

Kühldecken: Ingenieurverstand auf Abwegen ?

Dr.-Ing. habil. Bernd Glück, ROM-Zentrale, Hamburg

Als vor etwa acht Jahren die Kühldeckenanwendungen ernsthaft begannen, wurden die Anwender teilweise mit "rekordverdächtigen" Leistungsangaben konfrontiert. In Aussicht gestellte Kühlleistungen "halbierten" sich in einigen Fällen bei Kontrollmessungen. Die meisten Fachkollegen atmeten auf, als die DIN 4715 ein genormtes Verfahren präsentierte. Bewußt wurde eine Prüfkabine gewählt, die in der Höhe Büroräumen entspricht. Zahlreiche Hersteller optimierten ihre Konstruktionen und ließen in zertifizierten Prüfständen messen. Leider sprühten aber auch abwegige Ingenieurgedanken, die den Beinamen Ingenieur nicht verdienten.

- Plumpse Fälschungen wurden angeboten, in denen Normmessungen von Grundpaneelen (nackte Paneele) präsentiert wurden, die im praktischen Einbau jedoch wärmedämmende, zumindest aber strahlungsbehinderte Unterkonstruktionen erhielten.
- Dann wurde nach Lücken in der Norm gesucht. Wer sucht, der findet auch! In [1] stellte man die quantitativen Auswirkungen "vorteilhaft definierter" Kühldeckenflächen anschaulich dar. Rechnet man z. B. die für eine Deckenkonstruktion notwendigen Bandraster oder nicht mit Rohren belegte Randflächen der Platten aus der aktiven Fläche heraus, erhöht sich die Leistung der "aktiven" Fläche, was für die Wettbewerbsphase mitunter vorteilhaft ist.
- Dann gibt es noch die "Wissenschaftler", die zu recht feststellen, daß die in der Kabine gemessene Normleistung wegen veränderter Umgebungsbedingungen nicht mit der Leistung im Einsatzfall übereinstimmt. Will man dies untersuchen, bedarf es umfassender Simulationsmodelle oder einer Unmenge von Messungen, worauf [2] hinwies. Dieser Mühe unterzog sich niemand ernsthaft. Statt dessen griff man begierig Veröffentlichungen mit Umrechnungsfaktoren auf, die in der Regel zu höheren Leistungen im Realfall führten. Superponierbarkeit der Einzelwirkungen als Grundlage für die Anwendung der Faktorenmethode wurde vorausgesetzt, aber nirgendwo wissenschaftlich bewiesen. Hersteller, denen diese Methode suspekt erscheint, sind nach ihrer Aussage zu diesem "Wettbewerb" gezwungen.

Gibt es ein "Gegengift"?

Den ersten beiden Punkten kann man nur mit erhöhter Aufmerksamkeit begegnen. Das einzige "Gegengift" bei Täuschungsversuchen ist der Vergleich der Prüfsertifikate mit dem angebotenen Produkt und die genaue Prüfung, ob die Leistungsbezugsfläche technisch realisierbar ist. Der dritte Punkt kann bis auf wenige Ausnahmen objektiv beispielsweise mit dem Raummodell [3] beurteilt werden.

Simulation mit dem Raummodell

Der Büroraum nach Bild 1 mit einer Kühldecke und Quelllüftung wurde unter sommerlichen Bedingungen untersucht.

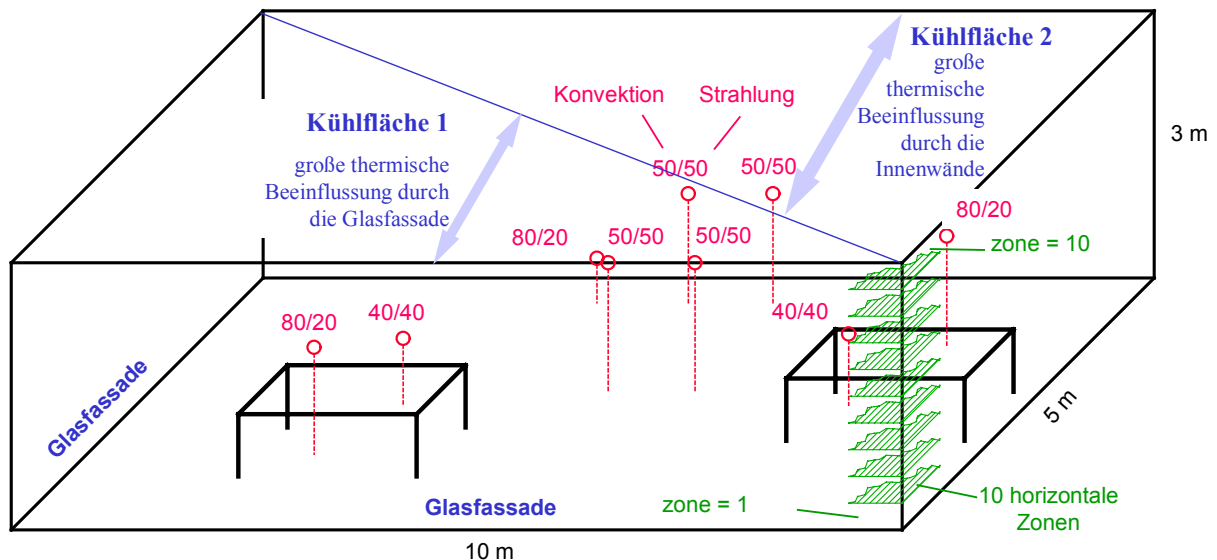


Bild 1 Eckraumbüro mit zwei Vollglasfassaden, neun inneren Wärmequellen, einer Kühldecke (Vollflächenbelegung) und Quelllüftung mit dreifachem Luftwechsel. Die Wärmeströme, die von den inneren Wärmequellen ausgehen, sind bezüglich der Konvektion und Strahlung in W angegeben.

Fläche 1 wird besonders von den Glasfassaden, Fläche 2 von den Innenwänden thermisch beeinflusst. Der Teilwärmehdurgangskoeffizient der Kühldecke beträgt $\kappa = 94,2 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. Das *erste Beispiel* betrachtet die wärmetechnische Raumsituation *instationär*. Den Glasfassaden und dem Fußboden werden zeitabhängige Belastungsverläufe (Einfluß: Sonnenstand, Jalousiesteuerung) aufgeprägt. Die symmetrisch belasteten, massiven Innenwände haben morgens eine homogene Temperatur; die inneren Wärmequellen weisen eine Konstantleistung auf (Detaillierungen in [3]). Die Ergebnisse der Simulation über einen Tag zeigt Tabelle 1. Die Faktoren f geben das Verhältnis der simulierten Leistungen \dot{q} zur Kühldeckenleistung \dot{q}_N gemäß DIN-Prüfung bei Δt an: $f = \dot{q}/\dot{q}_N$.

Im *zweiten Beispiel* werden *stationär* normale und extreme Fassadenbelastungen betrachtet (Detaillierung in [4]). Die Ergebnisse finden sich in Tabelle 2.

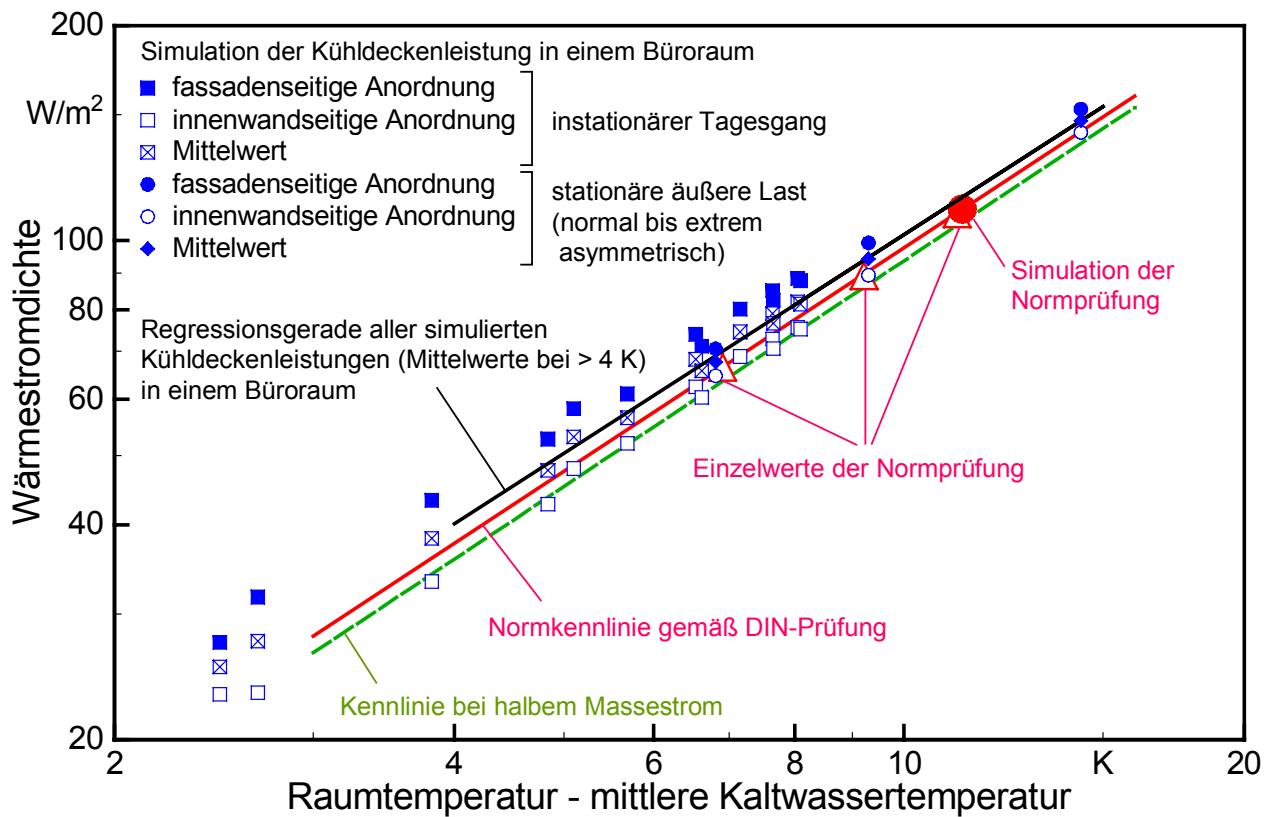
Tabelle 1 Untertemperatur und Leistungsverhältnisse

Uhrzeit	Δt K	f_1	f_2	f_{mittel}	Uhrzeit	Δt K	f_1	f_2	f_{mittel}
6 ⁰⁰	1,65	1,48	0,91	1,20	13 ⁰⁰	7,65	1,15	0,99	1,07
7 ⁰⁰	3,82	1,21	0,93	1,07	14 ⁰⁰	8,05	1,14	0,97	1,05
8 ⁰⁰	2,68	1,28	0,94	1,11	15 ⁰⁰	7,66	1,11	0,95	1,03
9 ⁰⁰	4,84	1,15	0,93	1,04	16 ⁰⁰	6,62	1,12	0,95	1,03
10 ⁰⁰	5,10	1,20	0,99	1,09	17 ⁰⁰	8,10	1,12	0,96	1,04
11 ⁰⁰	6,54	1,18	0,99	1,09	18 ⁰⁰	5,69	1,12	0,96	1,04
12 ⁰⁰	7,16	1,16	1,00	1,08	19 ⁰⁰	2,48	1,19	1,01	1,10

Tabelle 2 Untertemperatur, Leistungsverhältnisse und Strahlungsanteil

Variante	Δt K	f_1	f_2	f_{mittel}	s %
1	6,81	1,08	0,99	1,03	67
2	9,30	1,10	0,99	1,04	65
3	14,34	1,07	1,00	1,04	61
4	5,8	1,09	1,00	1,04	67
5	5,4	1,11	1,02	1,06	69
6	5,7	1,11	1,03	1,07	67
7	4,2	1,13	0,99	1,06	72

Eine Zusammenfassung der Ergebnisse beider Beispiele sowie der Normmessungen zeigt Bild 2.

**Bild 2** Zusammenstellung aller simulierten und gemessenen Ergebnisse für die Hochleistungskühldecke

Objektive Feststellungen

- Die Leistungsunterschiede zwischen den Flächen 1 und 2 hängen auch von der Qualität der Kühldecke ab. Diese sind bei der betrachteten Hochleistungsdecke besonders groß. Wiederholte man Variante 1 für eine leistungsschwächere Decke mit $\kappa = 20 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$, dann reduzierte sich der Unterschied von f_1 zu f_2 von 9,1 % auf 6,7 %. Dies ist logisch, denn würde man z. B. einen Heizkörper mit einer Wärmedämmung versehen - er stellte die Analogie zu einer leistungsschwachen Decke dar -, dann wären Änderungen der thermischen Umgebungsbedin-

gungen auch von geringerem Einfluß. Dieser Effekt spricht gegen die "Faktorenmethode", denn die Superponierbarkeit der Einflüsse ist offenbar nicht gegeben.

- Mehrleistungen im Fassadenbereich stehen meist Minderleistungen im Innenwandbereich - jeweils bezogen auf die Normkennlinie - gegenüber. Die hohen inneren Lasten in modernen Büros bedürfen meistens einer großflächigen Belegung mit Kühldeckenelementen. Die mittlere Kühldeckenleistung bei Vollbelegung liegt nur etwa 5 % über der Normleistung. Man sollte diese "Reserve" unbedingt belassen, denn mangelhafte Paneelfertigung und -montage sowie ein verringerter Wasserdurchsatz reduzieren die Leistung der Kühldecke.
- Nur für Räume mit ausgefallener Geometrie oder extremen Belastungen erscheint eine Simulation mit einem Raummodell angezeigt. Für übliche Büroräume sollte die Normkennlinie Verwendung finden.
- Es sei daran erinnert, daß beim Heizkörpereinsatz Umrechnungen in Abhängigkeit des Einsatzortes auch nicht üblich sind.

Überprüfung der "empfohlenen" Faktoren

Mit dem Raummodell sind unter Einbeziehung der komplexen Wärmeaustauschvorgänge sehr detaillierte Aussagen möglich. Keinesfalls gilt die einfache, verhältnisgleiche Überlagerung von Einflußfaktoren (Höheneinfluß, Fassadeneinfluß, Belegungseinfluß usw.) nach [5, 6].

Einfluß der äußeren Lasten (Gesamtzuschlag 3...7 % kontra 18 %)

Im ersten Beispiel tritt die maximale Last um 14.00 Uhr auf. Die mittlere Leistungserhöhung beträgt 5 %. Im zweiten Beispiel schwanken die Leistungsunterschiede zwischen 3 % und 7 %.

Nach [5] gelte ein Korrekturfaktor $f_{\text{Last}} = 1,2$; nach [6] sogar noch ein höherer Wert (die fehlende Abszissenbeschriftung gestattet kein zahlenmäßiges Ablesen). Beachtet man nach [5] noch die Raumhöhe, so folgte ein Gesamtzuschlag von 18 % auf die gemessene Normleistung.

Einfluß der Deckenbelegung (Gesamtzuschlag -5...+1 % kontra 25 %)

Der Berechnung gemäß Variante 5 unter Maßgabe, daß nur die Deckenfläche 1 oder 2 aktiv ist, folgen die Ergebnisse der Varianten 8 und 9 (Tabelle 3).

Tabelle 3 Untertemperatur, Leistungsverhältnis, Temperaturen und Strahlungsanteil bei halber Deckenbelegung

Variante		Δt K	f	t_{Decke} °C	$t_{\text{Strahlung}}$ °C	t_{Luft} °C	t_E °C	s %
5	Vergleichsvariante (Vollbelegung)	5,4	1,06	21,1	26,6	25,4	26,0	69
8	nur fassadennahe Fläche aktiv	10,9	1,01	16,1	26,7	25,1	25,9	62
9	nur innenwandnahe Fläche aktiv	11,6	0,95	15,5	27,1	24,9	26,0	59

Die Leistung der Kühldecke weist bezogen auf die Normbedingungen eine Abweichung von $f = 1,01 \dots 0,95$ auf.

In [5] wird von einem Leistungsfaktor $f_{\text{Belegung}} = 1,06$ und in [6] von 1,02 ausgegangen. Berücksichtigt man nach [5] noch f_{Last} und $f_{\text{Höhe}}$, so folgt ein Gesamtzuschlag von 25 %.

Einfluß der Raumhöhe (Gesamtzuschlag 1...2 % kontra 13 %)

Der im Bild 1 gegebene Raum wurde bei sonst gleicher Geometrie auf 4 m erhöht. Die Varianten 5 bis 7 werden bei gleichen Randbedingungen wiederholt (Ergebnisse: Tabelle 4).

Tabelle 4 Untertemperatur, Leistungsverhältnisse und Strahlungsanteil bei Raumhöhe 4 m

Variante	Δt K	f_1	f_2	f_{mittel}	s %
10 (\equiv 5)	7,1	1,05	0,97	1,01	67
11 (\equiv 6)	7,3	1,06	0,99	1,02	66
12 (\equiv 7)	5,7	1,07	0,96	1,01	70

Die Kühldeckenleistungen im 4 m hohen Raum sind niedriger, wobei der Strahlungsanteil nur um 1 % bis 2 % sinkt und $f_{\text{mittel}} = 1,01 \dots 1,02$ beträgt.

Für diesen Fall benennt [5] einen Faktor $f_{\text{Höhe}} = 0,94$; [6] gibt etwa 0,8 an (falls man die Änderung des Einstrahlzahlverhältnisses mit der Leistungsänderung gleichsetzt, was nicht eindeutig gesagt wurde). Die Kombination mit f_{Last} liefert nach [5] einen Gesamtzuschlag von 13 %.

Schwäche der Faktorenmethode

Die in [5, 6] definierten Einflußfaktoren betrachten stets nur ganz bestimmte Situationen unter größtmöglicher Vernachlässigung der überlagerten Wärmeaustauschvorgänge im Raum und ohne Auswirkung auf die stets einzuhaltende Empfindungstemperatur.

- Der Strahlungsaustausch wird nur bilateral zwischen Decke und Boden bzw. Außenwand betrachtet. Ein Gesamtmodell fehlt. Eine geometrisch verbesserte Abstrahlung wird automatisch mit einer Leistungserhöhung gleichgesetzt, z. B. bei reduzierter Deckenbelegung.
- Gleichermaßen fehlt das Einbeziehen der konvektiven Veränderungen. Dies sind die veränderten Temperaturdifferenzen, vertikalen Lufttemperaturprofile und Luftvolumenströme.
- In Realität muß bei einer Flächenreduzierung die Oberflächentemperatur abgesenkt werden, um die geforderte Leistung und Empfindungstemperatur einzuhalten. Damit steigt die Konvektion stark an. Gemäß Tabelle 3 führte die auf 50 % verkleinerte Kühldeckenfläche zu einer Oberflächentemperatursenkung von 21,1 °C auf 16,1 °C bzw. 15,5 °C. Die Lufttemperatur t_L änderte sich nur geringfügig, da $t_E = (26 \pm 0,1)$ °C galt. Wegen der größeren Tempera-

turdifferenz zwischen der Luft und der Kühldeckenoberfläche steigt die Konvektion um ca. 24 % an. Damit reduziert sich der Strahlungsanteil von 69 % auf 62 % bzw. 59 %.

- Die Leistungserhöhungen können in keinem Fall bestätigt werden.

Vor der heutigen Entwicklung wurde gewarnt

In [2] wurde von einer gefährlichen Extrapolation von Teilergebnissen gesprochen und aufgefordert, statt an Einzelfaktoren am Gesamtproblem "Kühllast und Raumkühlsystem" zu arbeiten. Das Raummodell [3] könnte einen Ansatz bieten. Die Strahlung wird exakt, die Konvektion relativ genau erfaßt, da das vertikale Temperaturprofil Beachtung findet. Bisher nicht eingearbeitet sind überlagerte, konvektive Strömungen.

Leider finden aber viele an einfachen aber falschen Zusammenhängen großen Gefallen. Die Zeitschriften publizieren fleißig - in der Regel leider aber kritiklos - alles. In [7] wird z. B. allerlei Bekanntes und Falsches (die Farbe der Möbel wird in der Regel die Kühldeckenleistung nicht beeinflussen; die konvektive Wärmeübertragung ist nicht genauer berechenbar als der Strahlungsaustausch) für mitteilenswert gehalten, bereits vollzogene Entwicklungsarbeit wird in Unkenntnis angemahnt und zur Lösung aber nichts beigetragen. Rietschel forderte auf dem XIII. Kongreß 1913 in Köln eine Zensur der Fachartikel. Sie wäre weder durchführbar noch wünschenswert, eine erhöhte Selbstverantwortung stünde unseren Fachautoren und -redakteuren aber gut an.

Schön gerechnete Komponenten verkaufen sich bekanntermaßen besser als Produkte mit Normleistungsangaben. Dies macht besonders Spaß, wenn man das Ergebnis nicht zu verantworten hat. Die Gewährleistungspflicht für die Gesamtfunktion liegt beim Anlagenbauer ja in guten Händen.

Literatur

- [1] FINKELSTEIN, W.; SEFKER, TH.: Erfahrungen mit Kühldeckenmessungen nach DIN 4715 - Vergleich mit der Nordtest-Methode. Ki Luft- und Kältetechnik (1997) Heft 9
- [2] GLÜCK, B.: Kühldeckenleistungen: Vom Prüfstand in die Praxis? CCI (1995) Heft 11
- [3] GLÜCK, B.: Wärmetechnisches Raummodell. Heidelberg: C. F. Müller Verlag 1997
- [4] GLÜCK, B.: Simulation der Leistungen von Kühldecken sowie der wärmetechnischen und wärmephysiologischen Verhältnisse in Räumen mit Kühldecken. Ki Luft- und Kältetechnik (19098) Heft 5
- [5] Prospekt: Das Kühldeckensystem STRAMAX 2000, Technische Dokumentation, 1995
- [6] LEIDINGER, D.: Kühldeckenleistung: Einflußfaktoren - physikalisch gesehen. CCI (1996) Nr. 8
- [7] STEINEMANN, J.: Stimmen Labor-Kühldeckenleistungen in der Praxis? - Eine Frage der Strahlung. CCI (1997) Nr.11