# METHODIK ZUR QUANTIFIZIERUNG DER AUSWIRKUNG VON MODERATER WÄRMEBELASTUNG AUF DIE MENSCHLICHE LEISTUNGSFÄHIGKEIT

Susanne Urlaub[1], Lioba Werth[2], Anna Steidle[1,2], Christoph van Treeck[3] , Klaus Sedlbauer[1,4]
[1]Lehrstuhl für Bauphysik, Universität Stuttgart
[2]Lehrstuhl für Wirtschafts-, Organisations- und Sozialpsychologie, TU Chemnitz
[3]Lehrstuhl für Energieeffizientes Bauen, RWTH Aachen
[4]Fraunhofer Institut für Bauphysik, Holzkirchen und Stuttgart

## KURZFASSUNG

Die Umgebungstemperatur übt einen vielfältigen Einfluss auf Gesundheit, Wohlbefinden und Leistungsfähigkeit des Menschen aus. Durch die zunehmende Verlagerung von Arbeitsplätzen in Büros rückt der Bereich der moderaten Wärmebelastung, wie er beispielsweise in natürlich belüfteten Gebäuden im Sommer auftritt, in den Fokus. Hierzu ist aus der bisherigen empirischen Forschung ein Zusammenhang zwischen Raumtemperatur und Arbeitsleistung ermittelt worden, der allerdings verschiedene Nachteile für die Tauglichkeit als Planungskriterium für Gebäude aufweist. Der in der Psychologie weit verbreitete Ansatz der Meta-Analyse kann dabei einen wertvollen Beitrag zur Lösung dieses Problems leisten. In dem Beitrag wird systematisch die Methode der Meta-Analyse aufgezeigt und anhand einiger konkreter Beispiele das Potential für eine Integration von nutzerbasierten Verhaltensmustern in eine Gebäudesimulation dargestellt.

## ABSTRACT

Ambient thermal conditions have fundamental impact on human health, well-being and working performance. Due to the increasing amount of office-related work such as in naturally ventilated buildings, the impact of moderate thermal stress to individuals becomes more and more important to be understood. Based on available empirical research, a mathematical relation has been established which, however, shows disadvantages in terms of its eligibility as building design criterion. The method of meta-analysis, which is a well-established method of psychological research, can contribute to solve this problem in terms of providing further insight into the mentioned relation. In this paper, the method of meta-analysis is introduced and its potential is shown by practical illustrations, how occupant-based data may be integrated into building simulation.

## EINLEITUNG

Die Umgebungstemperatur übt einen vielfältigen Einfluss auf Gesundheit, Wohlbefinden und Leistungsfähigkeit des Menschen aus. Während es in unserem Wohnumfeld vor allem darauf ankommt, dass sich der Mensch wohlfühlt und keine gesundheitlichen Einschränkungen hinnehmen muss, steht beim Arbeitsumfeld zusätzlich noch eine ökonomische Komponente im Fokus: Kann ein Mitarbeiter seine Leistung aufgrund baulicher Parameter nicht optimal abrufen, steht die daraus resultierende Wertschöpfung auch dem Arbeitgeber nicht zur Verfügung. Insbesondere das thermische Raumklima bietet einer Studie zufolge häufig Grund zur Beschwerde (IFMA, 2009). Die Auswertung der IFMA ergab, dass nahezu jedem befragten Gebäudebetreiber Beschwerden über eine zu kalte oder zu warme Umgebung vorliegen, während beispielsweise Beschwerden über Lärmbelästigung weitaus seltener vorkommen.

Forschung richtete sich längere Zeit überwiegend auf die Untersuchung der Auswirkungen von Wärme- oder Kältebelastung auf die Arbeitsleistung im militärischen und industriellen Kontext. Dort sind in der Regel sehr hohe oder sehr niedrige Temperaturen vorherrschend (z.B. Patterson, Taylor & Amos, 1998; Enander, 1987). Die Resultate deuten darauf hin, dass sowohl bei sehr kalter als auch bei sehr warmer Umgebung die Leistungsfähigkeit stark eingeschränkt sein kann (z.B. Hancock & Vasmatzidis, 2003).

Durch die zunehmende Verlagerung von Arbeitsplätzen in Büros rückt anstelle der extremen nun die moderate Wärmebelastung in den Fokus. Im Gegensatz zu industriellen Arbeitsplätzen treten keine Extrembelastungen durch maschinelle Wärmelast o.ä. auf, bei denen beispielsweise der Feuchtehaushalt in den Vordergrund rücken würde. Da die Tätigkeiten zusätzlich zu den geringeren Wärmelasten vor allem im Sitzen durchgeführt werden und geistige Arbeit überwiegt, ist alles in allem betrachtet die Wärmebelastung des Menschen geringer als in den oben beschriebenen Extrembereichen.

Ein typisches Problem bei Büroarbeitsplätzen ist die sommerliche Überwärmung der Räume, beispielsweise bedingt durch starke Sonneneinstrahlung in natürlich belüfteten Gebäuden. Für solche Arbeitsräume wurde in der Vergangenheit arbeitsrechtlich eine pauschalierte Temperatur-obergrenze von 26°C in der Arbeitsstättenrichtlinie festgeschrieben (Bundesrepublik Deutschland, 2001).

Trat nun das erwähnte Problem der sommerlichen Überwärmung auf, hatte dies in einigen Fällen erhebliche Konsequenzen für den Gebäudeeigentümer (Nachrüstung, LG Bielefeld, 2003, oder Mietminderung, OLG Rostock, 2000). Das Vorschreiben eines deterministischen Wertes steht zudem im Widerspruch mit geltenden Regeln der Technik im Bereich adaptiver Behaglichkeitsrichtlinien (DIN EN 15251).

Die wissenschaftliche Erforschung des Einflusses von moderater Wärmebelastung auf die Arbeitsleistung weist demzufolge eine enorme Wichtigkeit für wirtschaftliche Betrachtungen von Gebäuden auf. Mittlerweile wurde die Arbeitsstättenrichtlinie zwar dahingehend novelliert, dass der Grenzwert von 26°C nun nicht mehr als absoluter Wert gilt, sondern eine Überschreitung bei geeigneten Kompensationsmaßnahmen (z.B. Lockerung des Bekleidungskodex) zulässig ist. Jedoch ist der tatsächliche Einfluss der Raumtemperatur auf die Arbeitsleistung nach wie vor nicht eindeutig bestimmt.

Dies ist insbesondere darauf zurückzuführen, dass die vorhandenen Forschungsbefunde wenig belastbare Ergebnisse über einen möglichen Zusammenhang bzw. eine tatsächliche Verschlechterung der Leistungsfähigkeit bei Temperaturen über 26°C anbieten können (vgl. Urlaub, Hellwig, van Treeck & Sedlbauer, 2010). Um Gebäude sowohl nutzergerecht optimal (also dergestalt, dass auf keinen Fall ein Temperaturwert überschritten wird, bei dem die Nutzer nicht mehr adäquat arbeiten können) als auch ressourcenoptimiert (also beispielsweise die Begrenzung des Energiebedarfs für Herstellung, Betrieb und Entsorgung) zu planen, wäre ein solcher Zusammenhang jedoch unbedingt notwendig.

Einen ersten Lösungsversuch haben Autoren unternommen, die die vorhandenen Publikationen zu Überblicksartikeln zusammenfassten und so Gemeinsamkeiten der Befunde herausstellen konnten (z.B. Rashid & Zimring, 2008, Hancock & Vasmatzidis, 2003, Bell 1981). Die Heterogenität der Studien und ihrer methodischen Ansätze erschwerten allerdings die Vergleichbarkeit der Studien, die Größe des Einflusses der Raumtemperatur auf die Leistungsfähigkeit war auf diese Weise nicht verlässlich zu bestimmen. Einen anderen Weg haben Seppänen und Fisk beschritten, indem sie eine rechnerische Quantifizierung des Einflusses von Raumtemperatur und Arbeitsleistung ermittelten (Seppänen & Fisk, 2006). Diese bietet einen ersten guten Überblick, unterliegt jedoch ebenfalls Einschränkungen in der Aussagekraft, welche im unten folgenden Abschnitt dargestellt werden.

Daher gilt es, eine Methodik zu finden, die statistisch verlässliche Aussagen zum Einfluss der Raumtemperatur auf die Arbeitsleistung ermitteln und darstellen kann. Außerdem sollte eine verlässliche Aussage über zugrundeliegende Mechanismen oder Einflussgrößen möglich sein, mit deren Hilfe möglicherweise die bisher verfügbaren widersprüchlichen Ergebnisse erklärt werden können.

Im folgenden Beitrag wird aufgezeigt, dass und wie der in der Psychologie weit verbreitete Ansatz der Meta-Analyse diesen, für die Gebäudeplanung wesentlichen Anforderungen nachkommen und verlässliche Aussagen bieten kann. Dazu wird zunächst auf bisherige Ansätze, den Zusammenhang zwischen Raumtemperatur und der Arbeitsleistung zu quantifizieren, eingegangen, bevor im Anschluss die Methode der Meta-Analyse vorgestellt wird. Anhand bisher durchgeführter Arbeiten wird exemplarisch aufgezeigt, ob die daraus gewonnenen Erkenntnisse für den moderat-warmen Bereich ausreichend sind, um daraus eine Planungsgrundlage für Gebäude abzuleiten. Mittels eines konkreten Beispiels wird schlussendlich das Potential dieser Methode aufgezeigt.

## BISHERIGE QUANTIFIZIERUNGEN DES ZUSAMMENHANGS VON TEMPERATUR UND LEISTUNGSFÄHIGKEIT

Seppänen und Fisk entwickelten eine mathematische Funktion, die bislang als plausibelster Zusammenhang zwischen der Raumtemperatur und der Arbeitsleistung im moderat-warmen Bereich angesehen wird. Für die Ermittlung dieser Funktion wurde eine Regressionsanalyse über 24 Studien hinweg durchgeführt (Seppänen & Fisk, 2006). Die Basis für diese Analyse bildeten dabei prozentuale Veränderungen der Leistungsfähigkeit der Teilnehmer in den einzelnen Bedingungen.

Mathematisch lässt sich demnach der Zusammenhang zwischen Raumtemperatur und Leistungsfähigkeit gemäß Gleichung (1) ausdrücken. Die Variable P stellt dabei die prozentuale Änderung der Leistung dar, während T die Raumtemperatur bezeichnet.

$$P = 0{,}1647524 \cdot T - 0{,}0058274 \cdot T^2 + 0{,}0000623 \cdot T^3 - 0{,}4685328 \qquad (1)$$

Abbildung 1 zeigt grafisch den in Gleichung (1) dargestellten Verlauf. Demnach liegt die für Büroarbeit optimale Raumtemperatur bei ca. 21,6 °C, während bei 30 °C eine Verschlechterung von ca. 10 % festzustellen ist.

Festzustellen ist jedoch zum Einen, dass viele Studien bei der Ermittlung dieses Zusammenhangs nicht berücksichtigt wurden (z.B. Vitali, 2000, Wyon, 1969) und seit Durchführung dieser Analyse sehr viele weitere Untersuchungen durchgeführt wurden.

Zum Anderen ist anzumerken, dass vergleichsweise viele Feldstudien, bei denen im Gegensatz zu Laborstudien zahlreiche Einflussgrößen nicht konstant gehalten oder kontrolliert werden können, in den Berechnungen enthalten sind. So ist

beispielsweise eine Studie enthalten, die in einem natürlich belüfteten Gebäude durchgeführt wurde, in welchem die Raumtemperatur ebenfalls (nicht kontrollierten) Schwankungen unterlag (Niemela, Hannula, Rautio, Reijula & Railio, 2002). Hier ist es schwierig, sicherzustellen, dass die berechneten Unterschiede in der Aufgabenbearbeitung tatsächlich auf die unterschiedlichen Raumtemperaturen zurückzuführen sind.

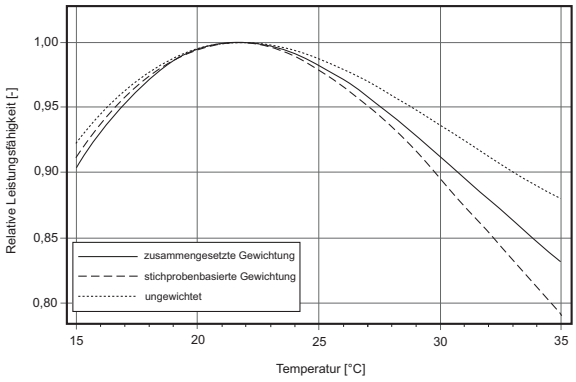


*Abbildung 1 Zusammenhang zwischen Raumtemperatur und Leistungsfähigkeit nach (Seppänen & Fisk, 2006)*

Die von Seppänen und Fisk entwickelte Funktion bietet einen ersten Orientierungspunkt zur Klärung des Zusammenhangs zwischen moderat-warmen Raumtemperaturen und Leistungsfähigkeit bei büroähnlichen Aufgaben. So lässt sich daraus ableiten, dass moderate Wärmebelastung offenbar durchaus einen negativen Einfluss auf die menschliche Leistungsfähigkeit haben kann. Weitere Aussagen, die der Gebäudeplanung verlässliche Hinweise darauf geben, sind hieraus jedoch nicht ableitbar. In einem weiteren Schritt muss nun daher zum Einen geklärt werden, ob die bisherigen und im Speziellen die Ergebnisse aus neueren Forschungsarbeiten in diesen Zusammenhang integrierbar sind und ob es zum Anderen möglicherweise weitere spezifische Einflussfaktoren gibt. Hierfür sind zusätzliche, differenziertere Betrachtungsweisen nötig. So ist beispielsweise noch nicht geklärt, ob eine Temperatur von beispielsweise 30°C generell einen negativen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit hat, oder erst ab einer gewissen Zeit, die der betreffende Nutzer in der Bedingung verbringt, überhaupt eine Veränderung eintritt. Auch ist nicht geklärt, inwiefern sich weitere Variablen, wie etwa der Bekleidungsgrad oder die Art der Tätigkeit auf die Leistungsfähigkeit bei erhöhter Raumtemperatur auswirken bzw. ob es Maßnahmen gibt, mit denen sich solchen Leistungseinbußen begegnen lässt.

Sowohl die allgemeine als auch die differenzierte Betrachtungsweise lassen sich mit Hilfe des meta-analytischen Ansatzes - noch dazu auf soliderer Datenbasis – abbilden. So kann eine grundlegende Aussage ermittelt werden, ob es einen generellen Einfluss von moderat-warmen Raumtemperaturen auf die Leistungsfähigkeit gibt und wenn ja, wie groß dieser ist. Zudem lassen sich aber auch Aussagen über spezifischere, zusätzliche Einflussfaktoren (so genannte Moderatorvariablen), wie beispielsweise den vorweg beschriebenen Einfluss der zeitlichen Exposition in einer bestimmten thermischen Bedingung, treffen.

Sind fundierte Aussage zur Veränderung der Leistungsfähigkeit bei unterschiedlichen Temperaturen getroffen, können diese in eine Gebäudesimulation integriert werden. Eine solche Integration wurde bereits gezeigt (Plokker & Wijsman, 2009). Die Autoren nutzen in ihrer Simulation beispielhaft die Funktion von Seppänen und Fisk. Dies zeigt demzufolge, dass eine Gebäudeplanung basierend auf nutzerbasierten Daten wie der Veränderung der Leistungsfähigkeit bei moderater Wärmebelastung möglich sein kann. Mit Hilfe einer Meta-Analyse ließen sich dann zusätzlich noch Aussagen für speziellere Planungen ermitteln.

## GRUNDLAGEN DER META-ANALYSE

### Definition

Grundsätzlich lassen sich empirische Daten auf drei verschiedenen Ebenen untersuchen (Gifford, Hine & Veitch, 1997, Glass, 1976). Die primäre Datenanalyse bezieht sich auf die statistische Auswertung der Daten aus einem Experiment. Die sekundäre Datenanalyse bezieht sich auf die erneute statistische Auswertung einer Primärstudie, beispielsweise aufgrund der Verfügbarkeit verbesserter statistischer Verfahren. Als dritte Möglichkeit der Datenanalyse bezieht sich die Meta-Analyse auf die Analyse der Analysemethoden bzw. auf die Aggregierung sehr vieler bereits durchgeführter Analyseergebnisse. So besteht ein Datenpunkt in einer einzelnen Studie aus den Daten einer Versuchsperson, während in der Meta-Analyse die aus einer Studie aggregierten Ergebnisse einen Datenpunkt bilden.

Somit kann die Meta-Analyse definiert werden als eine „Sammlung statistischer Techniken, um die Ergebnisse aus von einander unabhängigen Experimenten systematisch und quantitativ zu aggregieren, mit dem Ziel, zu einer allgemeinen Schlussfolgerung über die maßgebliche Hypothese zu gelangen“ (Gifford, Hine & Veitch, 1997; S. 224, Übers. der Autoren.).

### Durchführung einer Meta-Analyse

Der Grundgedanke der Meta-Analyse ist die möglichst vollständige Inklusion des bisherigen Forschungsstands, um die Gültigkeit der daraus ermittelten Aussage zu maximieren. Dazu geht jeder

Meta-Analyse eine umfassende, zu dokumentierende Literaturrecherche voraus. Werden die gefundenen Publikationen näher ausgewertet, ist es wichtig, im Vorfeld die zu beantwortende Frage genau zu definieren, so dass Kriterien festgelegt werden können, die eine Studie erfüllen muss, um Bestandteil der Analyse zu werden. Die sorgfältige Auswahl der Studien in diesem Stadium hat einen entscheidenden Einfluss auf die Qualität der Meta-Analyse. Ein Kriterium kann dabei beispielsweise sein, dass Studien, in denen Probanden extremen Umgebungstemperaturen (über 40°C) ausgesetzt sind, welche auch zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen führen können, zu speziell sind für die Beantwortung der allgemeinen Frage, wie Raumtemperatur auf die Arbeitsleistung bei büroähnlichen Randbedingungen wirkt. Daher müssten solche Studien von der Analyse ausgeschlossen werden. Sind alle aufzunehmenden Studien ermittelt, werden alle wesentlichen Merkmale wie vor allem die statistischen Daten aus den untersuchten Maßen, aber auch Randbedingungen wie zeitliche Dauer der Experimente oder der Bekleidungsgrad oder die Art der bearbeiteten Aufgabe dokumentiert. Zur Quantifizierung des untersuchten Einflusses wird die so genannte Effektstärke berechnet. Diese lässt sich auf unterschiedliche Art und Weise ermitteln. Grundsätzlich berechnet sich die Effektstärke gemäß Gleichung 2 aus den Mittelwerten der Vergleichsgruppen im Verhältnis zur Standardabweichung (DeCoster, 2009).

$$\mathrm{ES} = \frac{\overline{X}_e - \overline{X}_c}{s} \qquad (2)$$

Die ermittelten Effektstärken lassen sich in einen kleinen, mittleren oder großen Effekt einteilen. So bedeutet eine Effektstärke von 0,2 einen kleinen, 0,5 einen mittleren und 0,8 einen großen Effekt (Cohen, 1988). Aus den dokumentierten Daten können zusätzlich so genannte Moderatoren zur Identifizierung von wichtigen Randbedingungen oder zugrundeliegenden Mechanismen ermittelt werden (DeCoster, 2009).

**Möglichkeiten und Grenzen einer Meta-Analyse**

Der entscheidende Vorteil der Meta-Analyse ist die höhere Qualität der aus ihr gewonnenen Aussagen im Vergleich zu den Erkenntnissen aus einer einzelnen Studie. Auch in einer einzelnen Studie lassen sich für die ermittelten Ergebnisse Effektstärken berechnen und damit eine Quantifizierung der untersuchten Zusammenhänge darstellen. Jedoch lässt sich aufgrund einer einzelnen Studie noch kein gesicherter Zusammenhang annehmen. Erst wenn mehrere Studien denselben oder einen ähnlichen Sachverhalt untersuchen, kann auf einen tatsächlichen Zusammenhang geschlossen werden. Auch lassen sich in einer einzelnen Studie Moderatorvariablen untersuchen, die jedoch ebenfalls immer nur auf einer vergleichsweise kleinen Stichprobe beruhen. Die Meta-Analyse stellt die untersuchten Zusammenhänge auf eine sehr breite Datengrundlage und überprüft die Zusammenhänge auf Basis der Summe der Stichproben aller Studien (vgl. Hunter & Schmidt, 2004; Gifford, Hine & Veitch, 1997). Dies bedeutet, dass ein möglicher Effekt nicht nur in einer Studie mit beispielsweise 30 Teilnehmern gezeigt werden konnte, sondern an beispielsweise 56 Studien mit insgesamt über 2000 Teilnehmern (wie es bspw. der Fall ist in der Meta-Analyse von Hancock, Szalma & Ross, 2007).

Auch im Vergleich zu einem so genannten Überblicksartikel liefert die Meta-Analyse eine höhere Aussagegüte. In einem Überblicksartikel werden einzelne Studien ebenfalls aggregiert, jedoch auf einer qualitativen Ebene, d.h. anhand der verbalen Interpretation der Ergebnisse einzelner Studien werden Erkenntnisse gewonnen und Schlussfolgerungen gezogen. Die Effektstärken einzelner Studien können hier, sofern vorhanden, auch interpretiert werden, sie können aber nicht ohne weiteres für eine globale Aussage über den generellen Zusammenhang dienen. In einer Meta-Analyse werden die Daten aus den Studien dagegen mittels statistischer Methoden, d.h. rechnerisch aggregiert und gewichtet. Nach einem genau festgelegten Verfahren lässt sich so eine globale Aussage ermitteln. Liegen, wie im Bereich der moderaten Wärmebelastung auch gegensätzliche Ergebnisse vor, lassen sich Studien, die gegensätzliche oder unerwartete Tendenzen (z.B. die Verbesserung der Leistung bei höheren Temperaturen) aufweisen, nochmals genauer betrachten und ihre Bedeutung auf das Gesamtergebnis abschätzen.

Um die Ergebnisse einer Meta-Analyse für eine Gebäudesimulation nutzen zu können, ist es zudem von Vorteil, wenn sich beispielsweise prozentuale Veränderungen bei bestimmten Temperaturen oder Schwellenwerten, z.B. der 26°C-Grenze, ermitteln lassen. Auch solche Größenordnungen kann die Meta-Analyse liefern. Die Effektstärken lassen sich ebenfalls als Korrelationen ermitteln, aus denen auf eine prozentuale Veränderung der Zielvariable, z.B. der Leistungsfähigkeit, in Abhängigkeit der Steuerungsgröße geschlossen werden kann (Gifford, Hine & Veitch, 1997). Ein solches Ergebnis könnte wiederum für eine Simulationssoftware zur Auslegung von Gebäudekomponenten genutzt werden.

Neben den o.g. zahlreichen Vorzügen einer Meta-Analyse sind jedoch auch Nachteile bzw. problematische Aspekte zu nennen, die einer soliden Aussage der Analyse entgegenstehen können (vgl. DeCoster, 2009, Bortz & Döring, 2006). Um das Instrument der Meta-Analyse sachgerecht einzusetzen, ist es daher wichtig, diese kritischen Aspekte zu kennen und angemessen damit umzugehen. Im

Folgenden werden die drei typischsten dargestellt. Zum Einen ist kritisch, wenn innerhalb einer Meta-Analyse sehr unterschiedliche bzw. möglicherweise auch zu unterschiedliche methodische Ansätze verglichen werden und somit die Aussage aus der Analyse nur begrenzt wertvoll ist. Diese Problematik kann nur durch eine sorgfältige und transparente Auswahl der Studien kontrolliert und dadurch minimiert werden.

Zum Zweiten wird ebenfalls oft kritisiert, dass Studien unabhängig von ihrer Qualität in die Analyse eingeschlossen werden und somit auch Studien von minderer Qualität (z.B. zu kleine Anzahl an Versuchspersonen oder zu große Schwankung der Temperatur innerhalb einer Bedingung) berücksichtigt werden, was wiederum die Aussagekraft der Meta-Analyse schmälert. Dies kann entstehen, wenn Studien unreflektiert übernommen werden. Wenn jedoch die Qualität der Studien zusätzlich miterfaßt wird, kann auf dieser Grundlage eine differenzierte Aussage getroffen und die fraglichen Studien wahlweise ein- oder ausgeschlossen werden.

Einen dritten Kritikpunkt stellt die möglicherweise nur augenscheinliche Objektivität einer Meta-Analyse dar. Im Rahmen einer Meta-Analyse ließe sich z.B. auch untersuchen, ob der Einfluss der Temperatur in Abhängigkeit von der Aufgabenschwierigkeit unterschiedlich stark ist. Dazu sind die in den Studien verwendeten Aufgaben unter anderem in einfache und komplexe Aufgaben zu unterteilen. Diese Einteilung ist oftmals nicht leicht bzw. eindeutig zu treffen, da große Unterschiede im Verständnis darüber herrschen, was eine einfache und eine komplexe Aufgabe ausmacht und diese Einschätzung letztlich auf einer subjektiven Einschätzung der Autoren basiert. Dieser Subjektivität der Einschätzung lässt sich gut begegnen, indem mehrere Personen diese Einschätzungen vornehmen und die Ergebnisse hinsichtlich ihrer Übereinstimmung verglichen werden. Um eine valide Eingruppierung übernehmen zu können, ist dann erforderlich, dass nahezu alle Einteilungen zwischen den Bewertern übereinstimmen, also die so genannte Inter-Rater-Relabilität hoch ist.

## QUANTIFIZIERUNG DES EINFLUSSES MODERATER WÄRMEBELASTUNG

### Definition von moderater Wärmebelastung

Bevor auf die Anwendbarkeit des meta-analytischen Ansatzes für eine Quantifizierung des Einflusses von moderater Wärmebelastung auf die Leistungsfähigkeit eingegangen wird und dessen Potential aufgezeigt wird, ist zunächst zu klären, was unter moderater Wärmebelastung zu verstehen ist, denn dieser Begriff ist oftmals nicht eindeutig definiert.

Ausgangsbasis der Betrachtung bildet die menschliche Wärmebilanz. Bis zu einer Raumtemperatur von ca. 35°C ist es für eine wenig bekleidete Person typischerweise möglich, sämtliche Mechanismen der Wärmeabgabe (Konvektion, Strahlung, Wärmeleitung und Verdunstung) an die Umgebung zu nutzen. Steigt die Raumtemperatur über diesen Wert, kann nur noch über Verdunstung Wärme abgegeben werden (Aschoff, 1971). Es entsteht die Gefahr, dass unter diesen Bedingungen die Körpertemperatur mit der Zeit ansteigt, ohne dass dies durch thermoregulatorische Maßnahmen kompensiert werden kann (Hancock, Ross & Szalma, 2007). Dauert diese Exposition über einen längeren Zeitraum an, besteht die Gefahr von gesundheitlichen Beeinträchtigungen durch Hitzschlag oder ähnliches (Hancock, 1982, Aschoff, 1971). In der Arbeitsstättenrichtlinie, die unter anderem die Randbedingungen für Büroarbeitsplätze festlegt, ist dies bereits berücksichtigt, so dass oberhalb von 35°C ein Raum nicht mehr als Arbeitsraum geeignet ist (Bundesrepublick Deutschland, 2010).

Daher wird der Bereich der moderaten Wärmebelastung zwischen dem Komfortbereich und dem Beginn der Hitzebelastung, die bei dem erwähnten Schwellenwert von 35 °C Raumtemperatur beginnt, definiert. Im nächsten Abschnitt sollen ausgehend von dieser Definition bisher durchgeführte Meta-Analysen dahingehend betrachtet werden, ob sie für den speziellen Bereich der moderaten Wärmebelastung eine Aussage treffen können (und nicht nur für Extrembereiche).

### Bereits durchgeführte Meta-Analysen

Zur Analyse des Zusammenhangs zwischen Temperatur im Allgemeinen und der menschlichen Leistungsfähigkeit wurden bereits zwei Meta-Analysen durchgeführt (Pilcher, Nadler & Busch, 2002; Hancock, Ross & Szalma, 2007). Beide berücksichtigten das gesamte Temperaturspektrum und seine Auswirkungen auf die menschliche Leistungsfähigkeit. Inkludiert waren sowohl Studien, die extreme Kälte untersuchten, als auch Studien unter militärischem Kontext in extremer Hitze. Beide konnten nachweisen, dass ein Abweichen von einer Komforttemperatur eine Verschlechterung verschiedener Arten von Leistungsfähigkeit zur Folge hat. Tabelle 1 zeigt die wesentlichen Daten der Analysen.

In beiden wurden Klimasummenmaße verwendet, um beispielsweise auch den Einfluss der relativen Luftfeuchte normieren zu können. In der Analyse von Pilcher, Nadler und Busch erfolgten die statistischen Berechnungen auf Basis des WBGT-Index, der üblicherweise zur Beurteilung von Hitzearbeit herangezogen wird und daher vor allem die Strahlungstemperatur und den Einfluss der relativen Luftfeuchte bewertet (DIN EN 27243). In der Arbeit von Hancock, Ross und Szalma wurde Bezug auf die Effektivtemperatur (ET) genommen. Dieses

Klimasummenmaß kann sowohl im Komfort- als auch im Hitzearbeitsbereich verwendet werden und berücksichtigt den Einfluss von Lufttemperatur, relativer Luftfeuchte und Luftgeschwindigkeit (Brief & Confer, 1971). Durch die Verwendung dieser unterschiedlichen Maße wird jedoch wiederum eine Vergleichbarkeit zwischen den Analysen und auch die Interpretation der Ergebnisse für den moderat-warmen Bereich erschwert, in welchem zudem die Datengrundlage mit sieben bzw. zwölf Studien eher gering ist.

*Tabelle 1*
*Daten der bereits durchgeführten Meta-Analysen*

| KRITERIUM | PILCHER | HANCOCK |
|---|---|---|
| Messgröße | WBGT | ET |
| Moderat-warmer Bereich | 21-26 °C WBGT | 25,7-29,4 °C ET |
| Anzahl der Studien in diesem Bereich | 7 | 12 |
| Effektstärke moderat-warmer Bereich | -0,02 | -0,18 |
| Verminderung der Leistung im Vergleich zu einer neutralen Temperatur | bis zu 14,88 % | ca. 11 % |
| Untersuchte Moderatoren | - Akklimatisation<br>- Aufgabentyp<br>- Dauer der Aufgabenbear-beitung<br>- Expositionszeit | - Akklimatisation<br>- Aufgabentyp<br>- Expositionszeit<br>- Quantität und Qualität der Leistung |

Nach dieser allgemeinen Aussage wurden darüber hinaus auch einige Moderatorvariablen untersucht. Abbildung 2 zeigt die Ergebnisse zur Expositionszeit aus der Analyse von Hancock, Ross und Szalma. Dabei ist zu sehen, dass mit zunehmender Expositionszeit und steigenden Raumtemperaturen die Effektstärke negativ zunimmt. Betrachtet man die Studien mit einer Expositionszeit von bis zu 3 Stunden, beträgt die Effektstärke -0,76. Hier liegt gemäß der Einordnung von Cohen bereits ein großer Effekt vor. Dieses Ergebnis bezieht sich dabei sowohl auf warme oder heiße Umgebungstemperaturen als auch auf kalte Umgebungstemperaturen und bedeutet, dass ein Abweichen von einer Neutraltemperatur einen großen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit des in diesem Klima arbeitenden Menschen hat.

Ein in gewisser Weise überraschendes Ergebnis stellt dagegen die Effektstärke für Studien mit über 3 Stunden Expositionszeit dar, denn hier liegt höchstens ein kleiner negativer Effekt vor. Das heißt, dass Teilnehmer, die mehr als drei Stunden in einer von einer Neutraltemperatur abweichenden Temperaturbedingung verbringen, weit weniger negativ beeinflusst sind. als jene mit kürzerer Expositionsdauer. In dieser Kategorie sind allerdings nur 8 Studien inbegriffen.

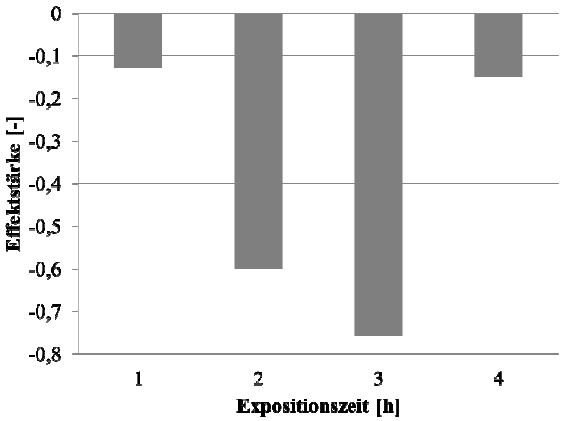


*Abbildung 2 Zeitlicher Einfluss von Wärme- oder Kältebelastung auf die menschliche Leistungsfähigkeit (Hancock, Ross & Szalma 2007)*

Aus den vorgestellten Ergebnissen lassen sich Korrelationen berechnen, die wiederum einen Rückschluss auf die prozentuale Leistungsveränderung unter der jeweiligen Bedingung zulassen und die dann für eine Gebäudesimulation nutzbar wären. So könnten die Räume in Abhängigkeit von der Nutzungsdauer individuell ausgelegt werden. Wie erwähnt, war die Datengrundlage speziell im moderat-warmen Bereich jedoch sehr gering, so dass die dort vorhandenen Studien nicht separat nach Expositionszeit ausgewertet werden konnten. Daher kann für diesen Bereich noch keine verlässliche Aussage, ob ein zeitlicher Einfluss vorhanden ist, abgeleitet werden.

Auch hinsichtlich der Art der Leistungserbringung, also der Frage, ob es darauf ankommt, möglichst schnell zu arbeiten oder möglichst wenig Fehler zu machen oder auch beides, kann die Temperatur sich unterschiedlich auswirken, wie Abbildung 3 zeigt.

Hier ist zu sehen, dass bei einem Abweichen von der Neutraltemperatur die Schnelligkeit der Aufgaben-bearbeitung viel stärker beeinträchtigt ist als die Genauigkeit. Das heißt, dass die Teilnehmer in einer kalten oder warmen Umgebung sehr viel langsamer arbeiten als in einer neutralen Umgebung. Hier liegt gemäß der Definition von Cohen mit einer Effekt-stärke von -0,45 ein mittlerer Effekt vor. Gleichzeitig machen sie auch mehr Fehler, aber in einem geringeren Ausmaß. Die Effektstärke beträgt diesbezüglich -0,28, was einen kleinen bis mittleren Effekt darstellt. Auch hier lässt sich aufgrund der geringen Datengrundlage der moderat-warme Bereich der Raumtemperatur nicht separat nach Schnelligkeit und Genauigkeit der Aufgabenbearbeitung auswerten.

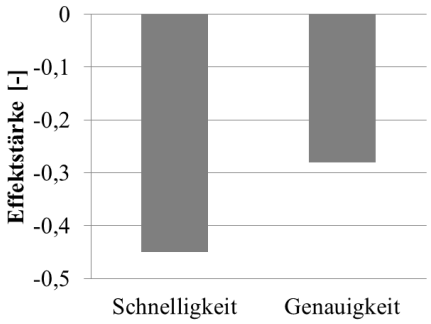


*Abbildung 3 Einfluss von Wärme- oder Kältebelastung auf die Art der Leistungserbringung (Hancock, Ross & Szalma 2007)*

Aufgrund der geringen Datengrundlage lässt sich aus dieser vorgestellten Analyse wie auch aus der Analyse von Pilcher, Nadler und Busch also noch nicht herauslesen, wie sich die Leistungsfähigkeit unter bestimmten Randbedingungen, bspw. unter der zeitlichen Exposition oder der Art der Leistungserbringung, bei moderater Wärmebelastung verhält. Auch Korrelationen, aus denen Rückschlüsse auf die prozentuale Veränderung der Leistung möglich wären, sind in den Analysen nicht angegeben. Dies bedeutet, dass aus den beiden vorliegenden Meta-Analysen noch kein Zusammenhang abgeleitet werden kann, der für die Einbindung in eine Gebäudesimulation, wie sie zur Planung von Bürogebäuden benötigt wird, geeignet ist.

Schlussendlich lässt sich daraus ableiten, dass Methode einer Meta-Analyse vielversprechende Aussagen für die Integration in eine Gebäudesimulation liefern kann, der moderat-warme Temperaturbereich aber bislang noch nicht hinreichend genau analysiert wurde. Aus diesem Grund wurde am Lehrstuhl für Bauphysik im Rahmen des Promotionskollegs „Menschen in Räumen“ damit begonnen, eine solche Analyse für den Bereich der moderaten-Wärmebelastung durchzuführen.

**Notwendigkeit einer weiteren Meta-Analyse**

Mithilfe einer solchen weiteren Meta-Analyse sind vor allem folgende wichtige Fragen zu klären:

- Ist tatsächlich ein Einfluss der Raumtemperatur im moderat-warmen Bereich auf die Arbeitsleistung von Büroangestellten vorhanden? Wenn dieser gegeben ist, wie groß ist die Auswirkung?
- Hat eine moderat-warme Raumtemperatur einen positiven oder einen negativen Einfluss?
- Ist dieser Einfluss linear, d.h. nimmt die Leistung mit steigender Temperatur kontinuierlich ab oder gibt es einen kritischen Punkt, ab dem ein starker Abfall festzustellen ist?
- Gibt es weitere Einflussgrößen, die die Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit verstärken oder abmindern? Als Beispiel sei der Bekleidungsgrad oder die Art der zu bearbeitenden Aufgabe genannt.
- Gibt es einen Zusammenhang zwischen Leistungsfähigkeit und Behaglichkeit?
- Welche speziellen Zusammenhänge sind noch nicht ausreichend erforscht? Wo ist die Datengrundlage noch nicht ausreichend? Als Beispiel lässt sich hier die geringe Datengrundlage bei Langzeitexpositionen anführen.
- Lässt sich ein zugrundeliegender Mechanismus identifizieren, der auch bisher widersprüchlich erscheinende Forschungsergebnisse erklären kann?

Da sich mit Hilfe einer Meta-Analyse sowohl eine globale Aussage über die Auswirkung der Raumtemperatur auf die Arbeitsleistung erstellen lässt als auch detailliertere Aussagen möglich sind, wie z.B. nach der Art der zu bearbeitenden Aufgabe getrennte Aussagen, können die Erkenntnisse aus dieser Analyse sowohl in eine erste Grobplanung eines Gebäudes einfließen als auch in der Detailplanung für eine bestimmte Nutzungsart, z.B. für ein Call-Center, eine wertvolle Basis sein.

## ZUSAMMENFASSUNG

Das thermische Raumklima übt einen wesentlichen Einfluss auf Gesundheit, Wohlbefinden und Leistungsfähigkeit des Menschen aus. Eine auf der Leistungsfähigkeit der Nutzer basierende Auslegung von Gebäuden und ihren Komponenten ist prinzipiell möglich. Dazu wurden bisher bekannte Zusammenhänge herangezogen, die aufgrund ihrer Datenbasis jedoch nur eine erste Orientierung und keine Möglichkeit der Differenzierung bieten. Daher ist eine andere methodische Herangehensweise erforderlich; als eine solche wurde das Verfahren der Meta-Analyse als wirkungsvolles Instrument zur Quantifizierung der Auswirkungen von moderater Wärmebelastung auf die menschliche Leistungsfähigkeit vorgestellt. Die Methodik der Meta-Analyse lässt zum einen eine globale Betrachtung des Zusammenhangs zu, bietet aber zugleich die Möglichkeit einer differenzierteren Untersuchung, z.B. hinsichtlich des Aufgabenbezugs, so dass auch für spezielle Planungsfragen ein Zusammenhang ermittelt werden kann. Durch die statistische Aggregierung vieler einzelner Studien stellt sie die untersuchte Fragestellung auf eine breite Stichprobenbasis und lässt verlässlichere Aussagen über das Vorhandensein und die Größe eines Effekts zu als

einzelne Studien. Bisherige Meta-Analysen untersuchten den Einfluss der Temperatur über alle Temperaturbereiche, d.h. sowohl extrem kalte und extrem warme, als auch moderat-warme und moderat-kalte Bedingungen waren in den Analysen inbegriffen. Leider standen für letztere Temperaturbereiche zum Zeitpunkt der Durchführung noch nicht ausreichend viele Studien zur Verfügung, so dass sich noch keine gesicherte Aussage über die Auswirkungen moderater Wärmebelastung auf den Menschen ableiten ließ.

Die in diesem Beitrag gefundenen Zusammenhänge zwischen Raumtemperatur und Leistungsfähigkeit haben dabei für Anwendungen im Bereich der thermisch-energetischen Gebäudesimulation eine Bedeutung. War es bislang etwa üblich, die Nutzerakzeptanz des Raumklimas durch Auswerten von Simulationsergebnissen bzgl. der thermischen Behaglichkeit nach ISO 7730 vorzunehmen (vgl. van Treeck, 2010), können zukünftig mit Kenntnis der Zusammenhänge zwischen Temperatur und menschlicher Leistungsfähigkeit auch mögliche raumklimabedingte Leistungseinbußen thematisiert und ein Gebäudeentwurf entsprechend optimiert werden.

## AUSBLICK

Um den Einfluss von moderat-warmen Raumtemperaturen auf die menschliche Leistungsfähigkeit im Speziellen bei Büroarbeit zu analysieren, ist eine separate Meta-Analyse für diesen Bereich erforderlich. Die Autoren führen eine solche im Rahmen des interdisziplinären Promotionskollegs „Menschen in Räumen“ (www.people-inside.de) derzeit durch und wollen damit darüber hinaus ursächliche Mechanismen, die für eine Leistungsveränderung bei moderater Wärmebelastung verantwortlich sein können, aufdecken und, wenn möglich, auch Widersprüche aus einzelnen Untersuchungen aufklären.

## LITERATUR


Aschoff, J. 1971. Thermoregulation. In: Aschoff, G.; Günther, B.; Kramer, K. (Hrsg.): Energiehaushalt und Thermoregulation. Verlag Urban & Schwarzenberg. München, Berlin, Wien. 1971.

Bell, P. A. 1981. Physiological comfort, performance and social effects of heat stress. Journal of Social Issues, 37 (1981), 71-94.

Bortz, J., Döring, N. 2006. Metaanalyse. In: Forschungsmethoden und Evaluation für Human- und Sozialwissenschaftler. Springer Medizin Verlag. Berlin und Heidelberg. 2006.

Brief, R.S., Confer, R.G. 1971. Comparison of heat stress indices. American Industrial Hygiene Association Journal. 32 (1971), 11-16.

Bundesrepublik Deutschland 2001. Arbeitsstätten-richtlinie Raumtemperatur ASR 6

Bundesrepublik Deutschland. 2010. Technische Regeln für Arbeitsstätten: Raumtemperatur. ASR A3.5

Cohen, J. 1988. Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences. Lawrence Erlbaum Associates. Hillsdale. 1988.

DeCoster, J. 2009. Meta-Analysis Notes. Retrieved 06.09.2011 from http://www.stat-help.com.

DIN EN 15251. 2007. Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden – Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik. Beuth Verlag. Berlin. 2007.

DIN EN 27243, 1993. Ermittlung der Wärmebelastung des arbeitenden Menschen mit dem WBGT-Index. Beuth Verlag, Berlin. 1993.

Enander, A. E. 1987. Effects of moderate cold on performance of psychomotor and cognitive tasks. Ergonomics, 30 (1987), 1431–1445.

Gifford, R., Hine, D. W. & Veitch, J. A. 1997. Meta-Analysis for environment-behavior and design research, illuminated with a study of lighting level effects on office task performance. In Moore, G. T. & Marans, R. W. (Hrsg.): Advances in environment, behavior, and design (Vol. 4). Plenum-Verlag. New York. 1997.

Glass, G.V. 1976. Primary, secondary and meta-analysis of research. Educational Research, 5 (1976), 3-8.

Hancock, P. A. 1982. Task categorization and the limits of human performance in extreme heat. Aviation, Space and Environmental Medicine. 53 (1982), 778-784.

Hancock, P.A., Vasmatzidis, I. 2003. Effects of heat stress on cognitive performance: the current state of knowledge. International Journal of Hyperthermia, 19 (2003), 355-372.

Hancock, P.A., Ross, J.M., Szalma, J.L. 2007. A meta-analysis of performance response under thermal stressors. Human Factors, 49 (2007), 851-877.

Hunter, J. E., Schmidt, F. L. 2004. Methods of meta-analysis. Sage. Thousanbd Oaks, London, New Delhi.

IFMA. 2009. Temperature Wars: Savings vs. Comfort. International Facility Management Association. Houston. 2009.

LG Bielefeld 2003.Urteil vom 16.04.2003. AZ: 3 O411/01.

Niemela, R., Hannula, M., Rautio, S., Reijula, K., Railio, J. 2002. The effect of air temperature on labour productivity in call centres—a case study. Energy and Buildings 34 (2002), 759-764.

OLG Rostock 2000. Urteil vom 29.12.2000, AZ:3 U83/98.

Patterson, M. J., Taylor, N. A. S., & Amos, D. 1998. Physical work and cognitive function during acute heat exposure before and after heat acclimization (DSTO-TR-0683). Melbourne, Australia: Defence Science and Technology Organisation, Aeronautical and Maritime Research Laboratory.

Pilcher, J.J., Nadler, E., & Busch, C. 2002. Effects of hot and cold temperature exposure on performance: a meta-analytic review. Ergonomics, 45 (2002), 682-698.

Plokker, W. & Wijsman, A. 2009. Productivity and sick leave integrated into building performance simulation. Proceedings of 11th International IBPSA Conference. Glasgow. July 27-30, 2009.

Rashid, M., Zimring, C. 2008. A review of the empirical literature on the relationships between indoor environment and stress in health care and office settings. Environment and Behavior, 40 (2008), 151-190.

Seppänen, O., Fisk, W. J. & Lei, Q. H. 2006. Room temperature and productivity in office work. Proceedings of Healthy Buildings Conference. 2006. Lisbon.

Urlaub, S., Hellwig, R.T., van Treeck, C. & Sedlbauer, K. 2010. Möglichkeiten und Grenzen bei der Modellierung von Einflussfaktoren auf die menschliche Leistungsfähigkeit. Bauphysik, 32 (2010), 373-379.

van Treeck C., Introduction into Building Performance Simulation, Habilitation thesis, Technische Universität München, 2010.

Vitali, L. 2000. Mentale Leistung bei Hitzestress. Dissertation. Universität Zürich.

Wyon D. P. 1969. The effects of moderate heat stress on the mental performance of children. SIB Document D8:1969, Statens institute för byggnadsforskning.