

1 Problemstellung

Mit dem ersten Einsatz einer größeren Anzahl von batterieelektrischen Fahrzeugen (Mini E), vor allem im Winterbetrieb, tauchte Ende der 2000er Jahre die Problematik der Reichweitenreduktion bei Elektrofahrzeugen durch die Fahrzeugheizung in der Automobilpresse auf. Eine Sammlung an Schlagzeilen dazu ist in Bild 1 gezeigt.



Bild 1: Sammlung aus Schlagzeilen zum Reichweiteneinfluss der Heizung bei Elektrofahrzeugen

Ursachen für den starken Reichweiteneinfluss liegen im hohen Energiebedarf für die Heizung und Klimatisierung von Fahrzeugen bei sehr niedrigen und sehr hohen Außentemperaturen, am zusätzlichen Heiz- und Kühlbedarf der Traktionsbatterie, an der nur geringen Abwärme des Antriebsstrangs, an der beschränkten Reichweite (sodass eine Reichweitenreduktion von 50% bereits zu einem Aktionsradius von unter 100 km führt) sowie an wenig effizienten Heiz- und Kühlkonzepten, da diese von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor übernommen wurden.

Bei konventionellen Fahrzeugen sind die Auswirkungen des hohen Heiz- und Kühlenergiebedarfs weniger problematisch, jedoch tritt auch hier ein erheblicher Mehrverbrauch durch den Betrieb von Heizung und Klimaanlage auf. Durch Effizienzsteigerungen fällt auch bei konventionellen Fahrzeugen immer weniger Abwärme an, sodass im städtischen Niedriglastbetrieb und auf Kurzstrecken bei niedrigen Außentemperaturen vielfach elektrisch zugeheizt wird. Zur Kälteerzeugung im Sommer benötigt der Klimaanlagekompressor mechanische Energie, die vom Verbrennungsmotor bereitgestellt wird. Dieses und auch die erhöhte Last des Generators für die elektrische Zuheizung führt zu einem Anstieg des Kraftstoffverbrauchs. Der differenzielle Zusatzverbrauch beträgt überschlägig 0,5 l/100 km pro



1.000 W zusätzlicher elektrischer Last. Daraus wird deutlich, dass es auch bei konventionellen und hybridisierten Fahrzeugen sinnvoll ist, das Heiz- und Klimasystem zu optimieren.

1.1 Zielsetzung

In dieser Arbeit soll untersucht werden, wie der Zielkonflikt entspannt werden kann, der zwischen dem Energiebedarf des Heiz- und Klimasystems zum Erreichen eines thermischen Komfortgefühls für die Insassen und dem Abwärmefizit im Antriebsstrang von Niedrigenergiefahrzeugen entsteht. Dabei werden der Energie- und Leistungsbedarf detailliert analysiert. Es ist zu klären, mit welchen Heiz- und Klimatisierungssystemen ein Fahrzeug ausgestattet werden muss, um einen möglichst geringen Energiebedarf zum Erreichen eines konstanten oder gesteigerten thermischen Komforts zu erzielen. Weitere Aspekte, wie Kosten und Gewicht, werden nur im Sinne eines grundsätzlichen Serieneinsatzes betrachtet.

Bisherige Arbeiten konzentrieren sich entweder auf eine oder wenige technische Lösungen und betrachten nicht Zeitverlauf von Temperatur und Leistung im Gesamtsystem aus Fahrzeug, Innenraum sowie Heizungs- und Klimatisierungssystem mit ihren Wechselwirkungen. Dafür muss zunächst der Aufbau des Heizungs- und Klimatisierungssystems im Fahrzeug betrachtet werden und es müssen die derzeit und in naher Zukunft verfügbaren Systeme zur Gewinnung und Speicherung von thermischer Energie analysiert werden. Daraus können dann Möglichkeiten zur Reduzierung des thermischen Energiebedarfs hergeleitet werden. Die detaillierten, zeitlich aufgelösten Anforderungen, die sich aus Fahrzeug- und Umweltrandbedingungen an ein Heiz- und Klimatisierungssystem für einen Anwendungsfall ergeben, müssen ermittelt werden, um eine geeignete Auswahl an Technologien treffen zu können. Die Technologie soll dabei nicht im Detail betrachtet werden. Um zukünftige Entwicklungen bei den Apparaten und Komponenten in die Methodik aufnehmen zu können, werden die Grundkonzepte, wie thermische Speicherung oder Wärmedämmung, miteinander verglichen. Durch den hohen Energiebedarf der Heiz- und Klimatisierungssysteme bei starken Abweichungen der Umgebungstemperatur von der Komforttemperatur ist zu erwarten, dass nicht ein Konzept für alle Nutzungs- und Temperaturprofile geeignet ist, sondern dass sich die Konzepte entsprechend dem konkreten Anforderungsprofil unterscheiden.

Für die Untersuchungen wird ein Innenraumsimulationsmodell in MATLAB/Simulink entwickelt, mit dem der Energiebedarf, die notwendige Leistung und der Innenraumtemperaturverlauf unter gegebenen Randbedingungen ermittelt werden kann. Exemplarisch soll das Vorgehen für zwei Fahrzeugklassen aufgezeigt werden.



2 Grundlagen

Die thermodynamischen Grundlagen dieses Kapitels wurden mit Hilfe folgender Literatur zusammengefasst: Baehr (2005); Langeheinecke et al. (2004); Marek et al. (2012). Zur Herleitung der Gleichungen sei auf ebendiese verwiesen.

2.1 Energieformen

Zur Heizung und Klimatisierung eines Fahrzeugs ist Energie nötig. Abgesehen vom Spezialfall des thermischen Energiespeichers ist zudem ein Energiewandler notwendig, der die mitgeführte, gespeicherte Energie in eine andere Energieform umwandelt. Dabei bleibt nach dem Energieerhaltungssatz die Gesamtenergie des betrachteten, abgeschlossenen Systems konstant.

2.1.1 Primärenergie und Endenergie

Primärenergien sind Energien, die natürlich vorkommen. Zu den technisch relevanten Primärenergieträgern gehören sowohl die fossilen Energieträger, wie Erdgas, Erdöl, Kohle und der nukleare Energieträger Uran, als auch regenerative Energieträger, wie Biomasse, Wind- und Solarenergie sowie Wasserkraft. Aus Primärenergie kann Endenergie gewonnen werden. Je nach Primär- und Endenergieform folgt die verlustbehaftete Umsetzung von Primär- zu Endenergie durch Transport und Veredelung (bspw. in einer Raffinerie), sie kann aber auch eine Energiewandlung beinhalten (bspw. die Gewinnung von elektrischer Energie aus Kohle).

Zu den für Kraftfahrzeuge verwendeten Endenergieträgern gehören Otto- und Dieselmotorkraftstoff, komprimiertes Erdgas (CNG), Flüssiggas (LPG) oder elektrische Energie. Beim Vergleich von unterschiedlichen Energiewandlern zum Heizen ist darauf zu achten, dass zum einen der Primärenergieverbrauch nicht mit dem Endenergieverbrauch verglichen wird, und zum anderen, dass die Gewinnung von unterschiedlichen Endenergien auch mit unterschiedlichen Wirkungsgraden verbunden ist. Die Endenergie wird im Fahrzeug in Nutzenergie (mechanische Energie, Licht, Wärme und Kälte) gewandelt. Bei der sogenannten *Well-to-Wheel-Analyse* wird versucht, die gesamte Wandlungskette zu betrachten und nicht nur die lokal benötigten Endenergiemengen, wie es bei der *Tank-to-wheel-Analyse* der Fall ist.

Tabelle 1: Energiedichten unterschiedlicher Endenergieträger bzw. -speicher für Fahrzeuganwendungen

	Benzin	Dieselmotorkraftstoff	Lithium-Ionen Batterie	(Bio-) Ethanol	CNG
Gravimetrische Energiedichte	43,5 MJ/kg	42,8 MJ/kg	0,36 MJ/kg	26,8 MJ/kg	46,8 MJ/kg
Volumetrische Energiedichte	32,2 MJ/l	35,7 MJ/l	0,9 MJ/l	21,1 MJ/l	0,04 MJ/l

In dieser Arbeit wird die thermische Energie betrachtet, die zum Heizen und Kühlen der Fahrzeugkabine notwendig ist. Die Energie wird bei batterieelektrischen Fahrzeugen aus dem elektrochemischen Speicher entnommen. Durch die geringe Energiedichte von Akkumulatoren (Tabelle 1) fällt die zur Heizung und Klimatisierung entnommene Energie stärker ins Gewicht, als bei den chemischen Energieträgern von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor.



2.1.2 Energiewandlung, Wirkungsgrad und Leistungszahl

Die Größe der Verluste bei der Energiewandlung hängt von der Art der Wandlung bzw. des Transports ab. Das Verhältnis zwischen genutzter Leistung P und umgesetzter Leistung wird als Wirkungsgrad η (Gleichung (1)) bezeichnet. Gleiches gilt für die Energie E (Gleichung (2)).

$$\eta = \frac{P_{Nutz}}{P_{Umsatz}} \quad (1)$$

$$\eta = \frac{E_{Nutz}}{E_{Umsatz}} \quad (2)$$

Den Anteil der Energie, der in eine beliebige andere Energieform umgewandelt werden kann, um Arbeit zu verrichten, wird als Exergie bezeichnet. Der verbleibende Anteil ist die Anergie:

$$\text{Energie} = \text{Exergie} + \text{Anergie} \quad (3)$$

Anergie kann nicht in Exergie gewandelt werden. Bei einer Wärmekraftmaschine wird der maximale Anteil von Exergie und minimale Anteil Anergie durch den Carnot-Wirkungsgrad vorgegeben.

Bei Kompressionskältemaschinen und Wärmepumpen wird üblicherweise nicht die Bezeichnung „Wirkungsgrad“ verwendet, sondern es wird von der Leistungszahl (auch CoP für Coefficient of Performance oder EER für Energy Efficiency Ratio) gesprochen. Die Leistungszahl kann im Gegensatz zum Wirkungsgrad Werte über 1 annehmen, da die Bilanz nicht entsprechend Gleichung (1) und (2) über die gesamte Energie und Leistung gezogen wird, sondern lediglich die eingesetzte mechanische Arbeit im Verhältnis zur Nutzwärme/-kälte betrachtet wird. Durch Druckerhöhung mittels eines Kompressors kann das Kältemittel oberhalb der Ausgangstemperatur kondensieren und dabei Wärme an die Umgebung (Kompressionskältemaschine) oder den Innenraum (Wärmepumpe) abgeben. Nach Entspannung des Kältemittels erfolgt bei der Heizung die Wärmeaufnahme aus der Umgebung und bei der Klimatisierung aus dem Innenraum im Wesentlichen durch Verdampfen des Kältemittels. Es kann so neben der Kompressorarbeit zusätzlich Energie aus der Umgebung bzw. an die Umgebung abgegeben werden, sodass die Leistungszahl größtenteils > 1 ist.

$$CoP = \frac{Q_{Heiz, K\ddot{u}hl}}{W} \quad (4)$$

2.1.3 Innere Energie und Enthalpie

Für den in dieser Arbeit betrachteten Wärmehaushalt der Fahrzeugkabine sind neben den Energiequellen bzw. dem Energiespeicher und der dazugehörigen thermischen Energie auch noch die thermodynamischen Größen Innere Energie und Enthalpie relevant.



Die thermische Energie E_{th} ist als das Produkt aus Wärmekapazität c_p , Masse m und Temperatur T definiert:

$$E_{th} = c_p \cdot m \cdot T \quad (5)$$

Die Innere Energie ist der thermische Mittelwert eines Systems bestehend aus mehreren Teilchen (Vielteilchensystem). Anschaulicher ist die Änderung der Inneren Energie ΔU eines geschlossenen Systems (bspw. der Kältemittelkreis einer Kompressionskältemaschine). Sie ist die Summe aus der zugeführten Wärme ΔQ und der am System verrichteten Arbeit ΔW :

$$\Delta U = \Delta Q + \Delta W \quad (6)$$

Die Enthalpie H setzt sich zusammen aus der Inneren Energie und dem Produkt aus Druck und Volumen eines Stoffstroms:

$$H = U + pV \quad (7)$$

Bei Betrachtung der relativen Innenraumfeuchte eines Fahrzeugs kann mit Hilfe der Enthalpie die für die Trocknung der Luft notwendige Energie ermittelt werden.

2.2 Wärmestrom, Wärmestromdichte und Temperatur

Wärme gemessen in $[J]$ oder $[W s]$ ist der Teil der thermischen Energie, der zwischen zwei Systemen mit unterschiedlicher Temperatur übertragen wird, sofern die Systemgrenzen wärmedurchlässig sind. Nach dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik fließt Wärme dabei stets von der höheren zur niedrigeren Temperatur. Besteht keine Temperaturdifferenz, herrscht ein thermisches Gleichgewicht und der Wärmefluss kommt zum Erliegen. Soll der Wärmestrom umgekehrt werden, sodass Wärme von niedriger zu höherer Temperatur transportiert wird, ist dafür Arbeit notwendig. Wird einem System die Prozessgröße Wärme zugeführt, erhöht sich die innere Energie und die Entropie des Systems, was über Temperaturmessung nachgewiesen werden kann.

Der Wärmestrom \dot{Q} gibt die in einem Zeitfenster einem System zugeführte Wärme in $[J/s]$ an. Analog dazu gibt die Wärmestromdichte \dot{q} in $[W/m^2]$ den auf eine Fläche A bezogenen Wärmestrom an:

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A} \quad (8)$$

Temperatur ist eine Grundgröße, die den thermischen Zustand eines Systems angibt und üblicherweise in $[K]$ angegeben wird. Sie kann nicht direkt gemessen werden, sondern wird über die Temperaturabhängigkeit der Dichte eines Gases oder der elektrischen Leitfähigkeit ermittelt. Eine berührungslose Temperaturmessung ist über die emittierte Wärmestrahlung möglich.

2.3 Wärmetransport

Wärme kann durch drei Mechanismen übertragen werden: Wärmestrahlung, Wärmeleitung und Konvektion. Die drei Arten überlagern sich, sodass eine Quantifizierung der einzelnen Anteile



im Einzelfall schwierig sein kann. Wärmeleitung und Konvektion sind stoffgebundene Transportprinzipien und treten im Vakuum nicht auf, Wärmestrahlung ist ein Teil der elektromagnetischen Wellen und funktioniert auch im Vakuum. (Langeheinecke et al. 2004; Marek et al. 2012).

2.3.1 Wärmestrahlung

Wärmestrahlung ist elektromagnetische Strahlung, die von jedem Festkörper und jeder Flüssigkeit mit einer Temperatur über dem absoluten Nullpunkt ausgesendet wird. Das Spektrum der ausgesendeten Strahlung liegt bei im Fahrzeug auftretenden Temperaturen hauptsächlich im langwelligen, infraroten Bereich. Bei sehr hohen Temperaturen (bspw. der Oberflächentemperatur der Sonne) liegt ein Teil des Spektrums im sichtbaren Bereich. Für die Übertragung der Strahlung ist keine Materie notwendig. Zwischen zwei Körpern mit gleicher Temperatur befindet sich ein Strahlungsfeld mit ausgeglichener Bilanz, sodass kein Nettowärmestrom fließt. Der Wärmestrom \dot{Q} zwischen zwei Körpern lässt sich über das Stefan-Boltzmannsche Strahlungsgesetz berechnen:

$$\dot{Q}_{12} = \sigma_{12} \cdot A_{12} \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (9)$$

Dabei ist σ_{12} die Strahlungskonstante in $[W/m^2K^4]$ der beiden Körper, die von der Geometrie und den Oberflächeneigenschaften (Emissionsgrad) sowie der Stefan-Boltzmann-Konstante abhängt. A_{12} ist die Oberfläche der Körper und T_x die Temperatur der beiden Körper in [K]. In der Praxis ist die Strahlungskonstante, die vom Emissionsgrad des Körpers abhängt, bei komplexeren Oberflächen schwer zu bestimmen.

2.3.2 Wärmeleitung

Mit Wärmeleitung (Konduktion) wird der Wärmefluss in einem Festkörper (bspw. der Fahrzeugkarosserie) oder ruhendem Fluid beschrieben. Findet ein durch eine Temperaturdifferenz ausgelöster Materialstrom statt, wird von Konvektion gesprochen. Der Wärmestrom fließt durch atomare bzw. molekulare Wechselwirkungen, wie Gitterschwingungen, Elektronendiffusionen und molekulare Zusammenstöße ohne Materialbewegung und ist im Gegensatz zur Wärmestrahlung stoffgebunden.

Die Fouriersche Differenzialgleichung

$$\vec{q} = -\lambda \cdot \text{grad}(T) \quad (10)$$

beschreibt die Wärmestromdichte \vec{q} durch Wärmeleitung mit λ als Wärmeleitfähigkeit (Bild 2) und $\text{grad}(T)$ den Temperaturgradienten. Die Wärmeleitfähigkeit ist dabei ein Proportionalitätskoeffizient, der nur in einfachen Fällen eine Konstante ist. Je nach Material und Randbedingungen variiert der Koeffizient mit der Temperatur, dem Druck und bei anisotropen Materialien auch mit der Richtung. Da sich das Temperaturfeld $\text{grad} T$ wegen der Wärmeströme zeitlich ändert, lässt sich Gleichung (10) in der Regel nicht direkt lösen.

Für einfache Probleme bei ausschließlicher Betrachtung der x-Richtung mit konstanten Stoffwerten λ , c_p (spezifische Wärmekapazität) und Dichte ρ sowie konstantem Volumen aus



homogenem und isotropen Material mit der Länge Δx ist die zeitliche Änderung der Enthalpie $\frac{\partial(mh)}{\partial \tau}$ eines Volumens durch Wärmeleitung gleich der Differenz der Wärmeströme \dot{Q}_x :

$$\frac{\partial(mh)}{\partial \tau} = \dot{Q}_x - \dot{Q}_{x+\Delta x} \quad (11)$$

Statt durch die Enthalpieänderung kann die Wärmestromdifferenz auch über Materialparameter und den zeitlichen Temperaturgradienten ausgedrückt werden:

$$m c_p \frac{\partial T}{\partial \tau} = \dot{Q}_x - \dot{Q}_{x+\Delta x} \quad (12)$$

Analog kann statt der Wärmestromdifferenz auch die Wärmestromdichte (vgl. Gleichung (8)) betrachtet werden. Zusammen mit der Fourierschen Differenzialgleichung lässt sich dann für ein Problem mit konstanten Stoffwerten λ, ρ und c_p die Wärmeleitung in den drei Raumrichtungen einheitlich mit Hilfe des Nabla-Operators darstellen:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{\rho c_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \frac{\lambda}{\rho c_p} \nabla^2 T \quad (13)$$

Hierbei ist ρ die Dichte des betrachteten Materials, c_p die spezifische Wärmekapazität und τ der betrachtete Zeitraum. Für eindimensionale Systeme lässt sich Gleichung (13) zu Gleichung (14) vereinfachen:

$$\dot{q}_x = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad (14)$$

Wenn das Problem zudem stationär ist, wie bspw. ein fester Körper mit zwei Wandflächen W_1 und W_2 und der Dicke d , lässt sich der Wärmestrom mit dem Fourierschen Gesetz beschreiben:

$$\dot{Q} = \frac{\lambda}{d} A (T_{W_1} - T_{W_2}) \quad (15)$$

Während für stark vereinfachte, stationäre Systeme über Gleichung (15) unter Verwendung von Tabellenwerten für λ die Wärmeleitung analytisch bestimmbar ist, ist dies für komplexere, instationäre Probleme nur in Sonderfällen möglich. Modelle zur Bestimmung der instationären Wärmeleitung \dot{Q} sind bspw. „ideal gerührter Behälter“, „halbunendlicher Körper“ und „Nährungslösung für große Zeiten“. (Marek et al. 2012).

Die genannten Modelle gelten nur in sehr engen Grenzen. Für komplexere Körper und Randbedingungen wird deshalb die Fouriersche Differenzialgleichung (13) numerisch mit Hilfe der Finite-Differenzen-, Finite-Volumen- oder Finite-Elemente-Methode gelöst. Die numerischen Verfahren sind nicht Bestandteil dieser Arbeit. Für weiterführende Informationen sei bspw. auf Press (2007) und Baumann et al. (2006) verwiesen.

Trotz der komplexen Bauform und der unterschiedlichen, in Reihe und parallel geschalteten Materialien lassen sich für die Fahrzeugkabine mit Gleichung (15) und mehreren material- und



geometrieabhängigen Thermem $\frac{\lambda}{d}A$ für Scheibenflächen, Klappen, Dach und Chassis gute Näherungen erzielen (Jordan 2000). In Bereichen, in denen starke Temperaturunterschiede auftreten, wie durch den Abgasstrang bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor, ist eine detailliertere Betrachtung der Wärmeleitung mit numerischen Hilfsmitteln notwendig.

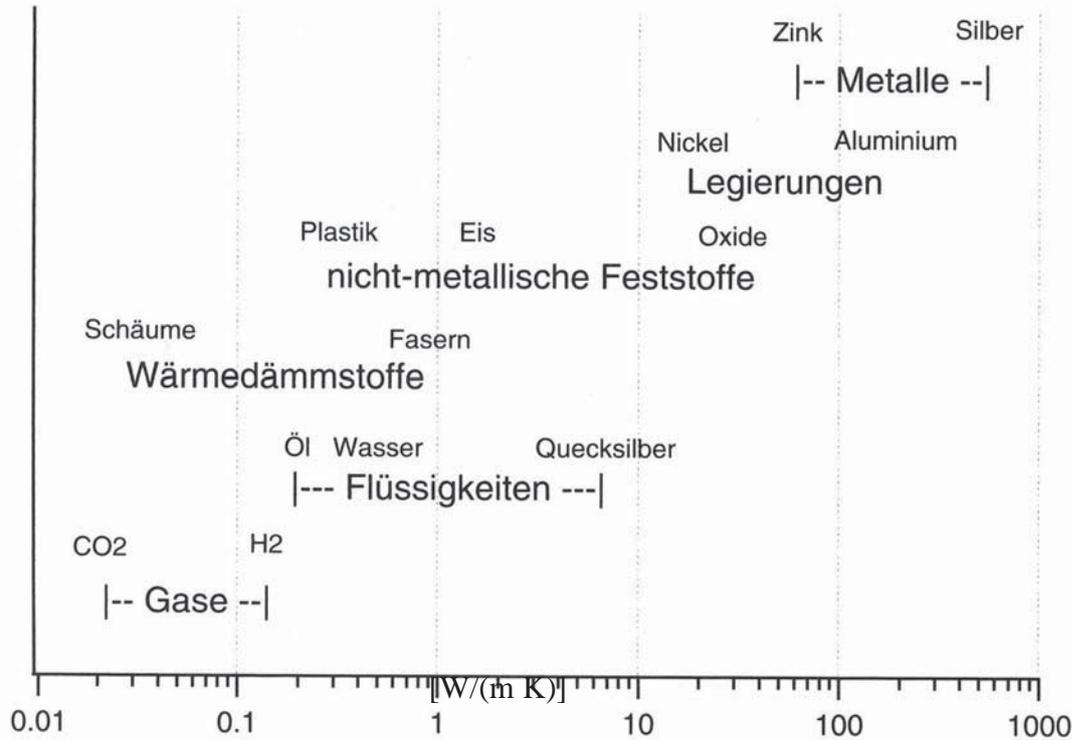


Bild 2: Wärmeleitfähigkeit verschiedener Materialien bei Standardbedingungen (Polifke et al. 2009)

2.3.3 Konvektion

Thermische Konvektion ist ein makroskopischer, massegebundener Wärmeübertragungsmechanismus, in dem durch Teilchenbewegungen Enthalpie transportiert wird. Konvektion wird unterteilt in erzwungene Konvektion, bei der durch äußere Kräfte (wie etwa das Heizungsgebläse) eine Fluidströmung erzeugt wird, und freie Konvektion, die durch Dichteunterschiede bei Temperaturdifferenzen hervorgerufen wird. Außer durch Temperaturdifferenzen können Dichteunterschiede auch aufgrund unterschiedlicher chemischer Zusammensetzungen (z.B. Salzkonzentrationen) hervorgerufen werden. Diese chemische Konvektion tritt im Fahrgastraum jedoch nicht auf.

Zur Bestimmung der Konvektion eines eindimensionalen Problems (x-Richtung) muss die Energiebilanz (Gleichung (11)) um die Differenz der Enthalpieströme $\dot{H}_x - \dot{H}_{x+\Delta x}$ des betrachteten Volumens erweitert werden:

$$\frac{\partial(mh)}{\partial \tau} = \dot{Q}_x - \dot{Q}_{x+\Delta x} + \dot{H}_x - \dot{H}_{x+\Delta x} \quad (16)$$



Analog zur partiellen Differenzialgleichung für die Wärmeleitung (Gleichung (13)) kann auch der Energietransport durch Konvektion über eine Differenzialgleichung beschrieben werden:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial T}{\partial x} + w_y \frac{\partial T}{\partial y} + w_z \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\lambda}{\rho c_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (17)$$

Hierbei beschreibt der linke Gleichungsteil die Strömungsgeschwindigkeiten für die Fluidbewegung, während der rechte Teil die Wärmeleitung enthält (vgl. Gleichung (13)). Je nach betrachtetem Fall und Viskosität des Fluids (Luft, Wasser, Kühlwasser, Öl) dominiert eher die linke konvektive oder die rechte leitende Seite.

Das für die Bestimmung der Konvektion notwendige dreidimensionale Geschwindigkeitsfeld in die drei Raumrichtungen w_x , w_y und w_z lässt sich in der Regel nicht analytisch bestimmen, insbesondere nicht für die Grenzschicht der Strömung um den Festkörper. Zur Quantifizierung der Konvektion wird deshalb oftmals die Ähnlichkeitstheorie genutzt, bei der der konvektive Wärmeübergang mit dimensionslosen Kennzahlen beschrieben wird. Mit dessen Hilfe lassen sich empirisch ermittelte Daten auf ein spezielles Problem übertragen, um auf relativ einfachem Weg die Konvektion zu quantifizieren. Die für die Bestimmung der erzwungenen Konvektion notwendigen Kennzahlen sind:

- Die *Reynoldszahl* beschreibt das Verhältnis von Trägheits- zu Zähigkeitskräften einer Strömung.
- Die *Prandtlzahl* gibt das Verhältnis von kinematischer Viskosität und Temperaturleitfähigkeit an.
- Die *Nusseltzahl* vergleicht die tatsächliche konvektive Wärmeübertragung mit der Wärmeleitung eines ruhenden Fluids.

Für die freie Konvektion sind die *Grashofzahl*, die das Verhältnis von Auftriebs- zu Reibungskräften angibt, und die *Rayleighzahl*, die das Verhältnis von Wärmeleitung durch Konvektion zu Wärmeleitung angibt, relevant (vgl. Gleichung (17)).

Mit Hilfe der Kennzahlen kann der Wärmeübergangskoeffizient α bestimmt werden, durch den die äußeren Randbedingungen, Stoffeigenschaften und Bauteilgeometrie berücksichtigt werden. Zusammen mit der Temperaturdifferenz zwischen Wand und Fluid gilt für den konvektiven Wärmestrom:

$$\dot{Q} = \alpha \cdot A (T_{Fluid} - T_{Wand}) \quad (18)$$

Der Koeffizient α berechnet sich aus dem Quotienten der Nusseltzahl multipliziert mit der Wärmeleitfähigkeit von Luft und der „Überströmlänge“ der Fahrgastzelle. Für die Nusseltzahl werden Fallunterscheidungen zwischen freier und erzwungener Konvektion sowie vertikalen und horizontalen Flächen durchgeführt. Auf die Darstellung der empirischen Formeln wird hier verzichtet. Eine ausführliche Beschreibung der Berechnung von Konvektion für eine Fahrgastzelle ist in Baumgart (2010) zu finden. (Böckh et al. 2009).



2.3.4 Wärmedurchgangskoeffizient und Wärmeübergangskoeffizient

Der Wärmedurchgangskoeffizient (früher k-Wert, heute U-Wert) ist ein vor allem in der Bauphysik häufig verwendetes Maß für den Wärmestrom zwischen zwei Fluiden mit dazwischen gelegentlichem festem Körper, wie bspw. einer Hauswand oder einer Pkw-Tür (vgl. Kapitel 5.4.1.1). Der Wärmedurchgangskoeffizient beinhaltet den Wärmeübergangskoeffizienten, der den Wärmeübergang an den Grenzflächen Fluid-Festkörper und Festkörper-Fluid beschreibt, und die Wärmeleitfähigkeit im Festkörper. Damit ist der Wärmedurchgangskoeffizient ein spezifischer Kennwert eines Bauteils, da er von Oberfläche, Geometrie und Konfiguration aus Fluiden und Festkörper abhängt, und kann nicht ohne weiteres auf andere Bauteile übertragen werden.

Die Einheit für den Wärmedurchgangskoeffizienten und Wärmeübergangskoeffizienten ist $\left[\frac{W}{m^2 K} \right]$. Analog zur Wärmeleitfähigkeit kann auch der Kehrwert als Wärmedurchgangswiderstand verwendet werden.

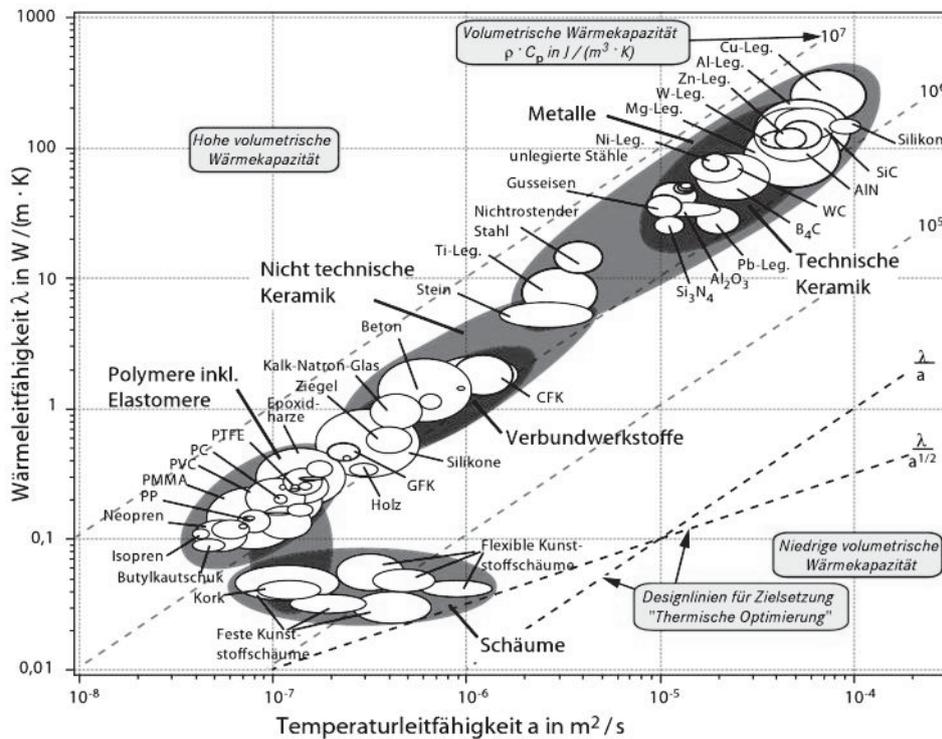


Bild 3: Zusammenhang von Temperaturleitfähigkeit und Wärmeleitfähigkeit aus Möller (2013) ¹

2.3.5 Wärmeleitfähigkeit, Temperaturleitfähigkeit und Wärmewiderstand

Die Wärmeleitfähigkeit wird benötigt, um den Wärmestrom bzw. die Wärmestromdichte zu berechnen (vgl. Gleichung (10) ff). Sie ist eine Eigenschaft des verwendeten Werkstoffs und wird in $\left[\frac{W}{m K} \right]$ angegeben. Bei anisotropen Werkstoffen ist die Leitfähigkeit auch abhängig von der betrachteten Richtung. Die Wärmeleitfähigkeit ist, wie auch die Wärmekapazität, temperaturabhängig, kann aber für geringe Temperaturänderungen als konstant angenommen werden. Stoffwerte für die Wärmeleitfähigkeit können über Messungen bestimmt oder aus Tabellenbüchern für gängige Baumaterialien entnommen werden. In Tabelle 2 ist die

¹ Bei der als Silikon bezeichneten Wolke im Bereich der Metalle handelt es sich vermutlich um Silizium