



Bundesinstitut
für Sportwissenschaft



Wir helfen
dem Sport

Isabel Janowsky-Vidovic • Philip Leistner

Gesunde und energieeffiziente Gestaltung von Sportstätten



Isabel Janowsky-Vidovic • Philip Leistner

Gesunde und energieeffiziente Gestaltung von Sportstätten

Schriftenreihe des Bundesinstituts für Sportwissenschaft 2023 | 03

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Herausgeber:

Bundesinstitut für Sportwissenschaft (BISp)
Graurheindorfer Str. 198
53117 Bonn
www.bisp.de

Ansprechperson:

Dr. Jutta Katthage
jutta.katthage@bisp.de
+49 228 99 640 9026

Stand:

Dezember 2023

Isabel Janowsky-Vidovic, Philip Leistner:

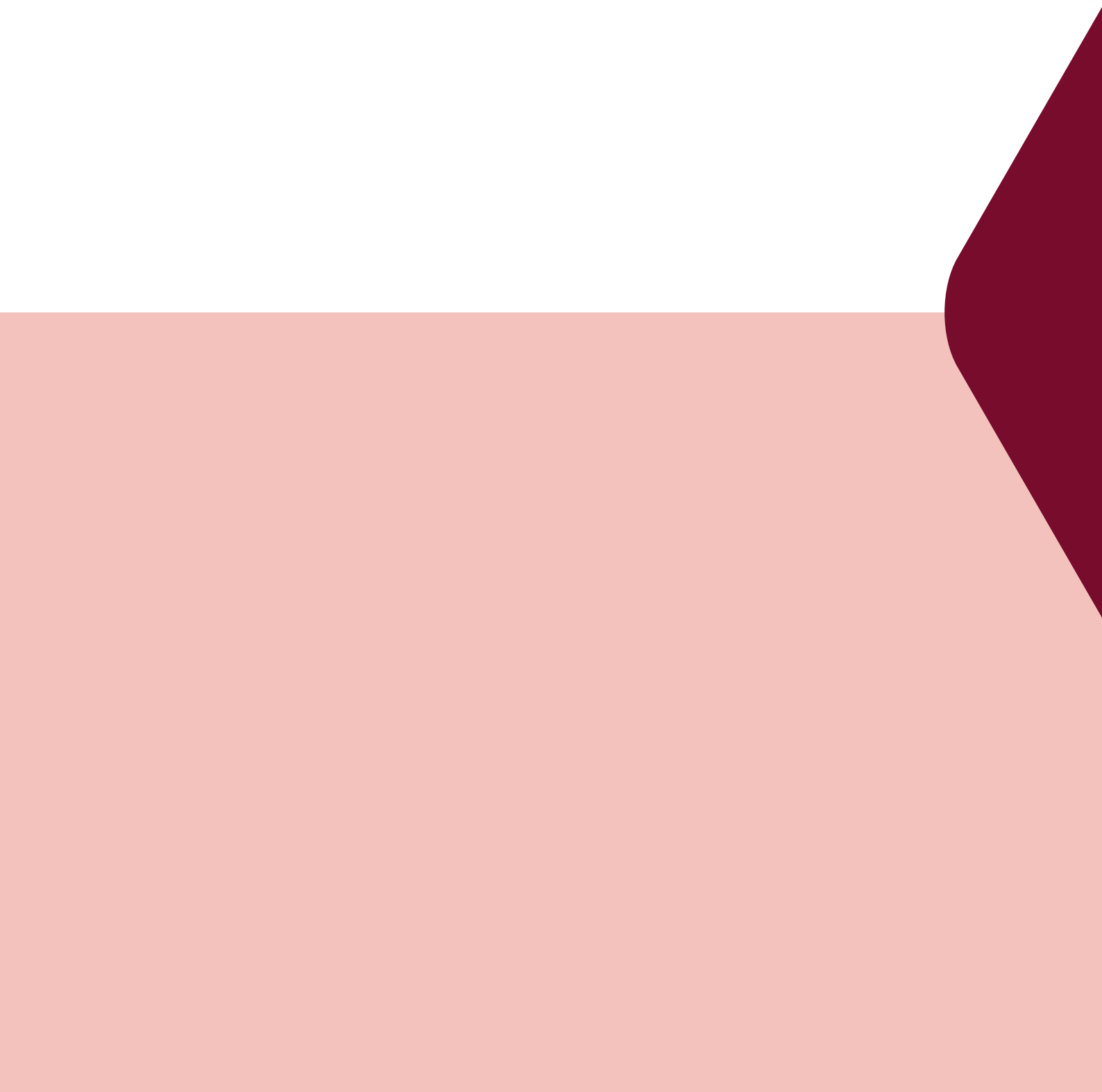
Gesunde und energieeffiziente Gestaltung von Sportstätten

Schriftenreihe des Bundesinstituts für Sportwissenschaft, Bd. 2023 | 03
ISBN: 978-3-96523-095-8

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt.
Kein Teil dieses Werkes darf ohne ausdrückliche Genehmigung des Bundesinstituts für Sportwissenschaft digital oder analog vervielfältigt werden.

Satz & Layout: A Vitamin Kreativagentur GmbH, Berlin
Umschlag: A Vitamin Kreativagentur GmbH, Berlin
Titelbild: Isabel Janowsky-Vidovic

Inhaltsverzeichnis



Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Stand des Wissens	7
1.1	Gesunde Aufenthaltsqualität	8
1.1.1	Nationale und internationale Normengrundlage und Regelwerke	8
1.1.2	Beurteilung der Aufenthaltsqualität	11
1.1.3	Wärmebilanz des Körpers bei sportlicher Aktivität	11
1.1.4	Thermoregulation bei sportlicher Aktivität	12
1.1.5	Einflussfaktoren auf die thermische Behaglichkeit	13
1.1.6	Vorhersagemodell zur Beurteilung der thermischen Behaglichkeit	15
1.1.7	Auswirkungen der thermischen Umgebung auf die Leistungsfähigkeit	17
1.1.8	CO ₂ -Gehalt als Indikator für die Luftqualität	18
1.2	Energieeffizienz	18
2	Aufgabenstellung	21
3	Basisanalysen	23
3.1	Nutzungsdifferenzierung	24
3.1.1	Die motorischen Fähigkeiten	24
3.1.2	Leistungsdiagnostik	26
3.1.3	Abschließende Nutzungsdifferenzierung	27
3.2	Energetische Kategorisierung von Sporthallen	28
3.2.1	Modellgrundrisse	28
3.2.2	Anforderungen in Verordnungen und Gesetzen	28
3.2.3	Abschließende energetische Kategorisierung	29
4	Mess- und befragungstechnische Untersuchungen zur Aufenthaltsqualität	31
4.1	Messgrößen	32

4.2	Fragebogen	32
4.3	Sporthallen	33
4.4	Auswertungsmethode	33
5	Untersuchungsergebnisse zur Aufenthaltsqualität	35
5.1	Außenklima	36
5.2	Messergebnisse	37
5.3	Demografische Probandendaten	40
5.4	Wichtigkeit und Zufriedenheit mit bauphysikalischen Raumbedingungen	40
5.5	Thermische Behaglichkeit	43
5.5.1	Sommer	43
5.5.2	Winter	49
5.6	Fazit zur Aufenthaltsqualität	52
6	Simulative Untersuchungen zur Energieeffizienz	55
6.1	Randbedingungen	56
6.1.1	Gebäudegeometrie und Konstruktionen	56
6.1.2	Thermische Anforderungsbereiche	56
6.1.3	Klimatische Randbedingungen	57
6.1.4	Anlagentechnik - Heizung und Kühlung	58
6.1.5	Lüftung	58
6.2	Parameterstudien	59
7	Simulationsergebnisse zur Energieeffizienz	61
7.1	Referenzgrößen – Energiebedarf nach Norm	62
7.2	Variation der Hallenbetriebstemperatur	63
7.3	Variation der Luftwechselzahl	66
7.4	Einfluss einer Kühlung	68

7.5	Einfluss einer Nacht- und Tagabsenkung	69
7.6	Einfluss der internen Wärmegewinne durch Sporttreibende	71
7.7	Einfluss von baulichen Maßnahmen	74
7.8	Fazit zur Energieeffizienz	75
8	Infektionsrisiko – Covid-19	77
8.1	Infektionswege	78
8.2	Infektionsrisiko	78
8.2.1	Dosis	78
8.2.2	Parameterstudie relatives Infektionsrisiko	79
8.3	Maßnahmen zur Reduktion des Infektionsrisikos	83
8.3.1	Lüftung	83
8.3.2	Luftreinigung	84
8.4	Fazit Infektionsrisiko	84
9	Zusammenfassung und Wissenstransfer	85
9.1	Zusammenfassung	86
9.2	Gestaltungshinweise	87
10	Diskussion und Ausblick	91
	Literaturverzeichnis	93
	Tabellenverzeichnis	101
	Abbildungsverzeichnis	105

1 Einleitung und Stand des Wissens

1 Einleitung und Stand des Wissens

Zu einer Sportinfrastruktur mit Zukunft gehören Räumlichkeiten, die sowohl Ansprüche an Funktionalität und Sicherheit erfüllen als auch gesunde und leistungsfördernde Aufenthaltsbedingungen bieten. Zugleich gilt es, diese Gestaltungsziele nachhaltig, mit energie- und ressourceneffizienten Gebäuden und technischen Anlagen, umzusetzen. Bisher liegen fundierte Forschungsergebnisse weder zur geeigneten Aufenthaltsqualität noch zur energetischen Bilanz von Sporthallen vor. Auch die an sich notwendige synchrone Betrachtung von Ansprüchen beider Aspekte wurde noch nicht berücksichtigt. Die Art und vor allem die Nutzung dieser Räume stellen dabei spezifische Anforderungen an ihre Konditionierung und Ausstattung, um Gesundheit, Wohlbefinden und Leistungsfähigkeit der Sporttreibenden zu gewährleisten.

1.1 Gesunde Aufenthaltsqualität

1.1.1 Nationale und internationale Normengrundlage und Regelwerke

Der gegenwärtige Kenntnisstand zur gesunden und gleichzeitig energieeffizienten Gestaltung von Sporthallen ist begrenzt und teilweise veraltet. Eine häufig zitierte Publikation des BISP („Planung und Ausstattung von Konditions- und Fitnessräumen“) stammt beispielsweise aus dem Jahr 1987 (Bundesinstitut für Sportwissenschaft [Hrsg.]). Die empfohlenen Hygieneregeln (Länder-Arbeitskreis zur Erstellung von Hygieneplänen, 2005) für Sportstätten bieten ledig-

lich knappe Hinweise und verweisen auf die entsprechende Norm DIN 18032-1 (DIN 18032-1:2014-11). Diese Norm wird häufig als Referenz angeführt, liefert jedoch keine ausführlichen Hintergrundinformationen zu den festgelegten Werten (siehe Tabelle 1), insbesondere in Bezug auf Heizung und Lüftung. Nichtsdestotrotz wird eine feste Nutzungstemperatur von 17 °C festgelegt. Es erscheint angemessen, diese Norm kritisch zu bewerten, da die DIN 18032-1 selbst auf weitere Normen verweist, welche in ihrem Anwendungsbereich Sportstätten nicht explizit einschließen oder gar ausschließen.

Auch für die Lüftung sind zusätzliche Normen wie die DIN EN 15251 (DIN EN 15251:2012-12) und die DIN EN 16798-1 (DIN EN 16798-1:2021-04) erforderlich. Jedoch werden in deren nationalem Anhang explizit Sporthallen ausgeschlossen. Die DIN 18032-1 differenziert im Abschnitt zur Lüftung nicht weiter und legt lediglich einen Außenluftstrom von mindestens 60 m³/h für Sporthallen fest, während es in Konditions-, Krafttrainings- und Kampfsporträumen sogar 100 m³/h pro Gerätestation sein sollen. Als Referenz wird die entsprechende AMEV-Empfehlung (AMEV RLT-Anlagenbau Empfehlung 140:2018) angeführt, die jedoch selbst wieder auf die DIN 18032-1 verweist. Es sind weder Grundlagen für diese Werte noch vergleichbare Richtlinien in anderen Ländern zu finden. Zum Vergleich: Der ASHRAE-Standard 62.1 (ASHRAE Standard 62.1-2016) veröffentlicht für Sporthallen und Krafttrainingsräume einen Mindestwert von ca. 35 m³/h. Obwohl dies möglicherweise kein Maßstab ist, könnte es auf eine generelle Unsicherheit hinweisen.

Tabelle 1: Bauphysikalische Anforderungen an Sporthallen nach DIN 18032-1 (DIN 18032-1:2014-11).

Umgebung	Lufttemperatur [°C]	Luftvolumenstrom mit RLT [m ³ /h]	Luftwechselzahl natürliche Belüftung [1/h]	Max. Lärmpegel [dB]
Hallen & Zusatzräume	20(1) / 17(2)	60(3) / 20(4)	1	45
Duschräume	24	keine Vorgabe	8 bis 10	45
Umkleideräume	22	keine Vorgabe	6	45
Toiletten	15	keine Vorgabe	keine Vorgabe	45
Treppenträume, Flure	12	keine Vorgabe	keine Vorgabe	45

Hinweise:

(1) zur energetischen Bewertung nach DIN V 18599-13 und GEG 20, 2020

(2) empfohlene Nutzungstemperatur

(3) je Sporttreibendem je Halle

(4) je Zuschauer/-innenplatz

Andere Handlungs- und Gestaltungshinweise im Bereich des deutschen Sportstättenbaus basieren oft auf unzureichenden „Analogiebetrachtungen“, da spezifische Erkenntnisse fehlen. Ein Beispiel hierfür ist der „Leitfaden Nachhaltiger Sportstättenbau“ (Eßig et al., 2015; siehe Kapitel 6.2, Komfort), der sich für Sporthallen auf Gestaltungskriterien (BNB-Steckbriefe) für Büro- und Verwaltungsgebäude bezieht (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, 2015). Dieser Vergleich hinkt in gewisser Weise, da Sport- und Büroräume kaum Gemeinsamkeiten aufweisen und der Begriff des Komforts nur einen Teil der Anforderungen abdeckt.

International ist in den Vereinigten Staaten beispielsweise die ASHRAE 55/2004 (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers ASHRAE 55:2004) die erste Norm, die sich mit den thermischen Aspekten in Innenräumen befasst. Jedoch enthält diese Norm keine spezifischen Anforderungen, die in Sportstätten zu beachten sind, insbesondere da die einzelnen US-Bundesstaaten in der Regel unterschiedliche Vorschriften in diesem Zusammenhang festlegen. In Russland werden in der

SNIP 31-112-2004 (SNIP 31-112-2004 The National Building Regulation of Russia) die Werte für Lufttemperatur, relative Luftfeuchtigkeit und Luftgeschwindigkeit festgelegt, die in einer typischen Sporthalle, in der verschiedene sportliche Aktivitäten stattfinden können, eingehalten werden sollten. In Italien ist die maßgebliche Norm für die Regelung der thermischen Behaglichkeit in Sporthallen die Richtlinie von CONI (CONI 1379-2008). Diese Richtlinie definiert Leitlinien für die Luftqualität sowie für die thermische, beleuchtungstechnische und akustische Umgebung in Sporthallen. Hierin werden Lufttemperaturen von 16 bis 22 °C vorgegeben.

In den meisten Sportstätten werden in der Regel verschiedene Sportarten ausgeübt. Jede dieser Sportarten bringt spezifische Anforderungen an die Räumlichkeiten mit sich und erfordert unterschiedliche Standards in Bezug auf die Raumluftqualität. Aufgrund dieser vielfältigen Anforderungen legen internationale Verbände nicht nur Regeln für das Spiel und das Material fest, sondern auch Standards für Umgebungsparameter wie Lufttemperatur, relative Luftfeuchtigkeit und Luftgeschwindigkeit, die in Innenräumen für jede Sportart eingehalten werden sollten. Tabelle 2 zeigt die Umgebungsparameter, die von den Sportverbänden für Hallensportanlagen vorgegeben werden und vom Internationalen Olympischen Komitee (IOC) anerkannt sind.

Tabelle 2: Bauphysikalische Anforderungen je Sportart gemäß Vorgaben internationaler Sportverbände.

Verband	Lufttemperatur [°C]	Rel. Luftfeuchtigkeit [%]	Max. Luftgeschwindigkeit [m/s]
Badminton (BWF) (Fortin)	18 bis 30	keine Vorgabe	< 0,2
Basketball (FIBA) (Lewis)	16 bis 20	< 50	keine Vorgabe
Boxen (AIBA) (Deutscher Boxsport-Verband e.V., 2021)	keine Vorgabe	keine Vorgabe	keine Vorgabe
Fechten (FIE) (The International Fencing Federation, 2021)	keine Vorgabe	keine Vorgabe	keine Vorgabe
Gewichtheben (IWF) (International Weightlifting Federation)	keine Vorgabe	keine Vorgabe	keine Vorgabe
Gymnastik (IFG) (Federation Internationale de Gymnastique)	Humidex = 22 bis 38		
Fitness (IFA) (International Fitness Association, 2020)	18 bis 22	40 bis 60	keine Vorgabe
Hallenfußball (FIFA)	keine Vorgabe	keine Vorgabe	keine Vorgabe
Hallenhockey (FIH) (International Hockey Federation)	keine Vorgabe	keine Vorgabe	keine Vorgabe
Handball (IHF) (International Handball Federation)	15 bis 22 (beheizte Hallen) 18 bis 24 (gekühlte Hallen)	keine Vorgabe	< 1
Judo (IJF) (International Judo Federation)	18 bis 22	30 bis 40	keine Vorgabe
Ringern (UWW) (United World Wrestling)	18 bis 22	keine Vorgabe	keine Vorgabe
Squash (WSF) (World Squash Federation)	15 bis 20	keine Vorgabe	keine Vorgabe
Tischtennis (ITTF) (International Table Tennis Federation)	12 bis 25	keine Vorgabe	< 0,1
Taekwondo (WT) (World Taekwondo, 2021)	keine Vorgabe	keine Vorgabe	keine Vorgabe
Tanzen (IDO) (International Dance Organisation)	keine Vorgabe	keine Vorgabe	keine Vorgabe
Tennis (ITF) (International Tennis Federation, 2021)	13 bis 17 (Winter) 6 bis 8 unterhalb der Außentemperatur (Sommer)	55 bis 60	keine Vorgabe
Volleyball (FIVB) (Fédération Internationale de Volleyball, 2021)	16-25 (für offizielle Wettbewerbe)	keine Vorgabe	keine Vorgabe

1.1.2 Beurteilung der Aufenthaltsqualität

Die Beurteilung der tatsächlichen Qualität von Innenräumen erfolgt in der Regel durch objektive und subjektive Bewertungen (Cianfanelli et al., 2016). Objektive Bewertungen umfassen die physische Messung von Indoor Environment Quality (IEQ)-Parametern, während subjektive Bewertungen durch Befragungen oder Interviews mit den Sporttreibenden durchgeführt werden, um ihre Wahrnehmungen und Präferenzen zu erfassen. In der Literatur werden hauptsächlich drei Methoden verwendet, um die verschiedenen Aspekte der Innenraumqualität zu bewerten:

- 1) die objektive Messung von physikalischen IEQ-Variablen
- 2) die subjektive Bewertung der Zufriedenheit der Nutzenden
- 3) ein gemischter Ansatz aus beiden Methoden

Die Berücksichtigung der thermischen Umgebung ist ein entscheidender Faktor bei der Ausübung von Sport, da sie einen maßgeblichen Einfluss auf die Gesundheit und Leistungsfähigkeit der Sporttreibenden hat. Es gibt jedoch keine einheitlichen Standards für die Messmethoden oder Modelle zur Vorhersage des thermischen Wohlbefindens in Sportstätten. Selbst die Normen zur Wahrnehmung der thermischen Umgebung berücksichtigen oft nicht die sportspezifischen Parameter (Fantozzi & Lamberti, 2019).

1.1.3 Wärmebilanz des Körpers bei sportlicher Aktivität

Der menschliche Körper hat die Fähigkeit, abhängig von der Intensität und Art der ausgeübten Tätigkeit unterschiedliche Mengen an Wärme zu erzeugen. Diese erzeugte metabolische Wärme muss durch den Körper mit der Umgebung ausgeglichen werden, indem Wärme entweder

an die Umgebung abgegeben oder von ihr aufgenommen wird. Die überschüssige Wärme wird über das Blut im gesamten Körper verteilt und durch Leitung an die Körperoberfläche abgegeben (Brotherhood, 2008). In technischer Hinsicht ist der menschliche Körper als Wärmequelle zu betrachten, die Wärme durch Leitung, Konvektion, Strahlung und Verdunstung mit der Umgebung austauschen kann. Der Wärmeaustausch zwischen dem Körper und der Umgebung kann durch die Anwendung der Wärmebilanzgleichung (1) beschrieben werden (Parsons, 2014).

$$M-W-K-C-R-E=0 \quad [-] \quad (1)$$

Mit:

- M Stoffwechselrate
- W mechanische Arbeit
- K Wärmeübertragung durch Konvektion
- C Wärmeübertragung durch Leitung
- R Wärmeübertragung durch Strahlung
- E Wärmeübertragung durch Verdunstung

Es ist jedoch zu beachten, dass die Anwendung der Gleichung (1) im Allgemeinen unter stationären Bedingungen erfolgt und sie daher in der Sportpraxis mit Vorsicht verwendet werden sollte (Fantozzi & Lamberti, 2019). Der Körper kann durch Leitung, Konvektion, Strahlung und Verdunstung Wärme mit der Umgebung austauschen. Wenn externe Arbeit durch Muskelaktivität geleistet wird, führt dies zu einer Erhöhung der Wärmeproduktion, die an die Umgebung abgegeben werden muss. Bei körperlicher Belastung ändert sich der prozentuale Anteil der verschiedenen Wärmeabgabemechanismen grundlegend (siehe Tabelle 3).

Tabelle 3: Geschätzter Wärmeverlust im Ruhezustand und bei sportlicher Betätigung (modifiziert nach Kenney et al., 2015).

Wärmeübertragungsmechanismen	Ruhezustand [%]	Sportliche Betätigung [%]
Leitung & Konvektion	20	15
Strahlung	60	5
Verdunstung	20	80

Im Allgemeinen wird zwischen trockenen und feuchten Wärmeübertragungsmechanismen unterschieden. Zu den trockenen Wärmeabgabemechanismen des äußeren Wärmetransports zählen die Leitung, Konvektion und Strahlung, während unter feuchter Wärmeabgabe die Verdunstung von Schweiß oder von Wasser über die Atemwege verstanden wird (Jessen, 2001). Durch die trockene Wärmeabgabe erhöht sich die Temperatur im umgebenden Raum, während die feuchte Wärmeabgabe zur Erhöhung der Luftfeuchte im umgebenden Raum führt (Dentel). Im Folgenden wird genauer auf die einzelnen Wärmeabgabemechanismen eingegangen.

Leitung

Leitung bezeichnet den Wärmeaustausch über die Haut bei direktem Kontakt mit einem anderen Material. Beim Berühren verliert der Mensch Wärme, wobei die Menge des Wärmeaustauschs stark von der Wärmeleitfähigkeit des Materials abhängt. In der Regel ist der konduktive Wärmeaustausch zwischen Körper und Umgebung auf kleine Bereiche des Körpers beschränkt. Daher werden die konduktiven Effekte normalerweise vernachlässigt oder in die konvektiven Effekte einbezogen. Dennoch muss die Leitung in der Wärmebilanz berücksichtigt werden, wenn der Körper mit großen Oberflächen in Kontakt steht. Dies ist insbesondere bei liegenden sportlichen Aktivitäten, wie Bankdrücken oder Bodenturnen, der Fall. Unter solchen Umständen hängt der Wärmeverlust oder -gewinn von verschiedenen Faktoren wie Körper- und Oberflächentemperatur, Kontaktfläche und Oberflächenleitfähigkeit ab und sollte nicht vollständig vernachlässigt werden (Hardy et al., 1938).

Konvektion

Unter Konvektion wird der Wärmeaustausch mit einem sich bewegenden Medium, in der Regel der Luft, verstanden. Die Körperoberfläche erwärmt eine Schicht ruhender Luft, die dann aufsteigt und durch nachströmende kalte Luft ersetzt wird. Während sportlicher Aktivität kann Konvektion durch die Bewegung des Körpers entstehen, die Luftströmungen erzeugt, oder durch die Luftbewegung selbst, zum Beispiel durch Wind. Die Luftbewegung in der Nähe der

Hautoberfläche ist für die konvektive Kühlung verantwortlich. Aus diesem Grund ist beispielsweise bei Aktivitäten, die eine hohe Bewegung beinhalten (wie Ausdauer- und Schnelligkeitstraining), der konvektive Wärmeaustausch in der Regel höher als bei statischeren Aktivitäten wie Kraftübungen (Hald, 2021).

Strahlung

Im Gegensatz zur Leitung und Konvektion erfordert die Wärmestrahlung keinen direkten Kontakt bzw. kein Übertragungsmedium. Körper stehen kontinuierlich in einem Strahlungsaustausch. Das Ausmaß dieses Energieaustauschs hängt hauptsächlich von deren Temperaturdifferenz ab (Hald, 2021).

Verdunstung

Der Wärmeverlust durch Verdunstung, der durch passive Diffusion oder Schwitzen über die Haut und durch Atmung über das Atmungssystem erfolgt, ist ein wichtiger thermodynamischer Prozess, den der Organismus im Rahmen der Thermoregulation nutzt, um überschüssige Wärme an die Umwelt abzugeben. Dieser Prozess wird von Faktoren wie der relativen Luftfeuchtigkeit der Umgebung, der Luft- und Hauttemperatur, der Luftgeschwindigkeit und der Kleidung beeinflusst. Bei sportlicher Aktivität basiert die Thermoregulation hauptsächlich auf dem Wärmeverlust durch Verdunstung von Schweiß und kann bis zu 80 % des Gesamtwärmeverlustes ausmachen, wodurch sie zum grundlegenden Mechanismus des Wärmeübertrags wird (Hald, 2021).

1.1.4 Thermoregulation bei sportlicher Aktivität

Der menschliche Körper kann als ein Zwei-Schalen-System, bestehend aus einem Kern und einer Hülle, verstanden werden. Die Körperkerntemperatur bezieht sich auf die Temperatur der lebenswichtigen inneren Organe und wird durch thermoregulatorische Mechanismen stabil gehalten. Die Temperatur außerhalb des Körperkerns, also in der Körperschale, kann niedriger sein und wird in der Regel durch die mittlere Hauttemperatur definiert, die von den Umge-

bungsbedingungen abhängt. Es ist wichtig zu beachten, dass die Begriffe „Kern-“ und „Schalentemperatur“ lediglich vereinfachte Konzepte sind (Gleeson, 1998; Hald, 2021).

Bei körperlicher Aktivität kann die Kerntemperatur aufgrund der muskulären Beanspruchung, die eine beträchtliche Wärmeentwicklung verursacht, auf bis zu 40 °C ansteigen. Temperaturen über 40 °C können die Leistung beeinträchtigen und gesundheitliche Probleme verursachen (Gleeson, 1998). Im Gegensatz dazu verhält sich die Hauttemperatur normalerweise umgekehrt proportional zur Belastungsintensität (Nielsen, 1938). Neben dem Anstieg der Körperkerntemperatur führen die Anpassungseffekte auch zu einem leichten Anstieg der Herzfrequenz und des Beanspruchungsempfindens.

Die Thermoregulation des Körpers erfolgt durch verhaltensbezogene und physiologische Mechanismen. Verhaltensbezogene Maßnahmen umfassen das Tragen geeigneter Kleidung und die Anpassung der Raumbedingungen, während physiologische Mechanismen Prozesse wie die Regulierung des Blutflusses in der Haut, Schwitzen und Zittern umfassen. Die verhaltensbezogene Thermoregulation setzt schneller ein als die physiologische Thermoregulation.

1.1.5 Einflussfaktoren auf die thermische Behaglichkeit

Die Wärmebilanz und Thermoregulation, und damit die thermische Behaglichkeit des Menschen, wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst, welche in Tabelle 4 aufgelistet sind und im Folgenden näher betrachtet werden.

Tabelle 4: Einflussfaktoren auf die thermische Behaglichkeit.

Umgebungsparameter	Lufttemperatur	°C
	Mittlere Strahlungstemperatur	°C
	Relative Luftfeuchtigkeit	%
	Luftgeschwindigkeit	m/s
Individuelle Faktoren	Körperliche Aktivität	met oder W/m ²
	Isolierung der Bekleidung	Clo oder m ² K/W

Lufttemperatur und mittlere Strahlungstemperatur – Operativtemperatur

Die Lufttemperatur beeinflusst hauptsächlich die Wärmeübertragung durch Leitung und Konvektion. Die mittlere Strahlungstemperatur bezieht sich auf die durchschnittliche Temperatur der umgebenden Oberflächen, mit denen der menschliche Körper in Strahlungsaustausch steht. Ist die mittlere Strahlungstemperatur niedriger als die Körpertemperatur, so gibt der Mensch Wärme an die Objekte ab. Ist sie höher als die Körpertemperatur, nimmt der Mensch Wärmeenergie auf. Aufgrund der Tatsache, dass der Mensch nur schwer unterscheiden kann, ob sein Temperaturempfinden von der vorhandenen Lufttemperatur oder der Strahlungstemperatur hervorgerufen wird, wurde die operative Temperatur eingeführt. In Innenräumen wird sie als arithmetisches Mittel der Luft- und mittleren Strahlungstemperatur definiert, siehe Gleichung (2).

$$t_o = 0,5 \times (t_a + t_r) \quad [^\circ\text{C}] \quad (2)$$

- › t_o Operativtemperatur [°C]
- › t_a Lufttemperatur [°C]
- › t_r mittlere Strahlungstemperatur [°C]

Luftfeuchtigkeit

Es gibt zwei Möglichkeiten, den Feuchtigkeitsgehalt der Luft zu beschreiben: die relative Luftfeuchtigkeit und die absolute Luftfeuchtigkeit. Die absolute Luftfeuchtigkeit gibt die Gesamtmenge an Wasserdampf in einer bestimmten Luftmenge an. Im Gegensatz dazu drückt die relative Luftfeuchtigkeit das Verhältnis zwischen der vorhandenen Menge an Wasserdampf und dem

maximal möglichen Gehalt bei einer bestimmten Lufttemperatur und einem bestimmten Luftdruck aus und wird in Prozent angegeben.

Die relative Luftfeuchtigkeit hat Auswirkungen auf die Wärmeübertragung an der Hautoberfläche des Menschen. Da der Mensch keine spezifischen Rezeptoren für die Beurteilung der Feuchtigkeit besitzt, kann er sie nur schwer einschätzen. Eine hohe relative Feuchtigkeit kann die Verdunstung über die Haut beeinträchtigen und die Wärmeabgabe stören. Zudem kann eine hohe relative Feuchtigkeit zu vermehrtem Schwitzen führen und wird als „schwül“ empfunden (Cui et al., 2017). Es gelten Obergrenzen von 65 % für die relative Luftfeuchtigkeit und 11,5 g/kg für die absolute Luftfeuchtigkeit in Aufenthaltszonen. Bei einer relativen Luftfeuchtigkeit unter 30 % können gesundheitliche Beeinträchtigungen auftreten (DIN EN 15251:2012-12).

Luftgeschwindigkeit

Die Luftgeschwindigkeit hat einen maßgebenden Einfluss auf die konvektive Wärmeübertragung. Je höher die Luftgeschwindigkeit, desto größer ist die Wärmeabgabe des menschlichen Körpers.

Körperliche Aktivität

Die körpereigene Energieerzeugung, die chemische Energie in mechanische und thermische Energie umwandelt, ist ein Indikator für den Energieaufwand der Muskelarbeit und ermöglicht eine quantitative Abschätzung sportlicher Aktivitäten (DIN EN ISO 8996:2020-11). Der Energieumsatz, auch als Stoffwechselrate bezeichnet, spielt eine wichtige Rolle bei der Beurteilung des Wohlbefindens. Er wird üblicherweise in met (metabolic equivalent of task) gemessen, wobei 1 met dem Energieumsatz im Ruhezustand entspricht. Jede Form körperlicher Aktivität erfordert eine spezifische Energiemenge für ihre Ausführung. Mit zunehmendem Aktivitätsniveau steigt die Wärmeproduktion (Hald, 2021).

Die Körperoberfläche fließt dabei in die Berechnung mit ein, da diese direkt mit dem Wärmeaustausch zwischen dem Körper und der Umgebung zusammenhängt. Ein met entspricht 105 W. Die durchschnittliche Oberfläche des menschlichen Körpers beträgt 1,77 Quadratmeter. Somit ent-

spricht 1 met etwa einer Wärmestromdichte von 58 W/m² des menschlichen Körpers (Hald, 2021).

$$1 \text{ met} = 58 \text{ W/m}^2$$

Die ISO 8996 (DIN EN ISO 8996:2020-11) enthält Angaben zu Stoffwechselraten für verschiedene Aktivitäten und deren Berechnungsmethoden. Das Kompendium für körperliche Aktivitäten (Ainsworth et al., 2011) gibt den Grundumsatz für verschiedene Sportarten an. Es ist jedoch zu beachten, dass diese Werte in den meisten Tabellen auf Durchschnittswerten basieren und gegebenenfalls für spezifische Zielgruppen oder Personen angepasst werden müssen. Anhand des met-Werts werden Aktivitäten in leichte (< 4 met), mittlere (4 bis 6 met), schwere (6 bis 8 met), sehr schwere (8 bis 10 met) und übermäßig schwere (> 10 met) Aktivitäten klassifiziert (McArdle et al., 2010). In Tabelle 5 sind typische Stoffwechselraten für verschiedene Aktivitäten angegeben.

Tabelle 5: Typische Stoffwechselraten für verschiedene (sportliche) Aktivitäten (modifiziert nach Ainsworth et al., 2011).

Aktivität	Stoffwechselrate [met]
Ruhezustand	
Sitzen, ruhig	1,0
Stehen, entspannt	1,2
Sportarten	
Badminton	5,5
Basketball	8,0
Boxen	12,8
Tanzen	7,8
Fechten	6,0
Fußball	8,0
Handball	8,0
Gymnastik	3,8
Schwimmen	4,8 bis 13,8
Tennis	7,3
Volleyball	6,0
Krafttraining	8,0
Yoga	4,0
Aerobic	5,0 bis 6,0
Judo, Kickboxen, Karate	10,0

Isolierung der Bekleidung

Die Bekleidung stellt eine zusätzliche Schutzschicht auf der Haut her, die die Wärmeübertragung durch Leitung und Konvektion reduzieren bzw. die Schweißverdunstung verhindern kann. Je nach getragener Bekleidung kann diese als Maß für den Wärmedurchgangswiderstand oder den Verdunstungswiderstand angegeben werden. Die Einheit des Bekleidungsgrades heißt „clo“. Es gilt:

$$1 \text{ clo} = 0,155 \text{ m}^2\text{K/W}$$

In Tabelle 6 sind einige Isolationswerte typischer Kleidungsstücke aufgelistet.

Tabelle 6: Isolationswerte zahlreicher typischer Kleidungsstücke (DIN EN ISO 9920:2009-10).

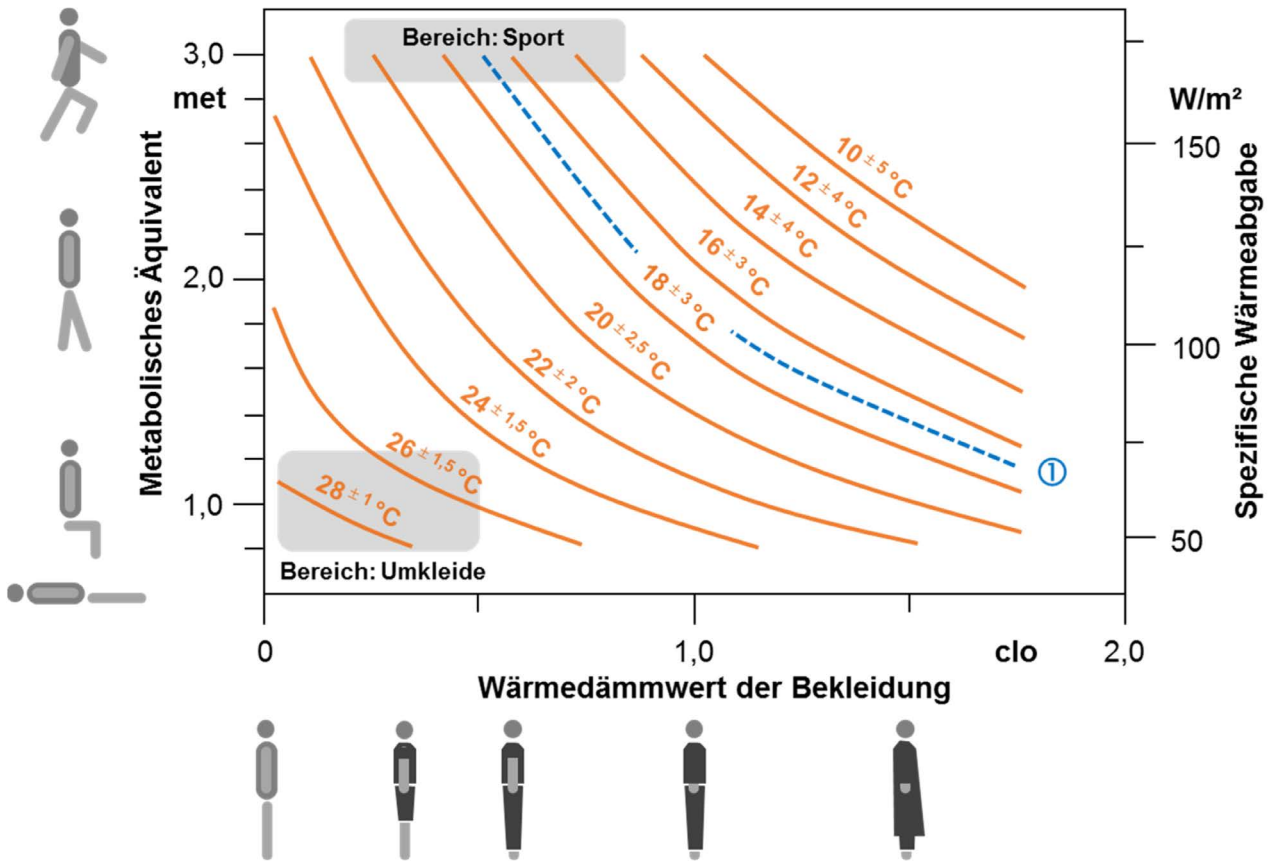
Kleidungsstück	Bekleidungsgrad [clo]
Unterwäsche	
Slip	0,03
Damenunterhemd	0,04
Unterhemd T-Shirt-Form	0,09
Unterhemd mit langem Arm	0,12
Slip und BH	0,03
Hemden, Blusen	
kurzer Arm	0,15
leichter Stoff, langer Arm	0,2
üblicher Stoff, langer Arm	0,25
Hosen	
Shorts	0,06
leichter Stoff	0,2
Normalstoff	0,25
Pullover	
Weste, ärmellos	0,12
Pullover	0,28
Pullover, dick	0,35

Kleidungsstück	Bekleidungsgrad [clo]
Jacken	
leichte Sommerjacke	0,25
Jacke	0,35
Kittel	0,3
Verschiedenes	
Socken	0,02
Stiefel	0,1
Schuhe, dünne Sohle	0,02
Schuhe, dicke Sohle	0,04

1.1.6 Vorhersagemodell zur Beurteilung der thermischen Behaglichkeit

Die DIN EN ISO 7730 (DIN EN ISO 7730:2023-04) bietet unter anderem eine klare Interpretationshilfe und ermöglicht eine raumnutzungsorientierte Betrachtung der thermischen Behaglichkeit. In Abb. 1 wird die operative Raumtemperatur als Funktion der Bekleidung (clo) und der Aktivität (met) dargestellt, welche den Anspruch erfüllen soll, dass mehr als 90 % der Personen mit dieser Raumbedingung zufrieden sind. Zu Vergleichszwecken wurde auch die „17 °C-Kurve“ aus der DIN 18032-1 (DIN 18032-1:2014-11) hinzugefügt, und der Bereich, der mit sportlicher Aktivität (metabolisches Äquivalent) und Bekleidung (Wärmedämmwert) verbunden ist, wird beispielhaft dargestellt. Diese Methodik basiert auf wissenschaftlichen Arbeiten (Fiala et al., 1999) zu Komfortmodellen, die als weitgehend auf Räume mit Sportnutzung übertragbar betrachtet werden können, wobei die metabolischen Raten bei sportlicher Aktivität deutlich höhere Werte als 3 met betragen können, siehe Tabelle 5.

Abb. 1: Optimale operative Temperatur im Raum als Funktion der Bekleidung (clo) und der Aktivität (met) in Anlehnung an DIN EN ISO 7730 (DIN EN ISO 7730:2023-04) für den Anspruch, weniger als 10 % Unzufriedene zu erreichen. Im Vergleich dazu ist (in blauer Farbe ①) die nach DIN 18032-1 (DIN 18032-1:2014-11) für Sporthallen empfohlene (feste) Nutzungstemperatur von 17 °C dargestellt.



Die Evaluierung des thermischen Komforts in Sportstätten basiert größtenteils auf der Berechnung der Fanger'schen Indizes, dem „predicted mean vote“ (PMV) und dem „predicted percentage of dissatisfied“ (PPD), welche ebenfalls in der DIN EN ISO 7730 (DIN EN ISO 7730:2023-04) integriert sind. Der PMV ist eine mathematische Funktion, die einen numerischen Wert im Bereich von -3 (zu kalt) bis +3 (zu heiß) liefert, wobei 0 den optimalen thermischen Komfort repräsentiert, siehe Tabelle 7. Er gibt die durchschnittliche Bewertung eines gemäßigten Raumklimas durch eine große Anzahl von Personen wieder. Um den vorhergesagten mittleren Wert zu berechnen, werden die Messungen der sechs thermischen Einflussgrößen benötigt, die die Raumluft und die menschliche Wahrnehmung betreffen, die Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftgeschwindigkeit, mittlere Strahlungstemperatur, Kleidungsisolierung und menschliche Aktivität.

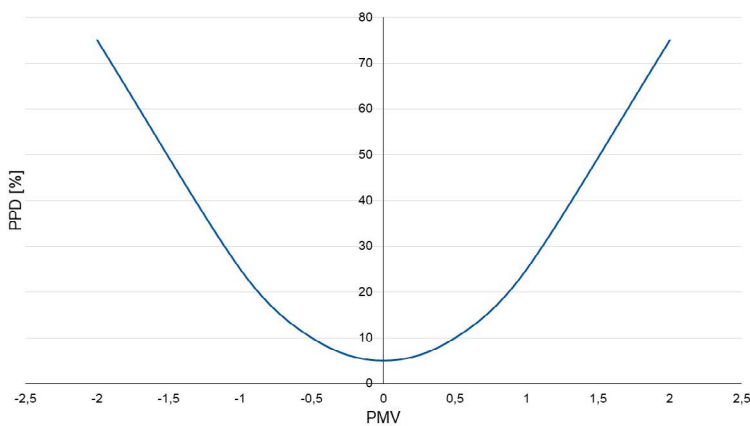
tiert, siehe Tabelle 7. Er gibt die durchschnittliche Bewertung eines gemäßigten Raumklimas durch eine große Anzahl von Personen wieder. Um den vorhergesagten mittleren Wert zu berechnen, werden die Messungen der sechs thermischen Einflussgrößen benötigt, die die Raumluft und die menschliche Wahrnehmung betreffen, die Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftgeschwindigkeit, mittlere Strahlungstemperatur, Kleidungsisolierung und menschliche Aktivität.

Tabelle 7: 7-stufige Bewertungsskala (links) und Einflussparameter mit ihrem Anwendungsbereich für den PMV (rechts), nach DIN EN ISO 7730:2023-04.

		Einflussparameter Anwendungsbereich des PMV	
+3	heiß	Lufttemperatur	10 bis 30 °C
+2	warm	Mittlere Strahlungstemperatur	10 bis 40 °C
+1	etwas warm	Luftfeuchtigkeit	
0	neutral	Luftgeschwindigkeit	0 bis 1 m/s
-1	etwas kühl	Bekleidungsisolierung	0 bis 2 clo
-2	kühl	Metabolische Rate	0,8 bis 4 met
-3	kalt		

Über den PMV kann der vorausgesagte Prozentsatz Unzufriedener (PPD) bestimmt werden. Der PPD bezieht sich auf den Anteil der Personen innerhalb einer großen Personengruppe, die mit dem vorherrschenden Umgebungsklima unzufrieden sind. Die restlichen Personen in der Gruppe empfinden das Umgebungsklima hinsichtlich der Temperatur entweder als neutral, etwas warm oder etwas kühl (DIN EN ISO 7730:2023-04). Deren Beziehung zueinander ist in Abb. 2 dargestellt.

Abb. 2: PPD als Funktion des PMV nach DIN EN ISO 7730:2023-04.



Die Verbreitung des PMV-Index hat zu Untersuchungen seiner Anwendbarkeit, insbesondere in realen Umgebungen, geführt. Obwohl internationale Richtlinien seine Verwendung in verschiedenen Arten von Umgebungen unterstützen, deuten Forschungsergebnisse darauf hin, dass der PMV-Index in vielen Anwendungsbereichen ein unzureichender Indikator für das tatsächliche Wärmeempfinden ist (Cheung, 2010; Cheung et al., 2019; Dear & Brager, 1998; Humphreys & Nicol, 2002; van Hoof, 2008). Verschiedene Faktoren beeinflussen die Aussagekraft des Index, darunter der Gebäudetyp (Humphreys & Nicol, 2002; Ramos et al., 2014; Yau & Chew, 2014), das lokale Klima (Yau & Chew, 2014), kulturelle und regionale Unterschiede (Maiti, 2014), Alter (Mors et al., 2011), Geschlecht (Schaudienst & Vogdt, 2017) und Aktivität (Broday et al., 2019). Der PMV-Index wurde entwickelt, um den thermischen Komfort basierend auf der Annahme einer geringen bis mäßigen körperlichen Aktivität (Aktivitätsgrad 0,8 bis 4,0 met) zu bewerten. Jedoch weisen viele sportliche Aktivitäten eine höhere Stoffwechselrate auf, als vom PMV-Index vorgesehen, wie in Tabelle 5 ersichtlich ist.

1.1.7 Auswirkungen der thermischen Umgebung auf die Leistungsfähigkeit

Lufttemperatur und Feuchte

Die vorliegenden Studien, die sich mit den Auswirkungen von Temperatur und Luftfeuchtigkeit auf die Leistungsfähigkeit von Sporttreibenden befassen, konzentrieren sich hauptsächlich auf heiße und feuchte Umgebungen (Smolander et al., 1986). Hohe Umgebungstemperaturen in Kombination mit erhöhter relativer Luftfeuchtigkeit stellen eine erhebliche Belastung für Sporttreibende dar (Zhao et al., 2013). Unter solchen Bedingungen ist die Fähigkeit des Körpers, Wärme durch Schwitzen abzuführen, beeinträchtigt, da der Schweiß nicht verdunsten kann. Darüber hinaus kommt es aufgrund des erhöhten Energieaufwands in heißer Umgebung zu einer höheren Körperkerntemperatur, Herzfrequenz und Atemfrequenz (Bregelmann, 1983). Dieser Effekt könnte die verringerte sportliche Leistung erklären, die hauptsächlich auf den übermäßigen Flüssigkeitsverlust und die beeinträchtigte Thermoregulation zurückzuführen ist (Laurson, 2012). Um eine potentielle Überhitzung zu vermeiden, reduzieren Sporttreibende ihre Aktivität, was zu einer Leistungsminderung von 2 bis 3 % führen kann (Dugas, 2010).

Ähnlich wie sich eine heiße Umgebung negativ auf die sportliche Leistung auswirken kann, hat sich gezeigt, dass auch Sport in einer kalten Umgebung die Leistung beeinträchtigen kann. Ein wesentliches Problem beim Sport in der Kälte ist die Auswirkung der kalten Luft auf das Atemwegssystem. Durch die Verengung der Atemwege aufgrund der trockenen und kalten Atemluft kann es zu einem trainingsinduzierten Bronchospasmus kommen, der zu einer erhöhten Ventilationsrate führt. Dies wiederum führt zu größerer Anstrengung und einem Leistungsabfall (Baker et al.). Da sich dieses Projekt ausschließlich auf Innenräume konzentriert, in denen Temperaturen nur selten in den Kältebereich fallen, werden die Auswirkungen kalter und trockener Umgebungsbedingungen nicht näher betrachtet (Hald, 2021).

Luftgeschwindigkeit

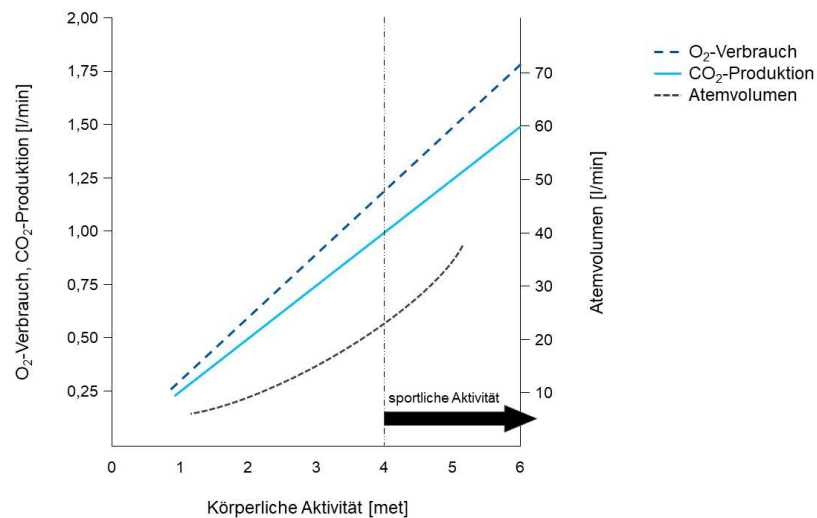
Es gibt nur sehr wenige Studien, die sich mit der Luftgeschwindigkeit und thermischen Behaglichkeit während sportlicher Aktivitäten befassen. Zwei Studien (Toftum & Nielsen, 1996; Griefahn et al., 2001) haben den Effekt von Luftbewegung und Zugluftrisiko bei höheren Stoffwechselraten untersucht und kamen zu dem Ergebnis, dass Luftbewegungen bei höheren Aktivitätsniveaus als angenehmer empfunden werden als bei niedrigeren. Zhai et al. (Zhai et al., 2015) bestätigten die Hypothese, dass Luftbewegung zusammen mit höheren Temperaturen bis zu 26 °C zu gleichem oder besserem Komfort und zu einer als besser wahrgenommenen Luftqualität im Vergleich zu 20 °C mit ruhender Luft führt. Der positive Effekt der Luftbewegung auf den Komfort während des Trainings ist auf den erhöhten konvektiven und verdunstenden Wärmeverlust zurückzuführen, der bei erhöhten Luftgeschwindigkeiten auftreten kann und den durch das Training verursachten Wärmegewinn ausgleicht (Hald, 2021). Es ist jedoch zu beachten, dass nicht bei allen Sportarten oder Belastungsformen höhere Luftgeschwindigkeiten zur Kompensation von warmen Umgebungen eingesetzt werden können. So können bei Sportarten wie z.B. Tischtennis oder auch Gymnastik höhere Luftgeschwindigkeiten als störend oder sogar als hindernd empfunden werden (Hald, 2021).

1.1.8 CO₂-Gehalt als Indikator für die Luftqualität

Durch Atmung und Ausdünstung sowie Verbrennungsprozesse gelangt Kohlenstoffdioxid in die Luft. In Innenräumen ist in der Regel eine höhere Konzentration von Kohlenstoffdioxid im Vergleich zur Außenluft zu beobachten, da CO₂ als Nebenprodukt der menschlichen Atmung freigesetzt wird. Die CO₂-Konzentration in Innenräumen wird durch verschiedene Faktoren beeinflusst, darunter die Anzahl und Aufenthaltsdauer der Personen, ihre Aktivitätsniveaus, die Lüftungsrate und das Raumvolumen (Gottfried et al., 2005). Je nach physischem Zustand und Aktivitätsniveau eines Menschen variiert die Menge an Kohlenstoffdioxid, die er ausatmet, siehe Abb. 3. Eine erhöhte CO₂-Konzentration kann sich negativ auf das Wohl-

finden und die Leistungsfähigkeit auswirken und zu Konzentrationsschwierigkeiten, Müdigkeit und Kopfschmerzen führen (Salonen et al., 2020). Das Problem hoher CO₂-Werte in Innenräumen ist insbesondere aus Schulklassenräumen bekannt, wo die entsprechenden Richtlinien häufig innerhalb kurzer Zeit überschritten werden (Fromme et al., 2019; Salthammer et al., 2016).

Abb. 3: Zusammenhang zwischen O₂-Verbrauch, CO₂-Produktion und körperlichem Aktivitätsniveau des Menschen nach Cory, 2005.



In einer Sportstätte, in der sich viele Sporttreibende versammeln, tritt oft eine ähnliche Situation auf. CO₂-Konzentrationen über 1000 ppm werden in der Regel als Indikator für eine unzureichende Belüftung angesehen und gehen mit einer erhöhten Wahrnehmbarkeit von Körpergerüchen einher. In einer Umgebung, die von sportlichen Aktivitäten und körperlicher Bewegung geprägt ist, spielt dies eine wichtige Rolle, da große Mengen an Schweiß produziert werden können.

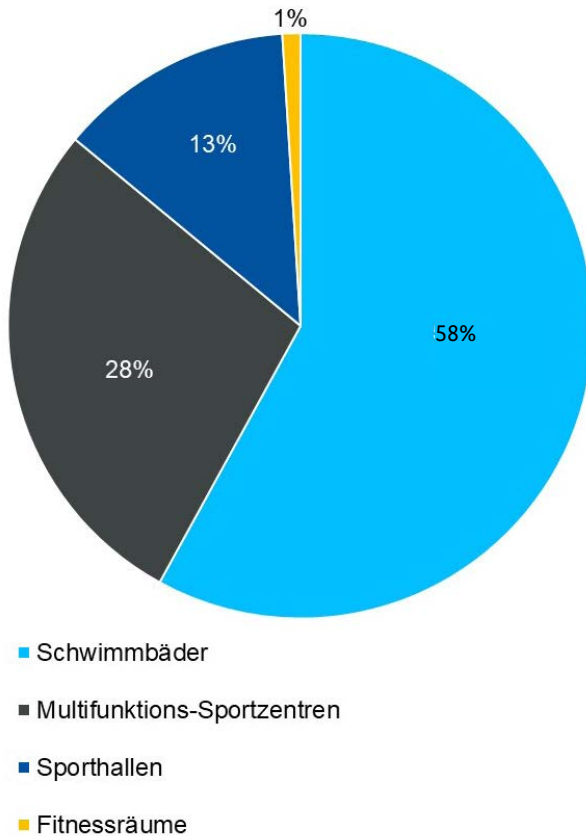
1.2 Energieeffizienz

Der Energiebedarf einer Sportstätte ist von ihrem Energieverbrauch zu unterscheiden. Der Energiebedarfswert basiert auf vorgegebenen Standardwerten in Normen und wird berechnet. Der Energieverbrauchskennwert hingegen beschreibt den tatsächlichen Energieverbrauch der Sportstätte. Sportstätten können hierbei nicht direkt mit dem typischen Verbrauch anderer Gebäudetypen wie Wohnhäusern oder

Büros verglichen werden, da dieser stark von der spezifischen Sportaktivität abhängt und je nach Standort, Art und Nutzung erheblich schwankt (Artuso & Santiangeli, 2007). Zum Beispiel verbrauchen Sportstätten in der kontinentaleuropäischen Zone aufgrund der vorherrschenden Witterungsbedingungen doppelt so viel Energie

der gesamten Betriebskosten einer Sporthalle ausmachen (Illeperuma, 2014). Zur Deckung des Energiebedarfs werden thermische Energie (für Raumheizung und Warmwasser) sowie elektrische Energie (für Heizung, Kühlung, Lüftung und Beleuchtung) eingesetzt (Trianti-Stourna, 1997).

Abb. 4: Verteilung des jährlichen Energieverbrauchs nach Typ des Sportgebäudes nach Gunnarsson & Thapper, 2015.



Gemäß den Ergebnissen des europäischen Projekts Step2Sport (Gunnarsson & Thapper, 2015; Torrentellé & Escamilla, 2015), in dem 26 Sportgebäude (einschließlich Sporthallen, Fitnessräume, Schwimmhallen und Multifunktions-Sportzentren) aus sieben EU-Ländern einem Energie-Audit unterzogen wurden, stellen sich Schwimmhallen als die energieintensivsten Sportstätten heraus (siehe Abb. 4). Der Gesamtjahresendenergieverbrauch der 26 Sportgebäude beträgt 24.993 MWh. Die gleiche Untersuchung ergab, dass Sporthallen jährlich für 13 % (3.249 MWh) des Gesamtenergieverbrauchs der Sportstätten verantwortlich sind.

wie Anlagen in der Mittelmeerzone. Die Energiekosten stehen in der Regel an zweiter Stelle nach den Personalkosten und können bis zu 30 %

Tabelle 8 zeigt die dabei ermittelten Bandbreiten der Anteile verschiedener Energieverbraucher. In Sporthallen und Fitnessräumen besteht der Hauptanteil des Energieverbrauchs aus den Bereichen Raumheizung, Lüftung und Klimatisierung (HLK). Die Prozentsätze variieren zwischen und innerhalb der Sportstätten teilweise stark. Dies ist auf verschiedene Faktoren, wie z. B. die Gesamtfläche, das Baujahr, die lokalen Wetterbedingungen, die Gebäudeeigenschaften, die Energieeffizienz der Geräte, die Wartungsarbeiten, die Belegung und die Betriebsstunden usw., zurückzuführen.

Tabelle 8: Bandbreiten der Anteile verschiedener Energieverbraucher am Gesamtenergieverbrauch, klassifiziert nach Arten von Sportstätten (modifiziert nach Gunnarsson & Thapper, 2015).

Sportstätte	Prozentualer Anteil am Gesamtenergieverbrauch [%]					
	HLK	Pumpensysteme	Licht	sonstige elektrische Anlagen	Warmwasseraufbereitung	Poolbeheizung
Sporthallen	51 - 92 %	0 - 4 %	6 - 25 %	0 - 10 %	1 - 25 %	0 %
Fitnessräume	53 - 71 %	0 - 1 %	6 - 20 %	1 - 8 %	5 - 38 %	0 %
Schwimmhäder	36 - 60 %	2 - 27 %	3 - 13 %	3 - 10 %	7 - 40 %	25 - 50 %
Multifunktions-Sportzentren	13 - 52 %	6 - 15 %	3 - 11 %	1 - 8 %	9 - 30 %	9 - 48 %

2 Aufgabenstellung

2 Aufgabenstellung

Das Ziel des Projektes richtet sich auf die Schaffung von Gestaltungs- und Lösungswissen für eine integrale und nachhaltige Behandlung von Sporthallen. Die Zielkriterien umfassen erstens die bauphysikalischen Raumbedingungen im Sinne gesunder, attraktiver Voraussetzungen für die sportliche Betätigung vieler Menschen. Zweitens geht es um die möglichst energie- und ressourceneffiziente Realisierung dieser Raumbedingungen. Damit versprechen die Projektergebnisse auch ein lukratives Einspar- und Optimierungspotential für die Träger und Betreiber sowie einen signifikanten Beitrag zur Energie- und schließlich zum Klimaschutz.

Ausgehend vom Stand des Wissens werden die nutzungsspezifischen baulichen und technischen Ansprüche und Merkmale der Sporträume repräsentativ erfasst, ausgewertet und in

verallgemeinerbare Zusammenhänge überführt. Dazu dienen sowohl methodische Instrumente, wie die Messung der physikalischen Raumklimaparameter mit kombinierter Befragung der Sporttreibenden nach ihren Präferenzen und Zufriedenheiten, als auch fundierte bauphysikalische Raum- und Wirkungsmodelle. Zudem werden Energieeinsparpotentiale für Sporthallen unterschiedlichen Baujahrs über die Simulation von Energiebedarfen quantifiziert und in Gestaltungshinweise für den Bau und Betrieb überführt.

Mit dem Projekt werden also die wissenschaftlichen Grundlagen (Wissen, Konzepte, Kriterien) geschaffen, um in der Folge anhand konkreter Parameter und Handlungsleitlinien eine praxisorientierte Raumgestaltung realisieren zu können.

3 Basisanalysen

3 Basisanalysen

3.1 Nutzungsdifferenzierung

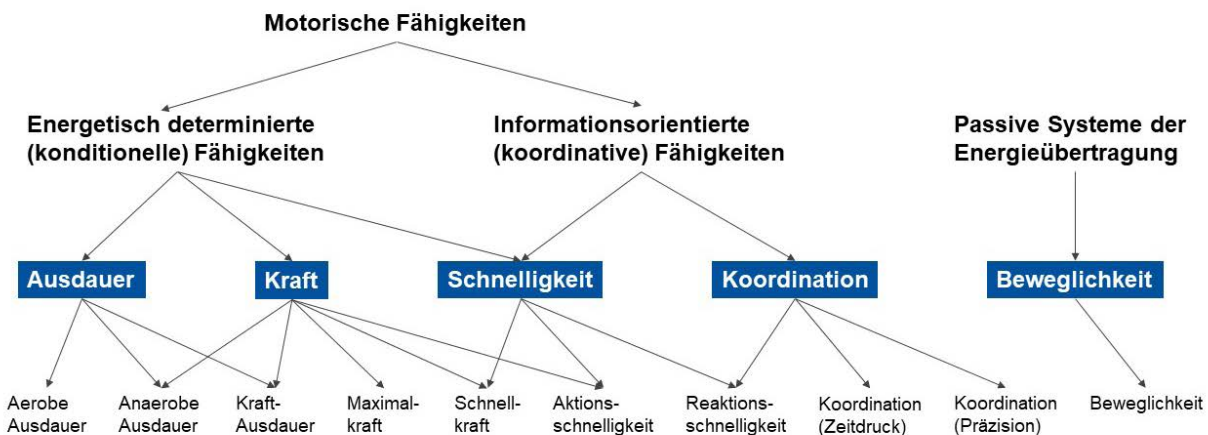
3.1.1 Die motorischen Fähigkeiten

Zur wissenschaftlichen Beschreibung der körperlichen Fitness wird üblicherweise auf eine Systematisierung der motorischen Fähigkeiten zurückgegriffen. Die Sportwissenschaft bietet verschiedene Ansätze zur Differenzierung motorischer Fähigkeiten, von denen fünf motorische Basisfähigkeiten, nämlich Ausdauer, Kraft, Schnelligkeit, Koordination und Beweglichkeit, als die zentralen kategorisiert werden. Es gestaltet sich jedoch als schwierig, diese Basisfähigkeiten eindeutig den konditionell determinierten Systemen der Energiebereitstellung und -übertragung sowie den koordinativen Systemen der Informationssteuerung und -regelung zuzuordnen (Hald, 2021).

die Beweglichkeit als passives System der Energieübertragung weder den koordinativen noch den konditionellen Fähigkeiten zugeordnet. Eine detailliertere dritte Ebene erlaubt die Unterscheidung von zehn Fähigkeitskomponenten auf Basis von Belastungsnormativen wie Dauer, Umfang und Intensität (Hald, 2021).

Die Berücksichtigung der Belastungsnormativen (Tabelle 9) im Sport ermöglicht eine präzise Bewertung der verschiedenen Belastungsformen und ihrer Auswirkungen auf die körperliche Leistungsfähigkeit. Diese Normativen erlauben es Athleten, ihre Trainingseinheiten bezüglich des körperlichen Leistungsstands, der Methodik und der Trainingsziele gezielt zu planen und zu steuern. Für eine erfolgreiche sportliche Leistung ist es daher von wesentlicher Bedeutung, die Normativen zu beherrschen und je

Abb. 5: Differenzierung motorischer Fähigkeiten nach Bös (Bös & Mechling, 1983).



In diesem Zusammenhang unterscheidet Bös (Bös & Mechling, 1983), dargestellt in Abb. 5, die motorischen Fähigkeiten auf drei Ebenen, wobei auf der ersten Ebene die motorischen Fähigkeiten in energetisch determinierte (konditionelle) und informationsorientierte (koordinative) Fähigkeiten unterteilt werden. Auf der zweiten Ebene werden die zentralen Fähigkeitskategorien Ausdauer, Kraft, Koordination, Schnelligkeit und Beweglichkeit differenziert. Hierbei wird

nach Zielsetzung zu variieren. Dies ermöglicht es, Intensität, Dauer, Umfang und Dichte des Trainings zu bestimmen und damit gezielt die gewünschten Anpassungen im Körper zu erreichen. Es ist jedoch zu beachten, dass Änderungen in einer der genannten Komponenten automatisch die gesamte Belastungsstruktur beeinflussen und sowohl Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit als auch auf das Wohlbefinden der Sporttreibenden haben können (Hald, 2021).

Tabelle 9: Belastungsnormative der fünf motorischen Fähigkeiten (Ausdauer, Kraft, Schnelligkeit, Koordination und Beweglichkeit) (Hald, 2021).

	Ausdauer	Kraft	Schnelligkeit	Koordination	Beweglichkeit
Belastungs-Intensität wird bestimmt durch	-Bewegungsgeschwindigkeit-Tempo (m/s; km/h) -Prozent einer Leistung (Zeit) auf einer Strecke -Leistung einer Übung (Watt)	-Last (kg) in einer bestimmten Übung – Prozent der Maximalkraft -Größe des Impulses (N/s) in einer Übung -Höhe des Impulses bei einer Bewegung (mittel bis maximal)	Bewegungsgeschwindigkeit und gleichbleibende Impulshöhe	Grad des instabilen Untergrundes z.B. bei Gleichgewichtsübungen	Winkelgrad (°) bis zur Dehnbelastungsfähigkeit
wird beschrieben mithilfe von	-Herzfrequenz -Laktatwert -Prozent der max. O2-Aufnahme -Atemfrequenz -Atem-Schritt-Rhythmus -Subjektives Anstrengungsgefühl	subjektives Anstrengungsgefühl (leicht... schwer)	subjektives Anstrengungsgefühl (leicht... schwer)	subjektiver Schwierigkeitsgrad (leicht/mittel/stark) der Übung	subjektives Spannungsgefühl (leicht/mittel/stark) des zu dehnenden Muskels
Belastungs-Dauer wird bestimmt durch	-Strecke (m/km) -Zeit (Sek./Min./Std.) der Belastung	-Anzahl der Wiederholungen -Zeit für eine Übung (Sek./Min.); vor allem bei statischen Übungen	Zeit (Sek./Min./Std.) – Anzahl der Wiederholungen	-Zeit (Sek./Min./Std.) der statischen Übung -Wiederholungen bei dynamischer Übung	-Zeit in (Sek./Min./Std.) der statischen Dehnung -Wiederholungen bei dynamischer Dehnung
Belastungs-Dichte wird bestimmt durch	Pausenzeit (Sek./Min.) zwischen den Teilstrecken	Pausenzeit (Sek./Min.) zwischen den Serien	Pausenzeit (Sek./Min.) zwischen den Serien	Pausenzeit (Sek./Min.) zwischen den Serien	Pausenzeit (Sek./Min.) zwischen den Serien
wird gekennzeichnet als	Verhältnis (2:1, 1:3) von Belastung zu Pause	Verhältnis (2:1, 1:3) von Belastung zu Pause	Verhältnis (2:1, 1:3) von Belastung zu Pause	Verhältnis (2:1, 1:3) von Belastung zu Pause	Verhältnis (2:1, 1:3) von Belastung zu Pause
Belastungs-Umfang wird bestimmt durch	Gesamtstrecke (km) in einer Trainingseinheit	Last (kg, Tonnen) in einer Trainingseinheit	Gesamtübungsdauer	Gesamtübungsdauer	Gesamtdehdauer
wird ermittelt durch	Summe aller Teilstrecken	Übungen, Wiederholungen (Zeit)	Summe aller Teilstrecken Übungen (Zeit)	Übungen, Wiederholungen (Zeit)	Übungen, Wiederholungen (Zeit)

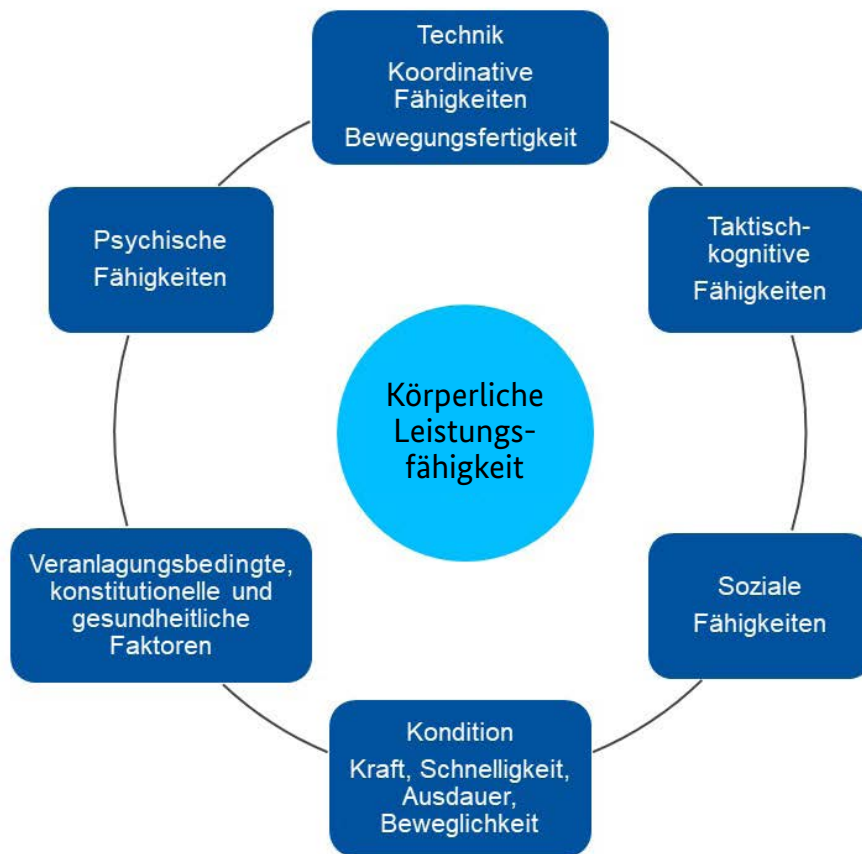
3.1.2 Leistungsdiagnostik

Eine Leistungsdiagnostik hat das Ziel, den aktuellen Leistungsstand und die Entwicklung eines Sporttreibenden zu erfassen. Die körperliche Leistungsfähigkeit lässt sich qualitativ nach den fünf motorischen Hauptbeanspruchungsformen sowie quantitativ nach den Belastungsnormativen einteilen (Hottenrott & Neumann, 2016). Zur Struktur der sportlichen Leistungsfähigkeit gibt es verschiedene Modelle (u.a. Abb. 6) in der Sportwissenschaft, die die Anforderungen in technische, soziale, taktische, psychologische und konditionelle Fähigkeiten sowie die Veranlagung der Sporttreibenden einteilen (Weineck, 2007).

Atemminuten- und Atemzugvolumen sowie die Sauerstoffaufnahme gemessen werden. Neben der Messung von Puls, Blutdruck und Laktat wird auch die Ergometrie (Belastungs-EKG) als direkte Funktionsmessung eingesetzt. Sie misst unter Belastung die geleistete Arbeit, die individuelle maximale Leistungsfähigkeit und körperliche Reaktionen anhand von Blutdruck, Puls und Herzstromkurve (Beckmann & Elbe, 2015).

Neben den objektiven physikalischen Messungen der körperlichen Leistungsfähigkeit gibt es auch ein Hilfsmittel, um das subjektive Belastungsempfinden zu bewerten. Hierbei handelt es sich um die sogenannte „Borg-Skala“ (Borg, 1982), die den RPE-Wert („Received Perception

Abb. 6: Einflussgrößen auf die sportliche Leistungsfähigkeit, vereinfachtes Modell (modifiziert nach Weineck, 2007).



Es ist nicht möglich, ein einheitliches Maß für die sportliche Leistungsfähigkeit des Menschen zu definieren, wie in Abb. 6 beschrieben. Stattdessen werden Tests durchgeführt, um das Herz-Kreislauf-System und die Atmung zu untersuchen. Dazu gehört beispielsweise die Lungenfunktionsmessung, bei der die Atemfrequenz, das

of Exertion“) angibt und somit das Belastungsempfinden des Sporttreibenden widerspiegelt. Diese Skala basiert auf der Annahme, dass das Belastungsempfinden in Zusammenhang mit der Herzfrequenz steht.

$$RPE = \text{Herzfrequenz} \times 0,1 \quad [-] \quad (1)$$

Da in der Regel die Ruheherzschlagfrequenz bei ca. 60 Schlägen pro Minute liegt, beginnt die Skala bei 6, was den 60 Schlägen pro Minute entspricht. Die maximale Herzschlagfrequenz liegt bei gesunden Menschen meist bei ca. 200 Schlägen pro Minute, daher endet die Borg-Skala bei

3.1.3 Abschließende Nutzungsdifferenzierung

Während der Untersuchungen zur Aufenthaltsqualität (Kapitel 5) hat sich ergeben, dass die Unterscheidung der Nutzung anhand der Sportart

Tabelle 10: 15-stufige Borg-Skala nach Borg et al. (Borg, 1982).

Skalenwert nach Borg	Anstrengungsgrad	% der max. Beanspruchung/Leistung
6	Überhaupt keine Anstrengung	20%
7	Extrem leicht	30%
8		40%
9	Sehr leicht	50%
10		55%
11	Leicht	60%
12	Optimaler Trainingsbereich	65%
13	Etwas schwer	70%
14		75%
15	Schwer	80%
16		85%
17	Sehr schwer	90%
18		95%
19	Extrem schwer	100%
20	Größtmögliche Anstrengung	Übersäuerung

20 (siehe Tabelle 10) (Borg, 1982). Die Sporttreibenden bewerten auf dieser Skala, wie schwer sie die Arbeit aufgrund ihrer subjektiven Atemnot empfinden. Obwohl die Skala eine gute Möglichkeit bietet, ohne Messgeräte die Leistungsfähigkeit einzuschätzen, sollte beachtet werden, dass es sich um eine subjektive Einschätzung handelt, die unter Umständen ungenau sein kann.

oder der motorischen Fähigkeit keinen geeigneten Ansatz darstellt. Stattdessen wird die Nutzung anhand des subjektiven Anstrengungsgefühls differenziert, da hierüber die Belastungsintensität adäquat beschrieben werden kann, wie in Tabelle 9 beschrieben. Daraus ergibt sich eine 5-stufige Bewertungsskala gemäß Tabelle 11, die an der Leistungsdiagnostiktabelle (Tabelle 10) ausgerichtet ist.

Tabelle 11: Nutzungsdifferenzierung: 5-stufige Bewertungsskala des subjektiven Anstrengungsgrades.

Keine Anstrengung	Leichte Anstrengung	Mittelschwere Anstrengung	Schwere Anstrengung	Extreme Anstrengung
1	2	3	4	5

3.2 Energetische Kategorisierung von Sporthallen

3.2.1 Modellgrundrisse

Der Sporthallenbestand in Deutschland gliedert sich im Wesentlichen in die normierten Hallengrößen der Einfeld-, Zweifeld- und Dreifeldhallen. Diese sind gemäß der Norm DIN 18032-1 (DIN 18032-1:2014-11) in Tabelle 12 definiert.

Tabelle 12: Geometrische Hallentypen mit ihren lichten Mindestmaßen nach DIN 18032-1 (DIN 18032-1:2014-11).

Geometrischer Hallentyp	Lichte Mindestmaße [m] Breite x Länge x Höhe
Einfeldhalle	15 x 27 x 5,5
Zweifeldhalle	22 x 45 x 7
Dreifeldhalle	27 x 45 x 7

Unter der Berücksichtigung der Normen und Planungshandbücher (Beugger et al., 2017; Senatsverwaltung für Bildung, Wissenschaft und Forschung Berlin [Hrsg.], 2011) wurden Modellgrundrisse herausgearbeitet, welche den simulativen Untersuchungen zur Energieeffizienz zugrunde liegen (Rietschel, 2021). In Tabelle 14 sind die geometrischen Kennwerte der Modellhallen, differenziert zwischen der Hallen- und Gebäudegeometrie, aufgelistet. Die Hauptfensterflächen sind gemäß den Planungshandbüchern (Beugger et al., 2017; Senatsverwaltung für Bildung, Wissenschaft und Forschung Berlin [Hrsg.], 2011) in Richtung Norden orientiert, um Blendung, ungleichmäßige Beleuchtung und Überhitzung zu vermeiden. Für die Dimensionierung der Fensterfläche in der Halle wurden ca. 30 % der Hallengrundfläche angesetzt (Senatsverwaltung für Bildung, Wissenschaft und Forschung Berlin [Hrsg.], 2011).

3.2.2 Anforderungen in Verordnungen und Gesetzen

Die vorliegende Datenlage in Deutschland hinsichtlich der Kategorisierung von Sportstätten ist begrenzt, wodurch eine umfassende und reproduzierbare Analyse von bestehenden Sporthallen den Rahmen dieses Projekts überschreitet. Daher ist es im Kontext dieses Projekts sinnvoll, sich hinsichtlich energetischer relevanter Gebäudeparameter an relevanten Verordnungen und

Gesetzen zu orientieren, um eine fundierte Analyse durchzuführen. Es werden die Anforderungen an die Wärmedurchgangskoeffizienten im Laufe der Jahre erörtert, um Rückschlüsse auf den Bestand zu ziehen (Rietschel, 2021).

Wärmeschutzverordnung 1977

- › Außenwände und Decken Gemäß Anlage 1 Nr. 2 Tabelle 2 (Abb. 3)
- › Fenster gemäß Anlage 1 Nr. 5 Tabelle 3 (Zeile 1, Spalte 2)
- › Bodenplatte gemäß Anlage 3 Nr. 3 Tabelle 2

Wärmeschutzverordnung 1982

- › Außenwände und Decken Gemäß Anlage 1 Nr. 2 Tabelle 2 (Abb. 3)
- › Bodenplatte gemäß Anlage 3 Nr. 3 Tabelle 2

Wärmeschutzverordnung 1995

- › Rückrechnung aus maximalem Jahres-Heizwärmebedarf

Energieeinsparverordnung 2007

- › Rückrechnung aus spezifischem Transmissionswärmekoeffizienten eines Referenzgebäudes gemäß Anlage 1 Nr. 1 Tabelle 1

Energieeinsparverordnung 2014

- › Gemäß Anlage 2 Tabelle 1

Gebäudeenergiegesetz 2020

- › Gemäß Anlage 2 Tabelle 1 (75 %)

3.2.3 Abschließende energetische Kategorisierung

Es ist erwähnenswert, dass die unterschiedlichen gesetzlichen Verordnungen in einigen

Bereichen spezifische energetische Standards für Bauteile wie beispielsweise Verglasungen festlegen. In diesem Projekt wird jedoch kein besonderer Standard vorausgesetzt. Stattdessen werden die energetischen Bauteileigenschaften konsequent so dimensioniert, dass sie den zuvor berechneten und in Tabelle 14 zusammenfassend festgelegten Mindestanforderungen entsprechen. Es sei auch angemerkt, dass es zwischen den Veröffentlichungen mehrere kleinere Anpassungen gab. Es wird jedoch als unangemessen angesehen, jede einzelne davon zu berücksichtigen und damit den Detailgrad der zeitlichen Aufschlüsselung zu erhöhen, da dies keinen signifikanten Einfluss auf die Gesamtergebnisse dieser Arbeit hat und lediglich vom Kern der Aussagen ablenken würde.

Tabelle 14: Geometrische Kenngrößen und maximale Wärmedurchgangskoeffizienten der drei geometrischen Hallentypen je energetischer Kategorie nach Rietschel, 2021.

		Einfeldhalle	Zweifeldhalle	Dreifeldhalle
Geometrie Halle	Länge [m]	27	45	45
	Breite [m]	15	22	27
	Höhe [m]	5,5	7	7
	Luftvolumen [m ³]	2227,5	6930	8505
	Fensterflächenanteil [%]	13	14	17
	Grundfläche [m ²]	405	990	1215
Geometrie Gebäude	Grundfläche [m ²]	680	1527	1974
	wärmeübertragende Hüllfläche [m ²]	1903	4018	5125
	Bruttorauminhalt (BRI) [m ³]	3089	8605	11394
	A/V-Verhältnis (Hüllfläche zu Volumen)	0,62	0,47	0,45
	Außenwandfläche [m ²]	405	647	722
	Fensterfläche [m ²]	138	317	455
	Dachfläche [m ²]	680	1527	1974

Energetische Kategorie	Bauteil	Einfeldhalle	Zweifeldhalle	Dreifeldhalle
		U _{max} [W/m ² K]		
1977	Außenwand	1,75	1,75	1,75
	Bodenplatte	1,33	1,04	0,91
	Dach	0,45	0,45	0,45
	Fenster	3,5	3,5	3,5
	Türen	3,5	3,5	3,5
	mittel	1,07	0,97	0,94
1982	Außenwand	1,5	1,5	1,5
	Bodenplatte	1,14	0,87	0,88
	Dach	0,3	0,3	0,3
	Fenster	3,1	3,1	3,1
	Türen	3,1	3,1	3,1
	mittel	0,90	0,80	0,81
1995	mittel	1,49	1,32	1,32
2007	mittel	0,75	0,82	0,83
2014	Außenwand	0,28	0,28	0,28
	Bodenplatte	0,35	0,35	0,35
	Dach	0,2	0,2	0,2
	Fenster	1,3	1,3	1,3
	Türen	1,8	1,8	1,8
	mittel	0,30	0,30	0,31
2022	Außenwand	0,21	0,21	0,21
	Bodenplatte	0,26	0,26	0,26
	Dach	0,15	0,15	0,15
	Fenster	0,98	0,98	0,98
	Türen	1,35	1,35	1,35
	mittel	0,23	0,23	0,23

4 Mess- und befragungstechnische Untersuchungen zur Aufenthaltsqualität

4 Mess- und befragungstechnische Untersuchungen zur Aufenthaltsqualität

Die Richtlinien bezüglich der Anforderungen an die bauphysikalischen Umgebungsparameter in Sporthallen wurden auf internationaler Ebene recherchiert und analysiert. Hierbei hat sich der dringende Forschungsbedarf bestätigt, da beispielsweise Vorgaben zu Lufttemperaturen im Bereich zwischen 13 und 25 °C getroffen werden. Darüber hinaus wurde der Stand der Forschung im Hinblick auf Auswirkungen der bauphysikalischen Umgebungsparameter auf den Komfort und die Leistungsfähigkeit von Sporttreibenden dargestellt. Die Forschungslage ist recht dürftig, wobei die daraus geschlossenen Tendenzen den Forschungsansatz dieses Projekts eindeutig stützen. Beispielsweise stellt eine Kombination aus hohen Umgebungstemperaturen und erhöhter relativer Luftfeuchtigkeit eine erhebliche Belastung für Sporttreibende dar und kann zu einer Leistungsminderung führen. Unterschiede und Abhängigkeiten in Bezug auf die Art der sportlichen Aktivität wurden bislang jedoch noch nicht erforscht.

Um diese Forschungslücke zu schließen, wurde ein kombiniertes Mess- und Befragungskonzept entwickelt, das insbesondere das Ziel verfolgt, nutzungsdifferenzierte Wahrnehmungen und Präferenzen für die bauphysikalischen Umgebungsparameter zu identifizieren.

4.1 Messgrößen

Gemessen werden die physikalischen Parameter gemäß Kapitel 1.1.5 sowie die CO₂-Konzentration als Indikator für die Luftqualität in unterschiedlichen Höhen an raumgeometrisch, -physikalisch und nutzungsbedingt sinnvollen Standorten. Die Standorte können den Grundrissen der untersuchten Hallen in Kapitel 4.3 entnommen werden, wobei nutzungsbedingt einige Verschiebungen durchgeführt werden mussten. Die Messungen in der Halle 1 haben gezeigt, dass die Messergebnisse räumlich horizontal konstant sind, weshalb die Standorte in den Folgeuntersuchungen auf eine Messposition je Hallenabteil reduziert wurden.

An einer Messposition wurden die Lufttemperatur und -feuchte gemäß DIN EN ISO 7726 (DIN EN ISO 7726:2021-03) in 0,1 m, 1,1 m und 1,7 m Höhe gemessen, die mittlere Strahlungstemperatur und Luftgeschwindigkeit auf 1,1 m Höhe und der CO₂-Gehalt auf 1,7 m Höhe. Die Messungen in der Halle 1 und 2 haben gezeigt, dass die Messergebnisse räumlich vertikal konstant sind, weshalb die Lufttemperatur und -feuchte in den Folgeuntersuchungen ausschließlich auf der Höhe 1,1 m gemessen wurden.

Die Auswahl der Messgeräte orientiert sich an den bereits in der Praxis erprobten Messinstrumenten und der DIN EN ISO 7726 (DIN EN ISO 7726:2021-03). Für die Lufttemperatur und -feuchte wurde das Kombinationsgerät testo 174 H verwendet. Der CO₂-Gehalt wurde entweder mithilfe des rotronic CP11 Handmessgeräts oder des Ahlborn Messfühlers FYAD 00 CO₂ in Kombination mit einem entsprechenden Almemo-Speicher- und Auslesegerät gemessen. Der Messfühler für die mittlere Strahlungstemperatur (Globethermometer FPA 805 GTS) und jener für die Luftgeschwindigkeit (FVA 605 TA) der Firma Ahlborn wurden ebenfalls an den Almemo-Datenlogger angeschlossen.

4.2 Fragebogen

Die Fokussierung der Datenerhebung durch Befragungen liegt auf Items, die in Bezug zu den messtechnisch erfassten Daten stehen. Dies beinhaltet die Erfassung von raumbedingten Präferenzen, insbesondere im energetisch relevanten Bereich, wie Klima, Luft, Licht und Hygiene. Zudem werden die Einflüsse von Moderator-Variablen wie Akustik, Olfaktorik und Haptik auf die berichteten Nutzerurteile und -Verhaltensweisen berücksichtigt. Demografische Informationen sowie spezifische Angaben zum Sport sind obligatorischer Bestandteil der Befragung. Allgemeine Fragen zum sozio-demografischen Hintergrund oder individuellen Haltungen werden jedoch nicht berücksichtigt. Um die

komplexe instationäre Bedingung eines Sporttreibenden abzubilden und dabei psychologische Erinnerungsfehler möglichst auszuschließen, wurde der untenstehende Fragebogen in zwei Teile untergliedert, wobei ein Teil vor dem Sport und der andere nach dem Sport auszufüllen ist.

Des Weiteren werden Untersuchungen, die auf die Erfassung personenbezogener oder gesundheitsbezogener Werte der Befragten abzielen, ausgeschlossen. Rückschlüsse auf Gesundheit, Wohlbefinden und Leistungsfähigkeit werden ausschließlich mithilfe erprobter und valider

untersucht werden. Hierfür dürfen die einzelnen Messwerte maximal gemäß Tabelle 15 vom Mittelwert abweichen. Anschließend wird die Operativtemperatur als arithmetisches Mittel der Lufttemperatur und mittleren Strahlungstemperatur gemäß Kapitel 1.1.5 gebildet. Um diese Messergebnisse mit denen der Befragung in Verbindung setzen zu können, werden die in den Fragebögen angegebenen Uhrzeiten und Messpositionen herangezogen und auf zeitliche Konstanz untersucht. Dadurch kann jedem Fragebogen ein Einzahlwert der Messergebnisse zugeordnet werden.

Tabelle 15: Maximale Abweichung der einzelnen Messgrößen vom Mittelwert zur Bewertung der räumlichen Homogenität und zeitlichen Konstanz.

Messgröße	Maximalabweichung vom Mittelwert
Lufttemperatur	0,6 K
Mittlere Strahlungstemperatur	0,6 K
Relative Luftfeuchtigkeit	10 %
CO ₂ -Gehalt	50 ppm

Befragungsimens erfasst. Eine umfassendere wissenschaftliche Untersuchung in diesem Kontext wäre zweifellos interessant und aufschlussreich, erfordert jedoch einen anderen Projektansatz.

4.3 Sporthallen

Die Abstimmung mit Trägern und Betreibern der Sporthallen erwies sich als besondere Herausforderung, da deren Unsicherheit während der Pandemie zu komplizierten Zustimmungsprozessen führte. Die Untersuchungen mussten sehr spontan durchgeführt werden oder wurden teilweise kurzfristig storniert, weshalb lediglich drei verschiedene Hallen zur Verfügung standen. Bei der Halle 1 handelt es sich um eine Einfeldhalle, die Hallen 2 und 3 sind Dreifeldhallen. Für das Ziel dieser Untersuchungen, komfortable Aufenthaltsbedingungen zu identifizieren, spielen die spezifischen Merkmale, wie Bausubstanz, technische Anlagen und Betriebsmodell, keine Rolle.

4.4 Auswertungsmethode

Zunächst werden die Messergebnisse aufbereitet, indem sie auf räumliche Homogenität

Die statistische Auswertung wird mithilfe der Software SPSS Statistics (IBM Deutschland GmbH) durchgeführt. Sie erfolgt hauptsächlich deskriptiv über Häufigkeiten und Boxplots. Mithilfe des Boxplots kann die Verteilung der Daten anschaulich visualisiert und es kann zwischen Gruppen oder Kategorien verglichen werden.

Mithilfe des Tamhane-t-Tests können Mittelwertunterschiede zwischen Gruppen, wie beispielsweise zwischen Temperaturbereichen oder Anstrengungsgraden, auf ihre statistische Signifikanz untersucht werden. Er ist eine robuste Alternative zum herkömmlichen t-Test, wenn die Varianzhomogenität nicht erfüllt ist oder die Daten in den Gruppen nicht normalverteilt sind.

Über den gepaarten t-Test werden Mittelwertunterschiede innerhalb einer Stichprobe analysiert. Hiermit können die Befragungsergebnisse vor dem Sport mit denen nach dem Sport verglichen werden.

Zusätzlich wird eine Korrelationsanalyse durchgeführt, um die Stärke und Richtung des Zusammenhangs zwischen den Variablen zu untersuchen.

Hierbei wird der Kendall-Tau-b als Korrelationskoeffizient herangezogen, da dieser robust gegenüber nicht normalverteilten Daten und Ausreißern ist. Er basiert auf Rangreihenfolgen der Daten und kann intuitiv interpretiert werden. Ein Wert von -1 bedeutet eine perfekte abnehmende monotone

Beziehung, während ein Wert von 1 eine perfekte zunehmende monotone Beziehung anzeigt. Ein Wert nahe 0 deutet auf eine schwache oder keine monotone Beziehung hin. Das Signifikanzniveau wird einheitlich auf 5 % festgelegt.

5 Untersuchungsergebnisse zur Aufenthaltsqualität

5 Untersuchungsergebnisse zur Aufenthaltsqualität

5.1 Außenklima

Um die Untersuchungsergebnisse zur Aufenthaltsqualität in Sporthallen einordnen zu können, wurden mithilfe des Wetterrückblicks (WetterKontor GmbH) die Außenklimadaten der einzelnen Hallen-Standorte zu den Messzeiträumen ermittelt und in Tabelle 16 dargestellt. Deutlich ersichtlich ist der relativ milde Som-

mer mit einer mittleren Außenlufttemperatur von 10,9 °C und Maximaltemperaturen im Bereich von 15 bis 24 °C. Messungen im Hochsommer (Juni bis August) waren jedoch aufgrund der Covid-19-Pandemie zu diesem Zeitpunkt nicht möglich. Die mittlere Außenlufttemperatur während der Winter-Messungen beträgt 4,3 °C mit Mindesttemperaturen im Bereich von -1,3 bis 5,3 °C.

Tabelle 16: Außenklimadaten während der Untersuchungen im Sommer und Winter.

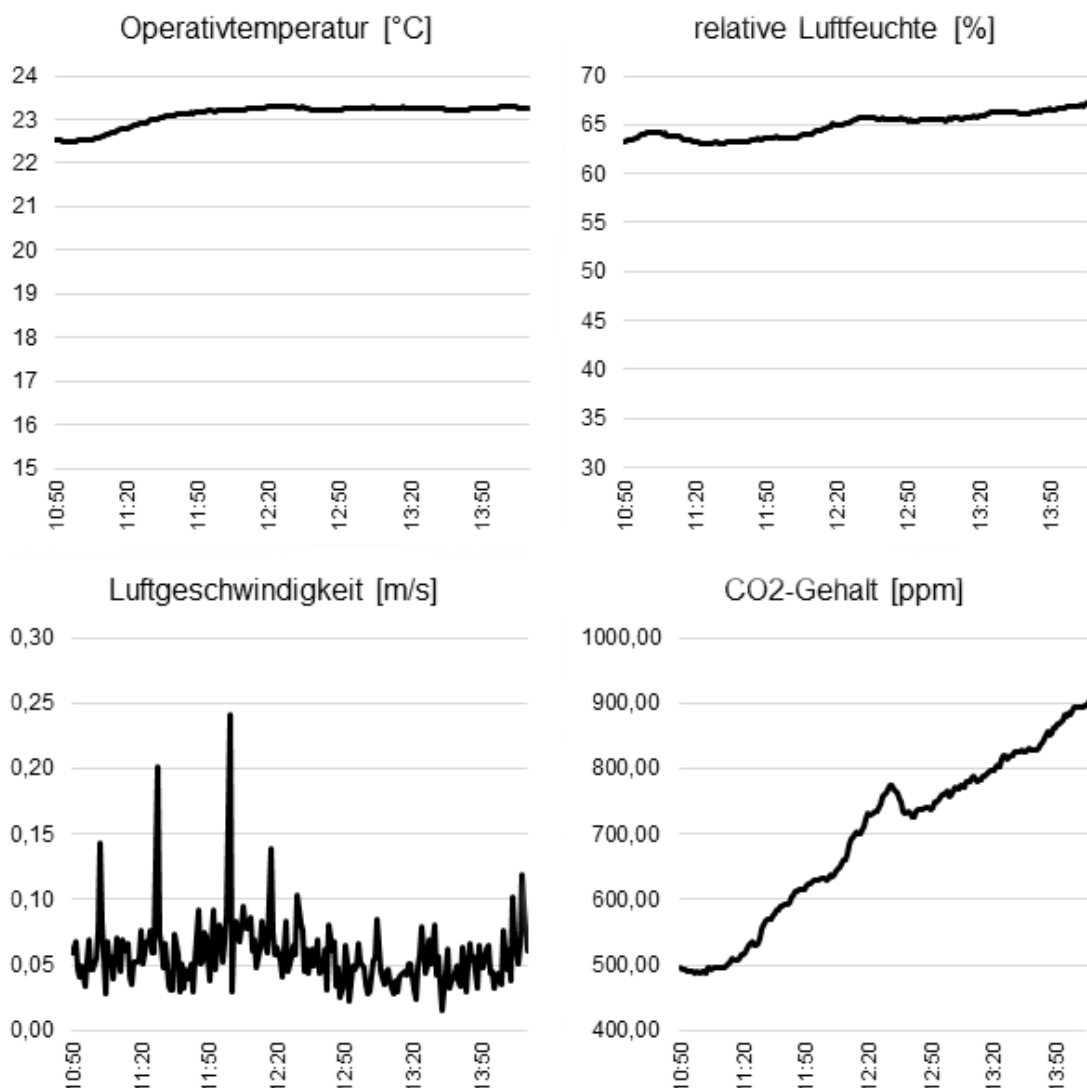
Datum	Standort	Minimum Temperatur	Maximum Temperatur	Mittelwert Temperatur	Niederschlag	Sonnenscheindauer	Max. Windböe
	Einheit	[°C]	[°C]	[°C]	[l/m ²]	[h]	[Bft]
22.08.2021	Halle 1	12,7	20,2	16,1	14	1,4	
31.08.2021	Halle 2	10,1	18,7	14,9	0	2,7	4
01.09.2021	Halle 2	8	20,7	14	0	6,7	4
02.09.2021	Halle 2	7,6	22,3	15,1	0	12,8	5
03.09.2021	Halle 2	8,1	24,5	16,1	0	12,9	4
18.09.2022	Halle 3	8	14,7	11,3	2,5	0,8	7
19.09.2022	Halle 3	6,9	15	10,1	1,6	1,7	6
20.09.2022	Halle 3	6,7	15,5	10,7	0	5,3	5
21.09.2022	Halle 3	4,2	17,1	10,3	0	10	4
22.09.2022	Halle 3	3,8	18,8	10,8	0	11,4	5
23.09.2022	Halle 3	5,9	19	12,3	0	9,5	3
SOMMER	Mittelwert	3,8	19,0	10,9	0,7	6,5	5,0
	Standardabweichung	1,49	1,74	0,73	1,00	4,13	1,29
27.11.2022	Halle 3	-1,3	7,7	3,1	0	5,2	4
28.11.2022	Halle 3	3,7	7	5,4	3,2	0	4
29.11.2022	Halle 3	5,3	6,9	6,4	1,6	0	3
30.11.2022	Halle 3	2,8	6,2	5,1	0	0	4
01.12.2022	Halle 3	2	3,8	2,9	0,1	0	3
02.12.2022	Halle 3	1,6	3,3	2,7	1,6	0	3
WINTER	Mittelwert	2,4	5,8	4,3	1,1	0,9	3,5
	Standardabweichung	2,03	1,67	1,43	1,18	1,94	0,50

5.2 Messergebnisse

Die Untersuchungen in der Halle 1 dienten unter anderem der Evaluierung der Mess- und Befragungsmethode. Es stellte sich heraus, dass die Messgrößen Lufttemperatur und -feuchte räumlich vertikal, d.h. über die drei Messhöhen 0,1 m, 1,1 m und 1,7 m an einer Messposition, und räumlich horizontal, d.h. über die 5 Messstationen, innerhalb der Messtoleranz konstant sind. Aufgrund dessen wurde die Anzahl der Messpositionen im Anschluss auf eine Position je Hallenabteil reduziert. Die Messungen in Halle 2 bestätigten die vertikale Konstanz der Messungen, weshalb auch hier die Anzahl der Messhöhen, auf die der 1,1 m Höhe, reduziert wurde. Die folgenden Darstellungen der zeitlichen Verläufe der Messergebnisse beziehen sich daher auf die räumlich vertikal und horizontal gemittelten Messwerte je Zeitpunkt.

Abb. 7 veranschaulicht die Messergebnisse der Halle 1 (Einfeldhalle). Die Operativtemperatur liegt zwischen 22,5 und 23,3 °C und kann als zeitlich konstant innerhalb des Messzeitraums angesehen werden. Die relative Luftfeuchte beträgt im Mittel 65 %. Die Luftgeschwindigkeit schwankt erwartungsgemäß deutlich, wobei sie nur vereinzelt über 0,1 m/s steigt. Im Mittel beträgt sie 0,06 m/s. Deutlich erkennbar ist der Anstieg des CO₂-Gehalts mit der Zeit. Innerhalb von 3 Stunden ist dieser annähernd linear um ca. 133 ppm/h von 500 ppm auf 900 ppm gestiegen. Dies ist auf die geschlossenen Fenster ohne mechanische Lüftungsanlage zurückzuführen. In der Halle waren 12 Personen anwesend, wovon sich 10 sportlich betätigten. Dies bedeutet einen Anstieg des CO₂-Gehalts pro sporttreibende Person pro Stunde von ca. 13 ppm in der Einfeldhalle ohne Lüftung.

Abb. 7: Sommer-Messdaten der Halle 1 (Einfeldhalle) vom 22.08.2021.



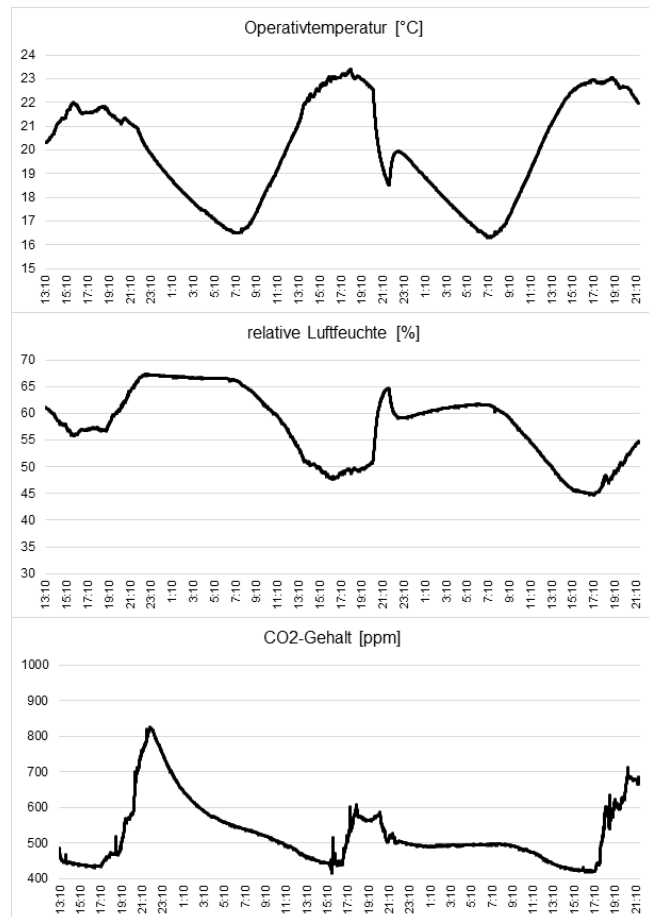
Die Messergebnisse in der Halle 2 (Dreifeldhalle) sind in Abb. 8 dargestellt. Die Halle verfügt über eine automatisierte Regelungstechnik der Lüftungs- und Beleuchtungsanlage. Die Halle war täglich ab ca. 17:00 Uhr bis 22:00 Uhr belegt. Zu den anderen Zeiten hat kein Sportbetrieb stattgefunden. Die tageszeitlichen Schwankungen der Operativtemperatur sind klar erkennbar. Sie steigt ab Sonnenaufgang bis zum ersten Sportbetrieb linear von 16,5 auf 22 °C, somit um ca. 0,6 K/h an. Ab Ende des Sportbetriebs bis Sonnenaufgang sinkt sie um ca. 0,5 K/h wieder ab. Während des Sportbetriebs liegt die Operativtemperatur zwischen 21 und 23,2 °C. Am zweiten Messtag wurden um etwa 20:00 Uhr bei 22,8 °C Fenster und Außen-Türen geöffnet, was die rapide Temperaturabnahme bis etwa 21:00 Uhr erklärt.

Die relative Luftfeuchte zeigt einen entgegengesetzten Trend. Während des Betriebs ist diese niedriger als außerhalb der Betriebszeiten. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass die relative Feuchte temperaturabhängig ist und bei konstanter absoluter Feuchte bei höheren Temperaturen (im Betrieb) niedriger ist als bei tieferen Temperaturen (außerhalb des Betriebs). Während des Betriebs liegt die relative Luftfeuchte zwischen 45 und 67 %. Der rapide Anstieg am zweiten Messtag um etwa 20:00 Uhr geht auf die rapide Temperaturabnahme durch Öffnung der Fenster und Türen zurück.

Der CO₂-Gehalt stieg am ersten Messtag während des Betriebs innerhalb von 5 Stunden um ca. 70 ppm/h von 450 auf 800 ppm. Im Durchschnitt haben ca. 15 Personen Sport getrieben, was einen Anstieg des CO₂-Gehalts um ca. 5 ppm pro Person pro Stunde bedeutet. Am zweiten Messtag waren von 16:30 bis 18:00 Uhr ca. 20 Sporttreibende (Badminton) anwesend, die ebenfalls einen Anstieg des CO₂-Gehalts um 5 ppm pro Person und Stunde verursachten. Zwischen 18:00 und 22:00 Uhr waren im Schnitt nur etwa 5 Personen anwesend, welche langsame Kampfsportarten wie Vovinam, Kung-Fu und Fechten ausübten.

Ein repräsentativer Ausschnitt der Sommer-Messergebnisse in der Halle 3 (Dreifeldhalle) ist

Abb. 8: Sommer-Messdaten der Halle 2 (Dreifeldhalle) vom 31.08. bis 02.09.2021.

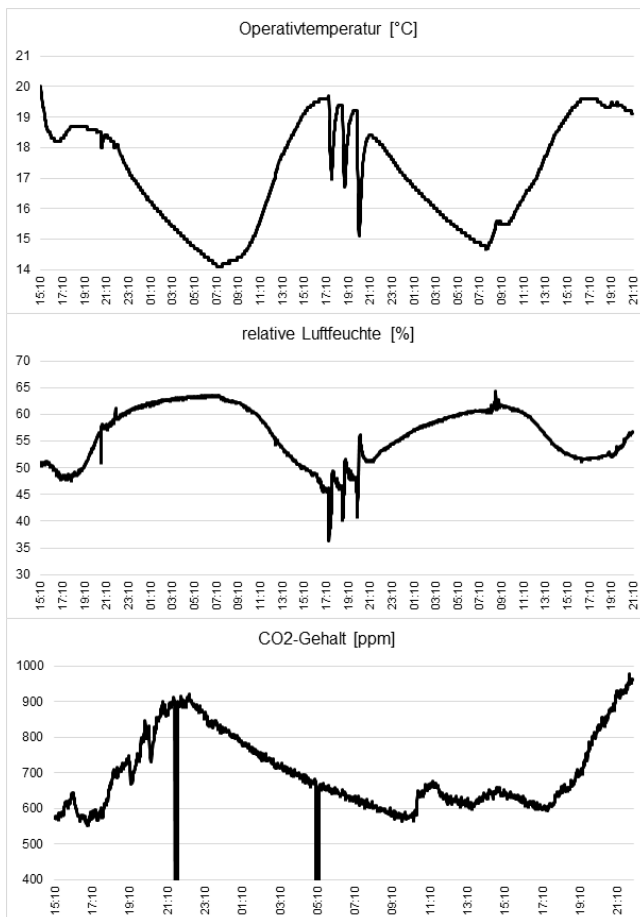


in Abb. 9 dargestellt. Die Halle war täglich ab ca. 10:00 Uhr bis 22:00 Uhr mit einigen Pausen belegt, wobei von 10:00 bis 18:00 Uhr Kleinkind- und Schulsport betrieben wurde und ab 18:00 Uhr Vereinssport mit überwiegend erwachsenen Sporttreibenden. Die tageszeitlichen Schwankungen der Operativtemperatur sind klar erkennbar. Sie steigt ab Sonnenaufgang bis 16:00 Uhr annähernd linear um ca. 0,6 K/h an. Ab 16:00 Uhr bis Sonnenaufgang sinkt sie um ca. 0,4 K/h wieder ab. Die Operativtemperatur liegt während des Sportbetriebs zwischen 14,5 und 19,5 °C, wobei die raschen Temperatursenkungen auf das Öffnen von Fenstern zurückzuführen ist. Die relative Luftfeuchte zeigt den umgekehrten Trend und liegt während des Betriebs zwischen 35 und 55 %.

Das Messgerät für den CO₂-Gehalt wurde während des Betriebs beschädigt, weshalb nur ein kleiner Ausschnitt für die Veranschaulichung des zeitlichen Verlaufs zur Verfügung steht. Er

steigt während des Erwachsenen-Betriebs um ca. 100 ppm/h an und sinkt in der Nacht um 25 ppm/h wieder ab. Jedoch kann festgehalten werden, dass zu keinem Zeitpunkt während des Sportbetriebs Werte größer 1000 ppm gemessen wurden.

Abb. 9: Sommer-Messdaten der Halle 3 (Dreifeldhalle) vom 21.09. bis 23.09.2022.

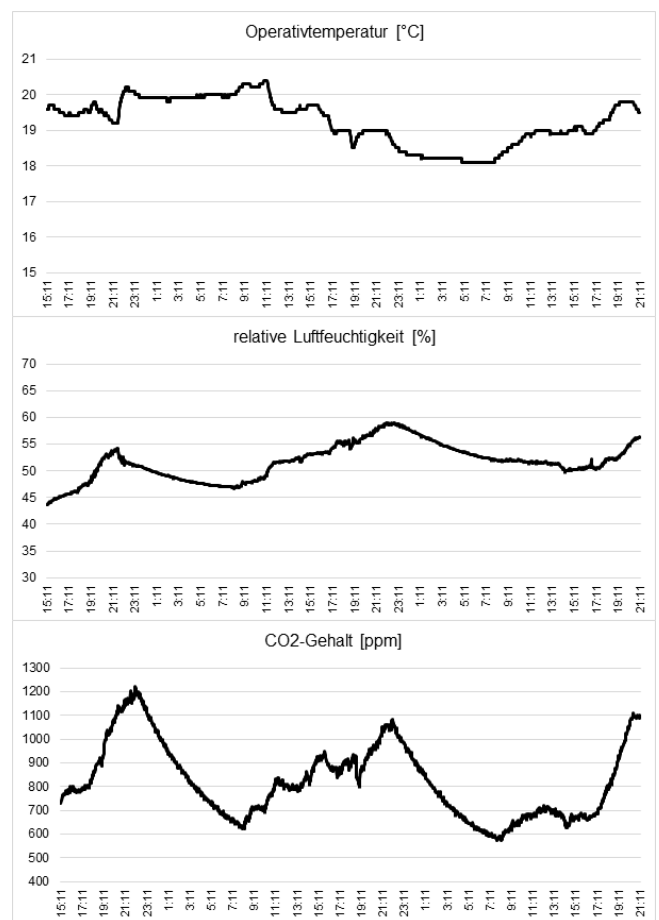


Ein repräsentativer Ausschnitt der Winter-Messergebnisse in der Halle 3 (Dreifeldhalle) sind in Abb. 10 dargestellt. Die Halle war täglich ab ca. 10:00 Uhr bis 22:00 Uhr mit einigen Pausen belegt, wobei von 10:00 bis 18:00 Uhr Kleinkind- und Schulsport betrieben wurde und ab 18:00 Uhr Vereinssport mit überwiegend erwachsenen Sporttreibenden. Tageszeitliche Schwankungen der Operativtemperatur sind im Winter nicht erkennbar. Während der ersten dargestellten Betriebszeit liegt die Operativtemperatur bei 19 bis 20 °C und bleibt über die Nacht konstant. Während der zweiten Betriebszeit sinkt sie wieder auf ca. 19 °C und pendelt sich in der Nacht bei ca. 18 °C ein. Während der dritten Betriebs-

zeit steigt sie wieder auf ca. 20 °C. Die relative Luftfeuchte zeigt den umgekehrten Trend und liegt während des Betriebs zwischen 45 und 60 %.

Der CO₂-Gehalt zeigt deutliche tageszeitliche Schwankungen. Während des Erwachsenen-Betriebs steigt dieser annähernd linear um 100 ppm/h an. Bei einer über die Anzahl der ausgefüllten Fragebögen geschätzten Anzahl von anwesenden Personen von 20 ergibt sich hier ebenfalls ein Anstieg von 5 ppm pro Person pro Stunde. Außerhalb des Betriebs, von 22:00 bis 8:00 Uhr, sinkt der CO₂-Gehalt um 60 ppm/h wieder ab. Festzuhalten ist, dass während der Abendstunden ab ca. 20:00 Uhr der CO₂-Gehalt oberhalb des Pettenkofer-Grenzwerts für eine gesunde Raumluft von 1000 ppm liegt.

Abb. 10: Winter-Messdaten der Halle 3 (Dreifeldhalle) vom 28.11. bis 30.11.2022.



5.3 Demografische Probandendaten

Im Sommer wurden von insgesamt 303 Sporttreibenden die Fragebögen ausgefüllt, wovon 35 % weiblich und 58 % männlich sind. 7 % haben keine Angabe zum Geschlecht getätigt. Im Winter konnten 244 Fragebögen ausgewertet werden, mit einer ähnlichen Geschlechterverteilung. Die Probandendaten zur Anzahl und Aufteilung nach Geschlecht können Tabelle 17 entnommen werden.

Tabelle 17: Probandendaten Anzahl und Aufteilung nach Geschlecht.

	SOMMER		WINTER	
	Häufigkeit	Prozent	Häufigkeit	Prozent
Weiblich	106	35	85	35
Männlich	175	58	127	52
Divers	0	0	5	2
Keine Angabe	22	7	27	11
Gesamt	303	100	244	100

In Tabelle 18 sind die statistischen Kennwerte zur Alters- und Body-Mass-Index (BMI)-Struktur der Probanden aufgelistet, die Altersstruktur kann Abb. 11 entnommen werden. Das Durchschnittsalter der Probanden im Sommer liegt bei 26,6 Jahren, wobei die Hälfte älter als 25 Jahre ist. Die jüngste Person ist 7 Jahre, die älteste 69. Im Winter liegen das Durchschnittsalter und der Median deutlich niedriger bei 19,3 und 15 Jahren, da viele Schulklassen den Sportunterricht im Sommer draußen durchgeführt haben und damit keine Fragebögen ausfüllten. Im Winter hingegen wurde der Sportunterricht in die Halle verlagert.

Tabelle 18: Probandendaten Alter und BMI.

	SOMMER		WINTER	
	Alter	BMI	Alter	BMI
Mittelwert	26,6	23,5	19,3	20,7
Median	25,0	22,8	15	20,5
Standardabweichung	9,99	4,35	12,45	4,17
Spannweite	62	42,45	63	25,75
Minimum	7	8,26	9	11,29
Maximum	69	50,71	72	37,04

5.4 Wichtigkeit und Zufriedenheit mit bauphysikalischen Raumbedingungen

Bereits die ersten deskriptiven Analysen verdeutlichen die Relevanz des Projekts. Während die Luftqualität für knapp 90 % der Befragten ein wichtiger bis äußerst wichtiger Faktor für die sportliche Aktivität darstellt, sind nur etwa 55 % im Sommer und 45 % im Winter mit den vorherrschenden Bedingungen zufrieden (siehe Abb. 12). Auch im Bereich

thermische Behaglichkeit (TB) besteht deutlicher Handlungsbedarf. Nur etwa 45 % der Befragten sind mit der thermischen Umgebung zufrieden, wobei dies für knapp 80 % im Sommer und 70 % im Winter einen wichtigen Faktor darstellt.

In Tabelle 19 sind die qualitativen Zusammenhänge der empfundenen und gemessenen Raumumgebung mit der Zufriedenheit der Sporttreibenden aufgeführt. Die weiblichen Probanden sind generell mit der Luftqualität und der thermischen Behaglichkeit weniger zufrieden als die Männer. Das Alter hat auf die Zufriedenheit

Abb. 11: Altersstruktur der Probanden aufgeteilt in Sommer und Winter.

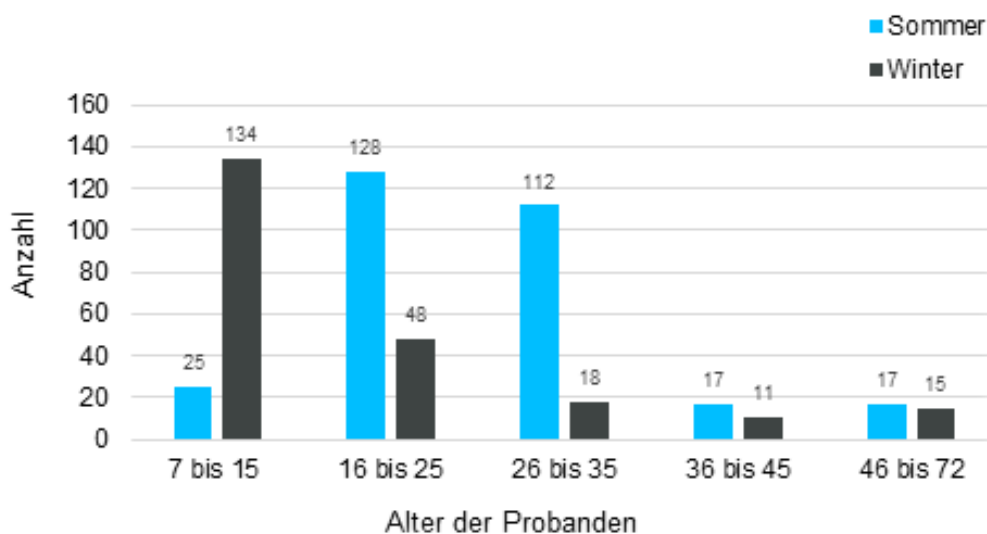
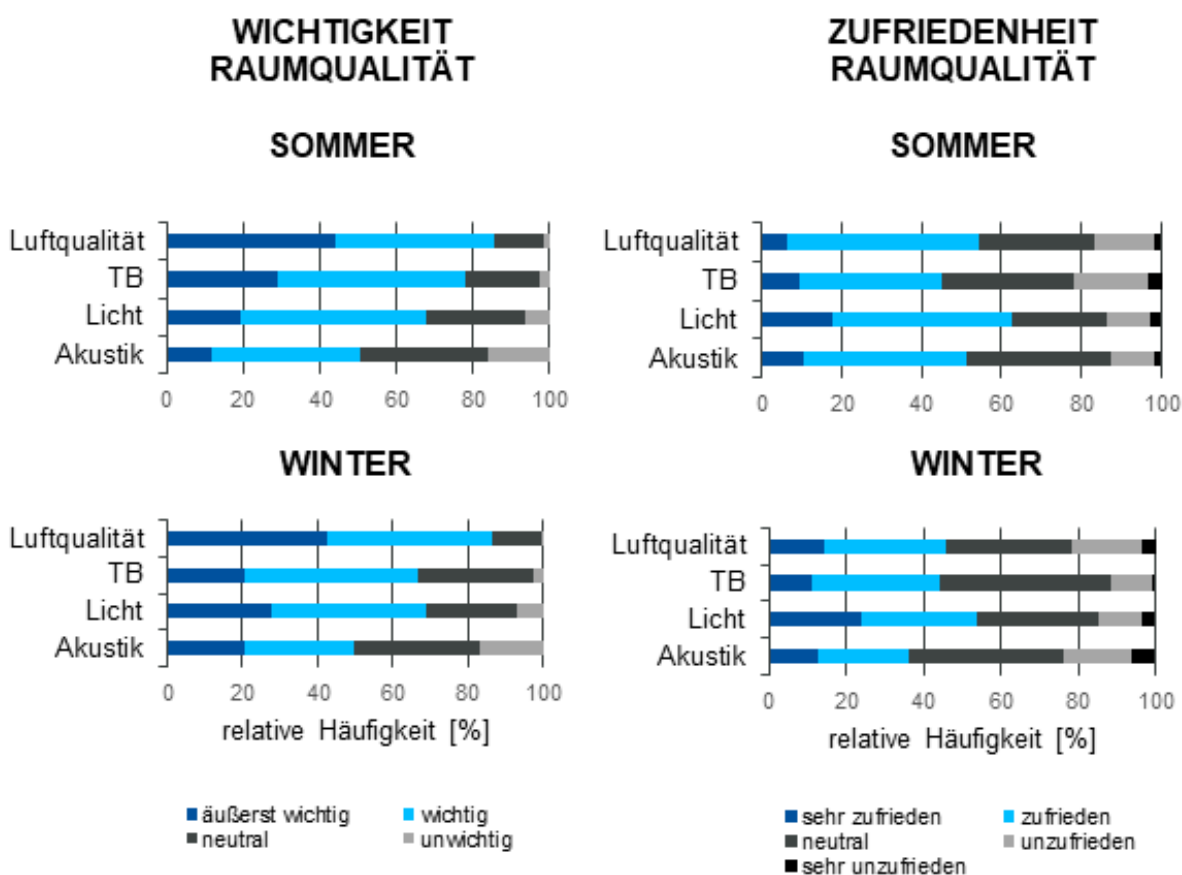


Abb. 12: Wichtigkeit von und Zufriedenheit mit der Raumqualität.



mit diesen beiden Raumqualitäten keinen signifikanten Einfluss, ebenso wenig der BMI. Im Winter sinkt die Zufriedenheit mit der thermischen Behaglichkeit mit zunehmender Bekleidungskategorie, also zunehmendem Isolationswert.

Im Sommer hingegen kann kein signifikanter Einfluss auf die Zufriedenheit festgestellt werden. Die Zufriedenheit mit der Luftqualität und der thermischen Behaglichkeit sinkt mit steigendem subjektivem Anstrengungsgrad im Sommer wie

im Winter. Im Sommer kann keine signifikante Korrelation zwischen gemessener Operativtemperatur und Zufriedenheit mit der thermischen Behaglichkeit festgestellt werden, wobei mit wärmer empfundenen Temperaturen die Zufriedenheit mit der thermischen Behaglichkeit eher zunimmt und mit wärmer empfundenen Temperaturen nimmt die Zufriedenheit mit der Luftqualität ab. Im Winter hingegen sinkt die Zufriedenheit mit diesen beiden Raumqualitäten mit steigender Operativtemperatur und steigendem Temperaturempfinden. Diese Zusammenhänge werden in Kapitel 5.5 detaillierter aufgeschlüsselt. Mit zunehmender relativer Luftfeuchtigkeit nimmt die Zufriedenheit mit der thermischen Behaglichkeit im Winter ab. Je höher jedoch das

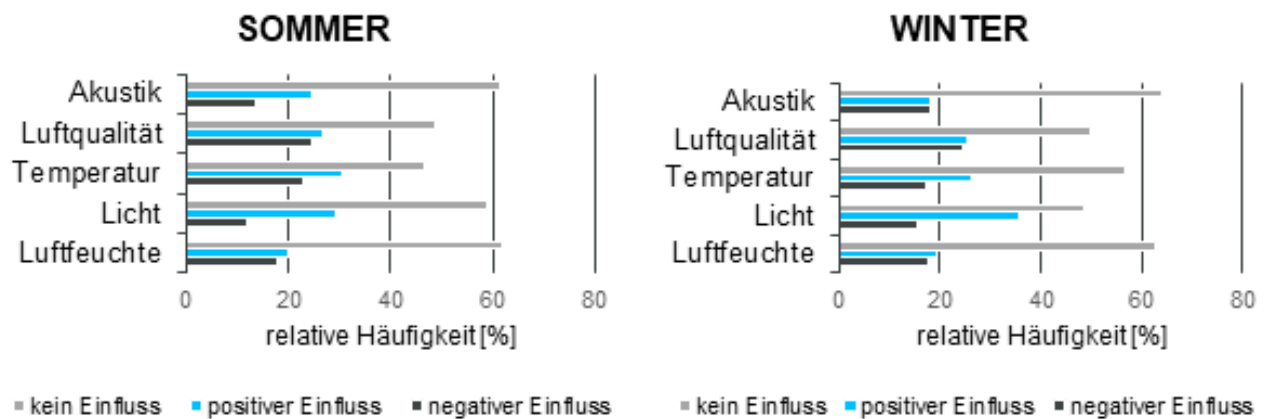
Feuchteempfinden, desto größer ist die Zufriedenheit im Winter. Mit steigender empfundener Luftfrische und abnehmenden empfundenen Gerüchen steigt die Zufriedenheit mit fast allen Raumqualitäten. Der gemessene CO₂-Gehalt hat im Sommer keinen Einfluss auf die Zufriedenheit mit der Luftqualität und thermischen Behaglichkeit. Im Winter hingegen sinkt die Zufriedenheit mit steigendem CO₂-Gehalt. Die Zufriedenheit mit dem Licht steigt mit zunehmender empfundener Gleichmäßigkeit und Helligkeit. Sie steigt im Sommer zusätzlich mit zunehmender wahrgenommener Lichtfarbtemperatur, je kaltweißer das Licht, desto zufriedener. Die Zufriedenheit mit der Akustik sinkt mit zunehmend wahrgenommener Lautheit.

Tabelle 19: Korrelationen der empfundenen und gemessenen Raumumgebung mit der Zufriedenheit der Sporttreibenden.

Steigende Einflussgrößen	Zufriedenheit Raumqualität							
	Luftqualität		Thermische Behaglichkeit		Licht		Akustik	
Bedeutung der Zeichen: ☀ im Sommer / ❄ im Winter ↑ steigt / ↓ sinkt / — kein signifikanter Zusammenhang	☀	❄	☀	❄	☀	❄	☀	❄
Geschlecht (weiblich/männlich)	w<m	w<m	w<m	w<m	—	—	—	w<m
Alter	—	—	—	—	↓	↓	—	↓
BMI	—	—	—	—	—	—	—	—
Bekleidungsklasse	—	↓	—	↓	—	—	—	—
Anstrengungsgrad	↓	↓	↓	↓	—	—	—	↓
Zufriedenheit mit sportlicher Leistung	—	—	—	—	—	↑	—	↑
Gemessene Operativtemperatur	—	↓	—	↓	—	↓	↑	—
Temperaturempfinden	↓	↓	↑	↓	—	—	↑	↑
Gemessene relative Luftfeuchtigkeit	—	—	—	↓	—	↓	↑	—
Feuchteempfinden	—	↑	—	↑	—	↑	↓	↑
Feuchtepräferenz	↑	—	↑	—	—	—	—	—
Empfundene Gleichmäßigkeit Licht	—	↑	—	↑	↑	↑	—	↑
Empfundene Helligkeit	—	↑	—	↑	↑	↑	↑	↑
Empfundene Lichtfarbtemperatur	—	—	—	—	↑	—	—	—
Gemessener CO ₂ -Gehalt	—	↓	—	↓	—	↓	—	—
Empfundene Luftfrische	↑	↑	↑	↑	↑	↑	—	↑
Empfundene Gerüche	↓	↓	↓	↓	—	—	—	—
Empfundene Lautheit	↓	↓	—	↓	↓	—	↓	↓

Darüber hinaus wird aus Abb. 13 ersichtlich, dass für rund die Hälfte der Befragten die physikalischen Raumumgebungsparameter subjektiv gesehen die Leistungsfähigkeit sowohl positiv als auch negativ beeinflussen. Hierbei gilt es, die positiven Effekte zu verstärken und die negativen möglichst zu eliminieren.

Abb. 13: Subjektiver Einfluss der Raumqualität auf die Leistungsfähigkeit.



5.5 Thermische Behaglichkeit

5.5.1 Sommer

Die Zufriedenheit mit der Umgebung kann auf anschauliche Weise durch eine Präferenzabfrage erfasst werden. Wenn Probanden eine Veränderung ihrer Umgebung bevorzugen, lässt dies auf eine gewisse Unzufriedenheit schließen. Abb. 14 illustriert diese Zusammenhänge in Form eines Boxplots, der die Präferenz für unterschiedliche Temperaturen in Abhängigkeit von den gemessenen Betriebstemperaturen darstellt. Eine negative Präferenz bedeutet dabei, dass eine kühlere Umgebung bevorzugt wird, während eine positive Präferenz im Gegensatz dazu auf die Bevorzugung einer wärmeren Umgebung hinweist. Die Betriebstemperatur bezieht sich im Folgenden auf die Operativtemperatur gemäß Kapitel 1.1.5.

Im Durchschnitt wird bei allen Temperaturen vor dem Sport keine Veränderung der Umgebung präferiert. Allerdings lässt sich eine Tendenz erkennen, dass bei 17 und 19 °C eine wärmere Umgebung bevorzugt wird, während bei 22 und 23 °C tendenziell eine kältere Umgebung bevorzugt wird. Darüber hinaus zeigen sich durch den t-Test nach Tamhane signifikante

Unterschiede zwischen den Temperaturgruppen. Insbesondere wird der Temperaturbereich zwischen 21 und 23 °C signifikant kälter präferiert als der Bereich von 17 bis 19 °C. Diese Feststellung wird noch deutlicher, wenn dieselbe Umfrage nach dem Sport betrachtet wird, wie in Abb. 15 dargestellt.

Durch den Mittelwertvergleich bei gepaarten Stichproben können Unterschiede zwischen den Ergebnissen vor und nach dem Sport identifiziert werden. Es lässt sich feststellen, dass die Operativtemperatur von 17 °C vor dem Sport annähernd signifikant wärmer präferiert wird als nach dem Sport. Im Gegensatz dazu werden 23 °C nach dem Sport signifikant kühler präferiert als vor dem Sport. Diese Unterschiede lassen sich auf die gesteigerte Wärmeproduktion des menschlichen Körpers während und nach dem Sport zurückführen. Kältere Umgebungen werden dadurch angenehmer bewertet, während wärmere Umgebungen als unangenehmer wahrgenommen werden. Dies veranschaulicht die Komplexität der sich verändernden Bedingungen eines Sporttreibenden.

In Abb. 16 ist der Boxplot zur Zufriedenheit mit der thermischen Behaglichkeit in Abhängigkeit der gemessenen Operativtemperatur dargestellt. Positive Werte stehen hierbei für Zufriedenheit und negative für Unzufriedenheit. Die Temperaturen von 17 bis 19 °C werden im Mittel neutral bewertet, wobei 17 und 18 °C tendenziell eher zu einer zufriedenen Bewertung führen, während 19 °C tendenziell als unzufriedenstellend empfunden wird. Hingegen werden die Temperaturen von 21 und 22 °C im Durchschnitt zufrieden

Abb. 14: Boxplot der Befragungsergebnisse zur Präferenz der Temperatur vor dem Sport in Abhängigkeit der gemessenen Operativtemperatur (Sommer).

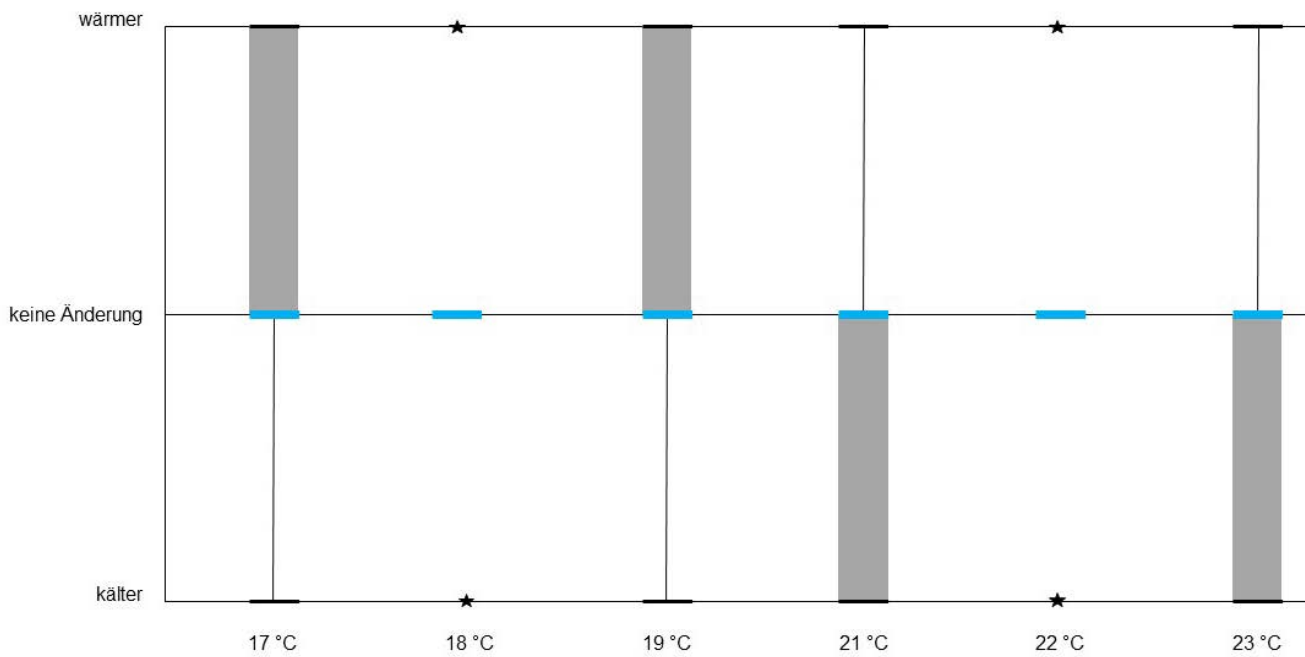
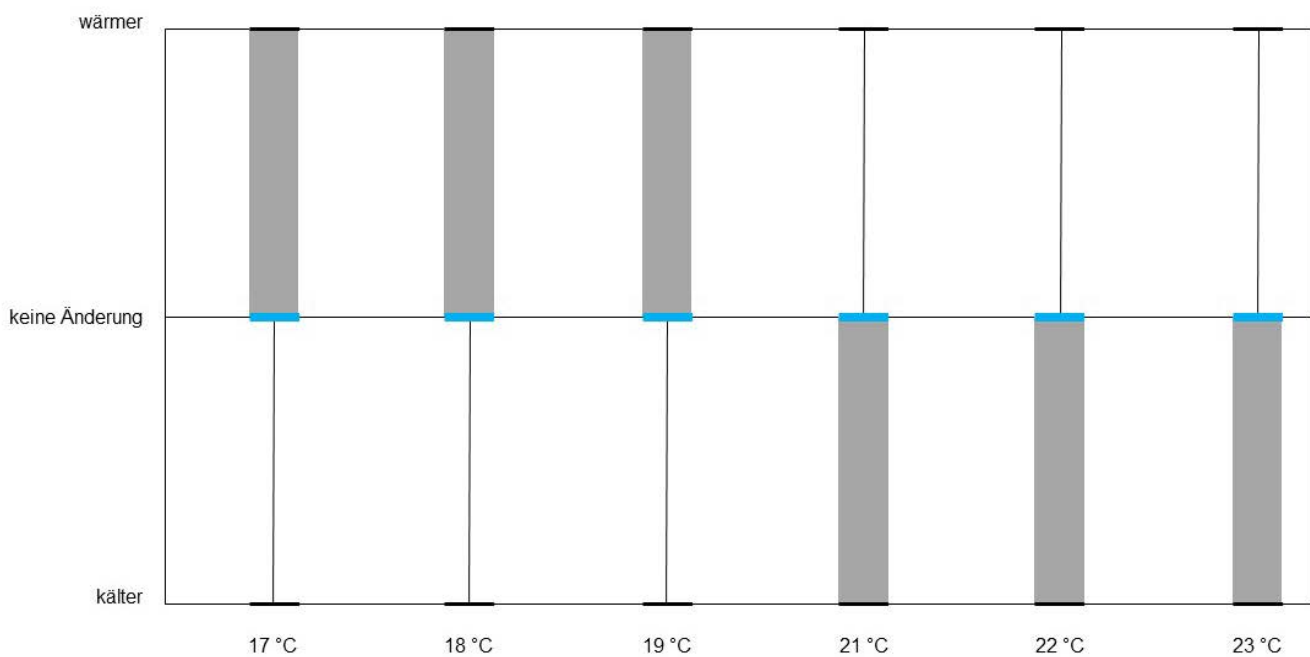


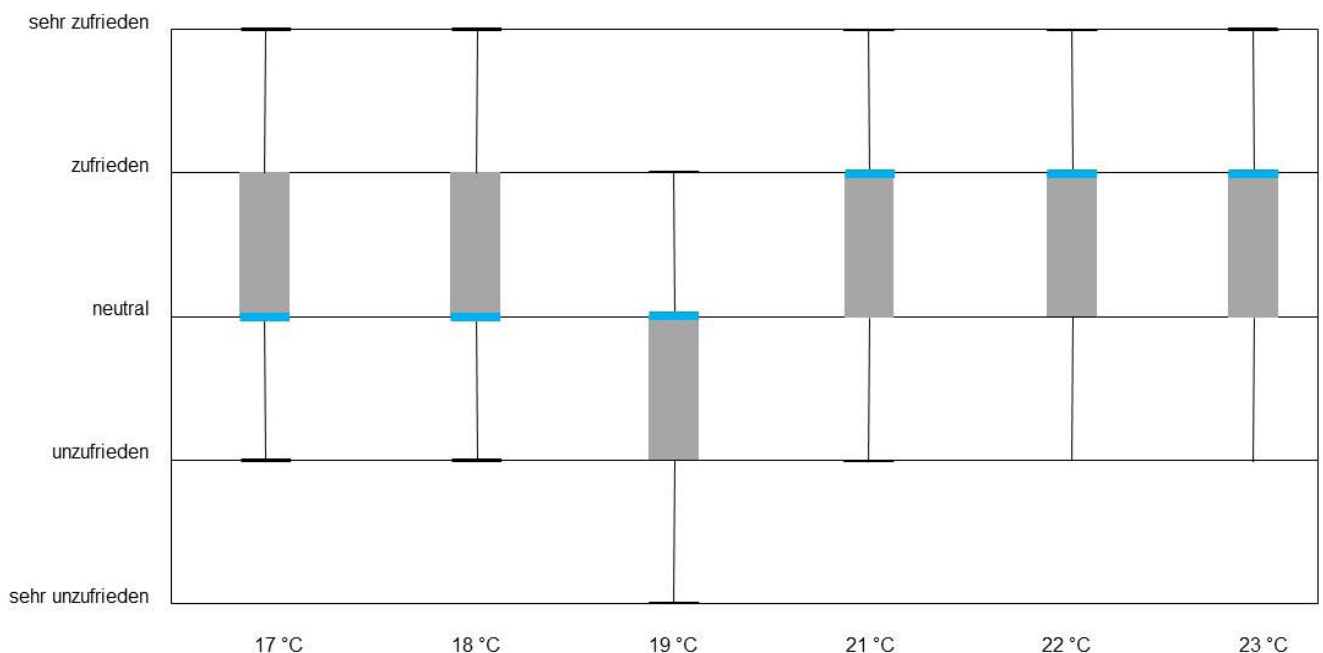
Abb. 15: Boxplot der Befragungsergebnisse zur Präferenz der Temperatur nach dem Sport in Abhängigkeit der gemessenen Operativtemperatur (Sommer).



und 23 °C neutral bis unzufrieden bewertet. Durch die Anwendung des Tamhane-t-Tests kann festgestellt werden, dass die Temperaturbereiche von 21 bis 22 °C signifikant zufriedener bewertet werden als der Bereich von 19 °C. In Verbindung mit den Erkenntnissen der Präferenzanalyse führt eine tendenziell kühler bevorzugte Umgebung zu einer zufriedeneren Bewertung der thermischen Behaglichkeit als eine tendenziell wärmer präferierte Umgebung.

nach dem Sport in Abhängigkeit des subjektiven Anstrengungsgrades dargestellt. Vor dem Sport wird im Mittel keine Veränderung der Temperatur präferiert, wobei bei leichter Anstrengung eine Tendenz hin zu wärmeren Temperaturen zu beobachten ist. Nach dem Sport hingegen wird bei mittelschwerer bis extremer Anstrengung tendenziell eine kühlere Temperatur bevorzugt. Es sind jedoch keine signifikanten Unterschiede zwischen den verschiedenen Anstrengungsgraden festzustellen. Der Vergleich der Bewertun-

Abb. 16: Boxplot der Befragungsergebnisse zur Zufriedenheit mit der thermischen Behaglichkeit nach dem Sport in Abhängigkeit der gemessenen Operativtemperatur (Sommer).



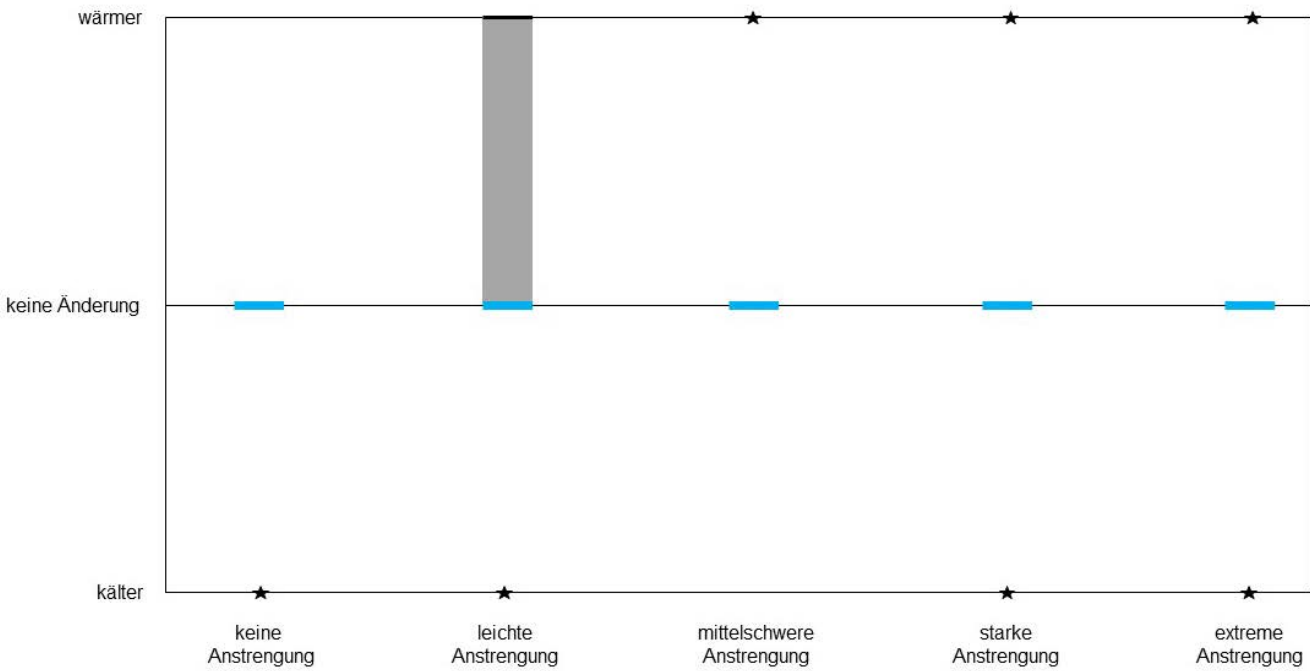
Dieses Ergebnis lässt den Schluss zu, dass unter den gegebenen sommerlichen Außenklimabedingungen operative Temperaturen von 17 °C als zu kühl und 23 °C als zu warm für sportliche Aktivitäten betrachtet werden können. Es ist jedoch zu beachten, dass der Vergleich der Präferenzen vor und nach dem Sport signifikante Unterschiede aufzeigt und die Bewertung somit von der körperlichen Anstrengung beeinflusst wird. Daher wird im Folgenden der Einfluss des subjektiven Anstrengungsgrads genauer untersucht.

Hierzu wird in Abb. 17 der Boxplot zur Präferenz vor dem Sport und in Abb. 18 zur Präferenz

gen vor und nach dem Sport verdeutlicht erneut die komplexen und instationären Bedingungen, da die Temperaturen bei mittelschwerer und extremer Anstrengung nach dem Sport signifikant kühler präferiert werden als vor dem Sport.

Diese Analysen verdeutlichen, dass sowohl die Operativtemperatur als auch der Anstrengungsgrad wichtige Faktoren für die Zufriedenheit der Sporttreibenden mit der thermischen Behaglichkeit darstellen.

Abb. 17: Boxplot der Befragungsergebnisse zur Präferenz der Temperatur vor dem Sport in Abhängigkeit des subjektiven Anstrengungsgrades (Sommer).



Um den kombinierten Einfluss von Operativtemperatur und Anstrengungsgrad zu analysieren, wird in Abb. 19 ein gruppiertes Boxplot-Diagramm zur Präferenz der Temperatur nach dem Sport dargestellt. Bei leichter Anstrengung

zeigt sich die Tendenz, dass Temperaturen von 17 und 22 °C wärmer bevorzugt werden. Hingegen wird die Temperatur von 23 °C tendenziell kühler präferiert. Mit zunehmendem Anstrengungsgrad verschiebt sich die bevorzugte

Abb. 18: Boxplot der Befragungsergebnisse zur Präferenz der Temperatur nach dem Sport in Abhängigkeit des subjektiven Anstrengungsgrades (Sommer).

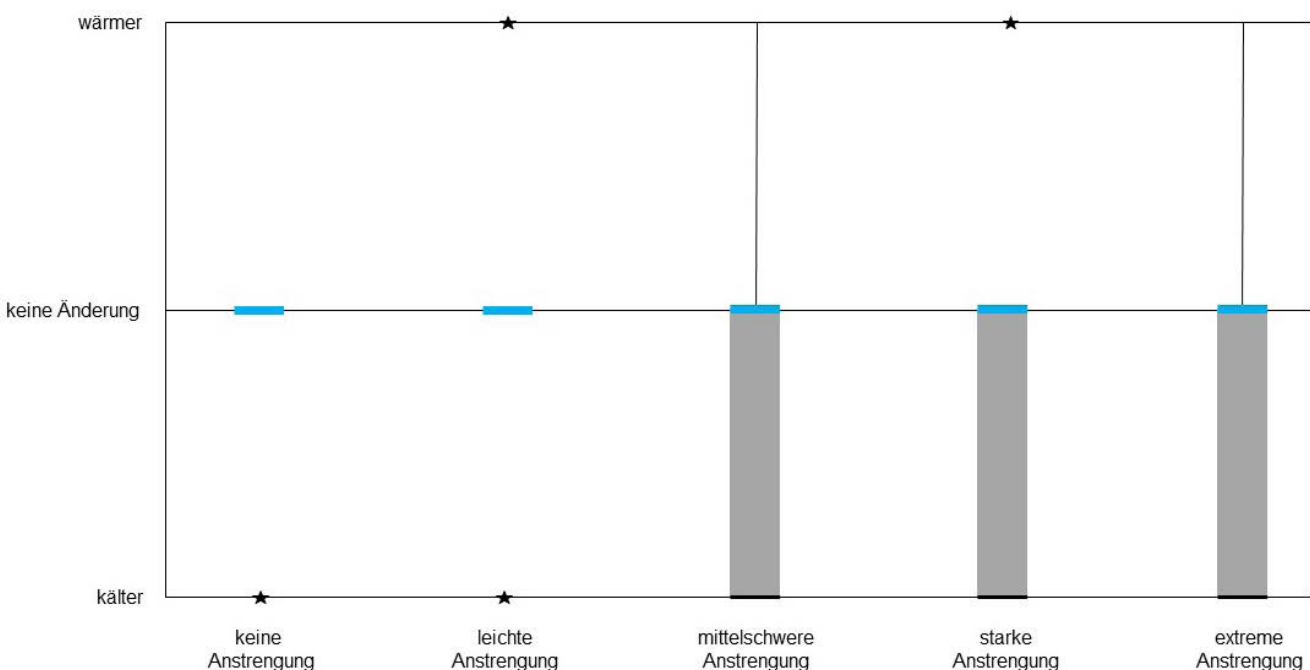
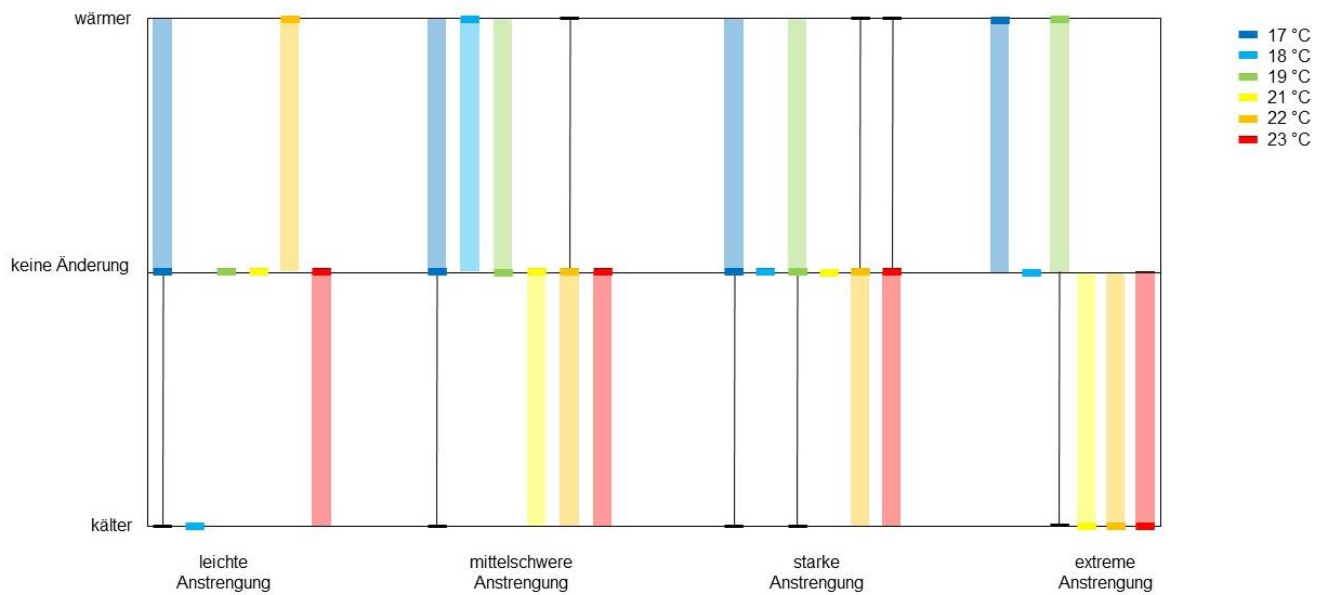


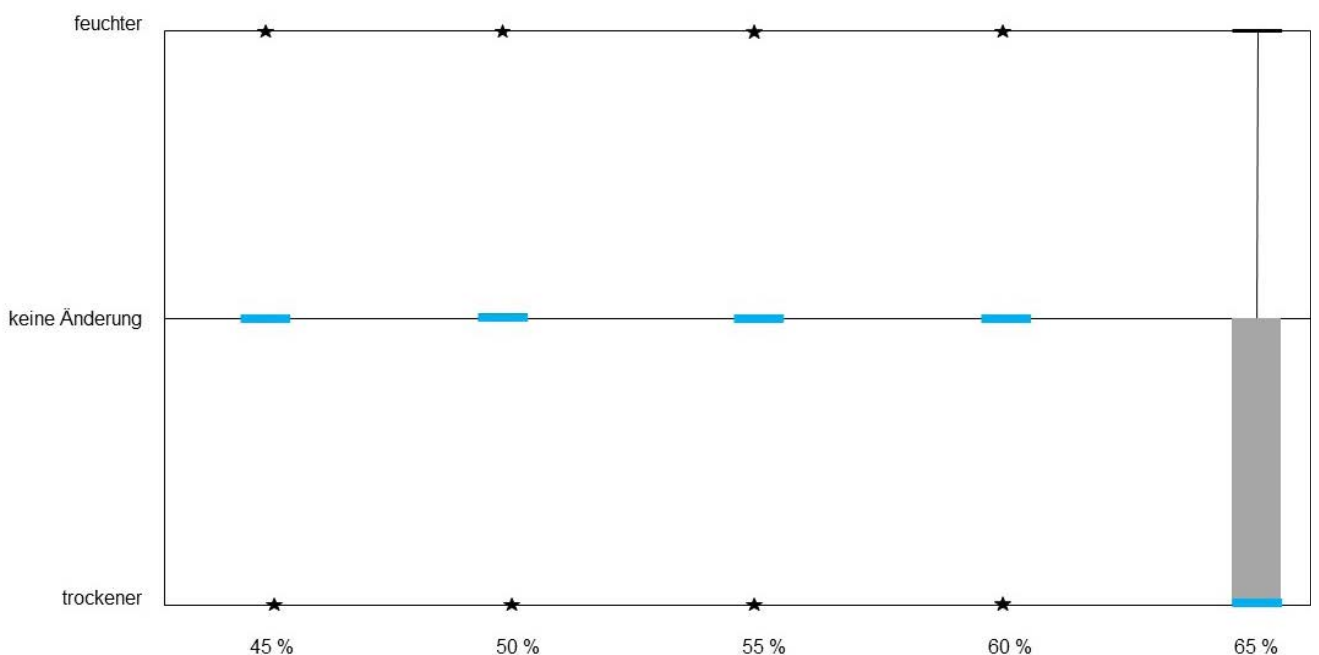
Abb. 19: Boxplot der Befragungsergebnisse zur Präferenz der Temperatur nach dem Sport in Abhängigkeit des subjektiven Anstrengungsgrades und der gemessenen Operativtemperatur (Sommer).



Temperatur, bei der keine Änderung gewünscht wird, hin zu kühleren Werten. Bei mittelschwerer Anstrengung zeigt sich beispielsweise eine Tendenz, dass der Temperaturbereich zwischen 21 und 23 °C kühler und der Bereich von 17 bis

19 °C tendenziell wärmer präferiert wird. Zudem kann aus Abb. 20 entnommen werden, dass relative Luftfeuchten von über 65 % vermieden werden sollten, da hier eine trockenere Luft präferiert wird.

Abb. 20: Boxplot der Befragungsergebnisse zur Präferenz der Luftfeuchte nach dem Sport in Abhängigkeit der gemessenen relativen Luftfeuchte (Sommer).

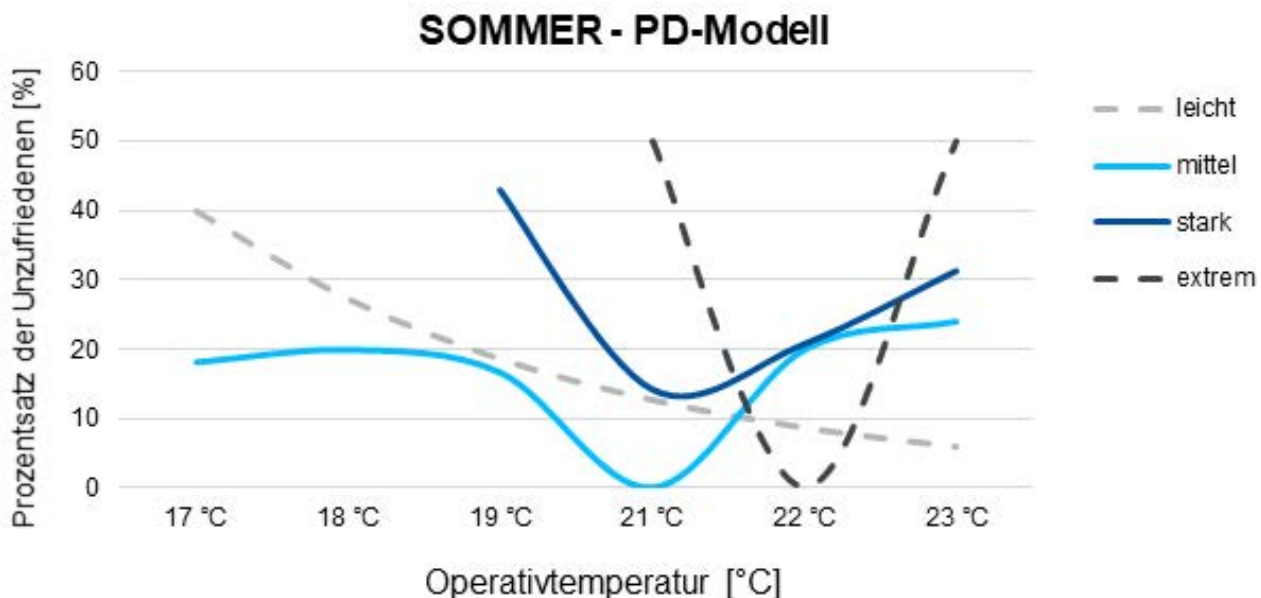


Aus den gewonnenen Erkenntnissen und den Befragungsergebnissen zur Zufriedenheit mit der thermischen Behaglichkeit lässt sich das PD-Modell ableiten, welches den beobachteten Prozentsatz der Unzufriedenen in Abb. 21 darstellt. Dabei werden gestrichelte Kurven für die leichte und extreme Anstrengung gewählt, da die Stichprobengröße in diesen Fällen zu gering ist, um statistisch aussagekräftige Ergebnisse zu erzielen. Zudem stellt die Kurve für leichte Anstrengung eine Trendlinie dar, da für den Temperaturbereich von 18 bis 22 °C keine ausreichenden Daten vorliegen. Deutlich ersichtlich ist jedoch, dass die Zufriedenheit mit der thermischen Umgebung abhängig ist vom Anstrengungsgrad. Bei mittlerer Anstrengung führt die Operativtemperatur von 21 °C zu 0 % beobachteten Unzufriedenen, wohingegen bei starker Anstrengung knapp 15 % der Sporttreibenden mit der thermischen Umgebung unzufrieden sind. Bei leichter Anstrengung führen höhere Temperaturen tendenziell zu geringerer Unzufriedenheit.

hersagemodell abzuleiten, da viele Einflussvariablen nicht kontrollierbar sind, wie zum Beispiel das Alter, die körperliche Fitness, die Motivation zur Teilnahme an der Studie und auch die relevanten physikalischen Messgrößen.

Der Temperaturbereich um 20 °C konnte beispielsweise nicht abgedeckt werden, da keine Fragebögen zu Zeiten ausgefüllt wurden, an denen die Temperatur herrschte. Die Eliminierung dieser sogenannten Störvariablen hat zur Folge, dass die Stichproben innerhalb einer einheitlichen Gruppe sehr klein und zwischen den Gruppen sehr unterschiedlich werden, was wiederum statistische Auswertungen erschwert. Dies kann auch der Grund dafür sein, weshalb innerhalb der Untersuchungen dieses Projekts nahezu keine statistisch signifikanten Ergebnisse festgestellt werden können. Denn bereits die Gruppierung nach Anstrengungsgrad und Operativtemperatur führt dazu, dass die Stichprobengrößen zu unterschiedlich werden, um sie quantitativ zu verglei-

Abb. 21: Beobachteter Prozentsatz der Unzufriedenen in Abhängigkeit von der Operativtemperatur und dem subjektiven Anstrengungsgrad im Sommer.



Es ist wichtig anzumerken, dass das PD-Modell den beobachteten Prozentsatz der Unzufriedenen (percentage of dissatisfied) darstellt und somit kein Vorhersagemodell, sondern ein Beobachtungsmodell ist. Es hat sich gezeigt, dass eine Feldstudie nicht geeignet ist, um ein Vor-

chen. Dennoch schmälert das die Aussagekraft der beschriebenen Ergebnisse nicht. Denn wenn bereits bei solch diversen Stichproben Tendenzen identifiziert werden können, liegt die Annahme nahe, dass diese sich bei einheitlichen Stichproben als signifikante Effekte herausstellen.

5.5.2 Winter

In Abb. 22 ist der Boxplot zur Präferenz der Temperatur in Abhängigkeit der gemessenen Operativtemperatur dargestellt. Es zeigt sich, dass vor dem

Abb. 22: Boxplot der Befragungsergebnisse zur Präferenz der Temperatur vor dem Sport in Abhängigkeit der gemessenen Operativtemperatur (Winter).

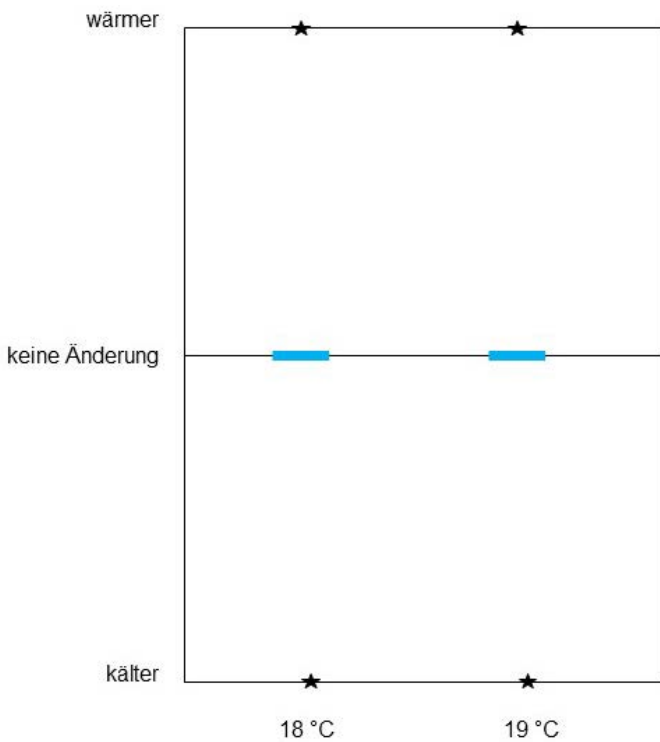
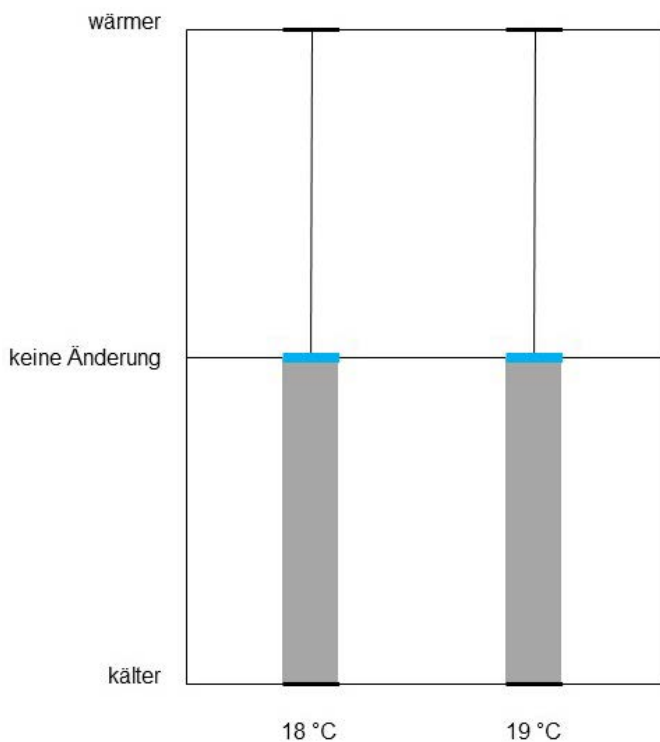


Abb. 23: Boxplot der Befragungsergebnisse zur Präferenz der Temperatur nach dem Sport in Abhängigkeit der gemessenen Operativtemperatur (Winter).



Sport im Mittel keine Veränderung der Temperatur präferiert wird. Ebenso ergibt sich nach dem Sport im Durchschnitt keine bevorzugte Änderung der Temperatur. Interessanterweise gibt es jedoch in beiden Temperaturbereichen, nämlich 18 und 19 °C, die Tendenz, eine kühlere Umgebung zu bevorzugen, wie in Abb. 23 ersichtlich ist. Es lassen sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den verschiedenen Temperaturbereichen feststellen. Durch den Mittelwertvergleich bei gepaarten Stichproben zeigt sich, dass die operativen Temperaturen von 18 und 19 °C nach dem Sport signifikant kühler präferiert werden als vor dem Sport. Diese Beobachtung verdeutlicht erneut die Komplexität der instationären Bedingungen eines Sporttreibenden. Temperaturen, die vor dem Sport als angenehm empfunden werden, können aufgrund der gesteigerten Wärmeproduktion während und nach dem Sport Unzufriedenheit hervorrufen.

In Abb. 24 ist der Boxplot zur Zufriedenheit mit der thermischen Behaglichkeit in Abhängigkeit der gemessenen Operativtemperatur dargestellt. Positive Werte stehen hierbei für Zufriedenheit und negative für Unzufriedenheit. Beide Temperaturbereiche werden im Mittel neutral bis tendenziell zufriedenstellend bewertet. Zwischen

Abb. 24: Boxplot der Befragungsergebnisse zur Zufriedenheit mit der thermischen Behaglichkeit nach dem Sport in Abhängigkeit der gemessenen Operativtemperatur (Winter).

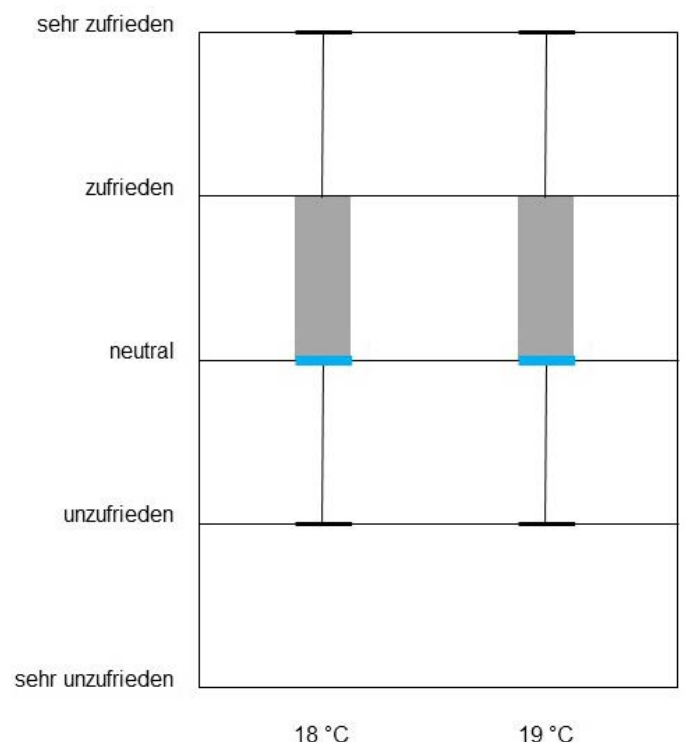
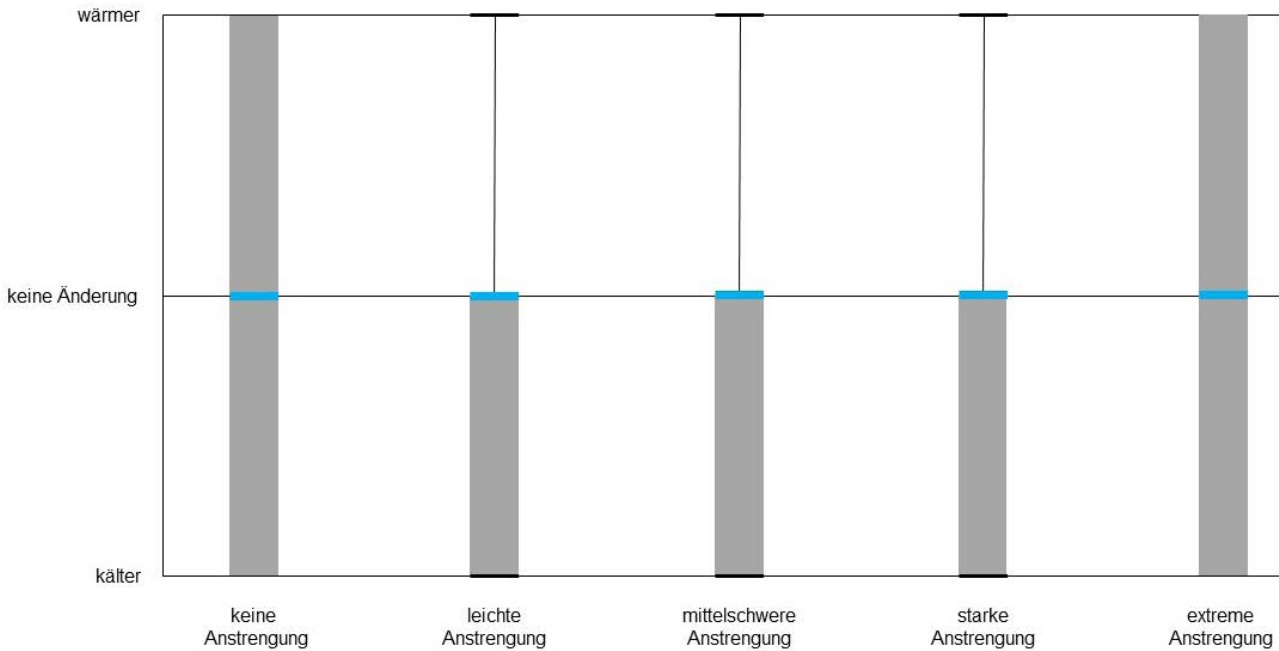


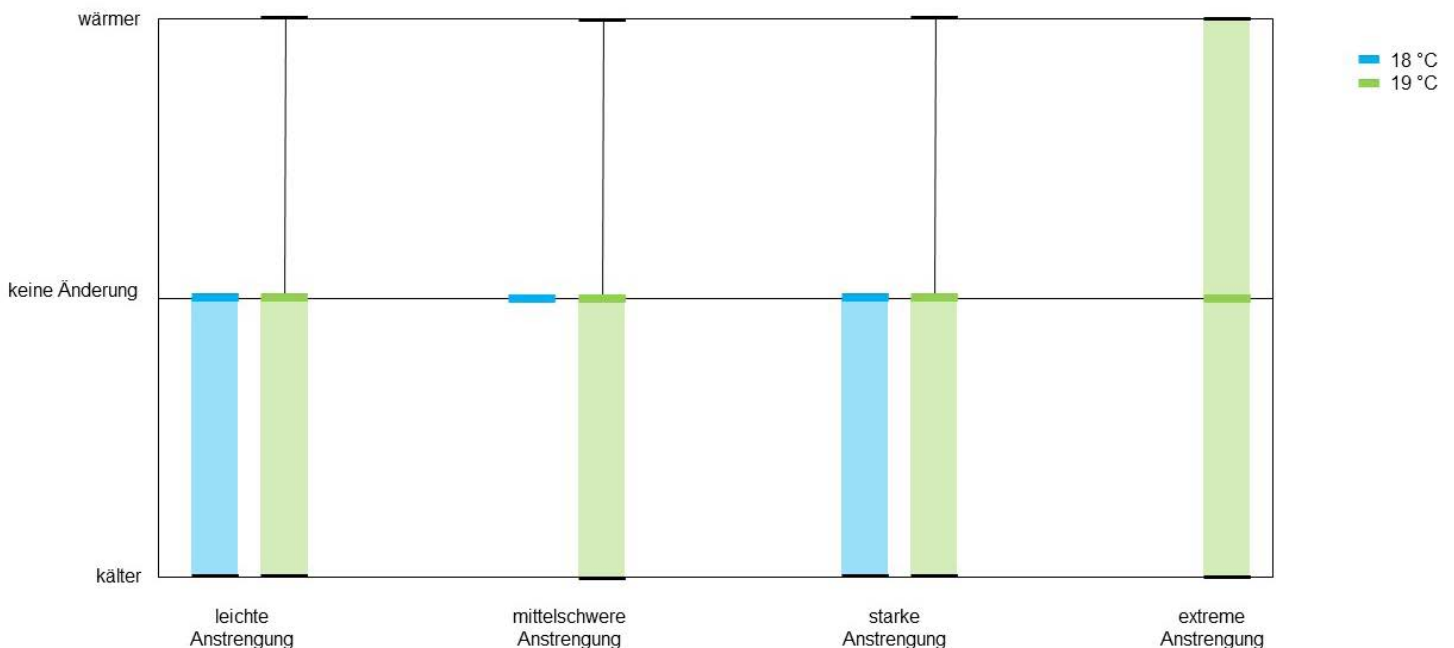
Abb. 25: Boxplot der Befragungsergebnisse zur Präferenz der Temperatur nach dem Sport in Abhängigkeit des subjektiven Anstrengungsgrades (Winter).



den Temperaturbereichen kann kein signifikanter Unterschied festgestellt werden. In Verbindung mit den Erkenntnissen der Präferenzanalyse führt eine tendenziell kühler bevorzugte Umgebung dennoch zu einer neutralen bis zufriedenstellenden Bewertung der thermischen Behaglichkeit.

Daraus lässt sich ableiten, dass bei den vorliegenden winterlichen Außenklimabedingungen eine operative Betriebstemperatur von 18 bis 19 °C als geeignet angesehen werden kann. Es ist anzunehmen, dass eine etwas kühlere Umgebung, insbesondere während und nach dem

Abb. 26: Boxplot der Befragungsergebnisse zur Präferenz der Temperatur nach dem Sport in Abhängigkeit des subjektiven Anstrengungsgrades und der gemessenen Operativtemperatur (Winter).



Sport, zu einer erhöhten Zufriedenheit führen kann. Allerdings zeigen die signifikanten Unterschiede bei der Präferenz vor und nach dem Sport, dass die Bewertung durch körperliche Aktivität beeinflusst wird. Aus diesem Grund wird im nächsten Schritt der Einfluss des subjektiven Anstrengungsgrades untersucht.

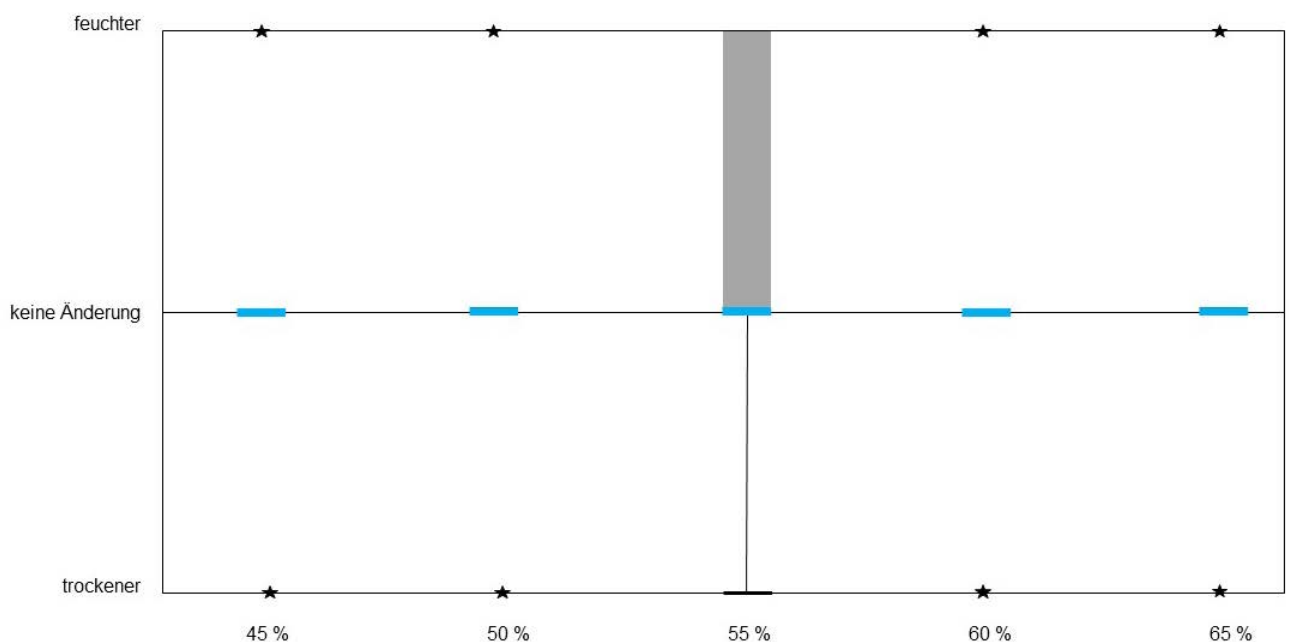
In Abb. 25 ist der Boxplot zur Temperaturpräferenz nach dem Sport in Abhängigkeit des Anstrengungsgrades dargestellt. Vor dem Sport wird im Mittel keine Änderung der Temperatur bevorzugt. Nach dem Sport zeigt sich bei leichter bis schwerer Anstrengung eine tendenzielle Präferenz für kühlere Temperaturen, wobei keine signifikanten Unterschiede zwischen den verschiedenen Anstrengungsgraden festgestellt werden können. Der Vergleich zwischen den Bewertungen vor und nach dem Sport verdeutlicht erneut die instationären Bedingungen, da bei allen Anstrengungsgraden die Temperaturen nach dem Sport signifikant kühler präferiert werden als vor dem Sport. Diese Analysen verdeutlichen, dass auch im Winter sowohl die Betriebstemperatur als auch der Anstrengungsgrad entscheidende Faktoren für die Zufriedenheit von Sporttreibenden in Bezug auf die thermische Behaglichkeit darstellen.

Zur Analyse des kombinierten Einflusses von Operativtemperatur und Anstrengungsgrad ist in Abb. 26 der Boxplot zur Temperaturpräferenz nach dem Sport dargestellt, gruppiert nach diesen Einflussgrößen. Bei allen Anstrengungsgraden zeigt sich im Mittel keine Präferenz für eine Änderung der Temperatur. Allerdings ist bei leichter bis starker Anstrengung eine Tendenz zu einer kühleren Umgebung erkennbar. Für die leichte und extreme Anstrengung liegen aufgrund einer kleinen Stichprobengröße mit großer Streuung keine eindeutigen Tendenzen vor.

Zudem kann aus Abb. 27 entnommen werden, dass eine relative Luftfeuchte von über 40 bis 55 % im Mittel zu keinem Änderungswunsch führt, wobei 50 % tendenziell feuchter präferiert wird.

Aus diesen Erkenntnissen und den Befragungsergebnissen zur Zufriedenheit mit der thermischen Behaglichkeit lässt sich das in Abb. 28 dargestellte PD-Modell ableiten. PD steht hierbei für den beobachteten Prozentsatz der Unzufriedenen. Lediglich für den mittleren Anstrengungsgrad konnten beide Temperaturbereiche ausgewertet werden, da hier ausreichende Stichprobengrößen vorhanden sind. Für die anderen

Abb. 27: Boxplot der Befragungsergebnisse zur Präferenz der Luftfeuchte nach dem Sport in Abhängigkeit der gemessenen relativen Luftfeuchte (Winter).



Anstrengungsgrade liegen bei 18 °C nicht genügend Daten vor, weshalb sie als Punkte markiert sind. Zudem war es nicht möglich, die in der DIN 18032-1 empfohlene Nutzungstemperatur von 17 °C abzudecken, da diese Temperatur während des Sportbetriebs im Winter nicht gemessen wurde. Deutlich ersichtlich ist jedoch, dass die Zufriedenheit mit der thermischen Umgebung abhängig ist vom Anstrengungsgrad. Beispielsweise führt eine Operativtemperatur von 19 °C bei mittlerer Anstrengung zu knapp 10 % unzufriedenen Sporttreibenden, bei extremer Anstrengung sind es bereits über 30 %.

5.6 Fazit zur Aufenthaltsqualität

Zufriedenheit mit der thermischen Behaglichkeit ist von verschiedenen Faktoren abhängig, darunter insbesondere der Operativtemperatur und dem Anstrengungsgrad. Es zeigt sich, dass eine tendenziell kühlere Umgebung nach sportlicher Aktivität bevorzugt wird, insbesondere bei mittelschwerer bis extremer Anstrengung. Bei maximalen Außenlufttemperaturen von 15 bis 24,5 °C führen operative Betriebstemperaturen zwischen 21 und 22 °C zu dem geringsten Anteil an Unzufriedenen, wobei relative Luftfeuchten von über 65 % vermieden werden sollten. Unter winterlichen Außenklimabedingungen mit Maximaltemperaturen von 3,3 bis 7,7 °C kann eine operative Betriebstemperatur von 18 °C als angemessen betrachtet werden, wobei sich eine

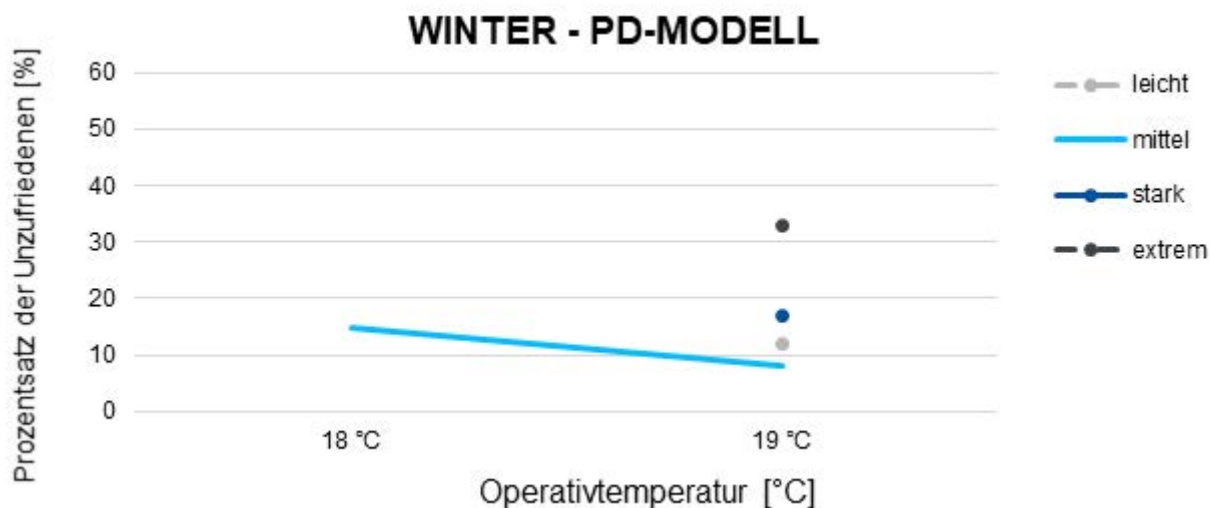
Tendenz zu einer kühler bevorzugten Umgebung abzeichnet. Dies deutet darauf hin, dass die in der DIN 18032-1 empfohlene Nutzungstemperatur von 17 °C im Winter durchaus sinnvoll sein kann, auch wenn sie in diesem Projekt nicht explizit untersucht werden konnte.

Es ist zu empfehlen, die Nutzungstemperatur entsprechend des Außenklimas zu differenzieren und als Operativtemperatur zu definieren. Zusammenfassend ermöglichen die gewonnenen Erkenntnisse die Empfehlung einer operativen Betriebstemperatur von maximal 18 °C im Winter und 22 °C im Sommer, zudem ist die operative Betriebstemperatur an die spezifische Nutzungssituation anzupassen.

Es muss jedoch angemerkt werden, dass die vorliegenden Ergebnisse aufgrund der Komplexität und Unkontrollierbarkeit vieler Einflussvariablen sowie der begrenzten Stichprobengröße statistisch gesehen nicht immer signifikant sind. Dennoch deuten die Tendenzen und Beobachtungen darauf hin, dass bei einheitlichen Stichproben signifikante Effekte festgestellt werden könnten.

Die Studie zeigt auch, dass eine Feldstudie zur Ableitung eines Vorhersagemodells weniger geeignet ist, da zu viele nicht kontrollierbare Variablen vorhanden sind. Dennoch stellt das PD-Modell eine nützliche Methode dar, um den beobachteten Prozentsatz der Unzufriedenen darzustellen und Tendenzen aufzuzeigen.

Abb. 28: Beobachteter Prozentsatz der Unzufriedenen in Abhängigkeit von der Operativtemperatur und dem subjektiven Anstrengungsgrad im Winter.



Insgesamt unterstreichen diese Erkenntnisse die Bedeutung von individuellen Präferenzen und der Berücksichtigung von Anstrengungsgrad und Außenklimabedingungen für die Zufriedenheit mit der thermischen Behaglichkeit. Es liegt nahe, dass weitere Felduntersuchungen mit größeren und Laborstudien mit homogeneren

Stichproben durchgeführt werden sollten, um die Zusammenhänge und Effekte genauer zu erforschen und möglicherweise ein aussagekräftigeres Vorhersagemodell zu entwickeln. Dennoch legt dieses Projekt den Grundstein für zukünftige Forschungsarbeiten und bietet eine erste Datengrundlage mit bedeutenden Anhaltspunkten.

6 Simulative Untersuchungen zur Energieeffizienz

6 Simulative Untersuchungen zur Energieeffizienz

Die Software WUFI® Plus (Fraunhofer IBP) stellt ein umfassendes Instrument zur ganzheitlichen Bewertung des hygrothermischen Verhaltens von Gebäuden dar. Es ermöglicht die Simulation der hygrothermischen Bedingungen in Bauteilen sowie des Raumklimas in Abhängigkeit von den äußeren klimatischen Bedingungen. Dadurch eignet es sich vor allem für Fragestellungen bezüglich Komfort und Energiebedarf unter instationären Bedingungen. Die Simulation der Wechselwirkung zwischen Gebäude, Nutzenden/Nutzung und technischen Anlagen erlaubt eine ganzheitliche Bewertung des Raumklimas unter Berücksichtigung des erforderlichen Heiz- und Kühlenergiebedarfs.

6.1 Randbedingungen

Es sind Geometrien und Konstruktionen zu implementieren, die in einzelne Zonen unterteilt werden können. Zudem ist die Wahl der äußeren klimatischen Bedingungen und die Simulationsdauer festzulegen. Informationen zu Sollwerten, Anlagentechnik, Lüftung und internen Lasten vervollständigen die Eingabe.

6.1.1 Gebäudegeometrie und Konstruktionen

Die Eingabe der Gebäudegeometrie ist zwingend erforderlich und entspricht den in Kapitel 3.2.1 entwickelten Modellgrundrissen. Es ist anzumerken, dass die Platzierung der Fenster ausschließlich unter energetischen Gesichtspunkten erfolgt, ohne Berücksichtigung von architektonischen oder optischen Aspekten. Um den jeweiligen Fensterrahmen und damit die Verringerung des transparenten Bereichs zu berücksichtigen, wird ein Rahmenreduktionsfaktor von 0,65 gewählt. Es wird davon ausgegangen, dass in der Realität Maßnahmen zur Beschattung getroffen werden, um eine blendfreie Umgebung für die Sporttreibenden zu gewährleisten. Innerhalb dieser Untersuchungen wird angenommen, dass diese Maßnahmen größtenteils

durch den Einsatz von innenliegenden Vorhängen oder Jalousien erfolgen, die energetisch nicht signifikant sind. Daher werden derartige Beschattungsvorrichtungen nicht berücksichtigt.

Jedem Bauteil wird anschließend eine spezifische Konstruktion zugeordnet. Es ist zu beachten, dass Bauteilschichten, die einen vernachlässigbaren Einfluss auf die energetischen Eigenschaften der Gesamtkonstruktion haben (z.B. ein Anstrich oder eine Dampfsperre), vollständig vernachlässigt werden. Für die im Rahmen der energetischen Kategorisierung erfassten Bauteile sind die Bauteile so definiert, dass sie genau den Anforderungen gemäß 3.2.3 entsprechen. Dabei werden sehr detaillierte Angaben zu den Dicken gemacht, die in mehreren Nachkommastellen im Zentimeterbereich liegen. Diese detaillierten Dicken wurden jedoch nicht tatsächlich verbaut, sondern lediglich gewählt, um den energetischen Anforderungen gerecht zu werden. Dabei werden die erwarteten Bauteildicken nicht überschritten, da dies Auswirkungen auf das Raumluftvolumen und den Lüftungswärmeverlust haben würde. Für jede Hallengröße wird somit ein Standardgeometrie-Modell mit je fünf energetischen Kategorie-Modellen im Programm implementiert.

6.1.2 Thermische Anforderungsbereiche

Die Annahme, dass sich die gleichen raumklimatischen Parameter im gesamten Gebäude befinden und daher keine Zonierung vorliegt, würde dazu führen, dass die Innenräume vollständig adiabatisch wären. Dies ist nicht realistisch. Eine differenzierte Betrachtung ist in diesem Zusammenhang unerlässlich. Gemäß der Norm DIN 18032-1 (DIN 18032-1:2014-11), Abschnitt 9 „Heizung“, werden für die Berechnung der Heizungsanlage sowie für den energetischen Nachweis gemäß DIN V 18599 (DIN V 18599-13) folgende Auslegungswerte zur Untergliederung

der Zonen festgelegt. Zudem ist eine Raumtemperatur von 10 °C mindestens einzuhalten (DIN 18032-1:2014-11).

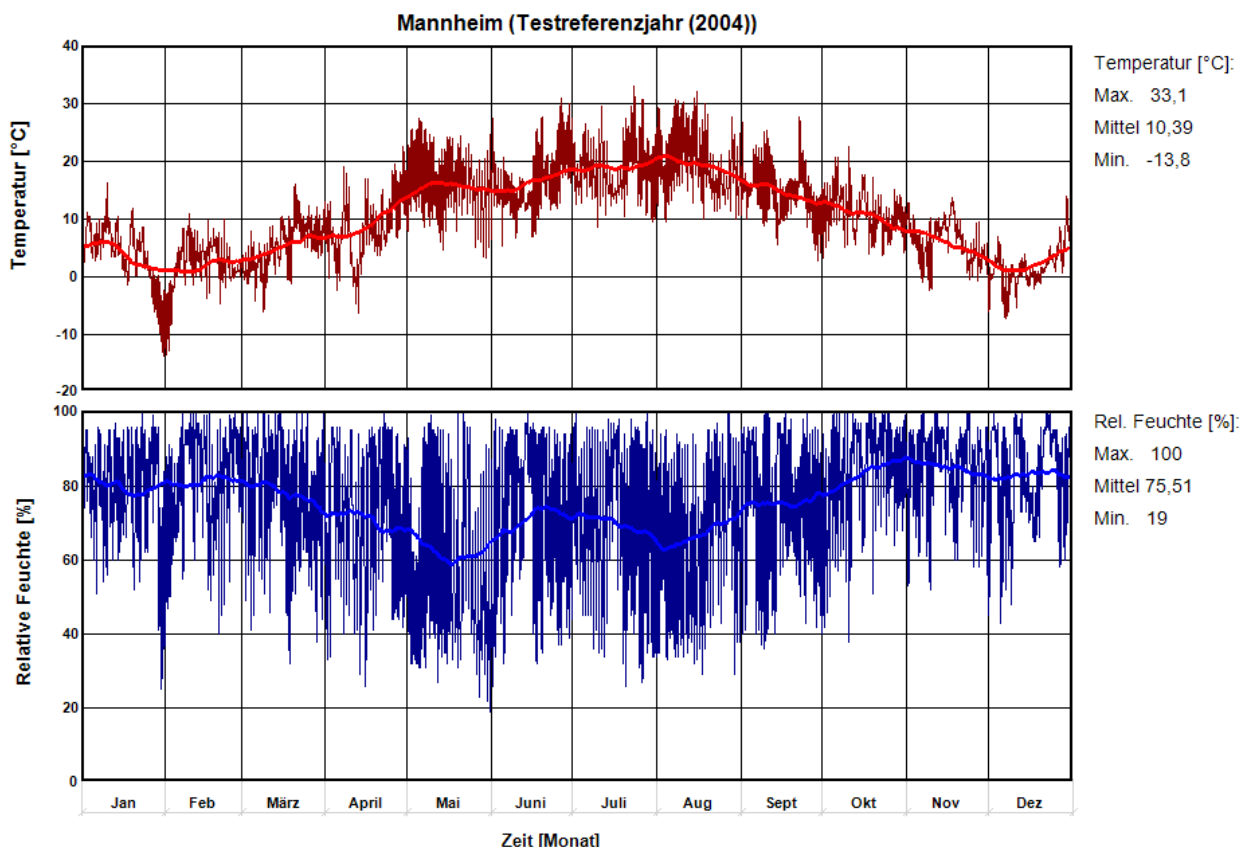
- Halle und Zusatzräume: 20 °C
- Duschräume: 24 °C
- Umkleieräume: 22 °C
- Toiletten: 15 °C
- Treppenträume und Flure: 12 °C

6.1.3 Klimatische Randbedingungen

Um das Erdreich angemessen zu beschreiben, muss ein sogenanntes „Optimales Klima an der Oberfläche“ definiert werden. Dabei können Standardwerte und konstante Temperaturen verwendet werden. Allerdings sind beide Ansätze nicht realitätsgetreu. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit eine Bodentemperatur angenommen, die durch eine Sinuskurve mit dem Mittelwert von 9 °C und einer Amplitude von 5 K beschrieben wird (Rietschel, 2021). Dieser Ansatz nähert sich dem Boden in den entsprechenden Regionen sehr gut an und liefert eine hinreichend genaue Approximation (Rietschel, 2021).

Im Rahmen der Parameterstudie wird Mannheim als Standort und somit das dort herrschende Klima für die Hallen gewählt. Es sei jedoch angemerkt, dass in dieser Studie die Annahme getroffen wird, dass der Standort keinen maßgeblichen Einfluss auf die Beziehung zwischen den Simulationsergebnissen hat und somit die allgemeine Gültigkeit der abgeleiteten Schlussfolgerungen nicht in Frage stellt. Mit dem Begriff „Standort“ ist hier ein beliebiger Ort in Deutschland gemeint, ohne besondere Berücksichtigung der Mikrolage. Faktoren wie ungewöhnliche Exposition, erhebliche Beschattung oder die Nähe zu witterungsregulierenden Gewässern sind Beispiele für Mikrolagefaktoren, die den Heizenergiebedarf beeinflussen können, jedoch in dieser Arbeit nicht weiter berücksichtigt werden (Rietschel, 2021). Die dabei in der Datenbank des Simulationsprogramms (Fraunhofer IBP) hinterlegten Temperaturen und relativen Feuchten aus dem Testreferenzjahr 2004 können Abb. 29 entnommen werden. Die gewählte Simulationsdauer beträgt ein vollständiges Kalenderjahr.

Abb. 29: Außenklimabedingungen für die simulative Untersuchung. Mannheim (Testreferenzjahr 2004) (Fraunhofer IBP).



6.1.4 Anlagentechnik - Heizung und Kühlung

Die Heizung und Kühlung ist in ihrer Anlagentechnik grob zu skizzieren. Hierfür sind die maximale Heiz- und Kühlleistung und ihre prozentuale Zuteilung auf die verschiedenen Zonen zu definieren. Dabei beziehen sich diese Zonen auf die Anforderungsbereiche gemäß Kapitel 6.1.2.

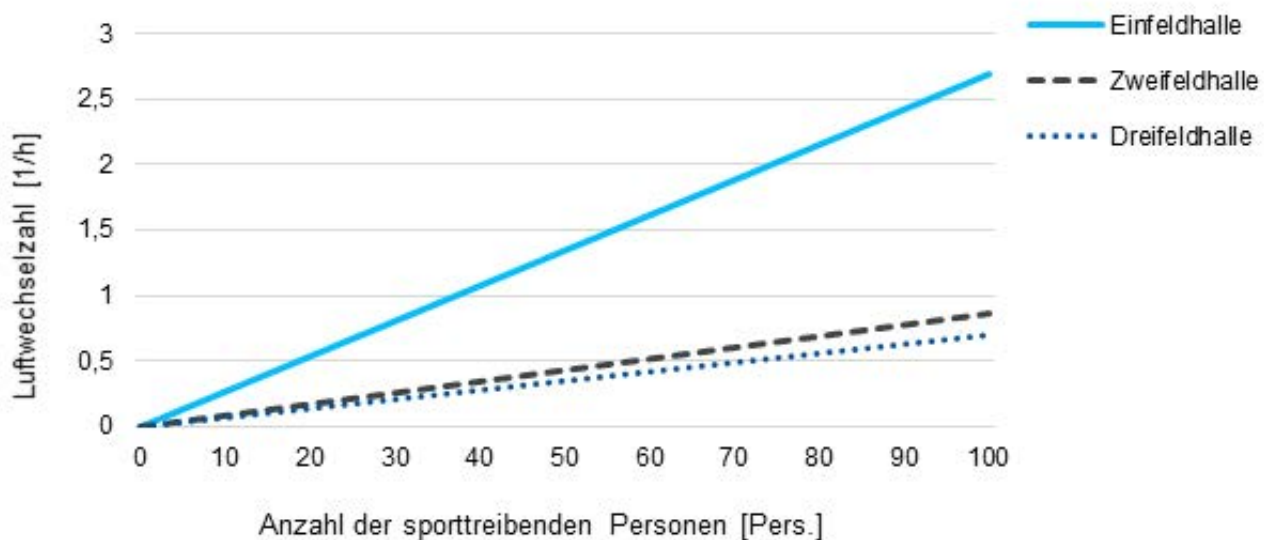
Hierbei kann einerseits auf die Daten von Bestandshallen zurückgegriffen werden, oder, für dieses Projekt zielführender, eine ideale Heiz- und Kühlanlage mit unendlicher Leistung angenommen werden. Die ideale Anlage wird in der Simulation genau so viel Energie benötigen, dass die in der Parameterstudie geforderten Temperaturen eingehalten werden können. Dies bedeutet, dass die Simulationsergebnisse den Energiebedarf für die Gewährleistung eines idealen Klimas beschreiben.

6.1.5 Lüftung

Raumlufttechnische (RLT) Anlagen werden immer dann eingesetzt, wenn die Nutzenanforderungen an das Bauwerk dies erforderlich machen. Es ist grundsätzlich wichtig sicherzustellen, dass die raumklimatischen Parameter möglichst ohne eine solche Anlage erreicht werden können und daher auf eine mechanische

Belüftung mit Konditionierung der Luft verzichtet werden kann. In Innenräumen von Sporthallen ist der Hauptfaktor, der eine hohe Luftwechselrate erforderlich macht, die Abführung von Lasten. In den Sanitärräumen müssen insbesondere Feuchtlasten abgeführt werden, während in der Halle selbst Stofflasten der Sporttreibenden abzuführen sind. In der DIN 18032-1 (DIN 18032-1:2014-11) ist für Sporttreibende eine Frischluftzufuhr von 60 m³/h und für Zuschauende ein Wert von 20 m³/h angegeben. Wenn keine raumlufttechnische Anlage eingesetzt wird, gibt die DIN 18032-1 (DIN 18032-1:2014-11) einen 1-fachen Luftwechsel bei natürlicher Belüftung an. In Abb. 30 ist die aus den Norm-Angaben zu einer RLT-Anlage abgeleitete Luftwechselzahl in Abhängigkeit der Anzahl der sporttreibenden Personen dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Anforderungen an den Luftwechsel bei Nutzung einer RLT-Anlage teilweise deutlich die Anforderung an die natürliche Lüftung unterschreiten. Bei einer Einfeldhalle könnte beispielsweise bei 20 sporttreibenden Personen die Luftwechselzahl um die Hälfte reduziert werden. Bei Zwei- und Dreifeldhallen sogar bei einer Personenanzahl von ca. 70. Daher wird eine Parameterstudie zum Einfluss der Lüftung auf den Energiebedarf durchgeführt. Für den Infiltrations-Luftwechsel, welcher durch Undichtigkeiten hervorgerufen wird, wird einheitlich ein Wert von 0,1/h angenommen.

Abb. 30: Aus dem Außenluftvolumenstrom je Sporttreibendem nach DIN 18032-1 (60 m³/Pers.) und den geometrischen Kenngrößen der Hallentypen abgeleitete geforderte Luftwechselzahl in Abhängigkeit der Anzahl der sporttreibenden Personen.



6.2 Parameterstudien

Für die Ableitung von Energieeinsparpotentialen in Sporthallen werden Referenzgrößen für geometrische und energetische Kategorien benötigt. Diese Referenzgrößen werden anhand der Kenngrößen gemäß Tabelle 14 und den Anforderungen der aktuellen DIN 18032-1 (DIN 18032-1:2014-11) ermittelt.

Zunächst wird der Einfluss der Hallenbetriebs-temperatur auf den Energiebedarf untersucht. Dadurch kann das Energieeinsparpotential durch die Reduktion oder Erhöhung der Temperatur quantifiziert werden, abhängig von den nutzungsspezifischen Anforderungen an die Aufenthaltsqualität, siehe Kapitel 5.

Da der theoretische Mindestluftwechsel mit RLT-Anlage die Anforderungen der DIN 18032-1 (DIN 18032-1:2014-11) an die natürliche Lüftung teilweise deutlich unterschreitet und die Möglichkeit, die Lüftung mit einer RLT-Anlage nutzungsspezifisch, d.h. in Bezug auf die Anzahl

und die Tätigkeit der Sporttreibenden, anzupassen, wird zudem eine Parameterstudie zum Einfluss des Luftwechsels durchgeführt.

Angesichts des Klimawandels und möglicher Hitzeereignisse werden Kühlungsmaßnahmen zur Gewährleistung gesunder und komfortabler Bedingungen für die Sporttreibenden zunehmend bedeutsamer. Vor diesem Hintergrund wird eine Parameterstudie durchgeführt, um den zusätzlichen Energiebedarf für die Kühlung zu bestimmen.

Als eine betriebliche Maßnahme zur Reduktion des Energiebedarfs wird der Einfluss einer Nacht- und Tagabsenkung, zu Zeiten in denen die Halle nicht genutzt wird, untersucht. Zudem bieten bauliche Maßnahmen, insbesondere die Erhöhung des Wärmedurchgangswiderstands von Außenbauteilen, ein großes Energieeinsparpotential. Hier wird insbesondere die Anhebung des energetischen Standards von Bestandshallen auf den des Gebäudeenergiegesetzes 2020 (GEG 20, 2020) diskutiert.

7 Simulationsergebnisse zur Energieeffizienz

7 Simulationsergebnisse zur Energieeffizienz

Um die Berechnungen der verschiedenen geometrischen Hallentypen miteinander vergleichen zu können, ist eine standardisierte Größe erforderlich. Eine Verwendung der Gesamtenergiebedarfe ohne Berücksichtigung der geometrischen Ausmaße der einzelnen Hallentypen ist nicht zielführend. Daher besteht die Notwendigkeit, die berechneten Energiebedarfe anzupassen. Die in dieser Studie angewendete Methodik orientiert sich an der Grundfläche der Hallen, um die Gesamtfläche und Wirtschaftlichkeit zu berücksichtigen. Es wird daher, sofern nicht explizit anders angegeben, der Heizenergiebedarf in kWh/m²a dargestellt. Es sei darauf hingewiesen, dass gemäß der DIN 277 die „Grundfläche“ die Brutto-Grundfläche (BGF) umfasst, einschließlich der Konstruktionsgrundfläche (KGF) und der Netto-Raumfläche (NRF). Diese Bereinigungsverfahren ist besonders geeignet, da sie leicht verständlich und in der Praxis von großer Relevanz ist (Rietschel, 2021).

7.1 Referenzgrößen – Energiebedarf nach Norm

Für die Ableitung von Energieeinsparpotenzialen müssen Referenzgrößen für die geometrischen und energetischen Kategorien definiert werden. Hierbei handelt es sich um die Energiebedarfe der Standardmodellgrundrisse gemäß Kapitel 3.2.1 in der Ausführung des jeweiligen zur Bauzeit geltenden energetischen Standards (siehe Tabelle 14) mit den in der DIN 18032-1 (DIN 18032-1:2014-11) angegebenen Anforderungen (siehe Kapitel 6.1.2) zur Berechnung des Energiebedarfs mit einer Hallenbetriebstemperatur (HBT) von 20 °C, einem Luftwechsel von 1/h und ohne zusätzliche Kühlung. Die Energiebedarfe nach Norm sind in Abb. 31 dargestellt.

Abb. 31: Heizenergiebedarfe der drei geometrischen Hallentypen je energetischem Standard zu geltenden Normbedingungen (Hallenbetriebstemperatur (HBT) 20 °C, ohne Kühlung, 1-facher Luftwechsel).

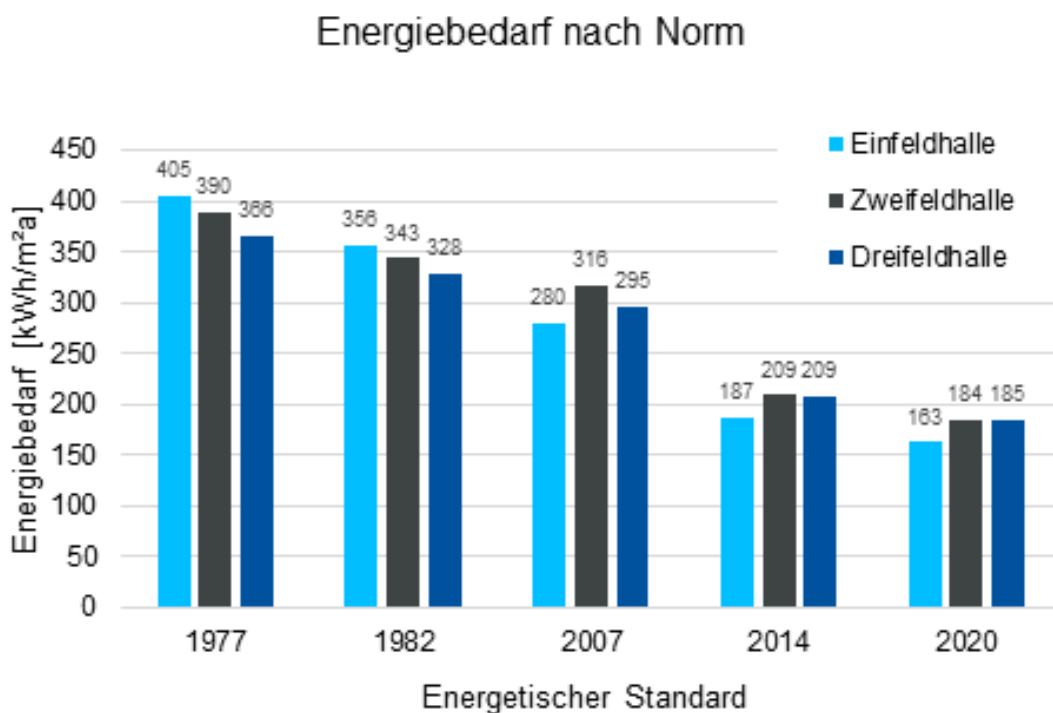
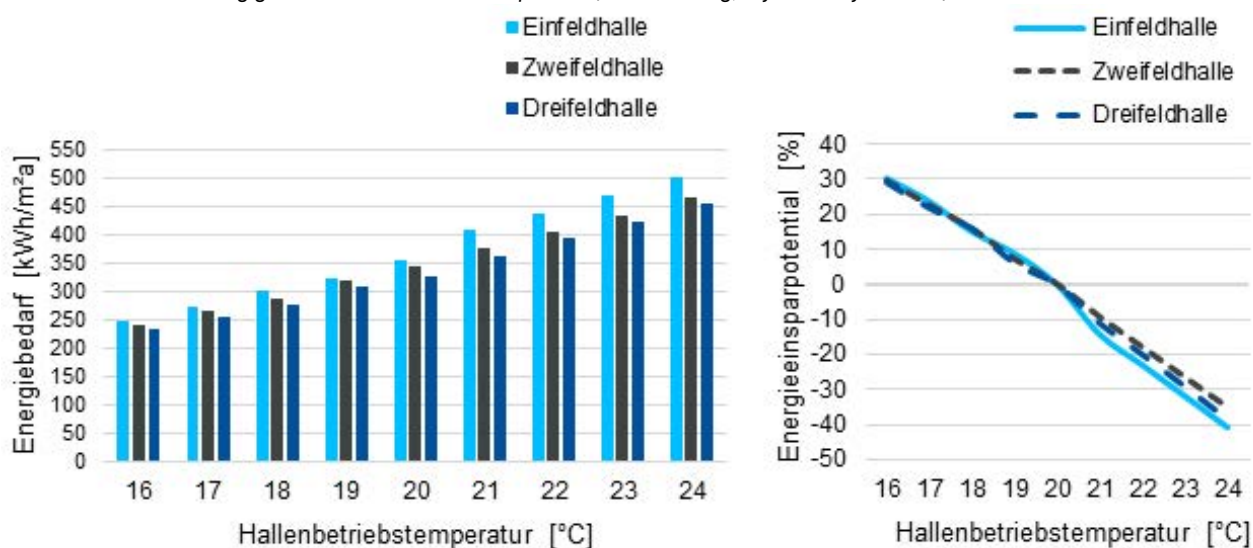


Abb. 32: Heizenergiebedarfe (links) und Energieeinsparpotential (rechts) der drei geometrischen Hallentypen mit energetischem Standard 1982 in Abhängigkeit der Hallenbetriebstemperatur (ohne Kühlung, 1-facher Luftwechsel).



In Bezug auf den Heizenergiebedarf lässt sich zunächst eine signifikante Veränderung zwischen den Standards 2007 und 2014 feststellen. Es ist jedoch anzumerken, dass in diesem Zeitraum mehrere kleinere Ordnungsänderungen stattgefunden haben, die allerdings keinen Einfluss auf die Ergebnisse dieses Projekts haben. Bemerkenswerter ist das Phänomen, wie sich die Energiebedarfe der verschiedenen Hallentypen im Laufe der Jahre zueinander verhalten. Einzelhallen mit Baujahr vor 2007 weisen pro Quadratmeter Grundfläche durchweg höhere und damit ineffizientere Heizenergiebedarfe auf als die Zweifeld- und Dreifeldhallen. Diese Dynamik ändert sich mit der Einführung der Energieeinsparverordnung 2007, wobei sich ein umgekehrter Zusammenhang einstellt. Der Grund hierfür ist, dass bei einer energetisch schlechten Gebäudehülle der geometrische Hüllflächenfaktor, auch bekannt als A/V-Verhältnis, eine entscheidende Rolle spielt. Mit zunehmend höheren Anforderungen an die energetische Ausführung der Gebäudehülle nimmt der Einfluss dieses Faktors jedoch ab. Das A/V-Verhältnis der Einfeldhalle (0,62) ist etwas höher als das der Zweifeld- (0,46) und Dreifeldhalle (0,45).

7.2 Variation der Hallenbetriebstemperatur

Zunächst wird untersucht, welchen Einfluss die Hallenbetriebstemperatur auf den Energiebedarf besitzt. Hierdurch kann das Energie-

einsparpotential bzw. der Mehrbedarf an Energie durch die Reduktion bzw. Erhöhung der Temperatur, je nach nutzungsdifferenzierter Anforderung an die Aufenthaltsqualität (siehe Kapitel 5), quantifiziert werden. Es sei angemerkt, dass innerhalb dieser Parameterstudie ausschließlich die Hallentemperatur zwischen 16 und 24 °C variiert wird, alle anderen Bereiche (Duschen, Umkleiden, Toiletten und Flure) und der Luftwechsel entsprechen weiterhin den Anforderungen der geltenden Norm DIN 18032-1 (DIN 18032-1:2014-11). In Abb. 32 sind links die Energiebedarfe der drei geometrischen Hallentypen mit energetischem Standard 1982 in Abhängigkeit der Hallenbetriebstemperatur dargestellt. Hierbei stellt sich erwartungsgemäß ein linearer Anstieg des Heizenergiebedarfs mit zunehmender Hallenbetriebstemperatur ein.

In Bezug zu der Referenz von 20 °C Hallenbetriebstemperatur ergibt sich das rechts dargestellte Energieeinsparpotential durch Variation der Hallenbetriebstemperatur. Durch eine Reduktion auf 16 °C besteht somit ein Energieeinsparpotential von bis zu 30 %. Dieser nahezu einheitlich lineare Zusammenhang in Verbindung mit der Proportionalität zwischen Heizenergiebedarf und Wärmedurchgangskoeffizient erlaubt die Annahme, dass die relativen Änderungen des Energiebedarfs in Abhängigkeit von der Hallenbetriebstemperatur zwischen den geometrischen Hallentypen übertragbar sind.

Daher wird die detaillierte Aufschlüsselung der energetischen Standards nur für die Einfeldhalle durchgeführt, welche in Abb. 33 dargestellt ist. Der mittlere hellblaue Balken bei 20 °C entspricht hierbei den Normbedingungen. Zu erkennen ist, dass der Einfluss der Temperaturvariation auf den Energiebedarf einer Halle mit zunehmenden energetischen Anforderungen abnimmt. Dies bedeutet, dass ältere Sporthallen ein deut-

lich höheres absolutes Energieeinsparpotential durch Reduktion der Hallenbetriebstemperatur aufweisen als neuere. Relativ gesehen ist das Einsparpotential zwischen den energetischen Standards jedoch nahezu identisch, siehe Abb. 34. Dies bedeutet, dass sich auch bei Hallen mit Baujahr ab 2020 bis zu 30 % Heizenergie durch die Reduktion der Hallenbetriebstemperatur auf 16 °C einsparen lassen.

Abb. 33: Heizenergiebedarfe der Einfeldhalle je energetischem Standard in Abhängigkeit der Hallenbetriebstemperatur (ohne Kühlung, 1-facher Luftwechsel).

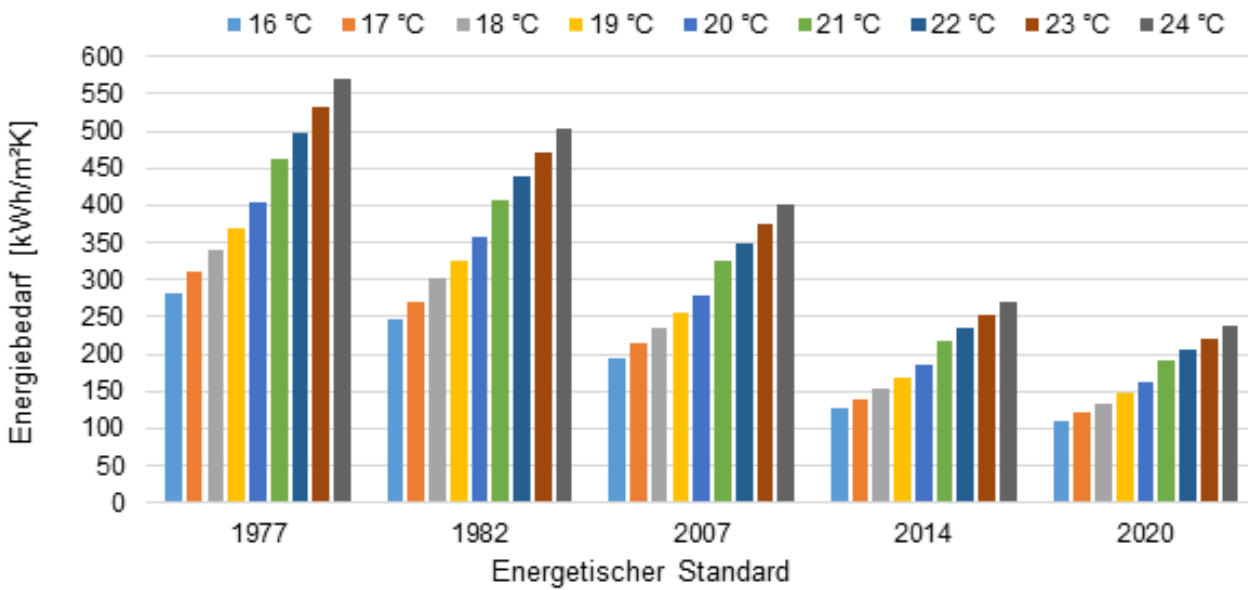


Abb. 34: Relatives Energieeinsparpotential der Einfeldhalle je energetischem Standard in Abhängigkeit der Hallenbetriebstemperatur (ohne Kühlung, 1-facher Luftwechsel).

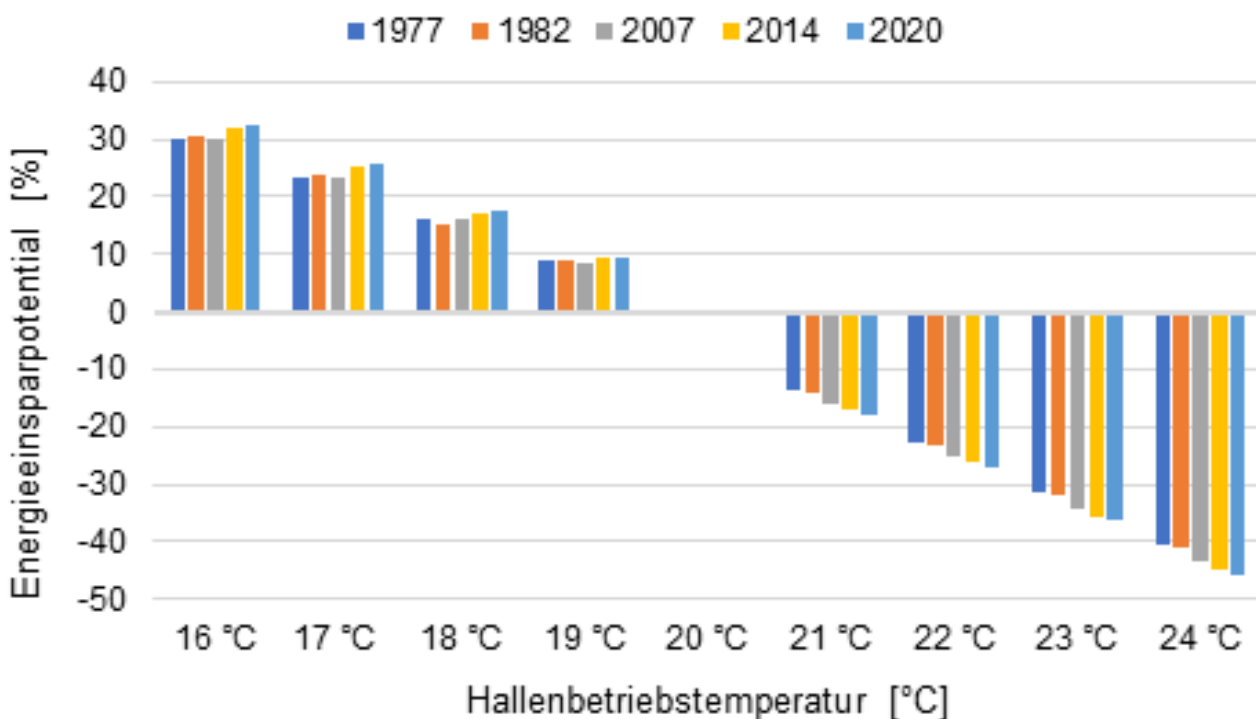
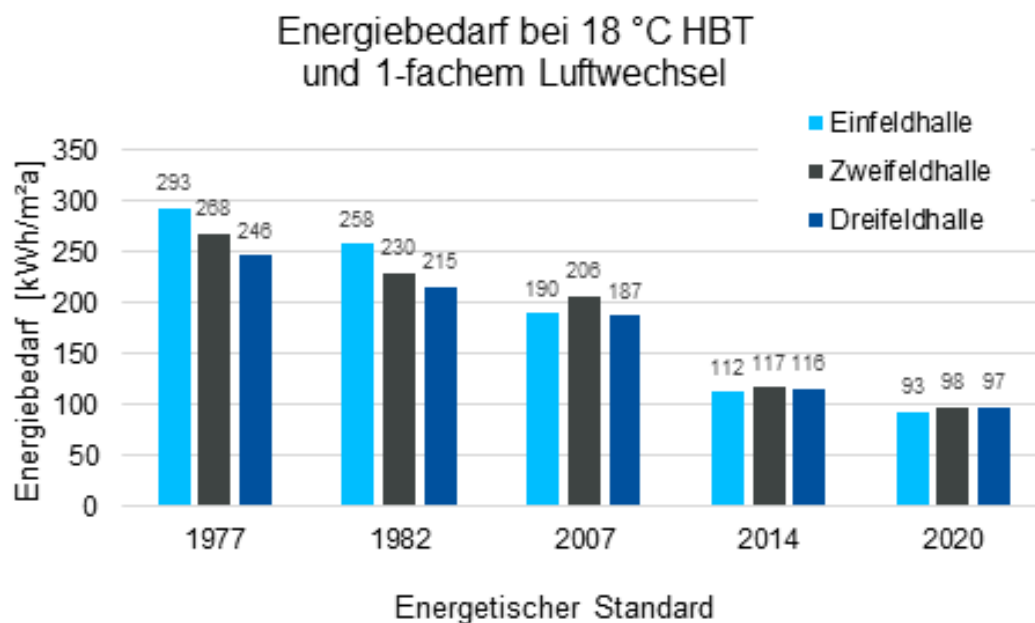


Abb. 35: Heizenergiebedarfe der drei geometrischen Hallentypen je energetischem Standard zu ermittelten komfortablen Bedingungen (HBT 18 °C, ohne Kühlung, 1-facher Luftwechsel). Entspricht einer Einsparung um ca. 15 % gegenüber 20 °C HBT mit 1-fachem Luftwechsel.



Entsprechend den Untersuchungsergebnissen zur Aufenthaltsqualität von Sporttreibenden aus Kapitel 5.5 wird im Folgenden die mindestens einzuhaltende Hallenbetriebstemperatur auf 18 °C festgelegt. Die entsprechenden Heizenergiebedarfe sind Abb. 35 zu entnehmen.

Die Reduktion der Hallenbetriebstemperatur von 20 °C auf 18 °C spart ohne zusätzliche bauliche Maßnahmen bereits bis zu 15 % der Heizenergie eines jeden geometrischen Hallentyps unabhängig vom energetischen Standard ein.

7.3 Variation der Luftwechselzahl

Da die Anforderungen an den Luftwechsel bei Nutzung einer RLT-Anlage die Anforderung an die natürliche Lüftung gemäß DIN 18032-1 (DIN 18032-1:2014-11) in Abhängigkeit der Personenanzahl teilweise deutlich unterschreitet und die Möglichkeit besteht, die Lüftung mit einer RLT-Anlage nutzungsspezifisch, d.h. in Bezug auf die Anzahl und die Tätigkeit der Sporttreibenden, anzupassen, wird eine Parameterstudie zum Einfluss des Luftwechsels

und damit zu dessen Energieeinsparpotential durchgeführt. Der Luftwechsel variiert hierbei zwischen 0,5/h und 2/h, um den hygienischen Mindestluftwechsel zu gewährleisten.

Die absolute Änderung des Energiebedarfs durch Variation der Luftwechselzahl ist aus theoretischen Gründen nahezu unabhängig vom energetischen Standard der Gebäudehülle, jedoch abhängig von der zugrundeliegenden Hallenbetriebstemperatur. Dieser Sachverhalt ist in Abb. 36 links bei 20 °C Hallenbetriebstemperatur und rechts bei 18 °C zu entnehmen.

Abb. 36: Absolutes Energieeinsparpotential der Einfeldhalle je energetischem Standard in Abhängigkeit der Luftwechselzahl (links HBT 20 °C, rechts HBT 18 °C, ohne Kühlung).

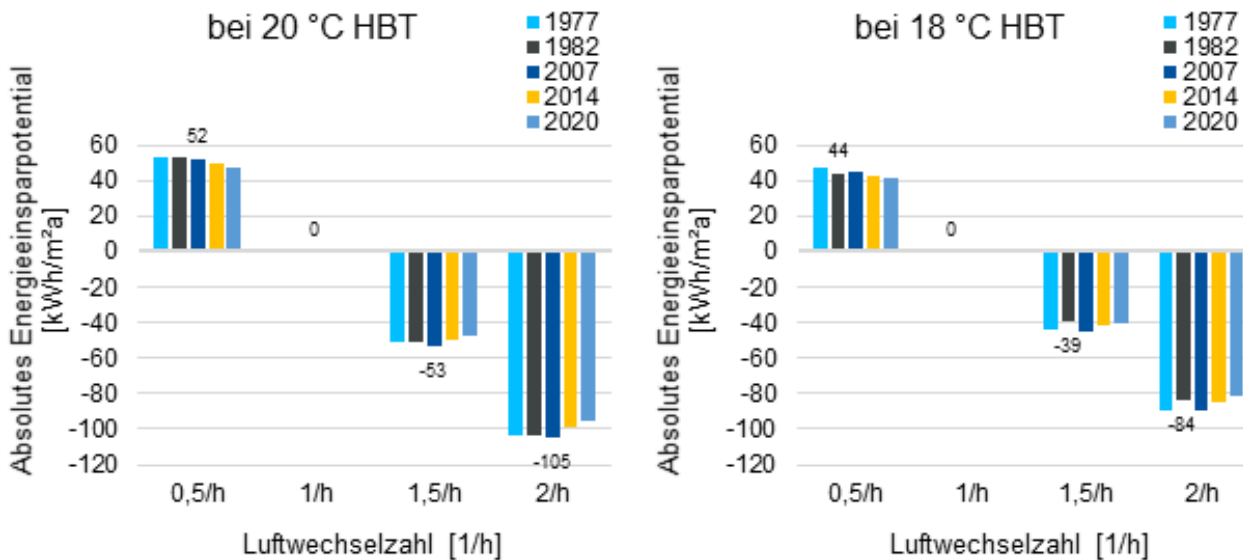
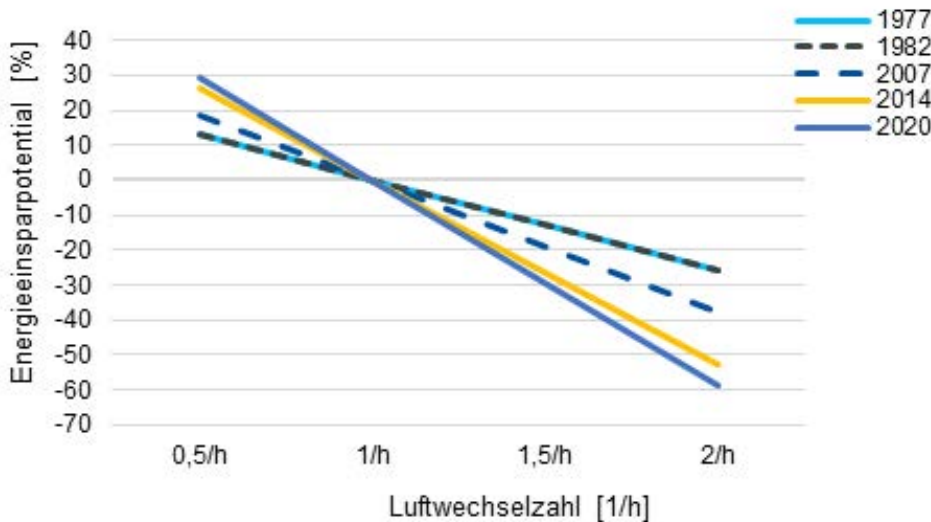


Abb. 37: Relatives Energieeinsparpotential der Einfeldhalle je energetischem Standard in Abhängigkeit der Luftwechselzahl (bei 18 °C und 20 °C HBT).



Die relative Änderung, bezogen auf den Heizenergiebedarf bei 1-fachem Luftwechsel, ist demgegenüber unabhängig von der Temperatur, aber abhängig vom energetischen Standard, siehe Abb. 37. Durch die Reduktion der Luftwechselzahl auf 0,5/h können bei Hallen ab Baujahr 2020 bis zu 30 % des Energiebedarfs eingespart werden, bei Hallen ab Baujahr 1977 etwa 13 %, und dies bei gleicher absoluten Einsparung von ca. 52 kWh/m²a.

Aufgrund dieser Tatsachen sind in Abb. 38 die absoluten Energieeinsparpotentiale der Ein-, Zwei- und Dreifeldhallen in Abhängigkeit von

der Luftwechselzahl dargestellt. Eine Reduktion des Luftwechsels auf 0,5/h verspricht demzufolge z.B. für eine Dreifeldhalle eine Reduktion des Energiebedarfs bei 18 °C Hallenbetriebstemperatur um 60 kWh/m²a gegenüber dem Energiebedarf bei 18 °C HBT und 1-fachem Luftwechsel (siehe Abb. 35), was einem Einsparpotential von 22 % bei energetischem Standard 1982 entspricht. Die daraus resultierenden Heizenergiebedarfe entsprechend den Untersuchungsergebnissen zur Aufenthaltsqualität von Sporttreibenden aus Kapitel 5.5 sind Abb. 39 zu entnehmen.

Abb. 38: Absolutes Energieeinsparpotential der drei geometrischen Hallentypen unabhängig vom energetischen Standard in Abhängigkeit der Luftwechselzahl (links HBT 20 °C, rechts HBT 18 °C, ohne Kühlung).

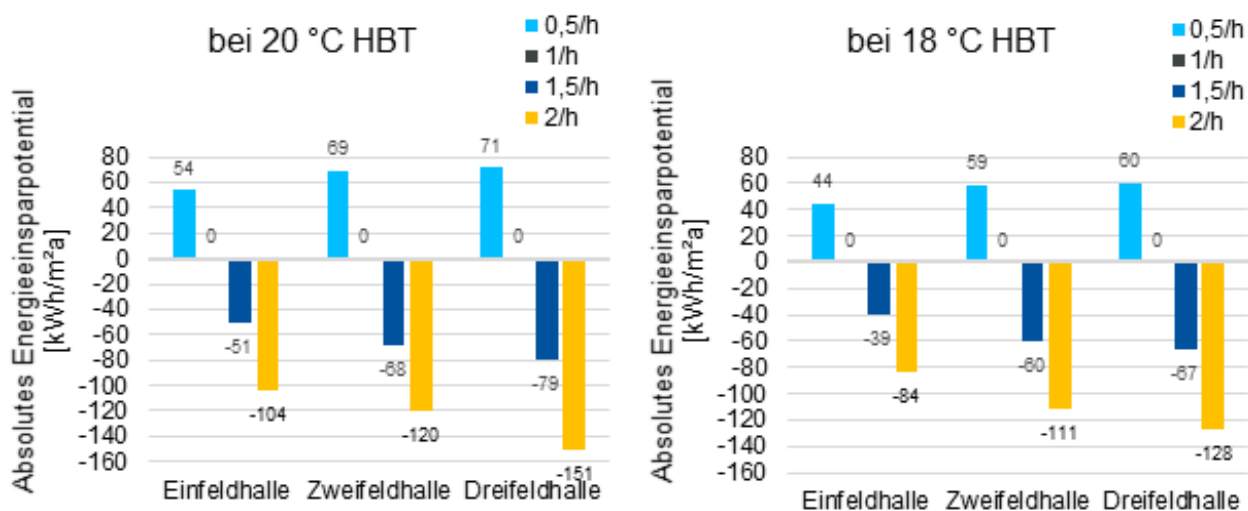
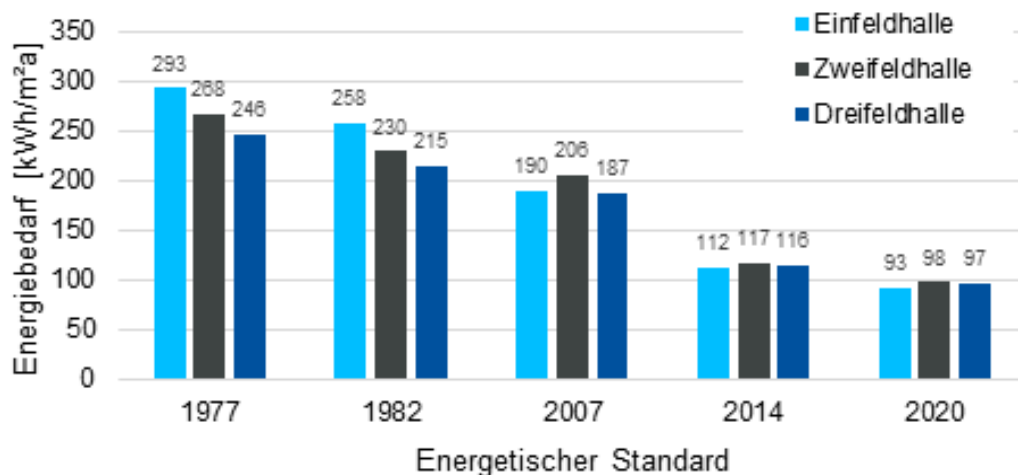


Abb. 39: Heizenergiebedarfe der drei geometrischen Hallentypen je energetischem Standard bei ermittelten komfortablen Bedingungen (HBT 18 °C, ohne Kühlung, 0,5-facher Luftwechsel). Entspricht einer absoluten Einsparung bei Einfeldhallen um 45 kWh/m²a, bei Zwei- und Dreifeldhallen um 60 kWh/m²a gegenüber 1-fachem Luftwechsel mit 18 °C HBT.

Energiebedarf bei 18 °C HBT und 0,5-fachem Luftwechsel

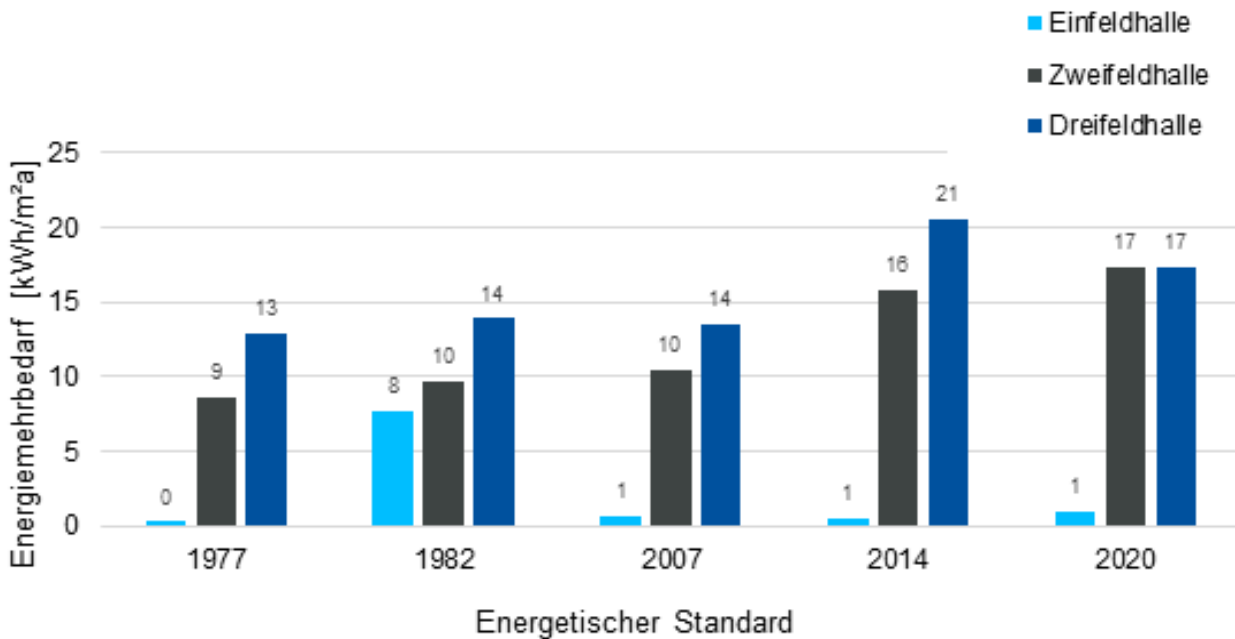


7.4 Einfluss einer Kühlung

Angesichts des Klimawandels, der eine Zunahme der durchschnittlichen Außenlufttemperatur sowie zunehmend extremer und länger werdende Hitzeereignisse zur Folge haben kann,

Außenklimarandbedingungen abhängig ist und somit nur für die in Kapitel 6.1.3 dargestellten Klimarandbedingungen Gültigkeit besitzt. Der Einfluss der zunehmenden Außenlufttemperaturen wird innerhalb dieses Projekts nicht berücksichtigt.

Abb. 40: Mehrbedarf an Energie durch aktive Kühlung der drei geometrischen Hallentypen je energetischem Standard bei komfortablen Aufenthaltsbedingungen (18 bis 22 °C HBT, 1-facher Luftwechsel).



erweist sich die Inanspruchnahme von Kühlungsmaßnahmen als bedeutsam, um gesunde und komfortable Aufenthaltsbedingungen für die Sporttreibenden sicherzustellen. Vor diesem Hintergrund wird eine Parameterstudie durchgeführt, um den zusätzlichen Energiebedarf für die Kühlung zu bestimmen, der erforderlich ist, um optimale thermische Bedingungen auch an heißen Tagen zu gewährleisten. Hierbei müssen die thermischen Anforderungen als Minimum und Maximum definiert werden. Für die Zone der Halle bedeutet dies, gemäß Kapitel 5, ein Minimum der Hallenbetriebstemperatur von 18 °C und ein Maximum von 22 °C. Für die Zonen der Umkleidekabinen und Duschräume werden die Anforderungen nach Kapitel 6.1.2 als Minimum und gleichzeitig Maximum definiert. Die restlichen Zonen der Flure und Toiletten erhalten kein Maximum.

In Abb. 40 ist der Mehrbedarf an Energie durch aktive Kühlung dargestellt. Es sei angemerkt, dass der Kühlenergiebedarf deutlich von den

Der Kühlenergiebedarf ist im Vergleich zum Heizenergiebedarf (siehe Abb. 35) deutlich geringer. In Bezug auf den sommerlichen Wärmeschutz sind die baulichen Aspekte der Sporthallen, wie beispielsweise eine hohe thermische Speichermasse und die Nordorientierung von Fensterflächen, bereits wirksame Maßnahmen. Um komfortable Aufenthaltsbedingungen ohne zusätzlichen Energiebedarf zu gewährleisten, können zusätzliche passive Kühlsysteme sinnvoll sein:

- ▶ **Wärmedämmung:** Eine Erhöhung der Wärmedämmung erzielt nicht nur im Winter geringere Heizenergiebedarfe, siehe Kapitel 7.7, sondern reduziert im Sommer ebenfalls den Wärmetransport von außen nach innen.
- ▶ **Sonnenschutzbeschichtung:** Durch das Anbringen von speziellen Folien oder Beschichtungen auf den Fenstern wird die Übertragung von Wärme und UV-Strahlen reduziert.

- › Außenliegender Sonnenschutz: Durch den Einsatz von Fensterläden oder Jalousien kann die direkte Sonneneinstrahlung auf die Fenster reduziert werden, wodurch die Wärmeübertragung ins Gebäude verringert wird.
- › Gründächer und -fassaden: Vegetation bietet zusätzliche Wärmedämmung, reduziert die direkte Sonneneinstrahlung auf die Bauwerkssubstanz und kühlt zusätzlich durch Verdunstung.
- › Nachtlüftung: In den kühleren Nachtstunden werden Fenster geöffnet, um kühlere Luft in das Gebäude zu lassen und die Wärme abzuführen. Am Morgen werden die Fenster geschlossen, um die kühlere Luft im Inneren zu halten.

7.5 Einfluss einer Nacht- und Tagabsenkung

Da Sporthallen im Tages- und Jahresverlauf nicht zu 100 % ausgelastet sind, wird der Einfluss einer Nacht- und Tagabsenkung bzw. -erhöhung unter Verwendung einer Kühlung an heißen Sommertagen an denen die Lufttemperatur die Soll-Betriebstemperatur übersteigen anstatt unterschreiten würde. Im Folgenden wird unter Absenkung gleichzeitig die Erhöhung verstanden. Für die Untersuchung der Nachtabenkung werden die Temperaturen in der Halle, den Dusch- und Umkleieräumen täglich zwischen 22:00 und 10:00 Uhr um je 2 K, 3 K und 4 K reduziert bzw. erhöht. Für die Ermittlung der Tagabsenkung wird zusätzlich zur vorgenannten Nachtabenkung die Absenkung jeden Sonntag zwischen 10:00 und 22:00 Uhr durchgeführt. Zu den jeweiligen Zeiten

wird zudem der Luftwechsel auf null bzw. den Infiltrationswechsel heruntergesetzt. Als Basis zur Berechnung der Einsparpotentiale ohne Kühlung dienen die komfortablen Aufenthaltsbedingungen gemäß Kapitel 5.5 mit 18 °C Hallenbetriebstemperatur und 1-fachem Luftwechsel aus Abb. 35. Es sei vorweggenommen, dass das Energieeinsparpotential durch Absenkung mit vorhandener Kühlung mit demjenigen ohne Kühlung nahezu identisch ist, weshalb im Folgenden nur jene Fälle ohne Kühlung betrachtet werden.

Aus Abb. 41 und Abb. 42, den Darstellungen des absoluten Energieeinsparpotentials, geht hervor, dass insbesondere Sporthallen älteren Baujahrs deutlich von einer Absenkung in der Nacht sowie am Tag profitieren. Zudem spielt bei Hallen mit niedrigem energetischen Standard auch die Höhe der Absenkung eine nicht zu vernachlässigende Rolle. Bei Zwei- und Dreifeldhallen des Standards 1977 kann der Energiebedarf durch Nachtabenkung um 2 K um 94 kWh/m²K (29 %), bei Absenkung um 4 K sogar um 113 kWh/m²K (35 %) reduziert werden. Je besser der energetische Standard, desto weniger relevant ist die Höhe der Nachtabenkung. Im Vergleich liegt das Einsparpotential der Zweifeldhalle mit Standard 2020 bei 71 kWh/m²a (bei Nachtabenkung um 2 K) und 75 kWh/m²a (bei Nachtabenkung um 4 K).

In Kombination mit einer Reduktion des Luftwechsels auf 0,5/h können zusätzlich 18 kWh/m²a bei Einfeldhallen und 25 kWh/m²a bei Zwei- und Dreifeldhallen eingespart werden. Dieses zusätzliche absolute Energieeinsparpotential ist unabhängig von der Höhe der Absenkung und, wie in Kapitel 7.3 beschrieben, auch unabhängig vom energetischen Standard.

Abb. 41: Absolutes (oben) und relatives (unten) Energieeinsparpotential durch Nachtabsenkung täglich von 22:00 bis 10:00 Uhr in Abhängigkeit der Höhe der Nachtabsenkung je energetischem Standard bei 18 °C HBT und 1-fachem Luftwechsel. Links für Einfeldhallen, rechts für Zweifeld- und Dreifeldhallen.

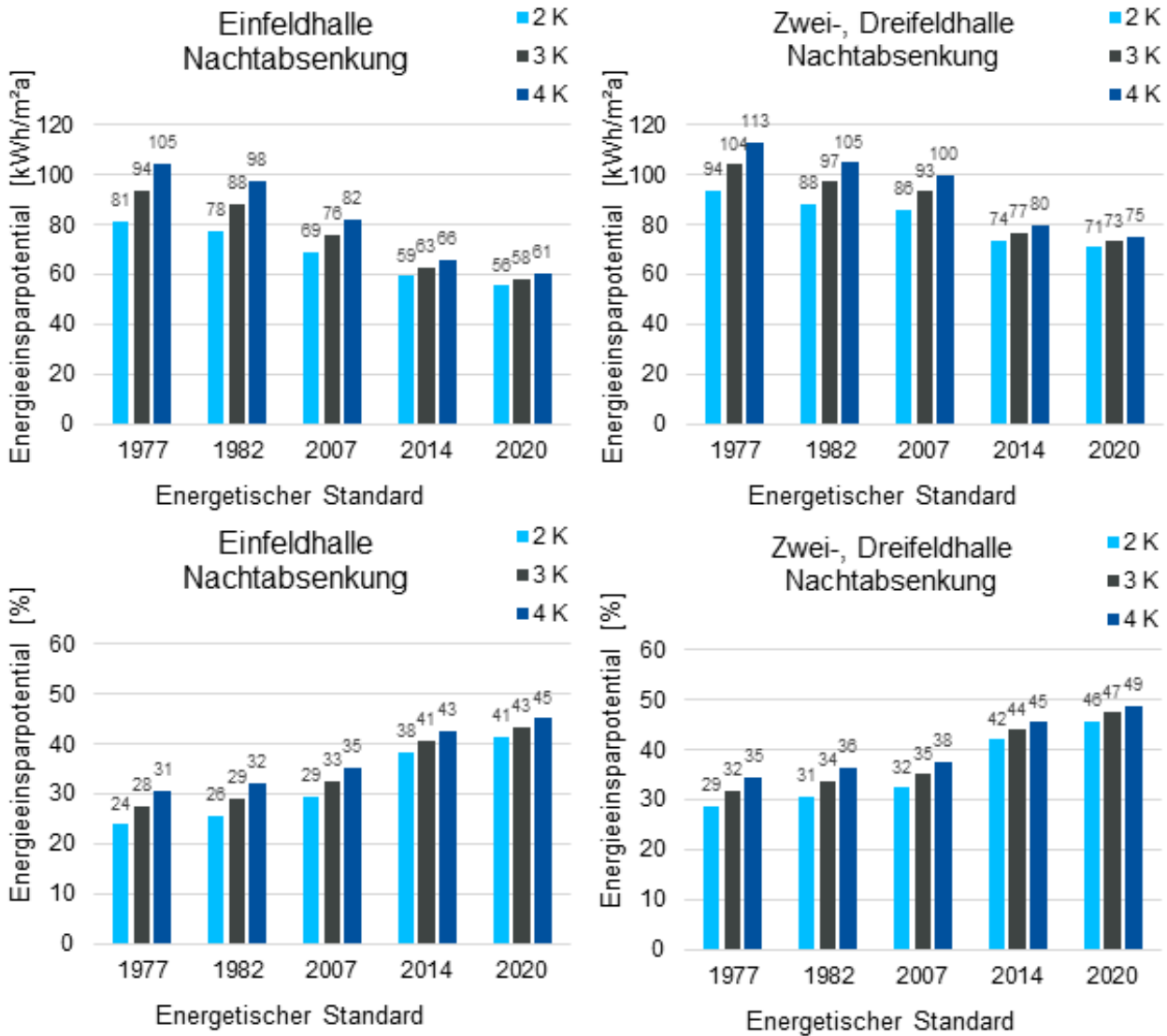
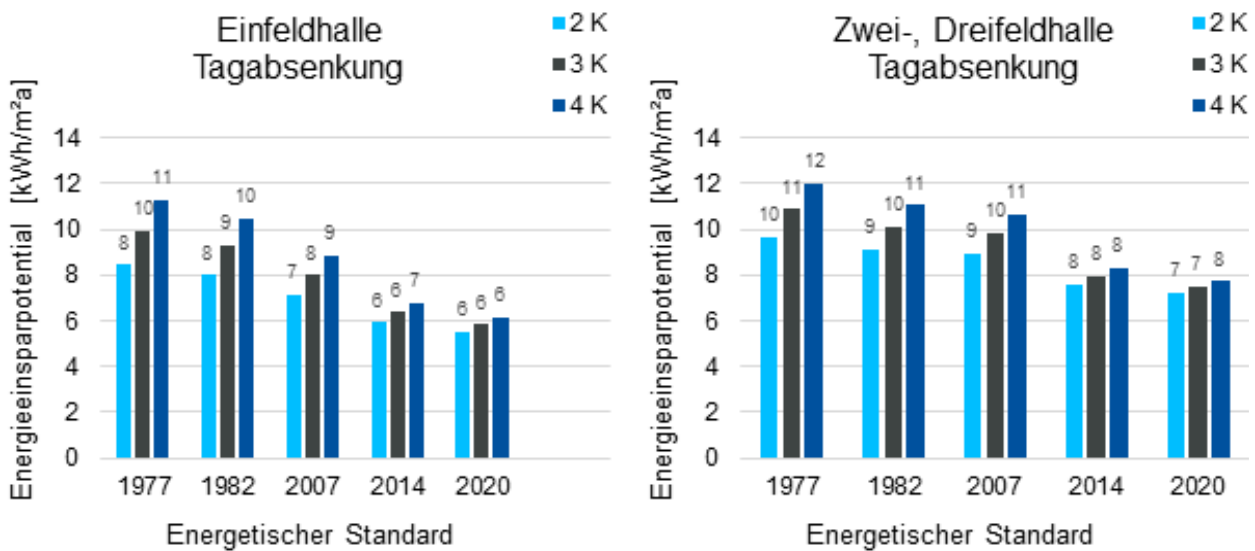


Abb. 42: Absolutes Energieeinsparpotential durch Tagabsenkung jeden Sonntag von 10:00 bis 22:00 Uhr in Abhängigkeit der Höhe der Absenkung je energetischem Standard bei 18 °C HBT und 1-fachem Luftwechsel. Links für Einfeldhallen, rechts für Zweifeld- und Dreifeldhallen.



Die hierbei ermittelten Gesamteinsparpotentiale werden zusätzlich auf eine Stunde Nacht- bzw. Tagabsenkung pro Jahr herunterskaliert, um einen Anhaltspunkt für Betreiber von Sporthallen zu liefern, ab wie vielen Stunden sich eine Tag- bzw. Nachtabsenkung energetisch lohnen kann. Die Ergebnisse sind Tabelle 20 zu entnehmen. Aufheiz- und Abkühlungsphasen verschiedener Heiz- und Kühlsysteme bleiben hierbei unberücksichtigt, da diese Differenzierung den Rahmen des Projekts überschreiten würde und die Gültigkeit der Ergebnisse nicht beeinflusst.

in Tabelle 21 dargestellten Energieumsätze für unterschiedliche Tätigkeiten. Es ist wichtig zu beachten, dass nicht die gesamte Energie, die bei sportlicher Aktivität erzeugt wird, als Wärme an die Umgebung abgegeben wird. Grob geschätzt werden ca. 30 % der Energie tatsächlich für die Durchführung der Arbeit verwendet, sei es das Laufen, Springen oder andere Bewegungen. Die genaue Verteilung zwischen mechanischer Arbeit und Wärmeabgabe kann variieren und wird von individuellen Faktoren sowie von der spezifischen Aktivität bestimmt.

Tabelle 20: Energieeinsparpotential in kWh/m²a durch 1 h Tag- bzw. Nachtabsenkung pro Jahr in Bezug auf konstante Innenklimabedingungen von 18 °C mit 1-fachem Luftwechsel.

Hallentyp	Energetischer Standard	Energieeinsparpotential in kWh/m ² a durch 1 h Nacht- bzw. Tagabsenkung pro Jahr					
		Nachtabsenkung			Tagabsenkung		
		um 2 K	um 3 K	um 4 K	um 2 K	um 3 K	um 4 K
Einfeldhalle	1977	0,019	0,021	0,024	0,014	0,016	0,018
	1982	0,018	0,020	0,022	0,013	0,015	0,017
	2007	0,016	0,017	0,019	0,011	0,013	0,014
	2014	0,014	0,014	0,015	0,010	0,010	0,011
	2020	0,013	0,013	0,014	0,009	0,009	0,010
Zweifeld- und Dreifeldhalle	1977	0,021	0,024	0,026	0,015	0,017	0,019
	1982	0,020	0,022	0,024	0,015	0,016	0,018
	2007	0,020	0,021	0,023	0,014	0,016	0,017
	2014	0,017	0,018	0,018	0,012	0,013	0,013
	2020	0,016	0,016	0,017	0,012	0,012	0,012

7.6 Einfluss der internen Wärmegewinne durch Sporttreibende

Sporttreibende erzeugen, wie in Kapitel 1.1.3 beschrieben, durch ihre körperliche Aktivität Wärme, die an den Raum abgegeben wird. Die Höhe der an den Raum abgegebenen Wärmeenergie ist von den Faktoren in Kapitel 1.1.5 abhängig, ausschlaggebend ist die Stoffwechselrate. Unter der Annahme der Körperoberfläche eines Erwachsenen von 1,9 m² und der eines Kindes von 1,33 m² (Dr. Frank Antwerps) ergeben sich daraus die

Bei einer geschätzten Belegungsdichte im schulischen Sport von 15 m² pro Person und im Vereinssport von 20 m² Person ergibt sich die in Tabelle 22 aufgestellte Anzahl an gleichzeitig anwesenden Sporttreibenden je Hallentyp.

Abb. 43 zeigt das daraus resultierende jährliche Energieeinsparpotential durch interne Wärmegewinne in Abhängigkeit der Tage mit Vollaustattung während des Heizbetriebs je Hallentyp für sportliche Aktivitäten mit 4 und 8 met. Bezogen auf die Hallengrundfläche ergibt sich ein Energieeinsparpotential von bis zu 75 kWh/m²a, unabhängig von Hallentyp und energetischem Standard, siehe Abb. 44.

Tabelle 21: Energieumsätze und geschätzte Wärmeabgabe (70 %) verschiedener Tätigkeiten (Annahme Körperoberfläche Kind 1,33 m², Erwachsener 1,9 m²).

Aktivität	Stoffwechselrate [met]	Stromdichte [W/m ²]	Leistung Kind [W]		Leistung Erwachsener [W]	
Ruhezustand			100 %	70 %	100 %	70 %
Sitzen, ruhig	1,0	58	77	54	110	77
Stehen, entspannt	1,2	70	93	65	132	93
Sportarten						
Badminton	5,5	319	424	297	606	424
Basketball	8,0	464	617	432	882	617
Boxen	12,8	742	987	691	1411	987
Tanzen	7,8	452	602	421	860	602
Fechten	6,0	348	463	324	661	463
Fußball	8,0	464	617	432	882	617
Handball	8,0	464	617	432	882	617
Gymnastik	3,8	220	293	205	419	293
Tennis	7,3	423	563	394	804	563
Volleyball	6,0	348	463	324	661	463
Krafttraining	8,0	464	617	432	882	617
Yoga	4,0	232	309	216	441	309
Aerobic	5,0 bis 6,0	319	424	297	606	424
Judo, Kickboxen	10,0	580	771	540	1102	771

Tabelle 22: Hallenbelegung bei regulärem Vereinssport und Schulsport.

	Einfeldhalle [Per.]	Zweifeldhalle [Per.]	Dreifeldhalle [Per.]
Regulär (20m²/Per.)	20	50	61
Schulsport (15m²/Per.)	27	66	81

Abb. 43: Jährliches Energieeinsparpotential durch interne Wärmegewinne in Abhängigkeit der Anzahl der Tage mit Volllastung während des Heizbetriebs (8 h Schulsport (15 m² pro Kind) und 4 h Vereinssport (20 m² pro Erwachsenem)) je Hallentyp bei sportlicher Aktivität mit 4 und 8 met.

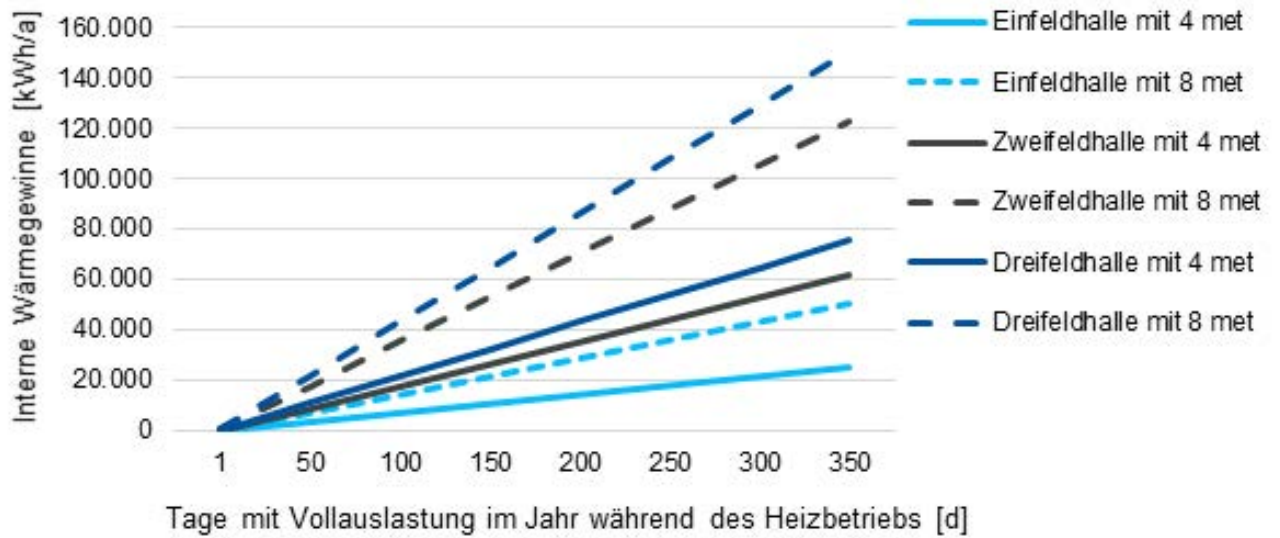
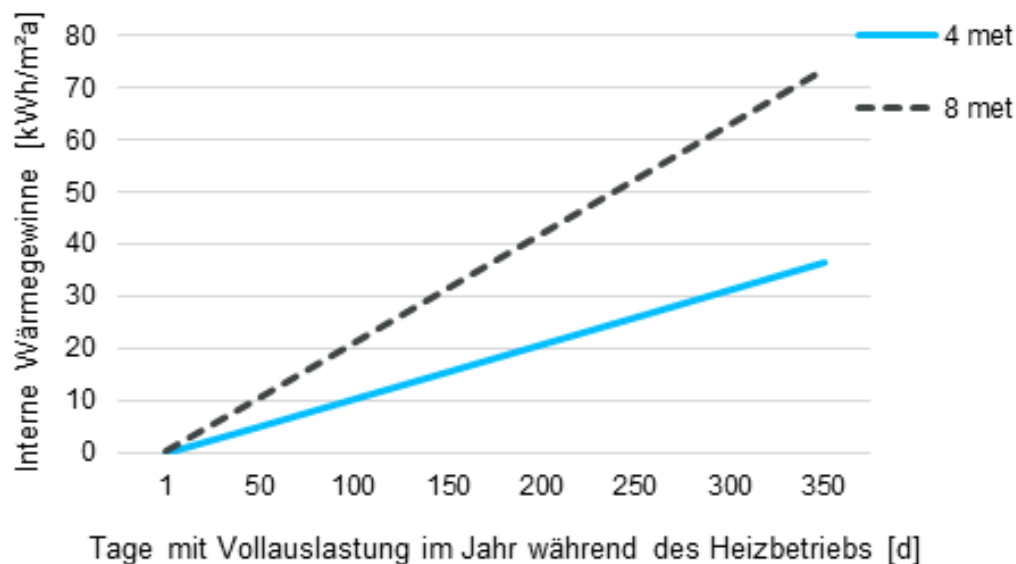


Abb. 44: Jährliches Energieeinsparpotential durch interne Wärmegewinne in Abhängigkeit der Anzahl der Tage mit Volllastung während des Heizbetriebs (8 h Schulsport (15 m² pro Kind) und 4 h Vereinssport (20 m² pro Erwachsenem)) bei sportlicher Aktivität mit 4 und 8 met bezogen auf die Hallengrundfläche.



7.7 Einfluss von baulichen Maßnahmen

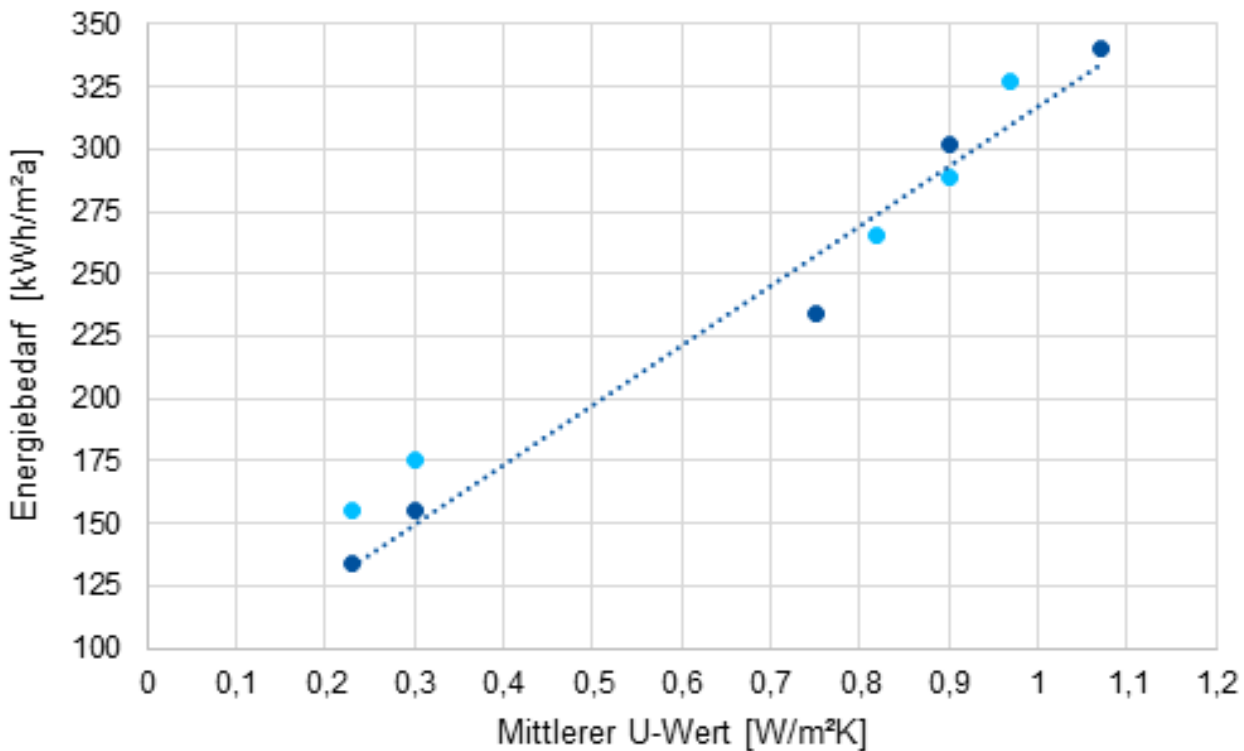
Zusätzlich zu den zuvor erörterten betrieblichen Maßnahmen besteht ein enormes Energieeinsparpotential durch bauliche Maßnahmen an der wärmeübertragenden Gebäudehülle. Dies bedeutet eine Reduktion des mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten. Im Gebäudebestand kann dies beispielsweise durch eine zusätzliche Dämmung der Außenwände und Dachflächen oder durch einen Austausch von Fenstern und Türen durch energieeffizientere Modelle realisiert werden. In Abb. 45 ist der Energiebedarf in Abhängigkeit des mittleren U-Werts dargestellt.

$$EP = \left(1 - \frac{EB_{U_{\text{bestand}}}}{EB_{U_{\text{modernisiert}}}}\right) \times 100 \text{ [\%]} \quad (12)$$

- › EP Energieeinsparpotential der Modernisierungsmaßnahme [%]
- › $EB_{U_{\text{modernisiert}}}$ Energiebedarf mit Modernisierungsmaßnahme [kWh/m²a]
- › $EB_{U_{\text{bestand}}}$ Energiebedarf im Bestand [kWh/m²a]

In Tabelle 23 ist dies exemplarisch für die Anhebung des energetischen Standards von Bestandshallen auf den des Gebäudeenergiegesetzes 2020 (GEG 20, 2020) durchgeführt. Es zeigt sich deutlich das erhebliche Potential zur Ener-

Abb. 45: Energiebedarf von Sporthallen in Abhängigkeit des mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten bei komfortablen Aufenthaltsbedingungen (18 °C HBT, 1-facher Luftwechsel, ohne Kühlung).



Mithilfe dieses Diagramms kann das prozentuale Energieeinsparpotential durch energetische Modernisierung einer Bestandshalle über folgende Gleichung (12) bestimmt werden.

gieeinsparung, insbesondere bei älteren Sporthallen. Einfeldhallen, die dem Standard von 1977 entsprechen, können ihren jährlichen Heizenergiebedarf um bis zu 61 % reduzieren. Auch

bei Hallen, die dem Standard von 2007 entsprechen, kann durch bauliche Maßnahmen ein signifikantes Einsparpotential erzielt werden.

an aktiver Kühlenergie. Daher sollten passive Kühlsysteme eingesetzt werden, um die Temperatur auf dem komfortablen Niveau zu halten.

Tabelle 23: Prozentuale (Heiz-)Energieeinsparung durch energetische Modernisierung von Bestandshallen auf den energetischen Stand des Gebäudeenergiegesetzes 2020, in Abhängigkeit des Baujahrs bzw. des beim Bau geltenden energetischen Standards. Mit komfortablen Aufenthaltsbedingungen (18 °C HBT, 1-facher Luftwechsel).

Hallentyp	Energieeinsparpotential durch Modernisierung auf GEG 2020			
	ab Baujahr 1977	ab Baujahr 1982	ab Baujahr 2007	ab Baujahr 2014
Einfeldhalle	61 %	56 %	43 %	13 %
Zwei- und Dreifeldhalle	53 %	46 %	42 %	12 %

7.8 Fazit zur Energieeffizienz

Basierend auf den Ergebnissen zur Aufenthaltsqualität (Kapitel 5) wird empfohlen, die Betriebstemperatur in der Halle während des Heizbetriebs auf maximal 18 °C zu begrenzen. In Zeiten, in denen die Halle nicht genutzt wird, ist es ratsam, die Temperatur abzusenken. Insbesondere ältere Sporthallen profitieren von einer Nacht- und Tagabsenkung, wobei eine Absenkung um 4 K ein deutlich höheres Einsparpotential bietet als eine Absenkung um 2 K. Auch Hallen mit höherem energetischen Standard können ihren Energiebedarf durch Nachtabsenkung um bis zu 50 % reduzieren. Hier zeigt sich, dass eine Absenkung um 2 K einen ähnlich positiven Effekt erzielt wie eine Absenkung um 4 K. Eine Tagabsenkung für einzelne Stunden oder Tage erzielt nur bei älteren Hallen einen nennenswerten Effekt. Für mehrere Tage oder Wochen kann sich dies jedoch auch bei neueren Hallen lohnen.

Außerhalb der Heizperiode wird empfohlen, die Betriebstemperatur von 22 °C nicht zu überschreiten. Dies erfordert vor allem bei neueren Hallen ab dem Standard 2014 einen Mehrbedarf

Durch eine Reduktion des Luftwechsels kann zusätzlich Heizenergie eingespart werden. Dies ist jedoch stets in Verbindung mit der Luftqualität zu betrachten, da das Ziel der Energieeinsparung nicht über das der Gewährleistung gesunder Aufenthaltsbedingungen zu setzen ist. Über eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung können beide Ziele miteinander vereint werden.

Insgesamt ist eine intelligente, auf tatsächlichen Messdaten und Belegungsplänen basierende Steuerung und Regelung der Heizungs- und Lüftungsanlage vorteilhaft. Über den Belegungsplan können Zeiten für die Nacht- und Tagabsenkung gesteuert werden. Über die Messdaten der Temperatur werden interne Wärmegewinne berücksichtigt und über die Messung des CO₂-Gehalts und der relativen Luftfeuchte kann der Luftwechsel reguliert werden.

Die Auswirkungen einer energetischen Modernisierung des Bauwerks stehen außer Frage. Hierbei bietet die Modernisierung auf den aktuellen energetischen Standard vor allem bei älteren Hallen ein enormes Einsparpotential von bis zu 61 %.

8 Infektionsrisiko – Covid-19

8 Infektionsrisiko – Covid-19

Weltweit ist die Luftverschmutzung eines der größten Gesundheitsrisiken in der Umwelt. Im Jahr 2012 ging einer von acht Todesfällen auf schadstoffbelastete Luft zurück (WHO). Die Auswirkungen der Luftverschmutzung auf die menschliche Gesundheit, besonders in Innenräumen, sind aufgrund des hohen Expositionsrisikos selbst bei niedrigen Schadstoffkonzentrationen ein Grund zur Sorge (Kim et al., 2015). Aufgrund dieser Tatsache wird im Folgenden das Infektionsrisiko in Sporthallen anhand einschlägiger Forschungsergebnisse aus anderen Bereichen erörtert.

8.1 Infektionswege

Generell erfolgt die Übertragung von SARS-CoV-2 (Covid-19) hauptsächlich über Aerosole. Aerosole werden gemäß der technischen Definition als luftgetragene Partikel mit einem Durchmesser von 1 nm bis zu einigen 100 µm betrachtet. In anderen Fachbereichen werden flüssige Schwebeteilchen mit einem Durchmesser von mehr als 5 µm als Tröpfchen bezeichnet. Eine solche Unterscheidung ist in diesem Fall jedoch nicht zielführend. Daher kann zwischen zwei Infektionswegen unterschieden werden: der direkten und der indirekten Infektion (Schlüter, 2021).

Unter direkter Infektion wird die Übertragung von infektiösen Aerosolpartikeln, beispielsweise durch Atmen, Sprechen, Husten, Niesen usw., von Mensch zu Mensch verstanden. Dabei werden Partikel über kurze Distanzen, in der Regel kleiner als 1,5 m, in großer Anzahl übertragen. Bei der indirekten Infektion hingegen erfolgt die Über-

tragung durch infektiöse Partikel, die sich über mehrere Stunden im Raum ansammeln. Aerosole können weite Strecken durch Luftbewegungen zurücklegen und bleiben mehrere Stunden in der Luft vorhanden. Daher besteht die Möglichkeit einer Infektion auch dann, wenn die infizierte Person den Raum bereits verlassen hat (Kriegel & Hartmann, 2021; Schlüter, 2021).

8.2 Infektionsrisiko

8.2.1 Dosis

Das Infektionsrisiko in geschlossenen Räumen wird durch die aufgenommene Dosis an virenbeladenen Aerosolpartikeln bestimmt. Die Höhe der Dosis wird von der Quellstärke (Emissionsrate), der Atemaktivität (Quelle und Empfänger), der Aufenthaltsdauer im Raum und der Aerosolkonzentration beeinflusst und wird im Folgenden nach Kriegel (Hartmann & Kriegel, 2021; Kriegel & Hartmann, 2021) und Hartmann (Hartmann & Kriegel, 2021) beschrieben.

Die Quellstärke und damit die Menge der ausgestoßenen respiratorischen Partikel variiert in Abhängigkeit von der Tätigkeit. In Tabelle 24 werden Richtwerte für Erwachsene und Kinder dargestellt. Es wird deutlich, dass die Partikelemission mit zunehmender Stärke der Stimmabgabe ansteigt. Im Vergleich zu Erwachsenen zeigen Kinder und Jugendliche in der Regel eine signifikant geringere Anzahl an ausgestoßenen Partikeln, außer wenn sie schreien. Sportliche Aktivität kann hierbei zwischen Atmen und Schreien eingeordnet werden.

Tabelle 24: Partikelemission von Erwachsenen und Kindern bei diversen Tätigkeiten nach Mürbe et al.

Tätigkeit	Partikelemission [P/s]	
	Erwachsene	Kinder
Atmen	50	10
Sprechen	200	20
Singen	1000	100
Schreien	1000	1000

Die Tätigkeit hat zudem einen Einfluss auf die Atemaktivität und damit auf die Menge der ein- und ausgeatmeten Luft. Tabelle 25 gibt Richtwerte für unterschiedliche Tätigkeiten. Ersichtlich ist die deutlich höhere Atemaktivität einer sitzenden Tätigkeit gegenüber beispielsweise bei sitzender Aktivität. Sporttreibende nehmen daher mehr Raumluft auf. Zusätzlich erfolgt die Atmung hauptsächlich durch den Mund, wodurch die Schadstoffe nicht durch die Nase gefiltert werden. Darüber hinaus gelangen die Schadstoffe aufgrund der gesteigerten Luftstromgeschwindigkeit während des Sports tiefer in die Atemwege (Carlisle & Sharp, 2001).

gen einer hohen Konzentration von Schadstoffen wie Infektionserregern ausgesetzt sind, die akute Atemwegsinfektionen verursachen können (Andrade & Dominski, 2018). Dem gegenüber stehen jedoch das große Verhältnis von der Anzahl der Nutzenden zum Luftvolumen, das zu einer geringeren Aerosolkonzentration führen kann, und die kurze Aufenthaltsdauer.

8.2.2 Parameterstudie relatives Infektionsrisiko

Es ist nicht möglich, genaue Werte für die Wahrscheinlichkeit einer Infektionsübertragung in

Tabelle 25: Atemaktivität bei diversen körperlichen Tätigkeiten nach Kriegel & Hartmann, 2021.

Tätigkeit	Eingeatmete Luft [m ³ /h]
Sehr niedrige Aktivität (liegend)	0,45
Niedrige Aktivität (sitzend, stehend)	0,54
Singen	0,65
Mittlere Aktivität (körperliche Arbeit)	0,9
Sport	1,2

Die Aerosolkonzentration im Raum ist das Mischungsverhältnis von zugeführter Frischluftmenge und der Quellstärke und bildet die Anzahl virenbeladener Partikel pro m³ Luftvolumen (Kriegel, 2020). Die Zufuhr von virenfreier Luft und die Abfuhr von virenhaltiger Luft trägt somit zu einer Minderung des Infektionsrisikos bei. Je höher die Zuluftmenge, desto größer ist der Effekt, wobei er zunehmend schwächer wird. Die Dimensionierung der Zuluftmenge basierend auf einer festen Luftwechselrate erweist sich als ungeeignet. Dieser Ansatz führt zu niedrigen Zuluftmengen in kleinen Räumen und zu hohen Zuluftmengen in großen Räumen, ohne eine Verbindung zur Menge eingeatmeter virenbeladener Partikel und damit zum Infektionsrisiko herzustellen. Zielführender ist die Dimensionierung über die Aufenthaltsdauer, die Anzahl und die Tätigkeit der Nutzerinnen und Nutzer des Raumes (Kriegel, 2020; Schlüter, 2021).

einem Raum anzugeben. Daher zielt der RisiCo-Rechner (RWTH Aachen) darauf ab, ein relatives Infektionsrisiko abzuleiten. Bei der Berechnung dieses Risikos werden ausschließlich technische Daten des Raums, der verwendeten Anlagentechnik, Informationen zur Sprechaktivität und körperlichen Aktivität sowie zur Verwendung von Mund-Nasen-Bedeckungen berücksichtigt. Dadurch wird es ermöglicht, die Infektionsrisiken verschiedener Räume einfach miteinander zu vergleichen. Die Referenz bezieht sich hierbei auf eine Schulstunde mit absolutem Risiko für mindestens eine Neuinfektion zwischen 0,764 bis 2 % (Müller et al., 2021).

Innerhalb dieser Parameterstudie werden folgende Parameter definiert:

- Aufenthaltsdauer: 60 Minuten
- Sprechaktivität: 10 % der Personen lautes Sprechen und 90 % der Personen Atmen

Die intensive Atmungsaktivität und die daraus resultierende erhöhte Freisetzung und Einatmung von Aerosolen können dazu führen, dass Nutzerinnen und Nutzer von Sporteinrichtungen

- ▶ Körperliche Aktivität: Fall 1: mittel (4,8 met) und Fall 2: schwer (6,7 met)
- ▶ Mund-Nasenbedeckung: keine

Abb. 46 zeigt das relative Infektionsrisiko einer Einfeldhalle bei mittlerer Aktivität und Abb. 47 bei schwerer Aktivität in Abhängigkeit von der Personenanzahl und der Luftwechselrate. Bei einer Belegung von 30 Personen mit 1-fachem Luftwechsel ergibt sich in Fall 1 das relative Infektionsrisiko von ca. 32 und in Fall 2 von ca. 63. Dies bedeutet eine Wahrscheinlichkeit von 24 bis 100 % für mindestens eine Neuinfektion. Durch eine Erhöhung des Luftwechsels auf 6/h kann das relative Infektionsrisiko deutlich verringert werden auf Werte zwischen 5 und 15.

Bei Zwei- und Dreifeldhallen, siehe Abb. 48 bis Abb. 51, ist das relative Infektionsrisiko deutlich geringer. Dies ist auf das größere Luftvolumen zurückzuführen. Bei 30 Sporttreibenden und 1-fachem Luftwechsel werden bei der Zweifeldhalle Werte zwischen 10 und 20 erreicht; bei der Dreifeldhalle zwischen 8 und 16. Generell kann das Infektionsrisiko durch eine Reduktion der Personenanzahl oder durch eine Erhöhung des Luftwechsels gesenkt werden.

Es wurde jedoch festgestellt, dass das relative Infektionsrisiko mit dem CO₂-Gehalt der Luft korreliert und dieser damit als Indikator fungieren kann. Bei einem CO₂-Gehalt von 1000 ppm beträgt das relative Infektionsrisiko 1 (Müller et al., 2021). Während der Messungen in Sporthallen sind gemäß Kapitel 5.2 nur sehr vereinzelt innerhalb eines kurzen Zeitraums Werte von über 1000 ppm gemessen worden, was ein positives Indiz für ein geringes Infektionsrisiko darstellt.

Abb. 46: Relatives Infektionsrisiko in einer Einfeldhalle bei mittlerer Aktivität in Abhängigkeit der Personenanzahl und der Luftwechselrate.

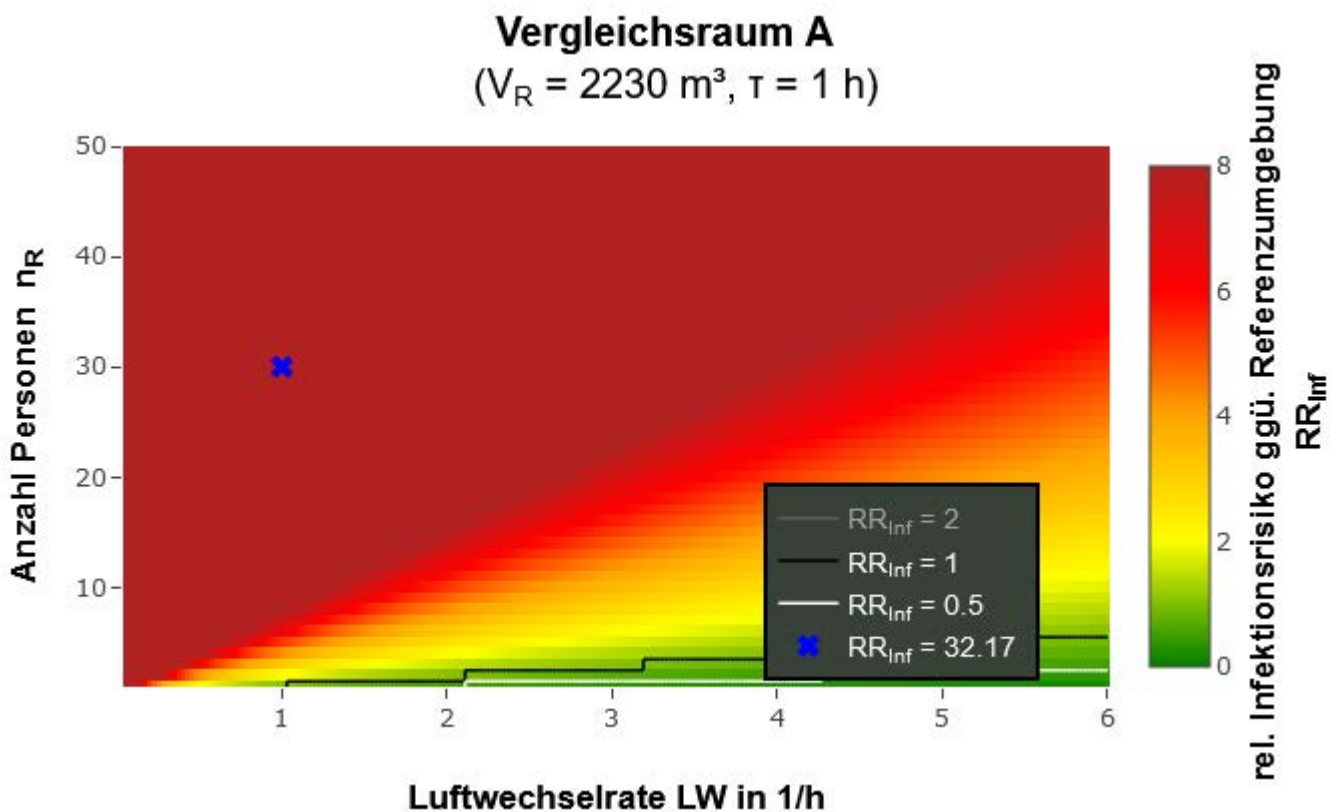


Abb. 47: Relatives Infektionsrisiko einer Einfeldhalle bei schwerer Aktivität in Abhängigkeit der Personenanzahl und der Luftwechselrate.

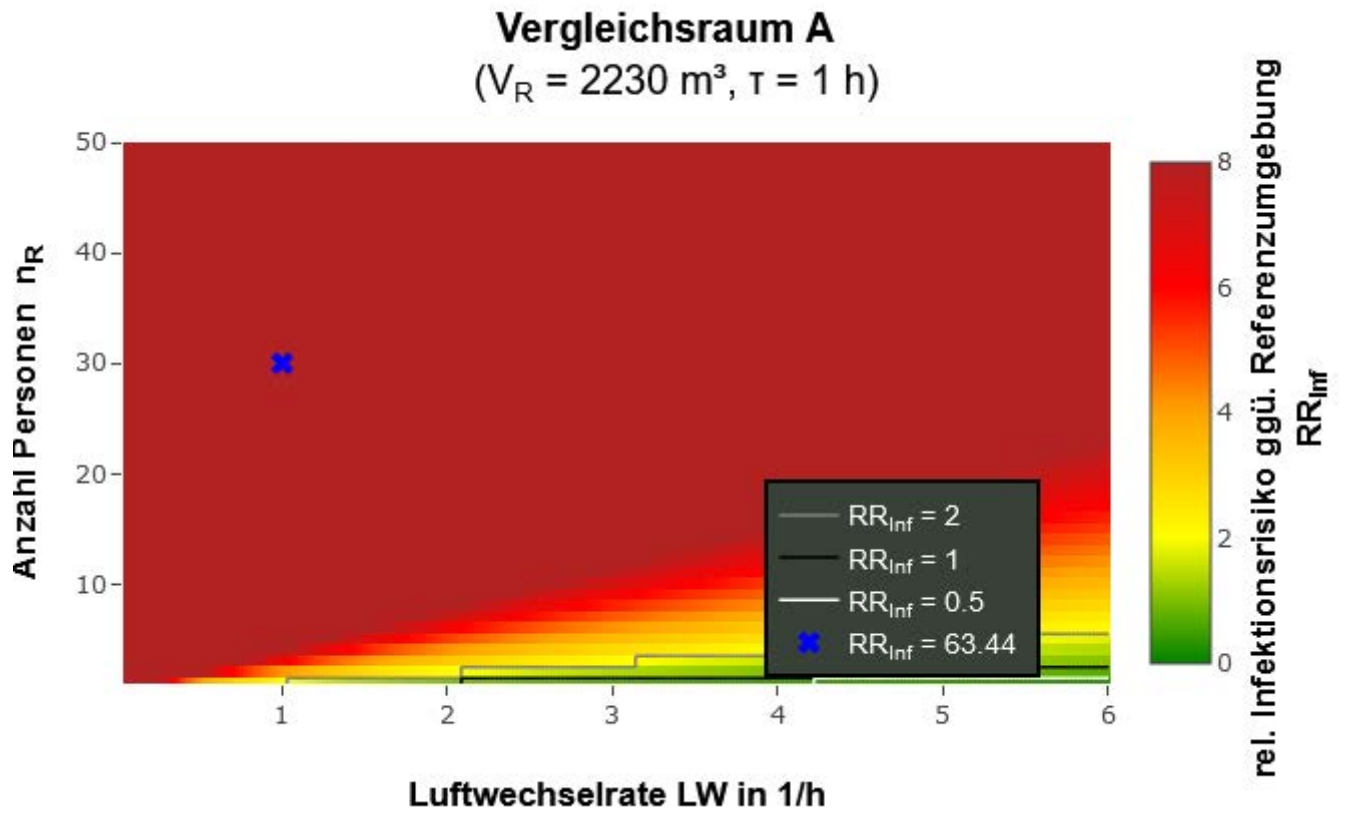


Abb. 48: Relatives Infektionsrisiko einer Zweifeldhalle bei mittlerer Aktivität in Abhängigkeit der Personenanzahl und der Luftwechselrate.

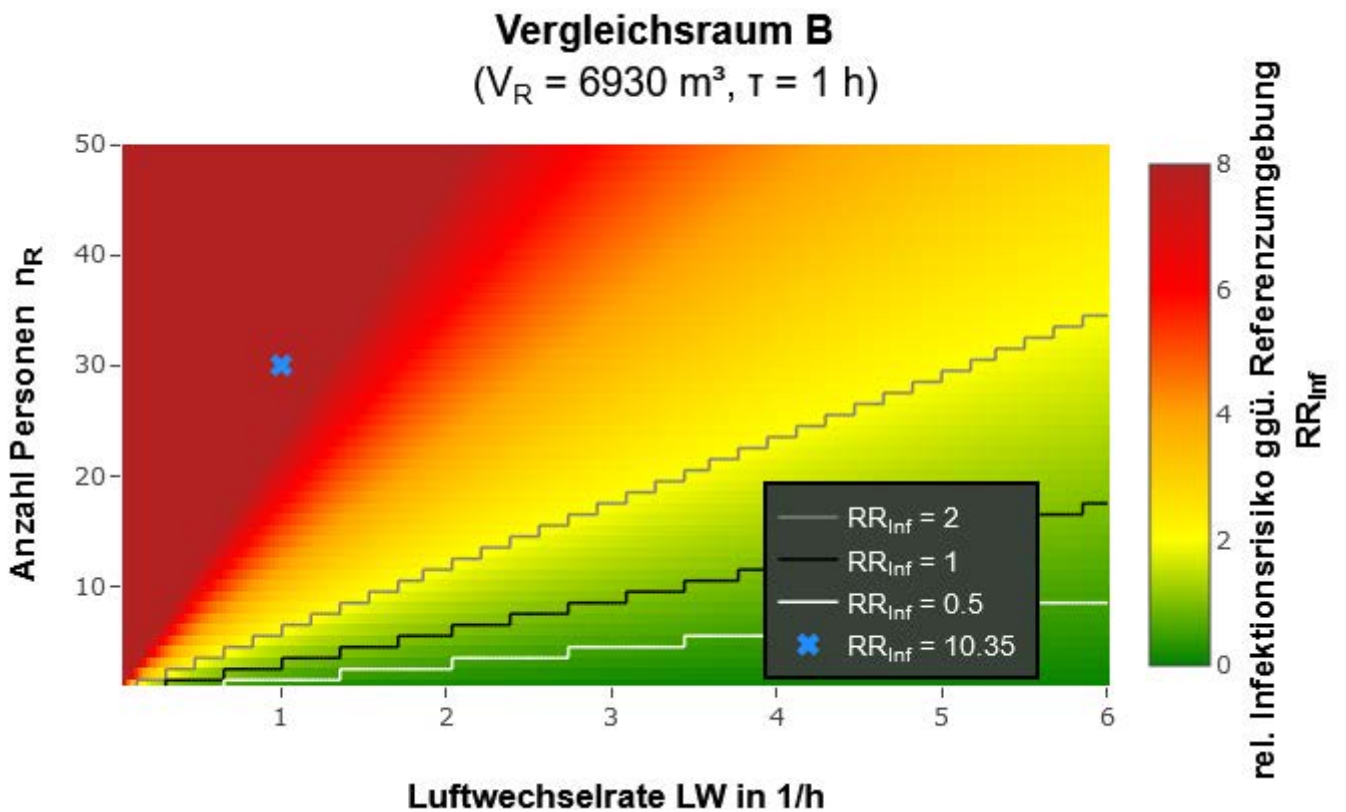


Abb. 49: Relatives Infektionsrisiko einer Zweifeldhalle bei schwerer Aktivität in Abhängigkeit der Personenanzahl und der Luftwechselrate.

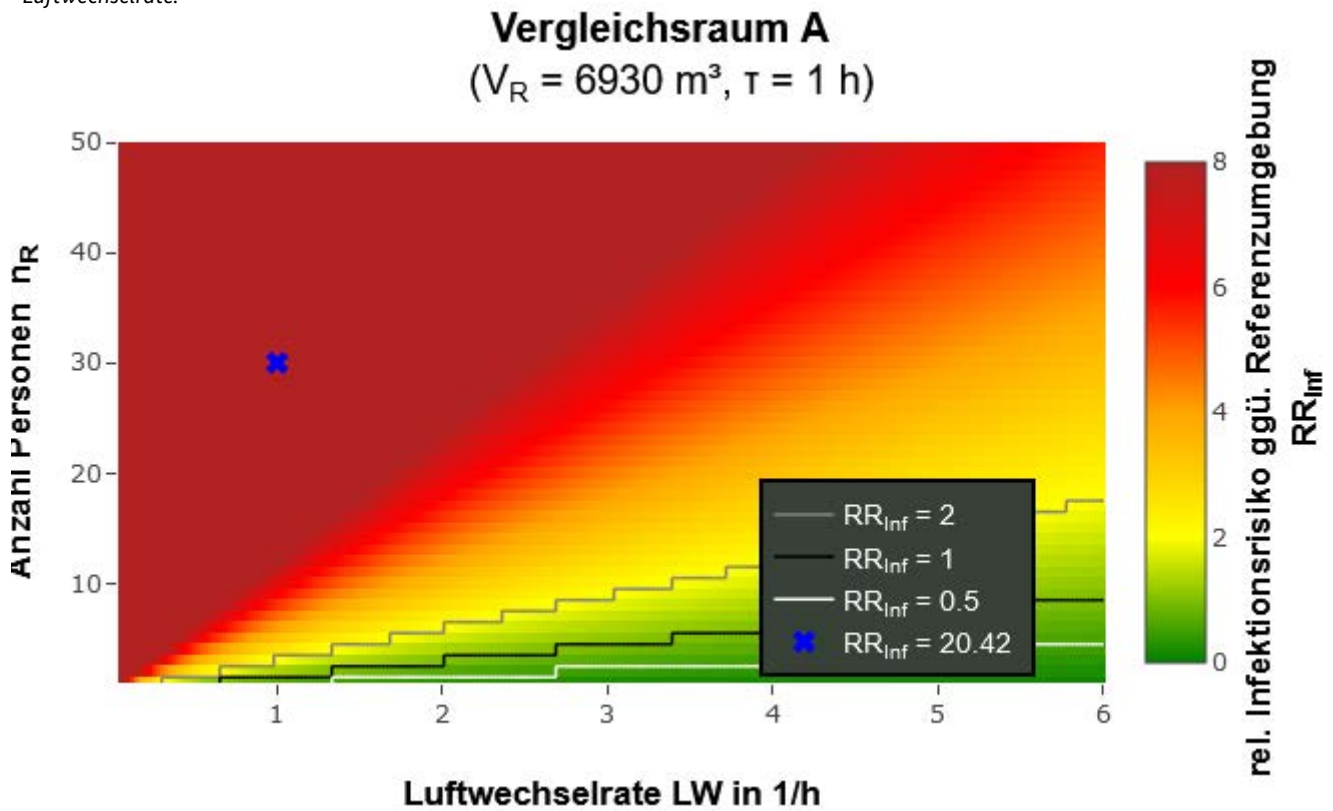


Abb. 50: Relatives Infektionsrisiko einer Dreifeldhalle bei mittlerer Aktivität in Abhängigkeit der Personenanzahl und der Luftwechselrate.

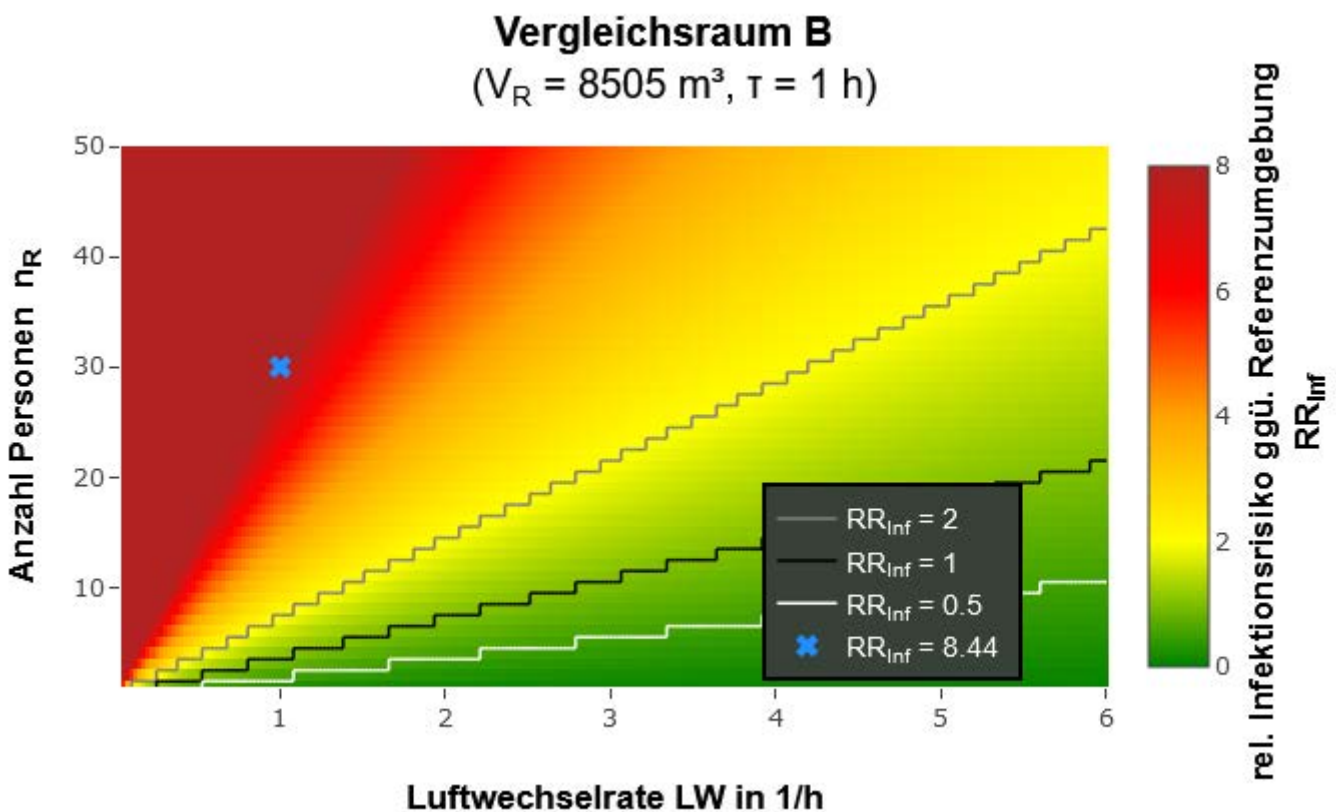
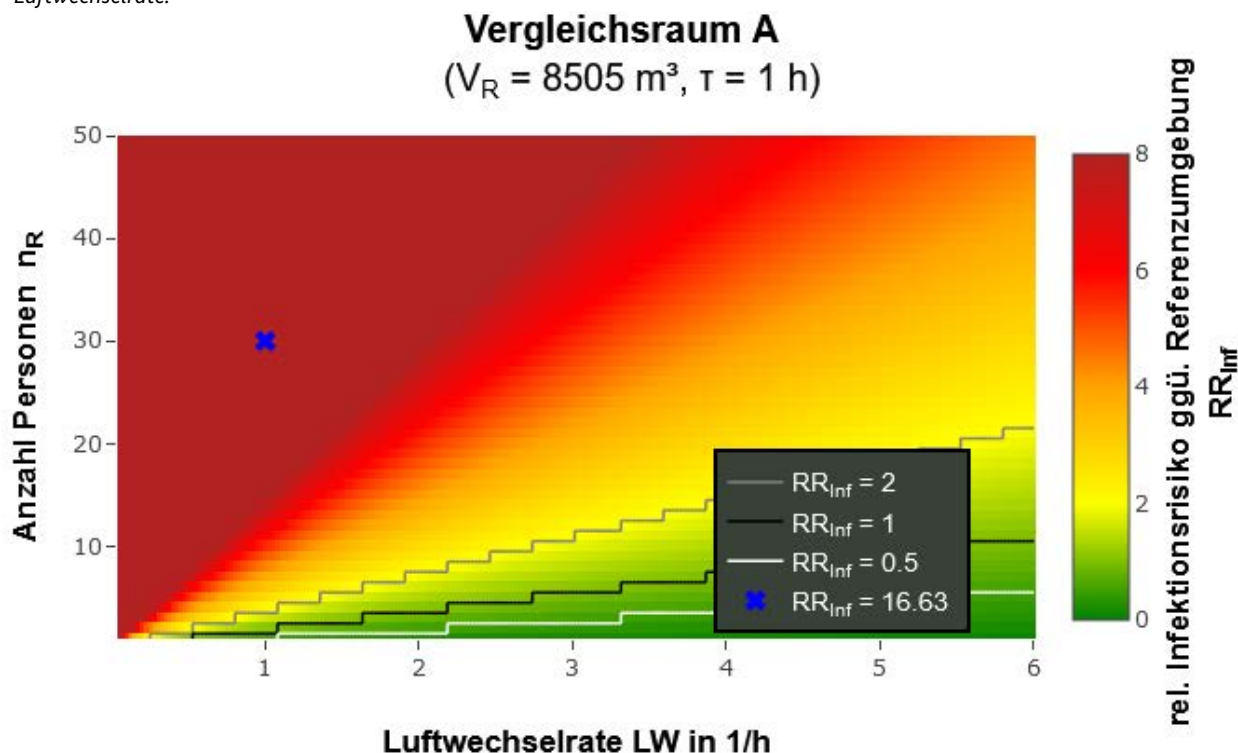


Abb. 51: Relatives Infektionsrisiko einer Dreifeldhalle bei schwerer Aktivität in Abhängigkeit der Personenanzahl und der Luftwechselrate.



8.3 Maßnahmen zur Reduktion des Infektionsrisikos

8.3.1 Lüftung

In Sporthallen sind verschiedene Arten der Belüftung denkbar und umgesetzt. Allerdings eignen sich nicht alle gleichermaßen zur Reduzierung des Infektionsrisikos.

Die Fensterlüftung weist die größten Unsicherheiten auf. Der Grad des Luftaustauschs hängt von Faktoren wie der Temperaturdifferenz zwischen der Außen- und Innenraumluft, der Größe der geöffneten Fläche sowie der Richtung und Geschwindigkeit des Windes ab. Daher ist sie als sichere Methode zur Senkung des Infektionsrisikos nicht zu empfehlen. Die Effektivität der Fensterlüftung kann jedoch über eine Messung und Kontrolle des CO₂-Gehalts kontrolliert werden (Kiegel & Hashemi, 2021; Kriegel & Hartmann, 2021).

Im Gegensatz zur natürlichen Lüftung über Fenster ist der Luftaustausch durch raumlufttechnische Anlagen besser kontrollierbar. Neben lokalen Verdrängungs- und Absaugmechanismen, die

in der Praxis kaum relevant sind und hauptsächlich in Reinraumlaboren Anwendung finden, sind die Mischlüftung und die Quelläftung (auch bekannt als Schichtlüftung) mögliche Methoden.

Die Mischlüftung erfolgt durch Zufuhr von Luft von den Wänden oder der Decke und verdünnt die verunreinigte Raumluft. Dadurch kann die Partikelkonzentration im Raum verringert werden, jedoch erreicht sie nicht zwangsläufig alle Bereiche des Raumes (Kriegel & Hartmann, 2021). Bei der Quelläftung wird die saubere Luft von unten in der Nähe des Bodens zugeführt. Die verunreinigte Luft wird im oberen Teil des Raumes abgesaugt. Dadurch entsteht eine saubere Luftschicht, die idealerweise bis über die Köpfe der Personen im Raum reicht" oder "die idealerweise bis zur Kopfhöhe der Personen im Raum reicht. Diese Art der Lüftung ist die effektivste Methode zur Reduzierung des Infektionsrisikos und kann auch außerhalb von Laboren umgesetzt werden (Kiegel & Hashemi, 2021).

Allerdings hängt die Effektivität der Belüftung immer vom Standort der Infektionsquelle, der Luftströmung im Raum und der Position von Zuluft und Abluft ab. Daher bietet keine Lüftungsart eine hundertprozentige Sicherheit.

8.3.2 Luftreinigung

Die Luftreinigungstechnologien lassen sich in abscheidende und entkeimende Verfahren unterteilen. Eine Möglichkeit besteht darin, Partikel wie Viren und Staub durch Filter abzuscheiden. Dabei gibt es ungeladene Vliesstofffilter, Vliesstofffilter mit elektrostatischem Abscheider und Elektrofilter. Die Filter in Luftreinigungsgeräten funktionieren zuverlässiger bei größeren Partikeln als bei sehr kleinen Partikeln wie Viren. Zudem müssen die Filter regelmäßig ausgetauscht werden und elektrostatische Abscheider können sich im Laufe der Zeit entladen, was zu einer Verringerung ihrer Effektivität führt (Verein deutscher Ingenieure, 2021).

Zu den entkeimenden Verfahren gehört die Plasmaluftreinigung, bei der vorhandene Mikroorganismen durch dissoziative und oxidative Abbaureaktionen deaktiviert werden (Viöl). Die Reduktionseffizienz dieser Geräte ist unterschiedlich und sollte beim Hersteller erfragt werden (Verein deutscher Ingenieure, 2021).

Am wirkungsvollsten ist die Entkeimung der Luft mittels UVC-Strahlung. Da diese kurzwellige Strahlung normalerweise von der Atmosphäre absorbiert wird, sind Mikroorganismen ihr gegenüber nicht resistent. Durch Bestrahlung mit UVC wird die DNA/RNA beschädigt und die Vermehrungsfähigkeit der Mikroorganismen gehemmt. Allerdings kann austretende UV-Strahlung auch für den Menschen gefährlich sein, weshalb eine Gefährdungsbeurteilung unter Berücksichtigung der Aufenthaltsdauer und der gewichteten UV-Dosis ratsam ist (Dr. Peter Sperfeld, 2021; Gober & Yigit, 2021; Verein deutscher Ingenieure., 2021).

Die Wirksamkeit von mobilen Luftreinigungsgeräten hängt stark von ihrer Position im Raum ab. Eine unsachgemäße Aufstellung kann die Wirksamkeit erheblich reduzieren, wenn beispielsweise Hindernisse nahe des Auslasses den Volumenstrom reduzieren oder die bereits gefilterte Luft direkt wieder angesaugt wird. Zudem sollten ausreichend viele Geräte vorhanden sein, um einen vierfachen Luftwechsel in allen Bereichen des Raumes zu gewährleisten. Dabei treten in größeren Räumen lokal deutliche Unterschiede auf. Da mobile Luftreiniger kein CO₂ abscheiden, ist dieses

als Indikator für die Überwachung der Luftqualität nicht geeignet (Thanheiser, 2021; Verein deutscher Ingenieure, 2021).

Insgesamt betrachtet wird der Einsatz von mobilen Luftreinigungsgeräten in Sporthallen als weniger sinnvoll erachtet, da eine große Anzahl von Geräten erforderlich ist, um die gewünschte Reinigungsleistung zu erzielen. Zudem können die Geräte kein CO₂ filtern, wodurch eine zusätzliche Lüftung ohnehin unerlässlich ist. Dabei ist auf einen möglichst hohen Außenluftanteil zu achten. Möglicherweise könnten Luftreinigungstechnologien in raumluftechnischen Anlagen implementiert werden, um die Vorteile beider Methoden zu kombinieren.

8.4 Fazit Infektionsrisiko

Sporttreibende können aufgrund ihrer hohen körperlichen Aktivität und der damit einhergehenden intensiven Atmungsaktivität einer hohen Konzentration von Schadstoffen wie beispielsweise Infektionserregern ausgesetzt sein. Dem gegenüber steht jedoch die große Zahl von Nutzenden im Verhältnis zum Luftvolumen, was zu einer geringeren Aerosolkonzentration führen kann, und die kurze Aufenthaltsdauer.

Generell kann das Infektionsrisiko durch eine Reduktion der Personenanzahl oder durch eine Erhöhung des Luftwechsels gesenkt werden. Dabei sind Raumluftechnische Anlagen mit Quelllüftung der Mischlüftung und Fensterlüftung vorzuziehen. Der Einsatz von mobilen Luftreinigungsgeräten wird als nicht zielführend bzw. praktikabel erachtet.

Die Überwachung der Luftqualität und die Steuerung der Lüftungsanlage durch die Messung des CO₂-Gehalts stellen eine sinnvolle Maßnahme zur Eindämmung des Infektionsrisikos durch luftgetragene infektiöse Partikel dar. Ein Grenzwert von 1000 ppm für den CO₂-Gehalt in Kopfhöhe wird hierbei empfohlen. Infektionsschutz bezieht sich daher nicht nur auf den Schutz vor Covid-19, sondern auch auf andere Erreger, die über Aerosole übertragen werden, sowie auf den Schutz vor verschiedenen Luftschadstoffen, wobei der CO₂-Gehalt als Indikator dient.

9 Zusammenfassung und Wissenstransfer

9 Zusammenfassung und Wissenstransfer

9.1 Zusammenfassung

Das Projekt fokussiert sich auf Sporthallen, deren Funktions- und Anforderungsbereiche auf der Basis von vorhandenen internationalen Richtlinien und Planungshandbüchern herausgearbeitet und in Standard-Grundrisse für Ein-Zwei- und Dreifeldhallen überführt wurden. Des Weiteren wurden sechs Energieklassen anhand der Mindestanforderungen nationaler Verordnungen, wie die Wärmeschutzverordnungen 1977 und 1982, die Energieeinsparverordnungen 2007 und 2014 und das Gebäudeenergiegesetz 2020, definiert. Sie Standard-Grundrisse und Energieklassen dienen gemeinsam als Basis und Referenz für die energetischen Betrachtungen und Optimierungen und damit als Grundlage der Gestaltungshinweise für die Modernisierung/Sanierung von Bestandshallen.

Die sportliche Aktivität wurde im Hinblick auf Vergleichbarkeit und Differenzierbarkeit der komfortablen Aufenthaltsbedingungen zwischen den Sportarten anhand sportbiologischer und -physiologischer Erkenntnisse über die fünf motorischen Fähigkeiten (Kraft, Ausdauer, Schnelligkeit, Koordination, Beweglichkeit) und deren Belastungsnormative beschrieben. Jeder Sportart können hierbei einzelne oder mehrere motorische Fähigkeiten mit spezifischer Gewichtung zugeordnet werden. Darüber hinaus wurden subjektive Anstrengungsgrade aus Ergebnissen der Befragungen in diese Betrachtung integriert.

Die Richtlinien bezüglich Anforderungen an die bauphysikalischen Umgebungsparameter in Sporthallen wurden auf internationaler Ebene recherchiert und analysiert. Hierbei hat sich der dringende Forschungsbedarf bestätigt, da beispielsweise Vorgaben zu Lufttemperaturen im Bereich zwischen 13 und 25 °C getroffen werden. Darüber hinaus wurde der Stand der Forschung im Hinblick auf Auswirkungen der bauphysikalischen Umgebungsparameter auf den Komfort und die Leistungsfähigkeit von Sporttreibenden

recherchiert. Die Forschungslage ist recht dürftig, wobei die daraus geschlossenen Tendenzen den Forschungsansatz dieses Projekts eindeutig stützen. Beispielsweise stellt eine Kombination aus hohen Umgebungstemperaturen und erhöhter relativer Luftfeuchtigkeit eine erhebliche Belastung für Sporttreibende dar und kann zu einer Leistungsminderung führen. Unterschiede und Abhängigkeiten in Bezug auf die Art der sportlichen Aktivität wurden bislang jedoch noch nicht erforscht.

Um diese Forschungslücke zu schließen, wurde ein kombiniertes Mess- und Befragungskonzept entwickelt, das insbesondere das Ziel verfolgt, nutzungsdifferenzierte Wahrnehmungen und Präferenzen für die bauphysikalischen Umgebungsparameter zu identifizieren. Gemessen wurden die Parameter Lufttemperatur, Luftfeuchte, Luftgeschwindigkeit, Strahlungstemperatur, CO₂-Konzentration, Schalldruckpegel und Beleuchtungsstärke in unterschiedlichen Höhen an raumgeometrisch und -physikalisch sinnvollen Standorten. Um die komplexe instationäre Bedingung eines Sporttreibenden abzubilden und dabei psychologische Erinnerungsfehler möglichst auszuschließen, wurde der Fragebogen in zwei Teile untergliedert, wobei ein Teil vor dem Sport und der andere nach dem Sport auszufüllen war. Die Untersuchungen zur Aufenthaltsqualität beschränkten sich auf die Halle und zugehörige Umkleidekabinen, da die Machbarkeit einer solch aufwändigen Studie gewährleistet sein muss. Öffentliche Bereiche, Sanitär-, Lager-, Erste-Hilfe-, Geräteräume und kleinere Räume für die sportliche Aktivität (wie Fitness- oder Gymnastikräume) wurden hierbei nicht betrachtet, fließen jedoch mit den geltenden Anforderungen und Bedingungen in die energetische Betrachtung mit ein.

Die Analysen der Raumklima-Messungen und -Befragungen in Sporthallen zeigen, dass die in der Norm festgelegte Nutzungstemperatur, die weder auf die Art des betriebenen Sports (z.B.

Yogastunde, Ausdauer- oder Kraftsport oder Mannschaftssport) eingeht noch auf die saisonal stark schwankenden Außenklimabedingungen, für die gesunde und attraktive Sportpraxis zu starr und pauschal angesetzt ist. Die gewonnenen Erkenntnisse führen zu einer empfohlenen operativen Betriebstemperatur von maximal 18 °C im Winter und 22 °C im Sommer, die an die spezifische Nutzungssituation anzupassen ist.

Mithilfe eines Simulationsprogramms wurden die Energiebedarfe der Standardgrundrisse je energetischer Kategorie berechnet. Hierbei wurden Parameterstudien bezüglich der Variation der Betriebstemperatur, des Luftwechsels und der Nacht- und Tagabsenkung durchgeführt, um daraus Handlungsempfehlungen hinsichtlich des Betriebs einer Heizungs- und Lüftungsanlage abzuleiten. Außerdem wurden die Einflüsse der aktiven Kühlung und interner Wärmegewinne auf den Energiebedarf untersucht. Zusätzlich zu den betrieblichen Maßnahmen zur Erhöhung der Energieeffizienz wurden bauliche Maßnahmen betrachtet, die mit einer Reduktion des mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten der wärmeübertragenden Gebäudehülle gleichzusetzen sind.

Auch wenn sie heute noch nicht praktiziert wird, eine dynamische Steuerung und Regelung des Raumklimas, basierend auf tatsächlichen Messdaten und Belegungsplänen, ist technisch möglich und bietet ein Potential zur Erhöhung der Energieeffizienz. Die Auswirkungen einer energetischen Modernisierung des Bauwerks stehen außer Frage. Hierbei bietet die Modernisierung auf den aktuellen energetischen Standard, vor allem bei älteren Sporthallen, ein enormes Einsparpotential.

Das Infektionsrisiko für Covid-19 wurde anhand einschlägiger Forschungsergebnisse aus anderen Fachdisziplinen erörtert. Sporttreibende können aufgrund ihrer hohen körperlichen Aktivität und der damit einhergehenden intensiven Atmungsaktivität einem hohen Risiko ausgesetzt sein. Generell kann das Infektionsrisiko durch eine Reduktion der Personenanzahl oder durch eine Erhöhung des Luftwechsels gesenkt werden. Dabei sind Raumluftechnische

Anlagen mit Quelläftung der Mischlüftung und Fensterlüftung vorzuziehen. Der Einsatz von mobilen Luftreinigungsgeräten wird als nicht zielführend oder praktikabel erachtet.

Die Überwachung der Luftqualität und die Steuerung der Lüftungsanlage durch die Messung des CO₂-Gehalts stellen eine sinnvolle Maßnahme zur Eindämmung des Infektionsrisikos durch luftgetragene infektiöse Partikel dar. Ein Grenzwert von 1000 ppm für den CO₂-Gehalt in Kopfhöhe wird hierbei empfohlen. Infektionsschutz bezieht sich daher nicht nur auf den Schutz vor Covid-19, sondern auch auf andere Erreger, die über Aerosole übertragen werden, sowie auf den Schutz vor verschiedenen Luftschadstoffen, wobei der CO₂-Gehalt als Indikator dient.

9.2 Gestaltungshinweise

Die gewonnenen Erkenntnisse ermöglichen die Ableitung von Gestaltungshinweisen für den Bau bzw. die Sanierung und den Betrieb von Sporthallen, kategorisiert nach Baujahr, gemäß Tabelle 29. Im Kontext der Realisierung energieeffizienter Sporthallen stellt die energetische Verbesserung der Gebäudehülle einen bedeutsamen Aspekt dar. Die Integration erneuerbarer Energien ist von Vorteil, um langfristige Nachhaltigkeit zu gewährleisten.

Es wird empfohlen, eine intelligent steuerbare Lüftungsanlage mit Quelläftung einzubauen, um sowohl eine gesunde Aufenthaltsqualität sicherzustellen als auch die Energieeffizienz zu steigern. Hierbei gewinnt CO₂ als „Infektionsindikator“ an Bedeutung. Insbesondere im Kontext der aktuellen Gesundheitslage wird CO₂ als ein Messwert betrachtet, der Aufschluss über die Luftqualität und die potentielle Ausbreitung von Infektionen geben kann. Durch eine Überwachung und gezielte Steuerung des CO₂-Gehalts in Innenräumen können Maßnahmen ergriffen werden, um die Sicherheit und Gesundheit der Nutzerinnen und Nutzer zu gewährleisten.

Des Weiteren spielt das Raumklima eine wichtige Rolle im Betrieb von Gebäuden. Eine anhand von Messdaten geregelte Hallenbetriebstemperatur

wird empfohlen, um den Komfort der Nutzenden zu gewährleisten. Je nach Bedarf kann auch eine passive oder aktive Kühlung zum Einsatz kommen, um ein angenehmes Raumklima zu schaffen. Insbesondere die Implementierung eines außenliegenden Sonnenschutzes und die Einrichtung von Nachtlüftungssystemen sind nachträglich problemlos umsetzbar. Die Nutzung von Gründächern und -fassaden kann bei Neubauhallen diskutiert werden, da sie zusätzlich einen positiven Einfluss auf die ökologische Nachhaltigkeit haben.

Die Nutzung von Tag- und Nachtabenkung ist eine weitere Strategie, um den Energieverbrauch

zu reduzieren. Dabei wird die Temperatur während der Nichtnutzungszeiten abgesenkt, um Energie einzusparen. Diese Methode ermöglicht eine effizientere Nutzung der Ressourcen.

Insgesamt sind Bau und Betrieb von nachhaltigen Sporthallen eng miteinander verbunden. Durch eine energetische Sanierung und den Einbau von steuer- und regelbaren Heizungs- und Lüftungsanlagen wird die Grundlage für die Umsetzung nachhaltiger Betriebsmaßnahmen geschaffen. Damit kann eine effiziente Nutzung von Ressourcen und Energie sowie eine langfristige Nachhaltigkeit erreicht werden.

Tabelle 26: Gestaltungshinweise für den Bau bzw. die Sanierung und den Betrieb von Sporthallen, kategorisiert nach Baujahr.

		Baujahr				
Gestaltungshinweise		bis 1977	1977 bis 2007	2007 bis 2014	2014 bis 2020	ab 2020
Bau	Gebäudehülle	<ul style="list-style-type: none"> - Dämmung der Außenwände - Dämmung der Bodenplatte - Dämmung des Dachs - Erneuerung der Fenster - Erneuerung der Türen 	<ul style="list-style-type: none"> - Dämmung der Außenwände - Dämmung der Bodenplatte - Erneuerung der Fenster - Erneuerung der Türen 	<ul style="list-style-type: none"> - Dämmung der Außenwände - Dämmung der Bodenplatte - Erneuerung der Fenster - Erneuerung der Türen 		
	Lüftung			Lüftungsanlage regelbar mit Quelllüftung		
	Energieversorgung			Nutzung erneuerbarer Energien		
	Kühlung			<ul style="list-style-type: none"> - außenliegender Sonnenschutz - Gründächer und -fassaden - Nachtlüftung 		
	Hallenbetriebstemperatur			<ul style="list-style-type: none"> - während Heizperiode 18 °C - außerhalb Heizperiode 22 °C - intelligente Steuerung anhand Temperatur-Messung 		
	Nachtsabsenkung			um 4 K	intelligente Steuerung anhand Belegungsplan	intelligente Steuerung anhand Belegungsplan
Betrieb	Tagabsenkung		um 4 K für einzelne Stunden/Tage/Wochen	intelligente Steuerung anhand Belegungsplan	intelligente Steuerung anhand Belegungsplan	um 2 K für mehrere Tage/Wochen
	Lüftung			<ul style="list-style-type: none"> - intelligente Steuerung anhand CO₂- und Feuchte-Messung - maximaler CO₂-Gehalt 1000 ppm - maximale relative Luftfeuchte 65 % 		

10 Diskussion und Ausblick

10 Diskussion und Ausblick

Die ganzheitliche Erfassung und Bewertung von Sporthallen im Quartierskontext beinhaltet die Betrachtung verschiedener Aspekte wie Baukonstruktion, Haustechnik und Nutzung. Es ist wichtig, den Zustand der Gebäude und ihrer Systeme zu analysieren, um Energieeinsparpotentiale zu identifizieren und geeignete Sanierungsmaßnahmen abzuleiten. Darüber hinaus sollten auch soziale und ökologische Aspekte berücksichtigt werden, um eine nachhaltige Quartiersentwicklung zu fördern.

Die Sanierung bestehender Gebäude spielt eine entscheidende Rolle bei der Energieeinsparung und der Erreichung von Klimazielen. Durch die Modernisierung von Gebäudehüllen, den Austausch ineffizienter Technologien und die Integration erneuerbarer Energien kann der Energieverbrauch erheblich reduziert werden. Sanierungsmaßnahmen tragen somit dazu bei, den CO₂-Ausstoß zu verringern und den Klimawandel einzudämmen. Die gezielte Förderung von Sanierungsprojekten und die Sensibilisierung der Akteure sind dabei von großer Bedeutung.

Bei der Umsetzung von Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz ist es wichtig, kommunale Machbarkeit, Wirtschaftlichkeit und Prioritäten zu berücksichtigen. Die finanziellen Ressourcen, die Verfügbarkeit von Fachkräften und die lokalen Bedingungen können die Umsetzbarkeit von Sanierungsprojekten beeinflussen. Eine sorgfältige Planung und Abstimmung der Maßnahmen unter Berücksichtigung der vorhandenen Rahmenbedingungen ist daher unerlässlich.

Um eine ganzheitliche Bewertung und effektive Umsetzung von energieeffizienten Maßnahmen zu erreichen, sind fachübergreifendes Wissen und eine enge Zusammenarbeit verschiedener Disziplinen erforderlich. Expertinnen und Experten sollten ihre Kompetenzen bündeln, um die komplexen Herausforderungen im Zusammenhang mit der Quartiersentwicklung anzugehen. Nur durch einen interdisziplinären Ansatz können

fundierte Entscheidungen getroffen und innovative Lösungen gefunden werden.

Die Erfassung und Analyse von Daten spielt eine wichtige Rolle bei der Bewertung der Energieeffizienz. Durch die Implementierung von Messsystemen und Monitoring-Tools können Informationen zum Energieverbrauch gesammelt und analysiert werden. Diese Daten liefern wichtige Erkenntnisse über den tatsächlichen Energieverbrauch und ermöglichen gezielte Maßnahmen zu dessen Reduzierung. Durch kontinuierliches Monitoring und regelmäßige Auswertung können Schwachstellen identifiziert und Optimierungspotentiale aufgedeckt werden.

Eine intelligente Regelung von Raumklima, Luftqualität und anderen gebäudetechnischen Parametern trägt zur Verbesserung der Aufenthaltsqualität und Energieeffizienz bei. Durch den Einsatz moderner Gebäudeautomatisierungssysteme können beispielsweise Heizung, Lüftung und Beleuchtung bedarfsgerecht gesteuert werden. Dadurch wird ein angenehmes und gesundes Raumklima geschaffen, während gleichzeitig der Energieverbrauch optimiert wird. Die Integration von Sensoren und datenbasierten Algorithmen ermöglicht eine präzise Anpassung der Gebäudeleistung an die jeweiligen Anforderungen und Nutzungsprofile.

Insgesamt unterstreichen diese Erkenntnisse die Bedeutung von individuellen Präferenzen und der Berücksichtigung von Anstrengungsgrad und Außenklimabedingungen für die Zufriedenheit mit der thermischen Behaglichkeit. Es liegt nahe, dass weitere Felduntersuchungen mit größeren und Laborstudien mit homogeneren Stichproben durchgeführt werden sollten, um die Zusammenhänge und Effekte genauer zu erforschen und möglicherweise ein aussagekräftigeres Vorhersagemodell zu entwickeln. Dennoch legt dieses Projekt den Grundstein für zukünftige Forschungsarbeiten und bietet eine erste Datengrundlage mit bedeutenden Anhaltspunkten.

Literaturverzeichnis

Literaturverzeichnis

- Ainsworth, B., Haskell, W., & Herrmann S. (2011). *2011 Compendium of Physical Activities: A Second Update of Codes and MET Values*. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 43(8), 1575–1581. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e31821ece12>
- AMEV RLT-Anlagenbau Empfehlung 140-2018. *Hinweise zur Planung und Ausführung von Raumluftechnischen Anlagen für öffentliche Gebäude*.
- Andrade, A., & Dominski, F. (2018). Indoor air quality of environments used for physical exercise and sports practice: Systematic review. *Journal of Environmental Management*, 206, 577–586. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.11.001>
- ANSI/ASHRAE Standard 55-2023. *Thermal Environment Conditions for Human Occupancy*.
- Artuso, P., & Santiangeli, A. (2008). Energy solutions for sports facilities. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(12), 3182–3187.
- ASHRAE Standard 62.1-2016. *Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality*.
- Beckmann, J., & Elbe, A.-M. (2015). *Sport psychological interventions in competitive sports*. Cambridge Scholars Publishing.
- Beugger, T., Coulon, A., Jaquet, J.-P., Gut, R., Gy-gax, R., Schwendimann, M., & Strupler, M. (2017). *Sporthallen Planungsgrundlagen*. Bundesamt für Sport BASPO. Abruf unter <https://doi.org/10.24451/ARBOR.14461> [Titel anhand dieser DOI in Citavi-Projekt übernehmen]
- Borg, G. A. V. (1982). Psychophysical bases of perceived exertion. *Medicine & Science in Sports & Exercise*(14), 377–381. Abruf unter <https://doi.org/10.1249/00005768-198205000-00012>
- Bös, K., & Mechling, H. (1983). *Dimensionen sportmotorischer Leistungen*. Hofmann.
- Brengelmann, G. L. (1983). Circulatory adjustments to exercise and heat stress. *Annual Review of Physiology*, 45(1), 191–212.
- Brodoy, E. E., Moreto, J. A., Xavier, A. A. P., & Oliveira, R. (2019). The approximation between thermal sensation votes (TSV) and predicted mean vote (PMV): A comparative analysis. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 69, 1–8.
- Brotherhood, J. R. (2008). Heat stress and strain in exercise and sport. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 11(1), 6–19.
- Bundesinstitut für Sportwissenschaft. (1987). *Orientierungshilfen zur Planung und Ausstattung von Konditions- und Fitnessräumen. Sport- und Freizeitanlagen / Planungsgrundlagen*.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. (2015). *Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB), Büro- und Verwaltungsgebäude, Kriterien 3.1.1 und 3.1.3*.
- Carlisle, A. J., & Sharp, N. C. (2001). Exercise and outdoor ambient air pollution. *British Journal of Sports Medicine*, 35(4), 214–222. <https://doi.org/10.1136/bjism.35.4.214>
- Cheung, S. S. (2010). Interconnections between thermal perception and exercise capacity in the heat. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 20(3), 53–59. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2010.01209.x>

- Cheung, T., Schiavon, S., Parkinson, T., Peixian Li, & Gail Brager (2019). Analysis of the accuracy on PMV – PPD model using the ASHRAE Global Thermal Comfort Database II. *Building and Environment*, 153, 205–217. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.01.055>
- Cianfanelli, C., Valeriani, F., Santucci, S., Giampaoli, S., Gianfranceschi, G., Nicastro, A., Borioni, F., Robaud, G., Mucci, N., & Spica, V. R. (2016). Environmental Quality in Sports Facilities: Perception and Indoor Air Quality. *Journal of Physical Education and Sports Management*, 3(2). <https://doi.org/10.15640/jpesm.v3n2a4>
- CONI 1379-2008. Norme Coni per L'impiantistica Sportiva: Norme Coni per L'impiantistica Sportiva.
- Cory, W. T. W. (2005). *Fans & ventilation: A practical guide*. Elsevier. Abruf unter <http://www.engineeringvillage.com/controller/servlet/Open-URL?genre=book&isbn=9780080446264>
- Cui, W., Wang, H., Wu, T., Ouyang, Q., Hu, S., & Zhu, Y. (2017). The influence of a low air pressure environment on human metabolic rate during short-term (< 2 h) exposures. *Indoor Air*, 27(2), 282–290.
- Dear, R. de, & Brager, G. S. (1998). Developing an adaptive model of thermal comfort and preference. *UC Berkeley: Center for the Built Environment*. Abruf unter Retrieved from <https://escholarship.org/uc/item/4qq2p9c6>
- Dentel, A., & Dietrich, U. *Thermische Behaglichkeit – Komfort in Gebäuden [Dokumentation Primero - Komfort]*. HafenCity Universität, Hamburg.
- Deutscher Boxsport-Verband e.V. (21. Juni 2021). *Wettkampfbestimmungen – Deutscher Boxsport-Verband e.V.* Abruf unter <https://www.boxverband.de/wettkampfbestimmungen/>
- DIN 18032-1:2014-11. *Sporthallen – Hallen und Räume für Sport und Mehrzwecknutzung: Teil 1: Grundsätze für die Planung*. Beuth Verlag GmbH.
- DIN 277:2021-08. *Grundflächen und Rauminhalte im Hochbau*. Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN 15251:2012-12. *Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden: Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik*. Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN 16798-1:2021-04. *Energetische Bewertung von Gebäuden – Lüftung von Gebäuden: Teil 1: Eingangsparameter für das Innenraumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden bezüglich Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik*. Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO 7726:2021-03. *Umgebungs-klima - Instrumente zur Messung physikalischer Größen: Umgebungs-klima – Instrumente zur Messung physikalischer Größen*. Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO 7730:2023-04. *Ergonomie der thermischen Umgebung – Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit*. Berlin. Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO 8996:2020-11. *Ergonomie der thermischen Umgebung – Bestimmung des körpereigenen Energieumsatzes*. Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO 9920:2009-10. *Ergonomie der thermischen Umgebung – Abschätzung der Wärmeisolation und des Verdunstungswiderstandes einer Bekleidungskombination*. Beuth Verlag GmbH.

- DIN/TS 18599-13:2020-10. *Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung: Teil 13: Tabellenverfahren für Nichtwohngebäude*. Beuth Verlag GmbH.
- DocCheck Medizinlexikon. *Körperoberfläche*. Abruf unter <https://flexikon.doccheck.com/de/Körperoberfläche>
- Dugas, J. P. (2010). How hot is too hot? Some considerations regarding temperature and performance. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 5(4), 559–564.
- Eßig, N., Lindner, S., Magdolen, S., & Siegmund, L. (2015). *Leitfaden Nachhaltiger Sportstättenbau: Kriterien für den Neubau nachhaltiger Sporthallen*. Sportverlag Strauß.
- Fantozzi, F., & Lamberti, G. (2019). Determination of Thermal Comfort in Indoor Sport Facilities Located in Moderate Environments: An Overview. *Atmosphere*, 10(12), 769. <https://doi.org/10.3390/atmos10120769>
- Federation Internationale de Gymnastique. *Technical Regulations 2020 amended, valid until 31.12.2021*. Abruf unter https://www.gymnastics.sport/publicdir/rules/files/en_Technical%20Regulations%202021.pdf
- Fédération Internationale de Volleyball. (21. Juni 2021). *Regulations and Forms*. Abruf unter <https://www.fivb.com/en/volleyball/regulationsofficialforms>
- Fiala, D., Lomas, K. L., & Stohrer, M. (1999). A computer model of human thermoregulation for a wide range of environmental conditions: The passive system. *Journal of Applied Physiology*, 87(5), 1957–1972.
- FIFA. *FIFA Fußballregeln*. Abruf unter https://www.dfb.de/fileadmin/_dfbdam/225108-FIFA_Futsalregeln_2020_2021_.pdf
- Fortin, T. Specifications for International Standard Facilities: Section 5.3.4. Abruf unter https://system.bwfbadminton.com/documents/folder_1_81/Statutes/CHAPTER-5---TECHNICAL-REGULATIONS/Section%205.3.4%20-%20Specs%20for%20Int'l%20Standard%20Facilities.pdf
- Fraunhofer IBP. *WUFI®Plus V.3.2.0.1 [Software]*. Abruf unter <https://wufi.de/de/software/wufi-plus/>
- Fromme, H., Debiak, M., Sagunski, H., Röhl, C., Kraft, M., & Kolossa-Gehring, M. (2019). *The German approach to regulate indoor air contaminants*. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 222(3), 347–354. Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme und Kälteerzeugung in Gebäuden.
- Gleeson, M. (1998). Temperature regulation during exercise. *International Journal of Sports Medicine*, 19(2), S96 - 99.
- Gober, N., & Yigit, F. (9. Juli 2021). *UVG-Raumluftentkeimung: Eine bewährte Technologie*. AG LUV. Fraunhofer IBP. IBP Expertengespräch Raumluftreinigungstechnologien.
- Gottfried, C. O., Lohmeyer, H., & Bergmann, M. (2005). *Praktische Bauphysik: Eine Einführung mit Berechnungsbeispielen*. Springer Fachmedien Wiesbaden.

- Griefahn, B., Künemund, C., & Gehring, U. (2001). The impact of draught related to air velocity, air temperature and workload. *Applied Ergonomics*, 32(4), 407–417.
- Gunnarsson, L., & Thapper, C. (2015). Integrated report. Energy audits and Energy Performance Certification. *step2sport*.
- Hald, D. (2021). *Bauphysikalische Anforderungen an und energetische Bilanzierung von Sportstätten* [Masterarbeit]. Universität Stuttgart.
- Hardy, J. D., Du Bois, E. F., & Soderstrom, G. F. (1938). The technic of measuring radiation and convection: one figure. *The Journal of Nutrition*, 15(5), 461–475.
- Hartmann, A., & Kriegel, M. (2021). *Vergleich der inhalierten Dosis von virenbeladenen Aerosolpartikeln in Klassenzimmern bei verschiedenen Lüftungsarten zur Einordnung in die Definition „Enge Kontaktperson“ gemäß Robert-Koch-Institut*. <https://doi.org/10.14279/depositonce-12665>
- Hottenrott, K., & Neumann, G. (2016). *Trainingswissenschaft: Ein Lehrbuch in 14 Lektionen*. Meyer & Meyer.
- Humphreys, M. A., & Nicol, F. (2002). The validity of ISO-PMV for predicting comfort votes in every-day thermal environments. *Energy and Buildings*, 34(6), 667–684. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00018-X](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00018-X)
- IBM Deutschland GmbH. *SPSS Statistics V28.0.0.0 [Software]*. Abruf unter <https://www.ibm.com/de-de/spss>
- Illeperuma, I. A. (2014). A Cost Benefit Analysis of Improving Energy Efficiency of a Fitness Facility. *Journal of Environmental and Resource Economics*, 01(01), Article 8. Abruf unter <https://digitalcommons.colby.edu/jerec/vol01/iss01/8>
- International Dance Organisation. *IDO Dance Sport Rules and Regulations*. Abruf unter <https://www.ido-dance.com/ceis/ido/rules/competitionRules/2021-IDO-Dance-Sport-Rules-and-Regulations.pdf>
- International Fencing Federation. (21. Juni 2021). *Offizielle Webseite*. Abruf unter <https://fie.org/development/projects>
- International Fitness Association. (7. Juli 2020). *Gym Temperature and Noise Limits*. Abruf unter <https://www.ifafitness.com/health/temperature.htm>
- International Handball Federation. *Recommendations and Guidelines für the Construction of Handball Playing Halls*. Abruf unter <http://www.handball.ee/g84s4107>
- International Hockey Federation. *Facilities guidance Indoor Hockey*. Abruf unter <http://www.fih.ch/media/13414916/fih-guide-to-indoor-hockey-facilities.pdf>
- International Judo Federation. *Sport and Organisation Rules*. Abruf unter https://78884ca60822a34fb0e6-082b8fd5551e97bc65e327988b444396.ssl.cf3.rackcdn.com/up/2021/05/IJF_Sport_and_Organisation_Rul-1622041960.pdf
- International Table Tennis Federation. *Handbook 2021*. Abruf unter <https://documents.ittf.sport/sites/default/files/public/2021-06/2021ITTFHandbook.pdf>

- International Tennis Federation. (21. Juni 2021). *Facilities Guide*. Abruf unter <http://itf.uberflip.com/i/1255985-facilities-guide/27?>
- International Weightlifting Federation. *IWF Guidelines*. Abruf unter https://www.iwf.net/wp-content/uploads/downloads/2015/11/IWF-Guidelines_Sustainability.pdf
- Jessen, C. (2001). *Temperature Regulation in Humans and Other Mammals*. Springer Berlin Heidelberg.
- Kenney, W. L., Wilmore, J. H., & Costill, D. L. (2015). *Physiology of sport and exercise*. Human kinetics.
- Kim, K. H., Kabir, E., & Kabir, S. (2015). A review on the human health impact of air-borne particulate matter. *Environment International*, 74, 136–143. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.10.005>
- Kriegel, M., & Hashemi, D. (2021). *COVID-19 – Ausbreitung von Aerosolen im Raum | TU Berlin | Prof. Dr. Martin Kriegel [Youtube-Video]*. Abruf unter <https://www.youtube.com/watch?v=zZ6pMkgGZv8>
- Kriegel, M. (2020). *Anzahl der mit SARS-CoV-2 beladenen Partikel in der Raumluft und deren eingeatmete Menge, sowie die Bewertung des Infektionsrisikos, sich darüber mit Covid-19 anzustecken*. <https://doi.org/10.14279/depositonce-10655>
- Kriegel, M., & Hartmann, A. (2021). *Covid-19 Ansteckung über Aerosolpartikel – vergleichende Bewertung von Innenräumen hinsichtlich des situationsbedingten R-Wertes*. <https://doi.org/10.14279/depositonce-11387.2>
- Länder-Arbeitskreis zur Erstellung von Hygieneplänen. (2005). *Empfehlungen zur Hygiene in Sportstätten*.
- Laursen, P. (2012). Keeping your cool: Possible mechanisms for enhanced exercise performance in the heat with internal cooling methods. *Sports Medicine*, 42(2), 89–98.
- Lewis, M. *Sustainable Development in Basketball Arenas*. Abruf unter <http://www.fiba.basketball/documents/sustainabledevelopment.pdf>
- Lindberg, A.-S., Malm, C., Hammarstrom, D., Oksa, J., & Tonkonogi, M. (2012). Maximal Work Capacity and Performance Depends Warm-up Procedure and Environmental but not Inspired Air Temperatures. *Journal of Exercise Physiology Online*, 15(1), 26–39.
- Maiti, R. (2014). PMV model is insufficient to capture subjective thermal response from Indians. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 44(3), 349–361.
- McArdle, W. D., Katch, F. I., & Katch, V. L. (2010). *Exercise physiology: nutrition, energy, and human performance*. Lippincott Williams & Wilkins.
- Mors, S., Hensen, J. L. M., Loomans, M. G., & Boerstra, A. C. (2011). Adaptive thermal comfort in primary school classrooms: Creating and validating PMVbased comfort charts. *Building and Environment*, 46(12), 2454–2461.
- Müller, D., Rewitz, K., Derwein, D., Burgholz, T. M., Schweiker, M., Bardney, J., & Tappler, P. (2021). Abschätzung des Infektionsrisikos durch aerosolgebundene Viren in belüfteten Räumen (2. überarbeitete und korrigierte Auflage). *RWTH-EBC(002)*.

- Mürbe, D., Schumann, L., Hartmann, A., Ifrim, L., Zadow, D., Lüske, J., Seybold, J., Kriegel, M., & Fleischer, M. *Vergleich der Aerosolpartikelemissionen von Grundschulkindern und Erwachsenen beim Atmen, Sprechen, Singen und Rufen*. Charité – Universitätsmedizin Berlin; Technische Universität Berlin.
- Nielsen, M. (1938). Die Regulation der Körpertemperatur bei Muskelarbeit 1. *Skandinavisches Archiv für Physiologie*, 79(2), 193–230.
- Parsons, K. C. (2014). *Human thermal environments: The effects of hot, moderate, and cold environments on human health, comfort and performance* (3. Auflage). CRC Press/Taylor & Francis Group.
- Ramos, C. A., Wolterbeek, H. T., & Almeida, S. M. (2014). Exposure to indoor air pollutants during physical activity in fitness centers. *Building and Environment*, 82, 349–360. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.08.026>
- Rietschel, J. (2021). *Energetische Kategorisierung von Sporthallen im Bestand sowie Analyse des Energieeinsparpotentials durch variable Betriebstemperatur und Raumlüftung* [Bachelorarbeit]. Universität Stuttgart.
- RWTH Aachen. *RisiCo [Software]*. Abruf unter <https://risico.eonerc.rwth-aachen.de/>
- Salonen, H., Salthammer, T., & Morawska, L. (2020). Human exposure to air contaminants in sports environments. *Indoor Air*, 30(6), 1109–1129. <https://doi.org/10.1111/ina.12718>
- Salthammer, T., Uhde, E., Schripp, T., Schieweck, A., Morawska, L., Mazaheri, M., Clifford, S., He, C., Buonanno, G., & Querol, X. (2016). Children's wellbeing at schools: Impact of climatic conditions and air pollution. *Environment International*, 94, 196–210.
- Schaudienst, F., & Vogdt, F. U. (2017). Fanger model of thermal comfort: a model suitable just for men? *Energy Procedia*, 132, 129–134.
- Schlüter, M. e. a. (Juli 2021). *Coronavirus-Pandemie: Wie lassen sich Infektionen durch Aerosole verhindern?* DFG.
- Senatsverwaltung für Bildung, Wissenschaft und Forschung Berlin. (2011). *Planungshandbuch Sporthallen*.
- Smolander, J., Kolari, P., Korhonen, O., & Ilmarinen, R. (1986). Aerobic and anaerobic responses to incremental exercise in a thermoneutral and a hot dry environment. *Acta Physiologica Scandinavica*, 128(1), 15–21.
- SNIP 31-112-2004 The National Building Regulation of Russia. *Consideration for the design and construction of buildings: Part 1 Sport halls*.
- Sperfeld, P. (Juli 2021). DIN/TS 67506 (D) "Entkeimung von Raumluft mit UV Strahlung": *Stand der Arbeit*. Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig und Berlin. Fraunhofer IBP. IBP Expertengespräch Raumlüftungstechnologien,
- Thanheiser, M. (9. Juli 2021). *Möglichkeiten und Grenzen von mobilen Luftreinigern und Raumdesinfektionsverfahren*. Robert-Koch-Institut. Fraunhofer IBP. IBP Expertengespräch Raumlüftungstechnologien.

- Toftum, J., & Nielsen, R. (1996). Draught sensitivity is influenced by general thermal sensation. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 18(4), 295–305.
- Torrentellé, M., & Escamilla, M. (2015). Roadmap towards nearly Zero Energy Sport Buildings. *step2sport*.
- Trianti-Stourna, E. (1997). Energy conservation strategies for sport centers:: Part A. Sport halls. *Energy and Buildings*.
- United World Wrestling. *Requirements for the Organisation of World Cups*. Abruf unter https://uww.org/sites/default/files/2018-09/senior_world_cups_en.pdf
- van Hoof, J. (2008). Forty years of Fanger's model of thermal comfort: comfort for all? *Indoor Air*, 18(3), 182–201.
- Verein deutscher Ingenieure. (September 2021). *Messen von Innenraumluftverunreinigung: Anforderungen am mobile Luftreiniger zur Reduktion der aerosolgebundenen Übertragung von Infektionskrankheiten* (Expertenempfehlung VDI-EE 4300).
- Viöl, W. *Plasma-Luftreinigung*. Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst Hildesheim/Holzminden/Göttingen. Fraunhofer IBP. IBP Expertengespräch Raumluftreinigungstechnologien.
- Weineck, J. (2007). *Optimales Training: Leistungsphysiologische Trainingslehre unter besonderer Berücksichtigung des Kinder- und Jugendtrainings* (15. Auflage). Medizin. Spitta-Verlag.
- WetterKontor GmbH. *Wetterrückblick [Internettool]*. Abruf unter <https://www.wetterkontor.de/de/wetter/deutschland/rueckblick.asp>
- WHO. Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide.
- World Squash Federation. *Specifications for Squash Courts*. Abruf unter <https://www.ussquash.com/wp-content/uploads/2012/08/WSF-Court-Specifications.pdf>
- World Taekwondo. (21. Juni 2021). *World Taekwondo Rules*. Abruf unter <http://m.worldtaekwondo.org/rules-wt/rules.html?sc=01>
- Yau, Y. H., & Chew, B. T. (2014). A review on predicted mean vote and adaptive thermal comfort models. *Building Services Engineering Research and Technology*, 35(1), 23–35.
- Zhai, Y., Elsworth, C., Arens, E., Zhang, H., Zhang, Y., & Zhao, L. (2015). Using air movement for comfort during moderate exercise. *Building and Environment*, 94, 344–352. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.08.026>
- Zhao, J., Lorenzo, S., An, N., Feng, W., Lai, L., & Cui, S. (2013). Effects of heat and different humidity levels on aerobic and anaerobic exercise performance in athletes. *Journal of Exercise Science & Fitness*, 11(1), 35–41. <https://doi.org/10.1016/j.jesf.2013.04.002>

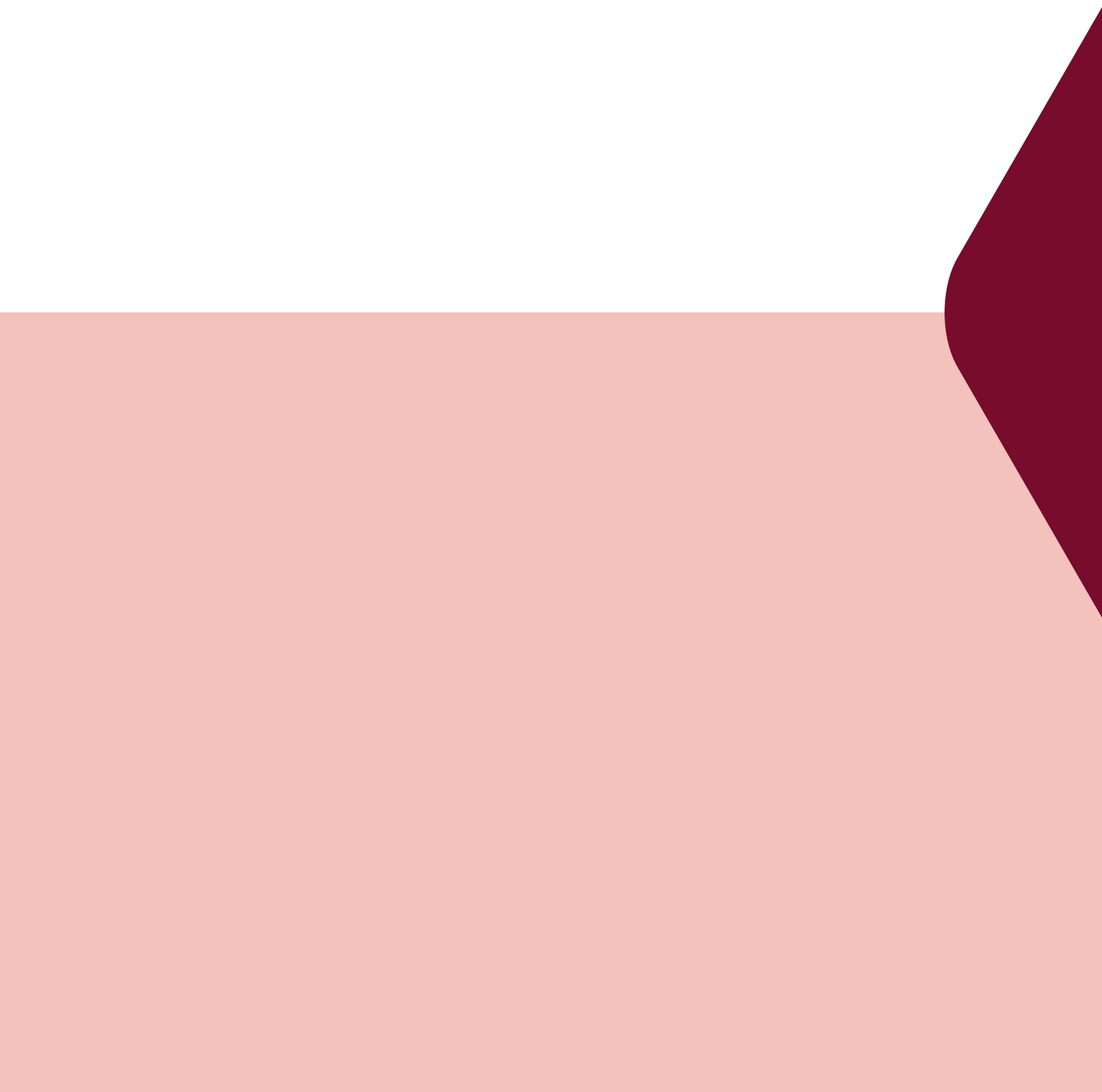
Tabellenverzeichnis

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	9
Bauphysikalische Anforderungen an Sporthallen nach DIN 18032-1 (DIN 18032-1:2014-11).	
Tabelle 2:	10
Bauphysikalische Anforderungen je Sportart gemäß Vorgaben internationaler Sportverbände.	
Tabelle 3:	11
Geschätzter Wärmeverlust im Ruhezustand und bei sportlicher Betätigung (modifiziert nach Kenney et al., 2015).	
Tabelle 4:	13
Einflussfaktoren auf die thermische Behaglichkeit.	
Tabelle 5:	14
Typische Stoffwechselraten für verschiedene (sportliche) Aktivitäten (modifiziert nach Ainsworth et al., 2011).	
Tabelle 6:	15
Isolationswerte zahlreicher typischer Kleidungsstücke (DIN EN ISO 9920:2009-10).	
Tabelle 7:	16
7-stufige Bewertungsskala (links) und Einflussparameter mit ihrem Anwendungsbereich für den PMV (rechts), nach DIN EN ISO 7730:2023-04.	
Tabelle 8:	19
Bandbreiten der Anteile verschiedener Energieverbraucher am Gesamtenergieverbrauch, klassifiziert nach Arten von Sportstätten (modifiziert nach Gunnarsson & Thapper, 2015).	
Tabelle 9:	25
Belastungsnormative der fünf motorischen Fähigkeiten (Ausdauer, Kraft, Schnelligkeit, Koordination und Beweglichkeit) (Hald, 2021).	
Tabelle 10:	27
15-stufige Borg-Skala nach Borg et al. (Borg, 1982).	
Tabelle 11:	28
Nutzungsdifferenzierung: 5-stufige Bewertungsskala des subjektiven Anstrengungsgrades.	
Tabelle 12:	28
Geometrische Hallentypen mit ihren lichten Mindestmaßen nach DIN 18032-1 (DIN 18032-1:2014-11).	
Tabelle 14:	29
Geometrische Kenngrößen und maximale Wärmedurchgangskoeffizienten der drei geometrischen Hallentypen je energetischer Kategorie nach Rietschel, 2021.	

Tabelle 15:	33
Maximale Abweichung der einzelnen Messgrößen vom Mittelwert zur Bewertung der räumlichen Homogenität und zeitlichen Konstanz.	
Tabelle 16:	36
Außenklimadaten während der Untersuchungen im Sommer und Winter.	
Tabelle 17:	40
Probandendaten Anzahl und Aufteilung nach Geschlecht.	
Tabelle 18:	40
Probandendaten Alter und BMI.	
Tabelle 19:	42
Korrelationen der empfundenen und gemessenen Raumumgebung mit der Zufriedenheit der Sporttreibenden.	
Tabelle 20:	71
Energieeinsparpotential in kWh/m ² a durch 1 h Tag- bzw. Nachtabsenkung pro Jahr in Bezug auf konstante Innenklimabedingungen von 18 °C mit 1-fachem Luftwechsel.	
Tabelle 21:	72
Energieumsätze und geschätzte Wärmeabgabe (70 %) verschiedener Tätigkeiten (Annahme Körperoberfläche Kind 1,33 m ² , Erwachsener 1,9 m ²).	
Tabelle 22:	73
Hallenbelegung bei regulärem Vereinssport und Schulsport.	
Tabelle 23:	75
Prozentuale (Heiz-)Energieeinsparung durch energetische Modernisierung von Bestandshallen auf den energetischen Stand des Gebäudeenergiegesetzes 2020, in Abhängigkeit des Baujahrs, bzw. des beim Bau geltenden energetischen Standards. Mit komfortablen Aufenthaltsbedingungen (18 °C HBT, 1-facher Luftwechsel).	
Tabelle 24:	78
Partikelemission von Erwachsenen und Kindern bei diversen Tätigkeiten nach Mürbe et al.	
Tabelle 25:	79
Atemaktivität bei diversen körperlichen Tätigkeiten nach Kriegel & Hartmann, 2021.	
Tabelle 26:	89
Gestaltungshinweise für den Bau bzw. die Sanierung und den Betrieb von Sporthallen, kategorisiert nach Baujahr.	

Abbildungsverzeichnis



Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	16
Optimale operative Temperatur im Raum als Funktion der Bekleidung (clo) und der Aktivität (met) in Anlehnung an DIN EN ISO 7730 (DIN EN ISO 7730:2023-04) für den Anspruch, weniger als 10 % Unzufriedene zu erreichen. Im Vergleich dazu ist (in blauer Farbe 1) die nach DIN 18032-1 (DIN 18032-1:2014-11) für Sporthallen empfohlene (feste) Nutzungstemperatur von 17 °C dargestellt.	
Abb. 2:	17
PPD als Funktion des PMV nach DIN EN ISO 7730:2023-04.	
Abb. 3:	18
Zusammenhang zwischen O ₂ -Verbrauch, CO ₂ -Produktion und körperlichem Aktivitätsniveau des Menschen nach Cory, 2005.	
Abb. 4:	19
Verteilung des jährlichen Energieverbrauchs nach Typ des Sportgebäudes nach Gunnarsson & Thapper, 2015.	
Abb. 5:	24
Differenzierung motorischer Fähigkeiten nach Bös (Bös & Mechling, 1983).	
Abb. 6:	26
Einflussgrößen auf die sportliche Leistungsfähigkeit, vereinfachtes Modell (modifiziert nach Weineck, 2007).	
Abb. 7:	37
Sommer-Messdaten der Halle 1 (Einfeldhalle) vom 22.08.2021.	
Abb. 8:	38
Sommer-Messdaten der Halle 2 (Dreifeldhalle) vom 31.08. bis 02.09.2021.	
Abb. 9:	39
Sommer-Messdaten der Halle 3 (Dreifeldhalle) vom 21.09. bis 23.09.2022.	
Abb. 10:	39
Winter-Messdaten der Halle 3 (Dreifeldhalle) vom 28.11. bis 30.11.2022.	
Abb. 11:	41
Altersstruktur der Probanden aufgeteilt in Sommer und Winter.	
Abb. 12:	41
Wichtigkeit von und Zufriedenheit mit der Raumqualität.	
Abb. 13:	43
Subjektiver Einfluss der Raumqualität auf die Leistungsfähigkeit.	

Abb. 14:.....	44
Boxplot der Befragungsergebnisse zur Präferenz der Temperatur vor dem Sport in Abhängigkeit der gemessenen Operativtemperatur (Sommer).	
Abb. 15:.....	44
Boxplot der Befragungsergebnisse zur Präferenz der Temperatur nach dem Sport in Abhängigkeit der gemessenen Operativtemperatur (Sommer).	
Abb. 16:.....	45
Boxplot der Befragungsergebnisse zur Zufriedenheit mit der thermischen Behaglichkeit nach dem Sport in Abhängigkeit der gemessenen Operativtemperatur (Sommer).	
Abb. 17:.....	46
Boxplot der Befragungsergebnisse zur Präferenz der Temperatur vor dem Sport in Abhängigkeit des subjektiven Anstrengungsgrades (Sommer).	
Abb. 18:.....	46
Boxplot der Befragungsergebnisse zur Präferenz der Temperatur nach dem Sport in Abhängigkeit des subjektiven Anstrengungsgrades (Sommer).	
Abb. 19:.....	47
Boxplot der Befragungsergebnisse zur Präferenz der Temperatur nach dem Sport in Abhängigkeit des subjektiven Anstrengungsgrades und der gemessenen Operativtemperatur (Sommer).	
Abb. 20:.....	47
Boxplot der Befragungsergebnisse zur Präferenz der Luftfeuchte nach dem Sport in Abhängigkeit der gemessenen relativen Luftfeuchte (Sommer).	
Abb. 21:.....	48
Beobachteter Prozentsatz der Unzufriedenen in Abhängigkeit von der Operativtemperatur und dem subjektiven Anstrengungsgrad im Sommer.	
Abb. 22:.....	49
Boxplot der Befragungsergebnisse zur Präferenz der Temperatur vor dem Sport in Abhängigkeit der gemessenen Operativtemperatur (Winter).	
Abb. 23:.....	49
Boxplot der Befragungsergebnisse zur Präferenz der Temperatur nach dem Sport in Abhängigkeit der gemessenen Operativtemperatur (Winter).	
Abb. 24:.....	49
Boxplot der Befragungsergebnisse zur Zufriedenheit mit der thermischen Behaglichkeit nach dem Sport in Abhängigkeit der gemessenen Operativtemperatur (Winter).	
Abb. 25:.....	50
Boxplot der Befragungsergebnisse zur Präferenz der Temperatur nach dem Sport in Abhängigkeit des subjektiven Anstrengungsgrades (Winter).	

Abb. 26:.....	50
Boxplot der Befragungsergebnisse zur Präferenz der Temperatur nach dem Sport in Abhängigkeit des subjektiven Anstrengungsgrades und der gemessenen Operativtemperatur (Winter).	
Abb. 27:.....	51
Boxplot der Befragungsergebnisse zur Präferenz der Luftfeuchte nach dem Sport in Abhängigkeit der gemessenen relativen Luftfeuchte (Winter).	
Abb. 28:.....	52
Beobachteter Prozentsatz der Unzufriedenen in Abhängigkeit von der Operativtemperatur und dem subjektiven Anstrengungsgrad im Winter.	
Abb. 29:.....	57
Außenklimabedingungen für die simulative Untersuchung. Mannheim (Testreferenzjahr 2004) (Fraunhofer IBP).	
Abb. 30:.....	58
Aus dem Außenluftvolumenstrom je Sporttreibendem nach DIN 18032-1 (60 m ³ /Pers.) und den geometrischen Kenngrößen der Hallentypen abgeleitete geforderte Luftwechselzahl in Abhängigkeit der Anzahl der sporttreibenden Personen.	
Abb. 31:.....	62
Heizenergiebedarfe der drei geometrischen Hallentypen je energetischem Standard zu geltenden Normbedingungen (Hallenbetriebstemperatur (HBT) 20 °C, ohne Kühlung, 1-facher Luftwechsel).	
Abb. 32:.....	63
Heizenergiebedarfe (links) und Energieeinsparpotential (rechts) der drei geometrischen Hallentypen mit energetischem Standard 1982 in Abhängigkeit der Hallenbetriebstemperatur (ohne Kühlung, 1-facher Luftwechsel).	
Abb. 33:.....	64
Heizenergiebedarfe der Einfeldhalle je energetischem Standard in Abhängigkeit der Hallenbetriebstemperatur (ohne Kühlung, 1-facher Luftwechsel).	
Abb. 34:.....	64
Relatives Energieeinsparpotential der Einfeldhalle je energetischem Standard in Abhängigkeit der Hallenbetriebstemperatur (ohne Kühlung, 1-facher Luftwechsel).	
Abb. 35:.....	65
Heizenergiebedarfe der drei geometrischen Hallentypen je energetischem Standard zu ermittelten komfortablen Bedingungen (HBT 18 °C, ohne Kühlung, 1-facher Luftwechsel). Entspricht einer Einsparung um ca. 15 % gegenüber 20 °C HBT mit 1-fachem Luftwechsel.	
Abb. 36:.....	66
Absolutes Energieeinsparpotential der Einfeldhalle je energetischem Standard in Abhängigkeit der Luftwechselzahl (links HBT 20 °C, rechts HBT 18 °C, ohne Kühlung).	
Abb. 37:.....	66
Relatives Energieeinsparpotential der Einfeldhalle je energetischem Standard in Abhängigkeit der Luftwechselzahl (bei 18 °C und 20 °C HBT).	

Abb. 38:.....	67
Absolutes Energieeinsparpotential der drei geometrischen Hallentypen unabhängig vom energetischen Standard in Abhängigkeit der Luftwechselzahl (links HBT 20 °C, rechts HBT 18 °C, ohne Kühlung).	
Abb. 39:.....	67
Heizenergiebedarfe der drei geometrischen Hallentypen je energetischem Standard bei ermittelten komfortablen Bedingungen (HBT 18 °C, ohne Kühlung, 0,5-facher Luftwechsel). Entspricht einer absoluten Einsparung bei Einfeldhallen um 45 kWh/m ² a, bei Zwei- und Dreifeldhallen um 60 kWh/m ² a gegenüber 1-fachem Luftwechsel mit 18 °C HBT.	
Abb. 40:.....	68
Mehrbedarf an Energie durch aktive Kühlung der drei geometrischen Hallentypen je energetischem Standard bei komfortablen Aufenthaltsbedingungen (18 bis 22 °C HBT, 1-facher Luftwechsel).	
Abb. 41:.....	70
Absolutes (oben) und relatives (unten) Energieeinsparpotential durch Nachtabsenkung täglich von 22:00 bis 10:00 Uhr in Abhängigkeit der Höhe der Nachtabsenkung je energetischem Standard bei 18 °C HBT und 1-fachem Luftwechsel. Links für Einfeldhallen, rechts für Zweifeld- und Dreifeldhallen.	
Abb. 42:.....	70
Absolutes Energieeinsparpotential durch Tagabsenkung jeden Sonntag von 10:00 bis 22:00 Uhr in Abhängigkeit der Höhe der Absenkung je energetischem Standard bei 18 °C HBT und 1-fachem Luftwechsel. Links für Einfeldhallen, rechts für Zweifeld- und Dreifeldhallen.	
Abb. 43:.....	73
Jährliches Energieeinsparpotential durch interne Wärmegewinne in Abhängigkeit der Anzahl der Tage mit Vollauslastung während des Heizbetriebs (8 h Schulsport (15 m ² pro Kind) und 4 h Vereinssport (20 m ² pro Erwachsenen)) je Hallentyp bei sportlicher Aktivität mit 4 und 8 met.	
Abb. 44:.....	73
Jährliches Energieeinsparpotential durch interne Wärmegewinne in Abhängigkeit der Anzahl der Tage mit Vollauslastung während des Heizbetriebs (8 h Schulsport (15 m ² pro Kind) und 4 h Vereinssport (20 m ² pro Erwachsenen)) bei sportlicher Aktivität mit 4 und 8 met bezogen auf die Hallengrundfläche.	
Abb. 45:.....	74
Energiebedarf von Sporthallen in Abhängigkeit des mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten bei komfortablen Aufenthaltsbedingungen (18 °C HBT, 1-facher Luftwechsel, ohne Kühlung).	
Abb. 46:.....	80
Relatives Infektionsrisiko in einer Einfeldhalle bei mittlerer Aktivität in Abhängigkeit der Personenanzahl und der Luftwechselrate.	
Abb. 47:.....	81
Relatives Infektionsrisiko einer Einfeldhalle bei schwerer Aktivität in Abhängigkeit der Personenanzahl und der Luftwechselrate.	
Abb. 48:.....	81
Relatives Infektionsrisiko einer Zweifeldhalle bei mittlerer Aktivität in Abhängigkeit der Personenanzahl und der Luftwechselrate.	

Abb. 49:.....	82
Relatives Infektionsrisiko einer Zweifeldhalle bei schwerer Aktivität in Abhängigkeit der Personenanzahl und der Luftwechselrate.	
Abb. 50:.....	82
Relatives Infektionsrisiko einer Dreifeldhalle bei mittlerer Aktivität in Abhängigkeit der Personenanzahl und der Luftwechselrate.	
Abb. 51:.....	83
Relatives Infektionsrisiko einer Dreifeldhalle bei schwerer Aktivität in Abhängigkeit der Personenanzahl und der Luftwechselrate.	



Prof. Dr.-Ing. Philip Leistner ist Universitätsprofessor und Direktor des Instituts für Akustik und Bauphysik (IABP) an der Universität Stuttgart sowie Leiter des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik (IBP).

Sein Forschungsschwerpunkt ist die ganzheitlich nachhaltige Bauphysik von Räumen, Gebäuden und Quartieren.



Isabel Janowsky-Vidovic, M.Sc., ist wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Akustik und Bauphysik (IABP) der Universität Stuttgart.

Ihr Forschungsschwerpunkt liegt im Bereich der Wechselwirkungen des Menschen mit der physikalischen Raumumgebung.