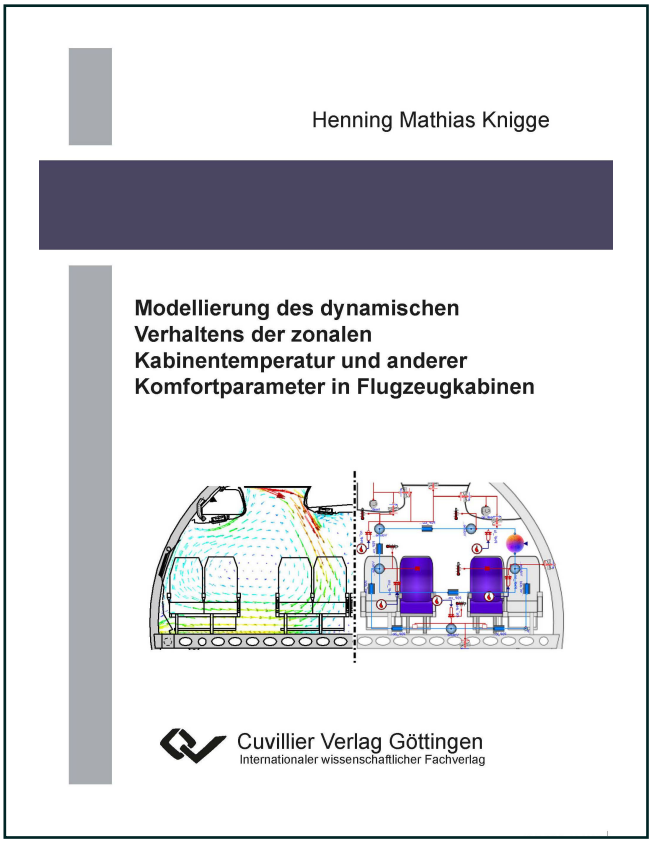
Henning Knigge (Autor)

Modellierung des dynamischen Verhaltens der zonalen Kabinentemperatur und anderer Komfortparameter in Flugzeugkabinen



https://cuvillier.de/de/shop/publications/6550

Copyright:
Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentzsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen, Germany
Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: info@cuvillier.de, Website: https://cuvillier.de

Kapitel 1
Einleitung

1.1 Allgemeine Einführung in das Forschungsthema

Das *Airports Council International* zählt jährlich rund 5 Milliarden Flugpassagiere [Airports Council International (2009)]. In der modernen Welt sind Flugreisen genauso selbstverständlich geworden wie Reisen mit anderen Massentransportmitteln wie beispielsweise Schiff oder Bahn. Anders als in diesen kann sich der Flugzeugpassagier jedoch während seiner meist mehrstündigen Reise nicht frei bewegen, sondern verbringt über 95% der Zeit im Sitzen [Miehlke (2005)]. Zudem ist er aufgrund der extremen Außenbedingungen während des Fluges einem vollständig künstlichen Umgebungsklima ausgesetzt. Der Komfort spielt somit für den Flugzeugreisenden eine sehr große Rolle. Daher investieren die Flugzeughersteller verstärkt in diesen Bereich, um den jährlich steigenden Anforderungen der Fluggesellschaften bezüglich der vielfältigen Aspekte des Flugzeugkabinenkomforts gerecht werden zu können.

Der in dieser Arbeit untersuchte Komfortaspekt bezieht sich vor allem auf die thermische Behaglichkeit, welche einen entscheidenden Einfluss auf die menschliche Empfindung und den Kabinenkomfort hat. Diese zeigt bei heutigen Passagierflugzeugen einen großen Optimierungsbedarf. Beispielsweise bemängeln viele Passagiere neben der viel zu trockenen Luft [Wörner (2006)] auch die Ausbildung eines unangenehmen Temperaturgefälles in Richtung des Kabinenboden. Insbesondere im Fußbereich bildet sich eine kalte Luftschicht aus, worauf Menschen aufgrund der am Fuß vermehrt angeordneten Thermorezeptoren sehr empfindlich reagieren. Dieser unangenehme Effekt wird durch Wärmebrücken zur kalten Flugzeugstruktur sowie zum ungeheizten Frachtraum verstärkt.

Die Aufgabe, thermische Behaglichkeit für möglichst viele Passagiere herzustellen, fällt beim Passagierflugzeug ausschließlich der zentralen Klimaanlage zu, die hier zudem auch wichtiger Bestandteil des Lebenserhaltungssystems ist. Die Ansammlung kalter Luftschichten am Boden lässt jedoch vermuten, dass die bisher eingesetzte Strömungsführung nicht geeignet ist, ein angenehmes Kabinenklima herzustellen.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Die Untersuchung dieses Komfortdefizits ist zentrale Aufgabe der vorliegenden Arbeit, um Erkenntnisse für eine darauf aufbauende Optimierung der Reglerauslegung des Klimatisierungssystems zu gewinnen.

1.2 Aufgabenstellung

Zwei wesentliche Faktoren der Flugzeugklimatisierung stellen die Lufttemperatur und die Luftgeschwindigkeit dar, da sie das Temperaturverhalten in der Kabine und das Behaglichkeitsempfinden der Passagiere entscheidend beeinflussen. Bei der konventionellen Form der Kabinenklimatisierung bei Passagierflugzeugen wird über im Deckenbereich angeordnete Lufteinlässe Zuluft so in die Kabine eingeblasen, dass sich im Querschnitt in den beiden Kabinenhälften zwei gegenläufig rotierende Luftwalzen ausbilden und stabilisieren. Diese beiden Luftwalzen dienen im Idealfall der kontinuierlichen Durchmischung der Kabinenluft mit dem Ziel, eine homogene Luftqualität und Lufttemperatur zu erhalten.

In der vorliegenden Dissertation werden die diversen Einflussfaktoren auf die Kabinentemperaturdynamik dieser konventionellen Klimatisierungsform mit Hilfe von Flugtestdaten sowie durch Messungen an einem im Rahmen dieser Arbeit aufgebauten Modelltestand (Maßstab 1:5) untersucht. Basierend auf den erhaltenen Messdaten und der Annahme gerichteter Strömungsvorgänge wird mit der Systemsimulationssoftware *Dymola* eine *Modelica*-Bibliothek erstellt. Unter Nutzung dieser Bibliothek wurden Simulationsmodelle zur Abbildung der Thermodynamik in Flugzeugkabinen aufgebaut, simuliert und deren Ergebnisse ausgewertet. Ziel der Untersuchungen ist die Abbildung einer auf physikalischen Einflussgrößen basierenden Regelstrecke, um zukünftig unterschiedliche Regelungsstrategien zu analysieren, Varianten untereinander vergleichbar zu machen und eine komfortoptimierte Reglerauslegung zu vereinfachen.

Neben dieser konventionellen Klimatisierungsform wird in der vorliegenden Forschungsarbeit auch eine alternative Form der Klimatisierung mittels Kühldecken untersucht, da sich hier, insbesondere in Kombination mit einer Quelllüftung [Zeidler et al. (2008), Schmidt et al. (2008), Markwart (2009), Tappert (2011)], ein großes Potential zeigt, die thermische Behaglichkeit in der Kabine für die Passagiere zu erhöhen. Für diese Untersuchung wird das erstellte Kabinensimulationsmodell um ein Strahlungssimulationsmodell erweitert.

Den Abschluss der Arbeit bildet eine theoretische Betrachtung zu den Grenzen des Einsatzes der Systemsimulation bei der Simulation von Flugzeugkabinen und Gedanken zur gekoppelten Berechnung von Feld- und Systemsimulationsmodellen (1D/3D-Coupling).

Die vorliegende Arbeit führt die Ergebnisse der Großen Studienarbeit *Zur Untersuchung des thermischen Verhaltens einer Flugzeugkabine anhand eines maßstäblichen Modells* [Chapela (2008)], der Diplomarbeit *Modellierung des Temperaturverhaltens einer Flugzeugkabine* [Wagner (2007)] und der Diplomarbeit *Untersuchung der Wirkung von Kühlflächen auf den*

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Passagierkomfort in Flugzeugkabinen [Zemella (2007)], welche im Rahmen dieser Dissertation vom Autor initiiert und betreut wurden, zusammen und wertet diese aus.

1.3 Struktur der Arbeit

Im Anschluss an das einleitende *Kapitel 1* folgen zunächst vier Grundlagenkapitel: *Kapitel 2* führt in die Bewertungskriterien von Behaglichkeit und Komfort im Flugzeug ein. In *Kapitel 3* wird der Aufbau eines Flugzeugquerschnitts, in *Kapitel 4* der Aufbau einer konventionellen Flugzeugklimaanlage beschrieben. *Kapitel 5* erläutert die gewählte Simulationsumgebung und Modellierungsgrundlagen.

Es folgen die drei Hauptkapitel dieser Arbeit: *Kapitel 6* beschäftigt sich mit den Untersuchungen am Modelltestand. Hier werden zunächst Auslegung und Aufbau des Teststandes, dann die daran durchgeführten Messungen erläutert. Es folgen Modellierung und Simulation des Teststandes sowie eine Beschreibung und Diskussion der erhaltenen Simulationsergebnisse. In *Kapitel 7* wird detailliert die Modellierung einer klimatisierten Flugzeugkabine mit Modelica beschrieben. Hierzu wird auf die getroffenen Annahmen sowie den Aufbau der Bibliothek eingegangen. Die selbst entwickelten Teilmodelle werden im Einzelnen vorgestellt und zuletzt in einem Flugzeugmodell zusammengeführt. Die daraus erhaltenen Simulationsergebnisse werden beschrieben und diskutiert. Ergänzend wird in *Kapitel 8* eine alternative Klimatisierungsform durch das Einbringen einer Kühldecke in die Passagierkabine untersucht. Auch hier werden die einzelnen Ergebnisse ausgewertet und besprochen.

Die Arbeit endet mit zwei Kapiteln, welche die Erkenntnisse aus den vorangegangenen Untersuchungen zusammentragen: *Kapitel 9* beschäftigt sich mit einer Gegenüberstellung von Feld- und Systemsimulation sowie mit Überlegungen zur 1D/3D-Kopplung. Die Arbeit schließt in *Kapitel 10* mit einer Zusammenfassung der wichtigsten Forschungsergebnisse und einem Ausblick.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Kapitel 2
Behaglichkeit und Komfortaspekte im Flugzeug

2.1 Entwicklung der Komfortanforderungen in Flugzeugkabinen

Das Flugzeug hat im 20. Jahrhundert eine Entwicklung durchlaufen, die mit keinem anderen Verkehrsmittel vergleichbar ist. Seit den ersten regelmäßigen Linienflügen im Jahr 1919 hat sich das Fliegen von einem exklusiven Erlebnis, das nur wenigen, meist sehr wohlhabenden Passagieren vorbehalten war, zu einer alltäglichen und massenhaften Form des Reisens entwickelt. Für das Jahr 2008 z.B. verzeichnete das *Airports Council International* rund 4,9 Milliarden Flugpassagiere, die zusammen mehr als 5 Billionen Flugkilometer rund um den Globus zurücklegten [Airports Council International (2009)]. Die Prognosen gehen von einem jährlichen Wachstum des Flugverkehrs von 3,5 bis 5% aus, so dass sich bis zum Jahr 2020 der Passagier-Flugverkehr voraussichtlich verdoppeln bis verdreifachen wird.

Seit den Anfängen des Motorfluges bis heute haben sich auch die Komfortanforderungen für Flugzeugpassagiere stark gewandelt. Das erste motorisierte Flugzeug der Gebrüder Wright aus dem Jahr 1903 bestand noch aus einer offenen Stahl-, Holz- und Seil-Konstruktion, welche lediglich einer einzigen Person in liegender Position Platz bot. Zu diesem Zeitpunkt lag der Gedanke an zukünftige Flugzeugpassagiere und deren Komfort daher noch fern.

Der erste Weltkrieg gab der Luftfahrt einen technischen Schub und die Flugzeuge entwickelten sich innerhalb weniger Jahre zu robusten Transportmitteln. Nach dem Krieg nutzte man diese Flugzeuge für zivile Zwecke, allerdings hauptsächlich für die Beförderung von Luftpost.

Bereits zur Zeit des zweiten Weltkrieges machte es der technische Fortschritt möglich, Flughöhen von bis zu zehn Kilometern zu erreichen. Durch das Fliegen oberhalb der Wolkendecke und des Wettergeschehens, wurde neben einer Erhöhung der Flugsicherheit auch ein ruhigeres und damit komfortableres Flugerlebnis für die Passagiere erreicht. Auch die Einführung der gedämmten Druckkabine, welche aufgrund der in diesen Flughöhen vorherrschenden Umgebungstemperatur und des niedrigen Luftdrucks notwendig wurde, steigerte

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

den Flugkomfort, da hierdurch der Einsatz von Atemmasken nicht mehr notwendig war [Boeing Corporation (2007)].

Im weiteren Verlauf wandelte sich auch der Sitzkomfort der Passagiere. Ausgehend von den geflochtenen Korbstühlen der Anfangszeit (s. *Abbildung 2.1*) ging die Entwicklung über Sitze aus Aluminium- und Magnesiumrohr und erste mit Schaumstoff gepolsterte und kunststoffverschalte Sitze bis zu den heutigen High-Tech-Sitzen für die Passagiere der ersten Klasse.

Abbildung 2.1: Kabine einer Handley Page W10 der Imperial Airways von 1936
(Grafik: www.flightglobal.com/blogs/aircraft-pictures/2007/12/handley-page-w10-interior-1.html)

Der Kabinenausstattung, einem attraktiven Design und vielfältigem Unterhaltungsangebot, insbesondere aber dem Komfort in der Kabine kommt heute beim Wettbewerb um Passagiere eine immer größere Bedeutung zu. Daher investieren Flugzeugbauer und Fluggesellschaften verstärkt u.a. in die Optimierung der Kabinenklimatisierung.

2.2 Aktuelle Tendenzen in der Komfortverbesserung

Seit der Erfindung des Fliegens standen viele Jahre Flugzeugtechnik und -sicherheit im Fokus von Forschung und Entwicklung, später die Maximierung der erzielbaren Flugdistanzen und Passagierzahlen bei gleichzeitiger Minimierung der Flugzeiten. Da jedoch eine weitere Verkürzung der Flugzeiten mit der Überschreitung der Schallgeschwindigkeit und den sich hieraus ergebenen wesentlich höheren technischen und damit wirtschaftlichen Anforderungen verknüpft wäre, hat sich der Schwerpunkt im Flugzeugbau unter anderem auf die Aspekte der Energieeffizienz sowie des Passagierkomforts verschoben. Die vorliegende Arbeit soll einen Beitrag zur Verbesserung der Behaglichkeit der Passagiere leisten, was insbesondere eine Optimierung der Kabinenklimatisierung erfordert. Vergleicht man das Reisen im Flugzeug mit anderen Massentransportmitteln, wie z.B. Schiff und Bahn, so ist die Bewegungsfreiheit im Flugzeug doch wesentlich stärker eingeschränkt. Kann sich der Schiffs- bzw.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Bahnpassagier noch frei bewegen und gegebenenfalls ein Fenster öffnen oder gar nach außen treten, so verbringt der Flugzeugpassagier die Zeit zum größten Teil im Sitzen. Für ihn spielt daher gerade der Komfort eine besonders wichtige Rolle.

Folgende Aspekte des Kabinenkomforts werden von Passagieren oft bemängelt:

Akustik: die räumlich sehr nah angeordneten Triebwerke führen zu einer permanenten Geräuschbelästigung in der Kabine, insbesondere dann, wenn aufgrund von Kondenswasseransammlungen die Schalldämmungseigenschaften der Isolationspakete beeinträchtigt werden.

Olfaktorik: Durch ungewollte Längsströmungen innerhalb der Kabine kann es zu Geruchsbelästigungen kommen, da hier viele Personen sowie funktionelle Einheiten wie Küche und Sanitärräume auf engem Raum konzentriert sind. Teilweise resultieren die Geruchsbelästigungen auch aus Ausdünstungen von Gütern im unter der Kabine angeordneten Frachtraum oder aus Abgasgerüchen der APU (Hilfstriebwerke).

Druck: Zu schnelle Druckänderungen in der Kabine während Steig- und Sinkflug können zu Schmerzen im Mittelohr führen, insbesondere wenn die Eustachische Röhre diesen Druckausgleich beispielsweise aufgrund von Verengungen nicht schnell genug herstellen kann. Eine dumpfe Geräuschwahrnehmung bis hin zu schmerzhaften Beschwerden ist die Folge.

Feuchte: Die geringe relative Luftfeuchte stellt ein gravierendes Defizit des Kabinenklimas dar. Sie führt zu trockenen Augen, Halskratzen und begünstigt aufgrund der Austrocknung der Schleimhäute luftgetragene Infektionen. Eine Befeuchtung der Kabinenluft ist technisch zwar möglich, würde aber die Transportkapazität und damit die Wirtschaftlichkeit des Flugzeuges verringern, da das hierfür benötigte Wasser zusätzlich mitgeführt werden müsste. Zusätzlich würde das in die Luft eingebrachte Wasser während des Fluges an der Innenseite der Flugzeugaußenhaut kondensieren und gefrieren und somit diesen bereits bei geringen Luftfeuchten auftretenden unerwünschten Effekt weiter verstärken. Das an der Außenhaut anfallende Kondenswasser würde zudem, wie oben erwähnt, die akustischen und thermischen Isolationseigenschaften der Flugzeugkabine noch weiter beeinträchtigen und aufgrund von Korrosion und *Fouling* kürzere Wartungsintervalle nötig machen. Eine höhere Luftfeuchte würde zudem das Risiko erhöhen, dass oberhalb der Kabine gefrorenes Wasser beim Auftauen während des Bodenaufenthaltes von der Kabinendecke tropft (*Rain in the Plane-Effekt*). Des Weiteren führt das hinter der Kabinenverkleidung akkumulierte, gefrorene Wasser bei kurzen *turn-around*-Zeiten, die kein vollständiges Abtauen ermöglichen, zu einer unerwünschten sowie unbestimmbaren zusätzlichen Erhöhung des Startgewichtes[1]. Zusammen mit der für die aktive Luftbefeuchtung mitgeführten Wassermenge ergibt sich somit ein doppelt negativer Effekt, welcher die Nutzlastkapazität eines Flugzeuges stark einschränkt.

Temperatur: Als unangenehm wird insbesondere das sich in der Kabine einstellende Temperaturgefälle in Richtung des Kabinenbodens empfunden. Diese lokale Abkühlung wird durch

[1] vgl. [Wörner (2006)]

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Wärmebrücken (Strukturelemente des Kabinenbodens) zwischen der Kabine und dem in der Regel unbeheizten Frachtraum weiter verstärkt und aufgrund der menschlichen Kälteempfindlichkeit an den Füßen als besonders unbehaglich wahrgenommen. Aufgrund zusätzlicher Störgrößen, wie beispielsweise einseitiger Sonneneinstrahlung, und der thermischen Trägheit des Systems ist eine präzise und schnelle Kabinentemperaturregelung in den verschiedenen Temperaturzonen sehr schwierig.

Mit Ausnahme der Akustik handelt es sich bei den o.g. Mängeln des Kabinenkomforts um Defizite im Bereich der Klimatechnik. Diese haben dazu geführt, dass die Fluggesellschaften gegenwärtig verstärkt ihr Augenmerk auf den Bereich der Klimakomfortverbesserung richten. In der vorliegenden Forschungsarbeit wird der Teilaspekt des thermischen Komforts untersucht. Ziel der Arbeit ist es, Kenntnisse zu erhalten, welche später für eine optimierte Reglerauslegung des Klimatisierungssystems genutzt werden können, um dem Flugzeugpassagier künftig mehr Behaglichkeit an Bord und somit auch ein entspannteres Flugerlebnis bieten zu können.

2.3 Definition von Behaglichkeit und ihrer Einflussfaktoren

Der Mensch kann mit Hilfe von technischen oder organisatorischen Maßnahmen innerhalb der thermischen Extrembereiche von unter -40 bis über +40°C, zumindest zeitlich begrenzt, tätig sein. Innerhalb dieses Temperaturbereiches unterscheidet man drei wesentliche klimatische Empfindungsbereiche [LASI (1999)]:

- Behaglichkeitsbereich
- Erträglichkeitsbereich
- Unerträglichkeitsbereich.

Im *Behaglichkeitsbereich* empfindet der Mensch unter den zahlreichen Einflüssen seiner Umgebung einen Zustand des Wohlbefindens. Neben physikalischen Einflussgrößen der Raumluft und der Umgebung wie z.B. Lufttemperatur, -geschwindigkeit, -feuchte oder Wandtemperaturen spielen auch individuelle Faktoren des Menschen wie Alter, Konstitution, Gesundheitszustand, Kleidung und Aktivitätsgrad sowie sonstige Parameter wie beispielsweise die Jahres- oder Tageszeit, Farben, Beleuchtung oder Gerüche eine Rolle beim menschliche Behaglichkeitsempfinden.

Folgende Umgebungsfaktoren beeinflussen u.a., ob das Raumklima von einem Menschen als angenehm oder unangenehm empfunden wird:

- Körperliche Betätigung, Aktivitätsgrad, Wärmedämmwert der Bekleidung
- Allgemeine körperliche Konstitution, aktueller Gesundheitszustand
- Alter, Geschlecht, ethnische Zugehörigkeit, Akklimatisierung
- Temperaturgradient, Strahlungsasymmetrien
- Oberflächentemperatur der Umschließungsflächen

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

- Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Luftbewegung, Luftdruck
- Luftelektrizität, Ionisierung, Luftzusammensetzung, Gerüche
- Optische Einflüsse, Farben, Beleuchtung
- Akustische Einflüsse
- Raumbesetzung, Aufenthaltsdauer, psychosoziale Faktoren
- Tages- und Jahreszeit.

Diese Vielzahl verschiedener Einflussfaktoren wird folgenden übergeordneten Gruppen zugeordnet:

- Thermische Behaglichkeit
- Lufthygienische Behaglichkeit
- Visuelle Behaglichkeit
- Akustische Behaglichkeit.

In dieser Arbeit liegt der Schwerpunkt auf Untersuchungen zur *thermischen Behaglichkeit*, welche den Hauptaspekt der vom Menschen empfundenen Behaglichkeitskriterien darstellt.

2.4 Thermische Behaglichkeit

Die Bedingungen für thermische Behaglichkeit wurden systematisch in einer Arbeit von Ole Fanger erarbeitet und in verschiedenen internationalen Normen[2] festgelegt. So definiert die sog. *Behaglichkeitsnorm* ISO 7730 den Zustand thermischer Behaglichkeit wie folgt:

Thermische Behaglichkeit (Bewertung "0" oder "neutral") ist *"der Umstand, unter dem Zufriedenheit mit der thermischen Umgebung ausgedrückt wird.*[3]*"* Es liegt ein Gleichgewicht vor zwischen der aktivitätsbedingten Wärmeproduktion des menschlichen Körpers und der gerade vorliegenden Wärmeabgabe an die Umgebung, ohne dass der Körper eigens dafür besondere Anpassungsleistungen (sog. *Thermo-Stress*) erbringen müsste.

Die ursprünglich von Ole Fanger eingeführte Bewertungsskala für die Bewertung der thermischen Behaglichkeit zeigt *Tabelle 2.1* :

Skala	+3	+2	+1	0	-1	-2	-3
Empfindung	heiß	warm	leicht warm	neutral	leicht kühl	kühl	kalt

Tabelle 2.1: Bewertungsskala zur thermischen Behaglichkeit nach ISO 7730

[2] z.B. CR 1752 [CEN (1998)], ASHRAE 55 Standard [ASHRAE (1992)], DIN EN ISO 7730 [DIN (2005)]

[3] Definition der American Society of Heating, Refrigerating and Airconditioning Engineers: "Thermal Comfort is the state of mind that expresses satisfaction with the thermal environment". [ASHRAE (1985)]

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Der Bereich der thermischen Behaglichkeit hängt somit nicht nur vom Zusammenspiel zahlreicher Umfeldeinflüsse (*vgl. Abschnitt 2.3*) ab, sondern auch direkt vom thermischen Gleichgewicht und Behaglichkeitsempfinden des menschlichen Körpers.

2.4.1 Das thermische Behaglichkeitsempfinden des Menschen

Das thermische Behaglichkeitsempfinden wird von der Haut und ihren Thermofühlern gesteuert [Rietschel, Esdorn (2008)]. Die einzelnen Kälte- oder Wärmerezeptoren nehmen weniger die absolute Temperatur als vielmehr die Temperaturänderung wahr - je stärker ein Reiz, desto unangenehmer die Empfindung.

Für das Empfinden von Luftgeschwindigkeit und Luftfeuchtigkeit besitzt der Mensch keine direkten Sensoren. Diese für die Behaglichkeit sehr wichtigen Faktoren werden indirekt über die Temperaturwahrnehmung registriert.

Thermische Behaglichkeit liegt im Allgemeinen vor, solange die Hauttemperatur nicht unter 33°C fällt und die Stammhirntemperatur nicht über 37°C steigt [Schütz (2003)]. Jenseits dieser Grenzen setzen zur Thermoregulation vom Hypothalamus gesteuert Frieren oder Schwitzen ein. Da diese Regulation subjektiv auch mit emotionalen Reaktionen verbunden ist, führen Reize des Warm- und Kaltsinns, welche eine zunehmende Abweichung des Istwertes vom Sollwert signalisieren, zu unterschwelliger Unzufriedenheit und Unbehagen.

Da die meisten Organe nur innerhalb eines engen Kerntemperaturbereichs optimal funktionieren, stellt das thermische Behaglichkeitsempfinden eine natürliche Schutzmaßnahme zur Aufrechterhaltung des lebensnotwendigen Wärmehaushaltes dar. Um die Solltemperatur von 37 +/-0,8°C annähernd konstant aufrecht zu erhalten, kann die Haut durch Änderung der Durchblutungsstärke ihres feinen Gefäßnetzes die Wärmeabgabe des Körpers regulieren. Gleichzeitig muss auf diese Weise auch die Wärmeabgabe aus der Nahrungsumsetzung geregelt werden. So strahlt der Körper selbst in völliger Ruhe bereits einen Grundumsatz von 80-100 W Wärme ab. Bei steigendem Aktivitätsgrad muss jedoch die Wärmeabgabe an die Umgebung zunehmen, um Wärmestaus zu vermeiden und eine konstante Körpertemperatur weiterhin aufrecht zu erhalten.

2.4.2 Thermoregulierung

Die menschliche Thermoregulierung erfolgt auf verschiedenen Wegen durch [Schütz (2003)]:

- Wärmeabstrahlung (zu rund 50%):

  Die Wärmeabstrahlung erfolgt kontaktlos. Sie wird von den strahlungsempfangenden Oberflächen, wie beispielsweise den umgebenden Wandflächen, absorbiert und in Wärmeenergie umgewandelt.
- Konvektion (zu rund 25%):

  Die einen warmen Körper umgebende Luft wird von diesem erwärmt und steigt auf. Hierbei wird Wärme vom Körper abgeführt.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

- Verdunstung (zu rund 15%):

Der an der Hautoberfläche austretende Schweiß verdunstet. Die für die Phasenumwandlung von flüssig zu gasförmig benötigte Verdunstungswärme wird dem Körper entzogen.

- Wärmeleitung:

An gemeinsamen Kontaktstellen zweier Oberflächen wird Wärmeenergie an benachbarte Teilchen weitergegeben. Dies gilt nicht nur für feste, sondern auch gasförmige und ruhende flüssige Medien

- Atmung, Ausscheidung, Nahrung.

Die menschliche Wärmeabgabe setzt sich anteilig aus Strahlung, Konvektion, Diffusion und Transpiration von Schweiß sowie Atmung zusammen [vgl. Schramek (2003)].

Demnach lautet die Wärmebilanz des Menschen:

$$\dot{Q}_{ges} - \dot{Q}_d - \dot{Q}_v - \dot{Q}_a - \dot{Q}_k - \dot{Q}_s = 0 \qquad (2.1)$$

$\dot{Q}_{ges}$	:	Gesamtwärmeabgabe des Menschen
$\dot{Q}_d$	:	Wärmeabgabe Diffusion von Wasser durch die Haut
$\dot{Q}_v$	:	Wärmeabgabe durch sensible Transpiration
$\dot{Q}_a$	:	Wärmeabgabe durch Atmung
$\dot{Q}_k$	:	Wärmeabgabe durch Konvektion
$\dot{Q}_s$	:	Wärmeabgabe durch Strahlung

Die Anteile von Strahlung, Konvektion und Verdunstung an der Gesamtwärmeabgabe des Menschen sind in *Abbildung 2.2* über der Lufttemperatur aufgetragen. Hierin werden die Mechanismen Transpiration, Atmung und Diffusion unter Verdunstung zusammengefasst.

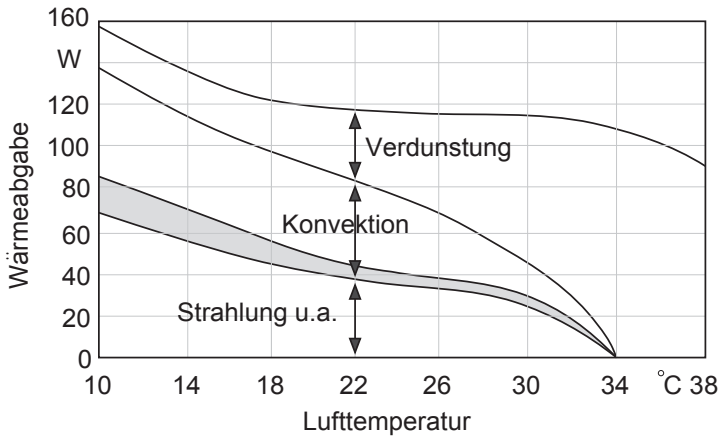


Abbildung 2.2: Wärmeabgabe des Menschen [Schramek (2003)]

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.