



Bild 1. Übersicht der behandelten Themen in Publikationen im klimaangepassten Bauen [4]

zieren. Zum besseren Verständnis der Klimaanalysen werden zudem häufig in den Publikationen die Grundlagen der Klimatologie behandelt.

Bei den Handlungsempfehlungen fällt auf, dass Strategien des klimaangepassten Bauens (allgemeine Handlungsempfehlung) und bauliche Methoden (konkrete Handlungsempfehlungen) unterschieden werden können. Unter einer Strategie wird in diesem Kontext eine übergeordnete Vorgehensweise verstanden. Bauliche Methoden hingegen sind Möglichkeiten der baulichen Umsetzung. Beispielsweise ist der „Sonnenschutz“ eine Strategie, ein auskragender Balkon oder Jalousien sind bauliche Methoden im Kontext der Strategie.

Die Erarbeitung der Handlungsempfehlungen erfolgt in der Regel wie in Bild 1 ersichtlich über einen Bottom-up oder einen Top-down Ansatz. Mittels eines Bottom-up Ansatzes wird die Analyse traditioneller Bauten verfolgt. Bei dieser Herangehensweise wird davon ausgegangen, dass aufgrund einer Gebäudeevolution eine Anpassung der Gebäude an das vorhandene Klima stattgefunden hat. Hier werden also bauliche Methoden und Strategien exemplarischer traditioneller Gebäude im Kontext des Klimaeinflusses untersucht, um so Handlungsempfehlungen auf Basis von Klimaeinflüssen ableiten zu können. Mittels eines Top-down-Ansatzes hingegen werden auf Basis einer Klimaanalyse Anforderungen formuliert und entsprechende Strategien sowie bauliche Methoden entwickelt. Über digitale Planungstools wird dieser Ansatz genutzt. Unabhängig davon, ob Bottom-up oder Top-down Ansätze Verwendung finden, ist die Bewertung der Handlungsempfehlungen ein häufig untersuchter Aspekt in Publikationen zum klimaangepassten Bauen.

3.1 Die Klimaanalyse als Teil des klimaangepassten Bauens

Die Analyse des Klimas liefert bis heute die Basisinformationen für das klimaangepasste Bauen. Viele Regionen weisen ähnliche klimatische Eigenschaften auf und werden deshalb mittels Klimakategorisierungsmodellen zu Klimazonen zusammengefasst. Da für ähnliche klimatische Gegebenheiten meist ähnliche Handlungsempfehlungen ausgesprochen werden können, finden diese Modelle ebenfalls im klimaangepassten Bauen

Anwendung. Ein häufig verwendetes Modell ist das Köppen-Geiger-Modell [54], welches in Bild 2 gezeigt wird.

Die Kategorisierung erfolgt nach der Ausprägung der *Klimaelemente* auf makroklimatischer Ebene. Klimaelemente dienen nach *Hausladen et al.* [40], der Beschreibung des Klimas, worunter man beispielsweise die Solarstrahlung, Luftfeuchte oder Lufttemperatur versteht. Die Betrachtung des Klimas auf dieser Ebene ist für die Planung jedoch oftmals nicht ausreichend. Mesoklimatische Aspekte wie die Hanglage oder das Vorhandensein eines Waldes in unmittelbarer Gebäudenähe beeinflussen eine klimaangepasste Bauweise maßgeblich, da sich die relevanten äußeren Randbedingungen deutlich unterscheiden können. Um neben makroklimatischen Einflüssen auch meso- und mikroklimatische zu berücksichtigen, wird meist neben der Klimakategorisierung eine detailliertere standortbezogene Klimaanalyse durchgeführt. Die zugehörigen Messgrößen werden üblicherweise mittels Wetterstationen vor Ort aufgezeichnet oder auf Basis von Interpolation der Daten entfernterer Stationen ermittelt.

Häufig werden Testreferenzjahre (TRY) verwendet. Diese sind speziell zusammengestellte Wetterdatensätze, welche meteorologische Daten auf Stundenbasis enthalten. Die Testreferenzjahre (TRY) sollen einen mittleren, jedoch für das Jahr typischen Witterungsverlauf abbilden, wobei sich die geografische Auflösung sowie die zeitliche Vergleichsbasis der TRY-Datensätze je nach Standort unterscheiden. In Deutschland werden die Datensätze beispielsweise für jeden Quadratkilometer über bestimmte Zeiträume erstellt. Typischerweise wird heutzutage ein Zeitraum von 1995 bis 2012 als Vergleichsbasis verwendet. Zusätzlich werden Datensätze für sehr kalte Winter und sehr warme Sommer zur Verfügung gestellt, um auch seltene Wetterereignisse in zugehörigen Zeiträumen abbilden zu können [56].

Die Auswertung und Visualisierung der Klimadaten dienen als Planungsgrundlage. Beispielsweise können auf Basis eines Sonnenstanddiagramms die solare Einstrahlung oder die Verschattung optimiert werden (Bild 3). Heutzutage werden Klimadaten üblicherweise mittels Algorithmen digital ausgewertet und mittels digitaler Planungswerkzeuge angewandt.

Weltkarte der Köppen-Geiger Klimaklassifikation

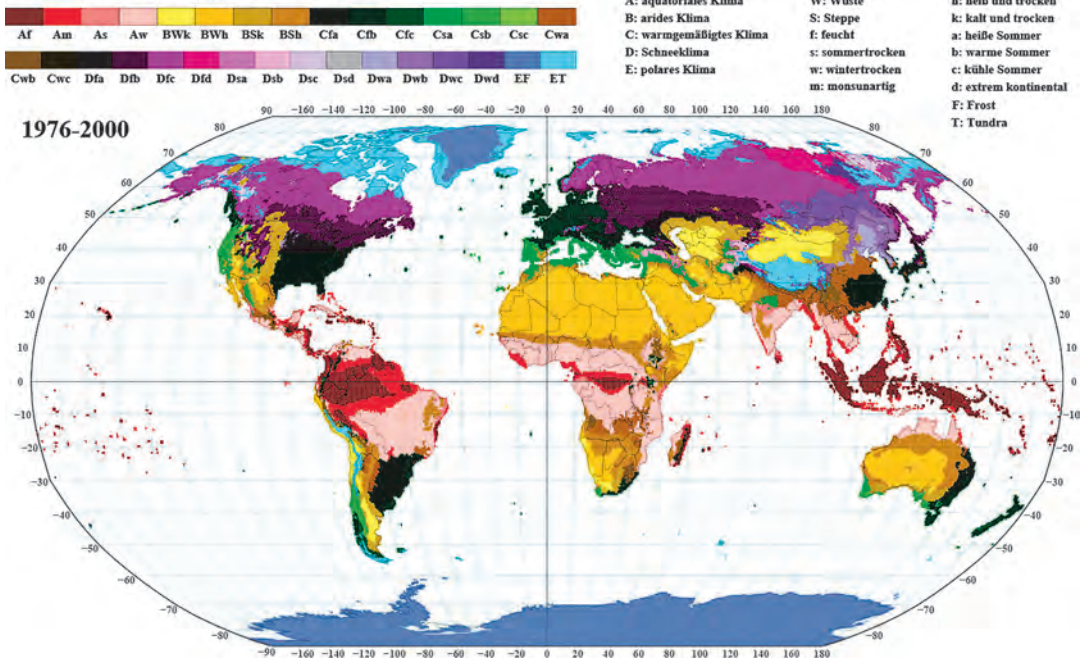


Bild 2. Klimatische Weltkarte und Klimaformeln [55]

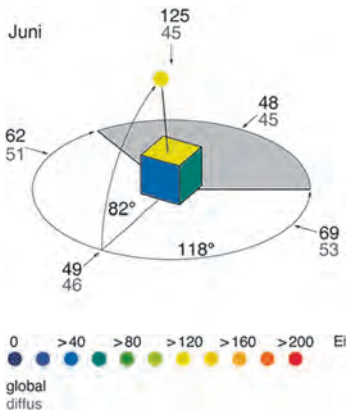


Bild 3. Visualisierung der auftretenden Strahlung auf der Oberfläche in kWh/(m² Monat) mittels Farbcodierung [29]

3.2 Handlungsempfehlungen – Strategien und bauliche Methoden

Wie bereits erwähnt, führt eine makroklimatische Analyse zu allgemeineren Handlungsempfehlungen (Strategien), welche erste wichtige Anhaltspunkte für eine klimaangepasste Planung für die einzelnen Klimazonen liefern. Bild 4 zeigt exemplarisch die Strategien des klimaangepassten Entwerfens nach Gertis [57]. Alternativ können Handlungsempfehlungen auf Basis von Diagrammen abgeleitet werden, welche die Kom-

bination von relativer Luftfeuchte und Temperatur abbilden, solange keine extremen anderen Einflüsse wie z. B. besonders hohe Windgeschwindigkeiten vorliegen. Dazu wird überprüft, ob das vorhandene Temperatur-Feuchtigkeitsverhältnis vor Ort in einer Zone liegt, die für die Nutzer komfortable Bedingungen verspricht. Ist dies nicht der Fall, werden Strategien empfohlen, um ein angenehmes Innenraumklima zu ermöglichen. *Olgay* und *Olgay* [52] berücksichtigen, wie in Bild 5 ersichtlich, zusätzlich den Einfluss aus Wind und Solarstrahlung.

Um konkretere Lösungen für das klimaangepasste Bauen darlegen zu können, entstanden bereits mehrfach Handlungsempfehlungen für spezifische Klimazonen [38, 44, 51, 58]. Beispielsweise untersucht *Krusche* [58] die Energiebewahrung, -speicherung und -gewinnung von Gebäuden in Abhängigkeit der baulichen Anpassungen an klimatische Gegebenheiten in der gemäßigten Zone. Bild 6 zeigt dazu exemplarisch quantitative Angaben des Wärmeverlustes in Prozent in Abhängigkeit der Lage in der Topografie. Die vergleichende Betrachtung bezieht sich hierbei auf einen Standardbaukörper, dessen Berechnungsdaten angegeben werden [58].

Neben der Fokussierung auf eine Klimazone gibt es häufig auch spezifische Analysen und Lösungsvorschläge für einzelne Regionen oder einen konkreten Standort [25, 45, 59–64].

Strategien klimaangepassten Entwerfens				
Arktis	Mitteleuropa	Amazonas	Sahara	Weitraum
Dauernd	Alternierend	Dauernd	Alternierend	Alternierend
Kalt (extrem kalt) Praktisch keine Strahlung	Winter mäßig kalt und trocken Sommer mäßig warm und feucht	Feucht warm (schwül)	Tagsüber warm (extrem warm) Nachts kühl	Strahlung (keine Luft)
1 Dämmen	1 Dämmen	2 Lüften	3 Speichern	4 Strahlenschutz
	2 Lüften	4 Strahlenschutz	4 Strahlenschutz	1 Dämmen
	3 Speichern	5 Regenschutz		
	4 Strahlenschutz			
	5 Regenschutz			

Bild 4. Strategien des klimaangepassten Bauens nach [57]

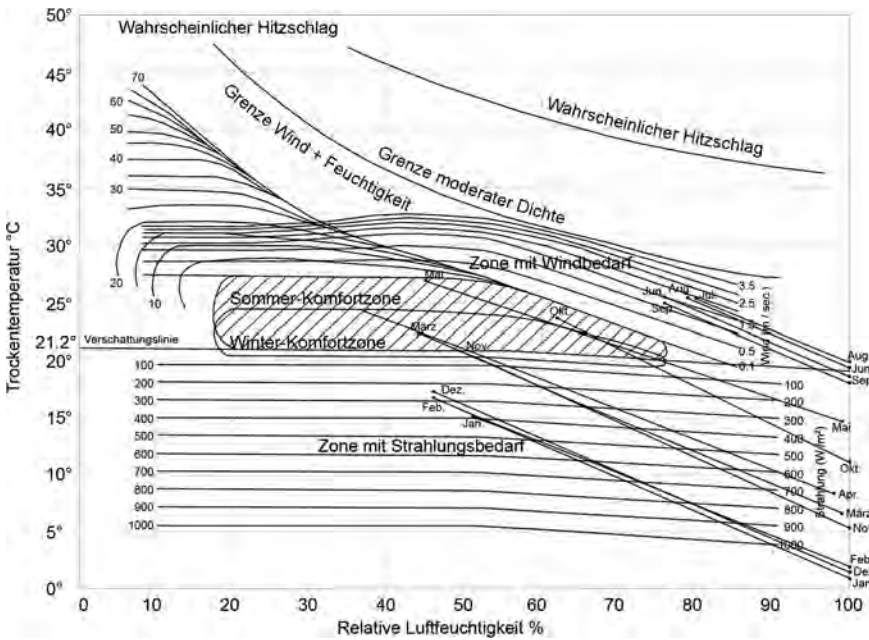


Bild 5. Bioklimatisches Diagramm (engl. bioclimatic chart) nach [52]



Bild 6. Wärmeverlust eines Gebäudes in Prozent in unterschiedlicher Lage bezüglich der Topografie nach [58]

3.3 Analyse traditioneller Bauweisen

Um Strategien und bauliche Maßnahmen des klimaangepassten Bauens herzuleiten, wird in einer Vielzahl an Untersuchungen der Energiebedarf, der Komfort sowie die Nachhaltigkeit traditioneller Architektur betrachtet. Oftmals werden dazu Fallbeispiele traditioneller Bauten qualitativ analysiert. Der Fokus liegt hierbei häufig auf einer spezifischen Region [65–71]. Neben der qualitativen Analyse wird häufig zusätzlich der Komfort traditioneller Gebäude mittels Feldmessungen bewertet. Der Fokus liegt dabei in den meisten Untersuchungen auf unterschiedlichen Regionen Asiens [46, 72–79]. Ergänzt werden diese Untersuchung durch zusätzliche Bewertungen des Komforts und/oder des Energiebedarfs auf Basis von Simulationen. [20, 26, 28, 80–83] Mehrfach wird der Komfort traditioneller Bauten mithilfe qualitativer Methoden wie Umfragen und/oder Interviews untersucht [84–87]. Traditionelle Gebäude Japans werden mittels des Nachhaltigkeitsystems CASBEE bewertet. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Forschungsziele und verwendeten Methoden der untersuchten Veröffentlichungen zur Analyse traditioneller Bauweisen.

Die Untersuchungen zeigen, dass traditionelle Designstrategien oftmals den Komfort und Energiebedarf positiv beeinflussen. Somit können auf Basis traditioneller Bauweisen zugehörige Strategien und Maßnahmen abgeleitet werden. Dennoch zeigen sich auch Erfolgsgrenzen traditioneller Strategien. Des Weiteren ist zu erkennen, dass kulturelle Aspekte traditioneller Architektur oftmals auch klimatisch sinnvoll sind. Ein Beispiel hierfür sind geschnitzte Vor den Fenstern, welche neben dem kulturellen Aspekt (Privatsphäre und Einbruchschutz) ebenfalls aus klimatischen Gründen sinnvoll sein können (Verschattung, Behinderung des Eintrags von Direktstrahlung). Das klima- und kulturangepasste Bauen ist dann stark verknüpft.

3.4 Planungs- und Optimierungstools

Die bereits aufgezeigten Methoden zur Klimaanalyse und Ermittlung der klimaabhängigen Handlungsempfehlungen unterscheiden sich stark in Ihrem Aufwand. Die Einordnung eines Standortes in die zugehörige Klimazone und die Ermittlung der empfohlenen Strategien erfordern weniger Aufwand als eine vollständige Klimaanalyse und die Ermittlung spezifischer baulicher Methoden auf meso- und mikroklimatischer Ebene. Damit Planer ein Gebäudekonzept im Sinne einer Klimaanpassung entwerfen können, ist eine zeitaufwendige Auseinandersetzung mit der Thematik notwendig. Des Weiteren unterscheiden sich die klimatischen Gegebenheiten oftmals bereits bei Standortdifferenzen von wenigen Kilometern oder einer anderen Ausrichtung oder Lage, sodass sich die Konzepte nicht 1:1 übertragen lassen. Um diesen Aufwand zu reduzieren und geeignete Planungen zu erleichtern, wurden die Methoden zur Klimaanalyse und Handlungsempfehlungen in digitale Werkzeuge überführt [29, 88–90].

Tabelle 1. Übersicht der untersuchten Veröffentlichungen zur Analyse traditioneller Bauweise in Hinblick auf das Forschungsziel und die Methode [4]

Autor	Forschungsziel(e)				Methode(n)	
	(1)	(2)	(3)	(4)	qualitativ	quantitativ
Bahadori (1978)	×				×	
Bodach (2014)	×				×	
Borong (2004)	×		×		×	×
Cabeza-Lainez (2013)	×		×		×	×
Coch (1998)	×				×	×
Dili (2010)	×		×		×	×
Dili (2011)	×		×		×	×
Eyüce (2007)	×				×	
Foruzanmehr (2011)	×	×	×		×	×
Ganem (2006)	×		×		×	×
Ghodsi (2012)	×				×	
Koranteng (2019)	×		×		×	×
Kubota (2014)	×		×		×	×
Kubota (2015)	×		×		×	×
Manu (2019)	×		×		×	×
Murakami (2008)	×			×	×	×
Nguyen (2011)	×		×		×	×
Oliver (1997)	×				×	
Piesik (2017)	×				×	
Rubio-Bellido (2018)	×		×		×	×
Shanthi Priya (2012)	×		×		×	×
Singh (2011)	×		×		×	×
Srivastav (2009)	×	×	×		×	×
Teimourtash (2016)	×		×		×	
Toe (2015)	×		×		×	×
Upadhyay (2006)	×				×	
Worre Foged (2019)	×	×	×		×	×
Yoshino (2007)	×		×		×	×
Zhai (2010)	×	×			×	×

- (1) Herleitung von Strategien und baulichen Maßnahmen
- (2) Bewertung des Energiebedarfs traditioneller Architektur
- (3) Bewertung des Komforts traditioneller Architektur
- (4) Bewertung der Nachhaltigkeit traditioneller Architektur

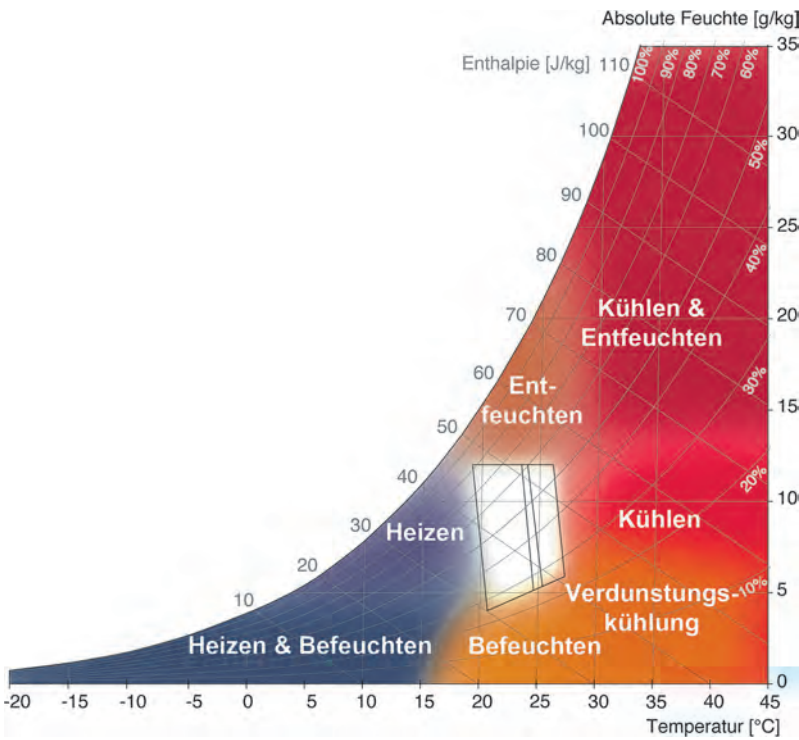


Bild 7. Strategien des klimaangepassten Bauens auf Basis des psychrometrischen Diagramms [33]

Um Designentscheidungen zu erleichtern, werden in zugehörigen Tools in einem ersten Schritt die Klimadaten digital ausgewertet. Mehrfach erfolgt die Auswertung auf Basis des bioklimatischen oder psychrometrischen Diagramms nach *Olgay* und *Olgay* [52] oder nach *Givoni* [29, 88–91]. In einem zweiten Schritt werden Strategien beispielsweise auf Basis des psychrometrischen Diagramms formuliert, wie Bild 7 zeigt. Neben den grundsätzlichen Strategien zeigen die Programme oftmals in Abhängigkeit des gewählten Komfortstandards die prozentuale Zeit an, in der das Außenklima bereits einem angenehmen Innenraumklima entspricht. Des Weiteren wird die Anzahl an Stunden ausgegeben, in der die empfohlene Strategie verfolgt werden soll [92].

Neben der Ermittlung der Designstrategien und baulichen Maßnahmen können Gebäudeoptimierungsverfahren auf Basis von Simulationsprogrammen zusätzliche Erkenntnisse liefern. Mithilfe von Algorithmen erfolgt damit eine Optimierung unterschiedlicher Designvariablen hinsichtlich festgelegter Zielgrößen. So kann beispielsweise bestimmt werden, welche Dimensionierungen oder Orientierungen zu einer optimierten Gebäudeperformanz hinsichtlich des Komforts oder des Energiebedarfs führen. Mehrfach untersuchte Entwurfsvariablen sind unter anderem die Gebäudeausrichtung, die Komponenten der Gebäudehülle sowie die Fenstertypen und Fenstergrößen. Zielgröße ist häufig neben der thermisch-energetischen eine ökonomische Optimierung [93, 94].

3.5 Bewertungsmethoden

Zur Abwägung welche der empfohlenen baulichen Methoden erfolgsversprechend im Sinne eines klimaangepassten Gebäudekonzeptes sind, ist eine Bewertung notwendig. Genau dies geschieht üblicherweise mithilfe von Feldstudien, Umfragen und Interviews oder numerischen Berechnungen und Modellierungen. Tabelle 2 liefert hierzu eine Übersicht.

Insbesondere bei Feldmessungen, Umfragen und Interviews ist es jedoch schwer, auf eine Kausalität zwischen der Leistung des Gebäudes hinsichtlich des Komforts und Energiebedarfs und der Klimaanpassung zu schließen. Inwieweit kommt beispielsweise der vorhandene Komfort durch die Anpassung des Gebäudes an das vorhandene Klima zustande? Dies kann zumindest in guter Näherung mithilfe von Simulationen

Tabelle 2. Übersicht zu Bewertungsmethoden im Sinne eines klimaangepassten Gebäudekonzeptes

Bewertungsmethode	Quelle
Feldstudien mit Energieverbrauch und Innenraumkomfort mittels Messtechnik	[25, 26, 46, 72–76, 78–82, 85, 87, 95]
zusätzlich Umfragen und Interviews	[84, 85, 87]
numerische Berechnungen oder Modellierungen mit Energiebedarf und Berechnungen zum Komfort	[20, 26, 28, 72, 80–83, 95]

quantifiziert werden. Seit den 1990er-Jahren wurde eine Vielzahl an Zertifizierungssystemen zum nachhaltigen Bauen entwickelt [31]. Von Interesse ist, inwieweit die Systeme das klimaangepasste Bauen berücksichtigen und ggfs. quantifizieren und bewerten, wobei einige internationale Systeme wie das LEED- (Leadership in Energy and Environmental Design) oder DGNB-System (Deutsche Gesellschaft für nachhaltiges Bauen) dies teilweise mit einbeziehen: In den Kriterienkatalogen werden passive Maßnahmen zur Verbesserung des Innenraumklimas und zur Reduktion des Primärenergiebedarfs positiv bewertet. Die Quantifizierung und Bewertung basieren jedoch nur auf der Umsetzung passiver Maßnahmen, unabhängig vom erzielten Erfolg der Maßnahme [96, 97]. Das System BREEAM UK (Building Research Establishment Environmental Assessment Method) [98] bewertet ebenfalls die Reduktion des Energiebedarfs, es wird dabei aber nicht auf den dazu führenden passiven Maßnahmen fokussiert [98]. Dabei zeigt sich, dass eine Quantifizierung und Bewertung der Klimaanpassung unter Berücksichtigung des erzielten Erfolges der Anpassung in keinem Zertifizierungssystem zum nachhaltigen Bauen festgestellt werden kann.

3.6 Schlussfolgerungen aus der Literaturrecherche

Insgesamt zeigt sich, dass es bereits eine Vielzahl an unterschiedlichen Methoden zur Klimaanalyse sowie verschiedenen Handlungsempfehlungen gibt. Die dargelegten Handlungsempfehlungen unterscheiden sich dabei in der Differenzierung (Strategie und bauliche Maßnahmen). Um die klimaangepasste Planung zu erleichtern, wurden die Handlungsempfehlungen in analoge und digitale Entwurfswerkzeuge überführt, darüber hinaus können mithilfe von Gebäudeoptimierungswerkzeugen die baulichen Methoden optimiert werden. Die Bewertung der Klimaanpassung von Gebäuden erfolgt üblicherweise auf Basis des Energieverbrauchs sowie des Komforts, aber auf eine Kausalität zwischen der Klimaanpassung und dem Energiebedarf sowie dem Komfort kann damit nicht geschlossen werden. Obwohl die notwendigen Werkzeuge bereits vorhanden sind, wurde die Klimaanpassung nicht einheitlich quantifiziert. Mithilfe der in diesem Beitrag vorgestellten Methode kann die Klimaanpassung künftig quantifiziert und eindeutig bewertet werden.

4 Interviewstudie zum klimaangepassten Bauen

Um neben dem Stand des Wissens ein detaillierteres Verständnis über den Umgang mit dem klimaangepassten Bauen in der Praxis zu erhalten, wurde im Rahmen der Arbeit von Mayer [4] eine Interviewstudie zum klimaangepassten Bauen durchgeführt.

4.1 Vorgehensweise und Aufbau der Interviewstudie

Um den Umgang mit dem klimaangepassten Bauen in der Planungsphase zu ermitteln, wurden am Planungsprozess beteiligte Experten aus der Baubranche in einem Interview befragt. Diese Akteure wurden mittels einer Stakeholderanalyse identifiziert und stellvertretend für die unterschiedlichen Berufsfelder wurden verschiedene Experten interviewt. Bei der Geschlechterverteilung wurde mit 25% weiblichen und 75% männlichen Interviewteilnehmern darauf geachtet, dass diese in etwa dem entspricht, was derzeit im Bauwesen noch üblich ist: Laut der Bundesagentur für Arbeit [99] waren 2021 19% der Beschäftigten im Baugewerbe weiblich und 81% männlich. Mit einer Altersspanne von 27 bis 85 Jahren sind unter den Interviewteilnehmern alle relevanten Altersgruppen vertreten.

Die geografische Verteilung der Experten erstreckt sich über ganz Deutschland. Ein Experte wohnt in Österreich, verfügt jedoch über eine langjährige Berufserfahrung in Deutschland. Eine Häufung im südlichen Raum kann darauf zurückgeführt werden, dass der Ursprung der Studie sich in München befindet. Dennoch kann durch die Teilnahme von Experten verschiedener Standorte Deutschlands auf eine deutschlandweite Repräsentativität der Studie geschlossen werden. Bild 8 zeigt die Herkunft der interviewten Stakeholder. Es zeigt sich, dass die Auswahl der Teilnehmer bezüglich der Geschlechter-, Alters- und geografischen Verteilung repräsentativ ist.



Bild 8. Herkunft der Interviewpartner [142]

Die im Interview gestellten Fragen zum klimaangepassten Bauen in der Praxis können drei übergeordneten Themenbereichen zugeordnet werden:

- allgemeines Meinungsbild,
- Herausforderungen und Chancen,
- Quantifizierungs- und Bewertungsmethoden.

4.2 Ergebnisse der Interviewstudie

Es wurde eine Befragung zum Verständnis der Begrifflichkeit *klimaangepasstes Bauen* in der Praxis durchgeführt. Die Experten wurden nach der Definition des Begriffs befragt und es zeigte sich, dass ein unterschiedliches Begriffsverständnis vorherrscht, jedoch Häufigkeiten von Aussagen zu erkennen sind. Ein Großteil der Experten versteht unter dem *klimaangepassten Bauen* die Anpassung des Gebäudes an das Klima mittels baulicher Maßnahmen, um den Energiebedarf zu minimieren und gleichzeitig ein angenehmes Innenraumklima zu ermöglichen. Vergleicht man dies mit der in Abschnitt 2 vorgestellten Definition, so zeigt sich eine Übereinstimmung zwischen Theorie und Praxis. Darüber hinaus fällt jedoch auf, dass das klimaangepasste Bauen in der Praxis nicht ausreichend vom *klimawandelangepassten*, dem *nachhaltigen*, dem *CO₂-neutralen* und dem *umwelt- und ressourcenschonenden Bauen* abgegrenzt ist. Häufig findet sogar eine Gleichstellung der Begriffe statt. Zudem setzen einige Befragte das klimaangepasste Bauen mit dem energieeffizienten gleich. Analog zur Literatur wird auch mehrfach auf die Bauweisen traditioneller Architektur verwiesen. Bild 9 gibt einen Überblick über das Verständnis des Begriffs aus Sichtweise der Experten.

Die Befragung der Experten zum Meinungsbild im klimaangepassten Bauen zeigt, dass sowohl die Rolle der Thematik als auch die Notwendigkeit und das Interesse

als hoch eingestuft werden. Dies kann auf den Beitrag des klimaangepassten Bauens zur Reduktion des Klimawandels und der Relevanz dieser Thematik zurückgeführt werden. Inwieweit das klimaangepasste Bauen im Berufsalltag der Experten eine Rolle spielt, kann Bild 10 entnommen werden: 90% der Experten antworteten mit „ja“, 3% mit „nein“ und 7% mit „eher weniger“.

Mittels quantitativer Fragen wurden die Experten um eine Einschätzung der Einstellung ihrer Berufsgruppe hinsichtlich des klimaangepassten Bauens gebeten. Bild 11 zeigt das Ergebnis der Auswertung. Dem klimaangepassten Bauen ist keiner der Experten sehr kritisch oder kritisch gegenüber eingestellt. Die Ingenieurbüros sind sich in ihrer Meinung nicht einig, was u. a. darauf zurückzuführen ist, dass diese Berufsgruppe die höchste Anzahl an Interviewteilnehmern aufweist.

Des Weiteren wurden die Experten gebeten, die Einflussmöglichkeit ihrer Berufsgruppe auf das klimaangepasste Bauen einzuschätzen. Auch hier zeigt sich, dass diese eher als hoch eingestuft werden (Bild 12).

Die derzeitige Klimaanpassung von Gebäuden wird unterschiedlich wahrgenommen. Ungefähr 40% empfinden die aktuelle Architektur als einfallslos, uniform und hauptsächlich ökonomisch geprägt und die Klimaanpassung aufgrund der hohen Verwendung von technischer Gebäudeausrüstung und Glaselementen als unzureichend. Ungefähr 30% sind der Meinung, dass bereits klimaangepasst gebaut wird, weitere 30% bewerten die aktuelle Architektur indifferent.

Bei der Befragung zu den Herausforderungen, Chancen und Strategien fällt auf, dass die Experten deutlich mehr Herausforderungen nennen als Chancen. Häufig genannte Aspekte der Herausforderungen sind die Kosten, der fehlende Wissensstand sowie das fehlende Bewusstsein und die Vorschriften im Bauwesen. Die

Klimaangepasstes Bauen ist...



Bild 9. Übersicht des Begriffsverständnisses klimaangepasstes Bauen der Experten [4]

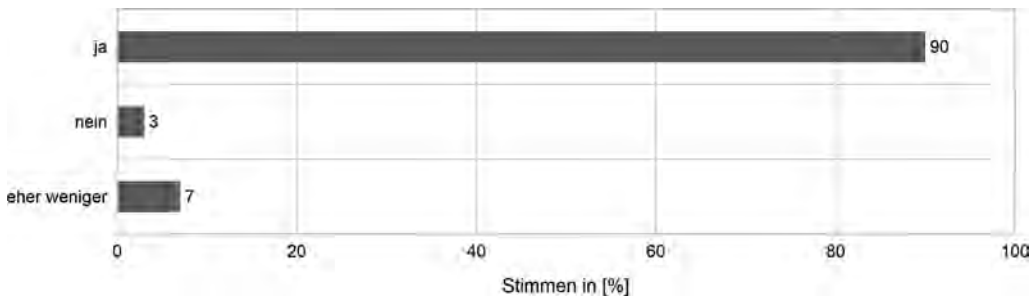


Bild 10. Verteilung der Einschätzung der Rolle des klimaangepassten Bauens im Berufsalltag [4]

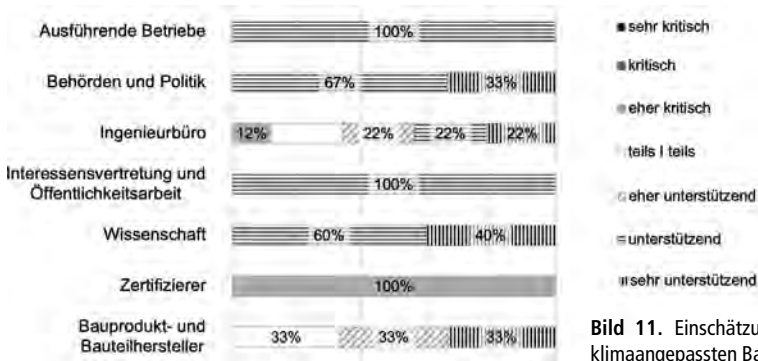


Bild 11. Einschätzung der Einstellung zum klimaangepassten Bauen nach Berufsfeld [4]



Bild 12. Einschätzung der Einflussmöglichkeiten im klimaangepassten Bauen nach Berufsfeld [4]

Experten sind sich einig, dass das Bauwesen stark ökonomisch geprägt ist, jedoch die finanziellen Anreize für eine klimaangepasste Bauweise fehlen. Simulationen, welche eine mögliche Kosteneinsparung durch eine klimaangepasste Bauweise aufzeigen können, werden aus monetären Gründen selten genutzt. Darüber hinaus fehlt den Bauherren ein offensichtlicher (monetärer) Mehrgewinn durch eine klimaangepasste Bauweise. Insbesondere in der Planungsphase wird oftmals zu wenig Geld investiert.

Als weitere Herausforderungen werden die kürzeren Zeiten im Bauablauf genannt: Planung und Ausführung finden teilweise parallel statt. Zudem entsteht im Planungsprozess eine immer größere Komplexität. In diesem Kontext wird auch das virtuelle bzw. digitale Bauen erwähnt. Neben der Technologisierung wird die

Globalisierung als Herausforderung benannt: Der globale Wandel führt zu einer weltweit einheitlichen Bauweise, dem internationalen Stil, welcher als *klimaunangepasst* angesehen wird.

Häufig wird angemerkt, dass zu wenig Wissen und Bewusstsein für die Thematik vorhanden sind. Einigkeit herrscht ebenfalls über das Fehlen einer eindeutigen Begriffsdefinition. Neben fehlender Forschung mangelt es laut den Experten an Techniken in der Praxis als auch an Literatur und Lehre im klimaangepassten Bauen und durch das unzureichende Lehrangebot fehlt es an Kenntnissen über die Thematik. Architekten, Ingenieure, Planer und Bauherren wissen zu wenig, was klimaangepasstes Bauen ist und welche passiven Maßnahmen es gibt [4].



Bild 13. Worthäufigkeit der von den Interviewpartnern genannten Herausforderungen im klima-angepassten Bauen, häufige Nennungen werden größer dargestellt [4]

Hinsichtlich der Vorschriften sind die Experten gespaltenen Meinung: Einige empfinden die Vorschriften als zu komplex und umfangreich, andere äußern die Notwendigkeit strengerer Vorschriften. Eine weitere Herausforderung des klimaangepassten Bauens ist laut Interviewteilnehmern der Nutzer, welcher zu wenig berücksichtigt wird. Als einer der Gründe werden abermals die ökonomischen Zwänge im Bauwesen angeführt. In einem Interview wird die steigende Anspruchshaltung der Bevölkerung beispielsweise hinsichtlich der Größe und des Komforts als Herausforderung genannt. Darüber hinaus sind sich die Experten einig, dass der Bestand zu wenig betrachtet wird und der Fokus auf dem Neubau liegt. Dies sei unter anderem auf die Zertifizierungssysteme zurückzuführen. Insgesamt nennen die Experten eine Vielzahl an Herausforderungen. Eine Häufung mancher Aspekte kann dabei festgestellt werden. Bild 13 fasst die genannten Herausforderungen unter Berücksichtigung der Häufigkeit ihrer Nennung grafisch zusammen.

Neben den Herausforderungen wurden die Experten zu den Chancen befragt, wobei die größte Chance im Schutz der Umwelt sowie des Klimas gesehen wird. Eine klimaangepasste Bauweise reduziert laut der Experten den Einsatz an Anlagentechnik und somit den Energiebedarf sowie den Ressourcenverbrauch. Mehrere Experten sind der Meinung, dass eine klimaangepasste Bauweise die Kreislaufwirtschaft im Bauwesen fördert und zu geringeren CO₂-Emissionen führt. Das Erreichen eines robusten, CO₂-neutralen Gebäudebestands wird in diesem Kontext genannt. Auch die Verbesserung des Innenraumklimas und Wohlbefindens der Nutzer wird als Potenzial des klimaangepassten Bauens gesehen. Insgesamt wird von einer Steigerung der Lebensqualität durch eine klimaangepasste Bauweise gesprochen. Bild 14 gibt einen Überblick zu den genannten Chancen des klimaangepassten Bauens. Ebenfalls kann eine deutliche Häufung einiger genannter Aspekte erkannt werden.

Um künftig den Herausforderungen zu begegnen und die Chancen im klimaangepassten Bauen wahrzunehmen, sehen mehr als die Hälfte der Befragten Handlungsspielraum im Bereich der Politik und der öffentlichen Hand. Dem öffentlichen Sektor wird dabei eine Vorbildfunktion zugesprochen. Mehrfach werden finanzielle Anreize wie staatliche Förderprogramme und Zuschüsse als Strategie genannt, um das klimaangepasste Bauen zu fördern. Laut einem Drittel der Befragten kann ein Anstieg klimaangepasster Bauweisen durch die Anpassung von Vorschriften erreicht werden. Hierbei unterscheiden sich die Vorstellungen der Experten. Mehr Designfreiheiten für den Architekten auf der einen Seite als auch strengere Bebauungspläne auf der anderen Seite werden als mögliche Strategie benannt. Darüber hinaus sind einige Experten der Meinung, die Normungskultur muss stark verändert werden. Insbesondere beim Bauen im Bestand sollten Alternativlösungen ähnlich wie im Denkmalschutz möglich sein. 45 % der Interviewpartner sehen die Stärkung des Bewusstseins für die Thematik als eine der Hauptstrategien. Mehrfach wird darauf hingewiesen, dass das klimaangepasste Bauen verstärkt im universitären Kontext behandelt werden soll, außerdem wird ein Erfahrungsaustausch und Wissenstransfer von erfahrenen Architekten und Berufsanfängern als fördernd angesehen. Bild 15 zeigt ebenfalls wie bei den Herausforderungen und Chancen eine Häufung der genannten Strategien.

Nach Befragung zum allgemeinen Meinungsbild sowie zu den Chancen und Herausforderungen wurden die Experten zur üblichen Vorgehensweise im klimaangepassten Bauen in der Praxis befragt. Ein Viertel der Experten ist der Meinung, dass die Thematik in der Praxis wenig bzw. gar nicht beachtet wird. 10 % der Befragten vertreten die Ansicht, dass eine klimaangepasste Bauweise häufig vom jeweiligen Architekten, Fachplaner oder Bauherren abhängt, da es dafür keine Vorschriften gibt. Allgemein kann festgehalten wer-



Bild 14. Worthäufigkeit der von den Interviewpartnern genannten Chancen im klimaangepassten Bauen, häufige Nennungen werden wiederum größer dargestellt [4]



Bild 15. Worthäufigkeit der von den Interviewpartnern genannten Strategien zur Begegnung der Herausforderungen im klimaangepassten Bauen [4]

den, dass aus den Interviews keine klare Vorgehensweise im klimaangepassten Bauen hervorgeht. Einigkeit herrscht lediglich über die Orientierung an traditionellen Bauweisen als Vorgehensweise im klimaangepassten Bauen. Die in Abschnitt 3 vorgestellten Methoden zu Klimaaudits und Handlungsempfehlungen sind hingegen vielen Experten nicht bekannt. Die Literaturrecherche zeigt verschiedene Planungstools auf. In der Praxis werden diese kaum verwendet und sind weitgehend unbekannt. Lediglich thermodynamische Simulationstools werden vereinzelt genannt.

Hinsichtlich der Bewertung des klimaangepassten Bauens sind zwei Drittel der Befragten der Meinung, dass es hierzu Methoden gibt. Es werden jedoch lediglich Methoden zur Bewertung der Energieeffizienz und nicht zur Bewertung der Klimaanpassung genannt, wie beispielsweise der Energienachweis, die Energieeffizienz-Richtlinie, die EnEV (heute GEG [105]) oder die Berechnung des Energiebedarfs bzw. des Heiz- und Kühlbedarfs. Methoden wie das Monitoring oder die Begleitung des Projektes durch einen Energiemanager oder Berater werden ebenfalls in diesem Kontext genannt. Teilweise wird in den Interviews darauf hingewiesen, dass die Methoden für eine Bewertung vorhanden sind, eine beschreibende Größe jedoch fehlt. Ein Drittel der Interviewteilnehmer geben an, keine Methode zu kennen. Die Frage, ob eine Quantifizierung der Klimaanpassung bekannt ist, verneinen zwei Drittel der Experten. Ein Drittel ist der Meinung, dass das klimaangepasste Bauen quantifizierbar ist. Mehrfach wird angemerkt, dass die Methoden für eine Quantifizierung der Klimaanpassung vorhanden sind, jedoch eine einheitliche Vorgehensweise fehlt.

Schlussfolgerungen

Die Auswertung der Interviewstudie verdeutlicht, dass eine Begriffsdefinition des klimaangepassten Bauens notwendig war. Dieses wird nämlich oftmals mit dem nachhaltigen oder energieeffizienten Bauen gleichgesetzt, eine klare Abgrenzung fehlte. Es zeigt sich, dass sich für das klimaangepasste Bauen keine klare Vorgehensweise in der Praxis etabliert hat. Die in der Forschung veröffentlichten Informationen und entwickelten Tools sind in der Praxis nicht angekommen. Genannte Vorgehensweisen beziehen sich eher auf das energieeffiziente und nachhaltige Bauen, was abermals auf die fehlenden Begriffsabgrenzung zurückge-

führt werden kann. Eine stärkere Sensibilisierung für die Thematik ist notwendig. Eine Quantifizierungs- und Bewertungsmethode zum klimaangepassten Bauen war nicht bekannt. Genannte Methoden beziehen sich wiederum auf das nachhaltige oder energieeffiziente Bauen.

5 Bewertungsmethode zum klimaangepassten Bauen

Der Stand des Wissens sowie die empirische Studie in Form von Experteninterviews haben gezeigt, dass bisher keine Quantifizierungs- und Bewertungsmethode zum klimaangepassten Bauen vorhanden war. Die neue von Mayer [4] entwickelte Quantifizierungs- und Bewertungsmethode besteht aus dem Input der Methode, der Quantifizierung des Bewertungsindikators und der Bewertung der Klimaanpassung.

5.1 Das Gebäudemodell als Inputgröße

Das Gebäudemodell dient als Input für die Bewertungsmethode, die an geplanten oder bereits gebauten Gebäuden angewendet werden kann. Geplante Gebäude sollten sich im Stadium der Ausführungsplanung befinden, da für die Quantifizierung der Bewertungsindikatoren auch der Innenausbau von Relevanz ist. Z. B. dient eine Wandverkleidung aus Holz, wie sie in alpinen Regionen häufig vorzufinden ist, der Behaglichkeit, da ein thermischer Diskomfort durch höhere Oberflächentemperaturen und eine günstige Strahlungsbilanz der Außenwände verbessert werden kann. Die Pläne der Ausführungsplanung bilden somit die Grundlage für die Bewertung der Klimaanpassung. Um das Gebäude hinsichtlich der Klimaanpassung bewerten zu können, wird eine Überführung der Ausführungspläne in ein thermisch-energetisches Simulationsmodell des geplanten oder bereits gebauten Gebäudes benötigt. Die Qualität der Ergebnisse hängt stark vom Detaillierungsgrad und der Realitätsnähe des Modells ab. Oftmals weichen simulierte Ergebnisse von realen ab, da das zu erwartende Nutzerverhalten nicht dem tatsächlichen entspricht. Somit ist insbesondere auf eine möglichst realitätsnahe Simulation des Nutzerverhaltens zu achten. Weiterhin wird die Qua-

lität der Ergebnisse maßgeblich von den Wetterdaten beeinflusst, die von einer Wetterstation stammen sollten, welche so nah wie möglich (idealerweise direkt) am Gebäudestandort liegt. Beispielsweise beeinflusst das Vorhandensein eines Waldes mit zugehöriger Verschattung in unmittelbarer Nähe des Gebäudes das Klima am Standort maßgeblich. Des Weiteren sind möglichst realitätsnahe Bauteilaufbauten und Materialkennwerte zu ermitteln und in der Simulation abzubilden. Ist ein ortsspezifisches Material nicht in den Datenbanken vorhanden, muss es durch ein Material mit möglichst ähnlichen bauphysikalischen Eigenschaften abgebildet werden. Bei bereits umgesetzten Bauprojekten können alternativ oder zusätzlich Daten wie Energieverbrauchswerte oder Messwerte des Raumklimas erhoben werden, welche dann zur Evaluierung für das Simulationsmodell genutzt werden können. Dadurch können die Qualität der Ergebnisse und die Bewertung erheblich verbessert werden.

5.2 Quantifizierung der Klimaperformanz

Die Klimaanpassung von Gebäuden soll quantifiziert und bewertet werden, was mithilfe der neuen Größe Klimaperformanz (KLP) nach Mayer [4] durchgeführt wird. Sie gibt die prozentuale jährliche Zeitdauer an, in der das Gebäude ohne Heizung, Lüftung und Klimaanlage ein angenehmes Innenraumklima ermöglicht. Zusätzlich werden hierbei Über- bzw. Untertemperaturgradstunden berücksichtigt, sodass ersichtlich wird, wie stark das Innenraumklima vom Erwünschten abweicht.

Die Klimaperformanz wird, wie in Bild 16 dargestellt, in einem zweistufigen Verfahren ermittelt. Im ersten Schritt wird mittels thermisch-energetischer Simulation und ggfs. zusätzlicher bauphysikalischer Messungen die operative Innenraumtemperatur $\theta_{i,op}(t)$ über einen typischen Nutzungszeitraum ermittelt. In einem zweiten Schritt wird die Klimaperformanz mittels eines in Matlab (Version MathWorks R2020a) implementierten, neu entwickelten Berechnungsalgorithmus aus der operativen Raumtemperatur $\theta_{i,op}(t)$ berechnet. Mittels des Berechnungsalgorithmus wird die prozentuale jährliche Zeitdauer anhand eines zuvor festgelegten Komfortbereichs auf der Basis von Innenraumklimadaten in Abhängigkeit vom Außenklima be-

stimmt. Dazu werden die Zeiträume innerhalb der Nutzungsdauer, in welchen die vorhandene operative Innenraumtemperatur (Ist-Werte) innerhalb der zuvor festgelegten Sollwerte der erwünschten operativen Innenraumtemperatur (Komfortbereich) liegt, aufsummiert und durch die gesamte Anzahl der Nutzungsdauer dividiert. Je größer der Wert ausfällt, desto besser ist die Klimaperformanz des Gebäudes zu bewerten, da somit die Innenraumtemperatur länger im Komfortbereich liegt.

Gleichung (1) beschreibt die Berechnung der Klimaperformanz:

$$KLP = \frac{\sum_i^{t_n} (t_{i,op = \text{komf,op}})}{t_{n,ges}} \cdot 100\% \quad (1)$$

mit:
 KLP Klimaperformanz in %
 $t_{i,op = \text{komf,op}}$ Nutzungsdauer, in der die vorhandene operative Innenraumtemperatur innerhalb der Komfortgrenzen der operativen Innenraumtemperatur liegt
 $t_{n,ges}$ gesamte Nutzungsdauer

Im Unterschied zu vielen Bewertungsmethoden des Innenraumklimas werden hier lediglich Zeiträume innerhalb der Nutzungsphase betrachtet. Beispielsweise wird für die Berechnung der Übertemperaturgradstunden nach DIN 4108-2:2013-02 [100] bei einer Wohnnutzung eine Anwesenheit von 24 Stunden am Tag angenommen. Auch bei der Auswertung der operativen Innenraumtemperatur oder des CO₂-Gehalts mithilfe von Carpet- oder Box-Plots wird meist der gesamte Simulationszeitraum betrachtet und nicht nur die Nutzungsphase. Eine Über- bzw. Unterschreitung der Komfortgrenzen des Innenraumklimas außerhalb der Nutzungszeit ist für den Nutzer jedoch irrelevant. Zudem werden passive Klimatisierungsmaßnahmen nicht nachteilig bewertet, welche außerhalb der Nutzungsphase absichtlich ein unkomfortables Innenraumklima erzeugen, um innerhalb der Nutzungsphase ein angenehmes Klima zu ermöglichen, wie es beispielsweise bei der Nutzung von Speichermassen in Kombination mit Nachlüftung der Fall sein kann.

Der Komfortbereich der operativen Innenraumtemperaturen ist den Randbedingungen sowie den kulturellen Gegebenheiten anzupassen. Randbedingungen

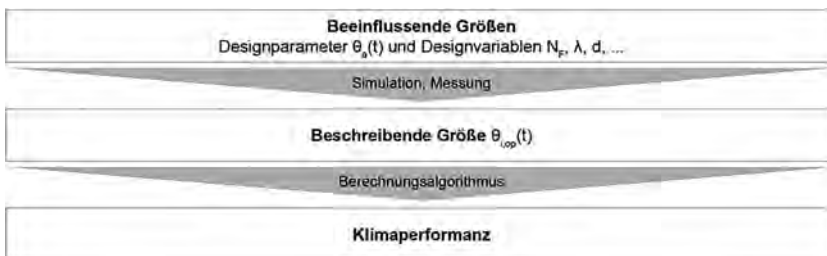


Bild 16. Schematischer Ablauf zur Ermittlung der Klimaperformanz [4]

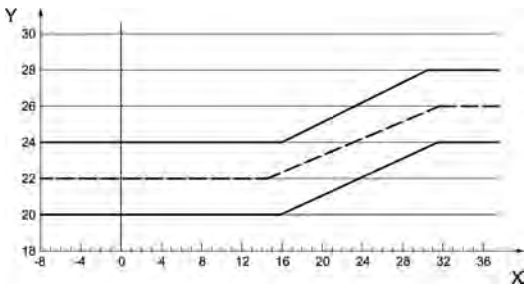


Bild 17. Bereich der empfohlenen operativen Raumtemperaturen mit X = Stundenmittelwert der Außenlufttemperatur in °C und Y = operative Raumtemperatur in °C [101] (DIN EN 16798-1:2022-03)

sind z. B. die Belüftungsart des Gebäudes (natürlich/mechanisch) oder das Außenklima. Hängt der gewählte Komfortbereich wie in Bild 17 zu sehen von den Außentemperaturen ab, wird dies im Berechnungsalgorithmus berücksichtigt.

Des Weiteren ist zu berücksichtigen, wie stark das vorhandene Innenraumklima vom erwünschten abweicht. Dazu wird die Methode der Übertemperaturgradstunden verwendet, welche üblicherweise als Maß für die sommerliche Überhitzung von Gebäuden eingesetzt wird [100]. Hier wird neben der Überschreitungsdauer (Anzahl an Stunden, in denen die vorhandene operative Temperatur die Komfortgrenze für die operative Raumtemperatur überschreitet) auch die Höhe der Überschreitung berücksichtigt. Übertemperaturgradstunden ergeben sich, wie in Gl. (2) und Bild 18 dargestellt, aus der Summe der positiven Differenzen der mittleren Stundenwerte der operativen Innenraumtemperatur innerhalb der Nutzungsphase und eines vorgegebenen Grenzwertes für die operative Innenraum-

temperatur während des gesamten Jahres. Auch hier können die Grenzwerte in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur (Bild 17) festgelegt werden. Dies wird ebenfalls im Berechnungsalgorithmus berücksichtigt.

$$dh_{KP} = \sum_i^{|\text{t mit } \theta_{i,op} > \theta_{komf,op}|} (\theta_{i,op} - \theta_{komf,op})t \quad (2)$$

mit

dh_{KP} Übertemperaturgradstunden in Kh/a

t Über- bzw. Unterschreitungsdauer der

Sollwerte des Komfortbereichs während der Nutzungsphase

$\theta_{i,op}$ operative Innenraumtemperatur

$\theta_{komf,op}$ Sollwert(e) des Komfortbereichs der operativen Innenraumtemperatur

Zusätzlich wird das Prinzip der Übertemperaturgradstunden, wie in Bild 19 dargestellt, auf Untertemperaturgradstunden übertragen. Die zugehörige Berechnung ist Gl. (3) zu entnehmen:

$$dh_{KP} = \sum_i^{|\text{t mit } \theta_{i,op} < \theta_{komf,op}|} (\theta_{komf,op} - \theta_{i,op})t \quad (3)$$

mit

dh_{KP} Übertemperaturgradstunden in Kh/a

t Über- bzw. Unterschreitungsdauer der

Sollwerte des Komfortbereichs während der Nutzungsphase

$\theta_{i,op}$ operative Innenraumtemperatur

$\theta_{komf,op}$ Sollwert(e) des Komfortbereichs der operativen Innenraumtemperatur

Zudem kann auch eine höhere zeitliche Auflösung der Innenraumklimadaten als Stundenwerte berücksichtigt werden. Für die Über- bzw. Untertemperaturgradstunden werden die zugehörigen Differenzen gemäß der angegebenen Berechnungsvorschriften über die zu-

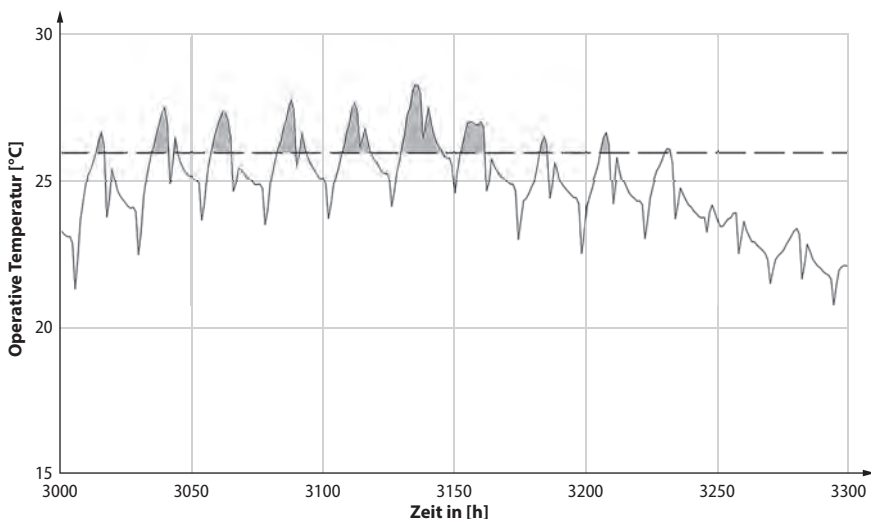


Bild 18. Graue Integralfäche der Übertemperaturgradstunden über 26 °C im Zeitraum 3000 bis 3300 Stunden eines Jahres [4]

diese Weise kann ein Reasoner verschiedene Aufgaben erfüllen. Durch die Klassenzugehörigkeit und deren Verbindung durch Eigenschaften ist es einem Reasoner möglich, Verbindungen zwischen Klassen herzustellen, die zu Beginn nicht definiert waren. So kann zum Beispiel vom Reasoner festgestellt werden, dass bei drei unterschiedlichen Individuen unterschiedlicher Klasse eine Verbindung zwischen Individuum eins und drei besteht, wenn es eine Verbindung zwischen eins und zwei und eine Verbindung zwischen zwei und drei aufgrund von Individuen oder Klasseneigenschaften gibt.

Maschinelles Lernen

Die Definition des Begriffs „maschinelles Lernen“ ist nicht einfach. *Chui and McCarthy* [29] definieren ihn wie folgt: „*Machine-learning algorithms detect patterns and learn how to make predictions and recommendations by processing data and experiences, rather than by receiving explicit programming instruction. The algorithms also adapt in response to new data and experiences to improve efficacy over time.*“ [29]. Einem Algorithmus des maschinellen Lernens unterliegt demnach immer eine Aufgabe eines zu erlernenden Zusammenhangs. Grundsätzlich ist eine Unterscheidung anhand der Art und Weise wie diese Aufgabe erfüllt wird, möglich. Die klassischen Algorithmen des maschinellen Lernens verwenden mathematische Methoden, wie beispielsweise Regressionsverfahren, um ihre Lernaufgabe zu erfüllen. Die sogenannten „Deep-Learning“-Algorithmen verwenden hingegen sogenannte künstliche neuronale Netze zur Verarbeitung der Lernaufgaben. Eine Unterscheidung beider ist demnach nur eine Unterscheidung der grundlegenden Arbeitsweise zur Erfüllung der Lernaufgabe.

Ein Problem beim Anlernen eines Machine-Learning Algorithmus besteht darin, dass in der Lernphase „gelabelte“ Daten vorhanden sein müssen. Das bedeutet, die Daten müssen im Vorfeld bereits für das Anlernen mit den zu lernenden Eigenschaften markiert (Label) worden sein. Bei den üblichen Datenmengen für eine Lernaufgabe erzeugt dies einen hohen Aufwand. Eine Möglichkeit, um das Problem der hohen Datenmengen zu umgehen, ist die Methode der „Data Augmentation“ (Daten-Vermehrung). Dabei werden von einem Datensatz viele Duplikate mit jeweils kleinen Änderungen erstellt. In der Lernphase werden diese abgeänderten Datensätze wie normale Trainingsdatensätze verwendet und somit in den Lernprozess einbezogen. Diese Methode macht den Algorithmus grundsätzlich robuster.

2.1.4 Digitaler Zwilling

„*Der digitale Zwilling ist eine Schlüsseltechnologie für die Digitalisierung unserer Welt.*“ [30]. Ein digitaler Zwilling kann demnach auch ein Simulationsmodell eines Teilsystems sein. Durch die Kombination vieler Teilsysteme entsteht dann der digitale Zwilling des Gesamtsystems. Die Herausforderung liegt hier also

in der Schaffung eines Frameworks, das die Kombination vieler digitaler Zwillinge zu einem Gesamtsystem zulässt. Anwendung findet dies vor allem in der Produktionstechnologie sowie in der Produktentwicklung, zum Beispiel im Fahrzeugbau. Dort werden Simulationsmodelle als digitale Zwillinge erstellt und im weiteren Entwicklungsprozess jeweils gegen akkurate Versionen getauscht. Auf diese Weise ist es möglich, den digitalen Zwilling des Gesamtmodells zu verbessern, ohne jede einzelne Komponente bei Änderungen überarbeiten zu müssen. Im Gegensatz zu anderen Branchen wird der digitale Zwilling im Bauwesen noch nicht regelmäßig verwendet, wengleich sein Einsatz auf verschiedenen Ebenen von der Erstellung über die Nutzung bis zum Abriss eines Gebäudes Vorteile verspricht. Zwar existieren grundsätzlich Ansätze zur Beschreibung digitaler Zwillinge von Gebäuden, wie beispielsweise die Datenhaltung der Gebäude über BIM-Modelle, letztendlich existiert jedoch noch kein volleinsatzfähiges etabliertes Framework für diesen Anwendungsfall. Einzelanwendungen zeigen in verschiedenen Forschungsvorhaben die Möglichkeiten entsprechender Frameworks bereits auf [25].

2.2 Bewertung des Standes des Wissens

Der Smart Home-Sektor ist ein stark divergenter Sektor. Auf der einen Seite existieren proprietäre Systeme, mit denen versucht wird, den Kunden über den Funktionsumfang der Software an die Hardware zu binden. Auf der anderen Seite stehen Community-Projekte, die genau diesen Effekt reduzieren wollen. Grundsätzlich ist das omnipräsente Problem des Smart Homes auch derzeit noch die mangelnde Interoperabilität, welche die anzubindenden Hardwarekomponenten betrifft. Mit communitygestützten Lösungen wie OpenHab, aber auch FHEM, der HomeKit von Apple, wird versucht, dem entgegenzuwirken. Allerdings können auch diese keine vollständige Lösung des Problems liefern. Die Hardware für Steuerung und Sensorik sowie deren Anbindbarkeit an ein Smart Home betreffend, ist also grundsätzlich derzeit noch mit Interoperabilitätsproblemen zu rechnen. Eine vollständige Lösung, mit welcher ein Smart Home erstellt und in Betrieb genommen werden kann und deren Komfort der Installation eines Computers oder einem anderen digitalen Verbraucherprodukt gleichkommt, ist derzeit noch nicht vorhanden.

Die Hardware, mit welcher logische Operationen und Rechnungen durchgeführt werden, ist im Gegensatz zu den in Science-Fiction-Filmen propagierten Großrechnern derzeit noch auf Einplatinencomputern oder peripherer Hardware der Netzwerktechnik zu realisieren. Dies liegt aber grundsätzlich an der geringen Auslastung der Systeme mit rechenintensiven Aufgaben. Solche Aufgabenstellungen wären zwar vorhanden, in der Praxis mangelt es jedoch an produktiven Systemen, die solche Aufgaben erfüllen. In der Forschung sind Systeme für solche Aufgaben häufiger vorzufin-

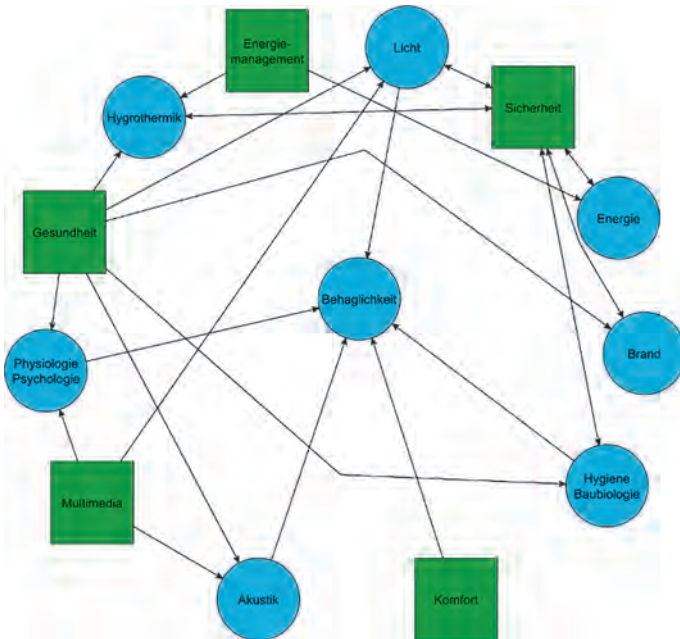


Bild 1. Überschneidung der Themengebiete des Smart Home und der Bauphysik

den. Hier liegt jedoch eine einzelfallbezogene, stark differenzierte Forschung ohne übergeordnetes Konzept vor. Durch eine eingehende Untersuchung zeigte sich, dass die Steuerabläufe im Smart Home eine parallele Vorgehensweise zu den Abläufen von Berechnungen oder Simulationen in der Bauphysik haben. Die Strukturelemente, Variablen und Messgrößen sowie Handlungsvorschläge und Regeln lassen auf ähnliche Abläufe in beiden Systemen schließen. Eine Überprüfung der thematischen Schwerpunkte der Bauphysik und des Smart Homes zeigte, dass auf Basis dieser Struktur Überschneidungen der beiden Bereiche aufgefunden werden konnten. Die Analyse ergab, dass in nahezu allen Themenbereichen der Bauphysik eine Interaktion mit dem Smart Home stattfinden kann. Bild 1 zeigt die Überschneidungen zwischen Themengebieten des Smart Homes mit denen der Bauphysik, wobei die Bereiche der Bauphysik blau und die des Smart Homes grün abgebildet sind.

Auffällig ist dabei, dass vor allem die Thematik um die bauphysikalische Behaglichkeit einen starken Anteil des Themengebietes „Komfort“ im Smart Home einnimmt. Die Steuerungen zur Bereitstellung des Komforts im Smart Home können jedoch in keiner Weise den Stand des Wissens der Bauphysik zur Thematik abbilden. Dies liegt hauptsächlich daran, dass viele Einflüsse aufgrund ihrer Komplexität oder schwierigen sensorischen Erfassung bis heute nicht berücksichtigt werden. Beispielsweise wird im Smart Home zur Steuerung des thermischen Komforts als alleiniger Parameter die Raumlufttemperatur betrachtet, während technisch bereits die Bestimmung des menschlichen Metabolismus oder des Bekleidungsgrades möglich wären [31].

Während die olfaktorische, visuelle, akustische und psychologische Behaglichkeit im Bereich der Bauphysik eine große Rolle spielen und deren Beachtung für die Erstellung von Arbeitsplätzen üblich ist, so haben diese Themen im Bereich des Smart Homes bis jetzt keinen oder nur sehr geringen Einzug gefunden. Auch Sicherheitsfunktionen oder Gesundheitsfunktionen, die mithilfe der Bauphysik einfach zu beschreiben wären, wie die Gefahr der Schimmelpilzbildung oder die Überwachung des Radongehalts der Luft, haben bis zum jetzigen Zeitpunkt keinen flächendeckenden Einzug in Smart Homes gefunden. Zwar gibt es vereinzelt in der Forschung Untersuchungen zu diesen Themen, ein für gängige Systeme anwendbarer Ansatz ist jedoch nicht zu finden. Im Bereich der Sicherheit sind hier mehr Anwendungsfälle zu vermerken, insbesondere zu Brand, Einbruch oder Wetterschutz.

Auch wenn es bereits einige Forschungsergebnisse im Bereich der Aktivitätserkennung gibt, so reichen diese bis jetzt nicht aus, um tatsächlich kontextsensitive Steuerungen im Bereich des Smart Homes zu ermöglichen. In der Praxis sind kontextsensitive Steuerungen und Aktivitätserkennung bis jetzt nicht umsetzbar, die lückenhafte Abdeckung des Forschungsfeldes lässt derzeit auch keine übergreifenden Themen oder Erkenntnisfelder erkennen. Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass Aktivitätserkennung technisch, sowohl die Sensorik als auch die Software betreffend, möglich ist. Die Systeme sind jedoch weder standardisiert noch so weit fortgeschritten, dass Muster zuverlässig und übertragbar erkannt werden können. Die bisher durchgeführten Forschungsarbeiten beschränken sich auf spezielle Einzelthemen. Eine grundlegende Untersuchung zur Thematik Aktivitätserkennung

im häuslichen Umfeld wurde bis jetzt nicht durchgeführt. Auch eine grundlegende Strategie zur Erschließung dieses Forschungsfeldes ist nach umfangreicher Recherche nicht zu erkennen. Einigkeit herrscht jedoch meist darin, dass vor allem individuelle Steuerungen stark kontextbasiert sein müssen. Zudem konnte mehrfach festgestellt werden, dass Kontextsensitivität ohne funktionsfähige Aktivitätserkennung kaum möglich ist. Daher kann man zusammenfassend festhalten, dass Aktivitätserkennung sowohl technisch als auch softwaretechnisch möglich ist. Für eine breite übergreifende Anwendung ist dieses Feld jedoch noch zu wenig erforscht. Außerdem sind kontextsensitive Steuerungen stark von der Erkennung dieser Aktivitäten abhängig. Aus dieser gegenseitigen Bedingung folgt, dass auch kontextsensitive Steuerungen technisch möglich wären, aber vor allem aufgrund des mangelnden Wissensstandes derzeit noch nicht weiterführend umgesetzt werden können. Das im folgenden vorgestellte Konzept muss demnach einen Spielraum für die Integration dieser Möglichkeiten bieten, damit sie nach ihrer Erforschung einfach integriert werden können.

3 Ganzheitliche Steuerung eines Smart Homes

Für die Entwicklung eines neuen intelligenten und besser auf den Nutzer zugeschnittenen Smart Homes wurde mit einer hohen Interdisziplinarität gearbeitet. Diesem System wurde ein Konzept zugrunde gelegt, das es ermöglicht, neue Technologien zu implementieren. Ein Entwickler kann ohne aufwendige Recherche gewisse Aspekte einbinden und interne Abläufe abbilden. Mittels eines Kernkonzeptes muss zunächst sichergestellt werden, dass die Schnittstellen klar definiert sind, dass kein Spielraum für Interpretationen bleibt. Das im Folgenden erläuterte System basiert dabei auf dem sogenannten „Open-World“-Konzept. Dieses impliziert eine Offenheit des Systems für Neuerungen und neue Aspekte.

3.1 Anforderungen anhand eines Kriterienkataloges

Der folgende Kriterienkatalog stellt die grundlegende Basis für die Entwicklung der hier vorgestellten Methode bereit, wenngleich er aufgrund des verwendeten Open-World Ansatzes keine vollständige Auflistung für alle in Zukunft auftretenden Kriterien bereitstellen kann.

Nutzerindividuell

Ein Smart Home lernt von den Gewohnheiten und Eigenschaften des Nutzers mittels zugehöriger Algorithmen und berücksichtigt diese im weiteren Steuerungsverlauf. Das Lernen ist damit ein Schlüsselfaktor, um eine starke Individualisierung erzeugen zu können, und Basis für die richtige Interaktion mit dem Nutzer.

Interaktiv

Ein Smart Home muss von der Interaktion mit dem Nutzer lernen, um seine Steuerung daraufhin anzupassen. Im Umkehrschluss ist durch Interaktion auch ein Lernprozess beim Nutzer möglich. Für das Gebäude schädliches Verhalten wird aufgrund regelmäßiger Feedbacks des Systems aus Einsicht oder Resignation des Nutzers mit der Zeit eingestellt oder zumindest eingeschränkt. Ein Beispiel aus dem Kontext der Bauphysik wäre hier ein schädliches oder nicht vorhandenes Lüftungsverhalten, das dem Nutzer durch regelmäßige Aufforderungen zum richtigen Lüften in der jeweiligen Situation abtrainiert werden kann [32].

Dynamisch

Um Individualität und Interaktion sicherstellen zu können, müssen Berechnungen für den automatisierten Wohnraum auf aktuelle Daten gestützt werden. Soweit möglich, werden diese an die aktuelle Lebenssituation des Nutzers und das spezielle Gebäude angepasst. Dadurch kann das Smart Home dynamisch auf veränderte Randbedingungen oder veränderte Lebensgewohnheiten eingehen. Durch diese schnelle Reaktion auf Veränderung ist eine Verbesserung der Interaktion möglich und so auch ein besseres Lernverhalten der Algorithmen. Zudem erzeugt ein System, das dynamisch und nicht träge wirkt, ein höheres Vertrauen beim Nutzer, was essenziell ist für eine richtige und brauchbare Interaktion. Ein System, welches den Nutzer aufgrund seiner Trägheit behindert, wird keine Akzeptanz und damit auch keine Unterstützung bei einem Lernvorgang erhalten.

Kontextsensitiv

Durch Erkennung des aktuellen Handlungskontextes des Nutzers kann die Steuerung besser an die nutzerspezifischen und temporären Wünsche angepasst werden. Dadurch ist es möglich, das Steuerungskonzept nicht in einer generischen Weise umzusetzen, wie es bis heute oft der Fall ist, sondern die Steuerung individuell und zeitnah den veränderten Gegebenheiten im Wohnraum anzupassen. Kontextsensitivität ist also der Schlüssel, um das System aus Nutzerindividualisierung, Interaktion und Dynamik, die sich gegenseitig verstärken, zu gewährleisten.

Modular

Für eine umfassende Beschreibung der vielfältigen Bereiche im Leben eines Menschen, der sich nicht nur auf die lebensnotwendigen Kernfunktionen beschränkt, ist auch im systembedingten Funktionsumfang eine Individualisierung erforderlich. Daher muss das Einbinden neuer Funktionalitäten in das System leicht möglich sein. Zusätzlich muss durch eine gute modulare Struktur sichergestellt werden, dass alle relevanten Verbindungen zwischen den Modulen und Anbindungen an Daten und vor allem individualisierten Daten des Nutzers und des Gebäudes vom System automatisch erkannt werden. Nur so ist es möglich, auch die System-

struktur regelmäßig an die Individualität und Dynamik des menschlichen Lebens im häuslichen Umfeld anzupassen.

3.2 Kernkonzept – Human centered

Aus den vorhergehend erfolgten Anforderungen entstand für die Methode die Notwendigkeit, das System so zu konzipieren, dass bei den Kalkulationen der Mensch und seine Bedürfnisse im Vordergrund stehen. Auf diese Weise lassen sich Nutzerkontext, nutzerindividuelle Parameter und spezielle Nutzervorlieben mit in das Konzept integrieren.

Bei der indirekten Methode kann zwar auf einen aus der Handlung resultierenden primären Bedürfnischarakter geschlossen werden, jedoch besteht eine gewisse Unsicherheit, ob eine Aktion nicht aus einem anderen und nicht sofort abzuleitenden Grund ausgeübt wird. So kann das Öffnen eines Fensters den Wunsch nach Frischluft stillen oder den Sinn haben, wegen zu hoher Luftfeuchtigkeit zu lüften. Allein aus der Handlung kann diese Aktion also keinem eindeutigen Bedürfnis zugeordnet werden. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, bereits im Vorfeld zu vermeiden, dass solche Anforderungen entstehen, wodurch auch die Menge der fehlinterpretierten Aktionen des Nutzers reduziert wird. Um die Bedürfnisse des Nutzers zu stillen bevor sie entstehen, ist eine genaue Kenntnis über die Entstehung und die Zusammenhänge dieser erforderlich. Daher kann dieses Konzept als „Human-Centred“ beschrieben werden. Die Bedürfnisse und Eigenschaften des Menschen stehen im Mittelpunkt der Betrachtung.

3.2.1 Digitaler Gebäudezwilling

Damit die Interaktion zwischen Nutzer und Gebäude abgebildet werden, wird eine digitale Version des Gebäudes erstellt. In der Informatik spricht man von einem digitalen Gebäude-Zwilling (DGZ). Diese Technologie eröffnet die Möglichkeit, die speziellen einzigartigen Besonderheiten einer jeden Wohnsituation zu berücksichtigen, nicht nur um die Interaktion zwischen Menschen und Gebäuden abzubilden, sondern auch zwischen verschiedenen Gebäudeteilen und Bereichen. Der derzeit übliche funktionsbasierte Automationsansatz wird dadurch um ein breites Spektrum an Möglichkeiten erweitert. So können auch Funktionen in Form von Modulen anderer Entwickler untereinander interagieren und Daten austauschen. Durch diese bei komplexen Systemen kaum noch vorhersehbaren Datenströme wird eine bessere Abbildung der Realität erzeugt als bisher mit einzelnen in sich abgeschlossenen Modulen, die ihre Berechnungen ausführen und direkte Steuerungen vornehmen. Für ein sich entwickelndes Smart Home, das von verschiedenen Akteuren beeinflusst wird, ist dies zusätzlich ein Weg, um das derzeitige Interoperabilitätsproblem zu lösen und auch auf Software-Ebene eine sinnvolle Vernetzung zu erlauben. Eine schematische Abbildung des digitalen Gebäudezwillings findet sich in Bild 2.



Bild 2. Schematische Gliederung des digitalen Gebäudezwillings

3.2.2 Digitaler Zwilling des Nutzers

Eine grundsätzliche Einteilung der Nutzerbedürfnisse ist in Form der Maslowschen Bedürfnispyramide zu finden, welche trotz vorherrschender Kritik für die Bestimmung der Prioritäten und deren Abstufung verwendet werden kann, da sie die grundlegenden Bedürfnisse des Menschen darstellt. Die Entscheidungen, die ein Smart Home auf dieser Basis für den Nutzer trifft, dienen der Unterstützung. Im Regelfall werden solche existenziellen Entscheidungen noch direkt vom Menschen getroffen. Hier spielt nahezu ausschließlich der Bereich der Defizitbedürfnisse eine Rolle. Diese wurden zum Zweck der programmtechnischen Verarbeitung in vier Kategorien eingeteilt und deren Wichtigkeit entsprechend der Pyramide von *Maslow* wie folgend absteigend angeordnet:

- Sicherheit
- Gesundheit
- Komfort
- Sonstige

Um vorrausschauend zu agieren, sodass ein bestimmtes Bedürfnis erst gar nicht entsteht, sind genaue Kenntnisse über das Entstehen von Bedürfnissen erforderlich. Beispielsweise kann das thermische Behaglichkeitsempfinden im Vorfeld ermittelt werden und dadurch vorab bereits erkennbar sein, ob ein Mensch in einer bestimmten Situation das Bedürfnis entwickeln wird, die Raumtemperatur zu verändern. Das bedeutet für die Funktionstüchtigkeit dieses Konzepts, dass ein grundlegender Bestandteil darin besteht, dass die Entstehung von Nutzerbedürfnissen beschrieben werden kann. Die Beschreibung dieser Zusammenhänge führt zur hier vorgestellten Entwicklung eines „Digitalen Zwillings des Nutzers“. Die Individualisierung der zugehörigen Parameter lässt sich am besten über ein möglichst detailliertes digitales Abbild des Nutzers generieren. Dadurch ist prinzipiell auch die Interaktion zwischen Nutzern abbildbar, da für eine Individualisierung jeder Nutzer seinen eigenen digitalen Zwilling erhält. Ein Entwickler kann im vorgestellten Modell die jeweiligen Komponenten frei wählen und sich für eine sehr detaillierte Lösung oder einen eher approximativen Ansatz entscheiden.



Bild 3. Schematische Gliederung des digitalen Nutzerzwillings

Auch der digitale Nutzerzwilling (DNZ) besitzt eine ähnliche Untergliederung wie der DGZ. Wie beim DGZ beschreibt der obere Bereich eher Parameter und physikalische Eigenschaften, während der untere Bereich das theoretische Wissen und Ersatzdaten liefert. Die genaue Aufteilung des DNZ ist Bild 3 zu entnehmen; wobei auch hier eine Unterteilung in fünf Bereiche möglich ist.

3.2.3 Interaktion von Nutzer- und Gebäudezwilling

Im hier vorgestellten Ansatz basiert die Interaktion des DGZ und dem DNZ auf dem Konzept von Bedürfnis und Bedürfnisbefriedigung. Der Nutzer und damit im Idealfall sein DNZ erzeugen ein „Bedürfnis“, woraufhin das Gebäude und damit der DGZ reagieren muss, um dieses zu befriedigen. Die grundlegende Systematik ist im Bild 4 zu erkennen. Auf der linken Seite ist hier der bereits bekannte DNZ abgebildet, auf der rechten Seite der DGZ. Das Bedürfnis des Nutzers wird in Bild 4 als Anforderung generiert und führt wie dargestellt zu einer Interaktion.

Damit wird klar, dass der früher in der Automation übliche Funktionsansatz in Form von Modulen auf beide Zwillinge und ihre Interaktion aufgeteilt wird. Während bisher Inhalte und Daten in einem Programm

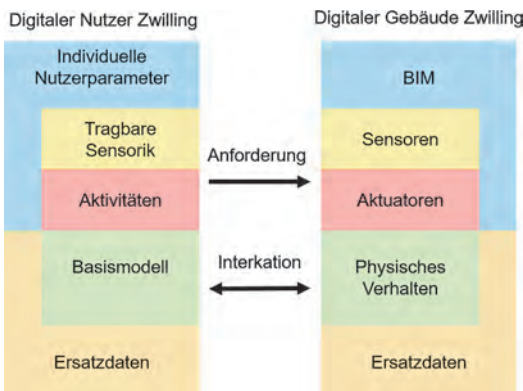


Bild 4. Interaktionsmodell digitaler Gebäude- und Nutzerzwillings

und einer Berechnung integriert waren, werden diese nun auf die Bestandteile beider Zwillinge aufgeteilt, sodass ein Konzept entsteht, um die Interaktion realitätsnah zu beschreiben. Damit dieses Prinzip auch interdisziplinär funktioniert, wurden in bestimmten Bereichen bereits Einschränkungen und minimale Anforderungen definiert, welche eingehalten werden müssen. Hauptsächlich betrifft dies eine konsequente Aufteilung der Funktionsbereiche auf die jeweiligen Bereiche der digitalen Zwillinge, die Definition der Ersatzdaten sowie die Definition der Anforderungen im Bereich der digitalen Zwillinge.

Um die durch das vorgestellte Konzept entstehenden Module unterstützen zu können, ist ein modularer Aufbau der gesamten Systemumgebung inklusive der dafür notwendigen Randbedingungen und Anforderungen nötig. Um die Komplexität der Definition der entsprechenden Module besser bewerten zu können, zeigt Bild 5 beispielhaft die nötigen Informationen und Definitionen zur Implementierung eines Wirkmoduls.

3.3 Knowledge-Based – Algorithmik zur Interaktion

Um die Zusammenhänge zwischen all diesen Modulen abbilden zu können und automatisch den richtigen Bezug zu finden, werden Informationen und Wissen über diese Struktur in die Algorithmik integriert. Für diese Aufgabe zeigten sich Ontologien als geeignetes Mittel [5]. Dadurch können Verknüpfungen von Datenströmen mithilfe der bereits definierten Eigenschaften erstellt werden.

Nach der nachfolgend beschriebenen Definition der Klassen werden die einzelnen Module als Instanzen in der Ontologie initialisiert und mit den für sie gültigen Eigenschaften versehen. Sind alle Informationen in der Ontologie enthalten, kann der Reasoner die Verbindungen zwischen den einzelnen Modulen und Teilen der Ontologie ermitteln und speichern.

Diese gespeicherte Information der Zusammengehörigkeit verschiedener Module ist essenziell für die Ermittlung der späteren Rechnungssetups und der Reihenfolge, in der die Module berechnet werden müssen. Das Finden der Verbindungen erfolgt durch das Prüfen der Übereinstimmung der Eigenschaften verschiedener Datenströme. Den Inputvariablen und -parametern sowie Sensoren und Outputvariablen und -parametern wurden dazu verschiedene Klassen und Eigenschaften zugeordnet. Diese definieren deren physikalische Beschaffenheit sowie deren Raumkontext in der Wohnung. Hieraus kann der Reasoner erkennen, ob ein Sensorwert als Input für ein Modul verwendbar ist.

Das Reasoning dient der Findung von Interaktionen von verschiedenen Modulen und dem Auffinden der richtigen Input Data Ströme sowie der richtigen Aktionen und Geräte. Das Reasoning ist ein Prozess, der für eine bestehende Ontologie einmalig ausgeführt werden muss. Solange an der Struktur des Smart Home keine

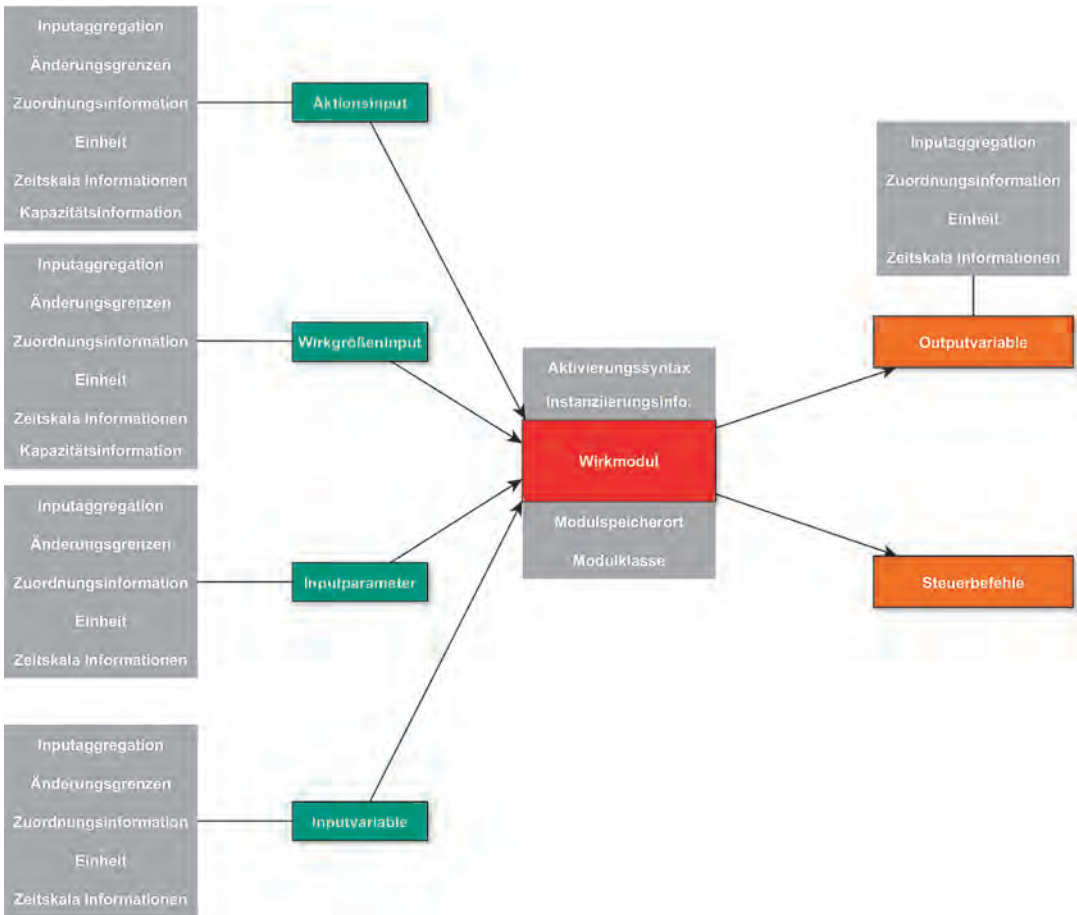


Bild 5. Übersicht über Definitionen und Informationen zur Beschreibung eines Wirkmoduls

Veränderungen durchgeführt werden, ist kein erneutes Reasoning notwendig und die Berechnungen können durch Auslesen der Ontologie durchgeführt werden. Beim Reasoning wird nach Verbindungen zwischen Individuen der Ontologie gesucht, die zueinanderpassen. Dies geschieht ähnlich einem Schlüssel-Schloss-Prinzip, wobei das Reasoning in dieser Methode mehrstufig erfolgt. Jede Stufe erzeugt dabei Verbindungen zwischen unterschiedlichen Bereichen der Ontologie:

- Stufe I: Reasoning von Sensorwerte
- Stufe II: Reasoning von Modulinteraktionen
- Stufe III: Reasoning von Ersatzdaten
- Stufe IV: Reasoning der Interaktionen von Funktionsmodulen
- Stufe V: Reasoning von Inputs der Wirkmodule zu Funktionsoutputs
- Stufe VI: Reasoning von Geräten zu den Wirkmodulen
- Stufe VII: Reasoning der Vollständigkeit

4 Implementierung

Im Folgenden werden Details zur praktischen Umsetzung des bereits theoretisch erläuterten Ansatzes dargestellt. Daraus entsteht ein Überblick über die technische Komplexität und die einzelnen Komponenten des Testframeworks.

Die zentrale Verwaltung von Daten wird mittels einer Datenbank gelöst. Dies betrifft alle Formen von Daten, die nicht ontologierelevant sind und beinhaltet Sensordaten, Nutzerparameter, Aktuatordaten und alle sonstigen Formen von Daten, die nicht direkt aus der Ontologie ausgelesen werden, sondern im Verlauf der Berechnung von einem Datensammlermodul abgerufen werden. Grundsätzlich empfiehlt es sich, für die Datenhaltung ein einheitliches System zu verwenden. Innerhalb dieser Datenstruktur ist auch die Liste anzulegen, mit deren Hilfe es dem Nutzer ermöglicht werden kann, einzelne Funktionen zu aktivieren und zu deaktivieren, ohne dabei Rücksicht auf modulbedingte Abhängigkeiten nehmen zu müssen.

Grundsätzlich existieren Möglichkeiten, Daten aus Modellen zu transferieren. Für die im Folgenden aufgeführten Anwendungsfälle wurden Daten händisch ermittelt und implementiert. Dies hatte den Hintergrund, dass von der in den Fallstudien verwendeten Testwohnung kein Modell vorhanden war. In einem Modell waren zwar alle wesentlichen Daten vorhanden, die für eine genaue Beschreibung eines Gebäudes erforderlich sind, diese sind jedoch, im Sinne dieser Arbeit, nur maschinenlesbar, wenn bestimmte Informationen davon in die Ontologie und auch in der Datenbank hinterlegt werden. Aus diesem Grund ist für einen Produktivbetrieb eine Software notwendig, die die jeweiligen Daten extrahiert und in den jeweiligen Bereichen abspeichert.

Da jeder Bewohner sein Gebäude unterschiedlich nutzen will, gilt es auch Spielraum für verschiedene Nutzerpräferenzen bei der Steuerung zu erzeugen. Dieser Spielraum ist bei den Funktionsmodulen von Seiten des Modulentwicklers einzuplanen und die zugehörigen Parameter, die die Nutzerpräferenzen beschreiben können, sind in der Datenbank abzulegen. Durch eine klare Trennung der Datenbanken für jeden Nutzer und jedes Gebäude ist es somit möglich, dass auch im Falle des Umzuges eines Nutzers die persönlichen Daten und angelernten Algorithmen übertragen werden können.

4.1 Gebäude- und Nutzermodule

Für den Test der Funktionsfähigkeit wurden die Module erstellt, welche in den nachfolgenden Fallstudien benötigt werden. Die verschiedenen Modultypen wurden mithilfe der Programmiersprache MATLAB in der Version 2017b mittels Funktionen umgesetzt. Die Module wie auch der übergreifende Algorithmus wurden dafür eigens erstellt und alle Module in ihrem Aufbau und ihrer Funktion an das hier vorgestellte Konzept angepasst. Das gewählte Framework lässt auch eine Implementierung von Modulen im FMI-Standard zu. In der Kategorie der Gebäudemodule wurde folgende Algorithmen abgebildet:

- Modul zur Verhinderung der Schimmelpilzbildung in Wohnräumen,
- Modul zur Kalkulation der Oberflächentemperatur mithilfe der Raum- und Außenlufttemperatur sowie dem U-Wert des Bauteils,
- Modul zur Kalkulation der Oberflächenfeuchte mittels der Oberflächentemperatur und der Raumluftfeuchte,
- Modul zur Beschreibung des hygrothermischen Raumfeedbacks auf Nutzeraktionen,
- Erweiterung um die Ausgabe des hygrischen Raumfeedbacks auf Nutzeraktionen in Form von relativer Luftfeuchte.

In der Kategorie der Nutzermodule wurde folgendes implementiert:

- Anforderung des Nutzers an das Nichtvorhandensein von Schimmel,

- Anforderung des Nutzers an die Radonkonzentration,
- Algorithmus zur Bestimmung der Anwesenheit des Nutzers,
- Algorithmus zur Vorhersage des Duschverhaltens eines Nutzers.

Entsprechend der beschriebenen Systematik sind folgende bereits genannten Module als Funktionsmodule einzustufen:

- Modul zur Verhinderung der Schimmelpilzbildung in Wohnräumen,
- Anforderung des Nutzers an das Nichtvorhandensein von Schimmel,
- Anforderung des Nutzers an die Radonkonzentration.

Nachfolgend aufgelistete Hilfsmodule wurden umgesetzt:

- Modul zur Kalkulation der Oberflächentemperatur mithilfe der Raumluft- und Außenlufttemperatur sowie dem U-Wert des Bauteils,
- Modul zur Kalkulation der Oberflächenfeuchte mittels der Oberflächentemperatur und der Raumluftfeuchte,
- Algorithmus zum Bestimmen der Anwesenheit des Nutzers,
- Datensammlermodul,
- Algorithmus zur Vorhersage des Duschverhaltens eines Nutzers.

Die folgend aufgezeigten Zusammenhänge wurden als Wirkmodule umgesetzt:

- Luftwechselsteuerung zur Geräte- und Aktionsauswahl,
- Erweiterung um Ausgabe des hygrischen Raumfeedbacks auf Nutzeraktionen in Form von relativer Luftfeuchte,
- Heizungssteuerung zur Geräte- und Aktionsauswahl.

4.2 Algorithmen zur Erkennung von notwendigen Interaktionen

Zur Gewährleistung der bereits erläuterten automatischen Zuweisungen von Datenströmen und damit auch zur Abbildung der Interaktion zwischen diversen Modulen, sind verschiedene Algorithmen und Systeme notwendig. Deren Umsetzung im Testframework wird in den folgenden Abschnitten näher erläutert.

Die Erstellung von Ontologien und deren Reasonings kann mit kostenfreien Softwarelösungen erreicht werden. Bei der Erstellung der Ontologie für die Durchführung der Fallstudien wurde darauf geachtet, dass nur Daten angelegt wurden, die automatisch mithilfe der richtigen Algorithmik angelegt werden können. Somit lässt sich alternativ ein Beschreiben der Ontologie auch mit einer externen Software durchführen. Das Auffinden der richtigen Sensoren, Aktuatoren und Modulverbindungen kann mithilfe von SWRL-Regeln (Semantic-Web-Rule-Language) erfolgen, da die dafür notwendigen Informationen in Form von Eigenschaf-

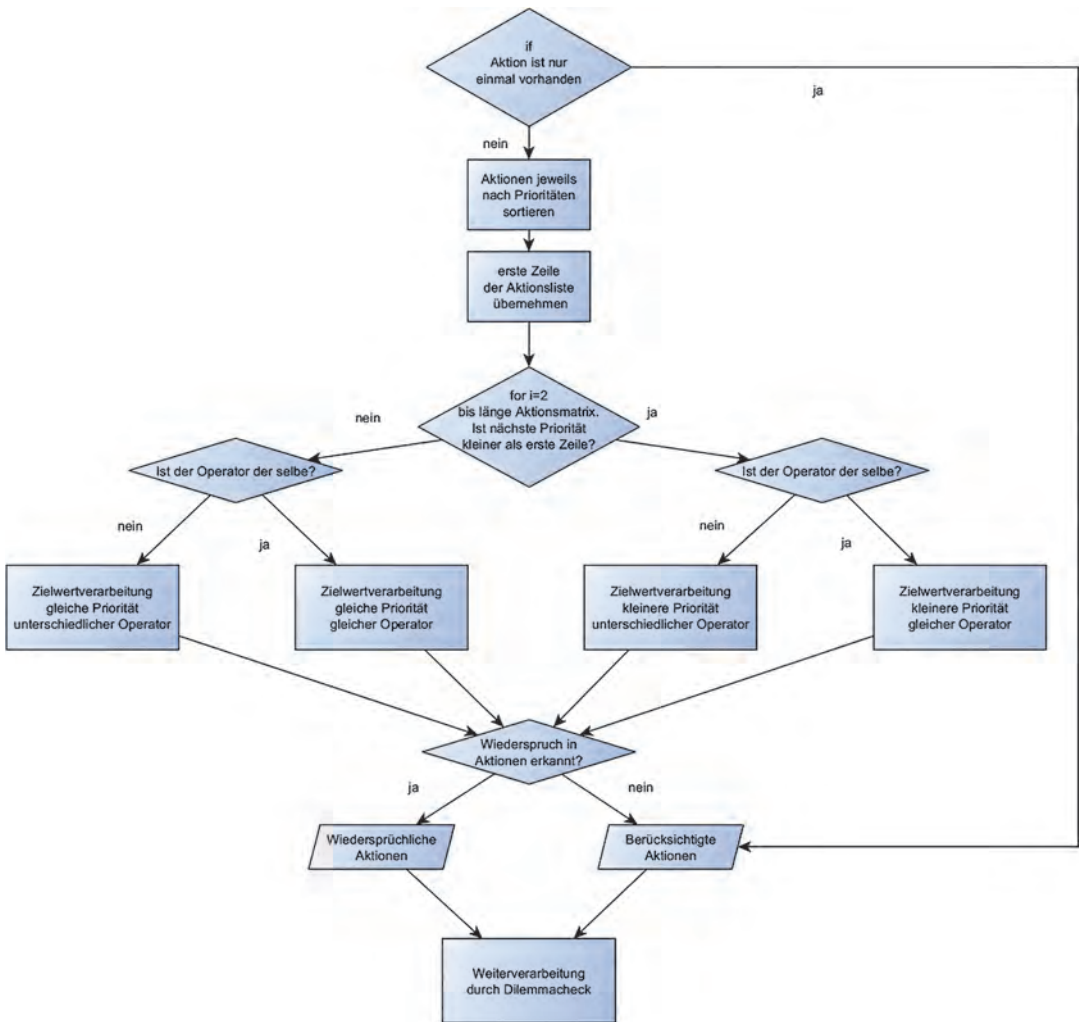


Bild 6. Programmablauf Prioritätenbereinigung

ten hinterlegt sind. Lediglich für das Auslesen zusätzlicher Informationen, wie dem Speicherort für Sensorwerte in der Datenbank oder der Ansteuerung der verschiedenen Aktuatoren, müssen zusätzlich Daten in Form von beispielsweise Pfadangaben in der Ontologie hinterlegt werden. Diese Aufgaben lassen sich jedoch leicht automatisch von Softwaresystemen in Form eines Installationskriptes umsetzen.

Bei der Wahl eines Reasoners ist auf dessen Kompatibilität zur erstellten Ontologie zu achten und zudem muss die Möglichkeit zur Verarbeitung von SWRL-Regeln enthalten sein. Wenn ein ausgewählter Reasoner die hier beschriebenen Aufgaben, vor allem die Verarbeitung von SWRL-Regeln, unterstützt, ist der Funktionsumfang im Sinne der vorgestellten Methodik ausreichend. Für das Prüfen der Methodik spielen weder Performance noch andere Aspekte eine wesentli-

che Rolle. In einem produktiven System müssen diese Aspekte dennoch betrachtet werden. Dabei sollte auf die Auswahl eines geeigneten Reasoners besonderer Wert gelegt werden.

Bild 6 zeigt vollständig die beschriebene Interaktion und Prioritätenarrays. Die Algorithmik zur Anpassung der Zeitskala wurde nur soweit bearbeitet, wie dies für die hier erforderlichen Daten im Rahmen der folgenden Fallstudien nötig war. Ein automatisches Anpassen ist für einen vollständigen Algorithmus unerlässlich.

Die Berücksichtigung von verschiedenen Zeitskalen bei Ein- und Ausgangsdatenströmen von Modulen sowie deren automatisiertes Angleichen durch Interpolationsinformationen wurde in Form des Datensammlermoduls umgesetzt. Die dafür notwendigen mathematischen Operationen stellen Grundfunktionen der Programmierplattform MATLAB dar. Die benötigten

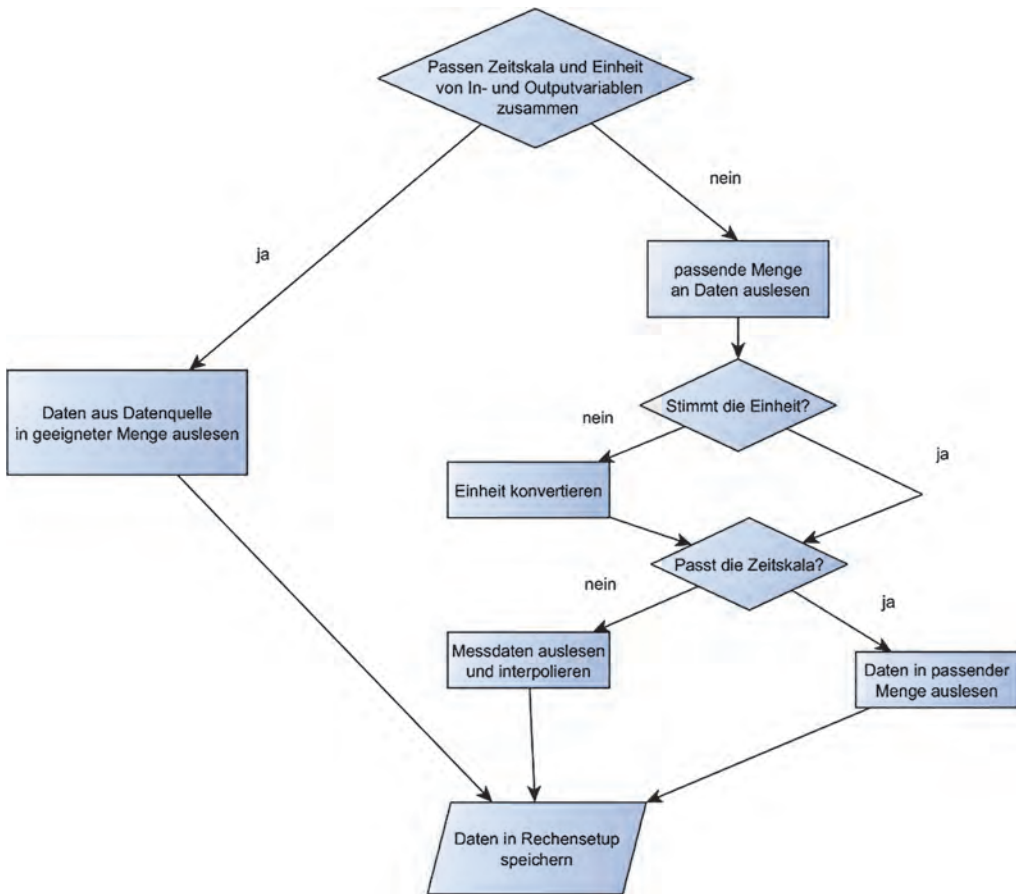


Bild 7. Programmablauf Datensammlermodul

Informationen zu Randbedingungen der Implementierung konnten aus der Ontologie mithilfe der Reasoner ausgelesen werden. Bild 7 zeigt den grundsätzlichen schematischen Ablauf des Datensammlermoduls. Die Prioritätenverarbeitung läuft wie folgt ab: Zuerst wird eine Zusammenstellung aller ausgegebenen Wirkgrößen der einzelnen Module erstellt. Alle Wirkgrößenoutputs werden nun entsprechend ihren Prioritäten und Zielwerten verarbeitet. Es werden alle berücksichtigten und sich widersprechenden Wirkgrößen bestimmt und diese Informationen im Rechensetup hinterlegt.

Ein wichtiger Aspekt des Algorithmus ist die Erkennung von Dilemma behafteten Situationen. Diese erzeugen bei der Steueranweisung einen Schaden. Die Umsetzung der beschriebenen Vorgehensweise zur Überprüfung auf solche eventuell auftretenden Dilemmas wurde in MATLAB umgesetzt. Die beispielhafte Umsetzung wird in der folgenden Fallstudie 2 demonstriert. Die Implementierung als Teil des Gesamtalgorithmus stellt eine Erweiterung des vorhergehend vorgestellten Systems zur Prioritätenbereinigung dar. Da-

durch werden Moduloutputs entfernt, bei welchen keine Lösung gefunden wurde. Weiterhin wird überprüft, ob für die Lösung der Gesamtproblematik noch ausreichend Lösungsvorschläge vorhanden sind.

Vorhandene Geräte wurden händisch direkt in der Ontologie als sogenannte „Individuals“ implementiert. Der Speicherort für diese Daten in der zentralen Datenbank erfolgte über eine gleiche Namensgebung der Geräte und Readings. Somit ist der Algorithmus mithilfe des Datensammlermoduls in der Lage, zugehörige Daten auszulesen und aufzubereiten. Als Geräte wurden nur die für die Fallstudien in Bezug auf die Ontologie relevanten Sensoren und Geräte eingefügt, um Übersichtlichkeit und Nachvollziehbarkeit zu gewährleisten. Um die Aktivierung der Geräte automatisch zu realisieren, wurden deren Befehlsstruktur durch eine Dateneigenschaft, dem „ActivationSyntax“ in der Ontologie repräsentiert. Diese enthält alle notwendigen Informationen, für eine automatische Steuerung der Geräte, die mithilfe des Automationservers initiiert werden.

5 Fallstudien

Der Nachweis der Funktionalität der neu entwickelten Methode wurde mithilfe von Fallstudien durchgeführt. Dabei konnte die Funktionsfähigkeit der Algorithmen für die jeweiligen Teilbereiche gezeigt werden. Die so entstandenen drei Fallstudien weisen die grundsätzliche Funktionsfähigkeit der automatischen Zuweisung von Datenströmen sowie den reibungsfreien Ablauf von einem Trigger-Event bis zum Auslösen einer Aktion nach [5]. Außerdem werden durch das Hinzufügen einer weiteren bauphysikalischen Funktion weitere Teilaspekte geprüft. Diese sind sowohl die Prioritätenberücksichtigung bei der Generierung von Wirkgrößen als auch die Überprüfung auf Dilemmas. Zuletzt werden noch die Möglichkeiten der Individualisierung durch Module für maschinelles Lernen und Vorhersagen demonstriert. Zu diesem Zweck wird das Duschverhalten eines Nutzers ausgewertet und damit eine Prognose für das zukünftige Duschverhalten erstellt.

5.1 Übersicht der Fallstudien

Um Tests verschiedener Funktionen durchzuführen und einen Überblick über die Komplexität von Hausautomationen zu erlangen, wurde eine Zweizimmerwohnung automatisiert. Die Testwohnung steht in Olching und ist Teil eines Mehrparteienhauses mit 53 Wohneinheiten. Ziel war es, sicherzustellen, dass die in diesem Beitrag vorgestellte Methode für möglichst viele Bereiche der Bauphysik anwendbar ist. Zur Validierung der Funktionalität wurden beispielhafte Anwendungen ausgewählt, mit welchen die einzelnen Teilaspekte der Methodik und deren Funktionalität demonstriert werden konnten. Die in weiteren Fallstudien genannten beispielhaften Anwendungen sind so gewählt, dass jeweils ein besonderes Merkmal der Methodik demonstriert werden kann. Die einzelnen Fallstudien weisen folgende Aspekte konkret nach:

- Fallstudie 1 zeigt die grundsätzliche Funktionalität des ontologiebasierten Algorithmus sowie, dass automatisches Zuweisen von zugehörigen Datenströmen möglich ist.
- Fallstudie 2 demonstriert Möglichkeiten, bei welchen auch gegensätzliche Handlungsanweisungen aus verschiedenen Bereichen mittels Prioritätensystem selbstständig zu lösen sind. Durch die Einführung einer stark kontextsensitiven Größe in die Berechnung wird zusätzlich gezeigt, dass die Methodik kontextsensitiv und dynamisch funktioniert. Im direkten Vergleich zwischen Fallstudie 1 und 2 kann zusätzlich nachgewiesen werden, dass Modulinteraktionen automatisch erkannt werden und daher ein sich selbst regulierendes Berechnungssystem geschaffen wurde, wodurch der Nachweis für die Modularität des Systems erbracht ist.
- Fallstudie 3 weist die Möglichkeit nach, nutzerindividuelle Parameter zu ermitteln und somit eine In-

dividualisierung in der Betrachtung und Steuerung des Wohnkontextes zu erstellen. Zusätzlich werden die Implementierung und Verarbeitung eines Moduls mit einem Machine-Learning-Algorithmus demonstriert. Durch die im Falle eines Dilemmas aufgezeigte Ausgabe einer Warnung an den Nutzer wird zusätzlich die Möglichkeit einer Interaktivität nachgewiesen. Zusammengefasst kann so mithilfe der drei Fallstudien eine Umsetzung der geforderten Kriterien Dynamik, Kontextsensitivität, Modularität, Interaktivität und Nutzerindividualität erbracht werden.

5.2 In den Fallstudien verwendete Testwohnung

Die Testwohnung wurde mit handelsüblicher bzw. selbst entwickelter Automationshardware ausgestattet. Ziel war es, eine Testumgebung zu schaffen, die einer realen Anwendung eines Smart Homes so nahe wie möglich kommt. Damit sollten nicht nur theoretische Aspekte der Methode, sondern auch eine reale Umsetzbarkeit gezeigt werden. Probleme wie die mangelnde Interoperabilität von Smart Home-Systemen konnten durch die Verwendung von stark unterschiedlichen Systemen mit in die Fallstudien einbezogen werden und die Eignung der Methode auch für diesen Anwendungsfall nachgewiesen werden.

Bei der Testwohnung handelt es sich um eine Zweizimmerwohnung mit Baujahr 2013. Sie hat einen für die Erstellungszeit typischen Grundriss mit einer Wohnküche. Jeder Raum, auch das Bad, hat ein außenliegendes Fenster. Zusätzlich ist sowohl im Bad als auch in der Küche eine Abluftanlage vorhanden. Der Grundriss in Bild 8 zeigt die räumliche Anordnung.

In der Testwohnung wurden für die Durchführung der Fallstudien mehrere Systeme zur Erfassung von Messdaten verbaut und unter anderem kommerzielle Sensoren, die im Smart Home-Sektor angeboten werden, eingebunden. Die hierbei über Funk stattfindende Übertragung ermöglichte eine flächendeckende Installation der Sensorik. Die üblichen im Smart Home-Bereich angebotenen Sensoren erfassen aber meist nur Temperaturen, relative Feuchten und in begrenztem Umfang lichttechnische Werte, wie zum Beispiel die Beleuchtungsstärke. Zusätzlich wurden Öffnungssensoren an Fenstern, Türen und Schubladen angebracht und flächendeckend Bewegungsmelder in der Wohnung verbaut. Bei der Wahl der Aktuatoren wurde darauf geachtet, ein System mit bidirektionaler Übertragung zu verwenden, womit die Übertragung von Statusmeldungen der Geräte möglich ist. In vereinzelt Fällen wurden an elektrischen Verbrauchern Messsteckdosen installiert, womit die elektrischen Größen gemessen werden können. Die Sensoren in Smart Home-Geräten sind bezüglich der Genauigkeit jedoch generell nicht vergleichbar mit üblicher Messsensorik aus der Bauphysik. Daher wurde ein professionelles Messsystem installiert. Dies geschah zum einen, um im Bedarfsfall für Fallstudien Messwerte mit



Bild 8. Grundriss und Raumaufteilung der Testwohnung

höherer Genauigkeit verfügbar zu machen, zum anderen aber auch um fehlende Messgrößen, für die derzeit im Smart Home-Bereich kein Angebot an Sensoren existiert, erfassen zu können. Hierunter zählen zum Beispiel Wärmeflusscheiben, Globaltemperatur, Oberflächen-Temperatur Sensoren sowie Wetterdaten. Der Anwesenheitsstatus des Nutzers für die zweite Fallstudie wurde über eine Anwesenheitskontrolle mithilfe des Smartphones des Nutzers erstellt. Es hat sich gezeigt, dass bei richtiger Konfiguration einer solchen Schaltung die Anzahl der Fehlauflösungen für „An- und Abwesenheit“ nahezu auf null verringert werden konnte. Eine Grundvoraussetzung dafür war, dass der Nutzer ein Smartphone immer beim Verlassen der Wohnung bei sich tragen muss.

Da sich die verwendete Testwohnung im ersten Stock eines Mehrfamilienhauses befindet, ist die Radonkonzentration in der Wohnung, im Vergleich zu einem Kellerraum, sehr gering. Sie war für die Tests in den Fallstudien mit durchschnittlich 56 Bq/m^3 nicht ausreichend; somit wurde die Radonbelastung durch ein einfaches Bilanzmodell ermittelt. Entsprechend des in der Wohnung vorliegenden Luftwechsels wurde ein realitätsnahes Steigen und Sinken der Konzentration simuliert. Um natürliche Schwankungen abzubilden, wurde zusätzlich auf die erzeugten Radonwerte jeweils ein zufälliger Wert aufgeschlagen oder abgezogen. So konnte eine für die Fallstudien ausreichend realitätsnahe Abbildung des Raumverhaltens in Bezug auf die Radonkonzentration umgesetzt werden. Das beschriebene Bilanzmodell nutzt hierfür eine eigene Berechnungsinstanz und aktualisiert in einem Ein-Minuten-Intervall den Messwert der Radonkonzentration. Die Verarbeitung des Bilanzmodells ist daher im Vergleich zu einem realen Sensor ausreichend abgebildet [5].

Im Rahmen der Automation der Testwohnung wurden möglichst viele verschiedene Systeme sowie Protokolltypen verwendet, um einen guten Überblick über die jeweiligen Funktionsweisen und deren Übertragungseigenheiten zu erlangen. So konnten für die Steuerung der Abluftanlagen Aktuatoren von HomeMatic genutzt werden, die das BidCoS Protokoll einsetzen. Zur Automation der Lüftung kommen Stufenschalter zum Einsatz, mit denen sich die beiden vorhandenen Abluftventilatoren in drei Stufen funkgesteuert ansteuern lassen. Bezüglich der Steuerung der Fußbodenheizung gibt es derzeit kein geeignetes kommerzielles und frei an einen Automationsserver anbindbares System. Um trotzdem die Heizfunktion abbilden zu können, wurde ein Aktuator an den vorhandenen Heizstab im Handtuchheizkörper des Bades angebracht.

Bei den Modulen, welche in den Fallstudien verwendet werden, kommt es selten zu Anforderungen, die das Ausschalten eines Gerätes notwendig machen. Die generische Beschreibung eines radonsicheren Wohnraums führt nicht dazu, dass eine Lüftungsanlage ausgeschaltet werden muss. Ein dauerhaft hoher Luftwechsel stellt im Gegenteil eine durchgehend niedrige Radonkonzentration sicher. Belange des Energiesparens werden bei isolierter Betrachtung der Radonsicherheit nicht berücksichtigt. Ebenso gibt es für die Sicherstellung eines schimmelfreien Wohnumfeldes nur selten die Situation, dass die Lüftung deaktiviert werden muss. Dies wäre nur dann der Fall, wenn die Außenluft zu feucht ist, um einen Trocknungsvorgang in der Wohnung zu bewirken. Das Abschalten dieser Geräte erfolgt daher normalerweise aus energetischen Gründen oder um den Verschleiß zu minimieren. Für die Fallstudien hat dies jedoch den Nachteil, dass bisher nur Module implementiert wurden, die die Gerä-

te an, aber nicht mehr zwingend ausschalten. Daher wurde eine zusätzliche Funktion implementiert, welche die Geräte, ähnlich einem Energiesparmodus, wieder deaktiviert. Dies geschieht immer dann, wenn diese von keiner Anforderung benötigt werden. Grundsätzlich kommt diese Vorgehensweise einer Art Energiesparmodus gleich.

Um alle Steuerungsaufgaben und vor allem die Anbindung der Interfaces für die vielfältige Hardware gewährleisten zu können, musste eine mit einem Automationsserver versehene Recheneinheit in der Wohnung platziert werden. Zur Steuerung der einzelnen Geräte sind, sofern die Geräte nicht netzwerkfähig sind, Interfaces notwendig, die zum Beispiel Funkstrecken auf ein USB-Signal oder ein Netzwerksignal umsetzen. Mit dem eben beschriebenen Framework wurden nun im Folgenden die drei Fallstudien durchgeführt, welche zur Evaluation der vorgestellten Methodik erforderlich sind.

5.3 Fallstudie 1: Berechnung der Schimmelpilzbildungsgefahr

Die grundlegende Funktionalität der Methodik wird in der Fallstudie 1 gezeigt, in der die Thematik der Schimmelpilzbildungsgefahr im Wohnraum untersucht wird. Zu diesem Zweck wurde das Badezimmer als Betrachtungsfeld ausgewählt. Die hier auftretenden hohen Luftfeuchten stellen meist das Maximum der Feuchteproduktion im Wohnkontext dar und sind daher für diese Untersuchung geeignet. Im Rahmen dieser Fallstudie wurden mehrere Duschereignisse mit deren Einfluss auf die Schimmelpilzbildungsgefahr untersucht. Diese Fallstudie zeigt die Modulimplementierung am Beispiel der Schimmelpilzberechnung zum Nachweis der Funktionalität der automatischen Zuordnung von Sensorwerten zu Modulen. Weiterhin wird nachgewiesen, dass eine automatische Generierung der interaktionsbedingten Verbindungen zwischen Modulen des DGZ und des DNZ und eine automatische Verknüpfung von Wirkmodulen zu Geräten des Smart Homes erfolgt. Zu diesem Zweck wurde im ersten Schritt auf das Isoplethenmodell [33] zur Schimmelpilzbildungsberechnung zurückgegriffen.

Bei der konkreten Umsetzung wurden auf Seiten des DNZ folgendes Modul implementiert:

- Anforderung an das Wachstum von Schimmel
- Auf Seiten des DGZ wurden folgende Module und Daten integriert:
- Funktionsmodul Schimmelberechnung (im weiteren Verlauf Schimmelmodul genannt),
 - Hilfsmodul Oberflächentemperatur aus Raumtemperatur, U-Wert und Außentemperatur,
 - Hilfsmodul Oberflächenfeuchte aus Raumtemperatur, Raumluftfeuchte und Oberflächenfeuchte,
 - U-Wert der Wandbauteile aus Ersatzdaten.

Als Geräte wurden folgende instanziiert:

- Sensor zur Bestimmung der Raumlufttemperatur,
- Sensor zur Bestimmung der Raumluftfeuchte,
- Sensor zur Bestimmung der Außenlufttemperatur,
- Sensor zur Bestimmung der Außenluftfeuchte,
- Aktuator zur Erhöhung des Luftwechsels.

Die Instanziierung dieser Module ist in Bild 9 abgebildet. Es zeigt Hilfs- und Funktionsmodule (in Blau dargestellt) sowie deren Inputvariablen (in Grün dargestellt) und deren Outputvariablen (in Orange dargestellt). Die Datenströme wurden thematisch so geordnet, dass ersichtlich wird, welche eine Interaktion zu anderen Modulen erzeugen und welche Verbindungen zu Sensorik oder anderen Datenquellen erfordern.

Die Definition des digitalen Zwillinges des Nutzers wird möglichst einfach gehalten: Ein Auskeimen des Schimmelpilzes muss verhindert werden, daher enthält das Modul seitens des DNZ nur die Information: *Schimmelpilzkeimung* \neq 1 Ontologie.

Auf der Seite des DGZ wird hier das Isoplethenmodell implementiert, mit dem es möglich ist, auf Basis empirischer Daten die Keimung der Sporen mithilfe von Tabellen und Grafiken vorherzusagen (siehe Tabelle 2). So wird mithilfe der Raumluftfeuchte, der Raumlufttemperatur und der Außenlufttemperatur durch ein Hilfsmodul die Oberflächentemperatur der Außenwand ermittelt. Anschließend wird diese auf die Oberflächenfeuchte umgerechnet und somit der erforderliche Eingangswert für die Schimmelbewertung generiert. Das Funktionsmodul (Schimmelmodul) berechnet, ob bei aktuellen Randbedingungen im stationären Fall im weiteren Verlauf eine Keimung erfolgt und wenn ja, wie weit diese in der Zukunft liegt. Basierend auf dieser Abschätzung erzeugt das Modul eine Anforderung in Form einer Luftwechselrate. Um deren Priorisierung zu ermitteln, wurde die Zeit bis zur voraussichtlichen Auskeimung als Bewertungsmaßstab herangezogen. Tabelle 2 zeigt die für den Testzweck definierten Randbedingungen bezüglich der Prioritätenbestimmung des Moduls in Abhängigkeit von der Zeit bis zur Auskeimung, der aktuellen hygrothermischen Randbedingungen und dem grundsätzlichen Keimungsgrad. Die in Tabelle 3 abgebildeten Grenzen bilden dabei jeweils mit den in der Tabelle darüberliegenden höheren Anforderungen ein Intervall.

Nach dem Reasoning der Stufe I wurden die Verknüpfungen zwischen Sensoren und Moduleingängen gefunden. Dabei konnten alle vorhandenen Sensorwerte den richtigen Inputvariablen zugeordnet werden. Das Ergebnis ist in Bild 10 dargestellt. Diese Zuordnung erfolgte, da sowohl Inputvariablen als auch Outputvariablen dieselben Eigenschaften haben, welche zur Verdeutlichung mit abgebildet wurden. Durch die Definition des Sensorwertes als Innensensor (Located: Inside), der Zuordnung zum Luftraum des Bades (Object Affiliation: Air_Space_Bath), der Bestimmung des Mediums (Medium: Air), der beschreibenden Größe als Temperatur (Quantity: Temperature) und der Lokali-