraum eines Fahrzeuges“. Offenlegungsschrift DE 4336934.
- [MOEb] MOERSCH, Volker; DECIUS, Andreas: „Verfahren und Klimaanlage zur Regelung des Klimas in einem aus einem ersten und zweiten Halbraum bestehenden Innenraum eines Fahrzeuges“. EP 0568826
- [MUE] MÜLLER, Otto: „Heiz- oder Klimaanlage zur Belüftung des Fahrgastraums eines Kraftfahrzeugs“. Patent EP 0419722.
- [PAL] PALAZZETTI, Mario; SALOTTI, Gianfranco; MINGRINO, Fabio: „Sensor Unit For Vehicle Air-Conditioning Systems“. Patent EP 0526426.
- [PET] PETRI, Horst; MÖNIG, Michael: „Klimatisierungssystem für ein Fahrzeug“. Patent EP 0375871.
- [REI] REIBNAGEL, Harald: „Schaltungsanordnung mit einem eine lichtgesteuerte elektronische Steuervorrichtung in einem Kraftfahrzeug steuernden Lichtsensor“. Offenlegungsschrift DE 4305446.
- [RUE] RÜTTIGER, Anton: „Klimaanlage für Kraftfahrzeuge“. Patent EP 0732230.
- [SAM] SAMUKAWA, Katsuhiko; YUJI, Kariya: „Klimaanlage mit verbesserter Sonnenlichtkorrektur“. Offenlegungsschrift DE 19634774.
- [SCHa] SCHLAUDRAFF, Ernst: „Verfahren zur Steuerung und Regelung einer Klimaanlage bzw. -automatik für Kraftfahrzeuge“. Patent EP 0677408.

- 
- [SCHb] SCHIERBEEK, Kenneth Lee; O'FARRELL, Desmond James: „Vehicular Moisture Sensor And Mounting Apparatus Therefor“. Patent EP 0412653.
- [SHAA] SHAH, Dipak J.: „Enthalpy Based Thermal Comfort Controller“. Patent WO 97/32167.
- [SHAb] SHAH, Dipak J.: „Thermal Comfort Controller“. Patent WO 97/48030.
- [SHU] SHUM, Shu: „Solar Powered Automobile Cooling System“. Patent US 4658597.
- [STR] STRAUB, Wolfgang; WIESZT, Herbert: „Klimaanlage zur sonneneinstrahlungsabhängigen Klimatisierung eines Fahrzeuginnenraums“. Offenlegungsschrift DE 19544893, Patent EP 0776777.
- [TAN] TANAKA, Masakazu; OHASHI, Toshio: „Radiant Heat Control Apparatus For Automotive Vehicle“. Patent US 4920759.
- [TUR] TURNER, Jack C.; THAYER, Peter A.; MURPHY, Morgan D.: „Automotive Climate Control With Infra-Red Sensing“. Patent US 5518176.
- [WAL] WALDMANN, Bernd; KUSUMA, Djuanarto: „Innenrückblickspiegel für Kraftfahrzeuge“. Patent EP 0689951.

# Sachwortregister

## A

Abgas 69  
Abgase 30  
Abkühlungszeit 71  
Abluft 22, 47  
Abwärme 42  
Abwärmenutzung 68  
Abweichung  
  kleinste 39  
Aerodynamik 39  
  des Fahrzeugs 30  
Aggregatzustand 30  
Agilität 19  
Aktuatoren 22, 47, 51, 61, 64, 65,  
  70  
aktuellen E-Klasse 59  
Anforderungen 18, 49  
  physiologische und  
  intermediäre 29  
  Technische 21  
Ansteckungsgefahr 20  
Anti-Windup-Reset 45  
Antrieb  
  alternativer 34  
Antriebsleistung 68  
Anzeige 38  
Anzeigeelement  
  für die Außentemperatur 38  
Anzeigehelligkeit  
  automatische Anpassung der  
  38  
Äquivalenztemperatur 66  
Arbeitsplatz 22  
Armaturenbrett 29, 35, 44  
asymptotisch stabil 50  
Aufbereitungsanlage 30  
Aufheizzeit 70  
Aufwand  
  technischer 27  
Ausblasgeschwindigkeit 72  
Ausblasrichtung 66, 72  
Ausblastemperatur 31, 33  
Ausfall  
  der Luftversorgung 47  
  der Stromversorgung 47  
Außentemperatur 38, 39, 42, 43,  
  57, 73  
  tiefe 34, 54

Außentemperaturfühler 43  
Außentemperatursensor 57  
Aussteigen 43, 63  
Austrocknung  
  der Bindehaut 26  
Automatikbetrieb 37, 66  
Autoradio 66

## B

Bahn 20  
Bahnübergang 33  
Bakterien 20  
Batterie 69  
Bauraum 29, 67  
  größerer 69  
Bauteile 31  
Bedeutung  
  große 42  
Bedienbarkeit  
  Grenzen der 37  
Bedienelement 22, 27, 36  
Bedienfehler 27, 66  
Bedienkonzept 38  
  einheitliches 66  
Bedienteil 27, 36, 42, 43, 48, 66  
Bedienung 22, 28  
  fehlertolerante 27  
Bedingungen  
  extreme 40  
  irdischen 27  
  physikalische, physiologische  
  und intermediäre 23  
Bedürfnis 64  
Begriffslexikon 10  
Begrüßungstext 67  
Behaglichkeit  
  thermische 23, 24, 64  
  thermischen 26  
Beifahrerseite 42  
Belastungsabfall  
  schlagartiger 31  
Belastungsintensität 26  
Beleuchtung 23  
Belüftung 62, 72  
  ausreichende 56  
Benutzer 27  
Beschädigung 33  
Beschlag 44  
Beschlagen

  der Scheiben 20  
Beschlagfreihaltung 71, 74  
  der Scheiben 49  
Betrieb  
  energieoptimaler 49  
  sicherer 22  
  stationärer 50  
Betriebsparameter 40  
Betriebstemperatur 70  
  des Kühlwassers 34  
  optimale 33  
Betriebszustand 40  
Bewegungssensor 68  
Blende 30  
Bodenfläche 42  
Bordrechner 64  
B-Säule 35  
Bus 20, 64  
Bussystem 46  
  zentrales 64

## C

Cabrio 58, 62  
CAN-Bus 22, 44, 46, 58  
CO 44

## D

Dämpfe 57  
Daten 65  
Datenaustausch 66  
Datenbus 66  
Deckenausströmer 62, 72, 73  
Defrost 20, 37, 66  
Defrost-Betrieb 37  
Defrostdüse 35  
Defrostdüsen 44  
Defrosterdüse 64  
Defrost-Programm 57  
Defrost-Taste 37  
Dehnstoffelement 47  
Design 19, 25, 26  
Dialogkomponente 38  
Dialogschritt 38  
Dieselmotor  
  verbrauchsarmer 68  
  verbrauchsgünstiger 70  
  verbrauchsoptimierter 34  
Display

multifunktionales 66  
Doppelglasscheibe 68  
Drehknopf 36  
Dreizonenklimateisierung 29  
Drucksensor 44  
Druckunterschied 30  
Druckverlust 34  
Durchlässigkeit  
der Strahlung 73  
Durchmischung  
optimale 54  
Durchströmung 36, 39, 62  
gleichmäßige 73  
optimale 72  
Düse 30  
Dynamik 44  
nichtlineare 49  
Dynamik-Schalter 68

## E

Economy-Schalter 37, 66  
Eigenschaften  
Fahrzeugkern- 19  
Einführung 15  
Eingangssignal  
des Reglers 52  
Einleitung 15  
Einsteigen 43, 63  
Einstellmöglichkeit  
manuelle 27, 40  
Einstellungen  
manuelle 37  
Einstellungsmöglichkeiten 37  
Einzelfall 36  
Elektrisch 47  
Elektromagnetisch 47  
Elektromechanisch 47  
Elektronik  
des Bedienteils 42  
Embedded-Chip 40  
Empfinden  
thermisches 23, 24  
Energie 31  
Energiebedarf 22, 62, 67  
Energieeinsatz  
optimierter 56  
Energienutzung  
effektivere 69  
energieoptimal 40  
Energieverbrauch 61  
minimaler 68  
Energieversorgung  
elektrische 34  
Enteisung 49  
der Windschutzscheibe 71  
Entfeuchtung 56, 62  
Entfrostung 74  
Entspanner 30

Entwicklung 40  
Entwicklungsumgebung  
einheitliche 40  
Entwurf 40  
Erfahrung 23  
Ergonomie 19  
Erkältung 55, 66  
Erlebnisklimateisierung 61  
Erstellung 40  
Erwärmung  
der Innenraumzuluft 33  
des Innenraums 34  
Europa 16  
Extremsituation 20, 69

## F

Face-Level-Düsen 72  
Fahrbahn  
nasse 38  
Fahrbetrieb 73  
Fahrer 39  
Bus- 22  
LKW- 22  
Taxi- 22  
Fahrerseite 42  
Fahrgeschwindigkeit 30, 36, 42,  
44  
verminderte 38  
Fahrverhalten 68  
Fahrzeug 22, 36, 39  
ästhetisch perfektes 25  
Gesamtsystem 22  
Offenes 62  
ohne Emissionen 68  
Personen- 34  
überhitztes 21  
völlig überhitztes 27  
Zero-Emission- 22  
Fahrzeugdach 71  
Fahrzeuge  
Elektrische 68  
Fahrzeuggeometrie 72  
Fahrzeuggewicht 70  
Fahrzeuginnenraum 22, 27, 34  
Fahrzustand 49  
Fehlbedienung 27  
der Benutzer 40  
Fehleingabe 22  
Fehler 27  
Fehlerdaten 20  
Fehlfunktion 22, 27  
Feinabstimmung  
manuelle 49  
Feineinstellung 58, 71  
Felder  
elektrostatische 27  
Fenster 30, 68  
Fensterrollo 73

Fernbedienung 63  
Feuchtigkeit 51, 74  
Feuchtigkeitssensor 71  
Filter 30  
adsorptive 74  
Filtersysteme 20, 30  
Fläche  
drucksensitive 66  
Flächenbeheizung 71  
Flattern  
der Luftleitgitter 73  
Flugzeug 20, 64  
Flüssigkeit 56  
Fond 29, 35, 37, 55, 63  
Fondbereich 42  
Fondraum 29  
Fördermenge 48  
Förderungen  
staatliche 68  
Form 22  
Formelzeichen 8  
Frischlucht 23, 28, 30, 34  
Frischluchtansaugung 44  
Frischluchtanteil 67  
Frischluchtkanal 35, 43  
Frontbereich 42  
Führungsänderung 50  
Führungsgröße  
Änderung einer 73  
führungsoptimal 50  
Funktionalität 38  
Funktionstüchtigkeit 42  
Funktionsweise 28  
Fußbereich 35, 37, 56, 58, 60, 66,  
71  
Füße 26  
warme 35  
Fußraum 55  
Fußraumklappe 59  
FUZZY-Regelung 46

## G

Gas 57  
Gaspedalstellung 68  
Gebäude 23  
Gebläse 27, 28, 30, 47  
drehzahlgeregeltes 30, 39, 42  
zusätzliches 29, 36  
Gebläsedrehzahl 53  
Gebläseleistung 27, 35, 44  
geringere 29  
Gebläsestärke 37  
Gebläsestufe 66  
höchste 48  
Gehäuse 47  
Genauigkeit  
der Aktuatoren 42  
der Sensoren 42

- Genick 26
  - Geräte
    - Zusätzliche 63
  - Geräusch 23
  - Geräusche
    - störende 31
  - Geräuschentwicklung 35
  - Geruch 23, 30, 57
  - Geruchsbelästigung 51
  - Gesamtverhalten
    - eines Systems 36
  - Gesundheit 23, 55
  - Gesundheitszustand 23
  - Gewicht 22, 29, 69
    - des Fahrzeugs 19
  - Giftstoffe 30
  - Gleichgewicht
    - thermisches 26
  - Gleichgewichtsgebiet 36
  - Glykol 71
  - Größe 22
  - Größen
    - physikalische 42
  - Großraumkabine 72
  - Großraumkabinen 20
  - Gütekriterium 52
- H**
- Handy 63
  - Hauptregler 58
  - Hawaii 61
  - Head-Up-Display 66
  - Heckablagefläche 36
  - Heckscheibe 36
  - Heißgaspumpe 70
  - Heizanlage 31, 33, 47
    - luftseitige 43, 48, 51
    - wasserseitige 35, 43, 51, 55
    - Wasserseitige 47
  - Heizbetrieb 33, 54
    - moderater 55
  - Heizdecke 71
  - Heizleistung 53
    - maximale 40, 57
  - Heizmittelventilmethode 32, 34
    - Nachteil 33
    - Vorteile 33
  - Hilfsmittel 39
  - Hilfsregelkreise 42
  - Hitzestau 36
  - Hub
    - variabler 64, 67
  - Hysterese 50
  - Hysterese Kennlinie 71, 73
- I**
- Idealzustand 39
- Informationssysteme 22
  - Infrarotheizung
    - für Fußbereich 71
  - Infrarotsensor 44
  - Inhaltsverzeichnis 4
  - Innenraum 23, 25, 26, 29, 30, 35, 36, 40
    - des Fahrzeugs 40
  - Innenraumeinrichtung 36, 41
  - Innenraumklima 18, 23, 26, 39, 43
    - angenehmes 20
  - Innenraums
    - Aufheizen des 68
  - Innenraumsolltemperatur 66
  - Innenraumtemperatur 26, 37, 39, 40, 42, 66, 73
    - angenehme 21
    - behagliche 57
    - vorgewählte 49
  - Innenraumtemperaturfühler 43
  - Innenraumtemperaturregelung 40, 43, 51
  - Innenraumtemperatursensor 43
  - Innenraumtemperatursollwert 42
  - Innenraumtemperaturverteilung 42
  - Innenraumzuluft 31, 34
  - Innovation 19
  - Innovationen 61
  - Insasse 23, 29, 35, 36, 37, 40, 49, 55, 62, 72
    - zugestiegener 64
  - Insassenanzahl 43
  - Integration 40
- J**
- Jalousieklappe 70
  - Japan 16
- K**
- Kälteanlage 30, 47
  - Kältekreislauf 70
  - Kälteleistung 43, 55
  - Kältemittel 30, 71
    - CO<sub>2</sub> 22
    - R134a 22
  - Kältequelle 63
  - Kältespeicher 63
  - Kaltluftdüse 35
  - Kaltluftkanal 35, 43
  - Kaltstart 69
  - Karosserie 21
  - Kennfeld 52
  - Kenngröße 42
  - Kleidung 56
  - Klima 26, 29, 58
    - komfortables 24, 73
    - optimales 19, 61
    - zugfreies 26
  - Klimaänderung 64
  - Klimaanlage
    - Leistung der 31
  - Klimaaspekte
    - weitere 42
  - Klimadaten 67
  - Klimafaktoren 27
  - Klimaregelung 22, 49
    - automatische 16, 39, 43
    - Automatische 39
    - optimale 64
  - Klimasitz 72
  - Klimatisierung 62
    - ausreichende 40
    - energiesparend 16
    - Fahrzeug- 18
    - Fahrzeug- 15
    - komfortable 55, 62
    - Komfortablere 61
    - kontinuierliche 21
    - ohne Betankung 68
    - von Fahrzeuginnenräumen 103
    - von Gebäuden 16
    - zugfreie 16
  - Klimatisierungsanlage
    - automatische 28
    - Komponenten einer 30
    - manuelle 28, 39
  - Klimatisierungsgerät
    - integriertes 29
    - zusätzliches 63
    - zweites 28
  - Klimatisierungskonzepte
    - Neue 61
  - Klimaverschlechterung 39
  - Klimazone 29, 49, 59
  - Klimazustand 39
  - Komfort 19, 22, 26, 39, 40, 41
    - Fahrzeug- 28
    - thermischer 20, 24, 26, 49, 56, 66, 67, 72
    - Thermischer 23, 61, 83
  - Komforthierarchie 25
  - Komfortparameter 56
  - Kommunikationssysteme 22
  - Kompaktklasse 22, 67
  - Kompatibilitätsproblem 40
  - Komplexität 22
  - Komponente 40
  - Komponenten
    - standardisierte 67
  - Kompressor 30, 37, 44, 50, 57, 66
    - drehzahlregelbarer 69
    - extern geregelter 56, 64
    - leistungsgeregelter 42
    - leistungsregelbarer 67
    - mit variablem Hub 31, 50



Kompressorleistung 31, 44  
 extern regelbare 69  
 Kondensator 30  
 Konstanthalten 49  
 Kontaktflächen 26  
 Konzept  
 neues 66  
 Konzepte  
 Bedien- 22  
 Hardware- 22  
 Software- 22  
 Kopf 26  
 Kopfbereich 35, 37, 54, 58, 66, 73  
 Kopplung 39  
 Körper 72  
 Kosten 29, 40, 67, 69  
 Anschaffungs- 19  
 Betriebs- 19  
 des Fahrzeugs 19  
 Kräfte  
 geringe 47  
 große 47  
 Kraftstoffverbrauch 69  
 Kühlbetrieb 32, 54  
 Kühlfach 63  
 Kühlleistung 53  
 maximale 40, 57  
 Kühlung 34  
 des Motors 33  
 Kühlwasser 33, 34, 43, 63  
 Kühlwasserfluß 51  
 Kühlwassertemperatur 32, 42, 43,  
 51, 69

## L

Ladestand  
 der Batterie 69  
 Lageregelung 51  
 Lärm 57  
 Lärmbelästigung 25  
 Lastenheftanforderungen  
 eingeschränkte 69  
 Lastfall 21  
 Latentwärmespeicher 70  
 Lebensmöglichkeit 27  
 Leerlaufdrehzahl 34  
 Leistung  
 des Fahrzeugs 19  
 maximale Heiz- 21  
 maximale Kühl- 21  
 Leistungsaufnahme 22  
 Leistungsbedarf 67  
 Leistungsfähigkeit 23  
 Leitungssystem  
 zentrales 62  
 Lenkradbelüftung 35  
 Links/Rechts-Trennung  
 eindeutige 37

Literaturverzeichnis 103  
 Lösung 29  
 geschlossene 36  
 Lösungsverfahren 49  
 Luft  
 frische 25  
 kalte 54  
 klimatisierte 34, 35  
 trockene 26, 44  
 warme 54  
 Luftansaugung 30  
 Luftauslaßklappe  
 Aktiv verstellbare 73  
 Luftauslaßöffnungen 36  
 Luftausströmrichtung 48  
 Luftaustrittsöffnung 30, 34, 42,  
 43, 48, 55, 72  
 im Fußbereich 33  
 zusätzliche 56  
 Luftaustrittsöffnungen 21, 27, 34  
 große 19  
 Großflächige 72  
 im Kopfbereich 33  
 Luftaustrittstemperatur 48, 51, 58  
 Luftaustrittstemperatursensor 43  
 Luftbefeuchtung 74  
 Luftbewegung 23, 27  
 Luftdruck 27  
 Luftdurchsatz 62  
 geringerer 70  
 Luftfahrt 74  
 Luftfeuchtigkeit 23, 27, 42, 44, 67  
 Luftführung 34, 72  
 Luftgeschwindigkeit  
 geringere 35  
 Luftionisation 27  
 Luftkanal 29, 36, 49, 55  
 spezieller 29  
 Luftkanäle 34  
 Luftklappe 47  
 Luftleitgitter  
 Aktiv verstellbare 72  
 Luftmassenstrom 29, 30, 39, 41,  
 43, 44, 48, 72  
 großer 56  
 im Innenraum 42  
 maximaler 21  
 Luftmischkammer 31, 32  
 Luftmischklappe 31, 42, 47, 48,  
 51  
 Position der 32  
 Luftmischprinzip 31  
 mit Jalousieklappen 70  
 Nachteile 32  
 Vorteile 32  
 Luftqualität 25  
 Luftstrom  
 gesamter 32  
 homogener 31

kalter 26, 32  
 Lufttemperatur 23, 27, 31, 32  
 Lufttrennklappe 32, 47  
 Lufttrocknung 74  
 Luftverteilung 37, 48, 53, 54, 55,  
 66  
 Luftverteilungsklappe 43, 47, 51,  
 52  
 Luftverteilungsklappen 34  
 Luftweg 31, 63  
 getrennter 29  
 Luftwege  
 getrennte 29  
 Luftwiderstand 55  
 Luftzirkulation 20  
 Luxusklasse 22, 67

## M

Magnetventil 47  
 Materialien 22, 25  
 Meeresrauschen 62  
 Mehrgrößenregelung 46  
 Mehrzonenklimatisierung 27, 29,  
 37, 42, 49, 50, 58  
 Mensch 22, 26, 39  
 Mensch-Maschine-Schnittstelle  
 27  
 Mercedes-Benz 59  
 neue S-Klasse 35, 44  
 Mikroorganismen 20  
 Mikroprozessor 46  
 Mikrowellen 71  
 Miniaturgebläse 43  
 Minimalklimatisierung 63  
 Minirechner 40  
 Mischkammer 29  
 Mitteldüse 34, 35, 43, 54  
 große 35  
 Mobilität 16  
 Modell 40  
 einfaches 50  
 komplexes 50  
 Modellierung 35  
 der Klimatisierungsanlage 48  
 Möglichkeiten  
 Erweiterungs- 28  
 Momente  
 geringe 47  
 große 47  
 Motivation 61  
 Motor 63, 64  
 ausgeschalteter 33  
 Verbrennungs- 31  
 Motordrehzahl 31, 51  
 Motorkühler 33  
 Motorkühlwasser 32, 33, 68  
 Motorlast 31, 51  
 Motorleistung

geringere 67  
Motorraum 29  
Motorrestwärme 33  
Motorrestwärmenutzung 37, 66

## N

Nachtbetrieb 38  
Nachtzeit 38  
Navigationssystem 66  
Nichtlinearität 48, 52  
Nichtlinearitäten 35  
Normalzustand 37  
NO<sub>x</sub> 44  
NTC-Tempersensoren 43

## O

Oberflächen  
aufwuchshemmende 20  
Oberkörper 73  
Öffnungsweite 47, 55, 60, 66  
der Luftaustrittsöffnungen 73  
Ökobilanz 19  
Omnibus 62  
Ozonschicht 22

## P

Palme 62  
PELTIER-Element 72  
PELTIER-Elemente 69  
Persönlichkeit 23  
Phänomene 35, 43  
Pilzen 20  
PI-Regler 45, 52, 59  
Platz 29, 32  
Platzangebot 26  
des Fahrzeugs 19  
Platzbedarf 62, 69  
Pneumatisch 47  
Pollen 20, 30  
Postausträger 63  
P-Regler 45, 52  
P-Reglern 59  
Programmiersprache  
höhere 46  
PTC-Zusatzheizung 68, 70

## Q

Qualität 19

## R

R134a 30  
Radioaktivität 27  
Rahmenbedingungen 36  
Erschwerte 67

technische 22  
Reaktion  
langsame 33  
schnelle 32  
Recherche  
Literatur- 17  
Patent- 17  
Recycling 22  
Redundanz 65  
Regel 40  
Regelabweichung 45, 50, 52, 73  
der Innenraumtemperatur 52  
Regelgröße 39  
Regelgrößen 42  
Regelkreis 40  
geschlossener 50  
klassischer 45  
unterlagerter 58  
Regelkreise  
unterlagerte 43, 52  
Regelstrecke 35, 40, 42  
Regelung  
Ausfalls der 40  
automatische 39  
der Feuchtigkeit 64  
feuchteabhängige 68  
intelligente 69  
klassische 63  
modellgestützte 40  
Regelungskonzept 36  
Regelungskonzepte 22, 39  
Neue 83  
Regelungsstrategien 52  
Regelungstechnik  
lineare 52  
Regelvorgang 42  
Regen 71  
Regensensor 68  
Regenwasser 74  
Regler 44, 50  
idealer 50  
Reglerverstärkung 50  
Reheat-Betrieb 31, 55, 56, 67  
Reibung  
nichtlineare 51  
Reichweite 68  
Reisebus 72, 73  
Ressourcen 49  
Restaurant 24  
R-hemmend 68  
Rotationsantrieb 47  
Rotationsantriebe 47  
Rückbank 36  
Rückschlagventil 36  
Rückspiegel 43  
Rückwärmegewinnung 68  
Rundumrollen  
automatische 68

## S

Sachwortregister 110  
SAE 17  
Sauerstoffdruck 27  
Sauerstoffgehalt 30, 67  
Sauerstoffzufuhr 30  
Schadgasbelastung 44  
Schadgassensor 44  
Schadstoffbelastung 30  
Schalter 36  
Schaltung  
analoge 46  
Scheibe 58, 62, 73  
beschlagshemmende 74  
wärmedämmende 68  
Scheiben 36  
automatisch verdunkelbare 68  
Schiebedach 36, 58, 62, 68, 73  
Schiebeleiste 36  
Schlußfolgerungen 102  
Schmutz 30, 36  
Schnee 71  
Schnittstelle  
Diagnose- 20  
Schrittmotor 47  
elektrischer 72  
Schutz 20  
der Insassen 20  
vor Erkältungen 26  
vor Luftkeimbelastungen 20  
Schweißbildung 26, 64  
Schwitzen 74  
Seitendüse 35  
Seitenfenster 71  
Selbstdiagnose 20  
Selbstüberwachung 20  
Sensordaten 22, 44  
Sensoren 22, 39, 43, 51, 61, 65,  
74  
Serie 28  
Sicherheit 19, 34, 39  
aktive 20  
Verkehrs- 20, 23  
Sicherheitsabschaltung 72  
Sicht 20  
Siedetemperatur 33  
Signal 44  
Simulation 34, 36, 41, 72  
Situation  
Termin- 23  
Verkehrs- 23  
Sitz 71  
Sitzbelegung 73  
Sitzbelüftung 35  
Sitzklimatisierung 72  
Sitzpositionssensorik 73  
Sitztemperatur 72  
Sitztrockner 74  
Software 40

Solarspektrum  
   sichtbares 73  
 Solarzelle 69  
 Sollwert 43  
 Sollwerte 42, 49  
   Korrektur der 56  
 Sollwertverstellung 50  
 Sommer 23, 26, 27, 55, 68, 71, 73  
 Sommerbedingung 44  
 Sommerbedingungen 21  
 Sonderzubehör 28  
 Sonne 44, 69  
 Sonneneinstrahlung 19, 39, 42,  
   57, 68, 73, 74  
   veränderliche 41  
 Sonnenenergienutzung 69  
 Sonnensensor 44  
 Sonstige 107  
 Speicher 38, 63  
   thermischer 69  
 Speicherbaustein 47  
 Spezifikation 40  
 Spiegelfuß 44  
 Split-Range-Verfahren 56  
 Spracheingabe 66  
 Stabilität 50  
 Stabilitätsuntersuchung 50  
 Standardkomponente 40  
 Standardregelkreis 46, 51  
 Standardzubehör 68  
 Standbetrieb 73  
 Standheizung 34, 51, 63  
 Standklimatisierung 63, 70  
 stationär 41  
 Staub 30, 36  
 Staubgehalt 57  
 Stelleingriff 66  
 Stellgröße  
   aufgelaufene 45  
   Stellgrößen 48  
   Stellgrößenbegrenzung 50, 54  
 Steuerbetrieb 40, 43  
 Steuereingriffe 57  
 Steuergerät 46, 52  
 Steuerung 48, 50, 57  
   präzise 51  
 Stillstand 48  
   des Fahrzeugs 38  
   des Motors 69  
 Störgröße 43  
   Änderung einer 73  
 Störgrößen 42  
 Störgrößenaufschaltung 51  
 Störungen 21, 25  
 störungsoptimal 50  
 Störungsrauschen 51  
 Störungsrechnung  
   singuläre 49  
 Stoßstange 36

Strahlung 27  
 Strahlungsdämmung 69  
 Strahlungsdurchlässigkeit 71  
 Strahlungsheizkörper 70  
 Strahlungsintensität 44  
 Strahlungskühlkörper 70  
 Strahlungswärme  
   des Fahrbahnbelags 42  
 Strandfahrt 62  
 Straßenzustand 23  
 Stromnetz 69  
 Strömung  
   laminare 35  
 Strömungsgeschwindigkeit 26, 55  
 Strömungswalze 55  
 Struktur  
   fraktale 66  
 Stückzahl  
   große 44  
 Suchbegriffe 17  
 Suppe 24  
 Symbolik 22  
 System  
   automatisches 39  
   verteilt 36

## T

Tachometer 44  
 Tagbetrieb 38  
 Tagesform 23  
 Tageszeit 38, 57  
 Taktmagnetventil 33, 34  
 Taupunkt 44, 56  
 Taupunktsberechnung 71  
 Taupunktsensor 44  
 TEKOS 41  
 Temperatur 24, 27  
   der Begrenzungsflächen 43  
   der Umschließungsflächen 23  
   Fußraum- 35  
 Temperatureinstellung  
   manuelle 35  
 Temperaturkarte 64  
 Temperaturschichtung 33, 35, 51,  
   55  
 Temperaturschieber 48  
 Temperatursensor 43  
 Temperatursensoren 74  
 Temperaturunterschied  
   zwischen Insasse und Wand 71  
*Temperaturverteilung* 41  
 Test 40  
 Thermoscan 64  
 Totzeit 45, 49, 50  
 Trägheit 68  
   thermische 41, 54  
 Transmission  
   steuerbare 73

Trend 28  
 Tür 71  
 Türe 30  
 Türen 68  
 Türfläche 42

## Ü

Überdruckgebiet 30, 36  
 Übergang 40  
 Übergangsbereich 50  
 Übergangsphasen 57  
 Übergangszeit 55  
 Überholen 68  
 Überreaktion 50  
 Überschwingen 50  
   der Innenraumtemperatur 51  
 Umgebung 18, 30, 40  
 Umgebungsbedingungen 49  
 Umgebungsluft  
   Taupunkt der 44  
 Umluft 30  
 Umluftanteil 28, 48  
   großer 67  
 Umluftbetrieb 44, 58  
 Umluftklappe 30, 42, 47  
 Umluftschalter 37, 66  
 Umlufttrockner  
   adsorptiver 68  
 Umschließungsflächen 36, 67, 71,  
   73  
 Umströmung 39  
 Umwelt 19, 22, 40  
 Umweltaspekte 21  
 Unbehagen 37  
 Unempfindlichkeitszone 50  
 Unsicherheit  
   des Benutzers 38  
 Unterdruckdose 47  
 Unterdruckgebiet 36  
 USA 16, 68  
 UV-hemmend 68

## V

Ventil 70  
 Verbesserung 64  
 Verbrauch 22  
   des Fahrzeugs 19  
 Verbrennungen 72  
 Verbrennungsheizung  
   zusätzliche 63  
 Verdampfer 28, 30, 43, 51, 56  
 Verdampfertemperatur 43, 44, 50  
 Verdampfungsdruck 30  
 Verdeck  
   offenes 58, 62  
 Vereisen  
   des Verdampfers 50, 56

-

Vereisung  
  der Scheiben 20  
  des Verdampfers 43

Verfassung  
  persönliche 56  
  Psychische 23

Verglasung  
  IR-reflektierende 68

Verkehr 20, 39

Verkehrssicherheit 39

Verstärkung 52

Versuch 48

Verunreinigungen 30, 36

Vibration 23

Vierzonenklimatisierung 29

Viren 20

Volumen 41

Volumenelemente 36

Vorgabe 42

Vorhersage 39

Vorklimatisierung  
  zeitgesteuerte 68

Vorkonditionierung  
  an der Steckdose 69

Vorschriften  
  gesetzliche 73

Vorsicht  
  größere 38

Vorteil 29

Vorteile 39

Vorwort 3

## W

Wahrnehmung  
  eines thermischen Zustands 24

  subjektive 23

Wärme 24, 31, 44

Wärmeabgabe 26

Wärmedämmung 69

Wärmeeinstrahlung 23

Wärmekapazität  
  des Innenraums 68

Wärmeproduktion 26

Wärmepumpe 69  
  elektrische 68

Wärmequelle 63, 69

Wärmer-Kälter-Schieber 66

Wärmer-Kälter-Taste 37

Wärmerückgewinnung 22

Wärmespeicher 63, 70

Wärmetauscher 28, 31, 32, 43

Wasser 71, 74

Wasserdampf 43, 56

Wasserpumpe 47, 48

Werkstatt 20

Wetterstation 67

Wettervorhersage 67

Widerstandsheizungen 69

Windschutzscheibe 30, 35, 44, 55,  
  73

Windschutzscheibenheizung 71

Windschutzscheibenrollo  
  Automatisches 73

Winkelangabe 48

Winter 23, 26, 38, 48, 55, 57, 61,  
  68

Wirtschaftlichkeit 19

Witterung 23

Witterungsbedingung 39

Wohlbefinden 27

Wünsche 38

## Z

Zeitkonstante 50  
  große 45

Zeitschaltuhr 63

Zerstörung  
  der Klimaanlage 44

Zone 29

Zug 55, 64

Zugbelästigung 26, 53  
  Vermeidung von 26

Zugerscheinung 60, 62  
  im Nacken 55

Zugerscheinungen 35, 36

Zuheizkonzept 63

Zuluft 29

Zusammenfassung 13

Zusammenhang  
  Nichtlinearer 32

Zusatzheizkonzept  
  elektrisches 34

Zusatzheizung 34, 68, 70

Zustand  
  aktueller 37  
  der Luft 28  
  der Straße 38  
  komfortabler 24  
  komfortabler stationärer 26  
  stationärer 26, 64  
  unkomfortabler stationärer 26

Zuverlässigkeit 19  
  größere 31

Zweipunktkennlinie  
  mit Hysterese 50

Zweizonenklimatisierung 29, 59