

Mensch-Technik-Interaktion und deren Auswirkung auf den Heizenergieverbrauch

Eine sozio-technische Analyse des Zusammenspiels
von Komfortpraktiken und Gebäudetechnologien
in Mehrfamilienhäusern

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades der Sozialwissenschaftlichen Fakultät
der Ludwig-Maximilians-Universität München

vorgelegt von
Simon Jonathan Möller

2025

Erstgutachter: Prof. Dr. Bernhard Gill (Ludwig-Maximilians-Universität München)

Zweitgutachter: Prof. Dr. Werner Lang (Technische Universität München)

Tag der mündlichen Disputation: 14.05.2025

Danksagung

Eine Doktorarbeit schreibt man nie allein und ohne die Unterstützung zahlreicher Personen wäre diese Arbeit nie entstanden. Offenkundig ist dies bei einer kumulativen Dissertation, weshalb ich zuvorderst meinen Mitautorinnen und Mitautoren Amelie Bauer, Bernhard Gill, Hannes Harter, Theo Hickfang, Sven Leonhardt, Michael Schneider, Franz Schröder und Ines Weber danken möchte. Zusammen mit Amelie Bauer und Michael Schneider möchte ich auch unserer (ehemaligen) Bürogemeinschaft mit Sophie Duschinger und Julia Mittermüller herzlich für die gemeinsame Zeit in der Arbeitsgruppe *Lokale Passung* danken. Ohne die gegenseitige Unterstützung in unseren zahlreichen Projekten wäre es vermutlich schwerer gefallen, die Dissertation mit Zuversicht und bei überwiegend guter Laune voranzutreiben. Die gemeinsamen Erlebnisse und die Zusammenarbeit haben meine Promotionsphase zu einer besonderen Erfahrung werden lassen, die weit über eine inhaltliche Spezialisierung hinausreicht.

Bedanken möchte ich mich zudem herzlich bei meinen beiden Betreuern, Professor Bernhard Gill und Professor Werner Lang. Bernhard Gill ist wissenschaftlich, aber auch persönlich in vielerlei Hinsicht ein großes Vorbild und ich bin froh, dass ich so lange gemeinsam mit ihm arbeiten konnte. Nicht nur hat er mich darauf gebracht, mich aus sozialwissenschaftlicher Perspektive mit dem Zusammenspiel aus Menschen, Gebäuden und Energie zu beschäftigen, und mir so eine Möglichkeit eröffnet, mein Interesse an Technik und Umwelt in meine soziologische Arbeit einfließen zu lassen. Er hat auch früh mein Interesse, über den disziplinären Tellerrand hinauszuschauen sowie sich auf andere disziplinäre Logiken und Inhalte einzulassen, befördert und bestärkt. Für einen guten Umwelt- und Techniksoziologen scheint mir dies seither unumgänglich. Für die (Sozial-)Wissenschaften eher ungewöhnlich erscheint mir auch das enge Betreuungsverhältnis mit nahezu wöchentlichen Treffen und inhaltlich tiefgehendem Austausch. Ein besonderes Anliegen ist es mir an dieser Stelle zudem, zu betonen, dass es auch die von Bernhard Gill gebotenen strukturellen Rahmenbedingungen waren, die mich nach meinem Ausflug in die freie Wirtschaft zurück an die Universität geführt und so diese Dissertation ermöglicht haben. Beeindruckt hat mich hier insbesondere die Selbstverständlichkeit, mit der Bernhard Gill seinen wissenschaftlichen Mitarbeitern in Vollzeitstellen – ob in Projekten oder für die Promotion – stets sowohl ein volles Gehalt als auch ausreichend Zeit für ihre eigene Forschung ermöglichte.

Mein Zweitbetreuer Professor Werner Lang hat mich von Anfang an herzlich in seine Gruppe von Doktorandinnen und Doktoranden aufgenommen und ich habe vom Austausch an seinem

Lehrstuhl, insbesondere im Rahmen der halbjährlich stattfindenden Doktorandentage, sehr profitiert. Als „Exot“ zwischen Bauingenieurinnen, Modellierern und Architektinnen auf solch positive Resonanz zu stoßen, hat mich immer wieder in meinem unkonventionellen interdisziplinären Weg bestärkt.

Ferner sei Frau Professor Henrike Rau für ihre Rolle als Drittprüferin gedankt. Hier ist die enge thematische Nähe in unseren Forschungsansätzen hervorzuheben und ich kann mir an dieser Stelle lediglich wünschen, dass ich schon früher auf sie und ihre Arbeiten aufmerksam geworden wäre.

Mein Dank gebührt darüber hinaus meinen neuen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl für Wissenschafts- und Techniksoziologie der *TU München* sowie der Lehrstuhlinhaberin Professor Silke Beck. Hier erfuhr ich in der wichtigen Abschlussphase der Dissertation, die doch länger währte als gedacht, stets Verständnis und inhaltliche Unterstützung.

Danken möchte ich auch den vielen Weggefährten und Kollaborationspartnern, mit denen ich in unterschiedlichen Projekten zusammengearbeitet habe und die damit zum Fortkommen dieser Arbeit beigetragen haben. Ebenso danke ich dem *Bayerischen Forschungsinstitut für digitale Transformation (bidt)* für die Förderung als Stipendiat und dem *Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit* sowie dem *Bundesministerium für Wirtschaft und Energie* für die finanzielle Förderung der Projekte *ZED*, *EffKom* und *InWaMod*.

Freunden und meiner Familie danke ich für ihre anhaltende moralische Unterstützung. Meine Eltern haben mein Promotionsprojekt nie infrage gestellt, sondern stets mit Interesse und Zustimmung verfolgt. Namentlich erwähnt sei außerdem meine gute Freundin und „Leidensgenossin“ Anna Huber. Wir haben diese Reise fast gleichzeitig begonnen und beendet, und unsere gemeinsame Zeit in den Bergen hat – nicht zuletzt „um den Kopf freizubekommen“ – sicherlich ihren Teil zum Gelingen dieses Projekts beigetragen.

Zu besonders großem Dank verpflichtet bin ich zuletzt meiner Ehefrau Susanne Fejér. Ihre kontinuierliche emotionale, aber vor allem auch inhaltliche Unterstützung hat mir gerade bei meinem letzten, für mich persönlich besonders wichtigen Paper sowie bei der Fertigstellung des Rahmenkapitels sehr viel Frust erspart. Ihr Umgang mit Texten ruft in mir nach wie vor Staunen hervor und ich kann mir nur wünschen, dass sich eines Tages und mit ausreichend Routine bei mir nur annähernd eine vergleichbare Leichtigkeit im Umgang mit dem geschriebenen Wort einstellt.

München, im November 2025

Simon Möller

Als kumulative Dissertation besteht diese Arbeit aus einer Reihe von wissenschaftlichen Aufsätzen. Den Kern der Arbeit bilden die drei folgenden Fallstudien, die in den drei Fachzeitschriften *Energy & Buildings*, *Energy Policy* und *Energy Research & Social Science* veröffentlicht wurden:

- Moeller, Simon; Weber, Ines; Schröder, Franz; Bauer, Amelie; Harter, Hannes (2020): Apartment related energy performance gap – How to address internal heat transfers in multi-apartment buildings. In: *Energy and Buildings* 215, Artikel 109887. DOI: 10.1016/j.enbuild.2020.109887.
- Moeller, Simon; Bauer, Amelie (2022): Energy (in)efficient comfort practices: How building retrofits influence energy behaviours in multi-apartment buildings. In: *Energy Policy* 168, S. 113123. DOI: 10.1016/j.enpol.2022.113123.
- Moeller, Simon (2024): Is it a match? Smart home energy management technologies and user comfort practices in German multi-apartment buildings. In: *Energy Research & Social Science* 118, S. 103794. DOI: 10.1016/j.erss.2024.103794.

Erweitert werden diese Artikel von fünf weiteren Publikationen, die im Zeitraum der Dissertation entstanden sind und einen direkten Bezug zum Thema dieser Dissertation haben. Für fremdsprachige Artikel wurden zur grammatikalischen Überarbeitung Werkzeuge generativer künstlicher Intelligenz (Grammarly, DeepL und ChatGPT 4o) zu Rate gezogen. Bei Personen, Gruppen- und Berufsbezeichnungen wird in der Regel das generische Maskulinum verwendet. Die Formulierungen gelten grundsätzlich für alle Geschlechter.

Inhalt

1.	Einleitung	1
2.	Theorie	6
2.1.	Technik versus Verhalten?	6
2.1.1.	Technische Innovation im Fokus	7
2.1.2.	Individuelles Verhalten im Fokus	7
2.1.3.	Struktur-Akteur-Dualismus	8
2.1.4.	Überwindung des Struktur-Akteur-Dualismus	9
2.2.	Soziale Praxistheorie zur Überwindung des Technik-Verhalten-Dualismus	11
2.2.1.	Praxistheorie in der Energieforschung	12
2.2.2.	Konzeptualisierung von Praktiken in empirischen Arbeiten	13
2.2.3.	Integration verschiedener Forschungsperspektiven	15
2.3.	Theorien des „Thermal Comforts“	16
2.3.1.	Heat-Balance-Ansatz	16
2.3.2.	Adaptive-Thermal-Comfort-Theorie	17
2.3.3.	Relevanz für die vorliegende Untersuchung	18
2.4.	Gebäudephysik und technische Effizienzstrategien	19
2.4.1.	Wärmeverluste im Gebäude	19
2.4.2.	Passive und aktive Designstrategien	21
2.4.3.	Gebäudetechnologien und Mensch-Technik-Interaktion	22
2.5.	Mensch-Technik-Interaktion aus sozialwissenschaftlicher Perspektive	23
2.5.1.	Der Aufforderungscharakter gebauter Umwelt	24
2.5.2.	Appropriation und Domestizierung von Technologien	26
2.6.	Mentale Modelle	28
2.6.1.	Mentale und konzeptionelle Modelle	29
2.6.2.	Die Ausbildung mentaler Modelle im Gebäudekontext	31
3.	Forschungsstand zur Mensch-Gebäude-Interaktion	32
3.1.	Energy-Performance-Gap und Bewohnerverhalten	33
3.1.1.	Energy-Performance-Gap und Prebound-Effekt	33

3.1.2.	Bewohnerverhalten als Ursache von Energy-Performance-Gaps.....	34
3.2.	Gebäudetechnologien und Raumtemperatur	36
3.2.1.	Ko-Produktion technischer Effizienz und kultureller Komfortpraktiken	36
3.2.2.	Homogene Raumtemperaturen als Folge passiver und aktiver Designansätze ..	38
3.2.3.	Hohe Raumtemperaturen als Nebenfolge moderner Gebäudetechnologien.....	40
3.2.4.	Zwischenfazit.....	41
3.3.	Komfortpraktiken und variierende Raumtemperaturen	42
3.3.1.	Unterschiede zwischen Wohn- und Schlafräumen	43
3.3.2.	Unterschiede im Tagesverlauf	44
3.4.	Erklärungen für Unterschiede des Energieverbrauchs in Gebäuden.....	45
3.4.1.	Aneignung und Manipulation von Gebäudetechnologien	46
3.4.2.	Lüftungsverhalten	49
3.4.3.	Sozioökonomische Ursachen variierender Komfortpraktiken.....	51
3.5.	Fazit zum Forschungsstand	54
4.	Methoden und Daten	56
4.1.	Sozio-technisches Fallstudiendesign.....	57
4.2.	Datengrundlage und Auswertungsmethoden.....	60
5.	Zusammenfassung der Fallstudien	63
5.1.	<i>Apartment related Energy-Performance-Gap</i> (Moeller et al. 2020).....	63
5.2.	<i>Energy (in)efficient comfort practices</i> (Moeller & Bauer 2022).....	65
5.3.	<i>Is it a match?</i> (Moeller 2024).....	69
6.	Fazit und Forschungsdesiderate	72
6.1.	Relevanz der Fallstudien	75
6.2.	Limitationen	79
6.2.1.	Heterogenität auf Haushaltsebene	80
6.2.2.	Erfassung des Lüftungsverhaltens	80
6.2.3.	Forschungsdesign	81
6.2.4.	Gebäudetyp	82
6.2.5.	Statistische Generalisierung.....	82
6.3.	Forschungsdesiderate	83

6.3.1.	Untersuchung weiterer sozio-technischer Konfigurationen	83
6.3.2.	Ableitung von Nutzertypen.....	85
6.3.3.	Langzeitstudien.....	85
6.3.4.	Integration sozioökonomischer Effekte	86
6.3.5.	Untersuchung des Lüftungsverhaltens.....	86
6.3.6.	Gesellschaftspolitischer Rahmen.....	87
6.4.	Schlussbemerkung.....	89
Anhang A	Fallstudien.....	91
A.1	<i>Apartment related Energy-Performance-Gap</i> (Moeller et al. 2020).....	91
A.2	<i>Energy (in)efficient comfort practices</i> (Moeller & Bauer 2022).....	104
A.3	<i>Is it a match?</i> (Moeller 2024).....	122
Anhang B	Weitere Veröffentlichungen	142
B.1	<i>GHG Emissions and the Rural-Urban Divide</i> (Gill & Moeller 2018).....	142
B.2	<i>Enablers and Barriers to the Sustainable Transformation of Urban Districts</i> (Moeller et al. 2023).....	142
B.3	<i>Nutzerorientierte Technologieentwicklung am Beispiel eines „intelligenten“ Heizungssystems</i> (Hickfang et al. 2020)	144
B.4	<i>When energy efficiency goes out the window</i> (Bauer et al. 2021).....	144
B.5	<i>Energiesparend Heizen durch intelligente Steuerungstechnik</i> (Moeller 2022).....	145
	Literaturverzeichnis.....	147

1. Einleitung

Das Versprechen des smarten Heizsystems klingt verlockend: Es ist einfach bedienbar, spart automatisch Energie und steigert den Komfort. Hierfür wird die Temperatur nicht mehr am Heizkörper geregelt, sondern zentral über ein Tablet. Dort wählt man den Raum und dann die gewünschte Stufe. Die Regelung ist übersichtlich und einfach zu bedienen, denn sie vermeidet komplizierte Menüführungen und ist dem althergebrachten Heizkörperthermostat nachempfunden: Stufen 1 bis 5 und Sternchen, verstellbar in halben Schritten. Energie spart das System im Hintergrund durch die automatisierte und intelligente Anpassung der Heizkurve.

Bei der Einführung kommt es allerdings bei vielen Bewohnern zu Verwirrung. Während viele Menschen ihre Heizung früher nie auf die Stufe 5 gestellt hätten, weil das viel zu teuer geworden wäre, reicht Stufe 3 oder 4 jetzt häufiger nicht mehr aus. Denn auch Stufe 5 entspricht nur noch 23 °C. Bis zu einem Update, das auch die Temperaturen anzeigt, erreichten den Mieterservice der Wohnungsgesellschaft deshalb regelmäßig Beschwerden, die Heizung werde nicht warm genug. Was die Bedienung außerdem erschwert: Es dauert jetzt deutlich länger, bis der Raum aufheizt. Als „Niedertemperaturtechnik“ beschreibt das der Hersteller. Und genau dadurch sollen unnötige Energieverluste vermieden und Energie eingespart werden. Das kurzfristige Hoch- und Herunterregeln, wie es viele Bewohner gewohnt waren, funktioniert daher nicht mehr. Der Hersteller empfiehlt stattdessen, die einmal gefundene Präferenzeinstellung möglichst wenig zu ändern. Das System mache den Rest und die Bewohner sparen gerade dadurch Energie und Kosten. Ob es funktioniert wie versprochen? Das wird erst die nächste Jahresabrechnung zeigen.

Ein wahrscheinlich typisches Szenario in einem großstädtischen Wohnbauprojekt, in dem eine solch innovative und smarte Heizungstechnologie zum ersten Mal in größerem Stil eingesetzt wird. Das Ziel: Heizenergie einzusparen, bei gleichem oder sogar verbessertem Komfort. Und gleichzeitig neue Wege aufzuzeigen, um zu mehr Klimaschutz im Gebäudesektor beizutragen. Doch wie bei vielen Technologien zur Effizienzsteigerung steckt auch hier der Teufel im Detail. Wie viel Einsparung generiert die Technik? Was müssen die Bewohner dafür machen? Was ist, wenn sie sich anders verhalten als von den Entwicklern erwartet? Und wie wirkt sich das Zusammenspiel von Technik und Bewohnern auf die Einspareffekte aus?

Im Alltagsverständnis, aber auch in der Wissenschaft, werden technische Effizienzmaßnahmen und Verhalten meist getrennt voneinander betrachtet und unerwünschte Nebeneffekte einseitig dem Verhalten oder aber der Technik zugeschrieben (Grandclément et al. 2015). Angesichts der

im Vergleich zu den notwendigen Klimazielen zu geringen Energieeinsparungen im Gebäudesektor (Buildings Performance Institute Europe (BPIE) 2023) und der unzureichenden Einsparungen aufgrund rein technischer (Zou et al. 2018) sowie rein verhaltensbasierter Einsparmaßnahmen (Abrahamse et al. 2005) widmet sich neuere Forschung verstärkt den Interaktionseffekten zwischen Menschen und der gebauten Umwelt (Galvin 2013a; Eon et al. 2017b; Day und O'Brien 2017; Wolff et al. 2017). Neben der Frage, auf welchen Vorannahmen über Verhaltensweisen technische Effizienzmaßnahmen beruhen, geht es dort auch darum, wie Technik und gebaute Umwelt bestimmte Verhaltensweisen nahelegen und befördern – und umgekehrt, wie Menschen sich ihre Umwelt aneignen und dabei neue Bedürfnisse erst entstehen. Wie bisherige Forschung zu dem Thema zeigt, können die daraus resultierenden Interaktionen zu unerwarteten und häufig ungewollten Nebeneffekten führen (Day und O'Brien 2017; Galvin 2013a). Im Gebäudebereich zeigen sich solche häufig in verringerten oder sogar ausbleibenden Energie spareffekten oder in Komfortproblemen (Hong et al. 2017). Die Folgen sind eine höhere Skepsis gegenüber entsprechenden Effizienzmaßnahmen bei Gebäudeeigentümern (Ahlrichs et al. 2020), eine fehlende Akzeptanz bei den Gebäudenutzern (Weber und Wolff 2018) sowie Sorgen vor Kostensteigerungen bei beiden. Auf Gebäude- oder Wohnungsebene zeigen sich die ausbleibenden Einspareffekte in der Differenz zwischen angestrebtem Einsparziel und tatsächlich erfolgter Einsparung, in der Forschung allgemein auch als „Energy-Performance-Gap“ (Galvin 2014) bezeichnet. Auf gesellschaftlicher Ebene wiederum können diese Probleme zu geringen Modernisierungsraten (Behr et al. 2023) und verfehlten Klimaschutzzielen (Hahn et al. 2020) beitragen.

Die folgende Arbeit beschäftigt sich mit diesem Problem unzureichender Einspareffekte, wie sie sich in der Energy-Performance-Gap zeigen, und analysiert mögliche Erklärungen, die sich aus der Interaktion von Menschen und verschiedenen Gebäudetechnologien ergeben. Im Fokus des Interesses stehen dabei die Wechselwirkungen zwischen den Komfortpraktiken der Bewohner und den materiellen Gegebenheiten ihres Wohnumfelds, wie den verbauten Gebäudetechnologien, sowie die Frage, wie sich diese Interaktionen auf den Heizenergieverbrauch für Raumwärme auswirken. Unter Komfortpraktiken wird dabei in Anlehnung an die Soziale Praxistheorie (Schatzki 1996; Reckwitz 2002b) ein Konglomerat verschiedener Elemente verstanden – vom Wissen und den erlernten Umgangsweisen der Bewohner über ihre Vorstellungen von Komfort und kulturellen Normen, durch die sie geprägt sind, bis hin zu institutionalisierten, formellen und informellen Regeln, denen sie folgen. Unter Gebäudetechnologien wiederum wird in einem weiten Sinn die gebaute Umwelt und damit das Gebäude selbst genauso wie die verbauten Heiztechnologien, Fenster oder IT-Infrastrukturen verstanden.

Für einen sozio-technischen Ansatz (Love und Cooper 2015), der die wechselseitigen Interaktionen bauphysikalischer, technischer sowie sozialer Aspekte berücksichtigt, braucht es eine theoretische Perspektive, die dieses soziotechnische Gefüge ganzheitlich in den Blick nimmt, ohne einem der Aspekte gegenüber anderen Priorität einzuräumen. Die Arbeit baut dazu auf der Praxistheorie als in der sozialwissenschaftlichen Energieforschung etabliertem theoretischen Rahmen auf (Galvin und Sunikka-Blank 2016b) und nutzt diese, um verschiedene Theorien und Konzepte in die Untersuchung zu integrieren: Von der Bauphysik über Thermal-Comfort-Theorien bis hin zum Konzept des mentalen Modells.

Um der übergeordneten Fragestellung nach den Auswirkungen der Mensch-Technik-Interaktionen auf den Energieverbrauch in Wohngebäuden nachzugehen, wurden – ausgehend von einem auf Mixed-Methods basierenden Fallstudiendesign (Yin 2018) – verschiedene Fallstudien zu Großwohnanlagen durchgeführt. Diese sind in drei Artikeln, die den Kern dieser Arbeit bilden, im Detail ausgeführt, wobei jeweils auf unterschiedliche Technologien und Interaktionseffekte fokussiert wird. Diese drei Fallstudien werden erweitert von weiteren Artikeln, die im Laufe der Promotionsphase entstanden sind und entweder den größeren Rahmen des Energieverbrauchs in Wohngebäuden beleuchten (Gill & Moeller 2018; Moeller et al. 2023) oder einzelne Aspekte der Mensch-Technik-Interaktion in Gebäuden vertiefen (Moeller 2022; Hickfang et al. 2018; Bauer et al. 2021).

In der Studie von Gill und Moeller (2018) zeigt sich die Bedeutung des privaten Heizenergieverbrauchs im Kontext des gesamten CO₂-Fußabdrucks, dessen regionale Unterschiede sowie die mit den Reduzierungsbemühungen verbundenen sozialpolitischen Implikationen. Im Artikel von Moeller et al. (2023) wiederum werden, ausgehend von sechs in den Jahren 2018–2023 geförderten Leuchtturmprojekten, die Schwierigkeiten analysiert, die mit der Reduzierung von Treibhausgasen auf Wohnquartierebene verbunden sind. Die restlichen drei Artikel hingegen fokussieren auf einzelne Aspekte der Mensch-Technik-Interaktion in Gebäuden. Sie stellen Vorstudien oder eine Vertiefung der drei zentralen Fallstudien dar. Hickfang et al. (2020) konzipieren auf Grundlage erster Interviews mit verschiedenen Stakeholdern der Gebäudesanierung Interaktionstypen von Bewohnern und Smart-Home-Technologien. Bauer et al. (2021) nehmen die Komfortpraktiken in gut gedämmten Mehrfamiliengebäuden in den Blick und unternehmen erste Versuche, die Effekte von wohnungsinternen Temperaturunterschieden auf den haushaltsspezifischen Heizenergieverbrauch abzuschätzen. In der Studie von Moeller (2022) schließlich werden erste Analysen zum Zusammenspiel von Komfortpraktiken und einer Gebäudeautomationstechnologie durchgeführt, die dann in der Fallstudie von Moeller (2024) vertieft werden. Einen Überblick der einzelnen Artikel bietet Tabelle 1.

Tabelle 1 - Überblick über die eigenen Veröffentlichungen der Dissertation

Nr.	Kapitel / Anhang	Titel	Zeitschrift	Impact-Faktor ¹	Kern der Dissertations-schrift	Eigenanteil	Autoren (Jahr)
1	A.1	Apartment related energy performance gap –How to address internal heat transfers in multi-apartment buildings	Energy & Buildings	5.879	Ja	90%	Moeller, Weber, Schröder, Bauer, Harter (2020)
2	A.2	Energy (in)efficient comfort practices: How building retrofits influence energy behaviours in multi-apartment buildings	Energy Policy	9.0	Ja	90%	Moeller & Bauer (2022)
3	A.3	Is it a match? Smart home energy management technologies and user comfort practices in German multi-apartment buildings	Energy Research & Social Science	6.9	Ja	100%	Moeller (2024)
4	B.1	GHG Emissions and the Rural-Urban Divide. A Carbon Footprint Analysis Based on the German Official Income and Expenditure Survey	Ecological Economics	4.281	Nein	50%	Gill, Moeller (2018)
5	B.2	Enablers and barriers to the sustainable transformation of urban districts. (Interim) results from six lighthouse projects	De Gruyter Sammelbandbeitrag		Nein	70%	Moeller, Schneider, Leonhardt (2023)
6	B.5	Nutzerorientierte Technologieentwicklung am Beispiel eines „intelligenten“ Heizungssystems	Springer Sammelbandbeitrag		Nein	25%	Hickfang, Moeller, Schneider, Gill (2018)
7	B.4	When energy efficiency goes out the window: How highly insulated buildings contribute to energy-intensive ventilation practices in Germany	Energy Research & Social Science	8.514	Nein	5%	Bauer, Moeller, Gill, Schröder (2021)
8	B.3	Energiesparend Heizen durch intelligente Steuerungstechnik. Die Bedeutung von Vertrauen, Verständlichkeit und Vermittlung in der Mensch-Technik-Interaktion	Springer Sammelbandbeitrag		Nein	100%	Moeller (2022)

¹5-Jahres-Impact-Faktoren aus den *Journal Citation Reports* der Zeitschrift im jeweiligen Veröffentlichungsjahr.

Eine Gemeinsamkeit der drei Fallstudien, die den Kern dieser Dissertation bilden, ist nicht nur der theoretische Rahmen und die übergeordnete Fragestellung nach der Mensch-Technik-Interaktion in Wohngebäuden, sondern auch der für deren Erforschung innovative sozio-technische Ansatz. So wurden für die drei Fallstudien sozialwissenschaftliche Daten (Befragungs-, Interview- und Beobachtungsdaten) mit physikalischen sowie technischen Daten (darunter Daten zur Gebäudephysik sowie Messdaten zu Energieverbräuchen, Temperaturen und Fensteröffnungsraten) kombiniert und mithilfe qualitativer wie quantitativer Analyseverfahren ausgewertet. Aufgrund der Vielzahl möglicher Einflussfaktoren und deren wechselseitiger Abhängigkeit sind die Auswirkungen der Mensch-Technik-Interaktionen auf den Heizenergieverbrauch hoch-

gradig kontextabhängig. Die dafür zu sammelnden Daten sind meist nur in Situationen begrenzten Umfangs in ausreichender Tiefe und Detailgrad erfassbar. Ein sozio-technisches Fallstudien-design, bestehend aus quantitativen und qualitativen Methoden, ermöglicht die notwendige Datenerhebung und -analyse, um darauf aufbauend Erkenntnisse über mögliche Mechanismen, die zur Energy-Performance-Gap führen können, zu gewinnen.

Eine weitere Besonderheit der Fallstudien, die sie von den meisten bisherigen Forschungsarbeiten unterscheidet, ist die Analyse auf Haushalts- bzw. Wohnungsebene. Während Analysen auf diesem Level in sozialwissenschaftlichen Studien die Regel sind, ist der vorliegend verfolgte Ansatz – die Bauphysik oder den Energieverbrauch betreffend – ungewöhnlich, da sich bauphysikalische Untersuchungen des Energiebedarfs gemeinhin auf die Gebäudeebene beschränken. Die Berücksichtigung aller Wohnungen in einigen wenigen mehrgeschossigen Wohnkomplexen erlaubt neben einer umfassenden Darstellung der Heterogenität zwischen den Wohneinheiten auch die Berücksichtigung der Interaktionseffekte zwischen den verschiedenen Haushalten innerhalb eines Gebäudes und deren Auswirkungen auf den Heizenergieverbrauch. Daraus lassen sich wichtige Schlussfolgerungen ziehen, sowohl für die Erwartungen hinsichtlich technologiegetriebener Klimaschutzmaßnahmen als auch – auf einem konkreteren Level – hinsichtlich der Weiterentwicklung entsprechender Technologien und der Vermittlungsangebote zwischen Bewohnern und Technik.

Die Arbeit beginnt mit einer kurzen Darstellung der Prämissen der interdisziplinären Energieforschung, auf welchen die Fallstudien aufbauen (Kapitel 2). Dabei wird auch erläutert, inwiefern sich die Arbeit von rein sozialwissenschaftlichen bzw. technischen Ansätzen abgrenzt und insofern eine interdisziplinäre Ausrichtung – mit all ihren Stärken und Schwächen – einnimmt. Hieran anschließend wird das theoretische Rahmengerüst der Praxistheorie eingeführt (Kapitel 3). Diese wird hier als Heuristik verwendet, das heißt als sensibilisierender Rahmen, mit dessen Hilfe bestimmte Aspekte empirischer Phänomene in den Blick kommen (Galvin und Sunikka-Blank 2016b; Reckwitz 2002b). Die Praxistheorie ermöglicht es, verschiedene theoretische Konzepte aus unterschiedlichen Disziplinen, die in diesem Kapitel kurz eingeführt werden, innerhalb eines theoretischen Rahmens miteinander zu verknüpfen. Im Anschluss an diesen Theorie-Überblick werden wesentliche Erkenntnisse aus der Forschung zu Mensch-Technik-Interaktionen und den Ursachen des Wärmeenergieverbrauchs im Gebäudebereich vorgestellt (Kapitel 4). Diese Kernergebnisse bilden den Ausgangspunkt für die Fragestellungen und Hypothesen der einzelnen Artikel. Um die Fragestellungen zu untersuchen, wurden Daten in zwei

Forschungsprojekten erhoben, die in den Jahren von 2018 bis 2023 an verschiedenen Standorten durchgeführt wurden. Ein kurzer Überblick über die Datenbasis sowie Methoden zu ihrer Analyse ist in Kapitel 5 dargestellt. Kapitel 6 umfasst eine kurze Zusammenfassung der einzelnen Artikel, wobei jeweils der Bezug zu der übergeordneten Fragestellung und zwischen den Fallstudien hergestellt wird. In Kapitel 7 schließlich wird ein Fazit gezogen und ein Ausblick auf sich aus der Arbeit ergebende Fragestellungen gegeben.

2. Theorie

2.1. Technik versus Verhalten?

Wie kommt es, dass Energieeffizienzmaßnahmen in Gebäuden regelmäßig zu geringeren Einsparungen führen als erwartet und dass Energy-Performance-Gaps daher im Gebäudesektor als eines der größten Probleme wirksamer Effizienzmaßnahmen gelten (vgl. Zou et al. 2018; Mahdavi et al. 2022; Hahn et al. 2023; Cozza et al. 2020)?

In der wissenschaftlichen Literatur werden verschiedene Gründe für Energy-Performance-Gaps angeführt. Sieht man von klimatischen Faktoren ab, lassen sich diese grundlegend in zwei Hauptursachen unterteilen (Shi et al. 2019). Auf der einen Seite gibt es technische Gründe: Dazu zählen neben Fehlern in der Durchführung technischer Maßnahmen vor allem design- und simulationsbasierte Effekte, bei denen die Abweichungen zwischen der Realität und den Annahmen, auf deren Grundlage der Energiebedarf abgeschätzt wird, eine Rolle spielen (Zou et al. 2018; Shi et al. 2019; Imam et al. 2017). Auf der anderen Seite werden betriebsbedingte Faktoren genannt, bei denen vor allem das Bewohnerverhalten eine herausragende Rolle spielt (Zou et al. 2018; Shi et al. 2019; Mahdavi et al. 2022).

Um die Energy-Performance-Gap zu schließen, konzentrieren sich entsprechend die meisten Ansätze darauf, durch Fortschritte in der Technik zu besseren Modellen und nutzergerechteren Technologien zu gelangen oder alternativ das Verhalten der Bewohner so zu ändern, dass sie weniger Energie verbrauchen. Diese Zweiteilung in eine Verbesserung technischer Ansätze auf der einen Seite und verhaltensbasierter Ansätze auf der anderen Seite – die sich mit Grandclément et al. (2015) auch als „building versus behaviour approach“ bezeichnen lässt – findet sich auch im Alltagsverständnis vieler Akteure, wobei meist ein Ansatz gegenüber dem anderen bevorzugt wird.

2.1.1. Technische Innovation im Fokus

Da Verhaltensanpassungen häufig als schwierig angesehen werden, präferieren viele Akteure technologische Innovationen, wie das folgende Zitat eines Wohnungsunternehmers zeigt:

„Ich muss sagen, dass man am ehesten einen Konsens herstellen kann, wenn Klimaschutz technologiegetrieben ist. Durch bessere Technologien und weniger, z. B. durch Belastungen von diesem und jenem Verbrauchsverhalten. Das Verbrauchsverhalten wird sich dann erst ändern, wenn die Technologien besser werden. Es ist eine Herausforderung an die deutsche Ingenieurkunst, was die Wärmeversorgung betrifft, was die Mobilität betrifft usw. Dann sollten wir das eigentlich schaffen, die Wende mit diesem Erfindungsreichtum und den Innovationen auch hinzubekommen.“

Ein übermäßiger Energieverbrauch ist demnach ein Problem, das es technisch zu lösen gilt. Der Fokus liegt auf den Technologien und deren Potenzial, die Effizienz zu erhöhen. Weitgehend ausgeblendet wird dabei jedoch oft, wie gut sich Technologien in reale Kontexte einbetten lassen und welche unerwünschten Nebenfolgen dabei auftreten.

Eine frühe Kritik an technisch-physikalischen Modellen, die Verhalten weitgehend ausblenden, stammt von Lutzenhiser (1993). Ein aktuelles Beispiel hierfür bietet die Forschung zu neuen Smart-Home-Technologien: Deren Entwicklung war jahrzehntelang von technologischen Interessen geprägt, während Fragen nach der Anwendung und Nutzung solcher Technologien kaum eine Rolle spielten (Marikyan et al. 2019; Alaa et al. 2017). Ein technologiezentrierter Blick rückt somit Technologien als strukturelle und von dem Verhalten weitgehend entkoppelte Gegebenheiten in den Blick und blendet die Seite der Verbreitung, Nutzung und Einbettung in soziale Kontexte weitgehend aus.

2.1.2. Individuelles Verhalten im Fokus

Technische Maßnahmen haben in der Vergangenheit durchaus zu wesentlichen Effizienzsprüngen geführt, wie dies zum Beispiel bei Neubauten im Gebäudesektor deutlich wird (dena 2016). Aufgrund technischer Maßnahmen erhöht sich häufig aber nicht nur die Effizienz, sondern es kommt auch zu sogenannten „Rebound-Effekten“ (Sorrell und Dimitropoulos 2008). Die erzielten Energieeinsparungen sind geringer als aufgrund der technischen Maßnahmen erwartet, da diese vollständig oder zum Teil durch verändertes Verhalten kompensiert werden. In der Energieforschung erhält daher seit langem auch das Verhalten eine große Aufmerksamkeit. Wie ein weiterer Wohnungsunternehmer beschreibt:

„Das Zentrale an dem ganzen Thema ist für mich grundsätzlich erst mal das Verbrauchsverhalten der Nutzer. Ich kann die Gebäude mit vielen Möglichkeiten der Nutzung regenerativer Energien oder Energieeinsparmöglichkeiten ausstatten. Wenn ich aber einen Nutzer habe, der verschwenderisch mit der Energie oder mit Ressourcen umgeht, dann ist das seitens des Vermieters ja überhaupt nicht beeinflussbar.“

Dieser Auffassung zufolge ist es nicht so sehr die Technik, sondern vor allem das individuelle Verhalten, das eine erhöhte Aufmerksamkeit verdient. In der Forschung und Politik ist nach der Ansicht verschiedener Sozialwissenschaftler (Shove 2010; Lutzenhiser 1993) eine ähnliche Sichtweise dominant: Das Paradigma ökonomischer und psychologischer Erklärungsansätze rücke das individuelle Verhalten als Erklärung für den Energieverbrauch und als zentralen Ausgangspunkt für mehr Nachhaltigkeit in den Fokus. Als gemeinsame Basis diene dabei eine modernistische Sichtweise (Brynjarsdóttir et al. 2012), wonach sich die Bedingungen menschlichen Verhaltens im Sinne von Gesetzmäßigkeiten erkennen und formalisieren ließen, und Verhalten auf diese Weise vorhersagbar werde. Situationen ließen sich demnach beispielsweise durch die Anpassung der Anreizstrukturen und Bereitstellung von Informationen so verändern, dass sich Menschen nachhaltiger verhielten und weniger Energie verbrauchten.

Durch ihren Fokus auf individuelles Verhalten haben solche Ansätze nach Shove (2010) die Tendenz, den Kontext als Triebkraft bzw. Barriere nachhaltigeren Verhaltens zu externalisieren. Das sich daraus ergebende Paradox bleibe ungelöst: Dem Kontext als Triebkraft oder Barriere des Verhaltens komme in solchen Modellen zwar die entscheidende Rolle zu, gleichzeitig gerieten aber durch den Fokus auf individuelles Verhalten die Geschichte, Dynamik und die wechselseitigen Abhängigkeiten der Kontextfaktoren aus dem Blick. Auch werde der Zusammenhang zwischen individuellen Entscheidungen und den situationsbedingten Gelegenheitsstrukturen als stabil und konstant und damit auch als unabhängig von weiteren, aus der Analyse ausgeklammerten Faktoren angenommen. Entsprechend wird in dieser sozialwissenschaftlichen Forschung wiederholt die Kritik geäußert, dass ein einseitiger Fokus auf individuelles Verhalten oder Technologie, auf das Individuum oder den strukturellen Kontext, zu kurz greife.

2.1.3. Struktur-Akteur-Dualismus

Vereinfacht dargestellt lässt sich das Verhältnis von Menschen zu Technik – ebenso wie das Verhältnis von Individuen zu Kontextfaktoren – auf einen Struktur-Akteur-Dualismus zurückführen, wie er sich in vielen sozialwissenschaftlichen Ansätzen zeigt (Röpke 2009). Laut Röpke finden sich auf der einen Seite Theorien, die Strukturen als unabhängig von den Individuen existierende Realität betrachten, welche das Verhalten von Individuen beeinflussen. Auf der anderen Seite gibt es Theorien, die Individuen als autonome Akteure begreifen und deren Entscheidungen in den Mittelpunkt stellen. Infolgedessen wären Effekte auf der Ebene der Gesellschaft lediglich der Summe der einzelnen Handlungen zuzuschreiben, die unter bestimmten Anreizen und Beschränkungen getroffen wurden (Röpke 2009, S. 2491).

Entscheidend für einen solchen Struktur-Akteur-Dualismus ist, dass Akteure und Strukturen als weitgehend unabhängig voneinander existierende Sphären angenommen werden, die aber in klaren kausalen Wechselwirkungen stehen können. Sozialwissenschaftliche Erklärungen würden demnach üblicherweise entweder von den Umständen (Strukturen) oder den Menschen dominiert werden (Law und Bijker 1992). Technische und andere materielle Strukturen würden darüber hinaus nach Reckwitz (2002a) im Sinne der soziologischen Kulturtheorien entweder als Teil der sozialen Strukturen betrachtet und damit als reale Sphäre hinter und unabhängig von den subjektiven und kollektiven Interpretationen, die wir als Kultur begreifen, angesiedelt werden (Reckwitz 2002a). Oder sie würden als rein symbolische Objekte betrachtet, die nur im Rahmen von kulturellen Bedeutungssystemen Bedeutung erlangten.¹

Auf das Beispiel der Heizung bezogen, könnte dieser Struktur-Akteur-Dualismus schematisch so gedeutet werden, dass entweder die Bewohner für ihr eigenes Los verantwortlich gemacht werden könnten und man ihnen diese Verantwortung zuschreiben müsste: Sie hätten grundsätzlich die Möglichkeit, ihre Heizung energiesparend zu bedienen, sich die entsprechenden Informationen zum energiesparenden Verhalten zu beschaffen, und insofern sollten sie im Mittelpunkt von Policy-Ansätzen stehen. Oder man geht alternativ davon aus, dass die Handlungen der Bewohner hochgradig vorstrukturiert seien – z. B. durch kulturell geprägte Vorstellungen von Behaglichkeit, durch Infrastrukturen oder technische Designs – und sie daher unter erheblichen Einschränkungen agierten. Auch hätten viele Bewohner andere Sorgen und nicht die Kapazitäten, sich die notwendigen Informationen zu beschaffen, auch wenn diese prinzipiell zur Verfügung stünden. Individuen seien deshalb nur bedingt zur Verantwortung zu ziehen, weshalb es die technischen und kulturellen Strukturen seien, die man verändern müsse.

2.1.4. Überwindung des Struktur-Akteur-Dualismus

Demgegenüber gibt es in der sozialwissenschaftlichen Forschung schon lange Ansätze, die versuchen, sowohl die Reduktionismen eines solchen Struktur-Akteur-Dualismus als auch die Trennung zwischen Sozialem und Technischem zu überwinden, da solche einseitigen Erklärungen den in der Praxis zu beobachtenden Phänomenen nicht gerecht würden (Reckwitz 2002a). Durch eine Konzentration entweder auf das Verhalten oder die Technik lässt sich demnach auch der Energieverbrauch in Gebäuden nicht verstehen. Die Effekte von Technik auf den Energieverbrauch lassen sich nicht nachvollziehen, ohne ein Verständnis davon, wie Technik von Nutzern angeeignet und auf verschiedene Weise in soziale Kontexte eingebettet wird (Lehtonen

¹ Vgl. hierzu auch noch Latours Kritik an modernistischen Tendenzen, Natur/Technik und Soziales/Kultur als strikt voneinander getrennte Sphären zu betrachten und seine Ansätze, diesen sich in den kulturellen Theorien zu findenden Dualismus zu überwinden (Latour 2019).

2003). Und umgekehrt lassen sich die Effekte von Verhalten nicht von ihrem Kontext isolieren (Shove 2010). Stattdessen ist zu berücksichtigen, wie bestimmte Verhaltensweisen in Technik angelegt und durch Technik nahegelegt („afforded“) werden (Ilmonen 2004; Ingold 2018).

Sogenannten sozio-technischen Ansätzen liegt die Beobachtung zugrunde, dass „weder das Soziale noch das Technische in letzter Instanz ausschlaggebend für einen Effekt sind“ (Law und Bijker 1992, S. 290; Eigene Übersetzung) und sich beobachtbare Phänomene auf keine der beiden Seiten reduzieren lassen. Auch können weder soziale noch technische Phänomene als feste und stabile Größen angenommen werden, da sich beide in den Interaktionen wandeln. Galvin (2017) unterscheidet sogar zwischen Kausalität in der physischen Domäne und Kausalität in der sozialen Domäne, um auf die Schwierigkeiten hinzuweisen, beide im Sinne von eindeutigen Ursache-Wirkung-Ketten zu verknüpfen. Demnach sei es häufig nicht möglich, formalisierte Modelle zu bauen, um die realen Kausalitätspfade zwischen materiellen und sozialen Elementen wiederzugeben. Stattdessen könne es zielführender sein, zum Verständnis des Zusammenspiels von physischen und sozialen Effekten einen heuristischen Ansatz zu verfolgen. Dessen Ziel sollte es sein, ausgehend von dem Durcheinander realer Phänomene und ausgehend von empirischen Daten relevante Anknüpfungspunkte für das Verständnis des Energieverbrauchs zu finden, um so ein Verständnis der ablaufenden Prozesse zu generieren (Galvin 2017, S. 99).

Beim Energieverbrauch in Gebäuden handelt es sich um ein solches sozio-technisches Gefüge im Sinne Galvins (2017), zu dem er auch selbst ausgiebig geforscht hat. Hier sind sowohl materielle Elemente (und damit physikalische Prozesse) als auch soziale Elemente, darunter Überzeugungen, Normen und Wissen, involviert, deren Ursache-Wirkung-Ketten sich aufgrund vielfältiger Feedbackeffekte nicht immer klar voneinander trennen lassen. Materielle und soziale Elemente sind wechselseitig aufeinander bezogen und erschweren damit aufgrund der Menge an Interaktionseffekten und relevanten Einflussfaktoren eindeutige und vor allem formalisierte Beschreibungen.

In dieser Arbeit wird daher eine Herangehensweise gewählt, die eine Integration beider Elemente erlaubt und dabei innerhalb eines gemeinsamen theoretischen Rahmens einen Bezug auf verschiedene, meist getrennt voneinander betrachtete Theorien erlaubt. Diese Vorgehensweise dient zum einen dazu, Reduktionismen zu entgehen, die in dem oben genannten building versus behaviour approach (Grandclément et al. 2015) qua methodischem Design schon angelegt sind. Zum anderen lassen sich so vorschnelle Grenzziehungen zwischen physischen und sozialen Prozessen vermeiden, die sonst leicht in eindimensionalen Zuweisungen von Ursache-Wirkung-Ketten münden können.

2.2. Soziale Praxistheorie zur Überwindung des Technik-Verhalten-Dualismus

Die Soziale Praxistheorie bietet einen theoretischen Rahmen beziehungsweise ein heuristisches Modell (Galvin und Sunikka-Blank 2016b), welches die Analyse von Mensch-Technik-Interaktionen in Gebäuden erlaubt, ohne die Annahme unveränderlicher und konstanter kausaler Effekte voraussetzen zu müssen. Praxistheorien lösen die Frage, ob man Personen oder Technik „Agency“ zuschreibt (Wilhite 2008), dahingehend auf, dass beide als notwendige Bestandteile von Praktiken gelten, die allerdings in ihren Effekten nicht unabhängig voneinander wirken können. Reckwitz (Reckwitz 2002a, S. 207) argumentiert unter Bezugnahme auf Latour (1994), dass materielle Dinge und Technologien Handlungen nicht einfach in einem strikten kausalen Sinne bedingen. Stattdessen müssten Dinge, um Auswirkungen zu haben, genutzt werden, und um genutzt zu werden, brauche es ein Verständnis, wie sie genutzt werden können, was wiederum von sozialen Interpretationen abhängt. Umgekehrt könnten Dinge aber auch nicht, wie in kulturalistischen Vorstellungen (vgl. Reckwitz 2002a, 202ff), mit einem beliebigen Sinn versehen und genutzt werden, sondern müssten in ihren physikalischen Eigenschaften ernst genommen werden (Reckwitz 2002a, S. 212).

Wie diese Interaktionen stattfinden und welche Effekte sie zeitigen, werde in jeder konkreten Praxis immer wieder neu ausgehandelt. Die Praxis unterliege damit prinzipiell, trotz der Ausbildung stabiler Muster, konstantem Wandel. Entsprechend stellt die Praxistheorie auch nicht die Akteure oder einzelne unverbundene Handlungen, sondern den Handlungsstrom in den Mittelpunkt ihrer Analyse, der verschiedene soziale und materielle Elemente miteinander verbindet (Røpke 2009, S. 2491). Der Fokus liegt daher nicht auf der rationalen und freien Entscheidung von Akteuren, sondern auf der Frage, wie verschiedene Elemente wie Motivationen, Bedeutungszuschreibungen, formelle und informelle Regeln, Wissen und Fähigkeiten sowie materielle Bedingungen – darunter Technologien, Artefakte, aber auch die (biologischen) Körper der Handelnden (Schatzki 2010) – stabile Muster in Form von Routinen oder Gewohnheiten bilden (Reckwitz 2002b, 249f).

Das Bild, das Praxistheoretiker vom Handeln haben, ähnelt daher in mancher Hinsicht den Ideen hinter dem Konzept der begrenzten Rationalität, wie es Herbert Simon in verschiedenen Arbeiten dargelegt hat (Simon 1959). Zum einen wird dadurch die Bedeutung unbewusster Routinen und Gewohnheiten für viele menschliche Aktivitäten betont (Røpke 2009, S. 2494). Dies steht im Gegensatz zu den im Bereich der Energieforschung dominanten Erklärungsmodellen, welche freie und grundsätzlich rationale Entscheidungen ins Zentrum ihrer Theorien

stellen (Wilhite 2001). Zum anderen ist damit auch ein Fokus auf tatsächliche Handlungen verbunden (Schatzki 1996, 22ff), während sich kulturalistische Theorien im Vergleich dazu häufig auf Aussagen oder Formen von Text konzentrieren (Reckwitz 2002a, S. 211).

Praktiken als zentrale Untersuchungseinheit zu betrachten und die verschiedenen Elemente zu berücksichtigen, die für eine Praxis konstituierend wirken, bedeutet zugleich, dass der Kontext von Handlungen internalisiert wird. Im Vergleich zu den oben kritisierten Ansätzen, die Kontext als externe Einflussfaktoren außerhalb der Analyse verorten, ist es in einem praxistheoretischen Rahmen damit nicht nur möglich, sondern geboten, andere Elemente – wie z. B. die materiellen Infrastrukturen – sowie die Dynamiken, denen sie unterliegen, zum Thema zu machen. Darunter fallen Fragen danach, wie sich einzelne Elemente verändern sowie zwischen verschiedenen Praktiken „reisen“ und eingebettet werden (Shove und Pantzar 2005), und ein Interesse dafür, auf welche Art und Weise diese Elemente mit verschiedenen Ausprägungen der anderen Elemente interagieren.

2.2.1. Praxistheorie in der Energieforschung

Es ist dieses Verständnis von Praxistheorie, das für viele Wissenschaftler zur Attraktivität dieses Ansatzes in der Energieforschung im Gebäudebereich beitragen dürfte. Erstens ist der Energieverbrauch in Gebäuden eindeutig eine Folge von Handlungen², die stark von verschiedenen materiellen Aspekten wie der Gebäudehülle, den Heizungs- und Fenstertechnologien, aber auch der Inneneinrichtung abhängen. Diese materiellen Aspekte können auf jeweils sehr verschiedene Art miteinander kombiniert und genutzt werden. Zweitens scheinen viele dieser Handlungen, die Komfort oder andere „Energy Services“ (Grubler et al. 2012) zum Ziel haben, weitgehend unbewusst und stark routiniert abzulaufen. Drittens sind Komfort oder andere Energy Services häufig eine unbewusste Nebenfolge von Handlungen, die andere Zwecke verfolgen; und bei vielen der einzelnen Handlungen scheint es wenig Sinn zu ergeben, diese als vom größeren Handlungsstrom unabhängige Entscheidungen zu betrachten. Viertens spielen offensichtlich auch verschiedenste soziale und kulturelle Faktoren – von Kleidernormen und kulturell geprägten Vorstellungen über richtiges und falsches Energiesparen bis hin zu Wissensbeständen über den Umgang mit Technologien – eine Rolle für den Energieverbrauch, und diese Faktoren interagieren dabei auf vielfältige Weise mit den materiellen Infrastrukturen.

² In dieser Arbeit wird nicht strikt zwischen Handeln und Verhalten unterschieden. Mit Hirschauer (2016) lässt sich das damit begründen, dass aus praxistheoretischer Perspektive der Unterschied zwischen beiden wesentlich geringer ist als im handlungstheoretischen Verständnis Webers. Handeln erscheint demnach als Verhalten, dem Sinn und Intentionalität zugeschrieben wird. Entscheidend sind aus praxistheoretischer Sicht aber die praktischen Vollzüge selbst – das, was Menschen tun –, unabhängig davon, ob diese Tätigkeiten als sinnhaft interpretiert werden oder nicht.

Der Energieverbrauch selbst, als konsumierte und aus einer Klimaschutzperspektive problematisierte physikalische Einheit, scheint hingegen ein essenzieller, aber nicht notwendigerweise besonders präsenter Teil der Praktiken zu sein (Warde 2005). Oder, um es mit Burgess und Nye (2008, S. 4454) auszudrücken: Der Energieverbrauch selbst bleibt für die Menschen unsichtbar, insofern er für die meisten Personen ein weitgehend abstraktes Konzept bleibt. Die Zusammenhänge zwischen Energieverbrauch und den eigenen täglichen Aktivitäten sind für viele Menschen daher nur schwer zu erfassen.

Eine Definition von Praktiken, die als gängiger Bezugspunkt in der sozialwissenschaftlich orientierten Energieforschung gilt und die die verschiedenen bislang diskutierten Aspekte von Praktiken kombiniert, stammt von Andreas Reckwitz. Er definiert eine Praktik als:

„a routinized type of behaviour, which consists of several elements, interconnected to one other: forms of bodily activities, forms of mental activities, 'things' and their use, a background knowledge in the form of understanding, know-how, states of emotion and motivational knowledge. A practice – a way of cooking, of consuming, of working, of investigating, of taking care of oneself or of others, etc. – forms so to speak a 'block' whose existence necessarily depends on the existence and specific interconnectedness of these elements, and which cannot be reduced to any one of these single elements. Likewise, a practice represents a pattern which can be filled out by a multitude of single and often unique actions reproducing the practice (a certain way of consuming goods can be filled out by plenty of actual acts of consumption).” (Reckwitz 2002b, 249f)

Auf den Wärmeenergieverbrauch in Gebäuden bezogen bedeutet dies, dass zu dessen Reduzierung viel mehr notwendig ist, als einzelne Technologien auszutauschen oder die Bewohner über ihre Einsparmöglichkeiten oder die richtige Bedienung der Gebäudetechnologien aufzuklären. Da es sonst immer wieder zu Situationen kommt, in denen sich auch andere Elemente von Praktiken auf nicht geplante Weise verändern, sind unvorhergesehene Interaktionseffekte mit nicht gewünschten Nebenfolgen eine fast unvermeidbare Folge.

Eine Veränderung des technischen Settings kann Veränderungen im Bewohnerverhalten nach sich ziehen (Gupta und Barnfield 2014). Eine Veränderung des Bewohnerverhaltens wiederum kann sich auf den Umgang mit Gebäudetechnologien auswirken und darüber längerfristig Rückwirkungen auf deren technisches Design haben (Rohracher 2003). Um die Einspareffekte bestimmter Maßnahmen realistisch einschätzen zu können, muss daher das Zusammenspiel der verschiedenen Elemente verstanden werden und inwiefern dieses zu systematischen, aber unerwünschten Nebeneffekten führt.

2.2.2. Konzeptualisierung von Praktiken in empirischen Arbeiten

Die Praxistheorie und ihre Anwendung in der Energieforschung ist stark in Traditionen soziologischer und philosophischer Theorienbildung verwurzelt (Bourdieu 1990; Giddens 1986;

Schatzki 1996). Für eine vereinfachte Handhabbarkeit in empirischen Fallstudien haben sich Konzeptualisierungen durchgesetzt, wonach „Praktiken“ als weitgehend routinierte Handlungsabläufe zu verstehen sind, für die drei oder vier wesentliche Elemente zentral sind, deren Wechselwirkungen es zu untersuchen gilt. Wahrscheinlich am häufigsten wird dabei auf die Aufteilung von Shove et al. (2012) zurückgegriffen, die zwischen „material“, „meaning“ und „competence“ unterscheiden (Röpke 2009). Eine ähnliche Unterteilung stammt von Gram-Hanssen (2010), die zusätzlich aber noch explizite und implizite Regeln als viertes Element nennt, welches man bei Shove et al. teils der Bedeutungsdimension, teils der Kompetenzdimension zuordnen könnte.

Ebenso wie die genaue Abgrenzung der Elemente ist auch die Frage zweitrangig, ob die Materialität als Teil der Praxis selbst gesehen wird, oder, wie bei Schatzki (2006, 2010), die materiellen Arrangements analytisch von den Praktiken getrennt werden. Entscheidend scheint vielmehr zu sein, dass es sich bei der Unterscheidung in Elemente um eine analytische Kategorisierung handelt, bei der nicht der Fehler begangen werden darf, eine strikte Trennung nach kausalen Wirkungen zwischen sozialer und materieller Sphäre vorzunehmen.

Allerdings, und dieser Auffassung folgt diese Arbeit, ist nach Shove und Walker (2014) die analytische Trennung zwischen Praktiken und materiellen Arrangements insoweit sinnvoll, als dass die Unmöglichkeit einer strikten Unterteilung nach Effekten noch nicht bedeuten muss, dass es keine Unterschiede gibt. So weisen die beiden Autoren (Shove und Walker 2014, S. 50) in Anlehnung an Schatzki (2006, 2010) darauf hin, dass Praktiken passieren, das heißt ausgeführt werden, während materielle Arrangements und Infrastrukturen existieren. Materielle Arrangements, darunter Infrastrukturen, Artefakte, Technologien und auch Körper (Schatzki 2010) sind nicht nur langlebiger, sondern können viele Praktiken gleichzeitig beeinflussen. Sie präfigurieren Praktiken in einer Weise, wie es umgekehrt nicht gilt.

Keine eindeutigen Kriterien gibt es für empirische Analysen hinsichtlich der Frage, wo zwischen einzelnen Praktiken sowie Praktiken und ihrer Umwelt die Grenzen zu ziehen sind. In der bisherigen Literatur rund um den Wärmeenergieverbrauch in Wohngebäuden wird aufgrund der Bedeutung des Heiz- und Lüftungsverhaltens meist von Heizpraktiken (Eon et al. 2017b; Wolff et al. 2017), Lüftungspraktiken (Matzat 2019; Galassi und Madlener 2018) oder allgemeiner von (Heat-)Thermal-Comfort-Praktiken gesprochen (Gram-Hanssen 2010). Das Konzept des thermischen Komforts beschreibt dabei den Zustand des Wohlbefindens und der Zufriedenheit mit den klimatischen Bedingungen der Umgebung und hat sich als gängiger Begriff in internationalen Normen und darauf aufbauend auch in der Literatur zum Wohlbefinden in Gebäuden durchgesetzt (Rupp et al. 2015; Enescu 2017).

In der Energieforschung liegt der Fokus des Interesses dabei auf den mit den Alltagspraktiken verbundenen Auswirkungen auf den Energieverbrauch. Da der Heizenergieverbrauch in Wohngebäuden – neben der Bereitstellung von Warmwasser, welche in dieser Arbeit nicht betrachtet wird – ausschließlich der Beheizung der Wohnräume dient, werden unter Thermal-Comfort-Praktiken zunächst all diejenigen Praktiken subsumiert, die direkt oder indirekt mit der Behaglichkeit und dem Verbrauch von Heizenergie für Raumwärme in Gebäuden zusammenhängen. Darunter fallen neben den genannten Heiz- und Lüftungspraktiken, die hier im Vordergrund stehen, auch Kleidungspraktiken und weitere Praktiken zum Wärmen oder Kühlen des Körpers und zur Gewährleistung des Innenraumkomforts (z. B. die Verwendung von Wärmflaschen, Decken oder auch Verhaltensweisen wie häusliche sportliche Betätigungen). Aber auch andere Praktiken wie das Kochen, das Halten und Umsorgen von Haustieren oder das Ausüben von Hausarbeit haben direkte Auswirkungen auf den thermischen Komfort und damit auch auf den Energieverbrauch, insofern das Öffnen von Fenstern oder Türen oder die Wärmeproduktion des eigenen Körpers involviert sind. Manche Autoren weisen daher darauf hin, dass es notwendig ist, alle Sinne des Menschen in Komfortpraktiken zu berücksichtigen (Madsen und Gram-Hanssen 2017). Hier zeigen sich Parallelen zu Komforttheorien, die zwischen dem akustischen, visuellen und dem thermischen Komfort unterscheiden und damit auch das Konzept des Komforts weiter ausdifferenzieren (Enescu 2017).

Die vorangehend dargelegten Überlegungen verdeutlichen, dass unterschiedliche Alltagspraktiken, denen Bewohner nachgehen, vielfältig miteinander verwoben sind. Klare Grenzziehungen zwischen den Praktiken stehen folglich immer unter dem Vorbehalt, dass es sich nur um eine analytische Grenzziehung handeln kann.

2.2.3. Integration verschiedener Forschungsperspektiven

Um zu verstehen, wie verschiedene Elemente in Komfortpraktiken zusammenspielen und wie diese miteinander interagieren, bezieht sich diese Arbeit auf Forschungsergebnisse aus verschiedenen Disziplinen, in denen unterschiedliche Teilaspekte von Alltagspraktiken und ihrer Relevanz für den Heizenergieverbrauch berührt werden. Auch wenn diese Literatur aus praxistheoretischer Sicht häufig wesentliche Aspekte ausklammert, sind die dort gewonnenen Erkenntnisse jedoch wichtige Bausteine für die in dieser Arbeit durchgeführten Fallstudien. Im Rahmen der Praxistheorie lassen sich dann wechselseitige Bezüge zwischen den einzelnen Forschungssträngen darstellen.

Abgesehen von der praxistheoretischen Forschung zum Energieverbrauch in Gebäuden sind es vor allem vier wesentliche Theoriestränge und deren Grundkonzepte, auf die sich diese Arbeit

bezieht: Erstens die Thermal-Comfort-Theorie mit ihrer Unterteilung nach „Heat-Balance-Modellen“ und „Adaptive-Thermal-Comfort-Modellen“. Sie bietet Erklärungen für die grundlegenden Bedingungen, unter denen sich Menschen wohlfühlen, sowie für die relevanten Einflussfaktoren. Zweitens Grundlagen der bauphysikalischen Theorie, um zu erklären, wie der Heizbedarf in einem Gebäude entsteht und welche Faktoren dafür entscheidend sind. Drittens Einsichten aus den *Science and Technology Studies (STS)*, um zu verstehen, wie Technologien angeeignet und in soziale Kontexte eingebettet werden. Und schließlich viertens das Konzept der mentalen Modelle, um zu untersuchen, wie Menschen sich selbst die Funktionsweise von technischen Systemen erklären. Letztlich lassen sich die Aspekte, die durch die jeweiligen Theorien betont werden, den unterschiedlichen Elementen der Praktiken – Meaning, Competence und Material – zuordnen.

2.3. Theorien des „Thermal Comforts“

Zum Beheizen von Gebäuden braucht es Energie. Ob der dafür notwendige Energieverbrauch als angemessen gelten kann, hängt von den Rahmenbedingungen ab, unter denen sich Menschen in Gebäuden wohlfühlen. Aus eigener Anschauung ist ersichtlich, dass es physikalische Grenzen für das Empfinden von Behaglichkeit zu geben scheint, auch wenn diese im Detail von vielen Faktoren abhängen. Zur Beurteilung derjenigen Innenraumbedingungen, die als angenehm gelten können, haben sich zwei prominente Ansätze etabliert (vgl. Luo et al. 2016 für eine kurze Darstellung; Enescu 2017 für einen allgemeinen Überblick).

2.3.1. Heat-Balance-Ansatz

Im „Heat-Balance-Ansatz“ wird das thermische Empfinden von Personen als Funktion verschiedener physikalischer Parameter bestimmt. Eine hohe Zufriedenheit wird dabei mit der Abwesenheit spürbarer Kälte- oder Hitzereize gleichgesetzt und damit als neutraler Zustand definiert (Luo et al. 2016). Laut dem bekanntesten Heat-Balance-Modell, dem PMV-Index von Fanger (1970), lässt sich das thermische Empfinden – außer durch die Bekleidung einer Person (persönliche Isolierung) und ihrer individuellen Stoffwechselaktivität – durch die vier Umweltfaktoren Lufttemperatur, Strahlungstemperatur, Luftfeuchte und Luftbewegung bestimmen. Aus Sicht der Vertreter dieses Modells blendet eine Reduzierung des Komforts auf eine reine Funktion der Außentemperaturen, wie es das Adaptive-Thermal-Comfort-Modell vorsieht, daher entscheidende physikalische Aspekte des Komforts aus (Halawa und van Hoof 2012). Aus praxistheoretischer Sicht verweist dieses Modell damit auf die materielle Dimension des thermischen Komforts.

Die Bedeutung der einzelnen Umweltfaktoren zeigt sich gerade bei der Funktionsweise verschiedener Gebäudetechnologien wie der Heizung: Die Heizflächen geben die Wärme des Heizmediums, üblicherweise Wasser, überwiegend über eine Kombination aus Konvektion und Strahlung an den Raum ab, wobei der jeweilige Anteil von der Heizungsanlage und der Temperatur abhängt. Grundsätzlich gilt, dass bei Radiatorheizkörpern mit steigender Temperatur zwar auch die Wärmeabgabe durch Strahlung steigt, aber der Strahlungsanteil gegenüber dem Konvektionsanteil sinkt (Laasch und Laasch 2013).

Die Interaktion der Nutzer mit den Technologien kann sich unterschiedlich auf die Wärmeabgabe auswirken. Bei der Heizung beeinflussen Bewohner den kombinierten Effekt von Konvektion und Strahlung auf ihren Komfort zum Beispiel dadurch, dass sie den direkten Strahlungseffekt einer Heizung auf ihren Körper blockieren, wenn Möbelstücke vor der Heizung stehen. Und auch durch das Öffnen von Fenstern können Bewohner nicht nur die Lufttemperaturen, sondern auch die Luftbewegung und Luftfeuchtigkeit beeinflussen. Die materielle beziehungsweise physikalische Seite des Komforts ist daher ein wesentliches Element bei der Untersuchung von Komfortpraktiken und ihrer Auswirkungen auf den Energieverbrauch in Gebäuden.

2.3.2. Adaptive-Thermal-Comfort-Theorie

Ausgehend von der Beobachtung, dass Bewohner von Gebäuden aktiv mit ihrer Umwelt interagieren, um für ihren Komfort zu sorgen, sowie der Tatsache, dass sich in Feldstudien der Zusammenhang von physikalischen Faktoren und individueller Behaglichkeit nicht so, wie von Heat-Balance-Modellen vorhergesagt, hat zeigen lassen (Humphreys und Nicol 1998), hat sich als alternativer Erklärungsansatz die Adaptive-Thermal-Comfort-Theorie etabliert. Dieser Ansatz betont die aktive Rolle, die Menschen einnehmen, um sich wohlfühlen. Dabei sind physiologische, psychologische und verhaltensspezifische Anpassungsmechanismen von Bedeutung (Brager und de Dear 1998).

Brager und de Dear (1998) konnten aufgrund eines Überblicks über zahlreiche Fallstudien zeigen, dass sich Menschen unter wesentlich mehr Bedingungen wohlfühlen, als es das Heat-Balance-Modell vorhersagt. Die aus dem Heat-Balance-Modell abgeleitete und als angenehm geltende Temperaturspanne verbreitert sich nicht nur mit den je nach Kontext verfügbaren Möglichkeiten, auf die Umwelt einzuwirken, sondern hängt darüber hinaus auch mit den persönlichen Erwartungshaltungen und der individuellen Erfahrungsgeschichte thermischer Zustände zusammen (Luo et al. 2016). Eine in diesem Zusammenhang häufig genannte Erkenntnis ist, dass Gebäudenutzer, solange sie das Gefühl haben, auf ihre Situation einwirken zu können und

den äußeren Bedingungen nicht hilflos ausgeliefert zu sein, sogar Bedingungen als angenehm empfinden können, die sie bei fehlenden Einwirkungsmöglichkeiten als nicht mehr akzeptabel beurteilen würden (Humphreys und Nicol 1998; Brager und de Dear 1998). Menschen passen sich demnach nicht nur in ihrem Verhalten – beispielsweise durch das Öffnen von Fenstern oder die Anpassung ihrer Kleidung – an ihre jeweilige Situation an, sondern bilden auch kontextabhängige Erwartungen.

Verschiedene Studien haben darüber hinaus gezeigt, dass sich Menschen zu einem gewissen Grad auch physiologisch an andere Bedingungen gewöhnen können und sich ihre langfristige Erwartungshaltung an angenehme Bedingungen im Laufe der Zeit ändern kann. Eindrückliche Hinweise für eine solche Komfortanpassung bietet die Studie von Luo et al. (2016): Dort werden Komfortvorstellungen von Studierenden untersucht, die aus dem Süden Chinas in den kälteren Norden umgezogen sind. Im Gegensatz zu den Gebäuden im Norden werden die Gebäude im Süden im Winter üblicherweise nicht beheizt und haben daher deutlich niedrigere Innenraumtemperaturen. Die Studie zeigt, dass sich die Studierenden mit der Zeit an die wärmeren Innenraumtemperaturen gewöhnen und nach der Rückkehr in ihre alte Heimat das kältere Innenraumklima im Süden als unangenehmer bewerten, als sie dies vor dem Umzug getan hatten. Dass der Gewöhnungseffekt in die umgekehrte Richtung nicht eintritt, erklären die Autoren mit der sogenannten „Expectation Expectancy Hypothesis“. Demnach passen sich die individuellen Erwartungshaltungen im Laufe der Zeit an bequemere Bedingungen an.

2.3.3. Relevanz für die vorliegende Untersuchung

Die Thermal-Comfort-Literatur ist aus einer Reihe von Gründen für die in dieser Arbeit durchgeführten Fallstudien relevant. Offensichtlich besteht eine enge Koppelung zwischen Wärme- komfort und Heizenergieverbrauch in Gebäuden. Vorstellungen von Komfort sind zu einem wesentlichen Teil materiell vorstrukturiert – durch die Physiologie der Bewohner, die Umwelt (insbesondere das Wetter), aber auch durch die Bausubstanz und Gebäudetechnologien. Im ökonomischen Sinne lässt sich trotzdem kaum von stabilen Präferenzen sprechen: Individuelle Erwartungshaltungen und selbst körperliche Reaktionen scheinen sich über längere Zeiträume zu verändern, weshalb die Vorstellungen, was als angenehm gilt, abhängig von den persönlichen Erfahrungen und der jeweiligen Situation sind. Die Suche nach angenehmen Innenraumbedingungen ist eng mit den durch die Sozialisation bedingten persönlichen Zielen und Überzeugungen in Bezug auf Komfort gekoppelt, also damit, was man in der Praxistheorie dem Element der Bedeutungsgehalte von Praktiken zuschreiben kann. Das bedeutet nicht, dass thermisches Wohlbefinden beliebig variabel ist – offensichtlich gibt es physische Faktoren und Grenzen.

Allerdings ist eine genaue Grenzziehung bislang erfolglos geblieben, was sich insbesondere aufgrund der Vielzahl an möglichen Einflussfaktoren und der Wirkung der sich verändernden kulturellen Prägung erklären lässt.

Insgesamt zeigt die Thermal-Comfort-Forschung, dass die Bedingungen, unter denen sich Personen wohlfühlen, variieren und es eine Reihe möglicher physikalischer Einflussfaktoren gibt, die bei der Untersuchung der Variabilität des Energieverbrauchs in Gebäuden zu berücksichtigen sind. Die Adaptive-Thermal-Comfort-Theorie bestätigt zwar, dass es eine Spanne möglicher, angenehmer Konditionen gibt, betont aber, dass diese von verschiedenen Anpassungsleistungen der Menschen abhängen.

Die Komfortvorstellungen von Menschen sind also über die Bedeutung fester Umweltfaktoren hinaus kontextsensitiv. Auch für dieselben Personen sind Präferenzen nicht stabil, sondern können sich über die Zeit in Abhängigkeit von der Situation ändern. Zuletzt weisen diese Theorien darauf hin, dass auch die Materialität in Form der Physiologie des Menschen sowie der Technologien als bedeutende Einflussfaktoren des Komforts zu betrachten sind.

2.4. Gebäudephysik und technische Effizienzstrategien

Bei einem gegebenen Komfortniveau hängt der Heizenergieverbrauch eines Gebäudes wesentlich von der Gebäudephysik sowie der technischen Gebäudeausstattung ab. Gebäude müssen im Winter und in den Übergangszeiten beheizt werden, um sie auf einer bewohnbaren Temperatur zu halten und die Energieverluste auszugleichen, die durch die Differenz zwischen Innen- und Außentemperaturen entstehen. Energieverluste treten dabei im Gebäude hauptsächlich aufgrund von Transmission und Konvektion auf (Laasch und Laasch 2013).

2.4.1. Wärmeverluste im Gebäude

Transmissionsverluste entstehen durch Wärmeleitung innerhalb von Materialien, das heißt durch das Entweichen von Energie durch die Gebäudehülle. Diese werden als Energieverlust pro Quadratmeter Außenfläche angegeben und berechnen sich aus der Höhe der Temperaturdifferenz sowie dem Wärmedurchlasskoeffizienten der Gebäudehülle.

Konvektionsverluste wiederum entstehen durch die in der Raumluft gespeicherte Energie, die mit dieser durch offene Fenster, Türen oder undichte Stellen im Gebäude entweicht. Während Luft nur $0,36 \text{ Wh/m}^3\text{K}$ an Wärmeenergie speichern kann, liegt dieser Wert bei der Gebäudestruktur, wie dem Mauerwerk, bei einer Größenordnung von $430 \text{ Wh/m}^3\text{K}$, was die große Bedeutung der in der Gebäudehülle gespeicherten Wärme und der dadurch möglichen Puffereffekte verdeutlicht (Laasch und Laasch 2013, S. 581). Je nach Gebäudeeffizienzklasse und den

verbauten Materialien kann der Anteil, der durch Konvektion und Transmission entweicht, stark variieren.

Zuletzt entstehen auch Verluste beim Betreiben der Heizungsanlagen, insbesondere bei der Verbrennung von Gas und Öl, da Energie mit der Abwärme direkt durch den Kamin entweicht. Der Energieverbrauch eines Gebäudes wird daher stark durch die Materialität der Gebäudetechnologien beeinflusst.

Unter Berücksichtigung gegebener Außentemperaturen und der Wärmegewinne, die beispielsweise durch solare Einstrahlung, interne Wärmegewinne von Personen, Warmwasser oder die Abwärme elektrischer Geräte entstehen, lässt sich der Heizenergiebedarf mithilfe von Annahmen zu Innenraumtemperaturen und Luftaustausch berechnen. Dabei werden – ausgehend von der Energieeinsparverordnung (EnEV) – üblicherweise konstante Innenraumtemperaturen von 19°C und eine Luftwechselrate von 0,7 Luftwechseln pro Stunde angenommen.

Solche auf Standardannahmen basierenden Berechnungen des Heizwärmebedarfs liefern einen wichtigen Vergleichswert, um Energy-Performance-Gaps zu berechnen und den Einfluss von Komfortpraktiken sowie Gebäude-Bewohner-Interaktionen auf den Energieverbrauch abschätzen zu können. Allerdings ist zu beachten, dass prinzipiell für die häufig beobachtete Abweichung des tatsächlichen Verbrauchs vom errechneten Bedarf eine Reihe verschiedenster Ursachen infrage kommen (Bordass et al. 2004; Mahdavi et al. 2021): Neben den aufgrund des Bewohnerverhaltens auftretenden Rebound-Effekten zählen dazu auch Konstruktionsmängel, Wärmebrücken und Abweichungen zwischen den Simulationsrechnungen und den tatsächlichen Gegebenheiten.

Bislang werden Energy-Performance-Gaps meist nur auf Gebäudeebene berechnet und berücksichtigen daher keine Unterschiede innerhalb von Gebäuden. Je nach Lage einer Wohnung kann ihr Energiebedarf allerdings stark vom durchschnittlichen Energiebedarf im Gebäude abweichen (Ling et al. 2015; Weber et al. 2017). Wie Weber et al. (2017) zeigen, kann der Heizbedarf von Wohnungen unter dem Dach und in Randlagen eines Gebäudes bei gleicher Nutzung nahezu doppelt so hoch sein wie derjenige von Wohnungen in Mittellagen. Dies liegt daran, dass die Mittellagewohnungen durch die umliegenden Wohnungen gut isoliert werden und im Vergleich zum Raumvolumen eine deutlich geringere Außenfläche aufweisen.

Durch den Vergleich verschiedener Wohnungen innerhalb eines Gebäudes bei gleichzeitiger Berücksichtigung der wohnungsbezogenen Abweichungen im Heizbedarf lassen sich design- und konstruktionsbedingte Einflussfaktoren kontrollieren und die sich dadurch ergebenden Un-

sicherheiten in Bezug auf den Einfluss des Bewohnerverhaltens reduzieren. Der Zusammenhang von Energy-Performance-Gaps und der Mensch-Technik-Interaktion lässt sich so besser untersuchen.

Allerdings existiert – anders als für Gebäude – keine etablierte Methodik, um den Energiebedarf von Wohnungen zu berechnen, weshalb der wohnungsspezifische Energiebedarf bislang nur in wenigen Studien ausgewiesen wird (eine Ausnahme ist Weber et al. 2017). Gerade für Untersuchungen, die sich für Haushalte innerhalb von Mehrfamiliengebäuden interessieren, müssen jedoch auch bauphysikalische Unterschiede auf Haushaltsebene berücksichtigt werden. Es braucht daher auch einen dem Energiebedarf auf Gebäudeebene entsprechenden Vergleichswert auf Wohnungsebene, um den Einfluss der Komfortpraktiken und der Gebäude-Nutzer-Interaktion auf den Energieverbrauch abschätzen zu können. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde daher eine Methodik zur Schätzung des Heizenergiebedarfs auf Wohnungsebene entwickelt und in den einzelnen Fallstudien angewendet.

2.4.2. Passive und aktive Designstrategien

Für die Gebäudephysik und die Auswirkungen auf den Heizenergiebedarf spielen auch Unterschiede in den Gebäudetechnologien eine bedeutende Rolle. Um den Energiebedarf im Gebäudesektor zu senken, wurden in der Vergangenheit auf EU-Ebene und in Deutschland auf nationaler Ebene – insbesondere für Neubauten – wiederholt Verschärfungen der Bauanforderungen erlassen. Die ersten Maßnahmen nahmen ihren Ausgangspunkt in den Ölkrisen der 1970er Jahre, als die Knappheit von Energie erstmals zum beherrschenden Thema wurde. Da die Heizenergie hauptsächlich über fossile Energien, insbesondere Öl und Gas, bereitgestellt wurde (BDEW 2024), kam der Verringerung des Energieverbrauchs zur Sicherung der Energieversorgung eine große Bedeutung zu. Nach der ersten Weltklimakonferenz im Jahr 1992 erhöhte sich außerdem die öffentliche Wahrnehmung für den Klimawandel als gesellschaftliche Herausforderung. Die Anforderungen an Gebäude wurden seitdem weiter schrittweise verschärft (El-Shagi et al. 2014). Dazu gehörten vor allem Anforderungen an technische Maßnahmen, um den Wärmebedarf von Gebäuden zu reduzieren und die Energieeffizienz zu erhöhen. Durch Maßnahmen zur Dämmung und Abdichtung der Gebäudehülle ließen sich die Transmissionsverluste durch Wände und Decken sowie die Konvektionsverluste durch Undichtigkeiten stark verringern. Am stärksten zeigen sich diese Reduktionen des Energieverbrauchs in Neubauten (El-Shagi et al. 2014).

Allerdings weist die Literatur zu Energy-Performance-Gaps auch darauf hin, dass es sich bei der Reduktion des Heizenergieverbrauchs nicht um ein rein technisches Problem handelt (Zou

et al. 2018; Mahdavi et al. 2021). Eine Kritik lautet, dass passive Design-Strategien wie die Isolierung und Abdichtung der Gebäudehülle Verhaltensänderungen nicht berücksichtigen (Feijter und van Vliet 2021) oder Bewohner die Systeme und ihre Auswirkungen nicht ausreichend verstehen (Zou et al. 2018). Die äußere Gebäudedämmung kam außerdem aufgrund hoher Sanierungskosten oder ästhetischer Bedenken bei Gebäuden, die unter Denkmalschutz stehen, in Kritik – ein gerade für ältere Gebäude mit einem hohen Energiebedarf in Deutschland nicht ungewöhnliches Problem.

Um das Bewohnerverhalten stärker in die technischen Effizienzmaßnahmen einzubeziehen und dadurch zu einer Reduzierung des Energieverbrauchs beizutragen, sind von technischer Seite in den letzten Jahren verstärkt aktive Designansätze wie Gebäudeautomationssysteme und Energiemanagementsysteme in den Entwicklungsfokus gerückt (Beucker et al. 2016; Zou et al. 2018; Nagy et al. 2023). Unterstützt durch den allgemeinen Trend zur Digitalisierung und des „Internet of Things“ haben diese Ansätze inzwischen überdies Eingang in europäische Richtlinien wie die EU-Richtlinie über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (EPBD 2018) gefunden.

Ein wesentlicher Vorteil solcher aktiver Designstrategien wird darin gesehen, dass sich durch intelligente Automationsstrategien auch Informationen zum typischen Nutzerverhalten verwenden lassen, um so Einsparungen zu maximieren. Durch hochauflösendes Monitoring soll die Mensch-Technik-Interaktion weiter verbessert werden und flexibler für den Gebrauch in verschiedensten Situationen werden. Solche Weiterentwicklungen werden dann auch als „Human-in-the-loop-Strategien“ bezeichnet (Zeiler et al. 2014; Zou et al. 2018). In der sozialwissenschaftlich orientierten Forschung werden solche Technologien unter dem allgemeineren und wesentlich weiter gefassten Stichwort der „Smart-Home-Technologien“ ebenfalls schon länger, aber vor allem kritisch, diskutiert (Rohracher 2003; Strengers 2013).

2.4.3. Gebäudetechnologien und Mensch-Technik-Interaktion

Die Gebäudephysik und die Entwicklungspfade bei der Gebäudetechnologie beeinflussen allerdings nicht nur den Heizenergiebedarf, sondern auch, wie das Gebäude auf das Bewohnerverhalten reagiert. Mit der Isolierung der Gebäudehülle steigt auch die Zeitspanne, in der die Temperaturen in Räumen absinken, wenn nicht geheizt wird. Umgekehrt lassen sich Gebäude nur langsam aufheizen, wenn Flächenheizsysteme oder Niedertemperatursysteme zum Einsatz kommen, da diese die Trägheit der Wärmeübertragung erhöhen (Laasch und Laasch 2013).

Da sich die Gebäudeabdichtung auch auf die Berechnung der Heizlast und damit auf die Auslegung des Heizungssystems auswirkt, kann sie ebenfalls Einfluss darauf haben, wie schnell

sich ein Raum aufheizen lässt. Effekte des Aufheizens und des Absinkens der Raumtemperatur, die darüber hinaus stark von der Gebäudemasse abhängen, spielen für das Verhalten der Gebäudetechnik und damit als materieller Aspekt der Komfortpraktiken eine große Rolle.

Wie Gebäudenutzer auf solche Effekte reagieren und wie sich dadurch die Komfortpraktiken ändern, kann für den Energieverbrauch und den Bewohnerkomfort eine wesentliche Rolle spielen (Day et al. 2020; Feijter und van Vliet 2021). Und auch die Effektivität von Gebäudeautomation hängt nicht nur davon ab, wie gut bestimmte Parameter überwacht und in automatisierte Funktionsabläufe eingebunden werden können, sondern auch davon, wie Gebäudenutzer diese Technologien in ihre Alltagspraktiken einbinden (McIlvennie et al. 2020; Larsen et al. 2023). Eine zentrale Erkenntnis der sozialwissenschaftlichen Beschäftigung mit verschiedenen Gebäudetechnologien ist daher, dass diese nicht als rein neutrale Kulisse, als Gelegenheitsstruktur oder Ressource, auf die Bewohner nach Belieben zurückgreifen können, zu betrachten sind. Die Präferenzen und Verhaltensweisen von Bewohnern sind nicht unabhängig von den Technologien und Kontextfaktoren, sondern entwickeln und ändern sich in der Interaktion mit diesen Technologien. Entscheidend ist daher, wie Bewohner mit solchen Technologien interagieren und diese in ihre Alltagspraktiken einbetten. In der vorliegenden Arbeit werden dafür sowohl in der Breite bereits etablierte Maßnahmen zur Abdichtung der Gebäudehülle als auch neue und noch relativ wenig verbreitete Maßnahmen zur Gebäudeautomation betrachtet, um die Effekte der Mensch-Technik-Interaktion in Gebäuden und ihre Auswirkungen auf den Heizenergieverbrauch unter verschiedenen materiellen Bedingungen zu untersuchen.

2.5. Mensch-Technik-Interaktion aus sozialwissenschaftlicher Perspektive

Die Adaptive-Thermal-Comfort-Theorie weist darauf hin, dass das Wohlbefinden wesentlich durch das Verhalten der Bewohner und deren Nutzung der Gebäudetechnologien beeinflusst wird. Aus der Perspektive der Techniksoziologie beziehungsweise der *Science and Technology Studies* können Gebäudetechnologien und Gebäude jedoch nicht als neutrale Technologien oder rein passive Mechanismen zur Reduktion des Wärmeverlustes gesehen werden. Eine rein technische oder physikalische Beschreibung von Technologien und ihrer Effekte sowie eine davon unabhängige Betrachtung der Verwendung der Technologien durch die Nutzer greifen zu kurz. Wenn ein Gebäudeteil isoliert wird, handelt es sich dabei um mehr als nur die Reduktion des Wärmeverlustes bei gegebenen Präferenztemperaturen. Und ein Thermostat ist mehr als ein neutrales Werkzeug zur Einstellung der Raumtemperatur. Stattdessen lenkt eine sozio-technische Sichtweise den Blick auf die Interaktion zwischen Technik und Mensch und löst dabei den

oben beschriebenen Dualismus von Verhalten und Technik als unabhängigen Sphären auf (Law und Bijker 1992).

Wenn es um die Effekte von Technologien geht, ist entscheidend zu verstehen, wie einerseits die materielle Umwelt von den Menschen wahrgenommen und angeeignet wird (vgl. Tweed 2013) und wie sie andererseits Verhalten strukturiert und prägt (Schatzki 2011). Ein Konzept, das diese Wechselwirkung zwischen gebauter Umwelt und Mensch betont und den Dualismus zwischen Materialität auf der einen und Sozialität auf der anderen Seite überbrückt, ist das der „Affordance“ (Ingold 2018).

2.5.1. Der Aufforderungscharakter gebauter Umwelt

Zurückgehend auf den ökologischen Psychologen James Gibson (2014 (1979)) beschreibt das Konzept der Affordance, dass die Umwelt allen Lebewesen und damit auch den Menschen bestimmte Handlungsweisen nahelegt und andere erschwert. Ins Deutsche übersetzt kann man auch vom Aufforderungscharakter der technischen Umwelt, kurz Affordanz, sprechen. Die Umwelt bietet dem Menschen bestimmte Möglichkeiten zum Handeln an und bildet gleichzeitig Barrieren für andere Handlungsweisen. Eine Besonderheit des Konzepts ist dabei, dass der spezifische Angebotscharakter von den Praktiken der Menschen und ihrer in der Praxis verorteten Wahrnehmung abhängt (Ingold 2018). Demnach ist die Wahrnehmung bestimmter Eigenschaften der Umwelt nicht nur eine Folge der Umwelt selbst, sondern auch davon, wie Menschen in ihren Praktiken davon Gebrauch machen können (Tweed 2013, S. 555). Nach Ingold (2018) besteht dabei eine grundsätzliche Spannung zwischen einer realistischen Sichtweise, wonach der Angebotscharakter eine intrinsische Eigenschaft der Umwelt ist, und einer relationalen Sichtweise, wonach die Affordanz erst im und durch den praktischen Umgang mit der Umwelt realisiert wird und die Umwelt daher auch erst durch die Interaktion mit ihr hervorgebracht wird. Auch wenn sich dieses Spannungsverhältnis nach Ingold (2018) nicht vollständig auflösen lässt, reicht es im Gebäudekontext aus, festzustellen, dass die gebaute Umwelt im Kontext der Praktiken der Bewohner direkt auf die Bewohner einwirkt, diesen bestimmte Verhaltensweisen nahelegt und insofern den Umgang mit ihr prägt.

Eine solche Affordanz im Gebäudekontext zeigt sich beispielsweise an der manuell bedienbaren und mit Öl oder Gas betriebenen Heizung. Aufgrund der hohen Vorlauftemperatur und des Designs des Heizkörperthermostats scheinen typische Heizkörper (Radiatoren und Konvektoren), wie sie in den meisten Bestandsgebäuden verbaut sind, für viele Bewohner ein Verhalten nahe-zulegen, die Heizkörper jeweils nur für relativ kurze Zeiträume stark aufzudrehen, um die Raumluft zu erwärmen (vgl. Kempton 1986; Goodhew et al. 2017 für eine Diskussion). Von

Bewohnerseite tragen dabei Vorstellungen darüber, wie Komfort unmittelbar und energiesparend erreicht werden kann, ihren Anteil zur Wirkung des Angebotscharakters der Heizung bei. Die Affordanz würde in diesem Fall der Verwendungsweise, wie sie vom technischen Design des Thermostats vorgesehen ist, widersprechen. Nach Vorstellungen der Ingenieure sollte eine Einstellung gewählt werden, die der wahren Präferenztemperatur entspricht. Auf Dauer würde dies im Normalbetrieb zu einem moderat warmen Heizkörper führen, der dem Raum nur so viel Wärme zuführt, wie bei einer gleichmäßig erwärmten Gebäudemasse in der gleichen Zeit durch die Außenwände entschwindet.

Das Konzept der Affordanz weist insofern darauf hin, dass die Art und Weise, wie Bewohner von Gebäuden für ihren Komfort sorgen, zu einem Gutteil in der gebauten Umwelt angelegt ist. Der Angebotscharakter der Umwelt ist jedoch, anders als von Gibson konzeptualisiert, nicht unabhängig von Werten und Bedeutungszuschreibungen (Feijter und van Vliet 2021, S. 1) und damit nicht neutral. Die gebaute Umwelt ist sozial konstruiert, das heißt, es fließen Vorstellungen der Designer in die Technologien ein. So werden Designer versuchen, die Tatsache zu nutzen, dass Technologien einen Angebotscharakter haben, um ein in ihren Augen vorteilhaftes Verhalten hervorzurufen.

Nach Akrich besteht daher ein Großteil der Arbeit von Innovatoren darin, ihre Vision der Welt, der Nutzer und über deren Umgang mit Technik in ihre neuen Entwicklungen einzuschreiben (Akrich 1992, S. 208). Technologieentwickler überlegen sich demnach bestimmte Szenarien, in denen ihre Technik zum Einsatz kommt, inklusive der entsprechenden Verteilung von Rollen. Während Akrich diese Rollenverteilung auch als Delegation bezeichnet, benennt sie das Resultat dieser in die Technik eingeschriebenen Nutzervorstellungen als „Skript“, das – ähnlich dem Filmskript – den Nutzern und der Technik verschiedene Rollen zuweist. Sowohl Designer als auch Technik wirken sodann daran mit, dass die Rollen, welche die Technologieentwickler für die Nutzer vorsehen, von diesen auch ausgefüllt werden. Solche Vorschriften, die Nutzer in Form von Bedienungshandbüchern, aber auch technischen Gestaltungen zu einem bestimmten Verhalten bewegen sollen, nennt Akrich „Präskriptionen“ (1992, S. 214). Da das Konzept der Präskription beinhaltet, dass den Menschen bestimmte Handlungsmöglichkeiten angeboten werden, gibt es hier Überschneidungen mit dem Konzept der Affordanz. Der Angebotscharakter geht allerdings über die gezielt eingesetzten Vorstellungen der Designer hinaus und umfasst auch die von den an der Entwicklung beteiligten Akteuren nicht-intendierten Effekte.

Norman (2013 (1988)) weist darauf hin, dass der Angebotscharakter nicht unbedingt sichtbar ist und dass für Designer daher „Signifikanten“, also Bedeutungsanzeiger, wichtiger seien als

Affordanzen. Da Designer häufig den gewünschten Umgang mit einem Objekt direkt signalisieren möchten, unterscheidet Norman zwischen dem Angebotscharakter eines Objekts (zum Beispiel eines Displays, das dem Nutzer die Berührung anbietet) und dem Signifikanten, einem Hinweis, den der Designer nutzt, um dem Nutzer zu kommunizieren, wo und wie dieser das Display berühren soll. Das Konzept des Signifikanten wiederum hat in diesem Kontext Ähnlichkeiten zum Konzept des „Nudgings“, da es auch dort um die Art und Weise geht, wie Informationen dargestellt werden, um Nutzer zu bestimmten Handlungen zu bewegen (siehe für das Konzept des Nudgings z. B. Kasperbauer 2017).

Die verschiedenen Konzepte weisen also darauf hin, dass Technik zum einen den Menschen bestimmte Entscheidungen nahelegt und Designer diese Tatsache bewusst nutzen, zum anderen – und das ist die Kehrseite –, dass es dabei jedoch immer auch zu nicht-intendierten Effekten und unvorhergesehenen Situationen kommen kann.

So verweist die relationale Dimension des Konzepts der Affordanz bereits darauf, dass der Angebotscharakter nie unabhängig vom Handeln der Akteure ist. Nach Norman hängt ihre Existenz sowohl von den Eigenschaften des Objekts als auch von der interagierenden Person ab (Norman 2013 (1988), S. 11). Feijter und van Vliet (2021) sprechen daher im Gebäudekontext auch von der praktischen Affordanz der Hausbewohner, die davon abhängt, in welcher für sie sinnstiftenden Weise Bewohner Gebrauch von ihrer Umwelt machen.

Durch das Zusammenwirken von Präskriptionen – als gezielt von den Designern genutzten Affordanzen – und weiteren, von den Designern nicht berücksichtigten Affordanzen kann es zu unerwünschten Folgen kommen, zu denen die Bewohner mitunter aktiv beitragen. Wie das Beispiel des Heizkörperthermostats zeigt, bietet die vom Menschen gemachte Umwelt im Zusammenspiel mit den Anforderungen der Bewohner also stets auch Möglichkeiten, die so nicht im Sinne der Erfinder waren.

Um zu verstehen, wie die Interaktion zwischen Technik und Nutzer abläuft, wie Objekte in der Praxis verwendet werden und welche Effekte sich daraus ergeben, muss man in Akrichs Worten daher „zwischen dem vom Designer projizierten Nutzer und dem wirklichen Nutzer, zwischen der im Objekt inskribierten Welt und der durch deren Verschiebung beschriebenen Welt hin- und zurückgehen“ (Akrich 1992, 208f).

2.5.2. Appropriation und Domestizierung von Technologien

Die soziale Konstruktion technischer Artefakte endet folglich nicht mit dem fertigen Design, sondern wird auch in der Nutzung beständig weiter vorangetrieben. Dieser Prozess der fortlaufenden Integration, bei dem die Menschen einen eigenen Sinn in die Interaktion mit der Technik

bringen und dieser von den Entwicklern bisweilen zur Weiterentwicklung der Technik aufgegriffen wird, kann auch als „Domestizierung“ oder „Appropriation“ beschrieben werden.

Lehtonen (2003) beschreibt Domestizierung als einen Prozess, in dessen Verlauf eine Technologie in bestehende technologische und soziale Gefüge eingebettet werden muss. Dabei findet ein Wandel sowohl des Objekts als auch der interagierenden Personen statt. Was sich auf technologischer Seite als Innovation darstellt, lässt sich auf der Seite der Personen als Lernprozess beschreiben. Nicht nur eignen sich Menschen neue Technik an und verändern sie dabei, sondern sie werden im Laufe dieses Prozesses auch affiziert: Aufgrund des fortlaufenden Umgangs und der zunehmenden Geschicklichkeit im Umgang ändert sich die Erfahrung des Umgangs selbst, woraufhin auch neue Bedürfnisse entstehen können.

Das Phänomen der Domestizierung widerspricht damit der Vorstellung, dass Menschen lediglich passiv das annehmen, was eine neue Technologie anbietet. Stattdessen kommt es, in Anlehnung an Latours Beschreibung der „Assoziation“ (Latour 1992, S. 242), zur Entstehung neuer Verbindungen zwischen Technologie und interagierender Person. Im Laufe des Prozesses der Domestizierung werden durch das graduelle Testen und Experimentieren „neue Formen des Wissens gebildet und Antworten auf die Fragen gegeben, wozu die Technik imstande ist, was man mit der Technik machen kann und welche Art der Verbundenheit zu ihr aufgebaut werden kann“ (Lehtonen 2003, S. 371; Eigene Übersetzung). Dabei werden auch bestehende Arrangements und Praktiken getestet, die durch die neue Technik affiziert werden. Das Ergebnis solcher Domestizierungsprozesse sind dann mehr oder weniger stabile Verbindungen zwischen der Technologie und ihren Nutzern (Lehtonen 2003, 382f).

Für eine ähnliche Beschreibung dieses Prozesses, in dessen Verlauf neue Verbindungen zwischen Menschen und Technik entstehen, steht auch das Konzept der Appropriation (Ilmonen 2004). Demnach handelt es sich beim Aneignungsprozess um Arbeit, die einen eigenen Umgang mit Objekten hervorbringt. Für die gleichen grundsätzlichen Anforderungen, die Objekte an eine Person stellen (die Affordanzen), entsteht eine große Variation an Umgangsweisen, je nachdem, wie die interagierende Person diese Objekte in ihren Alltag einbettet (Ilmonen 2004, S. 40).

Dabei können sich im Laufe der Zeit sogar die Objekte selbst ändern, entweder durch direkte Manipulation oder weil neue Nutzungsweisen im Innovationsprozess zu ihrer Weiterentwicklung führen. Rohrer (2003) beschreibt, ebenfalls am Beispiel von Gebäudetechnologien, inwieweit solche Aneignungs- und Domestizierungsprozesse für die Weiterentwicklung von Technologien genutzt werden und sich auf den weiteren Diffusionspfad auswirken können. Denn auch Technologieentwickler sind sich der Lern- und Aneignungsprozesse auf Nutzerseite

bewusst und versuchen oftmals, aus dem praktischen Umgang zu lernen. Diese Anpassungsreaktionen auf Seiten von Nutzern und Entwicklern können schlussendlich dazu führen, dass sich „technologische Dramen“ entspinnen: Es entstehen Spannungen zwischen Entwicklern und Nutzern, in deren Verlauf jede Seite zumindest indirekt versucht, die eigenen Vorstellungen durchzusetzen (Pfaffenberger 1992, zitiert nach Rohrer 2003).

Im Konzept der Affordanz ist also eine Doppelbewegung angelegt: Zwischen dem, was die Umwelt den Nutzern anbietet und nahelegt (und was Teil der materiellen Qualität ist), und dem, was die Menschen daraus machen und wie sich ihre eigenen Erfahrungen und Praktiken dadurch verändern. Diese beiden Seiten lassen sich im Detail zum einen mit den Konzepten der Präskription und zum anderen mit den Konzepten der Domestizierung und Appropriation erläutern.

In den einzelnen Fallstudien werden diese Konzepte aufgegriffen: Technologien sind sowohl mit Ideen der Designer ausgestattet, die diese ihnen eingeschrieben haben, als auch mit einem Angebotscharakter, der in ihrer Materialität als Dingen begründet ist. Mit beidem ist zu rechnen. Aber auch die Gebäudenutzer haben eigene Vorstellungen und eignen sich die Technologien an. In der Kombination der beiden Prozesse entstehen neue, häufig nicht-intendierte oder nicht vorhergesehene Verbindungen. Für Gebäudetechnologien sind gewollte wie ungewollte Effekte entscheidend. Sie zeigen, dass sich die Effekte der Materialität erst im Zusammenspiel von kulturellen Vorstellungen und Praktiken untersuchen lassen, wobei die genannten Konzepte dabei helfen, die große Bandbreite an Interaktionen analytisch nach den verschiedenen Wirkungsmechanismen zu unterteilen und zu untersuchen.

2.6. Mentale Modelle

Wenn es um Gebäudetechnologien und die Gründe für Abweichungen zwischen erwartetem Bedarf und tatsächlichem Verbrauch von Heizenergie geht, ist besonders wichtig, zwischen dem von den Designern intendierten Gebrauch der Technologien und ihrer tatsächlichen Nutzung durch die Bewohner zu unterscheiden. Um nationale Klimapfade zu entwickeln und die Einhaltung von Klimazielen zu überwachen, wird auch auf projizierte Energiebedarfsschätzungen zurückgegriffen. Diese Energiebedarfsschätzungen basieren wesentlich auf Annahmen über das Bewohnerverhalten, wobei insbesondere das Öffnen der Fenster, die Thermostat-Einstellungen und die Innenraumtemperaturen für den Heizenergiebedarf von Bedeutung sind (Andersen et al. 2009; Galvin 2013b). Während ein unbeheiztes Gebäude keine Energie verbraucht, werden selbst im modernsten Gebäude große Mengen an Energie konsumiert, wenn bei offenen Fens-

tern geheizt wird. Auf den Punkt bringt dies der häufig zitierte Titel von Janda (2011): „Buildings don’t use energy: people do.“ Entsprechend haben in der Forschung zum Energieverbrauch in Gebäuden die Heiz- und Lüftungspraktiken besonders viel Aufmerksamkeit erhalten (Peffer et al. 2011; Fabi et al. 2012; Matzat 2019; Mahdavi et al. 2021).

Wie die oben genannten Theorien nahelegen, gibt es durch das Zusammenspiel von „praktischen und materiellen Affordanzen“ (Feijter und van Vliet 2021) eine große Bandbreite an situationsbedingten Gründen, warum sich das Heiz- und Lüftungsverhalten von Person zu Person stark unterscheidet. Die Praxistheorie geht ebenso wie die Theorien zur Domestizierung und Appropriation davon aus, dass es sich beim Verhalten der Personen um stark inkorporiertes – das heißt verkörpertes und damit implizites und nicht reflektiertes – Handeln handelt. Trotzdem können die meisten Menschen, wenn sie danach gefragt werden, ex post Gründe für ihr Verhalten angeben (Giddens 1986). Dabei lässt sich davon ausgehen, dass solche nachträglichen Rationalisierungen verkörpertem Wissen wiederum zu einer Stabilisierung des entsprechenden Verhaltens beitragen. Darüber hinaus bieten sie aber auch Möglichkeiten für Forschende zu verstehen, warum Personen Dinge auf eine gewisse Weise tun. Forscher beschäftigen sich daher seit langer Zeit damit, sogenannte „mentale Modelle“ von Personen nachzuzeichnen und zu untersuchen. Dabei ist insbesondere der Vergleich von mentalen Modellen mit konzeptionellen Modellen, welche die von den Designern intendierte Funktionsweise der Technologien repräsentieren, von Interesse (Norman 2014 (1983)).

2.6.1. Mentale und konzeptionelle Modelle

Ein mentales Modell beschreibt „eine interne Repräsentation der physischen Welt, die den Menschen erlaubt, ein Zielsystem zu verstehen, zu erklären und zu bedienen und die dadurch bewirkten Effekte vorherzusagen“ (Bremer et al. 2020, S. 1; Eigene Übersetzung). Abgeschwächt und in Übereinstimmung mit der Praxistheorie lässt sich das mentale Modell auch als interne Repräsentation beschreiben, die es Personen ermöglicht, ihr Verhalten, wenn danach gefragt, anderen und sich selbst verständlich zu machen. Dabei ist es nicht notwendig, dass diese Beschreibung aus technischer Sicht akkurat ist. Sie muss lediglich insoweit funktional sein, dass sie einem Nutzer erlaubt, Erwartungen über das Verhalten des Zielsystems zu generieren (Norman 2014 (1983), S. 7).

Ein zentrales Resultat aus Studien zu mentalen Modellen zeigt, dass „das Verständnis der meisten Menschen für diejenigen Geräte, mit denen sie interagieren, überraschend dürftig, ungenau spezifiziert und voller Ungereimtheiten, Lücken und idiosynkratischer Eigenheiten ist“ (Nor-

man 2014 (1983), S. 8; Eigene Übersetzung). Ein aufgrund seiner Bedeutung für den Heizenergieverbrauch in Gebäuden häufig untersuchtes Beispiel für ein solches komplexes System ist das Heizkörperthermostat (Karjalainen 2007b; Revell und Stanton 2014; Revell und Stanton 2015; Goodhew et al. 2017). Am Beispiel von Heizkörperthermostaten wird vielfach gezeigt, wie sehr die faktische Nutzung von den Vorstellungen der Designer abweichen kann.

In einer ersten, häufig zitierten Studie aus dem Jahr 1986 argumentiert Kempton, dass die Nutzung von Thermostaten häufig einfachen „Folk-Theories“ folgt. Demnach legen sich Nutzer Erklärungsmuster zurecht, die oft nicht mit der tatsächlichen Funktionsweise der Thermostate übereinstimmen. Verschiedene empirische Studien haben diese Theorie seither bestätigt (Goodhew et al. 2017; Revell und Stanton 2014). Interessanterweise weist schon Kempton (1986) darauf hin, dass ein mentales Modell eines Nutzers nicht mit dem konzeptionellen Modell der Ingenieure übereinstimmen muss, um dennoch funktional zu sein. Es müsse, wie im Fall des Heizungsthermostats, nicht einmal zu einem erhöhten Energieverbrauch führen. Diese Tatsache deutet auf von den Designern in der Implementierung nicht-intendierte Effekte hin, die sich aber nicht zwangsläufig negativ auswirken müssen.

In einer neueren Studie weisen Revell und Stanton (2015) zusätzlich darauf hin, dass es zur Beurteilung der Effekte eines bestimmten Verhaltens nicht nur wichtig ist, welches mentale Modell eine Person auf der Ebene eines einzelnen technischen Geräts wie eines Thermostats besitzt, sondern auch, welches mentale Modell sie auf der Systemebene hat. Je nach Verhalten eines Bewohners – wann welcher Raum wie sehr geheizt wird – hängt der Heizenergieverbrauch nicht nur davon ab, ob die Person die Funktion des Thermostats richtig versteht, sondern auch, ob sie ein korrektes Verständnis der Wärmeströme in der Wohnung hat. Ein korrektes mentales Modell auf Ebene des Thermostats kann trotzdem zu Ineffizienzen führen, wenn falsche Vorstellungen über das Wirken auf der Systemebene der Wohnung bestehen.

In Bezug auf das Steuerungsverhalten von Thermostaten, wie sie sich in Deutschland üblicherweise finden, gilt insbesondere das Übersteuern von Thermostateinstellungen als problematisch (Goodhew et al. 2017). Dazu kommt es, wenn Bewohner aufgrund einer trägen Reaktion des Heizungssystems und des Wunsches nach schnellerem Aufheizen höhere Systemeinstellungen wählen, als es langfristig ihren Interessen entspricht. Damit tragen sie jedoch zu einer Überhitzung der Wohnung und einem deutlich höheren Energieverbrauch bei (Urban und Gomez 2013).

2.6.2. Die Ausbildung mentaler Modelle im Gebäudekontext

Eine Ausbildung mentaler Modelle, die im Sinne der Entwickler wäre, fällt Bewohnern gerade deshalb schwer, da es sich bei Komfortpraktiken um komplexe und dynamische Prozesse handelt, deren Auswirkungen auf Raumklima und Energieverbrauch nur schwer zu verstehen sind (Revell und Stanton 2015). So lassen sich Komfortpraktiken in Gebäuden als eine Reihe von Handlungen oder Entscheidungen verstehen, die in Situationen ablaufen, die als „komplex“, „dynamisch“ und „opak“ zu charakterisieren sind (vgl. Brehmer 1992):

Sie sind erstens komplex, aufgrund der Vielzahl miteinander interagierender Elemente wie der Gebäudehülle, von Fenstern und der Heizungssteuerung. Zweitens sind solche Situationen dynamisch, da wiederholt Entscheidungen notwendig sind, die nicht nur wechselseitig voneinander abhängen, sondern in deren Verlauf sich auch der Zustand der äußeren Bedingungen fortlaufend ändert. Die Veränderungen werden sowohl durch äußere Faktoren (z. B. Wetter) als auch durch die Entscheidungen der handelnden Akteure selbst beeinflusst. Am Beispiel von Gebäuden zeigt sich dies darin, dass sich das Hochstellen der Heizung darauf auswirkt, wie sich der Raum aufheizt. Die Geschwindigkeit, mit der sich der Raum aufheizt, hängt wiederum von verschiedenen Variablen wie der Gebäudehülle, der Außentemperatur und dem Wetter ab. Und die Zeit, die es zum Aufheizen braucht, beeinflusst ihrerseits Folgehandlungen wie das Anpassen von Kleidung. Drittens sind die Situationen opak, da für Bewohner nicht offensichtlich ist, wie die Elemente miteinander zusammenhängen, wie schnell sich das Aufdrehen der Heizung auf die Erwärmung des Raumes auswirkt und wie sich das eigene Wärmebedürfnis mit anderen Handlungen und wechselnden Aktivitäten ändern wird.

Gebäudetechnologien und die mit ihnen verbundenen thermischen Prozesse stellen also vergleichsweise komplexe Prozesse dar, wobei die zunehmende Trägheit der Systeme und damit abnehmende Reaktionsgeschwindigkeit nach einer Interaktion – z. B. aufgrund reduzierter Heizungstemperaturen – die Situation für die Bewohner zusätzlich verkompliziert (Miu et al. 2019). Angemessene mentale Modelle auszubilden, ist daher für Bewohner vergleichsweise schwierig (Revell und Stanton 2014; Goodhew et al. 2017).

Aus Designsicht muss es daher Aufgabe sein, die für den Nutzer relevanten Aspekte der konzeptionellen Modelle so zu kommunizieren, dass die Nutzer in der Ausbildung korrekter mentaler Modelle unterstützt werden. Die von den Designern gewünschte Verwendungsweise muss mithilfe von Signifikanten signalisiert werden (Norman 2013 (1988), S. 14). Gerade bei passiven Technologien wie der Gebäudedämmung ist dies jedoch nicht einfach zu realisieren, da im Vergleich zu normalen Haushaltsgeräten bei solchen Technologien unklar ist, was eine direkte Nutzerinteraktion bedeutet. Anders als ein technisches Werkzeug in der Hand des Benutzers

bildet eine gut gedämmte Wand vielmehr die Kulisse, vor der Handlungen stattfinden. Trotzdem kann sie durch spezifische Affordanzen auf das Handeln der Akteure wirken.

Den Nutzern Handbücher oder andere Informationen für den richtigen Umgang mit Technologien zur Verfügung zu stellen, reicht häufig ebenfalls nicht aus, weshalb einige Wissenschaftler die Bedeutung von Nutzerschulungen (Day und Gunderson 2015) oder die Rolle von Intermediären wie Wohnungsgesellschaften oder Handwerkern (Grandclément et al. 2015) in der Vermittlung zwischen Nutzern und technischen Systemen betonen. Gerade in der Eingewöhnungsphase können sie den Bewohnern Unterstützung bei der Ausbildung korrekter mentaler Modelle bieten. Da solche Ansätze jedoch sehr ressourcenintensiv sind, scheitern sie meist aus finanziellen Gründen. Eine besonders hohe Resonanz scheinen mentale Modelle hingegen im digitalen Bereich erfahren zu haben, wo das Konzept inzwischen umfassend Eingang in die Disziplin der Human-Computer-Interaction und in Designlehrbücher gefunden hat (vgl. Sears und Jacko 2009).

In dieser Arbeit verdeutlicht der Verweis auf die Unterscheidung von mentalen Modellen und konzeptionellen Modellen noch einmal die Notwendigkeit, die Vielfalt an Interaktionen von Menschen mit Gebäudetechnologien in der Praxis zu untersuchen – außerhalb von Laboren. Die Untersuchung von mentalen Modellen bietet Hinweise darauf, wie Nutzer Technologien wahrnehmen, und liefert außerdem das Gegenstück zu den von den Designern entworfenen Skripten. Auch wenn aus praxistheoretischer wie auch aus kognitionswissenschaftlicher Sicht (Clancey 1997; Lave 2004) nicht unbedingt davon auszugehen ist, dass Menschen im Handeln auf interne mentale Repräsentationen zurückgreifen, die sie zuvor von Umweltprozessen gebildet haben, hilft das Konzept des mentalen Modells, um die Rationalisierungen des eigenen Handelns als Gegenstück zu konzeptionellen Modellen und Skripten der Designer zu betrachten. Das Konzept des mentalen Modells dient der vorliegenden Arbeit daher als weiterer Referenzpunkt, um den Unterschied zwischen in das Design eingeschriebenen Nutzervorstellungen und dem tatsächlichen Nutzerverhalten zu analysieren.

3. Forschungsstand zur Mensch-Gebäude-Interaktion

Ein wesentliches Ergebnis des vorherigen Theorieüberblicks ist, dass unsere gebaute Umwelt bestimmte Verhaltensweisen nahelegt – aufgrund bewusster Designentscheidungen (Akrich 1992) sowie aufgrund anderer ungeplanter physikalischer Eigenschaften (Gibson 2014 (1979)). Zusätzlich werden Technologien von Bewohnern angeeignet (Ilmonen 2004), domestiziert (Lehtonen 2003) und in bestehende soziale Praktiken und materielle Arrangements eingebettet

(Rohracher 2003), wodurch auch die von den Designern intendierten Nutzungsweisen unterlaufen werden können. Im Gebäudebereich sind diese Effekte von großer Bedeutung und werden vor allem dann zum Problem, wenn technologische Innovationen, die zur Erhöhung der Effizienz beitragen sollen, diese Effizienzziele durch die Stabilisierung nicht-nachhaltiger Praktiken unterlaufen (Shove 2018). Diese Arbeit untersucht in verschiedenen Fallstudien einige der für einen erhöhten Heizenergieverbrauch verantwortlichen Mechanismen im Mehrfamiliengebäudebestand anhand der Praxistheorie und mithilfe eines sozio-technischen Methodendesigns. Das folgende Kapitel bietet hierfür einen Überblick über zentrale Erkenntnisse aus empirischen Studien, die sich mit der Mensch-Technik-Interaktion in Wohngebäuden und den Auswirkungen auf den Heizenergieverbrauch auseinandersetzen. Aus dieser Forschungsliteratur wird die wesentliche Forschungslücke identifiziert.

3.1. Energy-Performance-Gap und Bewohnerverhalten

Zahlreiche Studien zeigen, dass technische Maßnahmen in Gebäuden häufig nicht zu den gewünschten Einspareffekten führen (Zou et al. 2018). Die Energy-Performance-Gap steht für diese Lücke zwischen Erwartung und Realität, wenngleich sich keine einheitliche Definition und Berechnungsweise durchsetzen konnte (Mahdavi et al. 2021).

3.1.1. Energy-Performance-Gap und Prebound-Effekt

Generell beschreibt die Energy-Performance-Gap die Abweichung zwischen dem aufgrund standardisierter Verfahren berechneten beziehungsweise vorhergesagten Energiebedarf eines Gebäudes und der tatsächlichen, in der Nutzung verwendeten Energie. Bezogen auf die Raumwärme in Wohngebäuden handelt es sich um die Abweichung zwischen der notwendigen Heizlast (wie sie aufgrund der Gebäudephysik und typischer Annahmen über Temperaturen, Luftwechselraten sowie interne und solare Wärmegewinne berechnet wird) und dem tatsächlich gemessenen Heizenergieverbrauch.

Die wissenschaftliche Literatur zum Thema zeigt, dass der tatsächliche Heizenergieverbrauch von Gebäuden sehr häufig den vorhergesagten Bedarf überschreitet (Mahdavi et al. 2021; Zou et al. 2018). Auch haben verschiedene Studien wiederholt gezeigt, dass sich diese Unterschiede im Heizenergieverbrauch nicht auf Unterschiede in der Gebäudeform oder -konstruktion zurückführen lassen (Shi et al. 2019).

Interessant ist in dieser Hinsicht der Vergleich von Gebäuden vor und nach einer Sanierung. Während sich nach Renovierungen zur Reduzierung des Energiebedarfs häufig Energy-Perfor-

mance-Gaps nachweisen lassen, lag der Verbrauch vor der Renovierung häufig unter dem Bedarf (Galvin 2013b; Weber und Wolff 2018). Dieses Phänomen wird auch als Prebound-Effekt bezeichnet (Sunikka-Blank und Galvin 2012). Das gleiche Muster aus Prebound-Effekten vor Sanierung und Energy-Performance-Gaps nach Sanierung findet sich auch in Untersuchungen großer Gebäudebestände. So zeigt sich für die Schweiz wie für Deutschland, dass je niedriger der Energieverbrauch laut Energieeffizienz-zertifikat, desto höher die Energy-Performance-Gap (Cozza et al. 2020; dena 2016).

3.1.2. Bewohnerverhalten als Ursache von Energy-Performance-Gaps

Das Bewohnerverhalten wird als eine wesentliche Ursache von Energy-Performance-Gaps diskutiert. So zeigen sich in vielen empirischen Untersuchungen signifikante Unterschiede im Verbrauchsverhalten von Bewohnern, wobei Hochverbraucher häufig ein Vielfaches der Heizenergie von Niedrigverbrauchern benötigen (Galvin 2013b). Trotzdem bleiben sowohl die Größe des Einflusses als auch die genauen Mechanismen mit vielen Unsicherheiten behaftet (Mahdavi et al. 2021).

Laut der gängigen ökonomischen Erklärung würde eine aufgrund einer Effizienzmaßnahme eingetretene Kostenreduktion eines Energy Services wie Komfort (vgl. Grubler et al. 2012 zum Begriff des Energy Service) zu einer Ausweitung dieses Energy Services und damit zu direkten Rebound-Effekten – häufig daher auch als Take-Back-Effekt bezeichnet – führen (Sonnberger und Gross 2018). Allerdings wird dieser Interpretation vielfach unter dem Hinweis widersprochen, dass es zu kurz gedacht sei, die Erhöhung des Energieverbrauchs als bewusste oder gewollte Erhöhung des Komforts und damit als typischen Rebound zu betrachten (Chiu et al. 2014; Love 2014). In Übereinstimmung mit den in Kapitel 2 dargestellten Überlegungen wird stattdessen von etlichen Autoren darauf hingewiesen, dass es eine Bandbreite an mit der Mensch-Technik-Interaktion in Zusammenhang stehenden Gründen geben kann, warum der Energieverbrauch mit zunehmender Gebäudeeffizienz höher ausfällt.

Eine problematische Interaktion zwischen Bewohnerpraktiken und Gebäudetechnologien als eine mögliche Ursache der Energy-Performance-Gap scheint dabei sowohl etablierte Effizienzmaßnahmen wie die Gebäudedämmung als auch neue Gebäudetechnologien aus dem Bereich der Gebäudeautomation und Smart-Home-Technologien zu betreffen (van Thillo et al. 2022). Während passive Technologien wie Gebäudeisolation in der Praxis nach wie vor im Fokus stehen, werden in der wissenschaftlichen Fachliteratur inzwischen verstärkt die Potenziale aktiver Technologien wie „Smart-Home-Energy-Management-Systeme“ (SHEMS) untersucht (McIlvennie et al. 2020; Nagy et al. 2023).

Bei aktiven Technologien übernimmt die Technik die ‚intelligente‘ Kontrolle, indem wichtige Parameter laufend erfasst werden und sich dadurch ideale Zeitpunkte und die optimale Höhe der Wärmeabgabe bestimmen lassen. Die Nutzer behalten zwar grundlegende Möglichkeiten, um auf die Gebäudetechnik einwirken zu können, da sich wiederholt gezeigt hat, dass der Komfort von Nutzern schon durch das Gefühl fehlender Kontrolle leiden kann (Cole und Brown 2009; Karjalainen 2009). Die wesentliche Kontrolle übernehmen aber die Technologien. Unter Berücksichtigung der Nutzerbedürfnisse können Smart-Home-Energy-Management-Systeme die Energieabgabe flexibel nach dem Energieangebot und der optimalen Systemkonfiguration steuern und so dem Nutzer die Mühe des Systemverständnisses abnehmen.

Hinsichtlich des Nutzerverhaltens scheint sowohl im ingenieurwissenschaftlichen als auch im interdisziplinären Feld nach wie vor eine Sichtweise zu dominieren, wonach Nutzer passive Anhängsel der Technik sind (McIlvennie et al. 2020). Menschliches Verhalten, das als verhältnismäßig stabil betrachtet wird, kann daher in der Optimierung des Systems als fixe Randbedingung berücksichtigt werden. Dass Nutzer passiv sind, heißt in diesem Zusammenhang nicht, dass Nutzer keinerlei Eingriffsmöglichkeiten hätten oder ihr Verhalten nicht ändern müssten. Im Gegenteil müssen sie durch entsprechendes Feedback und eine bessere Rückkoppelung zwischen Systemsteuerung und Nutzerzufriedenheit aktiv in das System eingebunden werden. Allerdings übernehmen die Bewohner dabei nicht selbst die Kontrolle über die Technik, sondern haben höchstens begrenzte Einflussmöglichkeiten.

Eine Weiterentwicklung solcher aktiver Designkonzepte, die zusätzlich das in der Praxis auftretende Problem zu vermeiden versucht, im Vorfeld alle potenziell eintretenden Situationen definieren zu müssen, wird unter dem Begriff der Human-in-the-loop-Ansätze verhandelt (Zou et al. 2018; Zeiler et al. 2014). Solche Ansätze stellen nicht die aktive, die Kontrolle übernehmende Rolle der Technik in Frage, sondern erweitern diese um Methoden der hochauflösenden Datensammlung und künstlichen Intelligenz, um idealerweise in Echtzeit auf sich verändernde Bedingungen reagieren zu können.

Im Vergleich zur ingenieurwissenschaftlichen Sicht scheint bei Planern und Architekten die umgekehrte Sichtweise zu dominieren, wonach der Gebäudeautomation ähnlich den herkömmlichen Gebäudetechnologien wie der Wärmedämmung eine passive Rolle zugeschrieben wird und stattdessen aktive Nutzer gebraucht werden (McIlvennie et al. 2020). Entsprechend betonen Planer und Architekten eher Feedbackfunktionen, um Nutzer mit den notwendigen Informationen zum richtigen Umgang mit Gebäudetechnologien zu versorgen.

Aber auch solche, von der Technik entkoppelte Feedback- und Informationsansätze haben von sozialwissenschaftlicher Seite viel Kritik auf sich gezogen (Brynjarsdóttir et al. 2012; Strengers

2013; Buchanan et al. 2015). Während Feedbackansätze zu einem erhöhten Nutzerengagement führen und Nutzer durch gezielte Informationen zu einem rationaleren Verhalten bewegen sollen, hinterfragen einige dieser Autoren die Prämissen, auf denen solche Ansätze beruhen (Brynjarsdóttir et al. 2012; Strengers 2013). Andere Autoren weisen, unabhängig von dieser fundamentalen Kritik, darauf hin, wie voraussetzungsreich solche Ansätze in der praktischen Umsetzung sind (Lutzenhiser 1993; Buchanan et al. 2015; Sovacool et al. 2020b). In den meisten realisierbaren – das heißt technisch und wirtschaftlich auch umsetzbaren – Situationen sind die Voraussetzungen für erfolgreiche Feedbackansätze kaum zu erfüllen. Wie Experimentalstudien zeigen, sind langfristige und hohe Einsparungen entsprechend mit hohen Zweifeln versehen (Delmas et al. 2013).

Auch wenn Gebäudeautomation häufig als Möglichkeit genannt wird, um Energy-Performance-Gaps zu reduzieren (Aste et al. 2017; Mahdavi et al. 2021, S. 37), werden in bisherigen Umsetzungen selten die prognostizierten Einspareffekte erzielt (Tirado Herrero et al. 2018; Darby 2018; van Thillo et al. 2022). Die daraus resultierende Abweichung zwischen simuliertem und gemessenem Energieverbrauch kann, wie bei passiven Gebäudetechnologien auch, zum Vertrauensverlust und zu Zweifeln an der ökonomischen Rentabilität entsprechender Maßnahmen führen und damit letztlich zur Diffusionsbarriere werden (Aydin et al. 2019; Ahlrichs et al. 2020). Auch im Segment der Gebäudeautomation und Smart-Home-Technologien zeigt sich, dass die Kosten und die Erwartungen über das Einsparpotenzial solcher Technologien eine wesentliche Barriere für deren Diffusion darstellen (Sovacool und Del Furszyfer Rio 2020; Marikyan et al. 2019).

In der Forschung beschäftigen sich Wissenschaftler unterschiedlicher Disziplinen daher schon lange mit den Ursachen von Energy-Performance-Gaps und den systematischen Verletzungen der den Bedarfsrechnungen zugrunde liegenden Annahmen. Die in dieser Arbeit durchgeführten Fallstudien sollen zur Erklärung der Mensch-Technik-Interaktion als möglicher Ursache der in mehrgeschossigen Wohngebäuden auftretenden Energy-Performance-Gaps beitragen.

3.2. Gebäudetechnologien und Raumtemperatur

3.2.1. Ko-Produktion technischer Effizienz und kultureller Komfortpraktiken

Eine grundsätzliche Kritik an der Dominanz rein technisch orientierter Ansätze zur Erhöhung der Gebäudeenergieeffizienz gibt es nicht nur in der praxistheoretischen Forschung zu Komfort und Energiesparmaßnahmen. Die große Bedeutung, die Innovation und technologischer Fortschritt in der Umweltpolitik einnimmt, wird in weiten Teilen des sozialwissenschaftlichen

Nachhaltigkeitsdiskurses sehr kritisch gesehen (Blühdorn 2020; Dörre 2022; Heidenreich 2023).

Nachhaltigkeitsprobleme durch Technologie und Innovation zu lösen, kann vor allem deshalb als attraktiv gelten, da es die Menschen von dem Druck befreit, ihr Verhalten oder, noch gravierender, ihren Lebensstil ändern zu müssen. „Nachhaltigkeit (...) sei wie ein ‚End-of-Pipe‘-Problem zu behandeln, bei dem durch technische Innovationen, Effizienzsteigerungen und die Erschließung neuer Ressourcen der Umbau zu einer nachhaltigen Lebensweise sozusagen auf der Hinterbühne der Gesellschaft erfolgen könne” (Heidenreich 2023, S. 12).

In ähnlicher Weise beschreibt Hajer (1995) diese Vorstellung als das dominante Prinzip des Umweltschutzes in der Umweltpolitik, das als Positivsummenspiel gesehen wird. Demnach würden Umweltschutzprobleme diskursiv so gestaltet, dass sie durch die bestehenden institutionellen und technologischen Rahmenbedingungen bewältigt werden können. Die dem System inhärenten systematischen Widersprüche aus der Dynamik von Politik, Wissenschaft und Technologie, die diese Umweltprobleme erst hervorgebracht haben, sollen sie jetzt lösen.

In Bezug auf Gebäude bezieht sich diese Kritik auf die „Ko-Produktion“ von Versorgungsinfrastrukturen und Gebäudetechnologien sowie der Nachfrage nach Energy Services wie Komfort. Ähnlich wie Hajer in Bezug auf die Umweltpolitik allgemein, kritisiert Shove (2018) am Fokus auf technische Effizienz sowohl die Art und Weise, wie diese üblicherweise definiert wird, als auch ihre prominente Rolle in der Nachhaltigkeitspolitik. Denn durch den Fokus auf Effizienz würden die zugrundeliegenden Lebensstandards und Praktiken, aufgrund derer überhaupt Energie verbraucht werde, nicht nur nicht in Frage gestellt, sondern im Gegenteil sogar gefestigt und reproduziert. Der Fokus auf Effizienzsteigerungen schreibe demnach den Status quo nicht-nachhaltiger Praktiken fest und binde die Bürger damit an den Pfad einer nicht-nachhaltigen Zukunft.

Anstatt Fragen zu stellen, wie der Energiebedarf zur Beheizung einer 100 m² großen Wohnung auf 20 °C reduziert werden könne, auf die sich die technische Zunft üblicherweise konzentriere, müsse eher darüber diskutiert werden, ob es notwendig sei, 100 m² zu beheizen, nur um den Komfort eines Haushalts sicherzustellen (vgl. Sahakian et al. 2021). Ein abstrakter Effizienzbegriff, wie er durch die Kennzahl kWh/m² Heizenergie dargestellt wird, führe zu einer Abstraktion von der Frage, wofür Energie gebraucht werde (Shove und Walker 2014). Die Fokussierung auf die Steigerung der Effizienz durch technische Mittel mache demnach blind für die Geschichte und Dynamik der Erreichung von Komfort (Shove 2018). Durch technische Standards habe sich das Konzept von Komfort im Laufe der Zeit so eingengt, dass die energieauf-

wendige Herstellung als komfortabel geltender Bedingungen normal werde. Eine ähnliche Kritik findet sich auch in der Adaptive-Thermal-Comfort-Theorie (Brager und de Dear 2003): Neue technische Standards hätten eine Nachfrage nach energieintensiv herzustellenden homogenen Innenraumbedingungen erst ermöglicht, deren Auswirkungen es dann durch weitere technische Maßnahmen wieder zu reduzieren gelte.

Durch die Vorstellung eines universell als angenehm geltenden und daher definierbaren Komfortstandards (Chappells und Shove 2005, S. 34) und der Gleichsetzung von Komfort mit einheitlichen Raumbedingungen (Shove 2012) werden neue Konsumpraktiken und kulturelle Normen wie Kleidungsnormen und als inakzeptabel geltende Körpergerüche erst ermöglicht. Gleichzeitig hat die Einführung großskalierter und zentraler Energieversorgungssysteme wie der Zentralheizung dazu geführt, dass Nutzer immer passivere Rollen einnehmen (Rinkinen 2019). Körperliche Anstrengungen und Arbeiten wie das Holzholen entfallen und es wird leicht, viele Räume einheitlich zu beheizen. Eine Folge dieser technischen Entwicklungen, etablierten Standards und angepassten kulturellen Praktiken sei ein Trend zu homogenen und höheren Temperaturen (Rinkinen 2019; Shove 2012; Brager und de Dear 2003).

Für die vorliegende Arbeit folgt daraus, dass die in die Gebäudetechnologien eingeschriebenen Vorstellungen und Standards untersucht werden müssen, um zu verstehen, wie Gebäudetechnologien Komfortvorstellungen prägen.

3.2.2. Homogene Raumtemperaturen als Folge passiver und aktiver Designansätze

Allerdings ist der Trend zu homogenen Innenraumbedingungen nicht nur eine Folge neuer sozio-technischer Standards, sondern auch wesentlich in der Materialität, das heißt den physikalischen Eigenheiten der Technologien, begründet. Während viele Eigenschaften der Gebäudetechnologien, die auch homogene Raumtemperaturen begünstigen, von den Designern bewusst genutzt werden und Teil der Designstrategien zur Verringerung des Heizenergiebedarfs sind, sind andere Eigenschaften von den Designern als Nebenwirkung notwendigerweise in Kauf zu nehmen.

Bei der Dämmung und Abdichtung der Gebäudehülle als der prominentesten passiven Maßnahme zur Reduzierung des Wärmebedarfs ist die verlangsamte Abkühlung und Entkoppelung von wetterbedingten Temperaturschwankungen der entscheidende Mechanismus, um den Energiebedarf zu senken. Aufgrund der verringerten Heizlast lassen sich üblicherweise auch Heizanlagen kleiner dimensionieren oder alternative Niedrigtemperatursysteme nutzen, was allerdings auch die Zeitspanne zum Aufheizen erhöhen kann. Gerade Passivhäuser sind ein Musterbeispiel für diesen Technologiemix. Die Entkoppelung von Außentemperaturschwankungen

trägt auch zu homogenen Innenraumtemperaturen bei. Folglich müssen die Nutzer lernen, mit diesen Technologien zu leben und umzugehen (Zhao und Carter 2020).

In Mehrfamiliengebäuden führen interne Wärmeverschiebungen zwischen den Wohnungen und Räumen außerdem zu einer Angleichung der Temperaturen innerhalb des Gebäudes, die umso stärker ausfällt, desto höher die Außendämmung ist (Kõiv et al. 2012). In einem gut gedämmten Gebäude lässt sich eine Wohnung in günstiger Lage auch ohne zu heizen fast die gesamte Heizsaison über auf moderaten Temperaturen von mindestens 18 °C halten, solange alle anderen Wohnungen gleichmäßig auf 21 °C beheizt werden (Kõiv et al. 2012).

Auch passive Technologien wie Flächenheizsysteme begünstigen gleichmäßige und stabile Temperaturen. Diese Systeme agieren träge, da sich aufgrund der geringeren Vorlauftemperaturen und der Einbettung in die Gebäudematerialien (Fußboden, Wand oder Decke) die Zeitspanne erhöht, um Wärme vom Heizkreis an den Raum zu übertragen (Laasch und Laasch 2013). Da die Gebäudemasse als Speichermasse dient, dauert es länger, bis ein Raum aufheizt, aber auch wieder abkühlt. Solche Systeme erfordern von den Nutzern daher eine vorausschauende und damit gleichmäßigere, homogene Beheizungsstrategie (Madsen 2018), ohne dass dies vornehmliches Ziel des technischen Designs wäre.

Ein weiteres Beispiel, das man zu den passiven Technologien zählen könnte, sind Wärmepumpen, die umso effektiver laufen, je geringer die zu überbrückende Temperaturspreizung ausfällt. Sie werden daher häufig mit Flächenheizkörpern kombiniert und erfordern aus Kosten- und Effizienzgesichtspunkten ebenfalls eine vorausschauende Heizstrategie.

Passive Technologien erfordern daher ein aktives Nutzerengagement (Day und Gunderson 2015). Für einen optimalen Betrieb müssen die Designer die häufig unsichtbaren Affordanzen solcher Technologien daher durch Benutzerhandbücher oder Bewohnerschulungen signalisieren.

Aber auch aktive Designansätze, die darauf abzielen, über flexible Steuereingriffe mittels Gebäudeautomation eine Balance zwischen Komfort und Energieverbrauch herzustellen, neigen dazu, Bewohner dazu zu bewegen, ihre Räume gleichmäßiger zu beheizen. Dabei wird inzwischen vermehrt an Ideen geforscht, Gebäude als thermische Speicher zu nutzen, um den Bedarf an Raumwärme auch mit dem volatilen Angebot von erneuerbaren Energien decken zu können. Algorithmen berechnen dazu in Abhängigkeit von Daten zum Wetter, den Nutzerbedürfnissen und anderen Parametern die optimale Energieabgabe. Da hier die Gebäudemasse als Speicher dient, um Spitzen in der Energieversorgung abzufedern, sollten auch hier starke verhaltensbedingte Fluktuationen der Raumtemperaturen abnehmen (Larsen und Gram-Hanssen 2020; Guelpa und Verda 2021). Ansätze wie „Demand-Side-Management“ und „Demand-Shifting“

machen sich insofern die Vorteile aus der Homogenisierung der Innenraumtemperaturen direkt zunutze, um Leistungsspitzen abzufangen und den System- beziehungsweise Netzbetrieb zu optimieren.

Verschiedene Autoren haben allerdings gezeigt, dass solche aktiven Designstrategien, genauso wie die passiven Strategien, die Gebäudeautomation zur Systemoptimierung nutzen, dem Nutzer meist eine passive Rolle zuschreiben (Day und Heschong 2016; McIlvennie et al. 2020). Hier wird kritisiert, dass sich die Bemühungen zur Einbeziehung der Nutzer meist auf die Bereitstellung von Informationen und Feedback – beispielsweise mithilfe von In-Home-Displays – beschränken. Deren Erfolg beruht allerdings häufig auf einem eindimensionalen rationalistischen Nutzerverständnis und führt daher nicht zu den gewünschten Ergebnissen (Brynjarsdóttir et al. 2012; Strengers 2013).

Die Literatur zeigt, dass gleichmäßigere Raumtemperaturen oftmals durch die Funktionsweise der Technologien bedingt sind und sich auch in Designansätzen finden, die eine proaktive Steuerung der Innenraumbedingungen erfordern. In dieser Arbeit muss daher den Fragen nachgegangen werden, erstens, ob und wie sich Bewohner an diese Bedingungen anpassen beziehungsweise sich ihnen widersetzen, und zweitens, wie sich verschiedene Umgangsstrategien auf den Heizenergieverbrauch auswirken.

3.2.3. Hohe Raumtemperaturen als Nebenfolge moderner Gebäudetechnologien

Verschiedene Studien, die auf Messungen von Innenraumtemperaturen beruhen, haben gezeigt, dass sich tatsächlich eine Homogenisierung der Innenraumtemperaturen über lange Zeiträume abzeichnet. Diese Homogenisierung hängt vor allem mit einer Temperaturangleichung der üblicherweise kälteren Schlafzimmer an die höher temperierten Wohnzimmer zusammen (Mavrogianni et al. 2013; Vadodaria et al. 2014). Zurückführen lässt sich diese Entwicklung unter anderem auf die Verbreitung von Zentralheizungen und die geringeren Wärmeverluste durch die Gebäudehülle (Teli et al. 2019). Durch neuere Entwicklungen im Bereich von Niedertemperatursystemen könnte dieses Muster, wie oben gezeigt, weiter verstärkt werden. Allerdings scheinen sich die Temperaturen innerhalb von Gebäuden mit zunehmend höheren Energieeffizienzstandards nicht nur anzugleichen, sondern es ist auch eine generelle Erhöhung der Temperaturen damit verbunden. Ein Anstieg der Innenraumtemperaturen ist zum einen eine natürliche Folge der Angleichung der Schlafzimmertemperaturen an die üblicherweise wärmeren Wohnzimmertemperaturen. Zum anderen scheint, wie der Forschungsüberblick von Mavrogianni et al. (2013) auch zeigt, der Trend zu sanierten Gebäuden aufgrund der mit der Gebäudeisolierung verbundenen geringeren Auskühlungsrate allgemein zu höheren Temperaturen zu führen. Dies

wird auch in einer Studie für den deutschen Gebäudebestand bestätigt, in der systematisch Innenraumtemperaturen nach Effizienzklasse der Gebäude ausgewertet werden (Schröder et al. 2018).

Höhere Innenraumtemperaturen können aus verschiedenen Perspektiven problematisch sein. Zum einen weisen einige Autoren darauf hin, dass sich Menschen nicht nur an gleichförmigere Temperaturen (Brager und de Dear 2003), sondern auch an höhere Temperaturen gewöhnen (Meyer 2002; Luo et al. 2016). Die Erwartungshaltung von Menschen passt sich im Laufe der Zeit immer mehr an die Bedingungen an, die auf Grundlage des Heat-Balance-Modells in Klimakammerversuchen festgestellt wurden (Meyer 2002). Daraus kann ein dauerhaft höherer Energieverbrauch resultieren, der dann meist im Sinne des bekannten Rebound-Effekts diskutiert wird (Mavrogianni et al. 2013). Zum anderen gelten zu hohe Innenraumtemperaturen aber auch als potenziell problematisch für die Gesundheit (Mavrogianni et al. 2013). Demnach stellen nicht nur zu geringe Temperaturen ein gesundheitliches Risiko dar, wie regelmäßig unter Bezugnahme auf die WHO erwähnt (vgl. Vadodaria et al. 2014), sondern auch zu hohe Temperaturen, da diese beispielsweise zu erhöhtem Körpergewicht führen können.

Die Gewöhnung an höhere Temperaturen wäre sodann eine typische, nicht-intendierte Nebenfolge technologischen Wandels – hervorgerufen nicht aufgrund bewusster Anpassungen der Bewohner im Sinne eines höheren Komforts und eines gewollten Rebounds, sondern aufgrund der unsichtbaren Affordanzen der Technologien und der Gewöhnung der Bewohner an die damit zusammenhängenden Effekte.

Die genannten Studien legen nahe, dass es nicht nur ein absichtliches Hochdrehen der Heizungen ist, das im Gebäudebestand zu höheren Innenraumtemperaturen führt, sondern dass diese zumindest teilweise auch eine Nebenfolge technologischer Effizienzansätze sein können. Für die vorliegende Arbeit folgt daraus, dass gemessene Temperaturen nicht einfach als Indikatoren für die Komfortpräferenzen der Bewohner gelten können, sondern verstärkt auch darauf geachtet werden muss, wie Bewohner auf höhere Temperaturen reagieren.

3.2.4. Zwischenfazit

Die Forschungsliteratur deutet darauf hin, dass es in Gebäuden einen Trend zu homogenen und höheren Innenraumtemperaturen gibt, der in Teilen durch effizienzorientierte technologische Entwicklungen bedingt ist. Diese Entwicklung scheint in Bürogebäuden besonders ausgeprägt zu sein, da dort häufig deutlich mehr Technik (zum Beispiel Gebäudeautomation) zum Einsatz kommt und Vorstellungen über die optimalen Arbeitsbedingungen unter anderem aus

Produktivitätssicht eine größere Rolle spielen. Diese Entwicklung lässt sich aber auch in Wohngebäuden beobachten.

Im Zusammenspiel mit den baulichen Infrastrukturen verändern sich gesellschaftliche sowie kulturelle Praktiken und es kommt zu Gewöhnungseffekten. Diese werden zum Teil durch die technischen Möglichkeiten ausgelöst, verweisen aber auch auf grundlegendere gesellschaftliche Entwicklungen. Veränderte Kleidungsnormen beispielsweise haben sich im Zusammenspiel mit veränderten Klimatisierungsmöglichkeiten entwickelt (Brager und de Dear 2003; Kuijer und de Jong 2012). Gerade für die Klimatisierung von Bürogebäuden wird der Trend zu homogenen und höheren Innenraumtemperaturen häufig als energieintensiv kritisiert (Brager und de Dear 2003). Ebenso steht dieser Trend aber auch in Wohngebäuden in der Kritik, weil er für die Bewohner – sowohl in Bezug auf den Komfort als auch hinsichtlich gesundheitlicher Aspekte – nicht zuträglich sei (Mishra et al. 2016). Brager und de Dear (2003) weisen darauf hin, dass „thermal variety“ Vorteile habe, da sie „thermal boredom“ entgegenwirke und auch gesundheitlich positiv sein könne. Das Konzept der „Alliesthesia“ greift diese Vorstellung von angenehm wirkenden thermischen Reizen auf (de Dear 2011). Verschiedene Autoren gehen außerdem davon aus, dass stärker mit den Außentemperaturen schwankende Innenraumtemperaturen auch für den Energieverbrauch Vorteile haben, wenn die vollständige Komfortspanne von Menschen ausgenutzt wird, bevor durch technische Maßnahmen (Heizung, Kühlung) gegengesteuert werden muss (Mishra et al. 2016; Shove 2012).

Die Homogenisierung von Innenraumtemperaturen wird daher in der Literatur teilweise kritisch gesehen, scheint zugleich aber zumindest in Teilen eine natürliche Folge moderner Gebäude- und Bautechnologien zu sein. Offen bleibt dabei, inwieweit sich Haushalte an solche homogenen Bedingungen gewöhnen und diese – im Sinne eines selbstverstärkenden Kreislaufs – auch anstreben, oder ob und wie Bewohner auch nach unterschiedlichen thermischen Reizen suchen, wie andere Forschung nahelegt. Diese Frage soll daher auch in den hier durchgeführten Fallstudien untersucht werden.

3.3. Komfortpraktiken und variierende Raumtemperaturen

Es gibt zwar, wie gezeigt, viele Anhaltspunkte für die Entwicklung hin zu homogenen und höheren Innenraumtemperaturen in Wohngebäuden, jedoch zeigen etliche Studien, dass Innenraumtemperaturen in Wohngebäuden nach wie vor stark variieren. Inwiefern Bewohner homogenere Innenraumbedingungen wirklich wollen, ist nicht unumstritten. Das legen Hinweise auf Thermal Boredom (Candido und de Dear 2012) ebenso nahe wie das Verständnis von thermischem Komfort als soziokulturellem Konstrukt beziehungsweise als Praxis, die durch die Ko-

Evolution verschiedener Elemente entsteht (Chappells und Shove 2005). Denn auch heute gibt es in Wohngebäuden noch zahlreiche Möglichkeiten, unterschiedliche Temperaturreize zu erzeugen, und auch über das Jahr gesehen schwanken die Temperaturen durchaus stark. Vor allem aber gibt es zahlreiche Studien, die darauf hinweisen, dass Komfortpraktiken alles andere als einheitlich sind.

3.3.1. Unterschiede zwischen Wohn- und Schlafräumen

In einigen Standards zur Abschätzung des Energieverbrauchs sind Unterschiede in den Innenraumtemperaturen zwischen Wohnräumen festgeschrieben (vgl. Bruce-Konuah et al. 2018). Tatsächlich zeigen viele Feldstudien, dass Schlafzimmer im Winter regelmäßig signifikant kälter sind als Wohnzimmer. In etlichen Studien finden sich hierbei Unterschiede von einigen Grad Celsius.

So berichten Hens et al. (2010) für Belgien Unterschiede von 4°C in den durchschnittlichen wöchentlichen Mittelwerten zwischen Schlafräumen und Räumen, die tagsüber genutzt werden. Ähnliche Unterschiede finden auch Umishio et al. (2020) für Japan. Für Großbritannien hingegen, für das die meisten Studien zu Temperaturunterschieden vorliegen, werden häufig eher geringe Differenzen von einem halben bis zu einem Grad Celsius (Yohanis und Mondol 2010; Hamilton et al. 2017) aufgezeigt. Eine mögliche Ursache hierfür sind kulturelle Differenzen und Unterschiede in der Gebäudehülle (Umishio et al. 2020). Da es sich in Großbritannien meist um freistehende Einfamilienhäuser, Doppelhaushälften und Reihenhäuser handelt, in denen sich Schlafzimmer üblicherweise im oberen Geschoss befinden (Yohanis und Mondol 2010), werden ungeheizte Schlafzimmer möglicherweise stärker mitgeheizt, als dies bei einer ebenerdigen Anordnung der Fall wäre (vgl. hierzu die Gegenüberstellung von Temperaturdifferenzen in Wohn- und Schlafräumen in mehrstöckigen Gebäuden und Bungalows bei Yohanis et al. (2010)).

Üblicherweise werden diese Unterschiede auf die unterschiedliche Nutzung von Schlaf- und Wohnräumen zurückgeführt. Da Schlafzimmer tagsüber meist nicht genutzt werden, müssen diese auch nicht beheizt werden. Allerdings liefern insbesondere qualitative Studien auch immer wieder Belege dafür, dass Bewohner Schlafräume nicht nur aus Energiespargründen, sondern auch aus Komfortgründen kühl halten (Gram-Hanssen 2010; Galvin 2013b; Laakso et al. 2021). Empirische Studien belegen, dass Schlafzimmer auch im Winter deutlich länger gelüftet werden als andere Räume (Guerra-Santin und Itard 2010; Verbruggen et al. 2021).

In Deutschland scheint das Öffnen der Fenster zudem stark mit der Assoziation frischer Luft verbunden zu sein (Berneiser et al. 2024). Gerade das Kipplüften, bei dem Fenster über lange

Zeit offenbleiben, ist in Deutschland eine übliche Lüftungspraktik (Galvin 2013a), die wesentlich zu Unterschieden in Raumtemperaturen beitragen kann. Zwischen 10 und 20% der Haushalte scheinen überdies auch im Winter nachts dauerhaft zu lüften (Berneiser et al. 2024; Verbruggen et al. 2021). Starke Lüftungsunterschiede zwischen Räumen können daher auch zu Temperaturunterschieden beitragen, wobei sich die Lüftungspraktiken stark nach Ländern und Kontext unterscheiden können.

Die Forschungsliteratur bietet damit Hinweise darauf, dass die häufig auftretenden Temperaturunterschiede innerhalb von Wohnungen aufgrund der Komfortvorstellungen der Bewohner verstärkt werden und dabei das Öffnen von Fenstern bedeutend ist. Für die Fallstudien dieser Arbeit liegt, im Anschluss an diese Literatur, daher ein wesentlicher Fokus auf der Untersuchung des Fensteröffnungsverhaltens und der Messung von Temperaturunterschieden zwischen Räumen.

3.3.2. Unterschiede im Tagesverlauf

Auch was Unterschiede innerhalb einzelner Räume oder Wohnungen über den Tag angeht, zeigt die Forschung, dass sich keine einheitlichen, auf eine Dominanz homogener Raumtemperaturen hindeutende Heizmuster finden lassen und es auch sonst große Unterschiede zwischen Haushalten gibt (Huebner et al. 2013; Kane et al. 2015).

In ihrer Studie zu Tagestemperaturprofilen in einer Vielzahl verschiedener Gebäudetypen identifizieren Huebner et al. (2015b) insgesamt vier verschiedene Temperaturmuster: Ein bimodales, zwei unimodale und ein eher flaches Temperaturmuster, wobei der vierte Typ mit eher homogenen Temperaturen nur in ca. 40 % der Haushalte auftritt. Demnach ließe sich kaum von einheitlichen Heizmustern in Haushalten sprechen. Unterschiede in Bezug auf Gebäudecharakteristika zeigen sich vor allem darin, dass sich im Cluster mit homogenen Temperaturen im Gegensatz zu freistehenden Einfamilienhäusern oder Doppelhaushälften mehr Appartements befinden. Dies könnte auf die Wirkung interner Wärmetransfers zwischen Wohnungen deuten. Keine Unterschiede finden sich hinsichtlich der Gebäudeeffizienz oder der Ausstattung mit einer Zentralheizung. Lediglich die Gruppe mit homogenen Temperaturen besitzt häufiger Nachtspeicheröfen. Die Studie von Huebner et al. (2015b) liefert insofern Hinweise darauf, dass bestimmte Gebäudeeigenschaften homogenere Temperaturen begünstigen, ohne diese jedoch zu determinieren. In Übereinstimmung mit Thermal-Comfort-Studien deuten die Ergebnisse außerdem darauf hin, dass etliche Haushalte höhere Temperaturen am Abend präferieren, was, abgesehen von den üblichen Tagesaktivitäten, auch mit dem tagesperiodischen Zyklus der körpereigenen Wärmeproduktion übereinstimmt (Mishra et al. 2016).

Auch eine Studie von Kane et al. (2015), die auf stündlichen Temperaturmessungen in 249 Haushalten basiert, bestätigt den Befund, dass sich Heizmuster von Haushalt zu Haushalt stark unterscheiden, wobei gerade ältere Haushalte, die mehr zu Hause sind, länger und auf höhere Temperaturen heizen. Dass sich Haushalte nicht nur in den Temperaturprofilen und Durchschnittstemperaturen bedeutend unterscheiden, sondern auch hinsichtlich der Heizmuster und Häufigkeit, mit der Heizeinstellungen angepasst werden, betonen Sovacool et al. (2020b) in ihrer Untersuchung von 100 mit einer smarten Heizungssteuerung ausgestatteten Haushalten. Zu ähnlichen Ergebnissen zur Variation von Temperaturen innerhalb von Wohnungen kommt auch eine weitere Studie, in der 17 Haushalte mithilfe von Messdaten untersucht werden (Marszal-Pomianowska et al. 2021). Die Autoren schlussfolgern aus den Ergebnissen, dass die Durchschnittstemperaturen einer Wohnung nur ein schlechter Indikator für die Komfortpraktiken in Wohnungen sind.

Insgesamt zeigen diese Ergebnisse deutlich, dass man nicht davon sprechen kann, dass sich Muster homogener Heizpraktiken und einheitlicher sowie hoher Temperaturen einfach durchsetzen. Trotz technischer Infrastrukturen und entsprechender Normen findet sich in Haushalten eine große Bandbreite an Temperaturmustern. Eine naheliegende Frage ist daher, wie diese Bandbreite mit den oben diskutierten Affordanzen verschiedener Gebäudetechnologien zu homogenen und wärmeren Innenraumtemperaturen zusammenpasst. Weiterhin muss gefragt werden, inwieweit eine solche Variabilität bewusst gewollt ist und welche Auswirkungen sie im Zusammenspiel mit den Gebäudetechnologien hat. Ein wesentliches Thema der vorliegenden Arbeit ist daher, mithilfe eines Methodenmixes, Komfortpraktiken zu untersuchen und zu analysieren, wo diese mit den Effekten der Gebäudetechnologien übereinstimmen und wo sie ihnen widersprechen.

3.4. Erklärungen für Unterschiede des Energieverbrauchs in Gebäuden

Praxistheoretische Studien haben, ähnlich wie Thermal-Comfort-Studien, eine große Bandbreite an Erklärungen für die Variabilität von Komfortpraktiken angeführt. Die wesentliche Erklärung lässt sich praxistheoretisch wie folgt zusammenfassen: So wie Technologien und Infrastrukturen bestimmte Verhaltensweisen ermöglichen und nahelegen, müssen diese Technologien umgekehrt immer auch in soziale Kontexte eingebettet werden. Designer schreiben prospektiven Nutzern nicht nur Rollen zu, sondern Menschen eignen sich Technologien im Alltag durch ihre Handlungen auch aktiv an. Nutzer machen sich die Technologien zu eigen, indem sie neue, kreative Verwendungsweisen ersinnen oder die ursprünglichen Ideen der Designer unterlaufen.

Dieses Wechselspiel zwischen intendierter Nutzung und Aneignung kann im Zusammenspiel mit den unterschiedlichen Sozialisationserfahrungen der Bewohner und Unterschieden in der Haushaltszusammensetzung ein wesentlicher Grund dafür sein, warum es bei Gebäudetechnologien zu Abweichungen zwischen modelliertem Heizenergiebedarf und tatsächlichem -verbrauch kommt. Von Interesse ist dabei, in welchen Situationen es zu einem anderen als dem modellierten Verhalten kommt, welche Muster sich dabei beobachten lassen und warum sich Technologieentwickler trotzdem an bestimmten Nutzervorstellungen orientieren.

3.4.1. Aneignung und Manipulation von Gebäudetechnologien

Der Praxistheorie zufolge sind Bewohner immer schon in bestimmte Praktiken involviert. Dies gilt auch für die alltäglichen Komfortpraktiken. Neue Technologien stehen daher immer unter einem gewissen Anpassungsdruck durch die bereits bestehenden Praktiken, in die sie eingebettet werden müssen. Wenn eine smarte Heizungstechnologie neu in ein Gebäude eingebaut oder die Gebäudehülle gedämmt wird, so müssen die Vorstellungen der Designer mit den bestehenden Komfortvorstellungen, den Gewohnheiten der Bewohner und den existierenden Gebäudetechnologien in Einklang gebracht werden.

Viele Untersuchungen zum Interaktionsverhalten von Nutzern mit Technik haben gezeigt, dass Menschen kreativ darin sind, die Kontrolle über ihre Umwelt zurückzugewinnen, wenn sie den Eindruck haben, ihre Bedürfnisse würden durch das Design von Technologien außer Acht gelassen (Day und Heschong 2016). Selbst bei weitgehend unsichtbaren und im Hintergrund operierenden Technologien wie mechanischen Belüftungsanlagen und in Fenster eingelassenen Lüftungsschlitzen hinterfragen manche Bewohner die materiellen Arrangements und manipulieren diese, zum Beispiel indem sie Lüftungsschlitze abkleben, um Zugluft zu verhindern. Dies wiederum kann negative Folgen für andere Haushalte haben.

Insbesondere bei Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung, wie sie in Passivhäusern Standard sind, hat sich wiederholt gezeigt, dass Bewohner im Widerspruch zum technischen Design bestehende Lüftungsangewohnheiten beibehalten oder Anpassungen am Design fordern (Chiu et al. 2014; Grandclément et al. 2015). Rohrer (2003) beschreibt in Rückgriff auf Pfaffenberger (1992), wie Gebäudenutzer sich aktiv Versuchen von Ingenieuren widersetzen, ihnen Umgangsweisen mit der Technologie vorzuschreiben. Daraus folgen die bereits genannten „technologischen Dramen“: Die Technologien repräsentieren Machtverhältnisse, gegen die sich Nutzer wehren.

Auch Versuche, den Nutzern mehr Kontrolle zu geben und die negativen Effekte der Mensch-Technik-Interaktion auf den Energieverbrauch durch ein besseres Schnittstellendesign zu verringern, stoßen an Grenzen. Dies zeigt sich zum Beispiel beim Einsatz programmierbarer und smarter Thermostate (Meyers et al. 2010; Pritoni et al. 2015; Miu et al. 2019). Zu viele Möglichkeiten der Kontrolle, ein übermäßiges Angebot an Funktionalitäten oder komplexes Feedback können Bewohner überfordern, weshalb immer wieder einfachere Schnittstellen gefordert werden (Karjalainen 2007a; Hargreaves et al. 2017).

Ob eine Benutzerschnittstelle als einfach zu bewerten ist und die Bedienbarkeit einer Technologie erhöht, hängt ebenfalls von vielen Kontextfaktoren ab. So zeigt sich, dass auch bei programmierbaren Thermostaten häufiger die Einstellungen verändert werden, als es die Designer aufgrund der programmierbaren Funktionalitäten erwarten (Miu et al. 2019). Die Annahme, dass es aufgrund stark routinierter und in den Gewohnheiten der Bewohner fest verankerter Komfortpraktiken klare Muster geben müsse, die sich durch die Technik erlernen oder durch die Nutzer selbst programmieren ließen, erweist sich in der Praxis häufig als zu einfach. Stattdessen scheint ein Großteil der Menschen programmierbare Funktionen nicht zu nutzen, sondern auch programmierbare Thermostate manuell und je nach aktuellem Bedarf zu bedienen (Pritoni et al. 2015).

Die Varianz an Nutzungsweisen zeigt sich auch bei der Bedienung von Smart-Home-Systemen. Sovacool et al. (2020b) führen diese auf unterschiedliche Präferenzen zurück, wie einem vornehmlichen Interesse an Komfort, Kosten oder – aufgrund von Werten wie Nachhaltigkeit – am Verbrauch selbst. Die Autoren zeigen zudem, dass verschiedene Funktionen und Aspekte des Heizsystems von Bewohnern unterschiedlich wertgeschätzt werden. Manche Bewohner präferieren Strahlungswärme, während andere mit einer angenehmen Umgebungstemperatur zufrieden sind. Dies zeigt nicht nur, dass die physikalischen Eigenheiten der entsprechenden Systeme ernst genommen werden müssen, sondern auch, dass es auch bei smarten Ansätzen häufig eine große Diskrepanz zwischen der tatsächlichen Nutzungsweise der Technik und der Nutzungsweise gibt, wie sie sich Designer in Bezug auf Komfort und Energieverbrauch erhoffen.

Von Designern intendierte Nutzungsweisen werden ebenfalls konterkariert, wenn Bewohner auf implizitem, praktischem Wissen aufbauen, um Praktiken fortzuführen, die sie selbst als effektiv und sinnvoll erachten (Martin und Larsen 2024). Dabei machen sich Bewohner die Tatsache zunutze, dass Technologien grundsätzlich „interpretativ flexibel“ sind (Pinch und Bijker 2012 (1987); Law und Bijker 1992), das heißt, dass sie diese durch die Einbettung in Praktiken auch in ihrem materiellen Kern verändern können.

Interpretative Flexibilität im Gebäudebereich zeigt sich zum Beispiel dann, wenn Designer oder Handwerker auf Druck der Bewohner hin bestimmte Einstellungen oder Details verändern (Chiu et al. 2014) oder wenn eine Smart-Home-Technologie entgegen den Intentionen der Designer als Instrument für eine veränderte Planung des Energieverbrauchs statt zu dessen Reduzierung genutzt wird (Guasselli et al. 2024). Gerade für Smart-Home-Technologien wird vielfach gezeigt, dass die Art und Weise, wie diese Technologien in bestehende Praktiken eingebettet und dabei von den Bewohnern angeeignet werden, erhebliche Auswirkungen auf die ursprünglich antizipierten Effekte haben kann (Rohracher 2003; Hargreaves et al. 2017; Miu et al. 2019; Guasselli et al. 2024).

Wie bereits oben dargestellt, lässt sich die Aneignung oder Domestizierung von Technologien hierbei als Lernprozess beschreiben, der jedoch in einer hohen Variation an Umgangsweisen münden kann (Rohracher 2003; Lehtonen 2003; Hargreaves et al. 2017). Wie dieser Lernprozess verläuft, hängt wiederum von einer Vielfalt an Faktoren ab. Guasselli et al. (2024) unterscheiden dazu in Bezug auf smarte Technologien verschiedene Einstellungen zu neuen Technologien: Manche Haushalte sind aufgrund steigender Energiepreise und ihres Enthusiasmus für technische Lösungen motiviert, aktiv nach Informationen zu suchen, um Einsparungen zu optimieren. Solche Personen entsprechen am ehesten der Vorstellung des „Ressource Man“ als rationalem und an energiesparenden Funktionen interessiertem Nutzer, wie ihn Strengers (2013) beschreibt. Allerdings gibt es auch andere Arten des Engagements mit Technologien. Manche Nutzer verfolgen einen „learning-by-doing-Ansatz“ und werden eventuell erst im Laufe des Engagement-Prozesses zu Technologieenthusiasten. Einige zeigen sich nach einer Weile enttäuscht oder frustriert, während andere sich aufgrund der wahrgenommenen Komplexität der Systeme, fehlender Motivation oder weil sie die Aufgabe, sich mit der Technik zu befassen, an andere Haushaltsmitglieder delegieren können, komplett aus der Nutzung der Technologien zurück ziehen (Guasselli et al. 2024). Eine komplette Zurückweisung ist allerdings nicht immer möglich, sondern nur, wenn Nicht-Nutzung eine Option ist. Während dies bei vielen Funktionen smarterer Technik der Fall ist, können sich Bewohner bei der Dämmung einer Gebäudehülle oder der Installation eines Niedrigtemperatursystems den Effekten dieser Technologien nicht entziehen.

Theorien zur Aneignung und Einbettung von Technologien weisen insgesamt auf die Notwendigkeit hin, die Einspareffekte von Technologien in einer Vielfalt von Haushalten zu untersuchen, um unterschiedliche Muster in der Aneignung identifizieren zu können. Die Auswahl großer Multi-Appartement-Wohnblöcke, wie sie den Fallstudien in dieser Arbeit zugrunde liegt,

ermöglicht nicht nur die Analyse einer Bandbreite verschiedener Aneignungsweisen, sondern auch der Auswirkungen des sich daraus ergebenden Zusammenspiels innerhalb eines Gebäudes.

3.4.2. Lüftungsverhalten

Spontanes Frösteln, ein anstehender Besuch, oder auch die schlichte Gewohnheit, abends beim Sitzen auf dem Sofa die Heizung aufzudrehen: Es gibt verschiedene Gründe, warum Menschen die Raumtemperaturen erhöhen möchten. Aber auch ein vorübergehender Kältereiz kann in gewissen Situationen als angenehm empfunden werden.

Der Theorie der Alliesthesia (Parkinson und de Dear 2015) zufolge wird ein Wärme- oder Kältereiz dann als angenehm empfunden, wenn er einem Wärmeungleichgewicht im eigenen Körper entgegenwirkt. Die Abkühlung der Raumtemperatur durch das Öffnen eines Fensters kann einen angenehmen Ausgleich schaffen – etwa beim Wärmeüberschuss nach einer häuslichen Sporteinheit oder nach intensiver körperlicher Hausarbeit. Aber auch aus anderen Gründen, zum Beispiel beim Schlafen, werden kältere Temperaturen häufig als angenehmer empfunden. Interviews mit Bewohnern zeigen regelmäßig, dass das Schlafen in kalten Räumen von vielen Menschen als angenehm beurteilt wird, weshalb auch im Winter bei offenem Fenster geschlafen wird (Laakso et al. 2021; Gram-Hanssen 2010). Zum einen schätzen Bewohner die konstante Frischluftzufuhr, insbesondere da kalte Luft, unabhängig von ihrer tatsächlichen Verunreinigung, mit einer positiven Luftqualität assoziiert wird (Fang et al. 1998). Zum anderen kann es eine Reihe anderer Gründe dafür geben, dass Bewohner gerne in kalten Räumen schlafen, wie zum Beispiel, dass sich unter dicken Decken, gepaart mit dem Gefühl frischer Luft, ein besonderes Gefühl der Gemütlichkeit einstellt (Madsen und Gram-Hanssen 2017).

Räume werden jedoch nicht nur aus Komfortgründen kühler gehalten, sondern auch, weil Bewohner die Heizung abdrehen, um Energie und Kosten zu sparen (Madsen 2018). Insbesondere in alten Gebäuden lässt sich der Energieverbrauch damit deutlich reduzieren, wie die Evidenz zum Prebound-Effekt zeigt (Galvin und Sunikka-Blank 2016a). Zusätzliches Lüften ist in alten Gebäuden meist nicht notwendig und führt darüber hinaus im Vergleich zum Gesamtenergieverbrauch zu geringeren Verlusten als in modernen hochgedämmten Gebäuden. Um Energieeinsparungen zu realisieren, ist allerdings entscheidend, wie verschiedene Infrastrukturen zusammenwirken und wie sich Lüftungsgewohnheiten, das Schließen der Zimmertüren oder andere Bewohnerpraktiken daran anpassen (Revell und Stanton 2015; Bauer et al. 2021; van Thillo et al. 2022).

Passive Gebäudetechnologien wie Gebäudedämmung oder Fußbodenheizungen erschweren eine kurzfristige Veränderung der Innenraumtemperatur durch eine Anpassung der Heizeinstellungen. Eine mögliche Folge ist ein verändertes Lüftungsverhalten, um so Kontrolle über die Raumklimatisierung zu erhalten. Verschiedene Studien weisen darauf hin, dass sich aufgrund veränderter Gebäudetechnologien auch neue Lüftungspraktiken entwickeln können (Levie et al. 2014; Madsen 2018; Bauer et al. 2021; Weber 2021). Das Temperaturfeedback durch das Öffnen einzelner Fenster scheint in Niedrigenergiehäusern aufgrund der gleichmäßig erwärmten Gebäudehülle geringer auszufallen, was zu längeren Lüftungszyklen führen kann. Träge, weil mit geringeren Vorlauftemperaturen betriebene, Heizungssysteme hingegen könnten dazu führen, dass Bewohner so heizen, dass sich die Raumtemperaturen am oberen Ende der Komfortskala einpendeln, während sie die Temperaturen verstärkt über das Öffnen der Fenster regulieren.

Die genannten Beispiele zeigen, dass Heizpraktiken grundsätzlich eng mit Lüftungspraktiken verwoben sind, weshalb sie häufig im Rahmen von Komfortpraktiken gemeinsam betrachtet werden. Das Fensteröffnungsverhalten ist, wie die Beispiele zeigen, dabei mindestens so komplex wie das Heizverhalten. Das Fenster zu öffnen, gilt in vielen Haushalten nicht nur als Methode, um für frische Luft zu sorgen, sondern auch als Möglichkeit der Temperaturkontrolle (Rijal et al. 2007). Das Lüften ist darüber hinaus mit verschiedenen Assoziationen und Emotionen verknüpft und spricht verschiedene Sinne an (Hauge 2013). Werden solche Aspekte bei der Auslegung technischer Gebäudeausstattungen (z. B. mechanischer Lüftungsanlagen) nicht ausreichend berücksichtigt, können die positiven Effekte effizienter Gebäudetechnologien leicht konterkariert werden.

Das Lüftungsverhalten muss daher als wesentlicher Aspekt der Interaktion von Komfortpraktiken und Gebäudetechnologien mitbetrachtet werden. In den im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Fallstudien wurden dazu, wenn möglich, auch Messdaten ausgewertet. Entscheidend für die Fallstudien ist die Erkenntnis, dass verschiedene Lüftungspraktiken stark mit dem Heizen und den Versuchen, Energie zu sparen, interagieren können. Die Auswirkungen auf den Energieverbrauch durch Lüftungspraktiken stehen dabei oftmals weniger im Fokus der Bewohner als die Auswirkungen des Heizverhaltens. Insbesondere Situationen, in denen Bewohner in ihrer Wohnung kühle Bedingungen bevorzugen, müssen daher genauer untersucht werden, als bislang geschehen.

3.4.3. Sozioökonomische Ursachen variierender Komfortpraktiken

Die Gründe dafür, dass viele Haushalte zu einer gewissen Variabilität im Raumklima tendieren, obwohl moderne Gebäudetechnologien Passivität und homogene Bedingungen befördern, lassen sich mit der Praxistheorie vor allem in der Heterogenität der Komfortpraktiken und den daraus resultierenden Unterschieden in der Interaktion mit den Gebäudetechnologien erklären. Vor allem Unterschiede in den Verstehensweisen (Hauge 2013; Madsen und Gram-Hanssen 2017; Marszal-Pomianowska et al. 2021), Wissensbeständen (Guasselli et al. 2024; Martin und Larsen 2024) und der Art der Interaktionen (Guasselli et al. 2024) zwischen und innerhalb von Haushalten sind hier entscheidend. Neben diesen Unterschieden in Komfortpraktiken werden in der Literatur aber auch eine Reihe anderer Gründe dafür angeführt, warum sich das Verhalten zwischen verschiedenen Haushalten unterscheiden kann.

Vor allem Unterschiede bei sozioökonomischen und demografischen Faktoren werden gemeinhin als wesentliche Ursache für Unterschiede im Energieverbrauch vermutet. Diese Faktoren werden insbesondere in Studien untersucht, die auf sozialpsychologischen Ansätzen beruhen (vgl. Huebner et al. 2013; Guerra Santin 2013; D'Oca et al. 2017). In praxistheoretischen Ansätzen hingegen, wie sie üblicherweise in *Energy Studies* auftauchen, werden Unterschiede in der Demografie und dem sozioökonomischen Hintergrund von Haushalten meist kaum thematisiert. Zugespitzt mit Galvin und Sunnika-Blank (2016b, S. 66) formuliert: „The practitioners described in energy studies are all remarkably uniform.“ Allerdings sind Praktiken, wie die Autoren im Rückgriff auf Bourdieu und Giddens betonen, eindeutig mit dem sozioökonomischen Status verbunden. Aus welchem Milieu eine Person stammt, bestimmt wesentlich, welche Vorstellungen, Fähigkeiten und Ressourcen sie in Bezug auf bestimmte Praktiken mitbringt und wie sie diese Praktik ausübt. Die Praxistheorie trägt zum Verständnis bei, dass der sozioökonomische Status die Handlungen der Menschen nicht determiniert, sondern dass sich ihre Kompetenzen, Affekte, Motivationen und Bedürfnisse, die durch die Sozialisation geprägt sind, durch die wiederholte Ausübung der Praktiken stabilisieren, aber auch ändern können.

Als bedeutendste demografische Faktoren werden meist die Haushaltszusammensetzung und das Alter genannt (Guerra Santin 2017), auch wenn der Einfluss in empirischen Studien meist nicht sehr groß ist (Guerra Santin 2011; Huebner et al. 2015a; Gram-Hanssen 2013), was sich zum Teil durch vermittelnde Effekte erklären lässt. Demnach wird der Energieverbrauch wesentlich davon beeinflusst, ob ein Haushalt aus zwei Erwerbstätigen besteht, die den ganzen Tag außer Haus sind und daher die Temperaturen absinken lassen können, oder ob ein Rentner in der Wohnung wohnt, der die meiste Zeit zu Hause verbringt und dabei überwiegend ruhenden Aktivitäten nachgeht.

Einkommen und Bildung sind zwei weitere Faktoren, denen als sozioökonomische Ursachen des Energieverbrauchs gerade im Alltagsverständnis eine große Bedeutung zugeschrieben wird. Mit Einkommen und Bildung wird häufig die Erwartung verbunden, dass sie zu wesentlichen Variationen in den Komfortpraktiken und dem damit verbundenen Energieverbrauch führen sollten. Personen mit höherem Einkommen lebten häufiger in gut sanierten Eigenheimen oder energieeffizienten Mietgebäuden und seien, einem weit verbreiteten Stereotyp zufolge, kostensensibler bzw. rationaler in ihren Entscheidungen.

Im Zusammenhang mit Einkommen wird insbesondere in Deutschland außerdem die Abhängigkeit von Transferleistungen als zentrale Ursache für einen hohen Energieverbrauch vermutet. Da in Deutschland die Heizkosten für Empfänger von Sozialleistungen vom Staat gezahlt werden, bestehe für diese Gruppe kein Anreiz, Heizkosten zu sparen. In der Folge werde in solchen Haushalten zu viel geheizt, während andere Haushalte aus Kostengründen auf sparsamere Komfortpraktiken wie das Tragen wärmerer Kleidung in Innenräumen achten würden.

Darüber hinaus werden die Effekte von Einkommen und Bildung, aufgrund des zwischen ihnen bestehenden Zusammenhangs, häufig nicht klar unterschieden. Nach einer weit verbreiteten Auffassung verhalten sich gebildete Personen – Personen, die üblicherweise auch höhere Einkommen erzielen – umweltbewusster, weil sie die Zusammenhänge zwischen eigenem Verhalten, den Umweltauswirkungen und den Energiekosten besser verstehen und sich rationaler verhalten. Diese Annahme liegt, zumindest implizit, auch den Informations- und Feedbackansätzen zugrunde, da sie den Menschen die notwendigen Informationen mit den dazugehörigen Anreizen vermitteln und so zu einem rationaleren Verhalten beitragen sollen.

Insbesondere für die einkommensschwächsten Haushaltssegmente wird in Deutschland daher – sei es aufgrund mangelnder Bildung oder mangelnder Anreize – häufig der Vorwurf erhoben, verschwenderisch mit Heizenergie umzugehen. Allerdings ist, wie viele Studien zeigen (Huebner et al. 2015a; Kane et al. 2015; Weber et al. 2017) der Zusammenhang zwischen soziodemografischen Variablen und Komfortpraktiken häufig nicht besonders stark. Der Zusammenhang zwischen dem Empfang von Transfergeldzahlungen und dem Heizenergieverbrauch ist darüber hinaus nur schwach ausgeprägt und wird von etlichen anderen Effekten überlagert, die nicht unabhängig vom sozioökonomischen Status betrachtet werden können (Rehdanz und Stöwhase 2008).

So finden sich in der Studie von Rehdanz und Stöwhase für Haushalte, denen die Heizkosten erstattet werden, im Vergleich zu einer Gruppe mit ähnlichen Merkmalen, die keine Subvention erhalten, zwar signifikant höhere Heizausgaben von 5 %. Allerdings ist es den Autoren nicht

möglich, beim Vergleich zur Kontrollgruppe auch die Energieeffizienz der Gebäude zu kontrollieren. Eine neuere Studie von Felder et al. (2023) zeigt ebenfalls, dass die Heizkosten für Transfergeldempfänger, denen die Heizkosten gezahlt werden, im Schnitt ca. 5 € pro Monat höher liegen. Die gleiche Studie weist aber auch darauf hin, dass diese Haushalte häufiger in Gebäuden leben, die aufgrund ihres Baualters mit großer Wahrscheinlichkeit weniger energieeffizient sind. Sie wohnen außerdem häufiger zur Miete in Gebäuden, die mit Fernwärme versorgt sind, weshalb sie in den letzten 20 Jahren im Vergleich zu anderen Energieträgern tendenziell höhere Energiepreise zu tragen hatten (Behr et al. 2024). Vergleicht man Transferhilfeempfänger mit einer einkommensgleichen Kontrollgruppe hinsichtlich ihrer Stromausgaben, die nicht vom Staat übernommen werden, zeigt sich, dass diese für Transferhilfeempfänger trotzdem höher liegen. Dies legt die Vermutung nahe, dass fehlende Anreize höchstens in geringem Maße eine Rolle für höhere Verbräuche spielen (Felder et al. 2023).

Grundsätzlich besteht die Schwierigkeit aller Vergleichsstudien darin, dass Haushalte, die von Sozialleistungen abhängig sind, häufig auch in Gebäuden mit geringerer Effizienz leben. Die Größenordnung der möglichen Einsparungen weist außerdem darauf hin, dass der Aufwand, Energie zu sparen, im Vergleich zu anderen Herausforderungen, denen sich solche Haushalte gegenübersehen, als relativ hoch einzuschätzen ist.

In Bezug auf das Einkommen zeigt sich, dass dieses den Energieverbrauch nicht beeinflusst oder allenfalls geringfügig erhöht (Wei et al. 2014). Dafür werden in der Literatur verschiedene Gründe angeführt (vgl. Schmitz und Madlener 2018): Erstens ist Heizen ökonomisch betrachtet kein Luxusgut, sondern stellt zum größten Teil eine Notwendigkeit dar. Zweitens heben sich mit steigendem Einkommen verschiedene Effekte gegenseitig auf. Während Besserverdienende häufig in größeren Wohnungen leben, die unter Umständen auch etwas üppiger beheizt werden, sind sie insbesondere aufgrund ihres Arbeits- und Freizeitverhaltens weniger zu Hause und wohnen zudem in Gebäuden höherer Energieeffizienzklassen. Besserverdienende reagieren außerdem weniger sensibel auf Preisanstiege, was ihren ökonomischen Spielraum unterstreicht und dagegenspricht, dass sich diese per se umweltverträglicher verhalten. Unterschiede zwischen verschiedenen Einkommensgruppen hängen folglich weniger von den finanziellen Ressourcen, sondern vielmehr von verschiedenen Elementen der Komfortpraktiken und der gebauten Umwelt ab.

Auch Bildung hat laut der Studie von Schmitz und Madlener (2018) keinen Einfluss auf den Wärmeenergieverbrauch, worauf auch andere Studien hinweisen (Huebner et al. 2015a). Häufig wird in diesem Zusammenhang auf die „Knowledge-Action-Gap“ verwiesen (Frederiks et al. 2015). Demnach übersetzt sich ein besseres Wissen nur sehr bedingt in tatsächliches Verhalten.

Großmann (2017) weist daher darauf hin, dass sich soziodemografische Faktoren wie Bildung und Einkommen meist nicht direkt auf den Energieverbrauch auswirken, sondern miteinander in Wechselwirkung stehen und den Energieverbrauch eher indirekt, z. B. über den Zugang zu energieeffizienten Gebäudetechnologien, beeinflussen. Zu einem ähnlichen Ergebnis kommt auch die umfassende Review-Studie von Frederiks et al. (2015), die die häufig widersprüchlichen Ergebnisse damit erklärt, dass das komplexe Zusammenspiel verschiedener Faktoren eindeutige Schlussfolgerungen hinsichtlich einzelner Einflussgrößen erschwert und die Ergebnisse daher oft von den untersuchten Kontrollvariablen abhängen.

Die aufgeführten Ergebnisse scheinen den in dieser Arbeit gewählten Fokus auf Praktiken und ihr Zusammenspiel mit materiellen Arrangements zu unterstützen, um die Variation des Heizenergieverbrauchs in Haushalten zu untersuchen. Verhalten ist stark habitualisiert und in verschiedenen kulturellen Praktiken, Wissensbeständen und materiellen Settings eingebettet. Dazu kommt, dass bei Untersuchungen auf Haushaltsebene immer auch die Interaktionseffekte zwischen verschiedenen Haushaltsmitgliedern zu berücksichtigen sind, da Haushalte selten als Einheit agieren (Offenberger und Nentwich 2013; Offenberger 2016; Sovacool et al. 2020a).

Wie Galvin und Sunikka-Blank (2016b) richtig festgestellt haben, kann es von Interesse sein, in Praxisstudien stärker auf Unterschiede zwischen verschiedenen Milieus und sozioökonomischen Gruppen einzugehen, innerhalb derer sich aufgrund spezifischer Sozialisationserfahrungen über die Zeit auch unterschiedliche Praktiken ausbilden können. Zu diesem Zweck ist es lohnend, auch Unterschiede in Bildungs- und Einkommensgruppen zu berücksichtigen. Allerdings sollte, wie der kurze Forschungsüberblick zeigt, der Fokus auf der Ausübung verschiedener Praktiken und dem Zusammenspiel mit materiellen Arrangements liegen, während eine Betrachtung isolierter Variablen wie Bildung oder Einkommen nicht zielführend ist.

In der vorliegenden Arbeit stand, aufgrund der Konzentration auf bestimmte materielle Arrangements innerhalb eng umgrenzter Fallstudien, die Untersuchung systematischer Unterschiede zwischen Einkommens- oder Bildungsgruppen nicht im Vordergrund, sondern stattdessen die für den Heizenergieverbrauch wesentlichen Aspekte der Komfortpraktiken. Dafür wird an der Erkenntnis angeknüpft, dass Bildung oder Einkommen selbst nur von nachrangiger Bedeutung sein dürften.

3.5. Fazit zum Forschungsstand

Der Literaturüberblick zeigt, dass es eine große Variation an Verhaltensweisen und Praktiken im Umgang mit Gebäudetechnologien gibt. Es kann daher leicht zu Unterschieden in Temperaturmustern sowie Energieverbräuchen zwischen Haushalten kommen, wie sie sich auch in der

Praxis regelmäßig zeigen. In Bezug auf die Innenraumtemperaturen zeigt sich zusätzlich, dass auch innerhalb von Haushalten häufig regelmäßige und unregelmäßige Schwankungen auftreten. Die Komfortpraktiken resultieren nur teilweise in regelmäßigen Mustern, bei denen die Innenraumtemperaturen in festen Rhythmen mit dem Heizzyklus schwanken. Die Heterogenität der Innenraumtemperaturen wird – sei es aus Gründen des Wohlempfindens oder aufgrund von Gesundheitsaspekten – zumindest von einigen Personen als positiv bewertet. Nicht so klar ist hingegen, wie der Zusammenhang zwischen Variationen in den Raumtemperaturen und dem Heizenergieverbrauch bewertet werden soll.

In der Literatur zum Thema ist es nicht unüblich, die Heterogenität und Dynamik in den Innenraumbedingungen aufgrund der stärkeren Harmonisierung mit den Außentemperaturen als für den Energieverbrauch positiv zu bewerten (vgl. Mishra et al. 2016). Insbesondere die durch technische Ansätze ermöglichten, gleichmäßigen und von natürlichen Schwankungen der Umwelt entkoppelten Temperaturen haben aufgrund ihrer energieintensiven Bereitstellung bei verschiedenen Autoren Kritik ausgelöst (Brager und de Dear 2003; Shove 2018): Demnach entstehe bei Bewohnern im Laufe der Zeit die Erwartung, ihre Umwelt an die eigenen, zunehmend enger definierten Bedürfnisse anpassen zu können.

Vor dem Hintergrund dieser Forschungsergebnisse stellt sich allerdings die Frage, inwiefern nicht stärker zwischen vom Wetter beeinflussten und durch die Praktiken der Bewohner erzeugten Schwankungen in den Raumtemperaturen differenziert werden muss. Vor allem das Zusammenspiel von Komfortpraktiken und Gebäudetechnologien muss dabei in den Fokus rücken: Wie passt die von Bewohnern gewünschte Variabilität mit standardisierten und auf Homogenität zielenden Gebäudetechnologien zusammen? Und wie verhält sie sich im Vergleich zu herkömmlichen Gebäudetechnologien?

Dabei scheint ein Spannungsverhältnis zu existieren zwischen denjenigen Komfortpraktiken der Bewohner, die nach heterogenen Innenraumtemperaturen streben, und wiederum neueren Gebäudetechnologien, die vor allem durch homogenere Temperaturen zur Energieeffizienz beitragen. Oder allgemeiner formuliert: Es besteht ein Spannungsfeld zwischen einerseits den Anforderungen der Technologien und andererseits der Art und Weise, wie sich Menschen Technik aneignen und sie in ihre Praktiken einbetten. Grundlegende Fragen sind dabei, inwieweit Bewohner erwarten, ihre Umweltbedingungen an sich anpassen zu können, und welche (impliziten) Strategien sie dazu verfolgen. Oder aber inwieweit Bewohner sich umgekehrt selbst ihrer gebauten Umwelt anpassen. Da sich die Innenraumbedingungen in Gebäuden vor allem über die Nutzung der Gebäudeschnittstellen und insbesondere durch das Regeln der Heizung und

das Öffnen der Fenster anpassen lassen, stehen diese Aspekte im Fokus der vorliegenden Fallstudien.

Sie untersuchen, wie die Mensch-Technik-Interaktion in Gebäuden abläuft, welche Faktoren dabei entscheidend sind und wie sich die Interaktion auf den Heizenergieverbrauch und die Energy-Performance-Gap auswirkt. Der Schwerpunkt liegt dabei auf vermieteten Mehrfamiliengebäuden in Deutschland. Den drei Fallstudien ist gemein, dass sie auf den dargestellten Überlegungen und Erkenntnissen aufbauen und dabei die verschiedenen Aspekte von Praktiken – Materialität, Bedeutungs- und Verstehensweisen sowie Kompetenzen – berücksichtigen. Konkret fragen die Fallstudien danach, warum mit einer höheren Effizienz in den Gebäudetechnologien auch eine höhere Energy-Performance-Gap einhergeht und welche Rolle dabei nicht-intendierte Nebeneffekte der Mensch-Technik-Interaktion spielen. Dazu werden sowohl etablierte passive Technologien in Form von Wärmedämmung und Abdichtung der Gebäudehülle als auch neue aktive Ansätze aus dem Bereich der Smart-Home-Energy-Management-Technologien betrachtet.

4. Methoden und Daten

Die vorliegenden Fallstudien untersuchen die Mensch-Technik-Interaktion als mögliche Ursache der Energy-Performance-Gap in mehrgeschossigen Wohngebäuden. Sie folgen dabei der von der Praxistheorie geleiteten Annahme, dass es das Zusammenspiel von sozialen und materiellen Elementen in Komfortpraktiken sowie die daraus resultierenden nicht-intendierten Effekte in Form von Wärmeverlusten sind, die wesentlich zum Auftreten von Energy-Performance-Gaps in Wohngebäuden beitragen. Ein Mechanismus, der dafür zentral zu sein scheint, ist das Zusammentreffen von Faktoren, die zu homogenen und heterogenen Innenraumtemperaturen beitragen. Die explorativen Fallstudien analysieren anhand verschiedener Konstellationen, wie verschiedene Komfortpraktiken mit unterschiedlichen Gebäudetechnologien interagieren. Eine implizite Abgrenzung erfolgt dabei gegen die dominante Erklärung, wonach Energy-Performance-Gaps Folge ökonomischer Rebound-Effekte seien, insofern sich Haushalte aufgrund gesunkener Energiekosten nach einer Energieeffizienzmaßnahme bewusst für eine Ausweitung des Komforts auf Kosten des Energieverbrauchs entscheiden.

Die verschiedenen Fallstudien folgen einem Fallstudiendesign, wie es von Yin (2018) beschrieben wird und das, im Sinne von Love und Cooper (2015), auf einer sozio-technischen Forschungsperspektive basiert.

4.1. Sozio-technisches Fallstudiendesign

Fallstudien („Case Studies“) stellen eine eigene Forschungsmethode dar, die sich nach Yin (2018) wie folgt charakterisieren lässt: Eine Fallstudienanalyse ist eine empirische Methode, die ein aktuelles Phänomen – hier die Energy-Performance-Gap in mehrgeschossigen Wohngebäuden – in seinem realen Kontext untersucht. Am Beispiel der Komfortpraktiken in Wohngebäuden umfasst der Kontext dabei so unterschiedliche Aspekte wie soziale und technische Normen, soziopolitische Rahmenbedingungen, Gebäudetechnologien und technologische Entwicklungen oder Wetterbedingungen. Fallstudien zeichnen sich dadurch aus, dass die Grenze zwischen dem zu untersuchenden Phänomen und dem Kontext häufig nicht trennscharf verläuft. Technologien beispielsweise sind im Fall konkreter technischer Konfigurationen sowohl Teil des Gebäudes und der Komfortpraktiken, sie haben als Repräsentanten breiterer technischer Entwicklungen aber auch ihre eigene Entstehungsgeschichte und sind Teil größerer sozio-technischer Systeme.

Fallstudien eignen sich vor allem zur Untersuchung von Phänomenen, bei denen die Anzahl der interessierenden Variablen bzw. möglichen Einflussfaktoren für die Größe der erhebbaren Stichprobe deutlich zu hoch ist oder die Variablen auf vielfältige Weise miteinander interagieren und so komplexe Ursache-Wirkung-Zusammenhänge inklusive Feedbackschleifen erzeugen. Um Ordnung in diese Komplexität zu bringen, beruhen Fallstudien auf verschiedenen Datenquellen und Methoden, die trianguliert werden: Das gleiche Phänomen wird aus verschiedenen Perspektiven und mit verschiedenen methodischen Zugängen untersucht, um die Thesen zu bestätigen oder zu widerlegen. Eine solche Triangulierung ermöglicht es, Unsicherheiten zu reduzieren, die in den einzelnen Ansätzen existieren, um so zu gesicherteren Aussagen zu gelangen. Aufgrund der dargestellten Eigenschaften passt die Fallstudienforschung sehr gut zur Sozialen Praxistheorie, die als Heuristik die theoretische Grundlage für die vorliegenden Fallstudien liefert. Auch praxistheoretische Ansätze zielen darauf, den Kontext zu endogenisieren, also als Teil der Analyse miteinzubeziehen und nicht, wie beispielsweise (quasi-)experimentelle Studien, auszuklammern beziehungsweise durch dessen Kontrolle aus dem Fokus der Analyse zu exkludieren (Shove 2010).

Am Beispiel der Komfortpraktiken in Gebäuden bedeutet dies, dass die Gebäudetechnologien nicht nur als Einflussfaktor beziehungsweise Gelegenheitsstruktur von Komfortpraktiken betrachtet werden, sondern die Entwicklungsgeschichte der Technologien selbst Teil der Analyse werden kann. Technische Normen und die Vorstellungen der Designer darüber, wie Technologien zu funktionieren haben, sind zwar Teil des Kontextes, sollen aber ebenso wie das Verhalten selbst als gestaltbar und damit in der Analyse nicht als externe Größe behandelt werden.

Um Mensch-Technik-Interaktion zu verstehen, muss daher der Kontext nicht einfach als gegeben, sondern im Sinne von Shove (2010) als Teil der Analyse gesehen werden. Da Praktiken als Ensembles gelten, in denen verschiedene Elemente auf vielfältige Weise miteinander interagieren und diese nur für analytische Zwecke trennscharf untereinander und vom Kontext zu unterscheiden sind, scheint ein Fallstudiendesign zur Untersuchung von Praktiken in besonderer Weise geeignet.

In den vorliegenden Fallstudien stehen drei unterschiedliche Ensembles aus mehrgeschossigen Wohngebäuden mit verschiedenen technologischen und sozialen Bedingungen im Fokus der Analyse. Die Wohngebäude bzw. Wohngebäudekomplexe stellen die einzelnen Fälle der jeweiligen Fallstudie dar. Auch wenn die Analyse auf einzelne Komfortpraktiken auf Haushaltsebene fokussiert, ist das Hauptinteresse der Untersuchung die Variation innerhalb der Gebäude. Sie lässt sich wiederum in die Variation innerhalb der einzelnen Haushalte (über den Zeitverlauf und Räume) sowie die Variation zwischen Haushalten innerhalb des gleichen Gebäudes aufteilen. Zum Kontext zählen die jeweiligen technischen und sozialen Normen und Rahmenbedingungen, die für die Komfortpraktiken und die Auswirkungen auf den Heizenergieverbrauch eine Rolle spielen.

Wie der Literaturüberblick gezeigt hat, ist die Frage, wie sich Mensch-Technik-Interaktion auf den Energieverbrauch auswirkt, eng mit einer Vielzahl an Faktoren verbunden, die miteinander interagieren: Menschen bringen aufgrund ihrer Erfahrungen und eigenen Historie Vorstellungen von Komfort in Praktiken ein, die in den konkreten Situationen laufend reproduziert werden und sich dabei auch verändern können. Technologien wiederum prägen Praktiken, werden aber in Praktiken ebenso angeeignet und verändert.

Um Informationen zu den verschiedenen Faktoren zu erfassen, werden unterschiedliche Datenerfassungs- und Auswertungsmethoden verwendet. Zuverlässige Gebäudedaten lassen sich beispielsweise nur bei den Wohnungsgesellschaften erheben und nicht in Befragungen von Bewohnern, die über die technische Ausstattung und den Energiebedarf ihrer Gebäude selten detailliert Auskunft geben können. Für die Erforschung von Praktiken als miteinander verwobenen körperlichen und mentalen Aktivitäten (Galvin und Sunikka-Blank 2016b) sind ebenfalls unterschiedliche Daten zu erfassen. Kaum reflektiertes Verhalten wie etwa das Fensteröffnungsverhalten lässt sich nur bedingt mithilfe von standardisierten Befragungen erheben. Persönliche Motive und Wertschätzungen, aus denen sich subjektive Bedeutungszuschreibungen ableiten lassen, können wiederum nicht über Messdaten erfasst werden.

Die Kombination von Messdaten, Interviewdaten, standardisierten Befragungsdaten oder Beobachtungsdaten ermöglicht daher auch unterschiedliche Zugänge, um das gleiche Phänomen

– nämlich Komfortpraktiken und deren Zusammenwirken mit materiellen Arrangements – zu analysieren. Die Erhebung dieser unterschiedlichen Daten beschränkt aufgrund des damit verbundenen Aufwands allerdings die Möglichkeiten, große Stichproben zu erheben. Die Analyse bleibt daher auf einzelne Wohnblocks beschränkt.

Aufgrund der Kombination technischer und sozialer Daten und Methoden eignet sich ein sozio-technisches Forschungsdesign für die Studien in besonderem Maße. Technische Daten stehen dabei für solche Daten, die direkt über ein physisches oder technisches System Auskunft geben. Ihr ursprünglicher Zweck ist meist die Verbesserung von Modellen oder Algorithmen. Sie dienen damit direkt der Optimierung von Technologien. Als soziale Daten gelten hingegen solche, die über Personen, deren Aktivitäten und sozialen, mentalen oder physischen Zustand informieren (Love und Cooper 2015). In praxistheoretischen Studien werden diese häufig in narrativen Formaten berichtet, während sozialpsychologische Studien eher auf Umfragedaten abzielen.

Sozio-technische Analysen kombinieren nach Love und Cooper (2015) Daten und Methoden aus beiden Bereichen, wobei sie bewusst soziale und technische Daten als „integrierte Ströme“ sammeln, soziale Mechanismen auch mit technischen Daten zu erfassen versuchen und soziale Methoden zur Erforschung von Technik verwenden. Dies passt gut zu Galvins (2013a) Auffassung, wonach sich Praxistheorie als übergeordneter theoretischer Rahmen eignet, um diese unterschiedlichen Datenströme zusammenzuführen und eine Brücke zwischen der physischen und der sozialen Sphäre zu bauen (vgl. auch Galvin 2017). Die Triangulation im Fallstudiendesign kommt dieser Vorstellung sozio-technischer Analysen ebenfalls entgegen, wenn technische Daten nach dem obigen Verständnis zur Analyse sozialer Phänomene und soziale Daten wiederum zur Analyse technischer Phänomene verwendet werden.

Ein wesentliches Gütekriterium von Fallstudien ist nach Yin (2018), dass sie sich mit rivalisierenden Erklärungsansätzen beschäftigen. Dies ist insbesondere notwendig, da ein Ziel von Fallstudien ist, mittels analytischer Generalisierung zu allgemeingültigen Aussagen über empirische Zusammenhänge und Mechanismen zu gelangen (Yin 2018; Flyvbjerg 2006). Dabei geht es darum, aufgrund empirischer Ergebnisse Erkenntnisse hinsichtlich theoretischer Konzepte oder relevanter Mechanismen zu gewinnen, die beispielsweise in einer neuen Interpretation bekannter Zusammenhänge münden können. Die vorliegende Arbeit setzt sich dazu ganz im Sinne der Praxistheorie gegen die alternative Erklärung ab, wonach die Erhöhung des Energieverbrauchs darauf zurückgeführt werden könne, dass sie Folge eines bewussten Effekts einer Komfortanpassung im Sinne eines Rebounds sei. Zwar können gewollte Anpassungseffekte eine Rolle für einen erhöhten Energieverbrauch spielen, aber wie bestehende Studien (vgl. Chiu et

al. 2014; Love 2014) zeigen, greift es zu kurz, die Energy-Performance-Gap einzig als Ergebnis eines bewussten Rebounds zu interpretieren.

In den hier durchgeführten Fallstudien werden stattdessen Mechanismen untersucht, die darauf hinweisen, dass Bewohner nach einer Effizienzmaßnahme nicht absichtlich ihren Komfort erhöhen. Vielmehr wird als Ursache von Energy-Performance-Gaps das Zusammenspiel zwischen Komfortpraktiken, die zu variablen Innenraumbedingungen führen, und materiellen Arrangements, durch die sich die Temperaturen in Gebäuden angleichen, untersucht. Das Fallstudiendesign hilft dabei, solchen alternativen, aber nicht weniger relevanten Erklärungsmechanismen für die Energy-Performance-Gap auf den Grund zu gehen.

Für die Untersuchung der Energy-Performance-Gap ist es dabei nicht notwendig, im Vorfeld zu wissen, inwiefern sich in den untersuchten Gebäuden tatsächlich eine Energy-Performance-Gap zeigt, beziehungsweise wie hoch die Energy-Performance-Gap ist. Grundsätzlich lässt sich für Gebäude jeder Effizienzklasse die Abweichung von Bedarf und Verbrauch berechnen. In einem großen Gebäudebestand zeigt sich üblicherweise ein Kontinuum: Von Prebound-Effekten in Gebäuden niedriger Energieeffizienzklasse zu Energy-Performance-Gaps in Gebäuden mit hoher Energieeffizienz (Cozza et al. 2020). Die Abwesenheit einer Energy-Performance-Gap in Gebäuden hoher Effizienzklasse wäre dann genauso erklärungsbedürftig, wie es auch das wahrscheinlichere Vorfinden einer Energy-Performance-Gap ist.

Durch die Untersuchung verschiedener Mechanismen der Mensch-Technik-Interaktion als möglichen Erklärungen für Energy-Performance-Gaps in Wohngebäuden tragen die einzelnen sozio-technischen Fallstudien zur Beantwortung der übergeordneten Fragestellung dieser Arbeit bei: Wie wirken sich standardisierte technische Infrastrukturen im Zusammenspiel mit vielfältigen sozialen Praktiken auf den Energieverbrauch in Mehrfamiliengebäuden aus?

4.2. Datengrundlage und Auswertungsmethoden

In allen drei Fallstudien werden mehrgeschossige Appartementwohnblöcke untersucht, die durch kommunale Wohnungsgesellschaften vermietet werden. Die Wohnkomplexe repräsentieren verschiedene Gebäudetypen, die nach unterschiedlichen Energieeffizienzstandards errichtet wurden und mit verschiedenen technischen Infrastrukturen ausgestattet sind. Im Rahmen von transdisziplinären Forschungsprojekten – unter Beteiligung sowohl technischer als auch sozialwissenschaftlicher Forschungsinstitute sowie Wohnungsgesellschaften und Messdienstleistern als Akteuren aus der Praxis – wurden dort verschiedene technologische Ansätze getestet und evaluiert. Die Bewohner selbst wurden durch verschiedene Erhebungen wie standardisierte

Befragungen oder Interviews im Rahmen von wissenschaftlich begleiteten Handwerkerbesuchen in die Forschungstätigkeit einbezogen.

Der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit liegt zum einen auf der Untersuchung der Dämmung und Abdichtung der Gebäudehülle als etablierte Maßnahme zur Reduzierung des Heizenergiebedarfs. Zum anderen wird eine neu entwickelte Gebäudeautomations- und Kontrolltechnologie als typisches Beispiel für einen neueren Trend von Effizienzmaßnahmen betrachtet. Intelligente Automationstechnologien werden bislang im Wohngebäudesektor kaum eingesetzt, werden aber hinsichtlich möglicher zukünftiger Energieeffizienzsteigerungen mit großen Erwartungen verbunden (Beucker und Hinterholzer 2022).

Neben diesen unterschiedlichen technischen Konfigurationen repräsentieren die untersuchten Wohnkomplexe auch unterschiedliche Bewohnerstrukturen und wohnungspolitische Rahmenbedingungen. Die Fallstudien decken den typischen kommunalen Wohnungsbestand ab, der sowohl Sozialwohnungen als auch Mietwohnungen mit unterschiedlichen Bewohnerstrukturen umfasst, von Geringverdienern bis hin zu Bewohnern mit höheren Einkommen. Die Gebäude liegen zum einen in einer wohlhabenden, prosperierenden Gemeinde mit der typischen Struktur eines Vermietermarktes und zum anderen in Gemeinden in einer vom Strukturwandel gekennzeichneten Region mit der typischen Struktur eines Mietermarktes. Unterschiede zwischen Vermietermarkt und Mietermarkt zeigen sich vor allem beim Leerstand und den finanziellen Möglichkeiten der Vermieter, in teure Energieeffizienzmaßnahmen zu investieren. Aufgrund der Förderung der Wohnungsgesellschaften im Rahmen verschiedener Forschungsprojekte sind diese Unterschiede für die Ergebnisse der Fallstudien jedoch nicht von Bedeutung.

Zur Untersuchung der Mensch-Technik-Interaktion und ihrer Implikationen für die Energy-Performance-Gap auf Wohngebäudeebene und in Übereinstimmung mit dem sozio-technischen Design werden in allen Fallstudien unterschiedliche Daten kombiniert, darunter Daten zu technischen und physikalischen Aspekten des Energieverbrauchs, zur Demographie und zum Verhalten der Bewohner. Informationen wie Innenraumtemperaturen und Heizenergieverbräuche sind durch Messdaten technischer Apparaturen erfasst. Zusätzlich sind auch technische Daten über die wesentlichen Gebäudetechnologien wie Informationen über die Höhe des Wärmeverlusts oder die Funktionalität der Heizungssysteme erhoben. Um die Gebäudetechnologien zu verstehen, wurden außerdem Dokumente wie Bedienungsanleitungen, technische Beschreibungen oder E-Mails, in denen sich Projektmitarbeiter und Entwickler über Eigenschaften und Verhalten der Technologien austauschen, gesammelt und analysiert.

Für die Analyse der Bewohnerpraktiken sind zusätzlich Informationen über die verschiedenen Alltagspraktiken der Bewohner erfasst, unter anderem die subjektive Einschätzung der Bewohner zu verschiedenen Komfortdimensionen, ihre Heiz- und Lüftungsroutinen sowie ihre Erfahrung und ihr Wissen im Umgang mit neuen Technologien. Dazu werden verschiedene Datenquellen herangezogen: Standardisierte Befragungen dienen dazu, aus der Grundgesamtheit der Bewohner jedes Wohnkomplexes ein möglichst umfassendes Bild über die Heterogenität verschiedener Praktiken zu gewinnen. Dazu gehören Selbstauskünfte zu Einstellungen, vorhandenem Wissen sowie den Bedienungsroutinen verschiedener Gebäudetechnologien. Diese Befragungen dienen außerdem dazu, interessante Fälle zu identifizieren, um diese mit Interviews oder anhand von Messdaten vertieft zu analysieren. Qualitative Daten wie Beobachtungsdaten, Interviewdaten und Gesprächsprotokolle aus Wohnungsbesuchen tragen dazu bei, genauere Einsichten in Komfortpraktiken zu gewinnen, insbesondere über Motive und subjektive Einschätzungen. Diese können die standardisierten Befragungsdaten ergänzen und vertiefen. Interviewdaten mit weiteren Stakeholdern wie Entwicklern, Wohnungsgesellschaften und Dienstleistern helfen dabei, mehr über den Kontext zu erfahren, den Technologien zugrundeliegende Konzepte zu verstehen und Erfahrungen von Bewohnern aus zweiter Hand zu erfassen. Messdaten werden analysiert, zum einen, um Auswirkungen der Technologien und der Gebäudephysik zu erfassen, zum anderen, um die Interaktionseffekte zwischen Bewohnern und Technik nachzuvollziehen.

Während präferierte Innenraumtemperaturen oder Interaktionen mit den Benutzerschnittstellen der Gebäude durch Befragungen meist nur schwer und ungenau zu erfassen sind, kann die Verknüpfung von Messdaten – zum Beispiel der Veränderung von Temperatureinstellungen – mit Selbstauskünften genauere Informationen liefern. Aufgrund selektiver Wahrnehmungsprozesse und der kognitiven Entlastung fällt es Menschen naturgemäß schwer, alltägliche Aktivitäten, die ohne große Reflexion ablaufen und die aber im Detail von vielen verschiedenen Kontextfaktoren abhängen, adäquat zu erinnern und zu beschreiben. Darunter fallen Auskünfte zu Heizungseinstellungen, Heizzeiträumen oder Lüftungshäufigkeiten. Wo möglich, werden daher Befragungsdaten mit Messdaten ergänzt oder verglichen, sodass die für Fallstudien typische Triangulierung stattfindet.

Schließlich wird entsprechend des Fallstudiendesigns auf eine Kombination verschiedener Methoden zurückgegriffen, vor allem qualitativer Methoden, statistischer Verfahren und ethnografischer Beschreibungen, um die verschiedenen Daten auszuwerten. Während die statistischen Analysen von Bedeutung sind, um Muster in den Mess- und Befragungsdaten darzustellen und

um Zusammenhänge zwischen Temperaturen und Heizenergieverbräuchen zu analysieren, können die qualitativen Analysen tiefergehende Erklärungen liefern, warum bestimmte Praktiken vollzogen werden. Diese Kombination aus qualitativen und narrativen Formaten sowie statistischen Verfahren ist eine der Besonderheiten der vorliegenden Arbeit.

Die konkreten Daten und Methoden, die zur Analyse der Fallstudien verwendet werden, sind in der jeweiligen Fallstudie beschrieben.

5. Zusammenfassung der Fallstudien

5.1. *Apartment related Energy-Performance-Gap* (Moeller et al. 2020)

Der Heizenergieverbrauch eines Haushalts wird üblicherweise als Resultat des individuellen Verhaltens der Bewohner und der baulichen Infrastruktur gesehen. Praxistheoretische Ansätze weisen darauf hin, dass ein stärkerer Fokus auf die Interaktionseffekte zwischen Komfortpraktiken und Gebäudetechnologien notwendig ist, um besser zu verstehen, wie Unterschiede im Heizenergieverbrauch zwischen Haushalten zustande kommen. Während die Materialität der Infrastrukturen das Verhalten wesentlich vorprägt, werden diese Technologien gleichzeitig von den Bewohnern auf kreativen Wegen angeeignet und domestiziert – mit weder von den Bewohnern noch den Technologiedesignern intendierten Effekten auf den Energieverbrauch.

Die Fallstudie nimmt die Praxistheorie als Ausgangspunkt, um die Interaktion verschiedener Komfortpraktiken mit der Gebäudephysik gut gedämmter und isolierter Gebäude zu beleuchten. Dabei weitete die Studie den Blick: Während üblicherweise Komfortpraktiken einzelner Haushalte untersucht werden, werden hier die durch die Bauphysik vermittelten Interaktionseffekte zwischen verschiedenen Haushalten innerhalb eines Gebäudes analysiert.

Grundlage, um diese Interaktionseffekte innerhalb von Gebäuden zu untersuchen, sind sechs Wohngebäude, die im Jahr 2011 nach den damals in Deutschland üblichen Effizienzstandards (EnEV 2009) errichtet wurden. Die Gebäude besitzen einen identischen Grundriss, sind in je acht Appartements aufgeteilt und haben eine nahezu gleiche Ausstattung in den Gebäudetechnologien. In allen Gebäuden lässt sich eine deutliche Energy-Performance-Gap beobachten. Während der durchschnittliche Energiebedarf der Gebäude $59 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ betrug, lag der klimabereinigte Verbrauch im Jahr 2011 mit $68 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ im Durchschnitt 15 % höher.

Die Fallstudie basiert im Wesentlichen auf der Sekundärdatenanalyse von Messdaten zu Energieverbrauch, Innenraumtemperaturen, Fensteröffnungsraten und Wetterdaten, ergänzt um Angaben zur Bauphysik. Alle Messdaten stammen aus einem zum Zeitpunkt der Auswertung acht

Jahre zurückliegenden Forschungsprojekt und wurden von der Wohnungsgesellschaft zur Verfügung gestellt. Um einen Eindruck der Gebäude zu erhalten und mit den Kontextbedingungen vertraut zu werden, wurden in den Gebäuden zudem Interviews durchgeführt, die an anderer Stelle (Bauer et al. 2021) im Detail ausgewertet wurden.

Um den Energieverbrauch einzelner Wohnungen sinnvoll abschätzen zu können und Haushalte in Wohnungen unterschiedlicher Lage und Größe hinsichtlich ihres Energieverbrauchs miteinander vergleichen zu können, braucht es auch auf Wohnungsebene einen Referenzwert in Form des Energiebedarfs. Da die Abschätzung wohnungsgenauer Bedarfe bislang weder in der Forschung noch in der Praxis üblich ist, wurde für die Fallstudie eine Methode entwickelt und angewandt, um den Energiebedarf einzelner Wohnungen abzuschätzen und daraus die Energy-Performance-Gap auf Wohnungsebene berechnen zu können.

Als ein wesentlicher Indikator für Komfortpraktiken wird in dieser Fallstudie neben dem Heizverhalten auch das Fensteröffnungsverhalten betrachtet. Dieses dient den Bewohnern nicht nur dazu, das Auftreten von Gerüchen und Luftfeuchtigkeit zu reduzieren und dadurch für frische Luft zu sorgen, sondern auch zur Temperaturregulation. Durch seine Auswirkungen auf den Luftaustausch hat das Fensteröffnungsverhalten einen wesentlichen Einfluss auf den Heizenergieverbrauch. Messungen über Fensteröffnungsraten in normal bewohnten Gebäuden werden jedoch aufgrund des damit verbundenen Aufwands nur in seltenen Fällen erhoben. In dieser Studie wurde die Möglichkeit genutzt, bestehende Daten eines Forschungsprojekts auszuwerten, in dem über den Zeitraum von einem Jahr stündlich die Fensteröffnungsraten und Innentemperaturen gemessen wurden. Diese wurden mit monatlichen Heizenergieverbrauchsdaten und Informationen zur Gebäudephysik kombiniert.

So zeigt die Studie, welche Bedeutung die Bauphysik als materielle Komponente für die Komfortpraktiken in Gebäuden hat und wie die Mensch-Technik-Interaktion in Wohngebäuden sowohl durch Komfortpraktiken der Hausgemeinschaft als auch durch materielle Aspekte des Gebäudes geprägt wird. Interaktionseffekte zwischen verschiedenen Haushalten innerhalb eines Gebäudes sind wesentlich durch die Bauphysik des Gebäudes beeinflusst und führen regelmäßig zu nicht-intendierten Nebenfolgen in Form von internen Wärmeverschiebungen. Werden diese internen Wärmeverschiebungen, die sich aus den Temperaturunterschieden zwischen aneinander angrenzenden Wohnungen ergeben, bei der Abschätzung des Zusammenhangs von individuellem Verhalten und Energieverbrauch vernachlässigt, führt dies dazu, dass der Einfluss der individuellen Heizpraktiken eines Haushalts, wie er üblicherweise durch die Innentemperaturen dargestellt wird, überschätzt wird. Die Studie weist folglich nach, dass Innenraumtemperaturen nur bedingt als Indikatoren für das Heizverhalten eines Haushalts betrachtet werden

können und dass die Variabilität von Innenraumtemperaturen innerhalb von Gebäuden und ihre Auswirkungen auf den Heizenergieverbrauch im Detail untersucht werden müssen.

Die Studie weist die große Variation an Komfortpraktiken direkter Nachbarn nach, ausgewertet anhand der Indikatoren Fensteröffnungsrate, Innenraumtemperaturen und wohnungsspezifischer Energy-Performance-Gaps. Dabei zeigen sich zunächst kontraintuitive Muster, zum Beispiel, wenn einzelne Haushalte trotz hoher Temperaturen sehr geringe Heizenergieverbräuche aufweisen oder es bei Haushalten mit nahezu identischen Werten bei Temperaturen und Lüftungsraten zu sehr hohen Differenzen in den Energy-Performance-Gaps kommt. Eine mögliche Erklärung dafür sind interne Wärmeverschiebungen. Deren Einfluss wurde bereits von anderen Autoren vermutet (Gafsi und Lefebvre 2003; Cali et al. 2016; Osterhage et al. 2016) und kann nun durch die Studie bestätigt und quantifiziert werden. Die statistische Analyse belegt, dass die Größenordnung der internen Wärmeverschiebungen zwischen Wohnungen im Durchschnitt ein Viertel des gesamten wohnungsspezifischen Heizenergieverbrauchs für Raumwärme ausmacht, wobei es große Unterschiede zwischen den Wohnungen gibt.

In der Interpretation der Ergebnisse zeigen sich Hinweise auf verschiedene Mechanismen, die zu höheren Energy-Performance-Gaps führen können. Ein bislang wenig untersuchter Mechanismus ist die Interaktion zwischen den Bewohnern und den Eigenheiten der Gebäudephysik. Aufgrund der Trägheit gut isolierter Gebäude lassen sich diese im Vergleich zu schlecht isolierten Gebäuden schneller aufheizen und kühlen langsamer ab. In der Folge kann es leichter zu Situationen kommen, in denen es Bewohnern zu warm ist, wenn sie an ihrer gewohnten Praxis der Heizungsbedienung festhalten (vgl. hierzu auch Love 2014). Das Öffnen der Fenster bietet sich dann als bequeme Art der Temperaturkontrolle an. Die erhöhte Trägheit der Gebäudehülle kann außerdem das Temperaturfeedback reduzieren und damit zu verlängerten Lüftungszeiten verleiten (vgl. Bauer et al. 2021). Auf jeden Fall scheinen interne Wärmeverschiebungen das Potenzial individualisierter Informationen und Aufforderungen zum Energiesparen leicht an Grenzen zu bringen, wenn Haushalte mit unterschiedlichen Komfortpraktiken und Bedürfnissen in direkter Nachbarschaft zueinander liegen.

Die Studie weist damit erneut auf die Bedeutung nicht-intendierter Effekte der Mensch-Technik-Interaktion in Gebäuden hin und nimmt dabei die bislang wenig erforschten Interaktionen zwischen verschiedenen Haushalten innerhalb eines Gebäudes in den Blick.

5.2. *Energy (in)efficient comfort practices (Moeller & Bauer 2022)*

Die Energy-Performance-Gap kann das Vertrauen, das sowohl Vermieter als auch Mieter in Energieeffizienzmaßnahmen haben, untergraben. Eine wesentliche Frage ist daher, wodurch

Energy-Performance-Gaps zustande kommen. Sind sie Folge eines direkten Rebounds, weil Bewohner nach einer erfolgreichen Effizienzmaßnahme bewusst ihre Heizungen stärker aufdrehen? Oder können sie auch auf Interaktionen zwischen Bewohnern und Gebäudetechnologien zurückgehen, deren Ursachen und Wirkungen für die meisten Bewohner selbst nicht ersichtlich sind?

In der Fallstudie werden die alltäglichen Komfortpraktiken auf Haushaltsebene in zwei großen, mehrgeschossigen und nach heutigen Standards moderat sanierten Wohnblöcken untersucht. Die Fallstudie geht dabei, wie auch die anderen Fallstudien der vorliegenden Arbeit, von einem praxistheoretischen Verständnis von Komfort sowie der Mensch-Technik-Interaktion in Gebäuden aus. Im Fokus stehen dabei Unterschiede innerhalb von Wohnungen beziehungsweise Haushalten, die sich aufgrund der Komfortpraktiken und der Verbindung bestimmter Komfortpraktiken mit verschiedenen Räumlichkeiten ergeben.

Untersucht werden die unterschiedlichen Aktivitäten der Bewohner, die stark mit verschiedenen Lokalisationen in der Wohnung verknüpft sind und für die je unterschiedliche Komfortanforderungen zu bestehen scheinen. Während Schlafzimmer vor allem zum Schlafen genutzt werden und deshalb häufig kühl gehalten werden, dienen Wohnzimmer vor allem zum Entspannen und Essen, weshalb die Wärmeanforderungen dort höher sind. In Küchen wird gekocht – eine aktive Tätigkeit, bei der darüber hinaus viel Abwärme entsteht und weshalb dort üblicherweise viel gelüftet, aber wenig geheizt wird. Badezimmer wiederum werden für die Körperpflege genutzt. Viele Bewohner öffnen dort häufig die Fenster, wollen es aber trotzdem warm. Ergänzend werden auch von den Bewohnern geäußerte Vorstellungen erfasst, die den Zusammenhang von Komfortpräferenzen und häuslichen Aktivitäten begründen können. Schließlich werden die Interaktionseffekte zwischen den verschiedenen Räumlichkeiten innerhalb einer Wohnung betrachtet.

In der Fallstudie werden zwei mehrgeschossige Wohngebäude mit zusammen 88 Wohneinheiten untersucht. Beide Gebäude bewegen sich hinsichtlich ihres spezifischen Heizenergieverbrauchs für Raumwärme von ca. 90 kWh/m²a im Mittelfeld des deutschen Wohngebäudebestandes. Im Vergleich mit dem im Jahr 2019 erhobenen klimabereinigten Verbrauch von 94 und 96 kWh/m²a ergibt sich eine kleine Energy-Performance-Gap von ca. 8 %.

Zur Untersuchung der Komfortpraktiken in den Wohngebäuden wurden insgesamt 34 Face-to-Face-Befragungen durchgeführt, was bei einem Leerstand von 14 % einer Antwortrate von 44 % entspricht. Als zentrales Erhebungsinstrument kam ein standardisierter Fragebogen zum Einsatz. Zusätzlich wurden während der Vor-Ort-Termine aufschlussreiche Bemerkungen der Bewohnerinnen sowie interessante Beobachtungen erfasst und einmalig die Temperaturen in

den verschiedenen Räumen der Wohnung gemessen. Von der Wohnungsgesellschaft wurden außerdem die Heizenergieverbrauchsdaten aller Wohnungen sowie wichtige Gebäudedaten übermittelt, sodass sich hinsichtlich der Daten ein für sozio-technische Fallstudien typischer Mix aus quantitativen und qualitativen Daten ergibt.

Um die Ergebnisse aus den zwei Wohnblöcken zusätzlich zu validieren, wurden die gleichen Analysen mit einem weiteren Datensatz durchgeführt. Diese Daten stammen aus Wohnblöcken mit einer fast identischen Baustruktur. Dort wurde in Face-to-Face-Befragungen derselbe Fragebogen eingesetzt, allerdings konnten keine wohnungsspezifischen Bedarfe berechnet werden. Ebenso wurde auf die qualitative Erfassung von Auffälligkeiten während der Befragungen verzichtet.

Die Lage und das damit verbundene Verhältnis von Außenfläche zu Volumen führt zu Unterschieden in der Gebäudephysik einzelner Wohnungen und damit zu Abweichungen im Heizenergiebedarf innerhalb des Gebäudes. Um in der Analyse auf Wohnungsebene diesen Unterschieden im Heizenergiebedarf gerecht zu werden und die Höhe des Heizenergieverbrauchs eines einzelnen Haushalts beurteilen zu können, wurden auf Grundlage der Daten zur Bauphysik zunächst wohnungsspezifische Bedarfe berechnet. Über den Abgleich mit dem tatsächlichen Verbrauch konnten dann wohnungsgenaue Energy-Performance-Gaps berechnet werden. Diese Methodik wurde bereits in der ersten Fallstudie (Moeller et al. 2020) erarbeitet und konnte hier an weiteren Gebäuden erneut validiert werden. Durch die Berechnung wohnungsspezifischer Energy-Performance-Gaps wird berücksichtigt, dass ein Haushalt, der aufgrund einer in der Gebäudephysik benachteiligten Lage der Wohnung einen im Vergleich zum Rest des Gebäudes überdurchschnittlichen Heizenergieverbrauch hat, trotzdem im Vergleich zum lagespezifischen Bedarf als überdurchschnittlich effizient gelten kann.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Bedarfe einzelner Wohnungen in einem Wohnblock fast um den Faktor 3 voneinander abweichen können. In den untersuchten Wohngebäuden liegt dies vor allem an der im Vergleich zu Niedrigenergiehäusern schlechten Dämmung der Außenhülle. Die Studie zeigt auch, dass der tatsächliche Energieverbrauch einzelner Wohnungen den Bedarf in Einzelfällen ebenfalls um das Dreifache übertrifft, während andere Wohnungen fast gar nicht beheizt werden.

Die Studie liefert, in Übereinstimmung mit dem wissenschaftlichen Kenntnisstand, Hinweise dafür, dass das Heiz- und Lüftungsverhalten der Bewohner im Vergleich zu anderen Verhaltensaspekten die größte Bedeutung für den Heizenergieverbrauch hat. Darunter fallen die Bedienung der Heizungsthermostate sowie das Öffnungsverhalten von Fenstern und Türen. Allerdings ist für den Energieverbrauch nicht nur wichtig, wie sehr geheizt wird und wie oft die

Fenster geöffnet werden, sondern auch, wie diese beiden Elemente mit anderen Aspekten der Komfortpraktiken und des materiellen Kontextes der Wohnungen zusammenspielen.

Hinsichtlich der Komfortpraktiken zeigt sich, dass Wohnzimmer zwar deutlich besser beheizt werden als alle anderen Räume, die Bewohner die Heizung dort jedoch oft nur für ein paar Stunden höher drehen, zum Beispiel, um es sich abends gemütlich zu machen. Zugleich werden Wohnzimmer meist nur kurz belüftet, indem die Fenster vollständig geöffnet werden. Schlafzimmer hingegen werden meist nicht beheizt, da diese tagsüber kaum genutzt werden und viele Bewohner dort zum Schlafen ohnehin kalte Temperaturen wünschen. Die Daten liefern Hinweise darauf, dass für viele Personen eine Assoziation zwischen kalter und frischer Luft besteht, die gerade in Schlafzimmern von hoher Bedeutung ist und die dazu führt, dass etliche Haushalte die Fenster in ihren Schlafzimmern auch im Winter durchgehend gekippt halten. Auch die Küchen mit ihrer verhältnismäßig geringen Grundfläche werden von den meisten Haushalten aufgrund der Entstehung von Wasserdampf und Gerüchen stark belüftet und kaum beheizt – höchstens, wenn die Bewohner sich dort länger aufhalten. Trotzdem bleiben in vielen Haushalten die Küchentüren stets geöffnet oder die Küchentüren sind aufgrund des engen Durchgangs und Platzmangels in den Wohnungen komplett demontiert. Eine Folge dieser Konfiguration ist, dass warme Luft aus beheizten Zimmern vereinfacht in unbeheizte Räume (und dort teilweise zum Fenster hinaus) ziehen kann.

Die Ergebnisse liefern Hinweise darauf, dass sich Bewohner ihre Wohnungen abhängig von der Gebäudetypologie aneignen und dies negative Auswirkungen auf den Energieverbrauch haben kann. Die Interaktion der Bewohner mit Benutzerschnittstellen wie Thermostatventilen, Fenstern oder Türen erfolgt häufig intuitiv. Erst ein Unbehagen führt zu einer Anpassungsreaktion. Auch mögliche Energieleckagen werden häufig kaum wahrgenommen oder treten angesichts anderer Erwägungen in den Hintergrund. Eine solche spontane Anpassungsreaktion bestätigt Thesen der Adaptive-Thermal-Comfort-Theorie und verdeutlicht die Bedeutung eines angemessenen Feedbacks in der Mensch-Technik-Interaktion.

Aus den Ergebnissen lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen: Zum einen können Gebäudetechnologien wie eine verbesserte Dämmung oder Niedertemperaturheizsysteme die Trägheit erhöhen. Sie tragen damit zu einem verzögerten Temperaturfeedback bei, welches die Interaktion aus Sicht der Nutzer erschwert. Die Folge ist, dass es mit höherer Wahrscheinlichkeit zu nicht-intendierten Nebenfolgen für den Heizenergieverbrauch kommt, zum Beispiel, weil Bewohner zur kurzfristigen Temperaturregulierung vermehrt auf das Öffnen der Fenster zurückgreifen und gleichzeitig die Temperatureinstellungen so wählen, dass sich die Raumtemperaturen langfristig am oberen Ende der Komfortspanne einpendeln. Zum anderen zeigt die

Kontextabhängigkeit der Mensch-Technik-Interaktion, dass Energiespartipps, die auf herkömmliche technologische Arrangements ausgerichtet sind, in anderen Kontexten verfehlt sein können. Will man die Interaktion von Nutzern mit den Gebäudetechnologien durch Informationsbereitstellung verbessern, so ist es notwendig, diese Informationen stärker als bisher auf den jeweiligen Kontext zuzuschneiden.

Bewohner könnten aber auch durch technische Unterstützungssysteme zusätzliche Feedbackmöglichkeiten erhalten. Gerade der Einsatz personalisierter Heizsysteme, die beispielsweise mittels Strahlungswärme darauf ausgerichtet sind, statt kompletter Räume Personen punktuell warm zu halten, könnte dazu beitragen, Raumtemperaturen wieder in Richtung des unteren Endes der Komfortskala zu bewegen und Bewohnern im Falle von Kältegefühlen trotzdem eine kurzfristige Anpassungsmöglichkeit zu geben.

Die Fallstudie weist darauf hin, dass persönliche Anpassungen an die Umweltbedingungen (zum Beispiel das Wechseln der Kleidung) gegenüber Eingriffen in die Umweltbedingungen (zum Beispiel das Hochdrehen der Heizung oder Öffnen der Fenster) mit zunehmender Effizienz der Gebäudehülle wichtiger werden. Daraus ergibt sich die wesentliche Frage, inwiefern Forschung, Politik und Technologieentwicklung dazu beitragen können, im Rahmen von Nachhaltigkeitstransformationen den Fokus stärker darauf zu richten, wie man die Menschen warmhalten kann, anstatt ganze Gebäude auf hohe Temperaturen zu heizen (vgl. auch Kuijer und de Jong 2012; Sahakian et al. 2021).

5.3. *Is it a match?* (Moeller 2024)

In der dritten Fallstudie liegt der Fokus auf neuen Gebäudeautomationstechnologien, die häufig auch unter dem Stichwort Smart-Home-Technologien diskutiert werden. Die Fallstudie geht von der Beobachtung aus, dass neuere Ansätze des smarten Energiemanagements bislang häufig nicht zu den erwünschten Einspareffekten bei der Heizenergie geführt haben und auch bei solchen Technologien eine Energy-Performance-Gap zu beobachten ist. Im Kern der Untersuchung steht, inwiefern die Mensch-Technik-Interaktion in Gebäuden mit Gebäudeautomation dazu beiträgt, dass es zu Mehrverbräuchen kommt.

Ausgehend von der Praxistheorie und der Vorstellung, dass Gebäudetechnologien erfolgreich in das soziale Setting eingebettet beziehungsweise mit den Komfortpraktiken der Bewohner in Einklang gebracht werden müssen, wird in dieser Studie der Piloteinsatz einer sich aktuell in der Entwicklung befindenden Gebäudeautomations- und Kontrolltechnologie untersucht. Zum Vergleich wird außerdem das Zusammenspiel von Komfortpraktiken und Gebäudetechnologie

im konventionellen Gebäudebestand betrachtet. Wie in den beiden vorausgegangenen Fallstudien dient dabei die Variation an Komfortpraktiken innerhalb von Mehrfamiliengebäuden als Ausgangspunkt, um das Zusammenspiel mit den materiellen Arrangements zu untersuchen.

Das untersuchte Reallabor, das im Zentrum dieser Studie steht, ist eine Großwohnanlage mit zwei Gebäudeteilen und insgesamt 137 Wohneinheiten. Etwa zwei Drittel der Wohnungen sind regulär vermietet, bei einem Drittel handelt es sich um Sozialwohnungen. Die Gebäude wurden im Jahr 2020 nach den derzeit in Deutschland geltenden Energieeffizienzstandards neu errichtet und weisen einen Bedarf von 51,4 kWh/m² Wohnfläche pro Jahr spezifischen Heizenergieverbrauch für Raumwärme auf. Zusätzlich wurde der Gebäudekomplex mit einer neuen Gebäudeautomations- und Kontrolltechnologie ausgestattet, deren Effekte jedoch aufgrund der Schwierigkeit, diese genau abzuschätzen, nicht in der Energiebedarfsrechnung berücksichtigt sind.

Die installierte Smart-Home-Technologie ist typisch für aktuell diskutierte Entwicklungsansätze in diesem Bereich: Zum einen erlaubt sie die über ein In-Home-Display gesteuerte Einzelraumregelung, zum anderen ermöglicht sie durch die verbaute IT-Infrastruktur das hochauflösende Monitoring der Temperaturregelung, welches eine bedarfsgesteuerte Rückkoppelung der zentralen Heizanlage und die Vermeidung von unerwünschten Energieverlusten ermöglicht. Im Rahmen der Fallstudie wurden im Sinne des sozio-technischen Fallstudiendesigns verschiedene Datenquellen zum Wohnkomplex zusammengetragen und kombiniert. Messdaten, die durch die Gebäudeautomationstechnologie erzeugt werden, wurden verwendet, um sowohl das Verhalten der Technologie als auch Temperaturpräferenzen der Bewohner zu erfassen. Befragungsdaten wiederum wurden erhoben, um Einblicke in die verschiedenen Elemente der Komfortpraktiken der Bewohner zu erhalten. Analysiert wurden sowohl die Vorstellungen der Bewohner darüber, was Komfort ist, als auch ihre Vorstellungen davon, wie die Gebäudetechnologien am besten zu verwenden seien. Interviews und Beobachtungen aus Wohnungsbesuchen vor Ort liefern zudem Informationen darüber, wie die Technik Einsparungen generieren soll und wieso einzelne Verhaltensweisen der Bewohner von den idealen Nutzervorstellungen der Designer abweichen. Eine Befragung in konventionellen Gebäuden sowie die Erhebung von Energieverbräuchen in einem baugleichen Wohnkomplex ohne smarte Gebäudetechnik ermöglichen darüber hinaus eine Einordnung der Ergebnisse im Vergleich zum konventionell betriebenen Gebäudebestand.

Die Analyse basiert auf zwei Grundlagen: Zum einen auf einer Literaturschau zu den Effekten von Multi-Zone-Control- und Demand-Side-Management-Funktionalitäten, wie sie in der untersuchten Gebäudeautomationstechnologie zur Anwendung kommen. Zum anderen auf der Beobachtung von Variabilität der Innenraumbedingungen innerhalb einzelner Wohnungen,

wie sie in der zweiten Fallstudie untersucht wurde. Gegenüber der zweiten Fallstudie (Moeller und Bauer 2022) wurden jedoch nicht nur die Unterschiede zwischen Räumen zu einem gegebenen Zeitpunkt, sondern auch die Variabilität innerhalb von Räumen im Laufe des Tageszyklus und deren Auswirkungen auf den Heizenergieverbrauch betrachtet.

Die zentrale Hypothese besagt, dass die im Vergleich zu den Einsparerwartungen geringen Einspareffekte im Wärmeenergieverbrauch eine Folge des spezifischen Zusammenspiels von Gebäudetechnologien und Komfortpraktiken sind. Während die Gebäudeautomation in Kombination mit einer stark gedämmten Außenhülle homogene Innenraumbedingungen befördert, erzeugen viele Bewohner durch ihre Komfortpraktiken bewusst oder unbewusst Variabilität.

Die Analyse zeigt, dass die Smart-Home-Technologie, wie für viele solcher Energiemanagementsysteme üblich, zur Ausschöpfung der Effizienzpotenziale eine möglichst gleichmäßige Beheizung der Wohnungen verlangt. Gerade im Zusammenspiel mit einer guten Isolation der Gebäudehülle sind Unterschiede zwischen Räumen oder im Laufe des Tages nur durch sorgfältige Anpassung bestimmter Alltagspraktiken möglich, wie zum Beispiel klar abgestimmte Heizzyklen und ein konsequentes Schließen der Raumtüren. Für viele Haushalte, die an den homogenen und uniformen Innenraumbedingungen Gefallen finden oder sich im Laufe der Zeit an diese gewöhnen, stellen diese Affordanzen der Gebäudetechnologien kein Problem dar. Allerdings zeigt die Analyse auch, insbesondere in Übereinstimmung mit der zweiten Fallstudie (Moeller und Bauer 2022), dass ein Teil der Haushalte in ihren Alltagspraktiken auf eine schnelle Anpassungsmöglichkeit der Raumbedingungen setzt und ebenso nicht auf Variabilität in den Innenraumbedingungen zu verzichten bereit ist. Dies trifft insbesondere auf Haushalte zu, die auch im Winter bei geöffnetem oder gekipptem Fenster schlafen und dabei vermutlich die Auswirkungen des Herunterkühlens der Gebäudemasse auf den Heizenergieverbrauch unterschätzen.

Zusätzlich ermöglicht die Fallstudie weitere Einsichten hinsichtlich der Mechanismen, die zu internen Wärmeverschiebungen führen, und deren Auswirkungen auf den Energieverbrauch, wie sie in der ersten Fallstudie (Moeller et al. 2020) untersucht wurden. Eine vergleichende Detailanalyse von vier Haushalten anhand von Messdaten sowie quantitativen und qualitativen Befragungsdaten veranschaulicht den möglichen ‚Mismatch‘ von Gebäudeautomation und Komfortpraktiken. Die große Bandbreite an Passungsverhältnissen zwischen den Affordanzen der Gebäudetechnologien und der Art und Weise, wie sich die Bewohner diese Technologien aneignen, kann zu wesentlichen Unterschieden im Heizenergieverbrauch führen. Die Energy-Performance-Gap muss daher in solchen Fällen zu einem wesentlichen Teil als nicht-intendierte Konsequenz dieser Mensch-Technik-Interaktionen interpretiert werden.

Auch wenn die Ergebnisse der Fallstudie in weiteren Studien vertieft und zusätzlich durch gezielte quantitative Analysen hinsichtlich ihrer Effektstärke untersucht werden müssen, bestätigt sie erneut die großen Hindernisse, die beim Zusammentreffen standardisierter Technologien und heterogener Nutzerpraktiken auftreten können. Die Studie zeigt, dass der Umgang mit neuen Technologien gelernt sein will, aber auch nicht jede Funktionalität, die aus Sicht der Designer zu gewünschten Energieeinsparungen führen kann, aus Bewohnersicht zu begrüßen ist. Daraus folgt, wie schon bei den anderen Fallstudien, dass Vorsicht geboten ist, was die Erwartungen an die Leistungsfähigkeit rein technologischer Ansätze zur Reduzierung des Energieverbrauchs betrifft. Stattdessen muss ein größerer Fokus auf robuste und weniger von Idealszenarien abhängige Ansätze gerichtet werden. Die Studie zeigt außerdem, dass Bewohner-Technik-Interaktion nie im luftleeren Raum stattfindet, sondern immer durch Vorannahmen und bestehende Gewohnheiten geprägt ist.

Eine Schlussfolgerung dieser Studie ist daher, dass der Vermittlung zwischen Anforderungen der Technik und den Praktiken der Bewohner – bei der vor allem Akteuren aus der Wohnungswirtschaft und Technologieherstellern eine besondere Rolle zukommt – erhöhte Aufmerksamkeit zukommen sollte.

6. Fazit und Forschungsdesiderate

Die drei hier präsentierten Fallstudien untersuchen das Zusammenspiel von heterogenen Komfortpraktiken und Gebäudetechnologien in verschiedenen mehrgeschossigen Appartementgebäuden. Die gemeinsame Grundlage ist ein praxistheoretisches Verständnis davon, wie der Heizenergieverbrauch in Gebäuden zustande kommt. Demnach gilt es, die Wechselwirkungen und ko-evolutionären Entwicklungen zwischen verschiedenen Elementen zu verstehen. Hierzu zählen das implizite und explizite Wissen der Bewohner, ihre kulturell geprägten Vorstellungen und persönlichen Ziele genauso wie Technologien und Infrastrukturen als materielle Komponenten jeder Praxis.

Um die Auswirkungen auf die Raumtemperaturen und den Heizenergieverbrauch zu untersuchen, die sich aus den Wechselwirkungen ergeben, werden in jeder der drei Fallstudien unterschiedliche Aspekte des Zusammenspiels aus Komfortpraktiken und Gebäudetechnologien untersucht. Bei den Gebäudetechnologien liegt der Fokus zum einen auf der Isolation und Abdichtung von Gebäuden als etablierter und weit verbreiteter Energieeffizienzmaßnahme und zum anderen auf einer Gebäudeautomations- und Kontrolltechnologie als Repräsentant einer neuen, innovativen Entwicklung im Bereich Energiemanagement und Energieeinsparung. Bei

den Praktiken wiederum stehen die Heiz- und Lüftungsgewohnheiten sowie die Komfortvorstellungen im Vordergrund, die sich sowohl zwischen als auch innerhalb von Wohnungen unterscheiden können.

Die Isolation von Gebäuden und bestimmte Formen der Gebäudeautomation weisen dabei insofern Gemeinsamkeiten auf, als dass sie zu einer Entkoppelung der Innenraumtemperaturen von den Schwankungen der Außentemperaturen beitragen. Allerdings geschieht diese Entkoppelung nicht direkt, wie es aus vollklimatisierten Büros mit einer vollständigen Kontrolle der Innenraumbedingungen bekannt ist. Vielmehr zeigt sich der Effekt indirekt, da beide Technologien – einmal durch die Reduzierung der Wärmeverluste und einmal durch die Absenkung der Vorlauftemperaturen – einer schnellen Anpassung der Raumbedingungen entgegenwirken und damit zu homogenen Innenraumbedingungen beitragen.

Hinsichtlich der Mensch-Technik-Interaktion in den Gebäuden und der Auswirkungen auf die Energy-Performance-Gap auf Gebäudeebene stehen folgende Aspekte im Fokus: In der ersten Fallstudie (Moeller et al. 2020) werden die Auswirkungen der Heterogenität zwischen Wohnungen und die Effekte von internen, zwischen unterschiedlich beheizten Wohnungen auftretenden Wärmeverschiebungen untersucht. Die zweite Fallstudie (Moeller und Bauer 2022) untersucht die Heterogenität der Mensch-Technik-Interaktion in Form von Heiz- und Lüftungspraktiken innerhalb von Wohnungen im mäßig sanierten Gebäudebestand und beschreibt Ursachen für die Heterogenität solcher Praktiken. In der dritten Fallstudie (Moeller 2024) werden die Trägheit von Gebäudeautomationstechnologien im Zusammenspiel mit variierenden Komfortpräferenzen und deren Auswirkungen auf den Heizenergieverbrauch untersucht.

Wie in der Einleitung bereits kurz beschrieben, werden die drei Fallstudien, die den Kern der vorliegenden Dissertation bilden, durch weitere Studien flankiert, die im Rahmen der Dissertation durchgeführt wurden und in enger Beziehung zu den empirischen Analysen in den Fallstudien stehen. Im Folgenden ist der Kern dieser Arbeiten kurz aufgeführt. Im Anhang B finden sich die vollständigen Abstracts inklusive der digitalen Verlinkungen zu den Studien.

Eine grundsätzliche Einordnung der Bedeutung des privaten Heizenergiekonsums für den individuellen CO₂-Fußabdruck und der Schwierigkeit, ökologische und soziale Aspekte des Klimaschutzes auf einer Makroebene in Einklang zu bringen, bietet die Arbeit von Gill und Moeller (2018). Die Studie zeigt den hohen Anteil an Emissionen, der im Wohnbereich durch die Bereitstellung von Wärme und Elektrizität entsteht und unabhängig von der Gemeindegröße einen sehr großen Anteil (25-30 %) des privaten CO₂-Fußabdrucks bestimmt. Darüber hinaus diskutiert der Beitrag die sozialen Implikationen, die mit Bemühungen, den CO₂-Fußabdruck zu re-

duzieren, einhergehen und weist auf die verteilungspolitischen Konsequenzen strikter Effizienzmaßnahmen hin. Die Ursachen von Energy-Performance-Gaps sind in dieser Hinsicht ein wichtiger Aspekt, da Energy-Performance-Gaps den Konflikt zwischen Umweltpolitik (energieeffizientes Wohnen) und Sozialpolitik (bezahlbares Wohnen) zusätzlich verschärfen.

Auf die Mesoebene, nämlich die Energiewende im Quartier, blickt der Artikel von Moeller et al. (2023). Bezogen auf Wohngebäude zeigt sich hier, dass viele Stakeholder den Blick weg vom einzelnen Gebäude und hin zur Quartiersebene richten. Dies lässt sich unter anderem als Reaktion auf die Schwierigkeiten verstehen, jedes einzelne Gebäude auf ein hohes Effizienzniveau zu heben. Auch lassen sich auf Quartiersebene durch die Sektorenkopplung von Wärme und Elektrizität Systemlösungen implementieren, wie sie auch in Smart-Building-Ansätzen häufig betont werden (Darby 2018). Die Erfahrungen mit verschiedenen Leuchtturmprojekten zeigen außerdem die Notwendigkeit, die Energiewende im Gebäudesektor, bei der der Reduzierung des Bedarfs eine wesentliche Rolle zukommt, als dynamischen und nicht-linearen Prozess zu begreifen, bei dem auch nach der Implementierung neuer Technologien weiterer Handlungsbedarf mit den Bewohnern besteht. Was sich somit bereits auf der Quartiersebene zeigt, nämlich dass es an den Kontext angepasster Lösungen bedarf, bestätigt sich in den Fallstudien auf der Ebene einzelner Gebäude.

Die weiteren drei Studien (Hickfang et al. 2020; Bauer et al. 2021; Moeller 2022) behandeln einzelne Aspekte der Mensch-Technik-Interaktion in Wohngebäuden. In der Studie von Hickfang et al. (2020) werden in Interviews mit Entwicklern, technischen Dienstleistern und Bewohnern Einstellungen zu Gebäudeautomationstechnologien erhoben und entlang der Dimensionen Nutzerkontrolle versus Automation analysiert. Die Studie ist somit als Vorstudie zum besseren Verständnis einer Automationstechnologie zu verstehen, wie sie schließlich in der dritten Fallstudie zum Einsatz kommt.

Die Studie von Moeller (2022) wiederum basiert auf einer ersten vertieften Analyse dieser Gebäudeautomationstechnologie. Die Analyse verdeutlicht, in welchem Umfang die Funktionalität der Technologie von Kontextfaktoren wie der baulichen Infrastruktur und den Bewohnerpraktiken abhängt. Um ein ordnungsgemäßes Funktionieren der Technologien sicherzustellen, bedarf es unter anderem eines Vertrauensvorschusses seitens der Bewohner. Vertrauensaufbau kann dabei vor allem durch die Vermittlungstätigkeit von Drittparteien wie Wohnungsgesellschaften unterstützt werden. Die Studie vertieft insofern einige Aspekte, die über die eng umgrenzten Fragestellungen der drei Fallstudien hinausgehen.

In der Studie von Bauer et al. (2021) wird schließlich ein weiterer Aspekt der internen Wärmeverschiebungen untersucht, der sodann als Ausgangspunkt für die vertiefte Analyse in der Studie von Moeller (2024) dient. Im Mittelpunkt stehen dabei die Komfortpraktiken der Bewohner sowie deren Prägung durch das materielle Arrangement des Gebäudes. Dabei wird auch die Frage erörtert, inwiefern unterschiedlich beheizte Räume innerhalb einer Wohnung zu Wärmeverschiebungen und erhöhten Energieverbräuchen eines Haushalts beitragen können. Es zeigt sich, dass unter bestimmten Randbedingungen (Außentemperaturen, U-Wert der Außenwände und Außenfläche) der Versuch von Bewohnern, in angrenzenden Räumen (z. B. Schlafzimmer und Wohnzimmer) Temperaturunterschiede von mehreren Grad aufrechtzuerhalten, trotz deutlich geringerer Durchschnittstemperaturen zu einem höheren Energieverbrauch führen kann, als wenn die Bewohner beide Räume auf eine homogen hohe Komforttemperatur heizen.

Alle Studien haben einen direkten Bezug zur Energiewende im Gebäudesektor und den Bemühungen, den Heizenergiebedarf von Wohngebäuden durch technologische Maßnahmen zu reduzieren. Sie beleuchten verschiedene Aspekte der Mensch-Technik-Interaktion und bilden den Rahmen für die vertieften Analysen der Energy-Performance-Gap in den drei zentralen Fallstudien.

6.1. Relevanz der Fallstudien

Komfortpraktiken sind vielgestaltig. Die Studien zeigen auf, wie das Zusammenspiel verschiedener Elemente von Komfortpraktiken zu Temperaturunterschieden innerhalb von Gebäuden und Wohnungen beiträgt und zu durchschnittlichen Temperaturunterschieden über die Heizperiode und zwischen Wohnungen von über 6 K führt. Von Bedeutung sind dabei nicht nur kulturell bedingte Vorstellungen und informelle soziale Regeln als Teil sozialer Praktiken, sondern auch materielle Arrangements wie wohnungsgestalterische Aspekte oder das Verhalten der Gebäudetechnologien. In Gebäuden, in denen die Energieeffizienz eng an konstante Innentemperaturen gekoppelt ist, kann die Vielfalt an Komfortpraktiken Energy-Performance-Gaps verursachen, sofern die Komfortpraktiken starke Unterschiede in den Innenraumtemperaturen bewirken.

In diesem Zusammenhang weisen die Fallstudien insbesondere auf die Bedeutung interner Wärmeverschiebungen als Folge großer Temperaturunterschiede innerhalb von Gebäuden hin und untersuchen daher einen in der Forschung weitgehend vernachlässigten Aspekt des Heizenergieverbrauchs (wichtige Ausnahmen sind Kõiv et al. (2012), Lukić et al. (2017) und Michnikowski (2017)). Die Fallstudie von Moeller et al. (2020) zeigt, dass einige Haushalte bis zu 30 % ihres Heizenergieverbrauchs durch die internen Gewinne von angrenzenden Haushalten

abdecken, während andere Haushalte mehr als 30 % ihres Heizenergieverbrauchs an Nachbarn verlieren.

Auch Energiesparmaßnahmen, die nur das Verhalten oder die Technik adressieren, können zu nicht-intendierten Nebenfolgen führen: Ein Austausch von Technologien allein bringt nicht die notwendigen Verhaltensanpassungen hervor, um ein neues sozio-technisches System im Sinne der Innovatoren zu etablieren. Informations- und Aufklärungskampagnen hingegen vernachlässigen die materielle Einbettung individuellen Verhaltens. Einsparerwartungen, die auf eng umgrenzten Maßnahmen beruhen und mögliche Veränderungen in anderen Elementen ausblenden, sollten daher mit Vorsicht betrachtet werden.

Daraus folgt, dass Energy-Performance-Gaps nicht einseitig als Zeichen dafür interpretiert werden sollten, dass Bewohner sich falsch verhalten oder gezielt ihre Komfortansprüche immer weiter steigern. Umgekehrt sollten sie nicht als Zeichen dafür gewertet werden, dass Technologien nicht funktionieren. Stattdessen sollten Energy-Performance-Gaps als Folge der Interaktionen heterogener Praktiken und standardisierter technischer Ansätze, die wenig robust gegenüber Abweichungen sind, gedeutet werden. Die Fallstudien weisen insofern auf eine bislang vernachlässigte Ursache von Energy-Performance-Gaps hin.

Eine mögliche Implikation wäre eine Verschiebung des Fokus in der Entwicklung: Anstelle einer Optimierung von Technik unter eng definierten Annahmen sollte eine stärkere Fokussierung auf technische Ansätze erfolgen, die unter einer Vielzahl an Einsatzbedingungen robust sind (vgl. für eine entsprechende Diskussion auch Auer und Franke 2020; Auer und Negelein 2023). Robuste Ansätze sollten die Wechselwirkungen technischer und sozialer Aspekte berücksichtigen, die bislang meist getrennt voneinander verfolgt werden. Dabei gibt es Themen, die sowohl von technischer als auch sozialwissenschaftlicher Seite anschlussfähig sind. Hierzu gehört zum Beispiel die Idee, Menschen und nicht Räume zu wärmen (Sahakian et al. 2021), wozu auf technischer Seite Niedertemperatursysteme, eine gute Grunddämmung und personalisierte Heiztechnologien beitragen können. Neue Technologien sind für die Durchsetzung solcher Ideen jedoch nicht ausreichend, sondern es bedarf ergänzend der Umstellung von Energiesparvorstellungen und der Etablierung neuer Komfortpraktiken.

Methodisch innovativ sind die vorliegenden Fallstudien, da in ihnen verschiedene technische und soziale Daten kombiniert werden, um die Mensch-Technik-Interaktion besser zu verstehen. Konsequente sozio-technische Ansätze sind bislang selten, aufgrund der vielfältigen Trennungen – zwischen technischen und sozialwissenschaftlichen Disziplinen, zwischen Methoden (vgl. Praxistheorie und Sozialpsychologie) und auch zwischen unterschiedlichen zugrunde lie-

genden Epistemologien (vgl. realistische vs. sozialkonstruktivistische Ansätze). Während praxistheoretische Ansätze häufig auf Narrativen und qualitativen Methoden basieren, arbeiten sozialpsychologische Ansätze mit eindeutigen Ursache-Wirkung-Relationen, die Präferenzen mit Anreizen und Hindernissen verknüpfen.

Die Fallstudien, die im Rahmen der vorliegenden Dissertation durchgeführt wurden, verstehen sich als Beitrag, diese Trennung zu überwinden und quantitative sowie qualitative Verfahren und technische und soziale Daten zu kombinieren. Solche sozio-technischen Analysen finden sich in der Literatur bisher kaum (Love und Cooper 2015). Vor allem die Arbeiten von Galvin und Kollegen (z. B. Galvin 2013a, 2013b; Galvin und Sunikka-Blank 2016b), Eon und Kollegen (z. B. Eon et al. 2017a; Eon et al. 2018) sowie der Forschungsgruppe *Lokale Passung* von Bernhard Gill (z. B. Wolff et al. 2017; Weber et al. 2017) sind wichtige Ausnahmen, an welche die Fallstudien wesentlich anknüpfen. Durch die Berücksichtigung detaillierter Messdaten über Zeiträume von mindestens einem Jahr und die Betrachtung großer Gebäudekomplexe gehen die hier durchgeführten Fallstudien jedoch in Hinsicht der Länge des Untersuchungszeitraums und der Anzahl der berücksichtigten Wohneinheiten über die meisten dieser Studien hinaus.

Die Daten- und Methodentriangulation im Rahmen der Fallstudienanalyse hilft somit dabei, verschiedene Perspektiven zu kombinieren. Eine solche Perspektive ermöglicht es darüber hinaus, Nachhaltigkeitstransformationen kritisch zu reflektieren und die Barrieren bei ihrer Umsetzung zu verstehen.

Die Arbeit zeichnet sich weiterhin dadurch aus, dass sie mit auf der Bauphysik basierenden Energiebedarfsschätzungen auf Wohnungsebene operiert, um so sinnvoll Heizenergieverbräuche verschiedener Wohnungen vergleichen zu können. Wohnungsspezifische Bedarfe werden – mit Ausnahme weniger Arbeiten (Weber et al. 2017; Lukić et al. 2017) – in der Forschung bislang kaum berechnet. Da Komfortpraktiken üblicherweise auf Haushaltsebene untersucht werden und sich der spezifische Heizenergieverbrauch in Wohnungen abhängig von ihrer Lage im Gebäude stark unterscheiden kann, lässt sich jedoch erst durch die Einführung einer geeigneten Referenzgröße verlässlich einschätzen, ob ein Haushalt viel oder wenig Energie verbraucht. Für die durchgeführten Fallstudien wurde dabei in Anlehnung an die vereinfachten Verfahren zur Energiebedarfsrechnung eines Gebäudes ein Modell entwickelt, das es erlaubt, den Heizenergiebedarf einzelner Wohnungen abzuschätzen. Insbesondere in schlecht gedämmten Gebäuden kann das Außenfläche-zu-Volumen-Verhältnis der Wohnungen zu erheblichen Differenzen im Bedarf führen. Aber auch in stark gedämmten Gebäuden können Haushalte, die in der Mitte eines Gebäudes und umgeben von gut beheizten Wohnungen liegen, wesentlich von ihrer Lage

profitieren. Für die drei Fallstudien wurden daher Heizenergiebedarfe auf Wohnungsebene berechnet, um darüber Unterschiede im Energieverbrauchsverhalten der Haushalte aufzeigen zu können.

Schließlich zeigen die Fallstudien, wie wichtig es ist, den größeren Kontext des Themas Energieeffizienz in Wohngebäuden zu berücksichtigen und sich nicht nur auf einzelne Haushalte, Individuen oder Technologien zu konzentrieren. Komfortpraktiken und Energieverbrauchsmuster sind hochgradig materiell vorstrukturiert, auch durch die Gebäudetechnologien. Dieses Erkenntnis findet ihre theoretische Entsprechung in den Konzepten der Affordanz und der Präskription. Etliche dieser Vorstrukturierungen finden aber auch auf institutioneller Ebene statt. Jede neue technische Maßnahme trifft auf eine Reihe bestehender sozialer Konventionen, Vorstellungen und institutionell verankerter Regeln, in die sie sozial eingebettet werden muss.

Die institutionelle Strukturierung des Heizenergieverbrauchs lässt sich exemplarisch an der Aushandlung des Themas Energiesparen im öffentlichen Diskurs, den Erwartungen hinsichtlich der Entwicklung der Energiepreise, der angemessenen Höhe von Energiekosten sowie den Kriterien zur Gestaltung der Energiepreise aufzeigen. Die Preise für Strom und verschiedene Wärmeenergieträger unterliegen in Deutschland durch Abgaben und Steuern einer starken politischen Strukturierung. Dies führt zu deutlich höheren Strompreisen im Vergleich zu anderen Energieträgern. Die Folge ist nicht nur, dass bestimmte Heizungssysteme wie Wärmepumpen es schwerer haben mit Heizsystemen wie Gasheizungen zu konkurrieren. Sondern es hat auch zur Folge, dass der Stromverbrauch hinsichtlich der Kosten für viele Menschen im Bewusstsein präsenter ist als der Wärmeverbrauch.

Die Anwendung der Praxistheorie als übergeordnetem theoretischen Rahmen weist auf die Notwendigkeit hin, den größeren Kontext zu berücksichtigen, und erlaubt es unter Bezugnahme auf sozialwissenschaftliche und technische Theorien, institutionelle und materielle Strukturen sowie deren Bedeutung für Praktiken zu analysieren.

Zuletzt geht es in den vorliegenden Studien vornehmlich darum, Ursachen der Energy-Performance-Gap zu untersuchen, die nicht auf eine intentionale Komfortausweitung von Seiten der Bewohner zurückzuführen sind. Dahinter steht die Abgrenzung gegen die übliche Definition des Rebound-Effekts. In einem allgemeinen Sinn bezeichnet der Rebound die Tatsache, dass eine Erhöhung der Effizienz eines Energy Services zu einer Erhöhung der Nachfrage dieses Services führt. Meist wird damit die Vorstellung verbunden, dass die Nachfrage steige, weil Personen den Konsum eines Gutes aufgrund der relativen Kosteneinsparung gezielt ausweiten. Am Beispiel des Wohnraumkomforts hieße das beispielsweise, dass Bewohner nach einer Effizienzmaßnahme ihre Heizung höher drehen oder mehr Räume beheizen, um für angenehmere

Raumtemperaturen zu sorgen, die sie sich vorher aufgrund der hohen damit verbundenen Kosten nicht zu leisten bereit waren. Die Abgrenzung gegen solche alternative Erklärungen ist nach Yin (2018) ein wesentlicher Aspekt von Fallstudien, um aufgrund des empirischen Materials zu neuen theoretischen Erklärungen zu gelangen und eine Neuinterpretation bekannter Zusammenhänge zu erlauben.

Im Sinne einer analytischen Generalisierung können die gewonnenen Erkenntnisse so über die konkreten, in den Fallstudien untersuchten Fälle hinausreichen. Die vorliegenden Fallstudien legen die Erkenntnis nahe, dass die Interpretation der Energy-Performance-Gap als Ergebnis einer gezielten Komfortausweitung und der damit verbundenen Erhöhung des Energiekonsums nach erfolgten Einsparmaßnahmen verkürzt ist. Auch wenn die Effektgrößen einer komfortbedingten bewussten Anpassung im Rahmen dieser Studien nicht gemessen werden konnten, deuten die Ergebnisse in Übereinstimmung mit bisherigen Studien (Love 2014; Luo et al. 2016) deutlich darauf hin, dass bewusste Anpassungen nur einen Teil der vielfältigen Anpassungsmechanismen abdecken.

Für die weitere Forschung lässt sich daraus ableiten, dass ein größerer Fokus auf dem unbeabsichtigten Rebound, den nicht-intendierten Effekten der Mensch-Technik-Interaktion in Gebäuden, liegen muss, um die Ursachen von Energy-Performance-Gaps zu verstehen. Die nicht-intendierten Effekte sind auch eine Erklärung dafür, warum die Annahmen zum Benutzerverhalten, wie sie in Energiebedarfsrechnungen getroffen werden, nicht mit dem tatsächlichen Verhalten der Nutzer übereinstimmen (Zou et al. 2018). Denn das Bewohnerverhalten, über das Annahmen getroffen werden, kann schlichtweg nicht als konstant angenommen werden. Um die Dynamiken im Bewohnerverhalten in Simulationen berücksichtigen zu können, braucht es vielmehr ein besseres Verständnis der Interaktionseffekte. Zwei Aspekte müssen dafür in zukünftiger Forschung stärker beachtet werden: Zum einen die Affordanzen, die den Technologien zugrunde liegen und die den Designern Beschränkungen auferlegen, welches Nutzerverhalten sie den Technologien einschreiben können. Zum anderen die Vielfalt, in der Technologien von Bewohnern angeeignet werden. Daraus ergibt sich die Frage, inwieweit Widersprüche zwischen etablierten Komfortpraktiken und den Effizienzvorstellungen der Designer bestehen.

6.2. Limitationen

Die wichtigsten Limitationen der einzelnen Fallstudien sind in der jeweiligen Publikation behandelt. Hier werden allgemeinere Grenzen der vorliegenden Arbeit besprochen, aus welchen sich weiterer Forschungsbedarf ergibt.

6.2.1. Heterogenität auf Haushaltsebene

Im Fokus der Fallstudien stehen jeweils Multi-Appartement-Wohnblöcke, die durch eine hohe Heterogenität auf der Haushaltsebene gekennzeichnet sind. Auf dieser Ebene werden deshalb auch die Komfortpraktiken und Wärmeenergieverbräuche analysiert. Allerdings werden Haushalte als Einheit betrachtet, wodurch Unterschiede zwischen Haushaltsmitgliedern weitgehend ausgeblendet bleiben. Wie verschiedene Studien zeigen, kommt es jedoch innerhalb von Mehrpersonenhaushalten in Fragen von Komfort und Technikbedienung zu Aushandlungsprozessen (Offenberger und Nentwich 2013; Offenberger 2016; Sovacool et al. 2020a). Nicht nur kann die Verantwortung für die Bedienung verschiedener Technologien zwischen Haushaltsmitgliedern ungleich aufgeteilt sein, sondern es können sich auch die Komfortpraktiken der Bewohner widersprechen, mit möglichen Konsequenzen auch für den Energieverbrauch. Eine offene Frage für weitere Forschung ist daher, wie solche Unterschiede in Komfortpraktiken ausgehandelt werden und inwiefern bleibende Unterschiede zu zusätzlicher Heterogenität auf Haushaltsebene beitragen.

6.2.2. Erfassung des Lüftungsverhaltens

Eine weitere Einschränkung der Studien ergibt sich bei der Untersuchung des Lüftungsverhaltens. In der Untersuchung des Heizenergieverbrauchs spielen Heiz- und Lüftungspraktiken grundsätzlich die bedeutendste Rolle. Das Heizverhalten wird häufig mittels Messungen von Innenraumtemperaturen, Thermostateinstellungen oder Solltemperaturen erfasst. Hierzu gibt es etablierte und vergleichsweise einfach zu implementierende Ansätze. Vergleichbar einfach zu realisierende Verfahren fehlen hingegen zur Untersuchung der Luftwechselrate. Zum einen hängt der tatsächliche Luftwechsel nicht nur vom Fensteröffnungsverhalten ab, sondern auch von Windgeschwindigkeit, Windrichtung, dem Temperaturgradienten zwischen Innen- und Außenbereich sowie der Dichtigkeit der Gebäudehülle. Das Fensteröffnungsverhalten allein kann daher nur bedingt Auskunft über den tatsächlichen Luftwechsel und den damit verbundenen Wärmeverlust geben. Zum anderen lässt sich auch das Fensteröffnungsverhalten selbst nur schwer erfassen. Befragungsdaten sind ungenau, da das Fensteröffnungsverhalten, obwohl üblicherweise als routiniert beschrieben, in der Praxis häufig keinen strikten zeitlichen Mustern folgt. Bewohner sind daher nur bedingt in der Lage, detailliert darüber Auskunft zu geben. Dies gilt umso mehr, wenn im Rahmen von Haushaltsanalysen nur einzelne Haushaltsmitglieder befragt werden, die das Verhalten der übrigen Mitbewohner möglicherweise nicht im Detail kennen. Befragungsdaten können daher bestenfalls grundsätzliche Tendenzen in den Unterschieden zwischen Haushalten anzeigen. Die Erfassung von Messdaten wiederum ist mit erheblichem

Aufwand und Kosten verbunden und lässt sich daher nur schwer in größerem Umfang in bewohnten Wohnungen durchführen. Die erste Fallstudie (Moeller et al. 2020) stellt hinsichtlich des Fensteröffnungsverhaltens eine bedeutende Ausnahme dar, da hier auf vergleichsweise hochauflösende Messdaten zu Fensteröffnungsraten zurückgegriffen werden konnte. Dennoch bleibt auch in dieser Studie das Lüftungsverhalten die Variable, über die am meisten Unsicherheit besteht.

6.2.3. Forschungsdesign

Eine weitere Beschränkung der Studien besteht im Forschungsdesign. Die Daten für die einzelnen Fallstudien wurden im Rahmen von zwei Forschungsprojekten in Reallaboren über eine Laufzeit von insgesamt mehr als fünf Jahren gesammelt. Eine Ausnahme ist die erste Fallstudie, bei der auf Sekundärdaten eines länger zurückliegenden Forschungsprojekts zurückgegriffen wurde, bei deren Erhebung der Autor nicht beteiligt war. Einschränkungen ergeben sich in den Forschungsprojekten, wie für Reallaborforschung üblich (vgl. Hossain et al. 2019), beim Zugang zu Bewohnern und der Erhebung von Daten, in der Kooperation verschiedener Stakeholder mit unterschiedlichen organisatorischen Interessen und einem nicht immer geradlinigen Forschungsprozess aufgrund unvorhergesehener Feedbackeffekte. Eine konsistente und umfassende Datensammlung, die alle wesentlichen Aspekte der Komfortpraktiken abdeckt, war daher nicht immer möglich. Stattdessen wurde häufig ein exploratives Verfahren angewandt, bei dem wichtige Aspekte erst nach und nach berücksichtigt und in die Studie inkludiert wurden. Die einzelnen Fallstudien folgten daher nicht vollständig einem einheitlichen und linearen, im Vorhinein vollständig festgelegten Forschungsdesign. Dies wird beispielsweise daran deutlich, dass sich nach der Durchführung der dritten Fallstudie zeigt, dass die Erfassung weiterer Kennzahlen im automatischen Monitoring möglich und sinnvoll gewesen wäre.

Ähnliches gilt für die methodische Vorgehensweise, da es einer einzelnen Person im zeitlichen Rahmen einer Dissertation und bei der Breite eines solchen Themas kaum möglich ist, vollkommene Expertise in allen Auswertungsmethoden zu erlangen. Zur Absicherung wurden daher insbesondere in der ersten Studie Kolleginnen und Kollegen aus anderen Disziplinen zur Prüfung bestimmter Aspekte hinzugezogen. Die vorliegenden Fallstudien können insofern auch als typisch für einen interdisziplinären Ansatz in der Reallaborforschung gesehen werden.

6.2.4. Gebäudetyp

Schließlich ergibt sich eine Einschränkung der Ergebnisse aufgrund der Auswahl des analysierten Gebäudesektors. Wenngleich größere Mehrfamiliengebäude mit mindestens sechs bis maximal 68 Wohneinheiten, wie sie in den Fallstudien betrachtet werden, einen großen Anteil des Gesamtwohnungsbestandes in Deutschland ausmachen, decken sie nur 17 % des deutschen Gebäudebestands ab. Überwiegend besteht dieser aus Ein- und Zweifamilienhäusern (dena 2023). Eine Besonderheit ist auch, dass die Gebäude durch kommunale Wohnungsgesellschaften vermietet werden und somit keine Eigentumswohnungen enthalten. Damit ist jedoch aus sozialstruktureller Sicht in den Studien auch eine Selektion der Bewohner impliziert. Durch die Konzentration auf kommunale Mehrfamiliengebäude sind bestimmte sozioökonomische Gruppen wie wohlhabende Haushalte nicht in der Analyse erfasst. Auch der Fokus auf neuere oder bereits sanierte Gebäude stellt eine Einschränkung dar: Zwar dienen typische, unsanierte Altbauten bei mehreren Analysen aufgrund der dort typischerweise zu erwartenden Prebound-Effekte als Referenzwert, der Gebäudetyp selbst kann jedoch im Rahmen der Fallstudien aufgrund der Projektauswahl nur am Rande betrachtet werden. Es bedarf daher weiterer Forschung, die einen spezifischen Fokus auf den Altbau sowie Ein- und Zweifamiliengebäude legt.

6.2.5. Statistische Generalisierung

Zuletzt folgt aus dem sozio-technischen Fallstudiendesign, dass bei der Analyse nicht die statistische Quantifizierung eng umgrenzter Effekte von Ursache und Wirkung im Fokus steht, sondern die tiefe Beschreibung und Erklärung eines Phänomens aufgrund verschiedener Daten- und Methodenzugänge. Um die Mensch-Technik-Interaktion in Gebäuden in ihrer Vielfalt analysieren zu können und dabei den unterschiedlichen Kompetenzen und Vorstellungen der Bewohner ebenso gerecht zu werden wie den verschiedenen Gebäudetechnologien und ihrer Effekte, ist eine Datenbasis notwendig, die sowohl auf Befragungs- und Beobachtungsdaten als auch auf Messdaten oder Gebäudekennzahlen zurückgreift. Da weder umfassende Datenbanken noch einheitliche Methoden zur Verfügung stehen, um diese Daten zu sammeln, muss sich die Analyse auf ausgewählte Fallstudien begrenzen, innerhalb derer sich die notwendigen Daten bei zentralen Stakeholdern wie Wohnungsgesellschaften, Messdienstleistern und Bewohnern erheben lassen. Umfassende statistische Auswertungen, die auf einer großen Bandbreite verschiedener Gebäudekomplexe beruhen, und die damit verbundene statistische Generalisierung sind daher nicht möglich. Allerdings vermitteln die Fallstudien aufgrund ihrer methodischen Innovativität Einblicke in Mechanismen, denen dann in weiteren Studien gezielt nachzugehen

ist, um diese genauer zu quantifizieren. Dazu zählt beispielsweise das Zusammenspiel von trägen Gebäudetechnologien und Bewohnern, die nach variablen Innenraumtemperaturen suchen. Ebenso sollten sich eng umgrenzte Effekte auf den Heizenergieverbrauch – zum Beispiel der Temperaturvariabilität oder des häufigen Solltemperaturwechsels in gut gedämmten Gebäuden –, die in den hier durchgeführten Studien als problematisch identifiziert wurden, in zukünftigen Simulationsstudien quantifizieren lassen.

6.3. Forschungsdesiderate

Aus dem bisherigen Überblick über die Besonderheiten sowie Grenzen der vorliegenden Arbeit ergeben sich verschiedene Ansatzpunkte für weiteren Forschungsbedarf.

6.3.1. Untersuchung weiterer sozio-technischer Konfigurationen

Eine wesentliche These, die in den Fallstudien untersucht wird, lautet, dass eine Kombination aus Bewohnern, die variable Innenraumtemperaturen bevorzugen, und technischer Infrastruktur, die homogene Innenraumtemperaturen erzeugt, zur Entstehung von Energy-Performance-Gaps beiträgt. Wenngleich die Fallstudien umfangreich auf eine Bestätigung dieser These hinweisen, bedarf es zur Quantifizierung der dadurch verursachten Energy-Performance-Gap weiterer Forschung.

Die Ergebnisse der Fallstudien zeigen, welchen Herausforderungen eine realistischere Abbildung des Nutzerverhaltens in Simulationsrechnungen gegenübersteht. Viele neuere technologische Infrastrukturen tragen zu einer Homogenisierung von Innenraumtemperaturen bei, wobei ein Zusammenhang zwischen Effizienz und Homogenisierung zu bestehen scheint. Variable Innenraumtemperaturen, wie sie aus verschiedensten Komfortpraktiken folgen, scheinen diesem Effizienzgedanken jedoch zu widersprechen. Wenn beispielsweise Haushalte ihre Wohnungen tagsüber bei höheren Außentemperaturen heizen und nachts bei kälteren Außentemperaturen bewusst abkühlen lassen, führend dieses Aufheizen und Abkühlen der Gebäudemasse sowie die dadurch ausgelösten Wärmeverschiebungen zur Reduktion der Einspareffekte passiver Gebäudetechnologien. In alten Gebäuden mit stärkeren natürlichen Schwankungen des Innenraumklimas waren solche Komfortpräferenzen hingegen unproblematischer, da hier zwar der absolute Heizenergiebedarf deutlich höher lag, ein forciertes Abkühlen und Lüften zur Frischluftzufuhr jedoch kaum notwendig war.

Dieser Zusammenhang zwischen technisch bedingter Homogenisierung und komfortbedingter Variabilität der Innenraumtemperaturen sowie dessen negativer Effekte auf die Energieeinspa-

rungen wird durch die vorliegenden Fallstudien erhärtet und in verschiedenen Situationen untersucht. Insgesamt zeigen sich je nach Fallstudie Energy-Performance-Gaps von 1 % bis ca. 15 %. Dabei handelt es sich allerdings um sehr konservative Schätzungen, z. B. da Technologien wie die Gebäudeautomation in der Fallstudie von Moeller (2024) nicht angerechnet sind und prinzipiell auch Methoden fehlen, um diese in Heizenergiebedarfsrechnungen zu berücksichtigen. Die tatsächliche Energy-Performance-Gap dürfte damit mindestens in dieser Studie unterschätzt sein. Um zu belastbareren Aussagen über die Größe des Effektes von heterogenen Komfortpraktiken und Gebäudetechnologien auf Energy-Performance-Gap zu gelangen, sollten in zukünftigen Studien quantitative Analysen mit genaueren Messdaten sowie Simulationsstudien durchgeführt werden. Interessant könnte in diesem Zusammenhang die Untersuchung von Wohnungen mit Fußbodenheizung sein. Diese Technologie, die wesentlich zur Trägheit beim Aufheizen beiträgt, ist bereits lange etabliert, doch das Zusammenspiel mit Komfortpraktiken und die daraus folgenden Auswirkungen auf den Heizenergieverbrauch sind bislang kaum erforscht.³

Feldstudien auf Wohnungsebene haben grundsätzlich den Nachteil, dass immer auch ein Referenzwert für den tatsächlich notwendigen Energiebedarf benötigt wird. Diese Berechnungen unterliegen in Mehrfamiliengebäuden etlichen Unsicherheiten, da Interaktionseffekte mit den umliegenden Wohnungen bestehen. Von Interesse wäre daher, Untersuchungen auf Einfamilienhausebene durchzuführen, wo die etablierten Verfahren zur Bedarfsabschätzung existieren und die Komplexität durch Interaktionseffekte mit Nachbarwohnungen entfällt. Allerdings sollten sich solche Untersuchungen, anders als in vielen Studien üblich, nicht auf einige wenige Gebäude konzentrieren. Stattdessen wäre es notwendig, statistisch aussagekräftige Stichproben zu erheben und geeignete Indikatoren der Mensch-Technik-Interaktion zu bestimmen, um deren Effekte auf den Heizenergieverbrauch untersuchen zu können. Der Einfamilienhausbestand kann darüber hinaus auch einen Vergleich verschiedener technologischer Konfigurationen und Gebäudezustände ermöglichen. Eigenheimbesitzer, die im Einfamilienhausbestand einen großen Anteil ausmachen, setzen deutlich häufiger auf neuere Technologien wie Wärmepumpen, Smart-Home-Technologien oder Fußbodenheizungen. Gleichzeitig mangelt es einem Teil der Eigenheimbesitzer jedoch selbst bei ausreichenden finanziellen Mitteln an der Bereitschaft, in Effizienzmaßnahmen zu investieren und vielen Eigenheimbesitzer fehlt es grundsätzlich an den notwendigen Ressourcen. Auch der energetische Zustand des eigenen Gebäudes wird häufig überschätzt (Stieß et al. 2010). Dies könnten Gründe dafür sein, dass sich im Einfamilienhaussegment viele Gebäude mit hohen Energiebedarfswerten finden (dena 2016, S. 57).

³ Eine Ausnahme ist die Studie von Madsen (2018), die allerdings rein auf qualitativen Interviewdaten beruht.

Der Gebäudebestand aller Einfamilienhäuser in Deutschland deckt folglich eine große Bandbreite energetischer Zustände und technologischer Ausrüstung ab. Er könnte damit als Grundlage dienen, um das Zusammenspiel zwischen schwankenden Innenraumtemperaturen und der Energieeffizienz empirisch zu untersuchen.

6.3.2. Ableitung von Nutzertypen

Ausgehend von den durchgeführten Fallstudien in einzelnen Wohnblöcken mit einer großen Heterogenität an Haushalten wäre es außerdem interessant, die verschiedenen Komfortpraktiken der Haushalte nach typischen Nutzertypen zu quantifizieren. Solche wurden bereits in verschiedenen Studien ermittelt (van Raaij und Verhallen 1983; Guerra Santin 2011; Eon et al. 2017b; Sovacool et al. 2020b; Guasselli et al. 2024). Ausgehend von den Messdaten und Messanalysen einzelner Großwohnanlagen ließen sich in Anlehnung an Huebner et al. (2015b) und Kane et al. (2015) typische Temperaturmuster ermitteln, um auf deren Grundlage die Häufigkeit einzelner Nutzertypen für typische Wohnblocks abzuleiten.

Die dafür notwendigen Temperaturmessdaten sind in Deutschland in Wohnanlagen mit Mietwohnungen immer häufiger auch in der Breite verfügbar, da dort üblicherweise Heizkostenverteiler installiert sind, die zunehmend hochaufgelöste Daten erzeugen. In Forschungskooperationen zwischen Messdienstleistern, Wohnungsgesellschaften und Bewohnern ließen sich diese Daten in größerem Stil auswerten. Die Zusammenarbeit mit Wohnungsgesellschaften ist notwendig, um valide Informationen über die verbauten Gebäudetechnologien und die Gebäudehülle zu erhalten. Auf dieser Grundlage könnte analysiert werden, wie hoch der Energieverbrauch der einzelnen Nutzertypen vom Durchschnitt abweicht und ob durch gezielte Hilfestellungen solcher Haushalte erhöhte Einsparungen erzielt werden könnten.

6.3.3. Langzeitstudien

Da langfristig und mit zunehmender Verbreitung neuer Technologien durchaus mit Anpassungseffekten in den Komfortpraktiken zu rechnen ist, wären auch Langzeitbeobachtungen von großem Interesse, die es bislang im Gebäudebereich zur Untersuchung von Komfortpraktiken jedoch kaum gibt. Da Messdaten über lange Zeiträume erhoben werden und Gebäudedaten den Wohnungsgesellschaften prinzipiell zur Verfügung stehen, könnten in Forschungskooperationen mit Messdienstleistern und Wohnungsgesellschaften auch Analysen über längerfristige Zeithorizonte durchgeführt werden.

6.3.4. Integration sozioökonomischer Effekte

Auch hinsichtlich der Untersuchung sozialstruktureller Unterschiede könnten solche Forschungsk Kooperationen dienlich sein. Wie Galvin und Sunikka-Blank kritisch festgestellt haben, sind die Praktiker, wie sie in Energiestudien beschrieben werden, häufig bemerkenswert gleichförmig. Die Integration sozioökonomischer Effekte in Studien zu Komfortpraktiken wäre hilfreich, um die Auswirkungen von Herkunftseffekten auf den Energieverbrauch – zum Beispiel aufgrund unterschiedlicher erlernter kultureller Praktiken – oder Phänomene wie Energiearmut besser zu verstehen (Galvin und Sunikka-Blank 2016b, 66f).

In Deutschland wäre zudem von Interesse, inwiefern Haushalte, die Heizkosten im Rahmen der Sozialhilfe staatlich finanziert bekommen, aufgrund fehlender Anreize andere Komfortpraktiken pflegen und höhere Heizkosten verursachen. Dieser Vorwurf wird in der öffentlichen Debatte häufig erhoben, ohne dass es jedoch hinreichend empirische Evidenz gibt. Durch den Vergleich der Komfortpraktiken und Heizkosten von Haushalten in größeren Wohngebäuden, in denen sich sowohl Sozialwohnungen mit Mietpreisbindung als auch Wohnungen auf dem freien Mietmarkt befinden, könnten in weiterführenden Studien systematische Untersuchungen durchgeführt werden.

6.3.5. Untersuchung des Lüftungsverhaltens

Während das Heizverhalten und die sich daraus ergebenden Temperaturmuster in Wohngebäuden in einer Vielzahl an Studien relativ gut untersucht sind, besteht für das Lüftungsverhalten noch eine große Forschungslücke. Eine Ausnahme sind Simulationsstudien oder Laborprojekte, in denen einzelne Häuser umfassend mit Messtechnik ausgestattet wurden (Wallace et al. 2002). Ein wesentlicher Grund dafür ist, wie oben dargelegt, dass Bewohner über Dauer und Zeitpunkte des eigenen Fensteröffnungsverhaltens nur relativ ungenau Auskunft geben können. Zudem sind Messungen offener Fenster kostspielig.

Aufgrund des Fensterdesigns in Deutschland muss im Idealfall auch erfasst werden, ob ein Fenster vollständig geöffnet oder nur gekippt ist. Jedes Fenster müsste daher mit zwei Sensoren am Rahmen oder einem Sensor im Fenstergriff ausgestattet werden, wodurch die Vermessung in einer großen Zahl an Haushalten mit einem hohen Aufwand verbunden ist. Im Anschluss an die Arbeit von Weber (2021) wäre eine Untersuchung des Fensteröffnungsverhaltens in Abhängigkeit von verschiedenen Gebäudetypen und Gebäudetechnologien von Interesse, bei der Messungen als Grundlage dienen sollten.

Verschiedene Studien weisen darauf hin, dass gerade in Passiv- und Niedrigenergiehäusern mit Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung das Fensteröffnungsverhalten einen wesentlichen

Grund für Effizienzverluste darstellt (Rohracher 2003; Chiu et al. 2014). Die Studie von Weber (2021) hingegen bietet Belege dafür, dass es vor allem in gut gedämmten, aber nicht mit einer automatischen Lüftungsanlage ausgestatteten Gebäuden zu vermehrten Lüftungsereignissen kommt, während sich das Fensteröffnungsverhalten wieder wesentlich reduziert, wenn eine mechanische Lüftungsanlage vorhanden ist.

Grundsätzlich gilt das Fensteröffnungsverhalten als einer der größten Einflussfaktoren auf den Heizenergieverbrauch in Gebäuden. Für eine große Variabilität in den zu beobachtenden Mustern sorgt dabei unter anderem die Tatsache, dass für viele Menschen die Möglichkeit, ein Fenster öffnen zu können, weit mehr ist als nur ein Weg, für frische Luft zu sorgen (Hauge 2013; Berneiser et al. 2024). Um die Forschungslücke hinsichtlich des Lüftungsverhaltens zu schließen, wären größer angelegte Feldstudien des Fensteröffnungsverhaltens sinnvoll. Diese sollten, anders als bislang üblich, größere, quantitativ auszuwertende Stichproben umfassen. Die Kombination mit Befragungsdaten zu den Gründen für das Fensteröffnungsverhalten und Messdaten in verschiedenen technischen Settings ist notwendig, um zu einem besseren Verständnis dieses – nach dem Heizverhalten – bedeutendsten Einflussfaktors auf den Heizenergieverbrauch zu gelangen.

6.3.6. Gesellschaftspolitischer Rahmen

Der bisherige Überblick über die Forschungslücken hat gezeigt, dass es in einigen Dimensionen der Mensch-Technik-Interaktion in Wohngebäuden noch erheblichen Forschungsbedarf gibt – gerade auch, wenn es um quantifizierbare Effekte auf den Heizenergieverbrauch geht. Um die Lücke zwischen Einsparzielen und tatsächlich erreichbaren Einsparungen zu schließen, ist es zuletzt aber auch notwendig, die Analyse auf Phänomene jenseits der Mikroebene der Mensch-Technik-Interaktion auszudehnen und die größeren institutionellen Rahmenbedingungen in den Blick zu nehmen.

Letztlich deutet die Resonanz, die das Problem der Energy-Performance-Gap sowohl in der Forschung als auch in der Praxis erfahren hat, auf grundlegendere Probleme der nachhaltigen Transformation des Gebäudesektors hin. Ein grundsätzliches Problem der Nachhaltigkeitstransformation im Gebäudesektor – wie auch in anderen Sektoren – ist, dass viele Maßnahmen zur Senkung von CO₂-Emissionen derzeit betriebswirtschaftlich nicht effizient oder aufgrund verteilungspolitischer Fragen umstritten sind (Galvin 2024). Dies zeigt sich sowohl in der Skepsis von Vermietern und Hauseigentümern gegenüber weitreichenden Effizienzmaßnahmen als auch in der im Vergleich zu den angestrebten Zielen seit Jahren zu geringen Sanierungsrate in Bestandsgebäuden (Behr et al. 2023).

Obwohl weitreichende Effizienzmaßnahmen – sowohl absolut als auch relativ – trotz hoher Energy-Performance-Gaps zu wesentlichen Einsparungen führen, lassen sich die Kosten für solche Maßnahmen in vielen Fällen durch die erzielten Einsparungen kaum oder nur über sehr lange Zeiträume amortisieren (vgl. Aydin et al. 2019). Kosteneinsparungen sind aufgrund der lange Zeit stagnierenden und im Vergleich zu den ökologischen Folgekosten relativ geringen Energiepreise sowie der unzureichenden Menge eingesparter Energie zu gering, um die gleichzeitig aufgrund beständig steigender Baukosten hohen Sanierungskosten zu refinanzieren. Eine Anhebung der Energiepreise würde zwar den Anreiz zur Einsparung erhöhen, wie auch die aus dem Ukrainekrieg folgende Energiekrise gezeigt hat. Allerdings würden erhöhte Energiepreise ohne soziale Ausgleichsmechanismen gleichzeitig die einkommensschwächeren Haushalte unverhältnismäßig stark belasten.

Das Problem der unzureichenden Kosteneinsparungen wirft daher die Frage auf, wie viel eine Gesellschaft zur Erhöhung der Energieeffizienz und der Vermeidung von Emissionen zu zahlen bereit ist und wie diese Kosten zwischen den gesellschaftlichen Akteuren zu verteilen sind. Der fast ritualisierte Verweis von Vertretern der Wohnungswirtschaft auf die Verantwortung von Technikentwicklern und Mietern, um für mehr Effizienz in Gebäuden zu sorgen, sowie umgekehrt der Verweis der Ingenieure und Mieter auf die jeweils anderen Gruppen kann daher auch als Indikator für dieses Problem der wechselseitigen Verantwortungsverschiebung in Verteilungsfragen gesehen werden.

Die Energy-Performance-Gap weist daher auf Probleme hin, die auf der Makroebene der politisch-institutionellen Rahmenbedingungen angesiedelt sind. Dazu gehört zum Beispiel die Frage, inwieweit Staaten die Kosten für Nachhaltigkeitstransformationen im Sinne eines öffentlichen Gutes finanzieren müssten. Die Kosten dafür müssten dann über Schulden oder Steuern refinanziert werden. Denkbar wäre auf mittelfristige Sicht zum Beispiel eine Erhöhung der fossilen Energiepreise beziehungsweise eine progressive Besteuerung des fossilen Energiekonsums, die starke Anreize zu Einsparungen beziehungsweise zum Umstieg auf erneuerbare Energien liefern könnte.

Grundsätzlich stellt sich die Herausforderung, inwiefern auf Wachstum angewiesene Gesellschaften es schaffen können, dieses Wachstum von den negativen Umweltauswirkungen zu entkoppeln (vgl. Beckert 2024). Es sind solche allgemeinen Fragen zu Themenkomplexen wie der möglichen Besteuerung fossiler Energien, der Lastenaufteilung zwischen verschiedenen sozialen Gruppen und Generationen sowie der gerechten, aber realpolitisch durchführbaren Belastung von Einkommen, Vermögen und Lebensstilen, die auch in Bezug auf einzelne Sektoren

wie den Wohngebäudebereich einer erhöhten wissenschaftlichen, politischen und gesellschaftlichen Aufmerksamkeit bedürfen.

Ein konkretes Forschungsprogramm, das sich daraus ergibt, betrifft das aktuelle Abrechnungsregime für Heizkosten. Im derzeitigen Abrechnungsregime besteht für Vermieter ein geringer Anreiz, in Effizienzmaßnahmen zu investieren, da Mieter fast ausschließlich allein von den Heizkosten betroffen sind (Ástmarsson et al. 2013). Zu untersuchen ist, inwiefern alternative Heizkostenregime möglich wären, die dieses Vermieter-Mieter-Dilemma überwinden. Diese neuen Heizkostenregime müssten sowohl sozial gerecht gestaltet werden als auch hinreichende Anreize zur Steigerung der Effizienz im Wohngebäudesektor bieten, um so die bislang zu niedrige Sanierungsrate im Gebäudebestand zu erhöhen.

Die Auswirkungen der Mensch-Technik-Interaktion auf den Energieverbrauch in Gebäuden führen repräsentativ vor Augen, welche Rolle Technologien bei der nachhaltigen Transformation einnehmen und wie eine allgemeine Reduzierung der Emissionen gelingen kann: Inwiefern reicht technischer Fortschritt allein nicht aus, um die Nachhaltigkeitstransformation zum Erfolg zu führen? Und inwiefern sollte eher der soziale Umgang mit der Nachhaltigkeitstransformation, das Gefüge aus Institutionen und die Prozesse sozialen Wandels im Mittelpunkt der Diskussion stehen?

6.4. Schlussbemerkung

Erleichterte Bedienung, verbesserter Komfort, erhöhte Energieeffizienz. Die Versprechen der Technik sind verlockend. In der Praxis allerdings zeigen sich vielfältige Anpassungsprobleme. Technische Energieeffizienzmaßnahmen beruhen auf Annahmen darüber, wie sich Bewohner zu verhalten haben. Und auch Vorstellungen darüber, unter welchen Voraussetzungen sich Menschen wohlfühlen, spielen in den Skripten der Entwickler und Ingenieure eine wichtige Rolle. Umgekehrt zeigt sich in den Alltagspraktiken der Bewohner eine große Vielfalt, nicht nur in den Komfortvorstellungen, sondern auch darin, wie Technologien in die eigene Praxis eingebunden, angeeignet und domestiziert werden. Beide Seiten aneinander anzupassen, ist eine Herausforderung, bei der standardisierte Ansätze – sei es in der Technikentwicklung oder der Aufklärung der Bewohner – häufig an ihre Grenzen stoßen. Regelmäßig lassen sich in der Folge reduzierte Einspareffekte und Energy-Performance-Gaps beobachten.

Auch sind die Mechanismen, die zu Energy-Performance-Gaps führen, häufig nur schwer im Vorhinein absehbar. Vielmehr zeigen sich die Konsequenzen meist mit Verzögerung, nachdem die Maßnahmen durchgeführt wurden und viele Vermittlungsmaßnahmen zu spät kommen. Wie die vorliegende Arbeit zeigt, ist dies nicht nur bei neuen Gebäudeautomationstechnologien der

Fall, von denen gesagt werden könnte, sie seien noch nicht vollständig ausgereift. Auch für etablierte Effizienzmaßnahmen wie die Abdichtung und Dämmung der Gebäudehülle führen Unterschiede in der Mensch-Technik-Interaktion zu Ineffizienzen beim Energieverbrauch.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dieser spezifischen Ursache der Energy-Performance-Gap, nämlich der Interaktion zwischen Bewohnern und Gebäudetechnologien. Im Unterschied zu Forschung, die das Problem zum einen vor allem in den unzureichenden Berechnungs- und Simulationstechniken sieht, die den Bedarfsabschätzungen zugrunde liegen, und zum anderen im schwer vorherzusagenden und kaum zu kontrollierenden Bewohnerverhalten verortet, legt die vorliegende Studie den Fokus auf die Schnittstelle dieser zwei Phänomene. Betont wird damit eine Perspektive, die den Grund für den erhöhten Energieverbrauch nach einer Effizienzsteigerung im Zusammenspiel sucht, das sich ergibt, wenn ein spezifisches, nur teilweise designtes ‚Verhalten‘ von Technologien auf ein heterogenes, mit Eigensinn ausgestattetes und trotzdem nicht vollständig stabiles und damit vorhersagbares Verhalten von Bewohnern stößt.

Eine solche Perspektive bedeutet, die Technik wie auch das Soziale ernst zu nehmen und in einem gemeinsamen sozio-technischen Rahmen zu analysieren. Sie bedeutet aber auch, die nicht-intendierten Nebenfolgen nicht einseitig dem Nichtfunktionieren von Technik oder der Irrationalität von Bewohnern zuzuschreiben. Anhand konkreter Beispiele zeigen die einzelnen Fallstudien, wie eine solche sozio-technische Perspektive zum Verständnis von Energy-Performance-Gaps beitragen kann, wobei in Übereinstimmung mit der sozialwissenschaftlichen Perspektive der Beschreibung und Erklärung des Phänomens Vorrang gebührt vor dem Entwerfen von Lösungsvorschlägen.

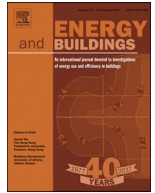
Als Ergebnis kann daher eine Sichtweise stehen, die demütig ist gegenüber der Komplexität der Realität und Vorsicht mahnt gegenüber einfachen Lösungen und ihren hochtrabenden Versprechen, die Probleme des Energieverbrauchs ökonomisch, ökologisch und sozial effizient zu lösen.

Anhang A Fallstudien

A.1 *Apartment related Energy-Performance-Gap* (Moeller et al. 2020)

Moeller, Simon; Weber, Ines; Schröder, Franz; Bauer, Amelie; Harter, Hannes (2020): Apartment related energy performance gap – How to address internal heat transfers in multi-apartment buildings. In: Energy and Buildings 215, Artikel 109887.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109887>.



Apartment related energy performance gap – How to address internal heat transfers in multi-apartment buildings

Simon Moeller^{a,*}, Ines Weber^b, Franz Schröder^c, Amelie Bauer^a, Hannes Harter^d

^aLudwig-Maximilians-Universität München, Department of Sociology, Konradstr. 6, 80801 München

^bInstitut Wohnen und Umwelt GmbH, Rheinstr. 65, 64295 Darmstadt

^cMetrona Wärmemesser Union GmbH, Aidenbachstr. 40, 81379 München

^dTechnical University of Munich, Institute of Energy Efficient and Sustainable Design and Building, Arcisstr. 21, 80333 München

ARTICLE INFO

Article history:

Received 10 September 2019

Revised 17 January 2020

Accepted 16 February 2020

Available online 24 February 2020

Keywords:

Energy performance gap

Internal heat transfer

Occupant behaviour

Social practice theory

Multifamily buildings

Energy-efficient buildings

Household energy consumption behaviour

ABSTRACT

Households' heating energy consumption is one of the most important sources of a nation's total CO₂ emissions. But there remains uncertainty about the impact of occupant behaviour on heating energy consumption, especially in multi-apartment buildings. In bringing together apartment specific data of occupant behaviour and physical building properties of multi-apartment buildings, the quantitative influence of different factors determining apartments' heating energy consumption can be separated by means of OLS-regression. For multi-apartment buildings the heating energy consumption of a single apartment seems to be determined not only by the behaviour of households in opening windows and using radiators but also by internal heat transfers, triggered by temperature differences between neighbouring apartments. This study shows some limits of refurbishment policies and consumer education and points to the importance of considering both data on occupant behaviour and building physics at the apartment level together to understand households' heating energy consumption.

© 2020 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

In this paper we investigate the causes for the energy performance gap in 40 apartments across six identical energy-efficient multi-apartment buildings¹ in Munich, southern Germany, over one heating period. We consider the interplay between different occupant practices within the same building to be a major cause for the high heating energy consumption in these buildings. Internal temperature differences between apartments, caused by different heating and ventilation habits of the respective households, lead to transfers of heating energy between adjacent apartments and thus to large differences in households' heating energy consumption and their respective energy performance gap. Analysing the interplay between building physics and occupant behaviour at the household level helps to understand the limits of purely

techno-centric approaches in reducing households' heating energy consumption.

Of the total final energy consumption in Germany about 26% is consumed in residential buildings, with around 70% of this share used for heating purposes [1]. Besides considerable efforts to upgrade buildings and heating technology to current energy efficiency standards [2,3], there remains a gap between the predicted heating energy demand and the actual heating energy consumed² by occupants [4]. This mismatch between design predictions and real consumption is referred to as energy performance gap³ (EPG), defined as the percentage difference between the actual measured heating energy consumption and the predicted energy demand of a building [5].

² Hereafter, the terms consumption, energy consumption or heating energy consumption refer to the actual metered final energy consumption for space heating, unless otherwise stated. The terms demand, energy demand, heating energy demand and predicted or calculated energy demand refer to the theoretical design demand calculated on the basis of information about the envelope and layout of the building.

³ The energy performance gap is in the literature often mixed up with other concepts like the energy savings deficit or the rebound effect, or labelled differently (e.g. energy efficiency gap), due to inconsistencies in definitions and terminology [5]. When referring to studies using different labels we will use the term energy performance gap for consistency reasons.

* Corresponding authors. .

E-mail addresses: simon.moeller@soziologie.uni-muenchen.de (S. Moeller), i.weber@iwu.de (I. Weber), f.schroeder@metrona-union.de (F. Schröder), amelie.bauer@soziologie.uni-muenchen.de (A. Bauer), hannes.harter@tum.de (H. Harter).

¹ The buildings are identical in layout and efficiency standard according to the German Energy Saving Ordinance (EnEV) of 2009. Each building consists of 8 apartments.

Explanations for the causes of the EPG mostly relate to technical and design issues [6–8] as well as occupant behaviour. A recurring topic in this regard are rebound effects [5,9–11], which are based on ideas of rational behaviour and describe a situation where efficiency gains are at least partly compensated by the demand for higher room temperatures and more negligent ventilation behaviour.

Critique of such explanations generally centres around an overly simplistic understanding of the occupants and the disregard of interaction effects between building and occupant behaviour [12–14]. Social practice theory, which has for some time now received increased attention in the field of energy research [15–17] addresses these shortcomings, moving beyond simplistic accounts of occupant modelling by focusing on “practices” rather than on the behaviour of individuals. Thus the interaction between building and occupant behaviour, such as difficulties in the handling of building controls [18], adaptation effects [13–19] or the emergence of energy consuming practices as a reaction to the design of the built environment [15], is emphasized.

By building on social practice theory [20–23] and combining it with calculations of EPGs and measurements of indoor temperatures and window opening rates of each specific apartment we investigate the mutual effects of building physics and different patterns of occupant behaviour on the EPG of the individual apartments. The advantage of focusing on EPGs at apartment level is that both the predicted heating energy demand dependent on the location of an apartment in a building and the metered heating energy consumption of the individual households in the apartments are taken into account. From the perspective of heating energy consumption, it matters if a household lives in the middle of the building or in an apartment on the top floor. Differences within buildings, which are usually ignored in calculations of energy performance certificates, are therefore considered. This approach offers new and more detailed insights into the interactions between buildings and household practices, in particular into the internal heat transfers between adjacent apartments, which have been largely disregarded in this context so far and are not yet well understood [18].

The next section provides a brief literature review on the EPG, occupant behaviour and the interactions between buildings and occupants. We then introduce a model for estimating the individual, apartment related energy demand and describe the data and methods used in this study. In the fourth section, we present the results regarding the differences in EPGs between apartments followed by a regression model of apartment related energy consumption taking building and occupant factors into account. The main results are summarized and discussed, followed by an outlook of the policy implications in the last section.

2. Literature review

The energy performance gap (EPG) is calculated by comparing the predicted heating energy demand with the actual metered heating energy consumption in the operational phase and is therefore a measure of the unrealized potential of buildings with regard to energy efficiency [5]. The EPG has attracted great attention and numerous studies report the actual heating energy consumption for energy-efficient buildings⁴ is threefold the predicted heating energy demand. In a survey of German single and multi-apartment buildings, Erhorn reports discrepancies between calculated and actual heating energy requirements of 300% [24], while Cali et al. [25] found a wide variation of EPGs, ranging from below 0 to over

280% for three different buildings in Germany. Haas et al. [26] and Haas and Biermayr [27] report in their studies of 400 and 500 buildings EPGs of 15 to 30% and 20 to 30% respectively, while in a more recent study of 10 buildings in Germany, refurbished between 2010 and 2015, Weber and Wolff [28] report EPGs ranging between – 33% and 65%.

Despite ample evidence on the existence of EPGs, there remains a gap in research understanding the performance of individual apartments in multi-apartment buildings (exceptions are [18,25,28–30]). This can, at least in part, be explained by the fact that there exists no standardised method of calculating the heating energy demand of single apartments within buildings [31]. Consequently, most studies only consider complete buildings without differentiating between apartments (e.g. [32–35]).

The causes of EPGs are often traced back to technical and design issues, such as problems with heating or ventilation technology [7,8] and oversimplified assumptions used in calculation and simulation procedures [6]. Building characteristics and heating technology are largely considered to be the most important determinants of differences in heating energy consumption [9,36,37]. Occupant behaviour is regarded as the main remaining cause for the differences in heating energy consumption between buildings [29,38,39]. Many studies therefore consider occupant behaviour to be a root cause for the underperformance of energy-efficient buildings [4,40]. Within this literature, the differences in energy consumption are explained by window opening behaviour [41,42], thermal comfort preferences, temperature settings and temperature profiles [39,43], socio-economic variables or divergences in occupancy patterns [9,43].

A recurring topic in research on households' energy consumption are rebound effects [9–11,44,45], usually understood in a narrow economic sense: they describe situations where efficiency gains are, at least in part, compensated by a deliberate increase in the consumption of energy services in reaction to a decrease in the cost of these energy services following the use of more efficient technology [46].

Recommendations for taking action to decrease the EPG are often based on these findings. In research about occupant behaviour and user interference, in accordance with the view of occupants as rational actors, there is a noticeable bias towards studies on awareness-raising and consumer feedback to inform and educate occupants and guide their behaviour towards more desirable paths [47–50]. This research often builds on models of planned and rational behaviour [51] and other ABC (Attitude, Behaviour and Choice) approaches [52], implying that a combination of peoples' attitudes and contextual barriers, such as incomplete information about the environmental consequences of energy consumption, drive wasteful energy use. However, overall, information and feedback approaches have shown little success in changing consumer behaviour [14,50,53].

By placing the focus on the interactive nature of building physics and occupant behaviour, social practice theory (SPT) helps to understand these shortcomings. It implies a more socio-technical view on energy consumption within buildings [13–15,54] by accounting in more detail for the embeddedness of behaviour in the environment of social interactions and the built environment [55]. This framework has so far been applied successfully in the field of energy research [13,14,18,19,56–59]. According to Galvin and Sunikka-Blank, it is mostly applied as a heuristic tool [23] implying a shift in perspective, away from individual actors making rational decisions based on cost-benefit calculations towards practices and the interactive nature between its elements technology and peoples' meanings, knowledge and habits [58]. Consequently, practices consist of different elements shaped as much by personal meanings and skills as by material surroundings [22]. And it is therefore not useful to think of behaviour as be-

⁴ In this article, when we speak of energy-efficient buildings, we mean, unless otherwise stated, buildings that, like the buildings in our sample, meet the requirements of the German Energy Saving Ordinance (EnEV) of 2009.

ing rational and planned but rather as consisting in largely unconscious routines and habits evolving over time in a co-evolutionary process with its environment [60]. Without going into a detailed analysis of these elements when analysing occupant behaviour, the theoretical and empirical approach in this study is backed by using the framework of practice theory as a heuristic device.

The practice theoretical accounts, together with findings about the heat transfers between apartments [25], encouraged us to look at the interactions between households within multi-apartment buildings in more detail. These buildings are of particular relevance in Germany, where about half of the population lives as tenants in buildings with three or more apartments [61]. Together with indoor temperatures and window opening rates, which are usually regarded to be the most important determinants of occupant behaviour on heating energy consumption [39,62], we consider the interaction effects between apartments to be an important additional explanatory factor for the heating energy consumption of households. Research on the heat cost allocation in multi-apartment buildings points to the importance of considering internal heat transfers between apartments when calculating households' specific costs of heating energy consumption [63–65]. Cali et al. [25] and Osterhage et al. [66] point to the heat transfers through inner walls and the possible effects on the heating energy consumption of single households in multi-apartment buildings. This is confirmed by Gafsi and Lefebvre [67] who report that different types of behaviour, through their interaction within apartment buildings, lead to high internal heat transfers between apartments. While some households benefit from heat transfers, decreasing their own energy consumption, other households suffer high heat losses due to heat transfers to adjacent apartments through temperature differences [8,25]. Consequently, indoor temperatures should not only be considered as an indicator for the thermal comfort of occupants as they are a result of the interaction effects between occupant practices in adjacent apartments and the different heat transfer coefficients of the inner and external walls. The relative importance of heat transfers increases with rising insulation standards of buildings. Internal heat transfers thus depend on building characteristics as well as on occupant behaviour. Vice versa, they also influence the behaviour of occupants by increasing or decreasing the need for heating, thus being a good example of the emergence of a practice if certain conditions and interactions are upheld for a longer period of time.

In the next section we describe how we estimated the internal heat transfers between the apartments in six multi-apartment buildings based on a static model. This allows us to address both the differences in the EPGs between the apartments as well as the interactions between the occupants and the buildings in the following analyses.

3. Data and methods

Our analysis builds on building and measurement data for six three story multi-apartment buildings of equal design and energy standard, built in 2010 in Munich, southern Germany, in accordance with the German Energy Saving Ordinance (Energieeinsparverordnung - EnEV) of 2009 [68]. Each apartment building has 8 apartments and a total effective area of 750 m², of which about 600 m² are living area (see Fig. 1). Information on the buildings, such as the floor plans, wall and window area and specific heat transfer coefficients were drawn from the thermal insulation certificate.⁵ We determined the heating energy demand of each apartment under assumptions used in the German

Energy Saving Ordinance (EnEV) and calculated it on the basis of DIN V 4108–6:2003–06 for residential buildings [69]. For these calculations we added up the hourly heat gains and losses based on the assumptions of an indoor temperature of 19 °C, an air change rate of 0.7 h⁻¹, internal heat gains of 5 W/m² and solar heat gains according to the global radiation in the measurement period. The apartment related surface-to-volume ratio depending on each apartment's location has been included in the calculation. The predicted values for the heating period from October to April are shown in Table 1. They differ not only by the size of the apartment, but also depend on the apartment's location. The apartments on the top floor (i.e. Apartments 1–3) have an energy demand of 1.5 to 2 times higher than the apartments of the same size on the 2nd floor (Apartments 4–6) due to the larger surface-to-volume ratio with external walls. The total energy demand of the apartments sums up to 45.4 MWh/a (60 kWh/m²a).

Between October 2012 and September 2013, the buildings were subject to a research project and the apartments had been equipped with temperature sensors and window handle contacts. The indoor temperatures and window statuses (open/closed) were logged every few minutes and aggregated on an hourly basis. The outdoor temperatures and global radiation were measured hourly. The heating energy consumption for all but 8 apartments and the total energy consumed for domestic hot water consumption per multi-apartment building was measured on a monthly basis [70]. For further analysis we aggregated all data on the level of months and apartments. The complete methodological process is shown in Fig. 2 in a general overview.

In order to calculate the EPGs for apartments, which in principle should be comparable with other studies, the measured heating energy consumption for all apartments had to undergo a weather adjustment and two further adjustments described in the following paragraph.

Each multi-apartment building is equipped with a central domestic hot water system and these systems have been shown to decrease the heating energy consumption of buildings significantly through their heat losses compared to buildings with decentralized hot water generation [63,70–72]. We take this effect into account by adding 60% of the average building energy consumption for hot water generation per square metre to the measured heating energy consumption of each household. This estimate of the energy distribution losses from hot water generation is a conservative estimate compared to the results from Schröder et al. [70] and other studies [63–71,72], who find that in buildings with central domestic hot water systems approximately 45–80% of the energy for hot water production is lost through the distribution within the building. The distribution of 60% of the average domestic hot water energy consumption in our multi-apartment buildings leads to a 26% increase on the energy consumption of each apartment. For the total heating energy consumption at the building level, we furthermore added 20% to account for the average heating energy consumption of the partially heated basement and staircases which are not included in the metered consumption data of the apartments. The 20% is the average difference between the sum of the measured heating energy consumption of the apartments within each apartment building and the respective total measured heating energy consumption per building. We had annual data from 2011 to 2017 for both. After these corrections, the adjusted heating energy consumption for the average multi-apartment building amounts to 51.8 MWh (69 kWh/m²a).

The energy performance gap (EPG) on the building level as well as for each apartment can now be calculated as the difference between the adjusted heating energy consumption C and the predicted energy demand D divided by the energy demand D in percent (see Eq. (1)), returning an average EPG for the buildings of

⁵ The thermal insulation certificate (German: Wärmeschutznachweis) was compiled according to EnEV 2009, DIN 4108, DIN EN 832 and DIN 4701-10.



Fig. 1. North view of one of the buildings with apartment id and living area in m².

Table 1

Heating energy demand of individual apartments in kWh over heating period.

	Apartment 1	Apartment 2	Apartment 3	Apartment 4	Apartment 5	Apartment 6	Apartment 7	Apartment 8
Total heating period [kwh]	7365	2798	6338	4680	1492	4141	6664	6861

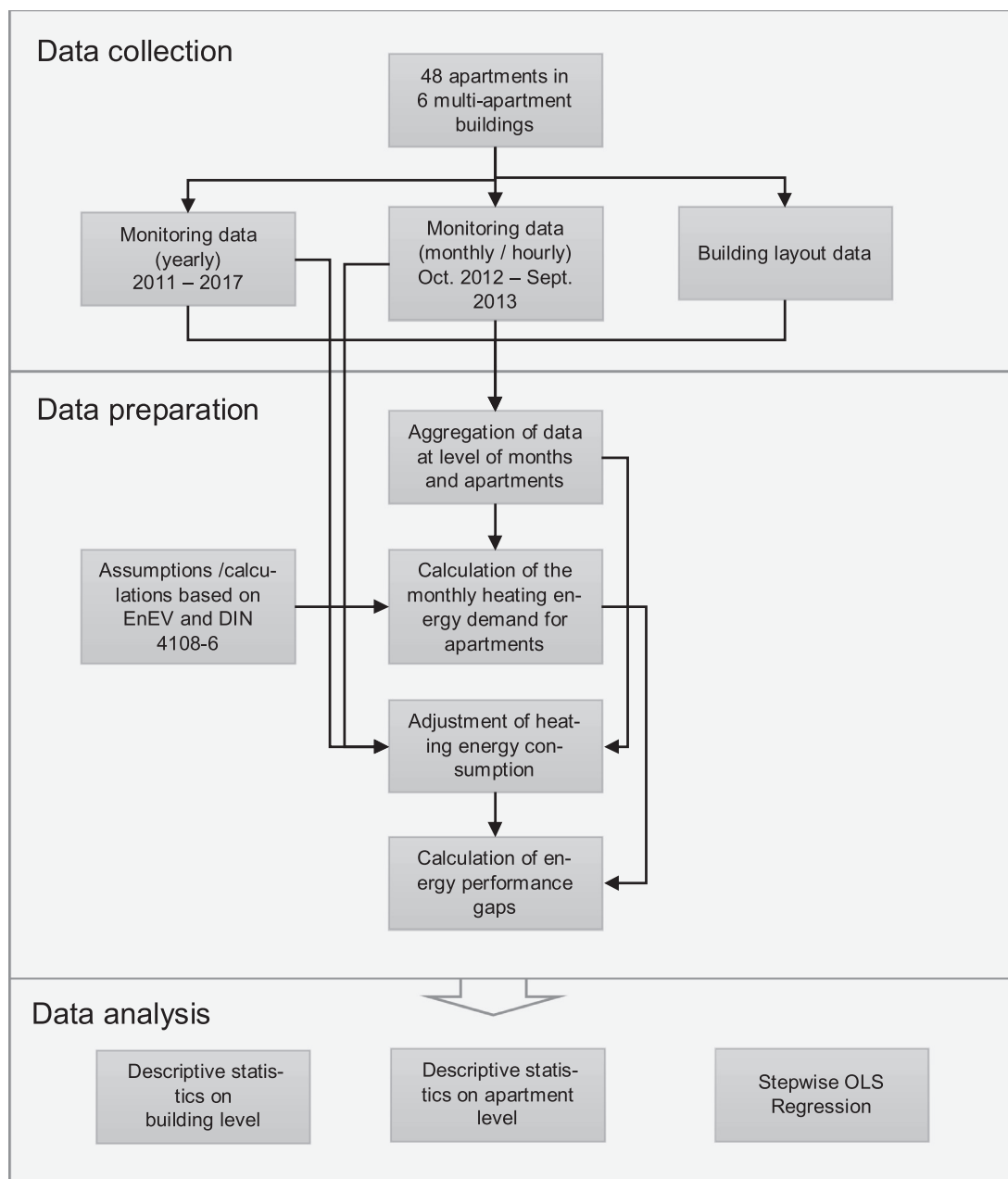


Fig. 2. Research methodology.

Table 2
Descriptive statistics for independent variables in regression models.

	Mean	Min	Max	SD	n*
Living area [m ²]	73	40	98	21.5	48
Living area squared					
External wall area [m ²]	127	30	205	63.3	48
Internal heat transfers [kWh]	0	−665	849	282	336
Indoor temperature [°C]	22.0	14.9	26.2	2.0	336
Window opening rate [%]	28	0	100	25	329

* The number of observations for living area and external wall area refer to the 48 different apartments whereas the observations for indoor temperature, window opening rate and internal heat transfers result from measures in 48 apartments for 7 time periods.

15.4% [5].

$$EPG = \frac{C - D}{D} \times 100\% \quad (1)$$

Where EPG = Energy Performance Gap [%]; C = Adjusted Heating Energy Consumption [kWh]; D = Predicted Heating Energy Demand [kWh].

In the next step, we extended our building model with information on measured indoor temperatures for each apartment. This allowed us to calculate the heat transmission losses based on the differences between actual indoor and outdoor temperatures. As the heat transfer coefficients for the internal walls are not reported in the thermal insulation certificate, we assumed a coefficient of 1.3 W/m²K, which represents a conservative estimate [64] [compare [73] for similar values]. Our main variable of interest, the internal heat transfers between adjacent apartments, was then calculated for each apartment based on the internal wall areas and the heat transfer coefficients by taking the differences between the actual apartment-related indoor temperatures into account.

For the multivariate analysis of the heating energy consumption on the apartment level to estimate the effect of the heat transfers between the different households on the heating energy consumption of a household, we perform stepwise, cross-sectional ordinary least squares regression (OLS). The dependent variable of interest is the apartment's monthly energy consumption in kWh. All independent variables are monthly values and refer to the apartment-level. The descriptive statistics of the independent variables are shown in Table 2.

The variable “living area” is an indicator for the differences in apartment size and typical occupancy within apartments, while “living area squared” takes into account a scale effect, based on the general observation that smaller apartments consume more energy per square metre than larger apartments [74]. Together with the variable “external wall area”, representing a control variable for the heat transmission losses, these two variables describe the influence of the building performance on the heating energy consumption. “Indoor temperatures”, measured in °C and ventilation rate are the main variables we find in the literature for describing occupant behaviour. Since we do not know air change rates when windows are opened, we use “window opening rate” as a proxy for the ventilation, measured as a factor of both the share of windows and the percent of time in which they are opened. Additionally, we include the calculated monthly “internal heat transfers” from and to adjacent apartments into the model. Dummy-variables for the months October to April as well as for the six multi-apartment buildings were included in the models to control for possible autocorrelation. Since we have consumption data for 40 apartments within 6 buildings and for 7 months, we have a panel data set where we need to correct for autocorrelation by using clustered standard errors at the apartment building level.

We controlled for multicollinearity with variance inflation factors, looking in more detail at the variables with a value higher

than a threshold of 2.5. We find values of 4 for internal heat transfers and indoor temperatures, which can be expected due to the calculation method of heat transfers. This issue is discussed further in Section 5. We find no substantial distortions through outliers, based on predicting the studentized residuals and looking at the leverage-versus-squared residual plots. We also performed robustness checks by calculating the models for each month separately, which did not indicate any signs of concern.

4. Results

4.1. Descriptive analysis of the differences between the apartment buildings

To investigate the causes of the energy performance gap (EPG) in the energy-efficient multi-apartment buildings, we start our analysis by looking at the descriptive statistics of the building-related heating energy demand according to the thermal insulation certificate and the building-related metered heating energy consumption (Fig. 3).

The adjusted, metered heating energy consumption of the average apartment building amounts to approximately 51.8 MWh (68 kWh/m²a), which is markedly above the 44.9 MWh (59 kWh/m²a) calculated in the thermal insulation certificate. This results in an EPG of 15% ((51.8 − 44.9) / 44.9), a figure which compares well to what one can find for similar buildings in the literature [25].

4.2. Descriptive analysis of the differences between the apartments

In the following, we will first examine possible reasons for the observation of an EPG by looking at the descriptive statistics of behaviour and building physics at the level of the apartments.

Table 3 shows that there exist large differences between the 40 apartments with regard to average indoor temperatures, window opening rates, energy consumption and EPGs over the heating period from October 2012 to April 2013.

All apartments appear to be rather warm in comparison to the average temperature of 19 °C which is commonly assumed in calculations of the heating energy demand, e.g. according to the DIN V 4108-6:2003-06 [69]. The average temperature in the apartment buildings within the heating period lies at 22 °C, but single apartments can deviate from this by almost ±4 K, which we argue can explain some of the differences in the heating energy consumption. This temperature difference is an indication that actual occupant behaviour deviates from projected behavioural standards in energy demand calculations, a finding which is also observed in other research [30–33].

Furthermore, window opening rates differ widely between apartments with some households almost never opening their windows, while, e.g. the window opening rate in apartment 1,5 – read building ID, apartment ID – amounts to 65%. Many households open their windows for durations much longer compared to what should be necessary in such buildings considering default requirements of air change of 0.7 vol per hour, an actual air change rate of about 0.17 h^{−1} from the automatic ventilation system⁶ and a high probability for considerable air change rates above 1 h^{−1} and up to 30 h^{−1} once windows are opened [41.75–77]. Excess ventilation can result from different routines and habits of households, their preference for fresh air [40,78] or, what could be even more important when looking at the EPG of apartment buildings,

⁶ Based on the performance of the automatic ventilation system, this system contributes an air change rate of approximately 0.17 h^{−1}. If an air change rate of 0.7 h^{−1} is necessary and an air change rate of 5 h^{−1} is assumed in winter when windows are opened, then a window opening rate of roughly 10% would be necessary.

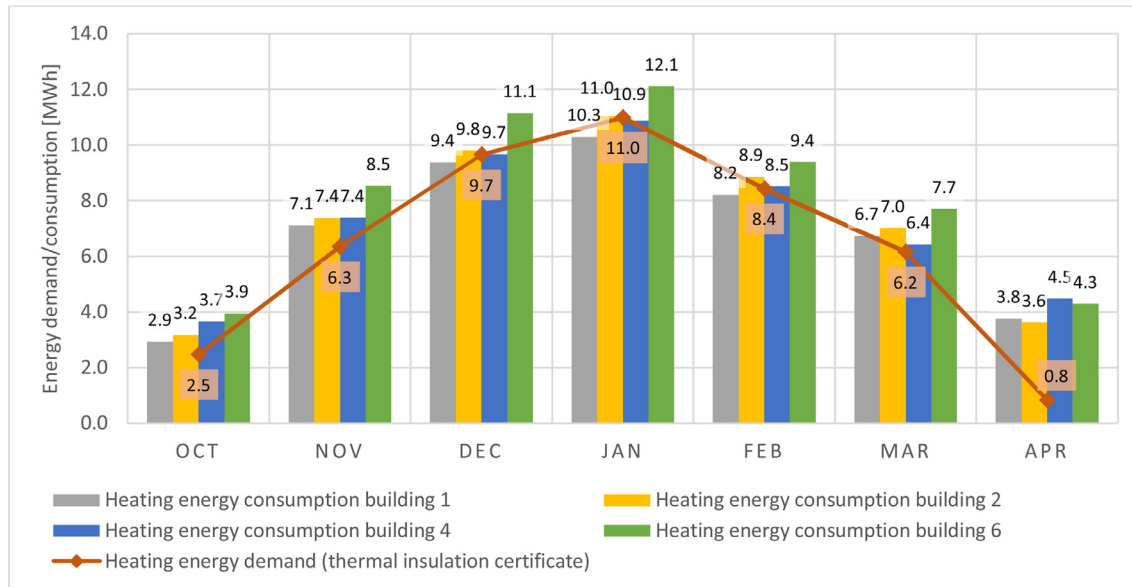


Fig. 3. Comparison of monthly heating energy demand and heating energy consumption [MWh] for multi-apartment buildings for which the heating energy consumption is fully available for all apartments.

Table 3

Temperature, window opening rate, adjusted heating energy consumption and EPG for the heating period October 2012 to April 2013. Energy consumption data is missing for 8 apartments.

Apartment building id	Apartment id	1	2	3	4	5	6	7	8
1	Temperature [°C]	22,19	24,67	22,25	24,67	25,66	22,6	20,9	19,56
	Window opening rate [%]	21	8	13	2	65	10	19	10
	Adjusted heating energy consumption [kWh]	8299	4025	8405	7868	6241	7716	6030	2788
	EPG [%]	13%	44%	33%	68%	318%	86%	-9%	-59%
2	Temperature [°C]	19,51	22,41	18,58	22,61	22,32	22,26	23,11	23,74
	Window opening rate [%]	12	7	10	9	0	14	35	8
	Adjusted heating energy consumption [kWh]			3005	5912			7793	7322
	EPG [%]			-53%	26%			17%	7%
3	Temperature [°C]	18,57	23,18	22,85	20,87	22,2	23,88	24,01	21,78
	Window opening rate [%]	17	16	10	8	66	15	17	7
	Adjusted heating energy consumption [kWh]	7170	2708	4859	2799	5094	8344	9859	6127
	EPG [%]	-3%	-3%	-23%	-40%	241%	101%	48%	-11%
4	Temperature [°C]	23,67	20,13	20,56	21,33	23,39	22	20,12	22,51
	Window opening rate [%]	13	3	8	3	27	12	19	30
	Adjusted heating energy consumption [kWh]	12356	2106	5171	5239	2343	5597	4482	9640
	EPG [%]	68%	-25%	-18%	12%	57%	35%	-33%	41%
5	Temperature [°C]	24,45	17,8	20,49	21,22	21,92	16,87	22,74	20,39
	Window opening rate [%]	12	2	16	9	1	19	17	30
	Adjusted heating energy consumption [kWh]	10866			3338	1153	4873		
	EPG [%]	48%			-29%	-23%	18%		
6	Temperature [°C]	22,05	23,01	22,49	21,21	23,68	21,65	24,33	24,06
	Window opening rate [%]	13	13	9	9	33	14	12	14
	Adjusted heating energy consumption [kWh]	7846	1153	8592	2352	1773	3644	9580	10202
	EPG [%]	7%	-59%	36%	-50%	19%	-12%	44%	49%

Table 4

Average, min, max and standard deviation of indoor temperature, window opening rate, heating energy consumption, EPG and calculated internal heat transfers in apartment building 3 in January 2013.

Apartment ID	1	2	3	4	5	6	7	8
Temperature [°C]	18.46	22.84	21.73	20.63	22.09	23.51	24.2	21.51
Min temperature [°C]	15.45	20.78	16.86	19.14	16.00	20.25	22.09	20.32
Max temperature [°C]	21.04	24.24	25.07	21.91	26.57	25.28	25.61	22.89
SD temperature [°C]	1.08	0.58	1.9	0.59	2.15	0.69	0.68	0.47
Window opening rate [%]	13	5	5	3	63	14	7	1
SD window opening rate [%]	17	15	10	9	32	14	14	5
Energy demand [kWh/month]	1589	621	1385	1102	385	986	1520	1601
Energy consumption [kWh/month]	962	449	875	328	904	1329	1500	924
Energy consumption [kWh/m ² /month]	11.19	11.23	12.68	3.81	22.6	19.26	15.31	9.62
Energy consumption [kWh/m ² a]	76	55	55	16	117	121	94	49
EPG [%]	-25	-11	-24	-50	+162	+53	+15	-27
Internal heat transfers [kWh](- losses + gains)	304	-168	159	163	43	-314	-418	232

the ventilation of excess heat gains from solar radiation or internal heat transfers from neighbours triggered by a preference for cool temperatures.

With heating energy consumption for some households up to four times the calculated heating energy demand, we see a wide range of different EPGs. While most households, performing better than their threshold value ($EPG < 0$), seem to have moderate indoor temperatures (< 21 °C) and window opening rates (around 10%) (e.g. apartment 1,8 and 6,4), apartments with a high EPG appear to have either high temperatures (e.g. apartment 1,6; 4,1), high window opening rates (e.g. apartment 4,8; 3,7) or a combination of both (e.g. apartment 3,5; 1,5). We also see a small proportion of households that, counterintuitively, have relatively high temperatures, are in the normal range of ventilating, yet perform exceptionally well with respect to their energy consumption (3,3; 6,2) and some households with similar behavioural patterns (e.g. 3,3; 1,6) but significant differences in their EPG. The reasons for these results are examined in the following.

In Table 4 we look at the EPG, heating energy demand and consumption and the three explanatory variables – indoor temperature, window opening rate and internal heat transfers – more closely by comparing different statistical indicators for each of these variables for the 8 apartments of apartment building 3 in January 2013.

If we compare the indoor temperatures of the eight apartments of one apartment building over a longer period of time in winter, one finds that the average temperatures in the apartments differ by almost ± 3 K from the average temperature of the building and vary between 18.5 °C in apartment 1 and 24.2 °C in apartment 7. A similar pattern can be found for window opening rates. While occupants in apartment 5 left at least one window open 63% of the time in the observation period, when outdoor temperatures in Munich were on average at 0.5 °C, most households only ventilated between 5 and 15% of the time.

Monthly energy consumption in January differs by a factor of almost six from 3.8 kWh/m² for the most economizing apartment (4) to 22.6 kWh/m² for the apartment (5) having the highest consumption. This can be traced back to the ventilation behaviour of its inhabitants. Even though apartment 5 has a high energy consumption, it still shows a net gain from the internal heat transfers, while the apartments above (2) and below (7) lose net energy to their neighbours. This indicates that the household in apartment 5 actually not only ventilates its own but also its neighbours heating energy as an effect of internal heat transfers.

It is furthermore apparent that heat transfers contribute significantly to the energy balance of single apartments. Apartment 6 and 3 have the same floor plan, but apartment 3 is located in the attic and therefore should have higher energy consumption. However, as a result of the heating practices of its neighbours,

the household in apartment 3 can benefit from its rather warm surroundings, decreasing the need to heat. Apartment 6, by contrast, transfers heat to its neighbour downstairs, therefore having a higher consumption and a much higher EPG. On average, the heat transfers from or to adjacent apartments equal a quarter of the total heating energy consumption. Some apartments, however, cover 30 (apartment 1) to 50% (apartment 4) of their heating consumption through heat transfers from neighbouring apartments.

4.3. Multivariate analysis of the differences between the apartments

In the next section we assess the magnitude of the internal heat transfers on the energy consumption of apartments by means of multivariate analysis using stepwise OLS-regression. By controlling for building physics, indoor temperatures and window opening behaviour, we can also estimate the influence of these variables compared to other determinants of the heating energy consumption which we could not measure, such as internal heat gains from electrical appliances and occupancy or differences in solar insolation due to shading. We include each apartment with the energy consumption figures ($n = 40$) for each month of the heating period from October to April ($n = 7$), resulting in 280 observations.

We calculated four models (Table 5) to predict the monthly heating energy consumption for single apartments as a linear function of the independent variables. The basic model includes the main building variables living area, living area squared and external wall area as explanatory variables. Apartment buildings and months are further controls to account for the panel structure of the dataset. External wall area, including roof and basement, describes the effect of heat transmission losses through the building surface on heating energy consumption. In model 2 we added internal heat transfers as the main explanatory variable. Model 3 shows building variables with indoor temperatures and window opening rate and model 4 combines all variables.

In model 1 the independent variables living space, living space squared and external wall area explain 44% of the variance of the apartments' heating energy consumption. According to the model, a higher external wall area results in a higher heating energy consumption. A larger living space is also associated with a higher heating energy consumption, however with the expected scale effect represented by the squared living space. Controlling for indoor temperature and window opening rate increases the fit of model 1 by about 32%, from a coefficient of determination of 0.44 to 0.76. Internal heat transfers alone explain another 4%. Since the variable internal heat transfers depends on the differences in indoor temperatures between the apartments, a large part of the variable indoor temperature is already controlled for by internal heat transfers, explaining the relatively small increase in explanatory power of the model once indoor temperature is included (compare model 2 and 3). However, the coefficient for indoor temperature decreases

Table 5

OLS regression for 40 apartments over the heating period (monthly heating energy consumption as dependent variable). Dummies for apartment buildings and months are further controls (not reported). T-statistics in parentheses and p-values as stars (* $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$).

DV: household heating energy consumption [kWh]	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4
Living space [m ²]	30.94 ^a (1.61)	52.62** (3.53)	74.15*** (5.04)	73.39*** (5.32)
(Living space) ²	-0.221 ^b (-1.46)	-0.374** (-3.34)	-0.530*** (-4.60)	-0.520*** (-4.94)
External wall area [m ²]	3.261* (2.24)	3.680*** (4.09)	4.024*** (4.35)	4.027*** (5.36)
Internal heat transfer [kWh]		-0.874*** (-6.52)		-0.660*** (-3.98)
Indoor Temperature [°C]			129.1*** (6.30)	41.06 ^c (1.28)
Window opening rate [%]			831.0*** (4.47)	920.6*** (4.37)
Constant	-507.0 (-0.84)	-1194.7* (-2.21)	-4716.7*** (-6.12)	-2829.8** (-2.92)
N	280	280	280	280
adj. R ²	0.435	0.721	0.761	0.803

^a p-value for living space: 0.116.

^b p-value for (living space)²: 0.152.

^c p-value for indoor temperature: 0.209.

from 129 in model 3 to 41 in model 4. Not controlling for internal heat transfers thus leads to a substantial bias in the correlation between indoor temperature and heating energy consumption. This indicates that, on average, a large proportion of the energy necessary to heat one's own apartment is actually shared with the adjacent apartments. Model 4 shows that 80% of the households' heating energy consumption can be explained by a combination of building physics, heating and window opening behaviour and the interaction effects between adjacent apartments, represented in the internal heat transfers.

The regression results show that the building physics together with the indoor temperature and window opening behaviour explain a large part of the differences in heating energy consumption between apartments, but that a significant proportion of this explanatory power is due to the internal heat transfers between the apartments. The remaining 20% not explained by this model likely stem from unobserved factors such as buffer effects of the thermal envelope, differences within apartments and thermal bridges, varying occupant practices such as the use of curtains and blinds and the differences in solar and internal heat gains from occupancy and electricity consumption.

5. Discussion

5.1. Research question

In this study we investigated the differences in the energy performance gap (EPG) for 40 apartments in six energy-efficient multi-apartment buildings and the effect of the internal heat transfers on their heating energy consumption. We focused on the household level to understand the interaction effects, first, between building physics and occupant behaviour and, second, between the different types of occupant behaviour within the buildings, with the aim of explaining their mutual effect on the heating energy consumption of the apartments. We build on research using the perspective of social practice theory for the analysis of household heating energy consumption [16,57] to suggest that it is neither occupant behaviour nor building physics alone which determine the energy performance of a building, but their interplay and the practices performed by the occupants that evolve within the context of the built environment. The results of this work suggest that research on the EPG of buildings should focus more on what happens within the buildings.

5.2. Summary of results

In a first step we calculated an apartment related value of the heating energy demand, which we then compared with the respective apartment's measured heating energy consumption. The average EPG on the apartment-building level amounts to 15%. At the level of the individual apartments, we found an average EPG of 25%, not weighted by apartment size, with a range from -59% to +318%, representing differences in energy consumption of more than 100 kWh/m²a.

To analyse the reasons for the EPGs of the apartments, we looked more closely at the internal heat transfers as indicators for the interaction effects between the building and occupant behaviour. We performed OLS regression analysis to compare the explanatory power of the different mechanisms. The results suggest that the interaction between building physics and occupant behaviour are of great importance for explaining differences in heating energy consumption. We see that the indoor temperatures are rather high compared to the standard assumption of 19 °C, but with large differences between the apartments. The regression analysis shows that a combination of building physics, indoor temperatures, window opening rates and internal heat transfers explains 80% of the variance of the heating energy consumption. Without controlling for internal heat transfers, the fit of the model decreases by only 4%; however, the decrease in the coefficient of indoor temperature suggests that a large part of the heating energy of an apartment does not increase its indoor temperature, but rather works to level off the temperature differences within the apartment building. The findings point to the interactions between indoor temperatures and internal heat transfers in explaining heating energy consumption and should be looked at in more detail in further research.

5.3. Discussion of results

The results show that it is important to consider the heating energy demand and the EPG at the apartment level. In this regard an understanding of the thermodynamic processes at this level is crucial. This is supported by research from Cali et al. [25] and Wolff et al. [18]. Based on a survey conducted in the same apartment buildings in 2018 [79] we know that a large share of the inhabitants receive low incomes and show high occupancy rates [80]. Thus the internal heat transfers and therefore the EPGs can be con-

sidered to be underestimated in our calculation of the heating energy demand. The overall findings appear to align quite well with the results of our qualitative research. Given the results in explaining the apartment related energy consumption for the sample of these six apartment buildings, this approach should be evaluated in different contexts in the future.

Except for the apartment size and location, the differences in heating energy consumption between the apartments can be explained mainly by two, in part interrelated, mechanisms.

As for the first mechanism, we suggest that deep rooted habits of heating and ventilation may lead to problems in energy-efficient buildings. People have different thermal comfort zones – with their thermal comfort depending on, inter alia, their adaptive behaviour, their body characteristics and their ideas of comfort [81,82] – but usually feel comfortable in a temperature range somewhere between 18–25 °C [83]. In highly insulated buildings the airtightness of the building envelope together with the inertia of the storage mass can cause people to feel uncomfortable more quickly if the set point of the indoor temperature is at the higher end of the thermal comfort scale. In contrast, occupants can regulate the indoor temperature up or down more quickly in older buildings [84]. This is especially relevant in periods with sudden high internal and solar heat gains, as the heat storage capacity of the building mass might already be at a maximum and cause apartments to overheat [85] if the thermostats are not adjusted accordingly in time. Thermal radiation from the walls might only slowly decrease if the radiators are turned off. Furthermore, people often do not know how to properly use thermostats. They are thus likely to adjust them corresponding to temperatures at the higher end of their comfort zone [18]. Opening the windows might therefore be favoured as the fastest way to regulate the indoor temperature in winter [70].

The heat storage capacity and airtightness of low-energy buildings in combination with the set-points of thermostats might also lead to the establishment of habits where households tilt windows over longer periods of time to increase the feeling of fresh air or where they repeatedly forget to close windows, leading to high losses of energy. If windows are tilted, the inflowing air is warmed up from the heat stored in the thermal mass and from the heaters, going unnoticed for longer time spans and resulting in a lack of biofeedback. Galvin [15] has shown that energy leakage through tilted windows could, in theory at least, amount to 10 times the energy lost from shock ventilation. Tilting windows is a common practice in German households due to window plants or other things placed at windowsills [15] and could be further reinforced by the design of energy-efficient buildings.

The second important mechanism leading to the EPG is the presence of internal heat transfers between adjacent apartments caused by different types of occupant behaviour within a building. Contrary to the interpretation of Galvin [8] we suppose that it is not just a small part of households, the behaviors, but the combination of households preferring high indoor temperatures situated next to households preferring low indoor temperatures within one apartment building. This results in internal heat transfers and thereby contributes to the EPG of some apartments. In general we see that occupant behaviour is not homogeneous as assumed in building performance simulations [86]. Rather, people ventilate quite differently, depending on factors like their preference for fresh air, habits like smoking or cooking as well as hygienic and acoustic reasons [41]. Also thermostat use depends on different determinants such as the wish to save money or physical stature [38,58,87]. If occupants with different thermal preferences or comfort practices are located next to each other, this results in high internal heat transfers and may lead to increased energy loss through ventilation.

Households who ventilate a lot and have a preference for a cooler indoor climate might also ventilate their heat gains from

neighbours. Then again households who prefer high temperatures have to spend a disproportionate amount of energy for heating if located adjacent to neighbours who are satisfied with low temperatures. The literature about heat cost allocation considers this issue to some degree, however without explicitly referring to the EPG [63–65]. If buildings are equipped with a high thermal insulation, the internal temperature differences become more important, since less energy is lost to the outside [36]. Our regression results imply that a high share of households in multi-apartment buildings covers a big part of their heating energy consumption with the heat from their neighbours, which is supported by findings from Calì et al. [25]. These considerations indicate that internal heat transfers might be an important mechanism of energy loss. Additionally, heat generators are rather oversized according to the German standard for calculating the heating load DIN EN 12,831–1 [88] and flow temperatures are usually set quite high, so that even the household with the highest heat demand can be supplied. If the flow temperatures could be regulated more precisely depending on a prediction of comfort levels and weather conditions, reducing overcapacities and excess heat waste would be more likely [89].

5.4. Limitations of the current study

To assess our own calculations of the heating energy demand for the apartments, we cumulated the heating energy demand of each apartment within each multi-apartment building, added a mark-up for the shared areas and compared our results against the figures for the whole buildings from the thermal insulation certificate. Our predicted heating energy demand differs on average by less than 5% from the assessment in the thermal insulation certificate [29].

Uncertainties in our calculations are likely to be a result of inaccuracies in the model with regard to the differences in solar and internal heat gains between the apartments and building physics, such as the neglect of the dynamics from the heat storage of the thermal envelope of the building [84], something we cannot adequately address within the means of our approach. Staircases were also not accounted for in the model for the calculation of the energy demand for the apartments, leading to slightly biased internal and external heat transmission losses. Regarding the data, no information was available on the heat transfer coefficients for internal walls, so we took a rather conservative estimate based on the available information [64–73]. Data on climate conditions like wind speed and relative humidity, which might affect both the heat transmission losses and behaviour [41–90] were likewise not available. Also, there was no detailed information about the internal temperature differences between rooms within one apartment and the exact window opening angles.

A drawback, which we hope to address in future research, is the lack of data on the heating energy consumption in a higher temporal resolution and the lack of information about the differences in internal heat gains between apartments, e.g. from occupancy rates, electricity and hot water consumption. In addition to the measurement of indoor temperatures, thermostat settings could be interesting as a more direct measure of heating behaviour, since indoor temperatures are influenced also by other variables like ventilation and internal heat transfers. For a better estimation of the ventilation rates, a distinction should ideally also be made between the different positions of the window opening handles, e.g. by monitoring the window states open, tilted and closed.

Overall, the coefficient of determination of 80% in explaining the apartment related heating energy consumption in the regression model combining building physics and occupant behaviour, indicates that our model performs quite well despite the gaps mentioned above.

5.5. Policy implications

The findings of this study have several implications for energy saving programs and policies. The importance of internal heat transfers caused by different behavioural types within a building and the interpretations drawn from a practice theoretical perspective, suggest that programs emphasizing behaviour change based on social-psychological strategies have serious limits. This has been implied also by a number of research projects [8,12,15,19,53]. The results also hint at the limits of refurbishment policies aiming to reduce the heating energy consumption in residential buildings by relying only on technological improvements such as better thermal insulation. Another technical approach to reduce the heating energy consumption in buildings aims at the full automation of indoor thermal conditions, thereby minimizing the influence of the occupant. Research from different disciplines shows that building automation systems and intelligent infrastructure have several advantages [91–94]. A recurring topic, however, is how much control is necessary without decreasing peoples' comfort levels [53,78,95], and thus avoiding that residents start to manipulate technical systems. Therefore, the question is how much individual behaviour can be restricted in favour of more energy-efficient and fair solutions. The main challenge is to adapt the technology to the user such that inefficiencies in behaviour are prevented without declines in comfort or subjectively felt control. The occupant needs to be disburdened but without getting the feeling of losing control [95].

To increase the bio-feedback and reduce heat losses from ventilation, heaters could be turned off automatically by applying window contacts or temperature sensors, recognizing a sudden drop in the indoor temperature due to the influx of cold air [96]. An intelligent infrastructure could also reduce flow temperatures within multi-apartment buildings, by automatically adjusting thermostat settings to occupancy patterns, such that peak loads are reduced [97].

To decrease the internal heat transfers, overall temperatures could be kept at the lower part of comfort zones by giving occupants the possibility of individualized predefined settings which they can only over- and underregulate within a certain range. For additional requirements of warmth, on top of personal adaptation techniques like clothing, personalized heating systems, e.g. the use of local radiant heating, comparable to their test use in office buildings [98], could be an option to decrease the building energy consumption.

Acknowledgements

We would like to thank the BMBF (Federal Ministry of Education and Research) and BMWi (Federal Ministry for Economic Affairs and Energy) for its financial support within the project "Zwickauer Energiewende Demonstrieren" (03SBE114D). We thank Bernhard Gill and Sarah Earnshaw for valuable comments. Additionally, we want to thank the anonymous reviewers who strongly helped to improve this article.

References

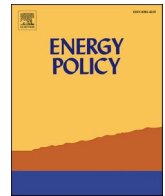
- [1] AG Energiebilanzen e.V., Energieflussbild (Detail in PJ) 2016, 2018.
- [2] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Klimaschutzplan 2050, Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung, Berlin, 2016.
- [3] Bundesministerium für Wirtschaft Und Energie, Sanierungsbedarf im Gebäudebestand, Ein Beitrag zur Energieeffizienzstrategie Gebäude, Berlin, 2014.
- [4] P.X.W. Zou, X. Xu, J. Sanjayan, J. Wang, Review of 10 years research on building energy performance gap: life-cycle and stakeholder perspectives, *Energy Build* 178 (2018) 165–181, doi:10.1016/j.enbuild.2018.08.040.
- [5] R. Galvin, Making the 'rebound effect' more useful for performance evaluation of thermal retrofits of existing homes: defining the 'energy savings deficit' and the 'energy performance gap', *Energy Build* 69 (2014) 515–524, doi:10.1016/j.enbuild.2013.11.004.
- [6] B. Bordass, R. Cohen, J. Field, *Energy Performance of Non-Domestic Buildings, closing the credibility gap*, Citeseer, Frankfurt, Germany, 2004.
- [7] G. Branco, B. Lachal, P. Gallinelli, W. Weber, Predicted versus observed heat consumption of a low energy multifamily complex in Switzerland based on long-term experimental data, *Energy Build* 36 (2004) 543–555, doi:10.1016/j.enbuild.2004.01.028.
- [8] R. Galvin, Targeting 'behaviors' rather than behaviours: a 'subject-oriented' approach for reducing space heating rebound effects in low energy dwellings, *Energy Build* 67 (2013) 596–607, doi:10.1016/j.enbuild.2013.08.065.
- [9] K. Gram-Hanssen, Efficient technologies or user behaviour, which is the more important when reducing households' energy consumption? *Energy Efficiency* 6 (2013) 447–457, doi:10.1007/s12053-012-9184-4.
- [10] O. Guerra Santin, Occupant behaviour in energy efficient dwellings: evidence of a rebound effect, *Journal of Housing and the Built Environment* 28 (2013) 311–327, doi:10.1007/s10901-012-9297-2.
- [11] H. Hens, W. Parijs, M. Deurinck, Energy consumption for heating and rebound effects, *Energy Build* 42 (2010) 105–110, doi:10.1016/j.enbuild.2009.07.017.
- [12] H. Brynjarsdóttir, M. Håkansson, J. Pierce, E.P.S. Baumer, C. DiSalvo, P. Senge, *Sustainably Unpersuaded, How Persuasion Narrows Our Vision of Sustainability*, 2012.
- [13] L.F. Chiu, R. Lowe, R. Raslan, H. Altamirano-Medina, J. Wingfield, A socio-technical approach to post-occupancy evaluation: interactive adaptability in domestic retrofit, *Building Research & Information* 42 (2014) 574–590, doi:10.1080/09613218.2014.912539.
- [14] C. Eon, X. Liu, G.M. Morrison, J. Byrne, Influencing energy and water use within a home system of practice, *Energy Build* 158 (2018) 848–860, doi:10.1016/j.enbuild.2017.10.053.
- [15] R. Galvin, Impediments to energy-efficient ventilation of German dwellings: a case study in Aachen, *Energy Build* 56 (2013) 32–40, doi:10.1016/j.enbuild.2012.10.020.
- [16] K. Gram-Hanssen, New needs for better understanding of household's energy consumption – behaviour, lifestyle or practices? *Architectural Engineering and Design Management* 10 (2014) 91–107, doi:10.1080/17452007.2013.837251.
- [17] I. Røpke, Theories of practice – new inspiration for ecological economic studies on consumption, *Ecological Economics* 68 (2009) 2490–2497, doi:10.1016/j.ecolecon.2009.05.015.
- [18] A. Wolff, I. Weber, B. Gill, J. Schubert, M. Schneider, Tackling the interplay of occupants' heating practices and building physics: insights from a German mixed methods study, *Energy Research & Social Science* 32 (2017) 65–75, doi:10.1016/j.erss.2017.07.003.
- [19] C. Eon, J.K. Breadsell, G.M. Morrison, J. Byrne, The home as a system of practice and its implications for energy and water metabolism, *Sustainable Production and Consumption* 13 (2017) 48–59, doi:10.1016/j.spc.2017.12.001.
- [20] T.R. Schatzki, *Social practices, A Wittgensteinian approach to Human Activity and the Social*, Cambridge Univ, Cambridge, 1996.
- [21] A. Reckwitz, Toward a theory of social practices: a development in culturalist theorizing, *European Journal of Social Theory* 5 (2002) 243–263.
- [22] A. Reckwitz, The status of the "Material" in theories of culture: from "Social structure" to "Artefacts", *J Theory of Social Behaviour* 32 (2002) 195–217, doi:10.1111/1468-5914.00183.
- [23] R. Galvin, M. Sunikka-Blank, Schatzkian practice theory and energy consumption research: time for some philosophical spring cleaning? *Energy Research & Social Science* 22 (2016) 63–68, doi:10.1016/j.erss.2016.08.021.
- [24] H. Erhorn, *Bedarf - Verbrauch, Ein Reizthema ohne Ende oder Die Chance Für Sachliche Energieberatung*, Stuttgart, 2007.
- [25] D. Calì, T. Osterhage, R. Streblow, D. Müller, Energy performance gap in refurbished German dwellings: lesson learned from a field test, *Energy Build* 127 (2016) 1146–1158, doi:10.1016/j.enbuild.2016.05.020.
- [26] R. Haas, H. Auer, P. Biermayr, The impact of consumer behavior on residential energy demand for space heating, *Energy Build* 27 (1998) 195–205, doi:10.1016/S0378-7788(97)00034-0.
- [27] R. Haas, P. Biermayr, The rebound effect for space heating empirical evidence from Austria, *Energy Policy* 28 (2000) 403–410, doi:10.1016/S0301-4215(00)00023-9.
- [28] I. Weber, A. Wolff, Energy efficiency retrofits in the residential sector – analysing tenants' cost burden in a German field study, *Energy Policy* 122 (2018) 680–688, doi:10.1016/j.enpol.2018.08.007.
- [29] I. Weber, M. Schönmann, A. Farny, F. Schröder, A. Wolff, B. Gill, Explaining flat-specific heating energy consumption by building physics and behaviour, *An interdisciplinary approach* (2017).
- [30] G. Dall'O, L. Sarto, A. Galante, G. Pasetti, Comparison between predicted and actual energy performance for winter heating in high-performance residential buildings in the Lombardy region (Italy), *Energy Build* 47 (2012) 247–253, doi:10.1016/j.enbuild.2011.11.046.
- [31] A. Wolff, J. Schubert, B. Gill, *Risiko energetische Sanierung?, Untersuchung zur Differenz von Energiebedarf und -verbrauch sowie deren Auswirkungen auf Einkommensschwache Haushalte*, in: K. Großmann, A. Schaffrin, C. Smigiel (Eds.), *Energie Und Soziale Ungleichheit: Zur gesellschaftlichen Dimension der Energiewende in Deutschland und Europa*, Springer, 2016, pp. 611–634.
- [32] C.A. Balaras, E.G. Dascalaki, K.G. Droutsas, S. Kontoyiannidis, Empirical assessment of calculated and actual heating energy use in Hellenic residential buildings, *Appl Energy* 164 (2016) 115–132, doi:10.1016/j.apenergy.2015.11.027.
- [33] R. Gupta, M. Kapsali, A. Howard, Evaluating the influence of building fabric, services and occupant related factors on the actual performance of low energy

- social housing dwellings in uk, Energy Build 174 (2018) 548–562, doi:[10.1016/j.enbuild.2018.06.057](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.06.057).
- [34] D. Majcen, L. Itard, H. Visscher, Actual heating energy savings in thermally renovated dutch dwellings, Energy Policy 97 (2016) 82–92, doi:[10.1016/j.enpol.2016.07.015](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.07.015).
- [35] P. van den Brom, A. Meijer, H. Visscher, Actual energy saving effects of thermal renovations in dwellings—longitudinal data analysis including building and occupant characteristics, Energy Build 182 (2019) 251–263, doi:[10.1016/j.enbuild.2018.10.025](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.10.025).
- [36] O. Guerra Santin, L. Itard, H. Visscher, The effect of occupancy and building characteristics on energy use for space and water heating in dutch residential stock, Energy Build 41 (2009) 1223–1232, doi:[10.1016/j.enbuild.2009.07.002](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.07.002).
- [37] S. Wei, R. Jones, P. de Wilde, Driving factors for occupant-controlled space heating in residential buildings, Energy Build 70 (2014) 36–44, doi:[10.1016/j.enbuild.2013.11.001](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.001).
- [38] G.M. Huebner, J. Cooper, K. Jones, Domestic energy consumption—What role do comfort, habit, and knowledge about the heating system play? Energy Build 66 (2013) 626–636, doi:[10.1016/j.enbuild.2013.07.043](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.07.043).
- [39] D. Mora, C. Carpino, M. de Simone, Energy consumption of residential buildings and occupancy profiles. a case study in mediterranean climatic conditions, Energy Efficiency 11 (2018) 121–145, doi:[10.1007/s12053-017-9553-0](https://doi.org/10.1007/s12053-017-9553-0).
- [40] Y. Zhang, X. Bai, F.P. Mills, J.C.V. Pezzey, Rethinking the role of occupant behavior in building energy performance: a review, Energy Build 172 (2018) 279–294, doi:[10.1016/j.enbuild.2018.05.017](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.05.017).
- [41] V. Fabi, R.V. Andersen, S. Corgnati, B.W. Olesen, Occupants' window opening behaviour: a literature review of factors influencing occupant behaviour and models, Building and Environment 58 (2012) 188–198, doi:[10.1016/j.buildenv.2012.07.009](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.07.009).
- [42] M.J. Sorgato, A.P. Melo, R. Lamberts, The effect of window opening ventilation control on residential building energy consumption, Energy Build 133 (2016) 1–13, doi:[10.1016/j.enbuild.2016.09.059](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.09.059).
- [43] G.M. Huebner, M. McMichael, D. Shipworth, M. Shipworth, M. Durand-Daubin, A.J. Summerfield, The shape of warmth: temperature profiles in living rooms, Building Research & Information 43 (2015) 185–196, doi:[10.1080/09613218.2014.922339](https://doi.org/10.1080/09613218.2014.922339).
- [44] L.A. Greening, D.L. Greene, C. Difiglio, Energy efficiency and consumption — the rebound effect — a survey, Energy Policy 28 (2000) 389–401, doi:[10.1016/S0301-4215\(00\)00021-5](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(00)00021-5).
- [45] S. Sorrell, J. Dimitropoulos, M. Sommerville, Empirical estimates of the direct rebound effect: a review, Energy Policy 37 (2009) 1356–1371, doi:[10.1016/j.enpol.2008.11.026](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.11.026).
- [46] S. Sorrell, J. Dimitropoulos, The rebound effect: microeconomic definitions, limitations and extensions, Ecological Economics 65 (2008) 636–649, doi:[10.1016/j.ecolecon.2007.08.013](https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.08.013).
- [47] W. Abrahamse, L. Steg, C. Vlek, T. Rothengatter, A review of intervention studies aimed at household energy conservation, J Environ Psychol 25 (2005) 273–291, doi:[10.1016/j.jenvp.2005.08.002](https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2005.08.002).
- [48] W. Abrahamse, L. Steg, C. Vlek, T. Rothengatter, The effect of tailored information, goal setting, and tailored feedback on household energy use, energy-related behaviors, and behavioral antecedents, J Environ Psychol 27 (2007) 265–276, doi:[10.1016/j.jenvp.2007.08.002](https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2007.08.002).
- [49] T. Hargreaves, M. Nye, J. Burgess, Making energy visible: a qualitative field study of how households interact with feedback from smart energy monitors, Energy Policy 38 (2010) 6111–6119, doi:[10.1016/j.enpol.2010.05.068](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.05.068).
- [50] L. Gynther, I. Mikkonen, A. Smits, Evaluation of european energy behavioural change programmes, Energy Efficiency 5 (2012) 67–82, doi:[10.1007/s12053-011-9115-9](https://doi.org/10.1007/s12053-011-9115-9).
- [51] I. Ajzen, The theory of planned behavior, Organ Behav Hum Decis Process 50 (1991) 179–211, doi:[10.1016/0749-5978\(91\)90020-T](https://doi.org/10.1016/0749-5978(91)90020-T).
- [52] E. Shove, Beyond the ABC: climate change policy and theories of social change, Environ Plan A 42 (2010) 1273–1285, doi:[10.1068/a42282](https://doi.org/10.1068/a42282).
- [53] J.K. Day, L. Hescong, Understanding Behavior potential: the Role of Building Interfaces, Pacific Grove, CA, USA, 2016.
- [54] M. Sonnberger, M. Gross, Rebound Effects in Practice, An invitation to consider rebound from a practice theory perspective, Ecological Economics 154 (2018) 14–21, doi:[10.1016/j.ecolecon.2018.07.013](https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.07.013).
- [55] W. O'Brien, H.B. Gunay, The contextual factors contributing to occupants' adaptive comfort behaviors in offices – A review and proposed modeling framework, Building and Environment 77 (2014) 77–87, doi:[10.1016/j.buildenv.2014.03.024](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.03.024).
- [56] K. Scott, C. Bakker, J. Quist, Designing change by living change, Design Studies 33 (2012) 279–297, doi:[10.1016/j.destud.2011.08.002](https://doi.org/10.1016/j.destud.2011.08.002).
- [57] R. Galvin, Humans and stuff: interweaving social and physical science in energy policy research, Energy Research & Social Science 26 (2017) 98–102, doi:[10.1016/j.erss.2017.01.012](https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.01.012).
- [58] K. Gram-Hanssen, Residential heat comfort practices, understanding users, Building Research & Information 38 (2010) 175–186, doi:[10.1080/09613210903541527](https://doi.org/10.1080/09613210903541527).
- [59] M. Westrom, Bathing in japan: applying a practice theory vocabulary to energy use through ethnography, Energy Research & Social Science 44 (2018) 232–241, doi:[10.1016/j.erss.2018.05.018](https://doi.org/10.1016/j.erss.2018.05.018).
- [60] E. Shove, Comfort, Cleanliness and Convenience, The Social Organization of Normality, Berg, Oxford, 2003.
- [61] Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung, Erhebung des Energieverbrauchs der Privaten Haushalte Für Die Jahre 2009–2010, Essen, Germany, 2013.
- [62] B.F. Balvedi, E. Ghisi, R. Lamberts, A review of occupant behaviour in residential buildings, Energy Build 174 (2018) 495–505, doi:[10.1016/j.enbuild.2018.06.049](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.06.049).
- [63] T. Cholewa, A. Siuta-Olcha, Experimental investigations of a decentralized system for heating and hot water generation in a residential building, Energy Build 42 (2010) 183–188, doi:[10.1016/j.enbuild.2009.08.013](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.08.013).
- [64] P. Michnikowski, Allocation of heating costs with consideration to energy transfer from adjacent apartments, Energy Build 139 (2017) 224–231, doi:[10.1016/j.enbuild.2017.01.020](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.01.020).
- [65] S. Sigelsten, Reallocation of heating costs due to heat transfer between adjacent apartments, Energy Build 75 (2014) 256–263, doi:[10.1016/j.enbuild.2014.02.022](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.02.022).
- [66] T. Osterhage, C. Davide, D. Müller, R. Voß, Auswirkung von wärmeverschiebungsvorgängen in energieeffizient sanierten bestandswohngebäuden, Bauphysik 38 (2016) 19–24, doi:[10.1002/bapi.201610004](https://doi.org/10.1002/bapi.201610004).
- [67] A. Gafsi, G. Lefebvre, Stolen heating or cooling energy evaluation in collective buildings using model inversion techniques, Energy Build 35 (2003) 293–303, doi:[10.1016/S0378-7788\(02\)00093-2](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00093-2).
- [68] , Deutscher bundestag, Verordnung Zur Änderung Der Energieeinsparverordnung, EnEV, 2009.
- [69] Deutsches Institut für Normung e.V., Wärmeschutz und energie-Einsparung in Gebäuden. Teil 6: Berechnung des Jahresheizwärme- und des Jahresheizenergiebedarfs. Thermal protection and Energy Economy in Buildings - Part 6: Calculation of annual heat and energy use, Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [70] F. Schröder, B. Gill, M. Güth, T. Teich, A. Wolff, Entwicklung saisonaler raumtemperaturverteilungen von klassischen zu modernen gebäudestandards – Sind Rebound-Effekte unvermeidbar? Bauphysik 40 (2018) 151–160, doi:[10.1002/bapi.201810017](https://doi.org/10.1002/bapi.201810017).
- [71] J. An, D. Yan, G. Deng, R. Yu, Survey and performance analysis of centralized domestic hot water system in china, Energy Build 133 (2016) 321–334, doi:[10.1016/j.enbuild.2016.09.043](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.09.043).
- [72] P. Raftery, A. Geronazzo, H. Cheng, G. Paliaga, Quantifying energy losses in hot water reheat systems, Energy Build 179 (2018) 183–199, doi:[10.1016/j.enbuild.2018.09.020](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.09.020).
- [73] N. Lukić, N. Nikolić, S. Timotijević, S. Tasić, Influence of an unheated apartment on the heating consumption of residential building considering current regulations—Case of serbia, Energy Build 155 (2017) 16–24, doi:[10.1016/j.enbuild.2017.09.006](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.006).
- [74] I. Weber, B. Gill, Heating demand in the residential sector: tackling the enigma of low price elasticity of homeowners' expenses, SocEcol 25 (2016) 81–101, doi:[10.17234/SocEcol.25.1.4](https://doi.org/10.17234/SocEcol.25.1.4).
- [75] R.K. Andersen, B.W. Olesen, J. Toftum, Occupant Behaviour with regard to Control of the Indoor Environment Ph.D. Thesis, Kgs. Lyngby (Denmark), 2009.
- [76] L.A. Wallace, S.J. Emmerich, C. Howard-Reed, Continuous measurements of air change rates in an occupied house for 1 year: the effect of temperature, wind, fans and windows, J Expo Sci Environ Epidemiol 12 (2002) 296–306, doi:[10.1038/sj.ejpa.7500229](https://doi.org/10.1038/sj.ejpa.7500229).
- [77] A. Roetzel, A. Tsangrassoulis, U. Dietrich, S. Busching, A review of occupant control on natural ventilation, Renewable and Sustainable Energy Reviews 14 (2010) 1001–1013, doi:[10.1016/j.rser.2009.11.005](https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.11.005).
- [78] K. Akerly, L. Baker, G. Brager, Window use in mixed-mode buildings: a literature review, 2011.
- [79] A. Bauer, Praktiken des Heizenergiekonsums im Wohnbereich, Interdisziplinäre Untersuchung an Einer Versuchshaussiedlung: (Unpublished Masterthesis), Ludwig-Maximilians-Universität München, München, 2018.
- [80] R. Ulbrich, Wohnungsversorgung, in: H. Häußermann (Ed.), in: Großstadt: Soziologische Stichworte, VS Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden, 2000, pp. 290–312.
- [81] D. Enescu, A review of thermal comfort models and indicators for indoor environments, Renewable and Sustainable Energy Reviews 79 (2017) 1353–1379, doi:[10.1016/j.rser.2017.05.175](https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.175).
- [82] R.J. Cole, J. Robinson, Z. Brown, M. O'shea, Re-contextualizing the notion of comfort, Building Research & Information 36 (2008) 323–336, doi:[10.1080/09613210802076328](https://doi.org/10.1080/09613210802076328).
- [83] R.F. Rupp, N.G. Vásquez, R. Lamberts, A review of human thermal comfort in the built environment, Energy Build 105 (2015) 178–205, doi:[10.1016/j.enbuild.2015.07.047](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.07.047).
- [84] S. Verbeke, A. Audenaert, Thermal inertia in buildings: a review of impacts across climate and building use, Renewable and Sustainable Energy Reviews 82 (2018) 2300–2318, doi:[10.1016/j.rser.2017.08.083](https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.083).
- [85] C. Eon, G.M. Morrison, J. Byrne, The influence of design and everyday practices on individual heating and cooling behaviour in residential homes, Energy Efficiency 11 (2018) 273–293, doi:[10.1007/s12053-017-9563-y](https://doi.org/10.1007/s12053-017-9563-y).
- [86] P.J. Hoes, J.L.M. Hensen, M.G.L.C. Loomans, B.d. Vries, D. Bourgeois, User behavior in whole building simulation, Energy Build 41 (2009) 295–302, doi:[10.1016/j.enbuild.2008.09.008](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.09.008).
- [87] J. Goodhew, S. Pahl, S. Goodhew, C. Boomsma, Mental models, Exploring how people think about heat flows in the home, Energy Research & Social Science 31 (2017) 145–157, doi:[10.1016/j.erss.2017.06.012](https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.06.012).
- [88] Deutsches Institut für Normung e.V., Energy Performance of Buildings - Method For Calculation of the Design Heat Load - Part 1: Space heating load, Module M3-3, Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [89] T. Cholewa, A. Siuta-Olcha, C.A. Balaras, Actual energy savings from the use of thermostatic radiator valves in residential buildings – Long term field evaluation, Energy Build 151 (2017) 487–493, doi:[10.1016/j.enbuild.2017.06.070](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.06.070).

- [90] T. Johnson, T. Long, Determining the frequency of open windows in residences: a pilot study in durham, north carolina during varying temperature conditions, *J Expo Sci Environ Epidemiol* 15 (2005) 329–349, doi:[10.1038/sj.jea.7500409](https://doi.org/10.1038/sj.jea.7500409).
- [91] A.I. Dounis, C. Caraiscos, Advanced control systems engineering for energy and comfort management in a building environment—A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (2009) 1246–1261, doi:[10.1016/j.rser.2008.09.015](https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.09.015).
- [92] R. Yang, M.W. Newman, Learning from a learning thermostat, in: *Proceedings of the 2013 ACM international joint conference on Pervasive and ubiquitous computing - UbiComp '13*, ACM Press, New York, New York, USA, Zurich, Switzerland, 2013, p. 93.
- [93] R. Yang, L. Wang, Development of multi-agent system for building energy and comfort management based on occupant behaviors, *Energy Build* 56 (2013) 1–7, doi:[10.1016/j.enbuild.2012.10.025](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.10.025).
- [94] T. Teich, F. Roessler, D. Kretz, S. Franke, Design of a prototype neural network for smart homes and energy efficiency, *Procedia Eng* 69 (2014) 603–608.
- [95] J.K. Day, W. O'Brien, Oh behave! survey stories and lessons learned from building occupants in high-performance buildings, *Energy Research & Social Science* 31 (2017) 11–20, doi:[10.1016/j.erss.2017.05.037](https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.05.037).
- [96] F. Schröder, O. Papert, T. Teich, D. Kretz, O. Scharf, EP3009908B1, 2014.
- [97] T. Teich, D. Szendrei, M. Schrader, F. Jahn, S. Franke, Feasibility of integrating heating valve drivers with KNX-standard for performing dynamic hydraulic balance in domestic buildings, *world academy of science, Engineering and Technology* (2011) 367–372.
- [98] M. Veselý, W. Zeiler, Personalized conditioning and its impact on thermal comfort and energy performance – A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 34 (2014) 401–408, doi:[10.1016/j.rser.2014.03.024](https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.024).

A.2 ***Energy (in)efficient comfort practices (Moeller & Bauer 2022)***

Moeller, Simon; Bauer, Amelie (2022): Energy (in)efficient comfort practices: How building retrofits influence energy behaviours in multi-apartment buildings. In: Energy Policy 168, S. 113123. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113123>.



Energy (in)efficient comfort practices: How building retrofits influence energy behaviours in multi-apartment buildings

Simon Moeller^{*}, Amelie Bauer

Ludwig-Maximilians-Universität München, Department of Sociology, Konradstr. 6, 80801, München, Germany

ARTICLE INFO

Keywords:

Energy performance gap
Energy-efficient buildings
Social practice theory
Occupant behaviour
Occupant-building-interaction
Thermal comfort

ABSTRACT

One of the main strategies employed to increase the energy efficiency of buildings is the insulation and sealing of building envelopes. This has led to considerable reductions in energy consumption in recent decades. However, with the increasing efficiency of the building envelope, a contrary effect is also evident: energy performance gaps (EPGs), the phenomenon where actual consumption exceeds calculated demand. While EPGs have often been associated with rebound effects, socio-technical studies argue that it is the interactions between occupants and buildings (or building technologies), which have negative, often unintended, consequences for energy consumption. To analyse these interactions and their contribution to EPGs, we conducted a survey of 34 households in two moderately insulated multi-apartment buildings and calculated EPGs at the apartment level. Based on the results, we argue that increasing the building insulation can lead to negative interaction effects because occupants adapt to the changes in building behaviour, producing a shift in energy consumption for the whole building. Building inertia and reduced feedback are likely accompanied by higher indoor temperatures and increased ventilation. We suggest that a better understanding of these mechanisms is necessary to evaluate the real savings of different efficiency measures, and discuss various implications for policy and research.

1. Introduction

Increasing the energy efficiency of the existing building stock is one of the key challenges for a successful climate change policy. In Germany, heating energy for space heating accounts for three quarters of final energy consumption in residential buildings and about 25% of total cross-sectoral final energy consumption (BMW, 2020). However, efficiency gains in the existing building stock remain at suboptimal levels compared to EU climate targets (Economidou et al., 2020). One of the reasons why heating energy consumption in the existing building stock is not decreasing at the desired rate is the existence of energy performance gaps (EPGs) in new and retrofitted buildings – i.e. a surplus of heating energy consumption as it is measured in the operation phase of a building over heating demand as predicted in the planning stage (Galvin, 2014). Uncertainty about the actual delivery of expected savings can become a barrier to investments in efficiency measures (Economidou et al., 2020).

In the German context, for example, both landlords and tenants expect the costs of efficiency measures to be offset by the savings. However, the ability to transfer costs to tenants is restricted by tenancy law (Weber and Wolff, 2018). If building owners are reluctant to take this financial risk, necessary investments may be postponed, with the result that the refurbishment rate remains at too low a level (Ahlrichs et al., 2020). Understanding the causes of the EPG is therefore very important if targeted measures to close this efficiency gap and to increase the energy efficiency of the buildings are to be developed.

In addition to factors relating to design, simulation and construction, occupant behaviour is regularly seen as the main cause of EPGs (Mahdavi et al., 2021; Zou et al., 2018). A common explanation as to why occupants behave differently than is assumed in energy performance calculations draws on rebound effects: this is where savings from energy efficiency improvements are at least partially offset by occupants choosing to increase their consumption of energy services¹ by taking

^{*} Corresponding author.

E-mail addresses: simon.moeller@soziologie.uni-muenchen.de (S. Moeller), amelie.bauer@soziologie.uni-muenchen.de (A. Bauer).

¹ Energy services such as lighting or, in our case, thermal comfort, are what actually matter from the consumer's perspective. Energy is used as an input for energy services, whereby energy resources are converted into useful energy such as light or heat, which in turn are converted into energy services, e.g. to achieve thermal comfort (see Grubler et al., 2012 for a detailed discussion). This is one of the reasons why energy consumption itself is often considered invisible (Burgess and Nye, 2008). However, final energy consumption also matters for consumers because the efficiency of the conversion process from final energy such as gas or district heat, usually expressed in kWh, into the energy service of thermal comfort affects the cost consumers have to pay, as well as the environmental costs. In this article, we follow the convention of using final heating energy consumption in kWh as a measure of the efficiency of providing thermal comfort (Galvin, 2014).

advantage of reduced costs (Gillingham et al., 2016). In the case of buildings, this means that occupants maximise their thermal comfort and increase indoor temperatures (Greening et al., 2000). However, active decisions to increase temperatures provide only one of multiple possible explanations for EPGs. According to socio-technical approaches (Chiu et al., 2014; Love, 2014), EPGs can also be interpreted as the unintentional by-product of a variety of interaction effects between building technologies² and occupants. These can result from, for example, poorly designed control interfaces, the impact of sudden internal and solar heat gains, the physical consequences of intermittent heating, or poorly balanced heating systems (Chiu et al., 2014). Social practice theory (Reckwitz, 2002b; Schatzki, 1996) provides a valuable framework with which to analyse how the interplay of different elements – such as occupants' knowledge about building controls, their attitudes regarding what it means to feel comfortable, and their habits, as well as the properties of the heating system and the building fabric – form relatively stable configurations (practices), affecting both comfort and heating energy consumption (Gram-Hanssen, 2010). Instead of focusing on the effect of incentives and constraints on individuals' rational decision-making, such an approach shifts the focus to the habitual, routinised and situated way behaviour takes place in everyday settings, and the practices that ensue (Galvin and Sunikka-Blank, 2016).

Based on a socio-technical case study of two 'typical' German multi-apartment buildings providing social housing, we analyse the patterns of EPGs for the individual apartments. This is rarely done but crucial for comparing heating energy consumption between households, as the energy demand between apartments can vary greatly depending on the location and the surface-to-volume ratio of an apartment (Cali et al., 2016; Ling et al., 2015; Weber and Wolff, 2018). We further analyse variations in comfort practices and show that they differ not only between households within the buildings but also between rooms within apartments, depending on use and time of day. The accompanying analysis of the 'behaviour' of the building technologies points to differences in how well certain comfort habits align with different building technologies. Our findings – based on qualitative as well as quantitative data – imply that comfort practices change with different efficiency measures. Drawing on the typical effects of the insulation and sealing of the building envelope, we show how negative interaction effects between building properties and typical occupant behaviour can emerge. Firstly, the building inertia in energy-efficient refurbishments makes window opening a convenient and quick way to cool down rooms and to counteract the tendency towards higher indoor temperatures. Secondly, internal heat flows favour the homogenisation of indoor temperatures, negatively affecting the desire of some occupants for thermal variation. These effects are intended neither by planners nor by occupants. While many occupants are used to some degree of variety in thermal indoor conditions, a state they also actively try to produce, the habits they rely on to bring about these climatic conditions may be more or less in line with the 'behaviour' of the building technologies. Using the example of the insulation and tightening of the building envelope, we discuss how the tendency towards homogenous indoor temperatures and a slow reaction to changes in building controls can lead to typical patterns associated with EPGs.

To our knowledge, the interactions between comfort practices within apartments and building technologies have not yet been studied at the level of apartments, that is, in a way that takes into account the differences in household heating energy consumption and demand. From our findings, we can draw conclusions about what impact different policy approaches to energy efficiency might have and how unintended consequences could be addressed. Socio-technical analysis allows us to

² We use the term building technologies not only to refer to the technologies within a building (such as heating technologies), but also including the properties of the building itself (such as the building envelope, its thermal mass etc.).

suggest ways that policies need to be designed to incorporate insights about how occupants' choices and demand for energy services are structured and contextually embedded (Shove, 2010).

Subsequently, we first review important findings on the different elements of comfort practices with a particular focus on the meanings of comfort, occupant habits and building technologies. We then describe the case study and the method used to analyse the data and show results for the EPGs at the apartment level and the analysis of the comfort practices. Building on these findings, in section 5 we discuss the implications of building insulation on energy behaviours and how EPGs could be addressed by energy efficiency policies.

2. Literature review

2.1. Energy performance gaps and the relevance of multi-apartment buildings

While the reasons for (building) energy performance gaps (EPGs) remain highly disputed, the prevalence of EPGs – that is, the difference between actual energy consumption and calculated demand under norm conditions – in refurbished and newly constructed buildings has been widely demonstrated (Mahdavi et al., 2021). In their extensive review, Mahdavi et al. (2021) report an average EPG for retrofitted or newly constructed buildings of 55%. In the German residential building stock, this effect is also evident for buildings constructed after the year 2001 (Fig. 1). In older, mainly un-refurbished buildings, however, actual heating energy consumption is often lower than the predicted heating demand, which Sunikka-Blank and Galvin (2012) call the prebound effect. Thus, as building efficiency increases, there is a shift from prebound effects to EPGs. Furthermore, in Fig. 1 we also see that multi-apartment buildings come with an efficiency premium on heating consumption due to a reduced volume-to-surface ratio. The negative relationship between the number of apartments and energy consumption per m² disappears, however, with decreasing building age, which is an indicator of negative interaction effects in highly energy-efficient multi-apartment buildings.

Whether these patterns result from deliberate increases in consumption and comfort (rebound effects) or from the unintended side effects of occupant-building interaction has important socio-economic implications, particularly in the domain of social housing. Determining the cause of these patterns has relevance to the question of whether it is legitimate to pass on the costs of efficiency measures to tenants in the rent, even if the energy savings do not cover the extra costs. It is therefore crucial to understand the role of the occupant in the energy consumption of buildings in more detail.

Understanding the causes of these inefficiencies is also important because multi-apartment buildings are one of the main types of housing in Germany, with more than half of the country's 40 million households living in this building type (Deutsche Energie-Agentur, 2016). The energy consumption for heating and hot water in these buildings amounts to approximately 24% of the total building energy consumption in Germany, corresponding to an average of 130 kWh/m²a (Deutsche Energie-Agentur, 2016).

2.2. Occupant-related causes and dominant strategies to reduce the EPG

Zou et al. (2018) provide a good overview of the current state of research regarding stakeholders and root causes with the highest impact on the EPG and review the most important strategies for its reduction. They find that the 'occupant is repeatedly cited as the critical stakeholder responsible for [EPGs]' (2018, p. 169). In Janda's words: 'buildings don't use energy, people do' (Janda, 2011). Even though the building (technology) ultimately represents the system of provision that determines how much energy is required to achieve a certain comfort level, it is the occupant who decides on the magnitude of the energy consumption.

A distinction can be made between different technological concepts

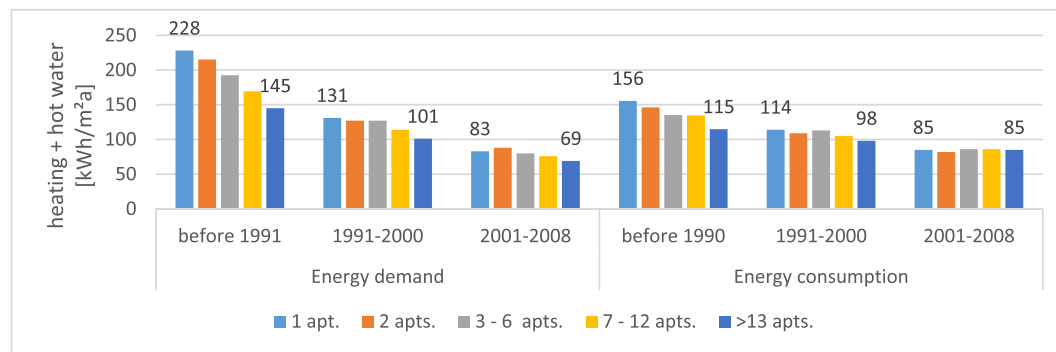


Fig. 1. –Energy demand and consumption [kWh/m²a] for heating and hot water in the German building stock, broken down by building age and building size. Reproduced from the German energy agency (Deutsche Energie-Agentur, 2016).

for increasing the energy efficiency of buildings (Zou et al., 2018). Passive design concepts build on technologies such as insulation, air tightness, heat recovery and low-temperature heating to decrease the demand for energy, supposedly without any involvement required from the user. Active design concepts, such as building automation approaches, rely on control algorithms to regulate the indoor climate and mediate between the requirements of energy services, environmental parameters and energy consumption.³ However, all these design concepts more or less explicitly assume that the residents understand, or at least tacitly agree to, the ‘behaviour’ of the technologies (Day and O’Brien, 2017; Winograd and Flores, 1987). Accordingly, if energy consumption is higher than was predicted assuming the intended and ideal use of the building technologies, ‘many researchers and practitioners believe (...) [that] educating occupants to change their behaviour has more benefits for improving building energy efficiency as compared to application of advanced technologies’ (Zou et al., 2018, p. 177).

However, so far, informational and educational approaches have had relatively little success in closing the EPG and decreasing energy consumption (Buchanan et al., 2015; Delmas et al., 2013), and there is a lot of research showing the drawbacks of approaches focused on attitudes, behaviour and choice (Brynjarsdóttir et al., 2012; Shove, 2010). Even though an implicit consensus seems to exist across different disciplines that there is a need to better involve users in energy saving, a gap remains in understanding the mechanisms behind the EPG in passive design buildings, which are at the core of energy efficiency policy for the building stock in Germany and Europe.

2.3. Social practice theory to understand occupant-building interaction

Practice theoretical accounts in energy research are particularly well suited to addressing the interactions and feedback effects between occupant behaviour and building technologies (e.g. Chiu et al., 2014; Eon et al., 2018; Galvin and Gubernat, 2016). Rather than seeing actors as behaving fully rationally to achieve certain ends, social practice theorists emphasise the habitual and routinised nature of behaviour, which is stabilised by and embedded in material settings (Reckwitz, 2002a; Schatzki, 1996). Occupants perform practices, which are held together by different elements, such as meanings, habits, skilful (bodily) knowledge and the material environment (including technologies) (Galvin and Sunikka-Blank, 2016). Even though many practice theorists treat practices as ontological entities and central elements of social analysis, we treat practices rather as a heuristic device (Galvin and Sunikka-Blank, 2016) to help us understand the mutual dependencies

³ Zou et al. (2018) further list human-in-the-loop design, which takes into account actual user behaviour by means of occupant behaviour detection and self-learning algorithms.

between, and co-evolutionary nature of, technologies and behaviour, as well as their effect on energy consumption.

The built environment and building technologies shape meanings, and in dealing with this environment people acquire habits and skills. These do not necessarily align with specified use patterns laid out by designers, nor are they as receptive to incentives or information as policy designers may hope. The different elements of practices interact and stabilise each other, determining how energy services like comfort are provided and generating certain patterns of energy consumption, in some cases observable as EPGs.

2.3.1. Comfort as element of practice

What occupants consider comfort (i.e. its meanings) and the routines they adopt to achieve comfort are two important factors contributing to differences in EPGs. According to the adaptive thermal comfort model, occupants will actively try to restore comfort if they feel discomfort (Humphreys and Nicol, 1998). However, adaptation can be psychological and physiological as well as behavioural (Dear and Brager, 1998): occupants not only actively interact with their environment to restore comfort, e.g. by opening and closing windows or doors, but also adapt their comfort expectations and can to a certain degree acclimatise to ambient conditions (Rupp et al., 2015). Comfort expectations might therefore evolve with the changes brought about in thermal indoor conditions by heating and building technologies (Rudge, 2012).

Furthermore, meanings and feelings of comfort depend not just on one environmental factor – air temperature, as the adaptive model assumes (Halawa and van Hoof, 2012) – but also on radiation heat, air velocity and relative humidity (Fanger, 1970). Examples of this are when occupants enjoy the radiant heat from a stove, the cold air while lying under a thick blanket or the draught when feeling too hot. The interplay between these environmental factors again depends on the (building) technologies in place, which is why both approaches to thermal comfort have to be taken seriously when considering the effects of occupant-building interaction on thermal comfort.

2.3.2. Building (technologies) as element of practice

Technologies are another important element of practices, as is the material environment more generally (Reckwitz, 2002a). For technologies to deliver certain outcomes like efficiency gains, they rely, often implicitly, on a specific concept of user behaviour (Winograd and Flores, 1987). Assumptions about user behaviour are inscribed into technologies (Akrich, 1992), prescribing how users should interact with the technology in more or less explicit ways (Linde, 1972). If user behaviour deviates from these inscriptions, unintended consequences can arise, such as when energy efficiency measures do not lead to energy savings. As an example, mechanical ventilation systems with heat recovery do not work as intended if occupants rely on window opening for ventilation (Grandclément et al., 2015). Even though automation is often seen as a solution that can minimise user influence, it basically faces the same

limitations as other technological solutions as long as it relies on similar assumptions about typical user behaviour (Strengers, 2013; Winograd and Flores, 1987). In the case of automation, there is also the disadvantage that, all other things being equal, people feel less comfortable when they feel they lack control (Cole et al., 2008; Dear and Brager, 1998) and occupants might manipulate technologies they do not fully understand or feel uncomfortable with (Day and O'Brien, 2017).

It is for these reasons that building technologies have to be aligned with prevailing social conditions if negative side effects are to be prevented (Hörning, 2001). This also applies to passive design technologies such as the insulation and sealing of the building envelope or low-temperature heating systems. If the properties of the building or heating system change, the balance between the environmental factors that affect thermal comfort changes as well. Draughts and therefore air velocity will decrease with the increasing air tightness of the building, as will radiant asymmetry, which depends on the temperature of the walls as well as on the design of the heating system. Thus, differences in thermal mass, building inertia and air tightness have an impact on how occupants can make use of the different factors that influence thermal comfort. These invisible properties therefore describe the 'behaviour' of the building technologies just as much as the more visible design and control options of user interfaces. Together, these properties not only shape how occupants can make use of the building technologies, but also prompt occupants into certain behaviours, making some actions more likely while constraining others. Appropriately, this has been described as the evocative character of technologies (Hörning, 2001) or the material affordance (Feijter and van Vliet, 2021), based on the concept of affordance introduced by the ecological psychologist James Gibson (2014). While affordances can be positive, leading to a good fit between an occupant's actions and the material environment, they can also be negative, leading to undesirable consequences, e.g. in the form of increased energy consumption. And while this evocative character could be used to nudge people in certain directions, in the sector of energy provision and buildings, these effects are pervasive even though they are not usually intentionally implemented and used by designers (Kasperbauer, 2017). Low-temperature heating systems, for example, often have long reaction times (system inertia) which adds complexity to the process of controlling them, and making them less predictable in the eyes of occupants (Feijter and van Vliet, 2021). In response, occupants may decide to change to alternative modes of temperature control such as window opening.

3. Data and methods

3.1. Description of the case study

To describe comfort practices in households and their interplay with building technologies, we draw on data from two multi-apartment social housing buildings with 88 apartments in total, located in a small city near Leipzig (Germany) (Fig. 2). The buildings were constructed in 1960 on an east-west and north-south orientation with five and six staircases respectively, each with eight apartments (1–4 rooms) and four floors per staircase (exemplary layouts shown in Fig. 3). In the 1990s, the buildings were retrofitted with a thermal insulation composite system (10 cm polystyrene insulation) with a composite U-value of 0.48 W/m²K for the exterior wall, 0.41 W/m²K for the top floor and 0.37 W/m²K for the basement ceiling, as well as with double glazing for windows (U-value of 1.8 W/m²K).

The energy efficiency standard was thereby raised to an average final specific heating demand of 88 kWh/m²a, including heat losses from the heating system but excluding hot water supply and auxiliary energy for heating pumps (in total reaching about 115 kWh/m²). The energy performance analysis of the buildings was conducted in 2014 according to DIN V 4701–10 and DIN 4108–6 to evaluate the energy-saving potential of further efficiency measures (DSK et al., 2014). In terms of their energy efficiency standard, the buildings are in the mid range (energy efficiency

rating of D according to EnEV conditions), with a relatively high standard compared to the total German building stock (Deutsche Energie-Agentur, 2016) but only a moderate standard compared to the requirements that currently apply to new refurbishments, such as in the new German Buildings Energy Act (cf. § 10 GEG, 08.08.2020).

Both buildings are supplied by district heat for warmth and hot water. Radiators with Thermostatic Radiator Valves (TRVs) with a scale from 0 to 5 are installed in each room (a setting of 3 indicating an indoor temperature of approximately 20 °C with each step representing a difference of 4 °C). All apartments have to be naturally ventilated by occupants; windows can be tilted or completely opened to the inside and have windowsills where people can place plants, decoration or other things – a common practice in German households, which often impedes the more efficient practice of shock ventilation (Galvin, 2013a). The buildings lie in the temperate climate zone with cold winters (1 °C average temperature and between 50 and 80 h of sunshine (1.7–2.7 h a day) from December to February). Outside temperatures during the interviews were between 0 and 5°, which is important as this is what occupants are referring to when answering questions about heating and ventilation patterns.

The housing company, planning to further decrease the heating consumption in the buildings, decided to implement a smart heating regulation system in 2019. In the course of this project and before the instalment, we collected data about the heating energy consumption of the individual households and conducted a household survey in the winter of 2019/2020. In total, 34 of 77 households took part in the survey, corresponding to a response rate of 44.2% (vacancy rate: 13.6%). The interviews were conducted during on-site visits, using a standardised questionnaire that covered topics ranging from residents' satisfaction with the housing situation to heating and ventilation patterns. To understand households' strategies to achieve comfort, we asked about TRV settings, window opening durations and other variables on a room level and made one-time temperature measurements, using an infra-red thermometer. A description of the relevant variables is provided in Table 1. The survey took place during three separate visits over the course of two months and the questionnaire was slightly adapted in between. Therefore, for some variables the sample size is lower. We provide an overview of the collected variables in Table 2.

While conducting the face-to-face interviews, we got an impression of the furnishing of the apartments and could take notes about comments interviewees made during the interviews. Even though these are not representative, they nevertheless gave us a clearer idea of the results and we will draw on these additional explanations of occupants' behaviour in the results section. The survey was conducted with the occupants named as the contact in the tenant list provided by the housing association and who can therefore be considered the 'head of the household'. Of the interviewees, 59% are male and 41% female. The average age is 51 with a median of 46. A quarter of the participants are older than 68 years and stay at home most of the day. Of all households, 58% have a net household income below €1,600, with only 15% having a net income of more than €3,000 a month, which is well below the average net household income of €2,228 for the greater region (Statistisches Landesamt des Freistaates Sachsen, 2021).⁴

⁴ As is common in Germany, the rent paid by residents to the housing association does not include heating costs. Instead, households receive an annual heating bill from their energy provider. For households entitled to social benefits (ALG II in German social law), their heating costs are covered, which could be an explanatory factor for Germany's relatively low rate of energy poverty compared to other European countries (Thomson et al., 2017). If one also takes into account the energy standard of the buildings and the moderate energy prices for heat (€0.088/kWh for district heat in 2018 all costs included), also compared to other European countries (e.g. for gas prices see Eurostat, 2021), we judge the need for the excessive saving of heating energy among the surveyed households to be rather low.

3.2. Methods

To be able to compare differences in heating energy consumption⁵ between households, we first calculated the apartment-related heating energy demand for each individual apartment.⁶ By comparing the apartment-related heating demand with the actual measured but weather-corrected heating energy consumption, we could derive apartment-related EPGs as a benchmark against which to compare energy consumption between different households.

To show how comfort practices influence energy consumption we mainly rely on descriptions of TRV settings and ventilation behaviour because these are the most important variables affecting heating energy consumption via transmission losses and air exchange rates (Galvin, 2013b). We describe how they relate to the different elements of comfort practices, in particular meanings, habits and technologies, and how they are aligned to other household practices that amplify or attenuate their effect on energy loss.

We rely on qualitative interpretations of interactions, drawing on box plots, frequency tables and mean value comparisons using the statistical program Stata to analyse the distribution of households' energy consumption, energy demand and EPGs, as well as the different aspects of comfort practices. Due to the relatively small sample size in several of the variables and the high number of potentially important co-dependent variables to explain energy consumption,⁷ conducting inferential statistics as well as multi-variate analysis was not considered appropriate. Following Flyvbjerg (2006), we nevertheless think that using a case-study design can contribute significantly to understanding more about the fundamental mechanisms leading to an EPG in moderately insulated buildings. It is exactly the nuanced view of the interactions between different elements that is supported by case-study research (Flyvbjerg, 2006) and which is important to understanding why many current views on occupant behaviour in buildings are misled. In the words of Flyvbjerg, a typical feature of case studies 'is falsification, not verification' (2006, p. 235), and it is the falsification of current and dominant views which could help us to make better policy choices in addressing EPGs. Even though we use standardised questions, we do not believe that the residents' responses about their behaviour are precise enough to predict differences in EPGs but consider that they nevertheless give a good enough estimate of what happens within a household and thus help us to understand the mechanisms affecting EPGs.

⁵ For simplicity, in this article, we refer to (heating) energy consumption when we mean final heating energy consumption required to provide thermal comfort. By referring to final heating energy consumption, we emphasise the need to increase the efficiency of buildings in providing thermal comfort, without taking into account the efficiency of the technologies used to supply the heating energy. For a discussion about the differences in the efficiency of final-to-useful energy conversion and the ensuing difficulties in comparing the environmental cost of the same energy service – in our case thermal comfort – fuelled from different energy sources with different levels of emissions, see Grubler et al. (2012).

⁶ Heating energy demand calculations are based on the information about building properties (apartment layouts, u-values and surfaces of exterior walls, basement ceiling and roof) and weather data (global radiation and outdoor temperature from the nearest weather station). Assumptions about occupant behaviour, such as internal heat gains, heating and air exchange patterns are made according to DIN V 4701–10, DIN 4108–6 and DIN 18599 (20 °C homogenous indoor temperature, an air exchange rate from natural ventilation of 0.4 per hour and 4.2 W/m² internal heat gains). In Germany, 19 °C is regularly used for energy performance calculations, according to the Energy Saving Ordinance (EnEV). However, because 20 °C is suggested by the WHO as the minimum temperature that should be maintained for people with health issues (WHO, 1990) and because 20 °C was used in the energy performance calculation as conducted by DSK et al. 2014 for these buildings, we also used 20 °C.

⁷ E.g. Guerra-Santin and Itard (2010), Huebner et al. (2015a) and Mahdavi et al. (2021) all provide a good overview of the large variety of variables affecting comfort and the demand for energy services.

To nonetheless put our results from the survey on a somewhat broader basis, we carried out the same analysis for another case study, where we used the same survey questions, although we did not calculate EPGs because some information about the buildings was missing (see appendix). The similarities in occupant behaviour indicate that there is some regularity in the patterns we describe for the smaller sample. For both samples, we also conducted comparisons of means for TRV settings between rooms and times of the day using repeated measure analysis to show that the differences are of significance even in the small sample.

4. Results

4.1. EPGs at the building and apartment level

The average specific heating energy demand of the two buildings is about 88 kWh/m². The average weather-adjusted heating energy consumption in 2019 was 96 and 94 kWh/m² respectively. The buildings therefore have a small EPG of around 8%, which is in the mid range between uninsulated buildings, which often show high prebound effects (negative EPGs), and highly insulated buildings, which show positive EPGs (Cozza et al., 2020).

Large differences exist, however, between apartments within buildings (Fig. 4). Heating energy demand depends on the size, position and surface-to-volume ratio of an apartment. Apartments in the middle of a building have the lowest energy demand with about 58 kWh/m². In this location, there are no big differences by apartment size. By contrast, the energy demand of the smallest apartments in the energetically most unfavourable position – on the top floor and with three outer walls – can be as high as 165 kWh/m². Thus, demand can differ by a factor of 2.8 between the smallest apartments (the corresponding value for the largest apartments is 2.2). Differences in energy consumption, however, are even higher, pointing to the large influence of occupants on energy consumption.

To correct for differences in apartment size and the apartment-related volume-to-surface-ratio, in Fig. 5 we show box plots for apartment-related EPGs for the years 2018 and 2019, compared by floor. EPGs for apartments differ between almost –100%, indicating that these households do not heat their homes at all, and above 200%, meaning that some households need more than three times their predicted heating energy demand under norm conditions of 20 °C indoor temperature and an air exchange rate of 0.4/h.

The median EPG for all apartments lies around –1% (2018) and –9% (2019).⁸ Because building variables and locational variations are controlled for, the differences in EPGs between apartments thus purely reflect occupant-related differences between households. This does not mean however, that occupants deliberately choose these consumption levels, since occupants' interactions with the building technologies can still differ widely, as we will show below.

4.2. TRV setpoints and temperatures

The control of thermostat setpoints and thereby heating demand temperature is one of the main factors affecting heating energy consumption (Firth et al., 2010; Galvin, 2013b). Fig. 6 shows that the patterns for self-reported TRV setpoints differ not only between households but also within households between different rooms and times of day, reflecting differences in activities, in what occupants consider thermal comfort and in the use of the building controls. Different activities such as relaxing, sleeping or cooking not only result in different internal heat gains and physiological reactions, but also change occupants' expectations with respect to heat requirements. While most households like it relatively warm in living rooms, they prefer it to be cold in sleeping

⁸ Since means are inflated, as EPGs cannot be smaller than –100, but have no upper limits, we report medians instead.



Fig. 2. View of case-study buildings, adapted from DSK et al. 2014



Fig. 3. Layout of apartments in case-study buildings (adapted from floor plans).

rooms and would rather use thicker blankets than raise the air temperature. For the kitchen, which is quite small in the case-study buildings ($\approx 6.4 \text{ m}^2$), most occupants do not see the need for heating because they will be active (preparing meals, cleaning dishes etc.) and generate internal heat gains (use of oven and cooking), and will often leave the room to eat. The generation of heat and humidity also requires increased ventilation, which is why most occupants heat only for shorter periods, if at all.

Evidence for bathrooms is mixed. In order to have the bathroom warm during use, which is what most occupants want, they rely on various strategies. Some residents who want to enjoy a pre-heated bathroom either permanently leave TRVs turned on or find creative solutions like one interviewee, who reported that her partner usually pre-warms the bathroom for her because he will get up earlier and does not mind the cold. For most occupants, however, it seems sufficient to turn heaters on only for the period of use. Therefore, radiators have to become hot quickly, which is easily possible with the rather high flow temperatures. In interviews, residents also regularly told us that they rely on feedback from the radiators to assess whether the heating is working or not and some explicitly stated that they enjoy the radiation of heat from the radiators.

Fig. 6 also shows that adjustment patterns vary by room, reflecting not only differences in use, but possibly also differences in the time it

Table 1

Description of variables included in descriptive analysis.

Variable	Description	Unit/scale
Household energy consumption	Weather-adjusted energy consumption for space heating	kWh/m ² a
Household energy demand	Weather-adjusted calculated energy demand for space heating. Detailed description in section 3.2	kWh/m ² a
Energy performance gap	EPG = [(Energy consumption – energy demand)/energy demand] *100% of weather-adjusted heating energy for space heating Missing values for apartments with temporary vacancy	%
Temperature	Measurement of temperature during home visit for each room	°C
TRV setting	Thermostat setting at radiators in rooms. 6-point scale	0-5 in steps of 0.5
Ventilation duration	Factor of average duration of ventilation and frequency of window opening	minutes
Window opening mode	Dummy variable for opening mode of tilt-and-turn windows in every room. Windows can be tilted to about 15% from the bottom of the window and opened completely by turning	0 – tilt ventilation 1 – shock ventilation
Door status	Dummy variable of opening status for each room door	0 – closed 1 – opened
Habits of frequency of change of TRV setting	Categorical variable of how often occupants change TRV settings	1 – during use 2 – morning and night 3 – never
Strategies if feeling too warm	Categorical variable with multiple response to the question of how occupants react if feeling too warm during winter	1 – turn down thermostat 2 – open window in tilt position 3 – open window or balcony door completely

takes the rooms to become warm. The lower the flow temperatures and the smaller the radiators in a heating system, the more slowly the heating system reacts when occupants turn up the TRV setpoints and the longer it takes to heat up a room. Since bathrooms are small and equipped with relatively large radiators, providing warmth on short notice is relatively easy. While using bathrooms, occupants will also be standing relatively close to radiators and the radiant temperature can therefore compensate for the colder air temperature. In contrast, in living rooms most people do not turn TRVs down completely, since it will then take longer to heat the room up again. Heating up living rooms can be further complicated because we regularly observed that households place furniture in front of the radiators. Still, many occupants report turning up heaters in living rooms in the evenings while watching

Table 2Survey sample statistics (Observations, Minimum and Maximum Value, Mean and Standard Deviation).

	Obs	Min	Max	Mean	SD
Household size	34	1.0	7.0	2.09	1.33
Living space [m ²]	34	31.5	73.6	56.09	18.87
Outer wall area [m ²]	34	17.6	65.8	34.17	13.64
Age of oldest household member	34	24.0	90.0	50.71	19.14
Heating demand [kWh/m ² a]	88	62.4	177.7	88.55	26.82
Heating consumption [kWh/m ² a]	77	0.1	243.1	97.30	61.27
2018					
EPG 2018 [%]	77	−99.9	193.9	12.73	69.08
Heating consumption [kWh/m ² a]	67	0.5	342.5	105.04	69.73
2019					
EPG 2019 [%]	67	−99.4	257.6	24.40	82.07

TV or relaxing and turning them down before going to bed. In bedrooms, many occupants seem to completely refrain from heating to keep the room cold, or only heat a very little so as not to feel cold when going to bed.

The temperature measurements principally support these differences in TRV settings between rooms (Fig. 7), but also hint at side effects like internal heat flows. Generally, we observe a large variance within as well as between rooms.⁹ For bathrooms the spread in comfort requirements seems to be the widest. Living room temperatures are considerably warmer than those in the other rooms. The small kitchen also seems to be rather warm considering that most people report not actively heating this room. This is an indication of internal heat gains, and also of internal heat transfers between rooms, where the warmth from living rooms dissipates to the other rooms, especially because many occupants either remove their kitchen door or leave it permanently open.

If we correlate average measured apartment temperatures with the EPG for each apartment, we see that there is a relatively strong positive correlation ($r = 0.46$, $p < 0.05$), as we would expect. However, there are households with large EPGs of above 50% but only relatively low average indoor temperatures of below 20 °C (Fig. 7 b, purple oval). On the other hand, for several households, average indoor temperatures are high but actual energy consumption lies below the predicted heating demand, indicating that some households attain high temperatures with relatively little energy consumption (Fig. 7 b, red oval). Although this can have different causes, such as high internal heat gains or reduced ventilation, several occupants reported that they feel they need less heating energy because they have a favourable location within the building. This is supported by research showing that occupants, particularly the ones in the middle of the building, can benefit from their neighbours' heating through internal heat transfers (Köiv et al., 2012).

4.3. Window opening behaviour

Window opening is, in addition to heating settings and the duration of heating, the other main way of controlling thermal comfort in households that has a high impact on energy consumption (Fabi et al., 2012; Rijal et al., 2007). It is heavily influenced by meanings of comfort, especially because of the association with fresh air (Madsen and Gram-Hanssen, 2017) and the negative association between indoor temperature and the perception of air quality (Fang et al., 1998).

⁹ Conducting repeated measure analysis of variance for the differences in thermostat settings between rooms and time of day, we find a statistically significant difference at the 0.05 level among the thermostat settings. Huynh-Feldt, Greenhouse-Geisser and Box's conservative ϵ for violation of the sphericity assumption about homogenous variations are all significant at $p < 0.001$ level. Differences between rooms explain 28.74% of the total variance; differences between time and the interaction term of room and time both explain a further 2.3%.

Window design also plays an important role. During our visits in the apartments, we could observe that windowsills in living rooms were commonly furnished with pot plants and other decorations, which prevents shock ventilation (opening windows completely). Here, meanings of comfort, such as interior style and the need to provide for fresh air, interact with window design to inhibit more energy-efficient ways of ventilation (cf. also Galvin, 2013a).

Window opening and closing patterns are further influenced by building technologies such as the thermal envelope and building mass (Weber, 2021), because they change the rate of cooling of the indoor environment and therefore the feedback for occupants (Bauer et al., 2021).

To analyse routines in window opening behaviour, we asked occupants for an estimate of how often and for how long they usually open their windows during winter in different rooms. Even though there is support for the assumption that reported and measured ventilation behaviour are positively associated (Rijal et al., 2007), because of the problems with self-reporting, the evidence should only be regarded as a qualitative indication of the differences between households rather than exact estimates.

While occupants usually open windows in living rooms for shorter times and mostly rely on shock ventilation, in all other rooms a sizeable share of occupants open windows for much longer durations and to a considerably higher degree by tilting the windows. Every fourth person reports that they keep windows tilted in bedrooms during the night and more than 40% ventilate bedrooms for more than 3 h a day. One interviewee reported that even though they close their bedroom window during the night, they tilt their living room window and leave the door between the living room and bedroom open to get fresh air. Residents repeatedly report that they need fresh air in bedrooms for sleeping, which for many means that they want to feel the cold air coming in (cf. Fang et al., 1998 for an explanation). It is this perception of comfort from sleeping in cold temperatures that inhibits a more energy-efficient practice, where rooms would be cooled down less. The energy-inefficient practice is supported by window design as well as the possibility of heating up rooms relatively fast after letting them cool down.

In kitchens and bathrooms, where cooking and bathing generate a lot of humidity, at least one in four households states that they routinely keep windows permanently tilted. Tilting windows is particularly problematic if households do not feel the room cool down. Because the radiation heat from walls and radiators balances the sensitivity to the relatively cooler air, this reduced feedback with respect to the outdoor conditions can induce occupants to leave windows tilted for long durations. Since occupants open or close their windows particularly in such situations when discomfort occurs (Rijal et al., 2007), they can easily forget to close the windows for longer periods of time (Bauer et al., 2021). However, even without this effect, Fig. 8 shows that a considerable share of households report ventilating intentionally for long periods, even in winter.

If we examine the reasons why residents open windows, we also find that window opening is used by some households as a cooling strategy if they feel too warm (Fig. 9). When we asked occupants about the strategies they apply when they feel too hot, every fourth resident stated that, in addition to other strategies, they also rely on opening windows. This is supported by findings from Rijal et al. (2007), who have shown that opening windows is one of the main modes for controlling thermal comfort, including in cold weather.

Because the use of heating and window opening also depends on how comfort is negotiated between different household members (Offenberger, 2016), the household composition can have an impact on the use of different strategies. A common strategy among households was to adjust the temperature for the household member with the lowest tolerance for cool temperatures, while other household members adapt by wearing fewer clothes or by sporadic ventilation to adjust the thermal expectation.

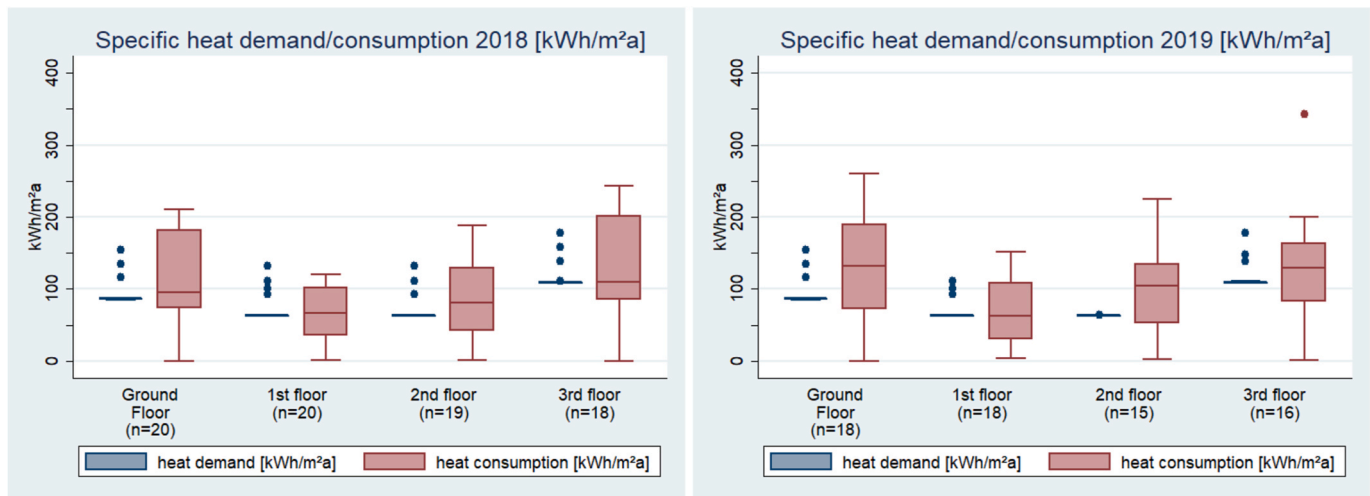


Fig. 4. Box plots of specific heating energy demand and consumption [kWh/m²a] in 2018 (left) and 2019 (right).

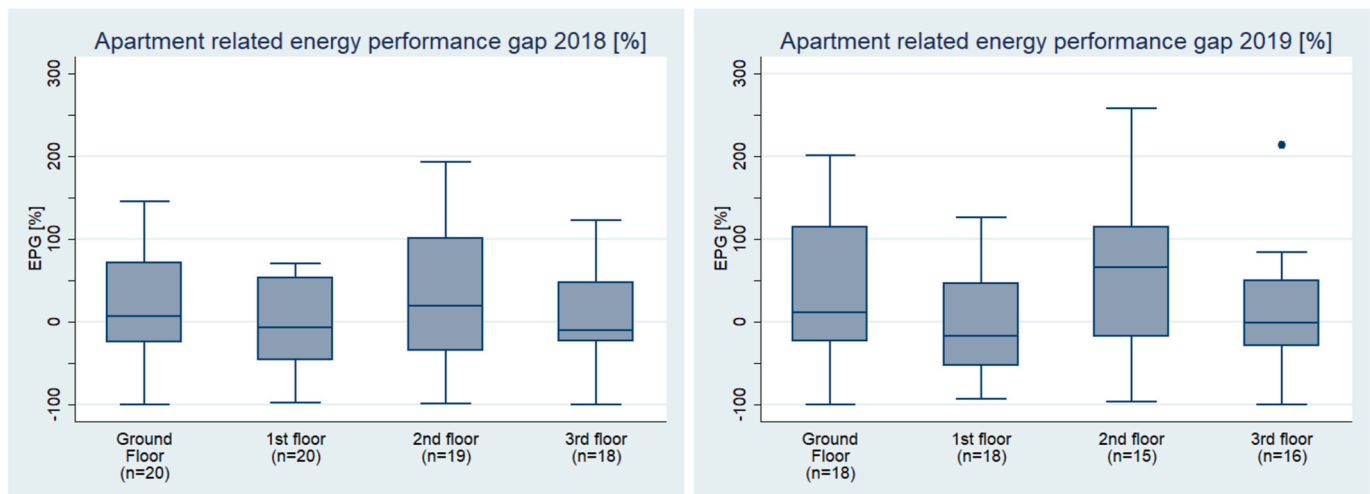


Fig. 5. Apartment-related energy performance gaps [%] in 2018 (left) and 2019 (right).

Heat loss from air exchange rates is not only affected by opening windows but further amplified by door opening behaviour and temperature differences within apartments (Cockroft et al., 2017). Open windows lead to higher energy loss when residents leave doors open between heated and unheated rooms. While different thermal comfort zones within the apartment seem to be prevalent, with most households preferring a rather warm living room and a cool bedroom, these zones are often not separated (Fig. 10) because occupants leave doors open for other reasons than thermal comfort (Raja et al., 2001), e.g. for visual comfort. Several households have even removed their kitchen door completely, e.g. so as to not further reduce the limited space in the apartment. While, in many households, bedrooms are not used during the day and the doors stay closed, most people report keeping the living room and kitchen doors open, e.g. because of pets, which would also explain why we measure rather warm temperatures in kitchens despite radiators being turned off. Additionally, in many apartments occupants ventilate the bathroom and kitchen quite heavily, amplifying the internal heat flows. Overall, this shows that window and door opening behaviour is often strongly linked to other practices, whereby various aspects of comfort come into play and the question of the impact on energy consumption recedes into the background (Madsen and Gram-Hanssen, 2017).

5. Discussion and policy conclusions

5.1. Summary of research question and results

In this socio-technical case study with 34 households in two multi-apartment buildings, we analyse the interplay between meanings of comfort (what occupants consider comfort), comfort strategies (how comfort is achieved within occupants' homes), and the built environment and how this affects a households' space heating consumption. Using EPGs at the apartment level to control for differences stemming from an apartment's location within a building, we showed that energy consumption between households differs widely, from EPGs of almost -100% to over 250%. We showed that there is a great variance in heating and ventilation patterns between households within a building, as well as between rooms within a single household. In Table 3 we provide an overview over the main patterns observed in our case study and cite further studies to assess the robustness of these observations.

As we will argue further below, the interplay between building technologies and patterns of occupant behaviour (meanings, knowledge and routines, in the terminology of social practice theory (e.g. Gram-Hanssen, 2010)) that we observed in these moderately insulated buildings favours the establishment of comfort practices that cause EPGs in buildings with higher insulation (energy-efficient refurbishments).

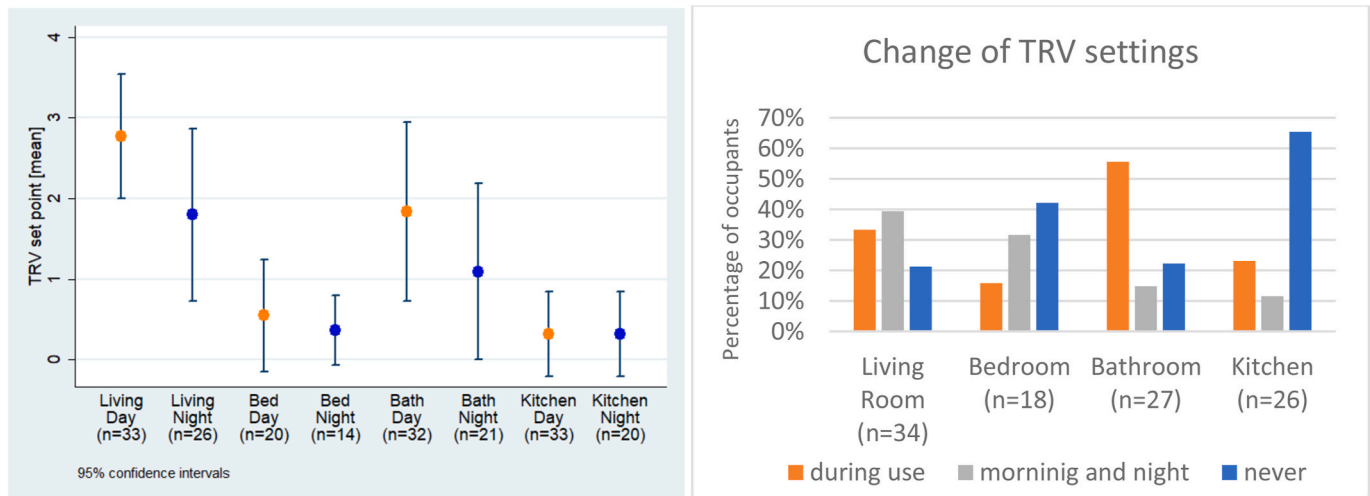


Fig. 6. Self-reported TRV settings by room and daytime (left) and preferred TRV operation (right).

5.2. Discussion and implications for occupant-building interaction in high-efficiency retrofits

Differences in indoor temperatures between bedrooms and living rooms are a frequently observed pattern in dwellings (Bruce-Konuah et al., 2018; Guerra-Santin and Itard, 2010; Teli et al., 2016). The adaptive thermal comfort theory underlines that the demand for different levels of indoor temperatures depends on the activities performed by the occupants (Humphreys and Nicol, 1998). Many people, for example, prefer their bedrooms to be cold while they sleep (Madsen and Gram-Hanssen, 2017). Plausible reasons for this are that warm air temperature can negatively affect perceived air quality (Fang et al., 1998) and that in old apartments it would be expensive to permanently heat all rooms. Having become used to sleeping in the cold over time, occupants consequently heat bedrooms less or only sporadically (Hens et al., 2010) and ventilate them more heavily than other rooms (Levie et al., 2014). Because opening windows is a relatively flexible and quick way of adjusting indoor temperatures downwards, compared to turning off heaters and waiting for rooms to cool down, it is also used in other situations to get rid of heat and regulate indoor temperatures (Karjalainen, 2009; Wolff et al., 2017). Once windows are open, they often remain in that position until occupants feel discomfort, e.g. when it gets too cold (Ackerly et al., 2011; Rijal et al., 2007). Thus, window opening times also depend on the building structure itself, because the air exchange rate is not only affected by window and door opening behaviour (Howard-Reed et al., 2002; Liu et al., 2018) but also by the building insulation and ventilation technologies. Energy stored in the building envelope can moderate the influence of cold air on the feeling of comfort via the radiant heat of the walls (Halawa et al., 2014). Ventilation behaviour is therefore also related to the effects of building technologies on the indoor climate and increases with the insulation of the building envelope, at least as long as there is no ventilation system installed (Weber, 2021), which is often not the case when apartment buildings are retrofitted.

Our findings show that heating control via TRV settings is the other predominant way in which occupants regulate indoor temperatures (Firth et al., 2010) and being able to change heating setpoints is critical to occupants' perception of comfort (Day and Hescong, 2016; Karjalainen, 2009). However, the reported frequency with which occupants change their heating settings varies considerably across studies (Huebner et al., 2013; Karjalainen, 2009; Urban and Gomez, 2013). Possible explanations for this are not only the lack of measurement data and occupants' difficulties in recalling frequencies in adjustment, but also study designs and the different contexts they were conducted in, such as the building controls in place. In general, occupants' control behaviour

seems to depend in part on their mental models (Kempton, 1986), suggesting that there are different types of users (Goodhew et al., 2017; Rubens and Knowles, 2013), which our results also seem to confirm. Many people do not use TRVs as intended by the technical design or fundamentally do not understand how thermostats work (Bruce-Konuah et al., 2018; Meyers et al., 2010; Shipworth et al., 2010; Wolff et al., 2017). While some users seem to believe that rooms get warmer faster at higher settings (Goodhew et al., 2017), which could explain high interim setpoints, many rely on direct sensory feedback, e.g. from the heat emitted from radiators (Matzat, 2019) or the cold air coming in when opening windows (Madsen and Gram-Hanssen, 2017), to control room temperatures. Our study seems to confirm that, because of occupants' different mental models and their orientation towards direct sensory feedback in regulating room temperatures, in combination with the time it takes for a room to get warm, some households adjust their thermostat settings regularly, while others leave their settings unchanged for long periods. The behaviour of building technologies, such as the warmth emitted by radiators or the reaction speed of radiators to changes in setpoints, therefore influences occupants' control behaviour (Matzat, 2019).

The expectations of fast feedback when operating TRVs and the preference for cooler temperatures in some rooms and under certain circumstances (e.g. while sleeping or doing physical activity or housework) fit relatively well with the circumstances of buildings with low insulation,¹⁰ which cool down relatively quickly once the heating is switched off and maintain differences in indoor temperatures between rooms if some rooms remain unheated. Because it is costly to heat all rooms permanently, occupants are used to heating some rooms, such as bedrooms, less and to regularly turning down TRVs when not needed. Relying on direct sensory feedback and regulating the indoor temperatures up and down at short notice therefore often works quite well in these settings (Urban and Gomez, 2013).

However, the mechanism of this interplay between comfort expectations, knowledge and beliefs about building controls, and building technologies changes in buildings with tight insulation and low-temperature heating technologies (e.g. heat pumps and underfloor heating). Compared to unrefurbished older buildings, highly insulated buildings regularly experience relatively high (Fletcher et al., 2017;

¹⁰ In Germany, such buildings are characterised by relatively high transmission heat losses and conventional heating systems (Deutsche Energie-Agentur, 2016), which are often operated with gas or oil (BDEW, 2021) and usually run on high flow temperatures, which means that the radiators get quite hot as soon as TRVs are turned up.

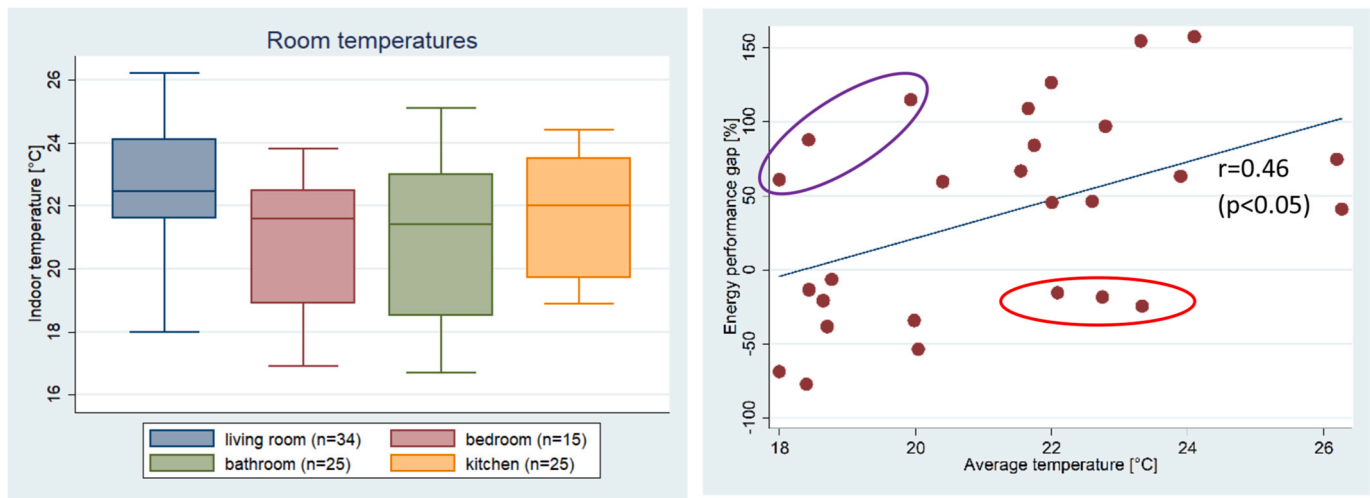


Fig. 7. a) Box plots of room temperatures [°C] (left) and b) bivariate correlation of EPG [%] and average temperature [°C] (right).

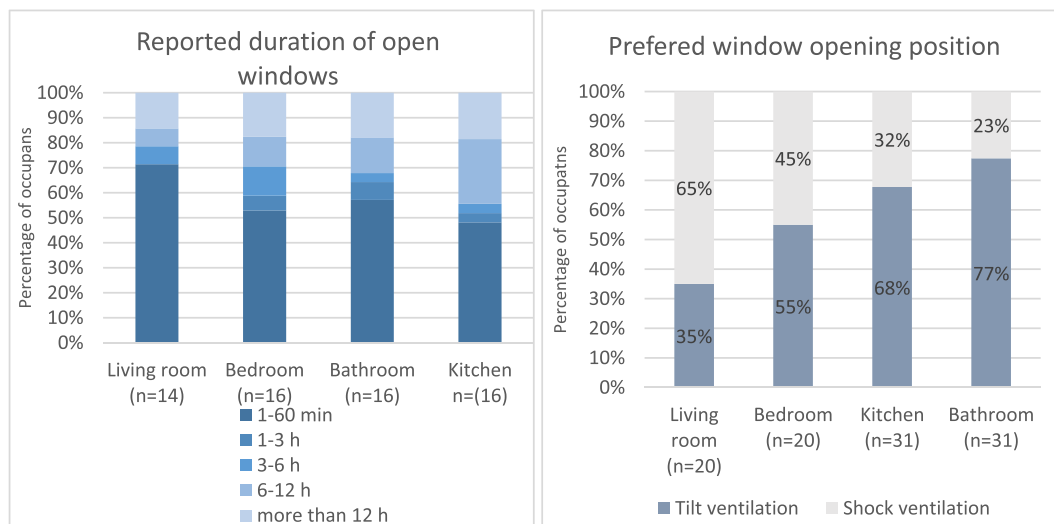


Fig. 8. Self-reported window opening durations (left) and preferred mode of ventilation (right) by room.

Haas et al., 1998; Love, 2014; Schröder et al., 2018) and homogenous indoor temperatures (Huebner et al., 2015b; Liu and Thoreson, 2013; Schröder et al., 2018), for which three mechanisms in particular are responsible.

Firstly, the higher the thermal insulation of a building, the greater the relative importance of internal heat flows compared to transmission heat losses and air exchange heat losses (Köiv et al., 2012; Lukić et al., 2017), favouring a homogenous indoor climate and leading to an increase in the indoor temperature of unheated rooms and apartments (Michnikowski, 2017).

Secondly, insulation increases the thermal inertia of the building – similar to increasing the thermal mass of the building (Reilly and Kinane, 2017; Verbeke and Audenaert, 2018) – as more heat is stored in the building envelope, which in turn also favours homogenous and constant indoor temperatures.

Thirdly, when refurbishing the building envelope – without replacing the heating system – the temperatures corresponding to the TRV setpoints can be reached more easily due to lower transmission heat losses. The consequences are lower discrepancies between thermostat settings and actual indoor temperatures, and thus higher indoor temperatures (Love, 2014).

Even though these improvements reduce the heat demand considerably, they also bring about a change in the 'behaviour' of the building,

which – in interaction with the control behaviour of the occupants – makes EPGs in highly efficient buildings more likely.

In the case of sudden internal or solar heat gains and in the context of already high comfort temperatures, there is a risk of overheating, because of the heat stored in the building envelope. This is a phenomenon regularly observed in energy-efficient buildings in summer (Lomas and Porritt, 2017; Schröder et al., 2018), but that also occurs in winter (Fletcher et al., 2017). In situations of overheating, turning down the heating, as most occupants would do, is not sufficient to restore comfort, as the building loses heat very slowly. Therefore, opening windows remains one of the most flexible ways to regulate the temperature down and windows will stay open for longer durations compared to in older buildings (Weber, 2021).¹¹

These considerations provide an explanation for why occupants might face difficulties in regulating their thermal comfort in energy-efficient buildings and are consistent with much of the literature on

¹¹ Weber (2021) shows that actually there is a U-shaped correlation between window opening times and building efficiency. For buildings with energy efficiency refurbishments that are not equipped with a ventilation system, window opening frequencies seem to increase compared to older unrefurbished buildings.

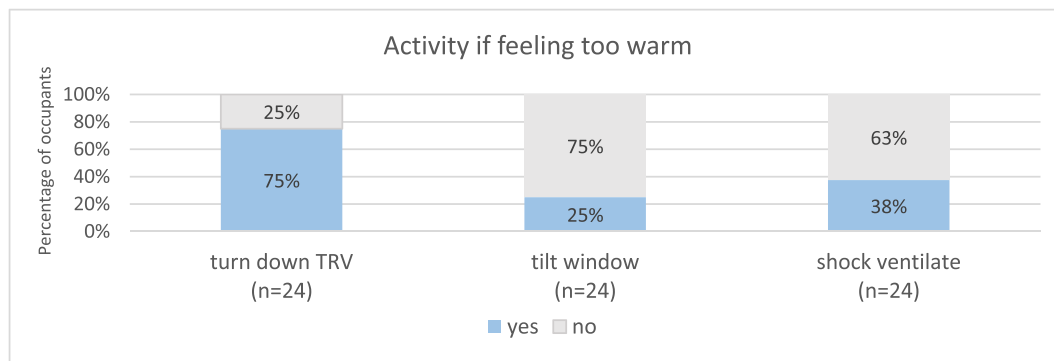


Fig. 9. Occupant strategies when feeling too warm.

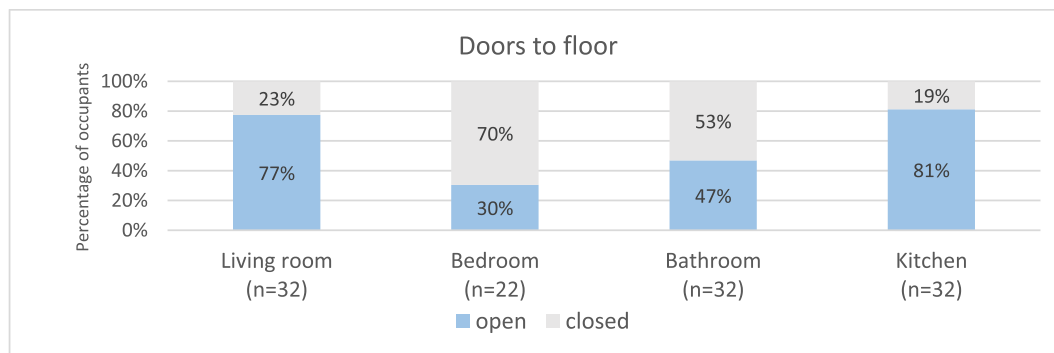


Fig. 10. Self-reported door opening behaviour.

comfort practices in energy-efficient buildings (Love, 2014; Matzat, 2019). However, more research is needed on long-term changes in occupant behaviour and the relative importance of the different mechanisms driving the EPG. Matzat (2019) points out that many residents acquire new habits over the long term, suggesting a familiarisation with the new environment. However, because occupants' behavioural adaptations can also be energy intensive, e.g. if they adjust their thermal expectations (Shove, 2003) and get used to wearing lighter clothing indoors (Galassi and Madlener, 2018; Rudge, 2012), it is necessary to understand these adaptations and changes in comfort practices in order to be able to prevent unintended rebound effects (EPGs).

In the next section, we will discuss policy conclusions and reflect on possible mechanisms for mediating between the built environment and occupant behaviour to prevent the development of energy-intensive comfort practices.

5.3. Policy considerations

EPGs represent an important barrier to energy efficiency in the building stock. Because EPGs reduce the savings generated by efficiency measures, they have a negative impact on the investment decisions of building owners (Ahlrichs et al., 2020). Building owners postpone investments in energy efficiency if the prospect of EPGs impairs the cost-benefit ratio and as long as refinancing is difficult, as is the case in the German rental market (Weber and Wolff, 2018). While higher costs could be justified in the event that occupants deliberately increased consumption after retrofitting, in any other case, occupants might resist increases in rent and fuel the debate about affordable housing (for a more detailed discussion see Weber and Wolff, 2018). The causes of EPGs – whether they are construction defects, intended behaviour (rebound) or unintended side effects – are thus crucial for deciding which measures are both suitable and cost-effective ways to reduce energy consumption in buildings.

Our results imply that the causes of EPGs cannot be easily classified

into either building technology effects or occupant behaviour effects. Instead, we should interpret them as the unintended side effects arising from the interaction between occupant behaviour and building technology.

Efficiency measures like insulation and increasing air tightness, while certainly very effective in reducing heating energy demand, might lose acceptance and economic viability in retrofitted buildings, beyond a certain threshold, if they are not accompanied by supportive measures that mediate between technologies and comfort practices (Grandclément et al., 2015).

Countering EPGs simply by providing more information or by offering price incentives to occupants seems likely to have only limited effectiveness, as long as households do not understand the intricate and non-linear relationship between their behaviour, building technologies and environmental parameters. Current approaches focusing on information and price incentives have been repeatedly called into question, on good grounds (Brynjarsdóttir et al., 2012; Eon et al., 2017; Shove, 2010). Encouraging occupants to turn heaters off completely, for example, could lead to adverse consequences in buildings with high insulation, when internal heat transfers enable households with a tolerance for lower temperatures to refrain from heating their own living space, instead freeriding on their neighbours' heating, for whom it consequently becomes harder to save (Michnikowski, 2017). Adverse effects could also occur in the case of slowly reacting heating systems, when households try to save energy by intermittently reducing TRV settings but then overregulate the heating in the expectation that rooms will warm up faster with higher thermostat settings (Goodhew et al., 2017). Instead, if occupants left rooms at constant and homogenous temperatures, this might lead to a better fit with the building properties of highly insulated buildings with heating systems run on low flow temperatures.

Furthermore, the differences in heating demand between apartments show that energy performance certificates, mandatory for buildings under the EU Energy Performance of Buildings Directive and based on

Table 3

Overview of adaptive behaviour in case study.

TRV settings and indoor temperatures	a. Differ depending on room, activity and time of day, reflecting an appreciation of thermal variability in environmental conditions. b. Occupants partly rely on sensory feedback from radiators after adjustment. c. When they feel too hot, many occupants usually turn heaters down. d. Differences in indoor temperatures between rooms and apartments point to the importance of internal heat shifts, meaning some households can easily save on heating energy while others have to 'heat for their neighbours'.	Guerra-Santin and Itard (2010) provide indirect evidence for self-reported heating setpoints and window opening behaviour for different rooms. Bedrooms are more ventilated and less heated. According to Bruce-Konuah et al. (2018), who analyse self-reported TRV settings in living rooms and bedrooms, social housing tenants use TRVs for zonal control and prefer cooler conditions in bedrooms. Rubens and Knowles (2013) report that occupants expect rapid warming after turning the heating on and heating behaviour depends on activity and occupancy. Some people use controls frequently, while others are more hands-off; some consider their home to reflect different zones, while others consider their home one zone, depending on one of the five identified user types. Overall, occupants expect bedrooms to be cool. Kempton (1986), Goodhew et al. (2017) and Rubens and Knowles (2013) all point to the importance of sensory feedback from radiators. Madsen and Gram-Hanssen (2017) and Matzat (2019) also report evidence for the importance of feedback for some households. E.g. Luo et al. (2014) report that the residents in their field study tend to first adjust heating downwards when they feel too hot. However, the action that is chosen when occupants experience discomfort might differ a lot between users and depending on the environment (Karjalainen, 2009). Teli et al. (2016), Guerra-Santin and Itard (2010) and Bruce-Konuah et al. (2018) all show that people generally expect bedrooms to be cooler. Michnikowski (2017), Kõiv et al. (2012) and Lukić et al. (2017) all show the importance of internal heat transfers for the energy consumption of individual apartments. Levie et al. (2014), D'Oca et al. (2014) and Guerra-Santin and Itard (2010) all report much higher ventilation frequencies for bedrooms than living rooms. Ackerly et al. (2011) state in their review study on window use that there seems to be a strong link between window control patterns and occupants' habits and routines, such as time of arrival and departure, which differ a lot between households. Bauer et al. (2021), Weber (2021) and Galvin (2013a) support the finding that many people rely on tilt (trickle) ventilation in their homes. Pilkington et al. (2011) underline that doors are often left open and this contributes to the energy consumption of dwellings. Cockroft et al. (2017) report considerable saving effects through door closing in their simulation study. Lee et al. (2016) also show the importance of door opening effects and temperature differences on air exchange rates between rooms. Rubens and Knowles (2013) report instances where people ventilate when feeling too warm. Madsen and Gram-Hanssen (2017) also provide qualitative evidence for occupants airing to cool down the house; however, there is a lack of information about how often residents feel too warm in winter and therefore open the windows. Huebner et al. (2013) and Karjalainen (2009) both present self-reported frequencies of adaptive behaviour, in line with the adaptive thermal comfort theory, emphasising the variety of actions to achieve thermal comfort (Humphreys and Nicol, 1998). Galassi and Madlener (2018) and Rudge (2012) provide some hints that occupants had become used to wearing lighter clothing indoors and adapted their comfort expectations over time.
Window and door opening behaviour	a. Large variety of ventilation patterns between rooms and depending on activities and time of day. b. More than half of the occupants rely on tilt ventilation, with longer durations of ventilation. c. Doors between differently heated and ventilated zones are left open in many apartments, likely contributing to internal heat transfers within apartments. Such patterns can lead to 'heating out of the window' if heated and ventilated areas are connected. d. Opening windows is a relevant strategy for at least every fourth household to get rid of warmth.	
Other adaptive strategies	a. If occupants feel too cold or too hot, besides changing TRV settings or opening windows, they rely on a diverse set of personal energy-efficient adaptation strategies, e.g. increasing clothing to keep warm. Correspondingly, occupants can also be expected to reduce clothing if they feel too warm.	

average demand and consumption figures per building, are not suitable as a benchmark for the comparison of individual households.

In-home displays are another approach to encourage residents to save energy by providing feedback and information on energy consumption (Abrahamse et al., 2005). However, as a comprehensive meta-study by Delmas et al. showed (2013), the savings from such approaches are rather questionable, as there are a lot of barriers that are difficult to overcome, such as a lack of user engagement and interest or the insufficient size of cost savings (Buchanan et al., 2015; Hargreaves et al., 2010; Strengers, 2013). The question therefore remains as to what appropriate user engagement might look like, taking into account considerations from socio-technical research.

Improvements to the building envelope and smart home technology, as well as information and price incentives, certainly play an important role in reducing energy consumption. However, instead of clinging to the ideal of the rational user and relying on feedback and control, alternative approaches should be pursued (Strengers, 2013; Wilson & Hargreaves, 2015). In the case of the insulation of old buildings, there might be a limit above which more insulation could be countering deeply rooted comfort practices like the demand for thermal variety and

intermittent and localised heating. Thermal variety in temperature, as well as different thermal stimuli, is not only perceived as positive in comfort practices, but can, within certain limits, also have positive health effects (Parkinson and Dear, 2015). In this case, technological measures could support occupants in preserving these differences instead of countering them by creating a homogenous and slow-reacting environment. Smart technology, which detects and learns occupancy patterns by feeding them back into the 'behaviour' of the technology (Zeiler et al., 2014), in this regard represents an interesting development. Another approach would be the use of personalised heating systems such as heating chairs or radiant heating panels (Vesely and Zeiler, 2014) in apartments, based on the idea of keeping residents warm, not buildings. In contrast to space heating, these systems have the advantage of providing fast feedback and therefore being adjustable to different contexts and situations. In experiments in offices, such approaches have been able to save more than 20% of the heating energy. In new residential buildings, these systems could be used to keep overall air temperatures at lower levels, within the comfort range and taking into account necessary requirements such as health needs (WHO, 1990). In older buildings, they could be used as additional heat sources for certain

practices or situations, similar to the use of blankets, hot drinks or other strategies to keep warm that many occupants already use today (Karjalainen and Koistinen, 2007).

Informational campaigns, on the other hand, would have to be adapted to context. Residents need to understand that in highly insulated buildings, immediate adaptation of indoor conditions to their changing needs is not possible. In old buildings, however, it is energetically favourable to maintain differences between rooms. Information could then focus on supplementary measures to keep warm, such as personalised heating systems, wearing warmer clothes and keeping doors between rooms shut. Context changes, e.g. when moving house, are particularly crucial moments to break habits (Huebner et al., 2013) and should thus be supported with detailed information and ideally close personal assistance, e.g. by the property management or the energy provider. Such targeted approaches appear more promising than general informational campaigns, which cannot consider specific contexts.

The challenge is therefore not to prevent people from aiming for high temperatures if they want or need to do so for health reasons, but to prevent occupants from inadvertently establishing new comfort practices in response to changes in building technology and adapting in energy-intensive ways – e.g. by increasing the overall temperature, reducing clothing and relying on ventilation when overheating. Instead, we should try to find alternative, less energy-intensive ways to provide comfort and promote design systems that support these behaviours rather than nudge people into energy-intensive ways of living.

5.4. Discussion of limitations

As Flyvbjerg (2006) astutely points out, there is a common misunderstanding that one cannot generalise from case studies when working with small samples and not applying multivariate statistical analysis, as in our study. The multi-apartment buildings in which we conducted our survey are typical of municipal housing, at least in eastern Germany. However, the patterns we see are quite likely not confined to this social group, as we have discussed above. Even though we cannot validate the considerations about the effects of increased insulation on comfort practices within this survey, overall, we trust our findings to provide important insights into occupant-building interaction beyond the two buildings studied. What we state about the effects of increased insulation on comfort practices should be regarded as deduced hypotheses, which should be further investigated.

One limitation exists with respect to the self-reported behaviour of heating and ventilation patterns, which, based on social practice theory, we suggest are highly routinised and, based on the adaptive thermal comfort approach, we argue are strongly influenced by unplanned events of discomfort. We report intervals instead of only point estimates to consider these possible inaccuracies in self-reported behaviour. Even though we are sceptical as to whether the self-reporting of behaviours can be used to accurately predict heat loss, we trust that the results reflect general trends and patterns based on three findings: 1) The behavioural patterns seem, overall, reasonable if we compare them to findings from other studies, as we discussed above, even though the ventilation durations in total seem quite high. 2) There is a high correspondence with the survey we conducted with 108 households in similar buildings (see Appendix). 3) The interviews were conducted face to face, enabling comments and the clarification of uncertainties during the interviews.

Another limitation concerning household behaviour is that we relied on the answers given by the ‘head of the household’ and did not ask in detail for differences in practices between household members. Therefore, there remains uncertainty as to the extent to which the answers reflect the behaviour of the whole households, which cannot be further specified. However, unobserved differences within households would support the main argument about differences in occupant behaviour that can counteract each other. In summary, these considerations lead us to

conclude that there is a need for more research, particularly research that measures occupant behaviour, such as window opening and heating behaviour, and ideally compares self-reported behaviour with these measurements.

6. Conclusion

In this paper, we analysed the complex interactions between occupants and building technologies at the apartment level within two buildings with moderate insulation levels. Based on our results regarding comfort practices and findings from the literature, we then discussed possible implications for EPGs in highly insulated buildings. Our analysis points to important mechanisms of the effects of passive design technologies, such as building envelope improvements, on comfort practices, which may explain why EPGs occur in highly insulated buildings – something that should be given more attention in further research.

Highly insulated buildings likely tend to produce thermal monotony and, due to the increased building inertia, make it more difficult for occupants to quickly regulate their indoor environment. However, as we have shown in accordance with other research, thermal monotony might not necessarily be what occupants seek. In older buildings with draughty windows, uninsulated walls and high flow temperatures (70 °C and higher), heating behaviour was usually localised and intermittent, corresponding to an expectation of thermal variety and quick upward or downward changes in indoor temperatures. In contrast, in highly insulated buildings, occupants will increasingly resort to opening windows to regulate temperatures and reduce their clothing or establish other psychological or habitual adaptations to achieve comfort. We therefore conclude that energy efficiency improvements can be accompanied by undesirable adaptive behaviours, leading to EPGs, which should not be misinterpreted as deliberate rebound effects.

While building insulation certainly is a very effective strategy to reduce energy demand and carbon emissions in the building sector, the widespread appearance of EPGs in highly insulated buildings and the causes of this discussed above require a detailed evaluation of the fit between building technologies and comfort practices. Only then will we be able to develop policies to successfully address occupant behaviour in buildings. Buildings should not only be designed to be energy-efficient but rather to be energy-efficient in ways that match well with occupants’ real-life practices and needs.

CRedit authorship contribution statement

Simon Moeller: Conceptualization, Methodology, Formal analysis, Writing – original draft, Writing – review & editing. **Amelie Bauer:** Methodology, Writing – original draft, Writing – review & editing.

Declaration of competing interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Acknowledgements

We would like to thank the BMWK (Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action) for its financial support within the project ‘EffKom – energy-efficient residential comfort: user-oriented development of an automated system for the control of space heating’ (FKZ 67KF0098AB). We also thank the BMBF (Federal Ministry of Education and Research) and BMWK (Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action) for their financial support within the project ‘Zwickauer Energiewende Demonstrieren’ (03SBE114D). Lastly, we thank Bernhard Gill and three anonymous reviewers for their valuable comments.

Appendix

A survey of 108 households was conducted in February 2020 in Zwickau, 80 km south of Leipzig, Germany, containing the same questions, which were used for the analysis above. The similarities between the building types in the two case studies are very large: both were constructed in the 1960s and refurbished in the 1990s, and they have similar layouts, with eight apartments (2–4 rooms) and four floors per staircase, and multiple staircases within one building). Because we could not gather detailed information about these buildings, however, we were not able to also calculate the apartment-related EPGs for these buildings. A description of the variables used for this analysis is provided in Table 1. The results shown here serve to compare and validate the findings presented above. Table 4 shows sample statistics for this survey.

Table 4

Survey sample statistics (Observations, Minimum and Maximum Value, Mean and Standard Deviation)

	Obs	Min	Max	Mean	SD
Household size	103	1.0	4.0	1.70	0.84
Living space in m ²	104	44.3	97.4	56.23	10.56
Number of rooms (excl. kitchen and bathroom)	104	2.0	4.0	2.74	0.72
Heating energy consumption in kWh/m ²	104	0.6	266.1	56.72	41.68
Age of oldest household member	104	22.0	88.0	59.88	18.22

Fig. 11 shows box plots for measures of specific heating energy consumption in kWh/m²a.

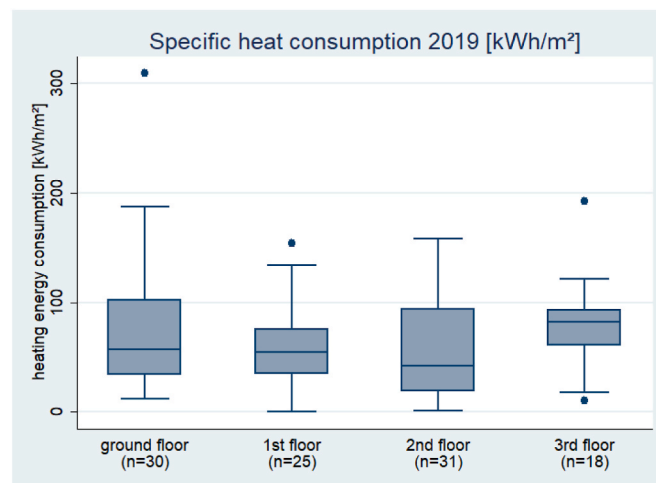


Fig. 11. Box plot of specific heating energy consumption

Fig. 12 a) shows self-reported TRV settings, which were reported by the same individuals for all rooms in their apartment, and include the typical daytime and night-time settings. Fig. 12 b) shows self-reported changes in TRV settings. Multiple answers were possible.

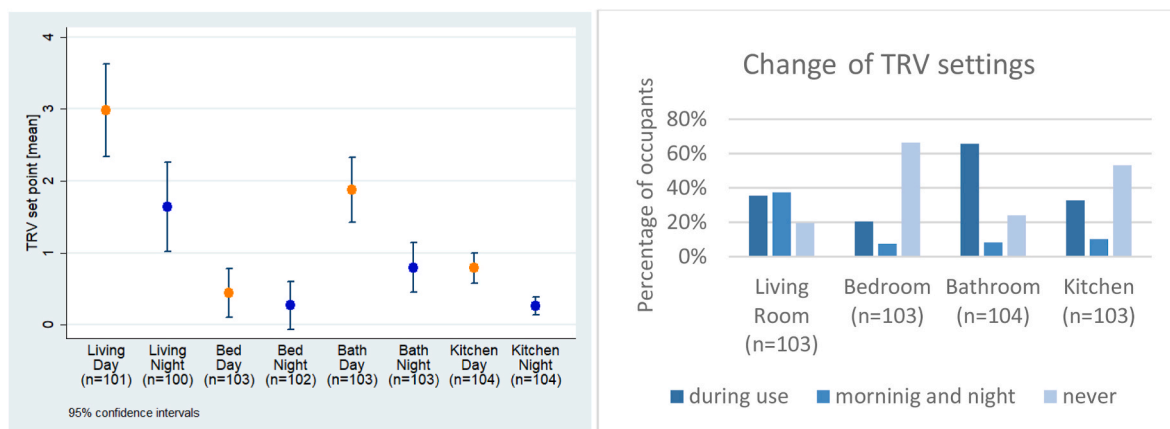


Fig. 12. a) Self-reported TRV settings by room and time of day (left) and b) preferred TRV operation by room (right)

We also conducted repeated measure analysis of variance for the differences in thermostat settings between rooms and time of day for the sample of the Zwickau survey and find a statistically significant difference among the thermostat settings (Huynh-Feldt, Greenhouse-Geisser and Box's conservative ϵ for violation of the sphericity assumption are all significant at $p < 0.001$ level). Differences between rooms explain 25.21% of the total variance, differences between time explain a further 10.0% and the interaction term explains 3.3%.

In Fig. 13 we depict self-reported daily duration of open windows (a) and the preferred window opening position (b) by room.

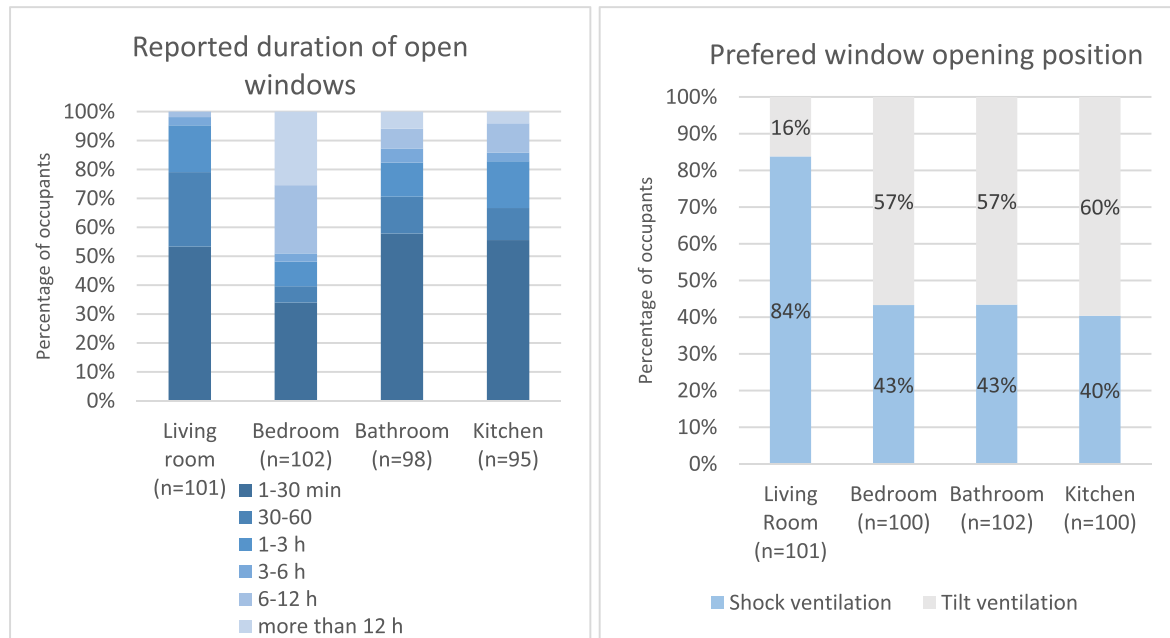


Fig. 13. a) Self-reported window opening durations (left) and b) preferred mode of ventilation (right) by room

In Fig. 14 we show a table with relative frequencies of self-reported door opening behaviour.

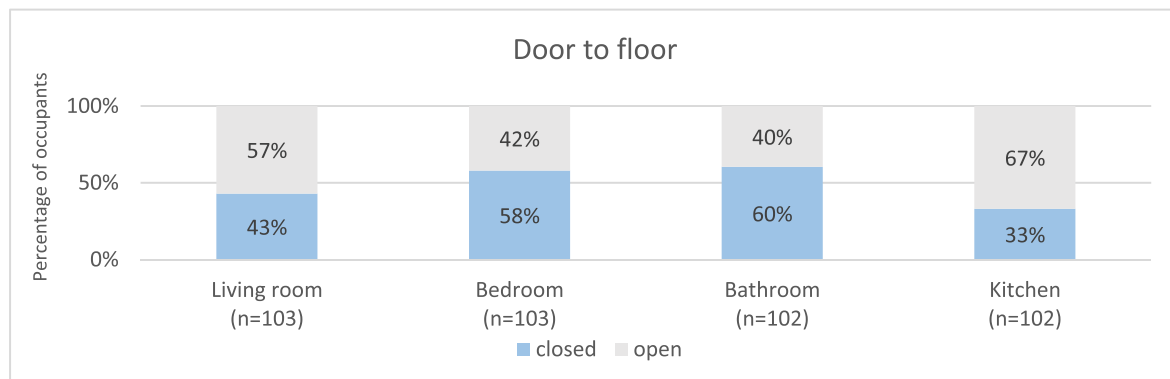


Fig. 14. Self-reported door opening behaviour

Fig. 15 shows self-reported reactions in situations in which occupants feel too warm in winter.

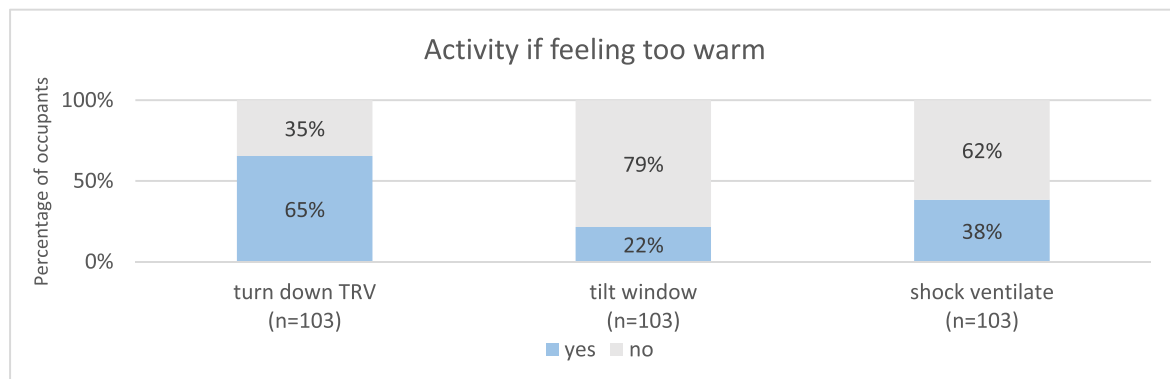


Fig. 15. Occupant activities if feeling too warm

References

- Abrahamse, W., Steg, L., Vlek, C., Rothengatter, T., 2005. A review of intervention studies aimed at household energy conservation. *J. Environ. Psychol.* 25, 273–291. <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2005.08.002>.
- Ackerly, K., Baker, L., Brager, G., 2011. Window use in mixed-mode buildings: a literature review. In: CBE Summary Report. Center for the Built Environment. <https://escholarship.org/uc/item/0t70f65m>. (Accessed 19 June 2019).
- Ahlrichs, J., Rockstuhl, S., Tränkler, T., Wenninger, S., 2020. The impact of political instruments on building energy retrofits: a risk-integrated thermal Energy Hub approach. *Energy Pol.* 147, 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111851>.
- Akrich, M., 1992. The De-scription of technical objects. In: *Shaping Technology/Building Society. Studies in Sociotechnical Change. Shaping Technology/Building Society. Studies in Sociotechnical Change*. MIT Press, Cambridge, London, pp. 205–224.
- Bauer, A., Möller, S., Gill, B., Schröder, F., 2021. When energy efficiency goes out the window: how highly insulated buildings contribute to energy-intensive ventilation practices in Germany. *Energy Res. Social Sci.* 72, 101888 <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101888>.
- BDEW, 2021. Entwicklung der Beheizungsstruktur des Wohnungsbestandes in Deutschland seit 1995. <https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/entwicklung-beheizungsstruktur-wohnungsbestand/>. (Accessed 6 January 2022).
- Bruce-Konuah, N.A., Jones, R.V., Fuentes, A., 2018. A comparison between thermostat and thermostatic radiator valve setpoint temperatures in UK social housing. In: SEEDS 2018: 4th International SEEDS Conference 2018 Sustainable Ecological Engineering Design for Society. <https://dspace.plymouth.ac.uk/handle/10026.1/12464>.
- Brynjarsdóttir, H., Håkansson, M., Pierce, J., Baumer, E.P.S., DiSalvo, C., Sengers, P., 2012. Sustainably unpersuaded: how persuasion narrows our vision of sustainability. In: CHI '12 Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp. 947–956. New York, NY, USA.
- Buchanan, K., Russo, R., Anderson, B., 2015. The question of energy reduction: the problem(s) with feedback. *Energy Pol.* 77, 89–96. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.12.008>.
- BMWi - Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2020. Energieeffizienz in Zahlen: Entwicklungen und Trends in Deutschland 2020, Berlin. <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/energieeffizienz-in-zahlen-2020.html>. (Accessed 30 May 2021).
- Burgess, J., Nye, M., 2008. Re-materialising energy use through transparent monitoring systems. *Energy Pol.* 36, 4454–4459. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.09.039>.
- Calì, D., Osterhage, T., Streblow, R., Müller, D., 2016. Energy performance gap in refurbished German dwellings: Lesson learned from a field test. *Energy Build.* 127, 1146–1158. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.05.020>.
- Chiu, L.F., Lowe, R., Raslan, R., Altamirano-Medina, H., Wingfield, J., 2014. A socio-technical approach to post-occupancy evaluation: interactive adaptability in domestic retrofit. *Build. Res. Inf.* 42, 574–590. <https://doi.org/10.1080/09613218.2014.912539>.
- Cockroft, J., Cowie, A., Samuel, A., Strachan, P., 2017. Potential energy savings achievable by zoned control of individual rooms in UK housing compared to standard central heating controls. *Energy Build.* 136, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.11.036>.
- Cole, R.J., Robinson, J., Brown, Z., O'shea, M., 2008. Re-contextualizing the notion of comfort. *Build. Res. Inf.* 36, 323–336. <https://doi.org/10.1080/09613210802076328>.
- Cozza, S., Chambers, J., Patel, M.K., 2020. Measuring the thermal energy performance gap of labelled residential buildings in Switzerland. *Energy Pol.* 137, 111085 <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.111085>.
- Deutsche Energie-Agentur, 2016. In: Der Dena-Gebäudereport 2016. Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand. <https://www.dena.de/newsroom/publikationsdetailansicht/pub/broschuere-dena-gebäudebericht-2016-printversion/>. (Accessed 30 May 2021).
- D'Oca, S., Fabi, V., Corgnati, S.P., Andersen, R.K., 2014. Effect of thermostat and window opening occupant behavior models on energy use in homes. *Build. Simulat.* 7, 683–694. <https://doi.org/10.1007/s12273-014-0191-6>.
- Day, J.K., Heschemong, L., 2016. Understanding Behavior Potential: the Role of Building Interfaces. ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, Pacific Grove, CA, USA.
- Day, J.K., O'Brien, W., 2017. Oh behave! Survey stories and lessons learned from building occupants in high-performance buildings. *Energy Res. Social Sci.* 31, 11–20. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.05.037>.
- Dear, R. de, Brager, G., 1998. Developing an adaptive model of thermal comfort and preference. *Build. Eng.* 104.
- Delmas, M.A., Fischlein, M., Asensio, O.I., 2013. Information strategies and energy conservation behavior: a meta-analysis of experimental studies from 1975 to 2012. *Energy Pol.* 61, 729–739. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.05.109>.
- DSK, Secon Ingenieure, GIZ, 2014. Gebietsbezogenes Integriertes Klimaschutzkonzept "Am Hochhaus" Borna. Deutsche Stadt- und Grundstücksentwicklungsgesellschaft mbH & Co. KG, Leipzig.
- Economidou, M., Todeschi, V., Bertoldi, P., D'Agostino, D., Zangheri, P., Castellazzi, L., 2020. Review of 50 years of EU energy efficiency policies for buildings. *Energy Build.* 225, 110322 <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110322>.
- Eon, C., Breadsell, J.K., Morrison, G.M., Byrne, J., 2017. The home as a system of practice and its implications for energy and water metabolism. *Sustain. Prod. Consum.* 13, 48–59. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2017.12.001>.
- Eon, C., Liu, X., Morrison, G.M., Byrne, J., 2018. Influencing energy and water use within a home system of practice. *Energy Build.* 158, 848–860. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.053>.
- Eurostat, 2021. Gas prices by type of user. <https://ec.europa.eu/eurostat/databrowse/r/view/ten00118/default/table?lang=en>. (Accessed 12 January 2022).
- Fabi, V., Andersen, R.V., Corgnati, S., Olesen, B.W., 2012. Occupants' window opening behaviour: a literature review of factors influencing occupant behaviour and models. *Build. Environ.* 58, 188–198. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.07.009>.
- Fang, L., Clausen, G., Fanger, P.O., 1998. Impact of temperature and humidity on the perception of indoor air quality. *Indoor Air* 8, 80–90. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.1998.t01-2-00003.x>.
- Fanger, P.O., 1970. *Thermal Comfort. Analysis and Applications in Environmental Engineering*. Danish Technical Press, Copenhagen.
- Feijter, F.J. de, van Vliet, B.J., 2021. Housing Retrofit as an Intervention in Thermal Comfort Practices: Chinese and Dutch Householder Perspectives, vol. 14. <https://doi.org/10.1007/s12053-020-09919-8>. Energy Efficiency.
- Firth, S.K., Lomas, K.J., Wright, A.J., 2010. Targeting household energy-efficiency measures using sensitivity analysis. *Build. Res. Inf.* 38, 25–41. <https://doi.org/10.1080/09613210903236706>.
- Fletcher, M.J., Johnston, D.K., Glew, D.W., Parker, J.M., 2017. An empirical evaluation of temporal overheating in an assisted living Passivhaus dwelling in the UK. *Build. Environ.* 121, 106–118. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.05.024>.
- Flyvbjerg, B., 2006. Five misunderstandings about case-study research. *Qual. Inq.* 12, 219–245. <https://doi.org/10.1177/1077800405284363>.
- Galassi, V., Madlener, R., 2018. Shall I open the window? Policy implications of thermal-comfort adjustment practices in residential buildings. *Energy Pol.* 119, 518–527. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.03.015>.
- Galvin, R., 2013a. Impediments to energy-efficient ventilation of German dwellings: a case study in Aachen. *Energy Build.* 56, 32–40. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.10.020>.
- Galvin, R., 2013b. Targeting 'behaviors' rather than behaviours: a 'subject-oriented' approach for reducing space heating rebound effects in low energy dwellings. *Energy Build.* 67, 596–607. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.08.065>.
- Galvin, R., 2014. Making the 'rebound effect' more useful for performance evaluation of thermal retrofits of existing homes: Defining the 'energy savings deficit' and the 'energy performance gap. *Energy Build.* 69, 515–524. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.004>.
- Galvin, R., Gubernat, A., 2016. The rebound effect and Schatzki's social theory: reassessing the socio-materiality of energy consumption via a German case study. *Energy Res. Social Sci.* 22, 183–193. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2016.08.024>.
- Galvin, R., Sunikka-Blank, M., 2016. Schatzkian practice theory and energy consumption research: time for some philosophical spring cleaning? *Energy Res. Social Sci.* 22, 63–68. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2016.08.021>.
- Gibson, J.J., 2014. *The Ecological Approach to Visual Perception*. Psychology Press.
- Gillingham, K., Rapson, D., Wagner, G., 2016. The rebound effect and energy efficiency policy. *Rev. Environ. Econ. Pol.* 10, 68–88. <https://doi.org/10.1093/reep/rev017>.
- Goodhew, J., Pahl, S., Goodhew, S., Boomsma, C., 2017. Mental models: Exploring how people think about heat flows in the home. *Energy Res. Social Sci.* 31, 145–157. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.06.012>.
- Gram-Hanssen, K., 2010. Residential heat comfort practices: understanding users. *Build. Res. Inf.* 38, 175–186. <https://doi.org/10.1080/09613210903541527>.
- Grandclément, C., Karvonen, A., Guy, S., 2015. Negotiating comfort in low energy housing: the politics of intermediation. *Energy Pol.* 84, 213–222. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.11.034>.
- Greening, L.A., Greene, D.L., Difiglio, C., 2000. Energy efficiency and consumption — the rebound effect — a survey. *Energy Pol.* 28, 389–401. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(00\)00021-5](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(00)00021-5).
- Grubler, A., Johansson, T.B., Mundaca, L., Nakicenovic, N., Pachauri, S., Riahi, K., Rogner, H.-H., Struweit, L., 2012. Chapter 1 - energy primer. In: *Global Energy Assessment - toward a Sustainable Future*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 99–150 and the International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria.
- Guerra-Santín, O., Itard, L., 2010. Occupants' behaviour: determinants and effects on residential heating consumption. *Build. Res. Inf.* 38, 318–338. <https://doi.org/10.1080/09613211003661074>.
- Haas, R., Auer, H., Biermayr, P., 1998. The impact of consumer behavior on residential energy demand for space heating. *Energy Build.* 27, 195–205. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(97\)00034-0](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(97)00034-0).
- Halawa, E., van Hoof, J., 2012. The adaptive approach to thermal comfort: a critical overview. *Energy Build.* 51, 101–110. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.04.011>.
- Halawa, E., van Hoof, J., Soebarto, V., 2014. The impacts of the thermal radiation field on thermal comfort, energy consumption and control—a critical overview. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 37, 907–918. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.040>.
- Hargreaves, T., Nye, M., Burgess, J., 2010. Making energy visible: a qualitative field study of how householders interact with feedback from smart energy monitors. *Energy Pol.* 38, 6111–6119. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.05.068>.
- Hens, H., Parijs, W., Deurincq, M., 2010. Energy consumption for heating and rebound effects. *Energy Build.* 42, 105–110. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.07.017>.
- Hörning, K.H., 2001. *Experten des Alltags: Die Wiederentdeckung des praktischen Wissens, first ed.* Velbrück Wiss., Weilerswist, p. 267.
- Howard-Reed, C., Wallace, L.A., Ott, W.R., 2002. The effect of opening windows on air change rates in two homes. *J. Air Waste Manag. Assoc.* 52, 147–159. <https://doi.org/10.1080/10473289.2002.10470775>.
- Huebner, G.M., Cooper, J., Jones, K., 2013. Domestic energy consumption—what role do comfort, habit, and knowledge about the heating system play? *Energy Build.* 66, 626–636. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.07.043>.
- Huebner, G.M., Hamilton, I., Chalabi, Z., Shipworth, D., Oreszczyn, T., 2015a. Explaining domestic energy consumption – the comparative contribution of building factors,

- socio-demographics, behaviours and attitudes. *Appl. Energy* 159, 589–600. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.09.028>.
- Huebner, G.M., McMichael, M., Shipworth, D., Shipworth, M., Durand-Daubin, M., Summerfield, A.J., 2015b. The shape of warmth: temperature profiles in living rooms. *Build. Res. Inf.* 43, 185–196. <https://doi.org/10.1080/09613218.2014.922339>.
- Humphreys, M.A., Nicol, J.F., 1998. Understanding the adaptive approach to thermal comfort. *Build. Eng.* 104, 991–1004.
- Janda, K.B., 2011. Buildings don't use energy: people do. *Architect. Sci. Rev.* 54, 15–22. <https://doi.org/10.3763/asre.2009.0050>.
- Karjalainen, S., 2009. Thermal comfort and use of thermostats in Finnish homes and offices. *Build. Environ.* 44, 1237–1245. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.09.002>.
- Karjalainen, S., Koistinen, O., 2007. User problems with individual temperature control in offices. *Build. Environ.* 42, 2880–2887. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.10.031>.
- Kasperbauer, T.J., 2017. The permissibility of nudging for sustainable energy consumption. *Energy Pol.* 111, 52–57. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.09.015>.
- Kempton, W., 1986. Two theories of home heat control. *Cognit. Sci.* 10, 75–90. <https://doi.org/10.1207/s15516709cog1001.3>.
- Köiv, T.-A., Hamburg, A., Thalfeldt, M., Fadejev, J., 2012. Indoor climate of an unheated apartment and its impact on the heat consumption of adjacent apartments. In: 3rd International Conference on Urban Sustainability, Cultural Sustainability, Green Development, Green Structures and Clean Cars (USCUDAR'12), pp. 52–58. Barcelona. <http://wseas.us/e-library/conferences/2012/barcelona/uscudar/uscudar-09.pdf>.
- Lee, S., Park, B., Kurabuchi, T., 2016. Numerical evaluation of influence of door opening on interzonal air exchange. *Build. Environ.* 102, 230–242. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.03.017>.
- Levie, D., Kluienaar de, Y., Hoes-van Oeffelen, E., Hofstetter, H., Janssen, S.A., Spiekman, M.E., Koene, F., 2014. Determinants of ventilation behavior in naturally ventilated dwellings: identification and quantification of relationships. *Build. Environ.* 82, 388–399. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.09.008>.
- Linde, H., 1972. *Sachdominanz in Sozialstrukturen*. Mohr, Tübingen, p. 86.
- Ling, J., Li, Q., Xing, J., 2015. The influence of apartment location on household space heating consumption in multi-apartment buildings. *Energy Build.* 103, 185–197. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.057>.
- Liu, L., Thoreson, J., 2013. Exploring indoor climate and comfort effects in refurbished multi-family dwellings with improved energy performance. *Sustain. Energy Buildings* 463–478.
- Liu, Y., Miztal, P.K., Xiong, J., Tian, Y., Arata, C., Nazaroff, W.W., Goldstein, A.H., 2018. Detailed investigation of ventilation rates and airflow patterns in a northern California residence. *Indoor Air* 28, 572–584. <https://doi.org/10.1111/ina.12462>.
- Lomas, K.J., Porritt, S.M., 2017. Overheating in buildings: lessons from research. *Build. Res. Inf.* 45, 1–18. <https://doi.org/10.1080/09613218.2017.1256136>.
- Love, J.A., 2014. Understanding the Interactions between Occupants, Heating Systems and Building Fabric in the Context of Energy Efficient Building Fabric Retrofit in Social Housing. UCL (University College London).
- Lukić, N., Nikolić, N., Timotijević, S., Tasić, S., 2017. Influence of an unheated apartment on the heating consumption of residential building considering current regulations—case of Serbia. *Energy Build.* 155, 16–24. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.006>.
- Luo, M., Cao, B., Zhou, X., Li, M., Zhang, J., Ouyang, Q., Zhu, Y., 2014. Can personal control influence human thermal comfort? A field study in residential buildings in China in winter. *Energy Build.* 72, 411–418. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.12.057>.
- Madsen, L.V., Gram-Hanssen, K., 2017. Understanding comfort and senses in social practice theory: insights from a Danish field study. *Energy Res. Social Sci.* 29, 86–94. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.05.013>.
- Mahdavi, A., Berger, C., Amin, H., Ampatzi, E., Andersen, R.K., Azar, E., Barthelmes, V. M., Favero, M., Hahn, J., Khovalyg, D., Knudsen, H.N., Luna-Navarro, A., Roetzel, A., Sangogboye, F.C., Schweiker, M., Taheri, M., Teli, D., Touchie, M., Verbruggen, S., 2021. The role of occupants in buildings' energy performance gap: myth or reality? *Sustainability* 13, 3146. <https://doi.org/10.3390/su13063146>.
- Matzat, J.S., 2019. *Die Energiewende in Den Eigenen Vier Wänden*. Dissertation, first ed. Nomos Verlagsgesellschaft mbH & Co. KG.
- Meyers, R.J., Williams, E.D., Matthews, H.S., 2010. Scoping the potential of monitoring and control technologies to reduce energy use in homes. *Energy Build.* 42, 563–569. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.10.026>.
- Michnikowski, P., 2017. Allocation of heating costs with consideration to energy transfer from adjacent apartments. *Energy Build.* 139, 224–231. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.01.020>.
- Offenberger, U., 2016. *Geschlecht und Gemütlichkeit: Paarentscheidungen über das Beheizte Zuhause*. Walter de Gruyter GmbH, Berlin/Boston, p. 1164.
- Parkinson, T., Dear, R. de, 2015. Thermal pleasure in built environments: physiology of alliesthesia. *Build. Res. Inf.* 43, 288–301. <https://doi.org/10.1080/09613218.2015.989662>.
- Pilkington, B., Roach, R., Perkins, J., 2011. Relative benefits of technology and occupant behaviour in moving towards a more energy efficient, sustainable housing paradigm. *Energy Pol.* 39, 4962–4970. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.06.018>.
- Raja, I.A., Nicol, J., McCartney, K.J., Humphreys, M.A., 2001. Thermal comfort: use of controls in naturally ventilated buildings. *Energy Build.* 33, 235–244. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(00\)00087-6](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(00)00087-6).
- Reckwitz, A., 2002a. The status of the "material" in theories of culture: from "social structure" to "Artefacts". *J. Theor. Soc. Behav.* 32, 195–217. <https://doi.org/10.1111/1468-5914.00183>.
- Reckwitz, A., 2002b. Toward a theory of social practices: a development in culturalist theorizing. *Eur. J. Soc. Theor.* 5, 243–263.
- Reilly, A., Kinnane, O., 2017. The impact of thermal mass on building energy consumption. *Appl. Energy* 198, 108–121. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.04.024>.
- Rijal, H.B., Tuohy, P., Humphreys, M.A., Nicol, J.F., Samuel, A., Clarke, J., 2007. Using results from field surveys to predict the effect of open windows on thermal comfort and energy use in buildings. *Energy Build.* 39, 823–836. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.02.003>.
- Rubens, S., Knowles, J., 2013. What People Want from Their Heating Controls: a Qualitative Study: A Report to the Department for Energy and Climate Change. DECC, London. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/251748/what_people_want_from_heating_controls_qualitative_study_appendices.pdf. (Accessed 19 July 2021).
- Rudge, J., 2012. Coal fires, fresh air and the hardy British: a historical view of domestic energy efficiency and thermal comfort in Britain. *Energy Pol.* 49, 6–11. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.11.064>.
- Rupp, R.F., Vázquez, N.G., Lamberts, R., 2015. A review of human thermal comfort in the built environment. *Energy Build.* 105, 178–205. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.07.047>.
- Schatzki, T.R., 1996. *Social Practices: A Wittgensteinian Approach to Human Activity and the Social*. Cambridge Univ. Press, Cambridge, p. 242.
- Schröder, F., Gill, B., Güth, M., Teich, T., Wolff, A., 2018. Entwicklung saisonaler Raumtemperaturverteilungen von klassischen zu modernen Gebäudestandards - sind Rebound-Effekte unvermeidbar? *Bauphysik* 40, 151–160. <https://doi.org/10.1002/bapi.201810017>.
- Shipworth, M., Firth, S.K., Gentry, M.I., Wright, A.J., Shipworth, D.T., Lomas, K.J., 2010. Central heating thermostat settings and timing: building demographics. *Build. Res. Inf.* 38, 50–69. <https://doi.org/10.1080/09613210903263007>.
- Shove, E., 2003. *Comfort, Cleanliness and Convenience: the Social Organization of Normality*. Berg, Oxford, p. 236.
- Shove, E., 2010. Beyond the ABC: climate change policy and theories of social change. *Environ. Plann.* 42, 1273–1285. <https://doi.org/10.1068/a42282>.
- Statistisches Landesamt des Freistaates Sachsen, 2021. *Statistischer Bericht: Sächsisches Kreiszahlen. Ausgewählte Strukturdaten 2020*. T3. https://www.statistik.sachsen.de/download/statistische-berichte/statistik-sachsen_zli2_t03-private-haushalte.xlsx. (Accessed 4 October 2021).
- Strengers, Y., 2013. *Smart Energy Technologies in Everyday Life: Smart Utopia?* Palgrave Macmillan UK, London, p. 211.
- Sunikka-Blank, M., Galvin, R., 2012. Introducing the prebound effect: the gap between performance and actual energy consumption. *Build. Res. Inf.* 40, 260–273. <https://doi.org/10.1080/09613218.2012.690952>.
- Teli, D., Gauthier, S., Aragon, V., Bourikas, L., James, P., Bahaj, A., 2016. Thermal adaptation to high indoor temperatures during winter in two UK social housing tower blocks. Windsor Conference.
- Thomson, H., Snell, C., Bouzarovski, S., 2017. Health, well-being and energy poverty in Europe: a comparative study of 32 European countries. *Int. J. Environ. Res. Publ. Health* 14. <https://doi.org/10.3390/ijerph14060584>.
- Urban, B., Gomez, C., 2013. A Case for Thermostat User Models, 13th Conference of International Building Performance Simulation Association.
- Verbeke, S., Audenaert, A., 2018. Thermal inertia in buildings: a review of impacts across climate and building use. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 82, 2300–2318. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.083>.
- Vesely, M., Zeiler, W., 2014. Personalized conditioning and its impact on thermal comfort and energy performance – a review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 34, 401–408. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.024>.
- Weber, I., 2021. Interplay of building efficiency and households' ventilation behaviour: evidence of an inverse U-shaped correlation. *Energy Build.* 252, 111466. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111466>.
- Weber, I., Wolff, A., 2018. Energy efficiency retrofits in the residential sector – analysing tenants' cost burden in a German field study. *Energy Pol.* 122, 680–688. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.08.007>.
- WHO, 1990. *Indoor Environment: Health Aspects of Air Quality, Thermal Environment light and noise WHO/EHE/RUD/90.2*. Unpublished. World Health Organization. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/62723>.
- Wilson, Charlie, Hargreaves, Tom, Hauxwell-Baldwin, Richard, 2015. Smart homes and their users: a systematic analysis and key challenges. *Personal and Ubiquitous Computing* 19, 463–476. <https://doi.org/10.1007/s00779-014-0813-0>.
- Winograd, T., Flores, F., 1987. *Understanding Computers and Cognition: A New Foundation for Design*. Addison-Wesley, Reading, Mass., p. 207.
- Wolff, A., Weber, I., Gill, B., Schubert, J., Schneider, M., 2017. Tackling the interplay of occupants' heating practices and building physics: insights from a German mixed methods study. *Energy Res. Social Sci.* 32, 65–75. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.07.003>.
- Zeiler, W., Vissers, D., Maaijen, R., Boxem, G., 2014. Occupants' behavioural impact on energy consumption: 'human-in-the-loop' comfort process control. *Architect. Eng. Des. Manag.* 10, 108–130. <https://doi.org/10.1080/17452007.2013.837252>.
- Zou, P.X., Xu, X., Sanjayan, J., Wang, J., 2018. Review of 10 years research on building energy performance gap: life-cycle and stakeholder perspectives. *Energy Build.* 178, 165–181. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.08.040>.

A.3 *Is it a match?* (Moeller 2024)

Moeller, Simon (2024): Is it a match? Smart home energy management technologies and user comfort practices in German multi-apartment buildings. In: Energy Research & Social Science 118, S. 103794. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2024.103794>.



Original research article

Is it a match? Smart home energy management technologies and user comfort practices in German multi-apartment buildings

Simon Moeller^{*}*Ludwig-Maximilians-Universität München, Department of Sociology, Konradstr. 6, 80801 München, Germany*

ARTICLE INFO

Keywords:

Occupant behaviour
Smart home energy management technologies
Residential buildings
Heating energy consumption
Social practice theory
Energy performance gap
Occupant-building-interaction

ABSTRACT

Energy-savings from smart home technologies (SHT) are a topic of considerable debate: While proponents of SHT emphasise the potential to reduce heating energy consumption and facilitate energy flexibility, critics highlight real-world challenges and a lack of evidence of actual savings. This study provides insights into SHT's actual saving potential and reveals essential mechanisms of occupant-technology interaction.

Based on social practice theory, this paper explores how occupants integrate SHT into their everyday comfort practices. Furthermore, it assesses the resulting impacts on heating energy consumption and compares these interactions to those within conventional building settings. The interactions with a pilot SHT are evaluated in 137 apartments in two newly constructed multi-apartment buildings. For comparison, a survey of households in conventional buildings, which vary in age, size and heating demand, is analysed. The case study employs a mixed-methods approach, based on standardised surveys, house tours, and measurement data, including metered energy consumption and indoor temperatures.

The findings suggest that households in conventional German buildings have become accustomed to temperature variations within apartments. However, a preference for thermal variation appears to conflict with the dominant features of SHT, which, as this study implies, tend to produce more homogeneous indoor temperatures. The study identifies four distinct interaction patterns based on an in-depth analysis of heating comfort practices. These patterns vary in how well material settings align with comfort practices, ranging from low to high efficiency. The results indicate that SHT does not offer a 'matching' one-size-fits-all solution for residents' diverse needs and heating demands.

1. Introduction

For the sustainable transformation of the residential building stock, it is essential to reduce its energy consumption for space heating. In the EU, this accounts for 18 % of total final energy consumption [1,2]. Innovative approaches such as smart home energy management technologies (SHT) [3], more commonly referred to simply as smart home technologies [4,5], are attracting growing interest because of their "great potential to provide cost-effective and significant energy savings" [6]. However, as for many other efficiency technologies, current research on such SHT points to a performance gap between the claimed savings potential, often estimated at up to 30 % [7,8], and actual savings achieved in real-world implementations [9,10].

Such performance issues have often been regarded separately: Technological issues on the one hand and behavioural problems on the other, a phenomenon Grandclément et al. [11] called the 'building

versus behaviour approach'. In contrast, more recent research increasingly focuses on the interactions between occupants and technologies. In the domain of SHT, for example, researchers look at how introducing such technologies changes everyday space heating and comfort practices and the implications this has for heating energy consumption [12–14]. Even though much of this research is concerned with the impacts on temperature [15] and energy patterns [12], there remains a need to analyse the interaction between SHT and different comfort practices as well as its impacts on their energy performance for space heating in a larger sample of dwellings.

In this study, I build on the abovementioned insights when presenting findings from a case study with 137 apartments in two multi-apartment blocks. In this living lab, a SHT – still in development – has been implemented for the first time on a grander scale. The technology combines two features typical of SHT to optimise space heating energy consumption: First, occupant-centred control, and second, demand-

^{*} Corresponding author.

E-mail address: simon.moeller@lmu.de.

<https://doi.org/10.1016/j.erss.2024.103794>

Received 7 January 2024; Received in revised form 4 October 2024; Accepted 9 October 2024

Available online 21 October 2024

2214-6296/© 2024 The Author. Published by Elsevier Ltd. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

based regulation [3]. The study aims to investigate how such a technology's behaviour aligns with other building properties and a variety of typical comfort practices. And it analyses the effects of the resulting interaction patterns on the energy performance of individual dwellings. The distinctive focus on technology in the early stages of development allows for examining the underlying assumptions and the challenges to increase the energy performance as intended by their designers. The study contributes to understanding systematic discrepancies between the assumptions inscribed into such technologies and everyday comfort practices. As will be shown, these discrepancies lead to a lack of space heating energy savings in real-world settings.

In studying households' habitual and routinised doings, social practice theory provides a framework well suited for considering material aspects of building technologies [16,17]. I use a mixed-methods socio-technical research design to examine three dimensions of these interactions: First, the material affordances of SHT and their consequences for potential use by occupants. Second, the typical patterns of comfort practices as they have evolved in German residential buildings – the majority of which are at best moderately insulated [18] and three-quarters of which are still heated with conventional oil- or gas-based heating systems [19]. And third, the effects of SHT on heating energy savings and how they depend on whether comfort practices remain stable or change in newly constructed buildings equipped with SHT.

The study's principal findings demonstrate, in accordance with previous research on such systems, that SHT is based on the assumption that connected living areas are evenly heated both spatially and over time. In this case, patterns of uniform indoor temperatures are reinforced, especially in well-insulated buildings. The study can also provide further evidence that many households' practices lead to varying indoor thermal conditions – even in material settings designed for uniformity. In the worst case, this not only impairs the energy performance of individual dwellings but, via feedback loops, also the overall efficiency of the smart buildings.

By comparing the interactions of material settings and comfort practices between older, less energy-efficient buildings and newer, more efficient buildings, the study also helps to explain shifts from prebound effects in the former [20] to energy performance gaps (EGP) [21,22] in the latter.¹

2. Background and objectives

2.1. Social practice theory as an analytical perspective

The analysis in this paper is inspired and informed by a practice-theoretical view. Such a framework is particularly suited for combining social with physical and technical data [23,24]. Combining these data is necessary to analyse how temperature patterns and energy consumption for space heating result from everyday comfort practices and the material arrangements with which they are aligned.

Following Galvin and Sunikka-Blank [16], I use social practice theory as a heuristic device to understand the co-evolution between occupants' activities and their material surroundings. A heuristic device is a "sensitising 'framework' for empirical research" of social phenomena [25], which conveys an image of the intricate links and feedback effects between a phenomenon's different elements and helps "identify lines of causality in related spheres" such as the design of SHTs [16].

Based on the work of Schatzki [26] and Reckwitz [27], a comfort practice is understood here in simplified terms as a bundle of activities

that are part of achieving comfort and involve the consumption of heating energy. These activities are closely interwoven with the material settings by which they are co-constituted [28]. And they usually occur in the form of habitual behaviours that are learned, usually performed tacitly and are, therefore, difficult to change [29]. As a result, relatively stable patterns emerge, which are strongly related to different cultural and material contexts.

For empirical research on energy consumption, Shove [30], Gram-Hanssen [17], and others [31] have developed an understanding of practices consisting of different elements. Many case studies are then concerned with extracting these individual elements to understand how practices are reproduced or changed.

In this case study, the research focuses on the interactions between comfort practices and material arrangements more generally. On the one hand, I look at the doings that occupants perform to achieve comfort in their homes. On the other hand, I look at the material arrangements, including technologies and things [28], that enable and constrain these practices. This study draws on this main analytical distinction between material arrangements that exist and practices that happen [32] to understand how they form a nexus in which then energy consumption patterns emerge.

The concepts of material affordance [33,34], prescription [35] and prefiguration [32] all describe how material arrangements enable, configure and promote particular behaviour while constraining others. The concept of inscription has sharpened the view of the design intentions and programs that are incorporated into artificial material structures [36]. However, technologies are rarely used as designers intended, and other ideas and uses also feed back into the material shapes [37]. Technologies are appropriated [38] and domesticated [39], thereby leading to a change in their effects. In their extreme forms of non-use and rejection, it becomes evident that people need to be able to use these technologies in one way or another for them to endure. Thus, there are also practical affordances [34].

Consequently, these two sides are closely related and co-evolve with each other. It is this mutual dependence and interaction that is the main topic of this article.

2.2. Smart home technologies for space heating energy management

Smart home technologies (SHT) have in common the ability to connect building systems, actors and sensors within a communication network (ICT) to allow better control, monitoring and automation of various services [40]. This paper focuses on the service of heating energy provision for comfort in the home. While there are many more specific terms for this domain, such as (energy) intelligent buildings [41], smart home or building energy management systems [3,42], building automation and control systems [6] or occupant-centric control and operation of buildings [43], for the sake of simplicity I will refer to smart home technologies (SHT) in the following.

Following Tirado Herrero et al. [9], Strengers [44] and McIlvennie et al. [3], SHT can be roughly categorised according to two different logics, which are then often mixed in concrete applications:

2.2.1. Logic 1 – active user – passive technology

One logic can be described as a user-centred approach, emphasising control through the user and active interaction of households with building technologies. According to Strengers, users of such technologies are imagined as "efficient, technologically enabled and rational consumer[s]" [44]. They are "resource manager[s] of the home" [44] who are, by making energy visible through monitoring and feedback systems (apps and in-home displays) [45], provided with the necessary information and incentives to make better decisions, take complete control of their home and manage comfort and energy consumption efficiently [46,47].

Even though much research and technical developments have focused on educational and informational approaches to provide the

¹ Prebound effects describe the phenomenon of less heating energy consumption used than expected from design calculations prior to an energy efficiency measure. Energy performance gaps describe the opposite effect of more energy used than expected after an energy efficiency measure. They both are indicators for the actual consumption compared to the demand from the design stage.

necessary feedback and incentives [45], these strategies seem to have led only to minor savings in energy. In a meta-study on electricity, Delmas et al. [48] only identified savings in the low single-digit percentages, a finding that, according to Buchanan et al. [49], can be applied to household energy consumption in general. It is also unlikely to change even with more innovative approaches such as gamification [50]. Apart from a lack of interest or small savings [49], such approaches generally seem unable to consider the broader social, cultural and institutional context [46].

2.2.2. Logic 2 – passive user – active technology

The second logic can be described as a system-centric approach [4]: The user has a more passive role, and technology provides comfort and reduces energy consumption on the user's behalf. The technology first monitors boundary conditions such as occupant preferences, indoor conditions, and occupancy patterns. It then uses algorithmic or third-party control to optimise energy consumption and balance the demand and supply of the broader energy system [3,43]. Examples of this approach include the integration of buildings into smart grids through demand-side management and early approaches to fully automated buildings.

Approaches to tightly controlled indoor conditions have often been criticised [51–53] for relying on a too narrow definition of comfort, neglecting building users' psychological and behavioural adaptation [54]. They have also been accused of reducing the perceived comfort when occupants lack the feeling of having control [55]. Furthermore, because the comfort range is reduced under tightly controlled conditions, the automated maintenance of these conditions has been criticised as very energy-intensive [51,56]. Conversely, variable indoor conditions, which fluctuate more with the outdoor temperature, should result in lower energy consumption and be more acceptable or even preferable to many occupants [57].

2.2.3. A blending of the logics – current approaches of SHT

Since neither approach's ultimate form seems to lead to the desired results, they are often mixed [3,43,44]. This is also reflected in the most important norm on building automation [8,58] and the Energy Performance of Building Directive. According to the latter, such technologies aim to "support energy-efficient, economical and safe operation of technical building systems through automatic controls and by facilitating the manual management" [6]. Still, high-level automation [59] and the division between a passive user and an active, control-taking SHT seem to dominate many approaches [3]. Innovative approaches to the technical monitoring of user preferences and behaviour, such as human-in-the-loop approaches [60], shall then provide a remedy to a lack of user control [43,59] and allow heterogeneity of behaviour to be predicted [61].

More recent approaches also extend the boundaries of the system. Darby refers to a system-focused narrative [4], integrating demand-side management with the volatility of renewables and district heating requirements. Buildings can store heat in the building mass and load shift demand, increasing flexibility [13,62,63]. These approaches are thought to integrate the mutual requirements of energy supply, distribution, and demand [64].

However, the question remains about how robust such systems are to heterogeneous comfort practices and spontaneously varying conditions [13,62] and how they cope with short-term adaptation requests [61]. A tension exists between the technological optimisation of building performance based on predicted user behaviour on the one hand and the user's freedom of control on the other. Another tension seems to exist between the homogeneity and uniformity created by many modern building technologies [65,66] or control approaches [13] and the heterogeneity of indoor conditions that is evident in many homes [67,68]. While homogeneity of temperatures could mean higher efficiency, heterogeneity appears to contribute physiologically to positive comfort perceptions [57].

2.3. Literature review and research gap

The aim of this study fits well within a research tradition that looks at how households use SHT, how comfort and heating practices change as a result, and how both affect the energy performance of buildings. Much of this literature focuses on the complexity of comfort practices and the wide variation in the use of SHT.

A key issue is that using SHT in everyday practices often does not match the designers' expected user behaviour. According to Wilson et al. [69], the field is too technology-driven and lacks a clear user-centred vision. Technology's integration into practices is affected by differences in competencies and engagement of individual household members [12], in preferences such as comfort, cost and value [15], and in relationships within and beyond household boundaries [12,70,71]. Occupants must learn to use these technologies and domesticate and adapt them to their needs [72]. And when new technologies challenge existing comfort practices, the unintended consequences of the evolving interactions have potential implications for energy consumption.

The difficulties arising from the need to adapt technologies to the chaotic and varied nature of residents' daily practices [69] are also reflected in what seems to be a paradox: On the one hand, households are often not sufficiently involved through control options and feedback [3], but on the other hand, many people also seem to have little interest in more control or information [44,49], corresponding to low perceived usability [40,73]. Improved feedback can lead to better engagement by supporting residents in their sense-making process [61]. However, it can also shift the focus away from energy consumption by emphasising comfort, health or other aspects [74], which is one reason for the extensive criticism of such technical approaches by Shove and colleagues [75,76].

It has also been shown that SHT can lead to changes in system behaviour due to demand side management, load shifting, and low-temperature heating, which can lead to difficulties in operation, at least for some households: Both Larsen et al. [62] and Miu et al. [61] point out that demand flexibility and load shifting do not necessarily coincide with occupants' routines and that fixed heating schedules increase the likelihood of occupants overriding default settings.

Another common theme is the delayed and slower response of low-temperature systems [61,77] or panel heating systems [13], restricting the ability of occupants to change temperatures at short notice or to rely on the sensation of warmth or feedback from hot radiators. These inertiae in system behaviour might also limit how much can be saved from lowering temperatures during short absences [59]. The above literature suggests that a change in system behaviour due to SHT upgrades may lead to practices being adapted [13], households becoming disengaged [12], or households creating workarounds to maintain their old comfort practices despite the system effects [52]. However, the consequences of the described interactions on energy performance remain a topic that has yet to be sufficiently explored through empirical research.

Overall, the main challenges for the successful use of SHT are evident: They lie in the wide variation in household practices due to the different meanings that households associate with their home [78], the range of previous experiences and knowledge of users [13,77], conflicts about comfort between household members [70], and the various material aspects of the home into which such technologies must be integrated [79].

2.3.1. Research gap

In the above-mentioned studies, several issues repeatedly emerge, which are at least partially addressed in this study. Instead of relying mainly on reported behaviour for isolated cases and metered consumption over relatively restricted periods, this study uses metered indoor temperatures and energy consumption for two complete multi-apartment blocks over two years. Furthermore, the study attempts to systematically integrate technical approaches, comfort practices and

energy savings, looking at the effect on the energy performance of individual households and a building as a whole.

The case study of 137 households also has the advantage of going beyond the often relatively small sample sizes and short observation periods in many studies. The SHT examined in this study was purchased by a housing company and installed in all the apartments of the multi-apartment building. Consequently, the study has no self-selection bias for motivated or tech-savvy households, as we often see in studies where SHT is installed in households recruited explicitly for research. Most studies also tend to focus on homeowners who can carry out the necessary installations. In contrast, this study focuses on tenants in multi-apartment buildings, which are particularly relevant in Germany, where half the population lives in such buildings [80]. Because these buildings are home to people from very different backgrounds, including social housing occupants, people with little income receiving subsidies and middle-income families, there is also no bias regarding technical literacy or motivation to acquire an SHT.

Lastly, this research includes a robust analysis of the material affordance of the SHT under study. While technical literature tends to focus on technical issues such as interoperability, data security or reliability [40], social science literature tends to focus on the meanings and engagements in practices. Here, I look more specifically at the material affordances of the SHT versus the practical affordances of the users, trying to understand what is necessary for the technology to work and what is essential for the occupants to feel comfortable.

2.3.2. Research question and hypothesis

In the following section, I will investigate how households' interaction with an SHT based on multi-zone control and demand-side management affects their heating patterns and heating energy consumption. I will also analyse what this means for the energy performance of the larger building complex. The research aims to understand which aspects of comfort practices correspond to the occurrence of temperature differences. The work is thus directly linked to the developments described above. Firstly, it connects to the frequent observation of highly variable indoor temperatures within dwellings [67,68,81,82]. Secondly, based on the observed trend towards more homogeneous indoor temperatures in modern buildings [51,57,65], which is presumably also supported by certain features of SHT [13], this research addresses the question of to what extent these more homogeneous indoor temperatures could be rejected by households proactively seeking differences in temperatures.

This study investigates the hypothesis that the interplay between the homogeneity of thermal conditions created by modern building technologies and the heterogeneity created by certain comfort practices leads to problems in energy performance. It does so by comparing occupants' comfort practices with the material affordances of an SHT in a well-insulated building and those of technologies in the conventional building stock in Germany.

3. Methods and data

3.1. Description of the case study

In 2020, 137 households moved into two newly constructed multi-apartment buildings equipped with a new, not yet fully commercialised, SHT. During the last decade, this SHT has been developed in a collaboration between a University and a metering company for heat cost allocation. In a transdisciplinary research project, a living lab was set up for the first real-life test of the technology to prove its successful application and trigger learning processes and innovation. Heating energy consumption data from two almost identical buildings in the same neighbourhood and with the same construction but only 124 residential units serve as a reference value for energy savings. In this project, the task of the social scientists was to analyse interactions between occupants and technologies, their effects on energy consumption and trigger co-production with occupants. The housing association's main interest

was to assess the savings in heating energy consumption and to evaluate the effort and cost involved in implementing a state-of-the-art SHT as it looks for cost-effective ways and innovative approaches to improve the energy performance of its building stock. Since its first implementation in 2020, this technology has been installed in >500 apartments of different housing associations across Germany.

All four buildings provide a mix of social housing, subsidised housing for middle-income families, and regular rentals, as is typical of large housing projects in this municipality. The tenants learned about their heating system only after moving in, so the study has no problems with the self-selection of motivated or technology-savvy residents. Still, by signing rental contracts, all tenants agreed for the monitoring data to be analysed. The case study buildings with their high-efficiency level (51.4 kWh/m²a final heating energy demand according to the Energy Saving Ordinance [83]), while certainly not representative of the total German building stock, serve as a critical case [84] because demand-side management and load shifting should work even better in such buildings than in the majority of the building stock.

To serve as a reference case and better understand typical comfort practices in conventional multi-apartment buildings – more representative of the German building stock – the study includes the analysis of a larger sample of 251 households. These households live in buildings with relatively low insulation, gas or oil-based heating systems and classical radiators with thermostatic radiator valves (TRVs). All data sources are described in more detail below.

The operation of the analysed SHT (see Fig. 1 for a schematic diagram) corresponds to the general description of SHT given above. The technology thus combines two mechanisms: An individual room control (multi-zone control) and a connected and demand-driven regulation of the central heating unit, which correspond to the user-centred control logic and the system-centred automation logic, respectively. These features make it a typical case of SHT as studied by other authors [3,4,8,14,64,85].

Because the technology under study is an emerging technology that has not yet reached market maturity, an advantage of this living lab research project is the possibility of opening the black box of the SHT and revealing its underlying assumptions and mechanisms [86,87].

3.2. Data sources and data analysis

The analysis is based on a mixed-methods case study design [88], using quantitative and qualitative data to understand the different elements of comfort practices and material arrangements. Furthermore, informed by a socio-technical research design from Love and Cooper [89], the analysis is based on a combination of technical as well as social data and methods. It uses models on heat regulation, building physics and social behaviour, as well as data from technical devices, surveys and interviews (Table 1).

The data is first evaluated using an inductive approach, i.e., it aims to identify fundamental mechanisms of friction between material and practical affordances corresponding to higher heating energy consumption. Regression analysis is then used to systematically test the effect of temperature variations on heating energy consumption. The primary data sources are:

- i. Survey data: In the spring of 2022, a survey with 30 participants (response rate of 21.9 %) in the case study buildings was conducted to analyse comfort practices with the new heating technology. The same survey questions were answered by 18 households (response rate of 14.5 %) of the two identical reference buildings with conventional heating technology. A secondary analysis of a sub-sample of a survey with 251 households is used to compare comfort practices in conventional buildings (low insulation, gas or oil-based heating and radiators). The total survey of 485 households (response rate of 8.1 %) was carried out in different building types 12/2021–01/2022, using a slightly

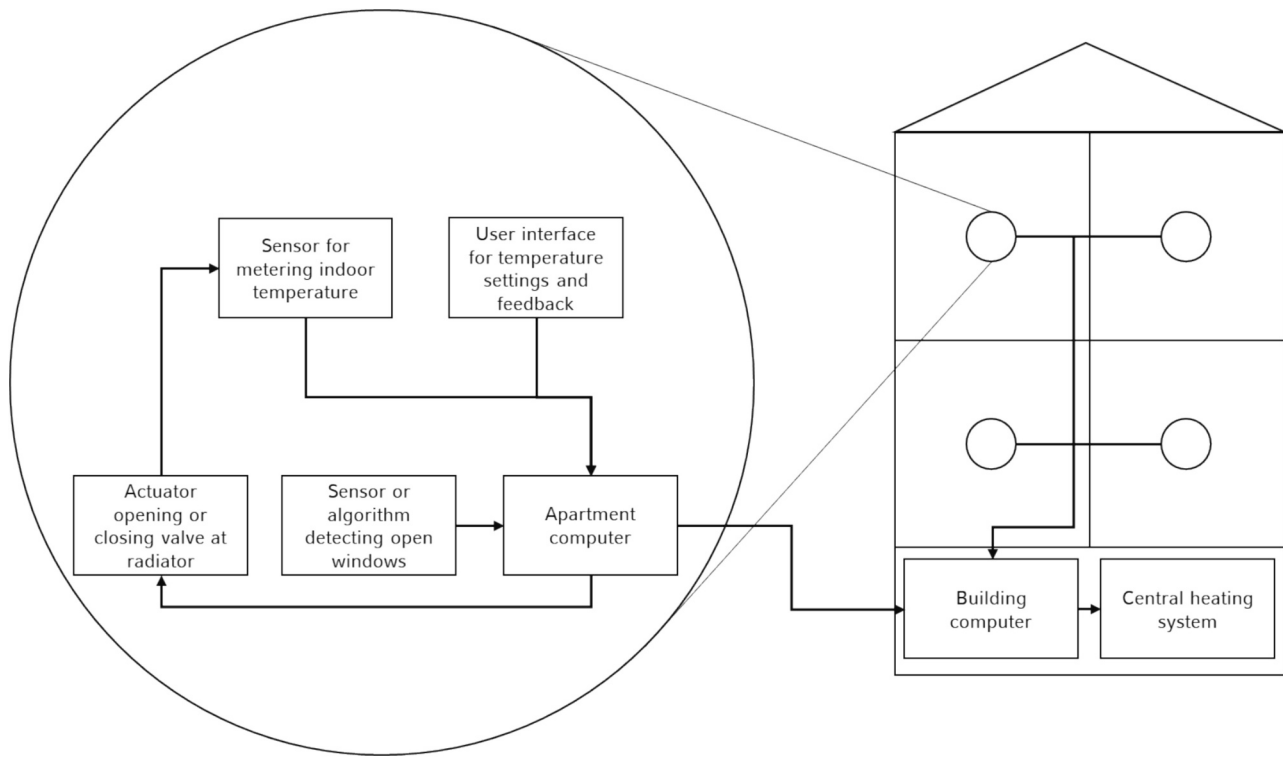


Fig. 1. Illustration of the Smart Home Technology combining features for occupant control and demand-side management.

more extensive questionnaire. Of the 485 households, 132 also agreed to have their indoor temperatures monitored in living and sleeping rooms for four weeks, giving a more detailed picture of differences in indoor temperatures in a varied building stock. All surveys included questions about demographics and household characteristics, typical behaviour related to heating energy consumption, patterns of heating regulation, and comfort preferences. The data was analysed descriptively and combined with measurement and qualitative data to identify typical cases that show the range of possible interactions between different comfort practices and the SHT, resulting in distinctive temperature and energy use patterns.

- ii. Measurement data: Indoor temperatures, setpoints and heating consumption have been collected for all 137 households equipped with the SHT for the winter seasons 11/2021–02/2022 and 11/2022–02/2023. As there have been problems with the familiarisation and commissioning of the building technologies during the introductory phase of the technology, data from the first heating period is not used. For most analyses, I use the monitoring data from the heating season 2021/22 to ensure a close temporal correspondence with the survey. I use the 2022/23 data with complete information available for 122 households for the regression analysis. In the 2021/22 season, full information is only available for 102 households, and there were still problems with defective components in several households that only had been resolved afterwards.² Measurements are conducted by the SHT every 10 min and then directly aggregated to the hour by taking average values.

This data is used to analyse the 'behaviour' of the technology as well as households' behaviour. Two indicators are used to depict temperature variations within apartments – one for differences between rooms and one for variations during the day. The

indicators have been calculated by taking the average values of the measured daily temperature differences within apartments. All variables for the regression analysis refer to the apartment level. Some descriptive statistics of the independent variables of the regression models are shown in Table 2.

- iii. Qualitative data: During the project, I conducted several expert interviews: With housing associations, experts in the field of SHT, and developers of the SHT in this study. I recorded their expectations and experiences with different building technologies to better understand the SHT analysed in this study. These data were coded based on qualitative content analysis [90]. Another data source for examining the SHT and understanding the motivations, assumptions and challenges of implementing this SHT was operating instructions or notes on internal communications. Furthermore, observational and personal communication data has been collected, including notes from over 30 home visits, accompanying tradespeople when they visited households with heating problems, or from email and telephone contacts with various project stakeholders, including residents.

As is typical of case studies and ethnographic research, I used different approaches to collect data on the residents' practices and their interactions with the SHT. The challenge with the qualitative data is that it is inherently more diverse and less standardised than survey or measurement data. In this study, I use the qualitative data mainly to cross-validate and support the analysis based on the measurement and survey data. Particularly in interesting cases, such as the in-depth stories reported below, the interpretations based on the measurement data and the links between statements on individual items were checked by observations made for the same or similar households. The qualitative data thus particularly helped in the first step to discover interesting patterns and relationships between the SHT and different aspects of comfort practices. Then, the data has been used to deepen the understanding of the survey and measurement data findings. The various data sources are triangulated, i.e. they are used to substantiate each other and ensure validity [88]. The combination of measurement, survey, interview and

² Although the year 2022/23 was exceptional due to the energy crisis in Europe, it did not affect the results of the study (see chapter 6.2 Limitations).

Table 1
Data sources.

	Case study (energy-efficient with SHT)	Reference buildings (energy-efficient with TRVs)	Conventional buildings (energy-inefficient with TRVs)
Heating energy consumption 2021/22	51,9 kWh/m ² a for space heating (measured)	53,5 kWh/m ² a for space heating (measured)	129 kWh/m ² for space heating (self-reported)
Buildings & building technologies	Two multi- apartment buildings, high- efficiency standard, district heat, wall- mounted radiator panels, multi-zone control and demand-side management	Two multi- apartment buildings, energy- efficient, district heat, wall- mounted radiator panels, conventional thermostatic radiator valves	Multi-apartment buildings, relatively low- efficiency standard, gas heating, wall- mounted radiator panels, conventional thermostatic radiator valves
Households	137 households	124 households	ca. 6000 households
Survey and interview data	Survey: 30 households (response rate: 21.9 %) Notes from field observations (30+ home visits + telephone calls + emails) Expert interviews with stakeholders	Survey: 18 households (response rate: 14.5 %)	Survey: 485 households (response rate: 8.1 %) Only a subsample of 253 households in buildings as described above was used.
Measurement data	06/2021–05/ 2023: Monthly energy consumption for space heating on apartment level; hourly indoor temperatures, setpoints and radiator temperatures on room level for all apartments (with gaps)	06/2021–05/ 2023: Monthly energy consumption for space heating on building level	12/2021–01/2022: Hourly indoor temperature measurements in living rooms and bedrooms of 108 households

Table 2
Descriptive statistics for independent variables in regression models for the
heating period 2022/23.

	Mean	Min	Max	SD	n
Heating energy consumption Nov-Feb [kWh/m ²]	32.3	0	99.5	20.9	122
Flatsize [m ²]	72.6	43.0	140.5	22.9	122
Outside area [m ²]	79.8	27.8	267.2	48.3	122
Avg. apartment temperature Nov-Feb [°C]	20.8	13.9	25.6	1.7	122
Avg. diurnal temperature difference within the apartment Nov-Feb [°C]	3.1	1.2	5.6	0.9	122
Avg. temperature difference between rooms Nov-Feb [°C]	3.1	1.2	9.6	1.4	122

observational data helps to get a detailed picture of the differences between ideas about occupants as inscribed into technologies [35] and actual user behaviour shaped by past and current comfort practices and material settings.

4. Results

The following section describes how interactions between comfort practices and SHT affect energy consumption for space heating. The

chapter is divided into six parts. 1) A short analysis of the energy savings on the building level is provided. 2) The characteristics of the material setting of conventional building technologies are briefly reviewed. 3) The material affordances of the SHT are compared to the ones of conventional buildings. 4) Typical patterns of comfort practices, as we see them in conventional energy-inefficient buildings, are discussed. 5) In-depth stories from the case study are presented to illustrate the range of possible interactions between comfort practices and the SHT. 6) Regression modelling is used to analyse the overall impact of the interaction effects between SHT and varying temperature patterns on heating energy consumption.

4.1. Energy consumption in buildings with/without SHT

Two buildings with 137 residential units were equipped with the SHT described above in December 2020. After most of the initial problems had been solved, the average climate-adjusted energy consumption for space heating in the following 2021/22 season amounted to 51.9 kWh/m²a. In contrast, the climate-adjusted heating energy consumption in the two reference buildings with a conventional heating control system (TRVs) was 53.5 kWh/m²a. Compared to the reference buildings, this translates into savings of approximately 6 %. Compared to the final energy demand for space heating stated in the energy performance certificate for the smart building (51.4 kWh/m²a), an EPG of 1 % is observed. Thus, the building consumed about as much energy as predicted by design.³ In the second season, 2022/23, the climate-adjusted heating energy consumption fell to 39.5 kWh/m²a (EPG of −13.7 %).

The substantial reduction in energy consumption in 2022/23 can be attributed to the energy price crisis caused by Russia's invasion of Ukraine. Due to a temporary sharp increase in energy prices and the resulting uncertainty, households across Germany cut back sharply on their heating consumption for a few months [91]. Interestingly, the difference between the case study and reference buildings remained relatively constant at −7 %. This temporary effect does not affect the remaining analysis in this study.⁴ In summary, despite stable savings of about 7 %, the performance of the SHT has fallen short of expectations.

4.2. Understanding the material of energy-inefficient buildings

Before analysing the interplay between SHT and comfort practices to explain the relatively low savings, it is essential to consider the case of energy-inefficient buildings first. I argue that it is the setting of energy-inefficient buildings – i.e. a material context of low insulation, high flow temperatures and manual control options – in which habits and routines of achieving comfort evolved. In energy-inefficient buildings, these practices result in heterogeneous and fluctuating temperatures. They also contribute to prebound effects, which are the opposite of energy performance gaps, namely lower heating energy consumption than expected from design predictions [20]. In contrast, in energy-efficient buildings equipped with SHT, issues arise because established comfort practices often remain unchanged, even though the material setting requires adjustments in behaviour.

Most residential buildings throughout Germany have been heated in the last decades with gas and oil-based heating systems [19], with

³ However, the SHT was not considered within the energy demand prediction according to the Energy Performance of Building Directive, which is principally possible and would further reduce the predicted energy demand and thereby lead to a larger energy performance gap. Furthermore, heating consumption for hot water, which is not considered in this paper, amounts to about 40 kWh/m²a in the case study buildings, which is much more than the calculated 22.5 kWh/m²a. Because a large part of the hot water consumption can be considered dissipation losses and, therefore, internal heat gains, actual heating energy demand should be further decreased.

⁴ For further discussion see Chapter 6.2 Limitations.

radiators that could easily reach 60–70 °C and then emit about half of the heat through radiation [92]. Occupants could regulate the temperature using thermostatic radiator valves (TRVs), showing numbers from one to five, with one step representing a temperature difference of 4°. Their designers constructed TRVs to show numbers instead of temperatures because the same setting can correspond to different air temperatures depending on context and because air temperatures are not the same as perceived temperatures [93,94]. Although TRVs will keep temperatures constant when kept in the same setting, a minimal adjustment can result in significant temperature jumps and increased heating activity. Occupants can then use radiators as a stable source of warmth within a room when turning up TRVs a little bit higher for some time, a behaviour Revell and Stanton [95] describe as the timer theory of thermostat use. Generally, heating systems with high flow temperatures are required to compensate for heat loss in buildings with low insulation and high heating demand, which is the case for the majority of German buildings [18,96]. Conversely, indoor temperatures will cool down relatively fast when occupants turn the heating down in such buildings. Therefore, it seems natural to change thermostat settings regularly: Keep them low in unoccupied rooms and only heat rooms when needed to avoid high heating bills. However, such a practice also favours relatively substantial temperature differences in time and space.

These findings about comfort practices, as we find them in the majority of the German building stock, are confirmed by the temperatures that have been monitored in energy-inefficient buildings as part of this study: Table 3a shows substantial spatiotemporal variations in indoor temperatures within apartments, with bedrooms being on average 5 °C cooler than living rooms with some differences during the day. The standard deviations of temperatures between apartments also provide evidence of considerable household variations.

4.3. Understanding the material of energy-efficient buildings with SHT

SHT in highly energy-efficient buildings changes the material setting for comfort practices described above in many ways.

4.3.1. Material affordances of SHT

With their SHT, occupants choose setpoint temperatures in the case

Table 3

a (on the left): Measured indoor temperatures in living rooms and bedrooms (mean and standard deviation (SD)) from temperature loggers in the broader household survey ($n = 109$) and b (on the right): setpoints and indoor temperatures in living rooms and bedrooms in the case study ($n = 137$).

	Conventionally heated buildings (Energy-inefficient buildings)			Case study (Energy-efficient buildings with SHT)	
	Living room	Bedroom		Living room	Bedroom
Avg. Indoor temperature [°C]	20.69	16.43	Avg. Indoor temperature [°C]	21.86	20.74
Avg. SD of diurnal indoor temperatures within rooms [°C]	1,15	1,23	Avg. SD of diurnal indoor temperatures within rooms [°C]	1,41	1,39
SD of indoor temperatures between apartments [°C]	1.76	1.15	SD of indoor temperatures between apartments [°C]	1.40	1.70
			Avg. Setpoint daytime [°C]	19.19	16.48
			SD setpoint daytime between apartments [°C]	3.42	3.06
n	106	109	n	123	123

study for each room via an in-home display. This multi-zone control is intended to improve occupant control and reduce what designers consider inaccurate system use, such as repeatedly adjusting settings to increase or lower indoor temperatures and using heating controls like water valves to control heat intensity [97]. The system compares each room's constantly monitored indoor temperature with its setpoint temperature. When occupants choose setpoints between 19 and 25 degrees – which is in the usually expected range for indoor comfort [98] – the system can ensure through demand-side management that all available heating surfaces are used to maintain indoor temperatures, avoiding situations where only some radiators heat large areas while others are turned off completely. By maximising heating surfaces, demand-side control can lower flow temperatures and, as a consequence, reduce dissipation losses and internal heat shifts. This makes the system more akin to a low-temperature heating system (e.g. underfloor heating), which facilitates the integration of renewable energy sources, low-temperature district heat or the electrification of the heating systems via heat pumps.

One of the developers accordingly described the system's main effect as follows:

“The user sets a setpoint (desired temperature), and the control then allocates heating intervals according to this setting. This is the purpose and predetermined physics of low-temperature heating control. (...) The fact that the radiators do not reach the full flow temperature (Average heating temperature around 45°C) due to short intermittent heating cycles is a sign of good optimisation and energy output with radiators that heat up as little as possible.”

(Technology Developer 1)

Fig. 2 shows the typical behaviour of the system. It depicts the intermittent heating cycle with heating temperatures that, for most of the time, stay below 40 °C (35.2 °C on average in heating mode). Consequently, occupants can no longer use radiators as a stable source of warmth within a room as they were used to in conventional buildings. According to a technology developer, this “*lack of radiant heat is a known side effect of the smart home technology*” (Technology Developer 2). Particularly in the period after moving in, many occupants noticed that they missed the feeling of a hot radiator. Another developer regularly mentioned the “*common perception problems*” (Technology Developer 1), where occupants confuse the desire for a warm room with the desire for a warm radiator. While the SHT designers see only the former as a system purpose, many residents, especially at the beginning of the project, seemed to expect the latter as well. Presented with the item “I find it important to be able to feel the warmth of the radiators directly”, 8 of 26 occupants (31 %) in the case study buildings tended to agree (4 or 5 on a 5-point Likert scale), while in the survey of households within conventional buildings, almost 60 % tended to agree with this question. This indicates that a considerable share of the occupants value the warmth or cosiness felt from a noticeable heat source within a room, in line with the findings of Devine-Wright et al. [99]. The differences between the surveys could also be evidence that such valuations might change when material elements change, but this may not apply equally to all households.

Another effect of reduced heating temperatures is the system's reduced and delayed response to setpoint changes. Because of the slow reaction speed and because the “[system] regulation decides for itself and energy-saving reasons also quite slowly, when and how often additional heating is required” (Technology Developer 1), occupants are left with little short-term control to adjust indoor conditions. As one occupant commented in the survey: “(...) the system works very well. You just have to know that if you set the temperature higher, it takes a while!”

From the designers' point of view, occupants should have little reason to interact with the heating system once they have found their preferred settings. Because of low temperatures and intermittent heating, radiators fall out as a predictable source of heat over which occupants have control. The reduced reaction to setpoint changes and

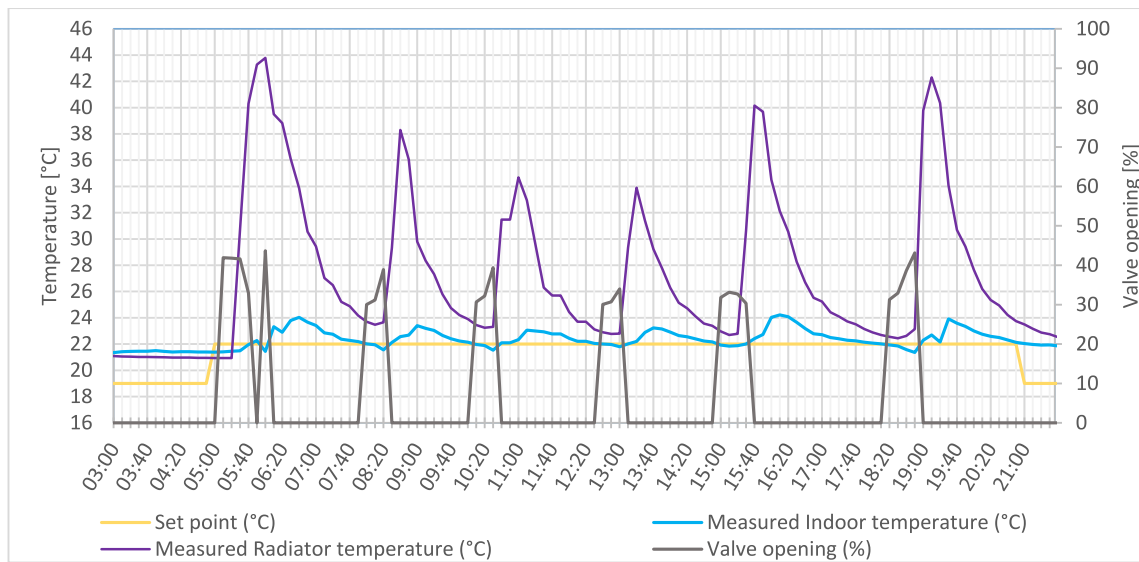


Fig. 2. Typical view of the monitoring for one room, showing setpoints, metered room and radiator temperatures, and valve opening.

prolonged preheating periods is also typical for low-temperature heating systems [61]. It also limits the use of temperature setbacks when rooms are unoccupied for shorter times. In contrast, occupants expecting the radiator to heat a room quickly when turning up the setpoints will be disappointed, leading some to complain heavily after moving in.

4.3.2. Problems with measured air temperatures

Another issue related to the lack of control over radiators is that perceived and air temperatures are not the same but differ depending on the context [100]. Research has shown that air temperatures are only a good indicator of perceived temperature if there are no radiant asymmetries from colder or warmer surfaces [94,101]. Thus, rooms must be heated evenly, and the thermal mass must be kept close to the desired temperature to ensure that the perceived temperatures correspond to the measured air temperatures. In contrast, if rooms have been cooled down a lot, air temperatures measured shortly after a heating cycle are not a good indicator for perceived temperatures.

However, as Fig. 2 shows, indoor air temperatures are the sole control parameter for the SHT. Therefore, occupants and technical staff may be tempted to judge indoor conditions based on this information alone. There were several instances where technical staff and occupants argued about whether rooms were well heated, with both sides referring to temperatures as evidence for their arguments. In an email forwarded by a housing representative to a technical project employee, an occupant complained about the heating not working correctly: “The radiators can definitely not be controlled manually; they do what they want; we have no control over the radiators! It’s bitterly cold in some rooms and warm in others! It can’t go on like this!” (Occupant 1) A technical staff member provided a list of average room temperatures from the monitoring, explaining to the housing representative: “Here are the current room temperatures as a snapshot. The temperature in the apartment is very high, about 23°C on average. It is possible that the temperature in the bathroom and bedroom (attached) appears virtually and temporarily a little too high because the radiators may be somewhat blocked (covered with textiles or blocked with furniture). The corridor cannot quickly cool down to 21°C in such a highly insulated building when 4/5 of the other rooms are conditioned to >23°C. The apartment is warm, just as the occupants have requested.” This quote shows that it can be tempting, even for technically educated staff, to only look at air temperatures, neglecting other possible sources of concern, such as radiant asymmetries or a lack of sensory feedback from radiators. The quote also highlights the potential for other sources of error to influence the accuracy of temperature measurements. These may include misaligned or obstructed measuring devices, demonstrating

the need for a certain level of technical expertise to identify such sources of error. Such subtleties of the sense-making process in the use of environmental parameters have also been well illustrated before [74]. In this study, conflicts regarding the accuracy of the recorded room temperatures appeared regularly. While the technical staff usually advised occupants to leave setpoints at higher levels when feeling too cold, many were reluctant to do so for fear of high heating expenses and expecting the shown temperatures to reflect actual thermal indoor conditions.

4.3.3. Heating patterns in buildings with SHT

The analysis of the monitoring data shows that indoor temperatures are, on average, much more homogeneous, with minor differences between living rooms and bedrooms, in the case study buildings (Table 3b) compared to the energy-inefficient buildings (Table 3a). SHT, in combination with insulation, leads to harmonising indoor temperatures despite multi-zone control. Load-shifting demand and strong insulation ($U = 0,43$) work well together. However, the standard deviation of average temperatures over households, particularly in bedrooms, and the differences between average setpoints and average measured temperatures (Table 3b) is the first indication that not all households necessarily welcome homogeneous heating patterns. Instead, this pattern suggests that occupants value and act towards differences in thermal conditions, which is consistent with previous research [67,68,81].

In summary, the analysis shows that the SHT does not support short-term changes to indoor conditions. Instead, the system smoothes indoor temperatures and the heat stored in the thermal mass, consistent with the insulation of the building envelope and the idea of demand-side management.

The system behaviour also aligns with the concept of smart grid integration, which involves smoothing the heating supply, cutting peak loads, and shifting heating loads. For occupants, the consequence is a trade-off between the efficiency gained from smoothing the heating supply and the possibility of spontaneously adjusting the indoor environment on demand.

4.4. Understanding comfort practices in energy-inefficient vs. smart buildings

Having analysed the material aspect of the SHT and its tendency to favour uniformity of indoor conditions, the next step is to investigate how certain aspects of comfort practices that have evolved in the conventional building stock lead occupants to expect variety in thermal

indoor conditions.

From self-reported assessments (Fig. 3), we see that about three-fourths of all respondents in the energy-inefficient buildings at least partly agree with the statement that they appreciate different temperatures between rooms. Even though the share in the case study buildings is lower, it is still almost half of all households. This finding also suggests that the homogeneous indoor patterns observed above could result from the homogenisation of indoor temperatures not intentionally brought about by occupants. Looking at subjective perceptions of differences, occupants in the survey of energy-inefficient buildings tend to agree more often that there are differences in indoor temperatures between rooms and that temperatures fluctuate within the apartment throughout the day. However, many occupants also experience such differences in the case study buildings. Regarding the overall indoor climate, the groups' approval rates do not differ considerably.

When it comes to the assessment of the heating system, the approval rates show that, on average, after a year of living with the SHT, occupants seem to handle the technology quite well and do not seem to have any more problems with the SHT than other people have with the conventional systems.

In conclusion, the less-than-expected energy savings do not seem to be due to general issues in user experience. In contrast, occupants appear to be satisfied with the new heating technology and the indoor conditions it provides. As shown below, this does not mean that some households experience problems.

4.4.1. Thermal variety with conventional heating

I identify three typical patterns of comfort practices that favour differences in thermal indoor conditions. First, occupants have typical ideas (mental models [95]) about how to use building controls to save energy, which, coming from energy-inefficient buildings, favour

variations in indoor conditions. Second, and related to the first point, occupants expect fast feedback when interacting with building controls such as the heating system. These interactions intensify short and long-term differences within apartments. Third, some ventilation and cooling habits might be less problematic in older buildings than in newer ones.

From living in conventional buildings with insufficient insulation and high flow temperatures, most occupants are used to turning the heating on and off to manage heating consumption and costs. In their subjective assessment, about three-fourths of the households in the energy-inefficient buildings at least partly agree that their buildings need much energy for heating (Fig. 4), which corresponds to an average self-reported energy consumption for space heating of 129 kWh/m²a (SD: 71 kWh/m²a). Still, the same share of households is at least partly convinced that they have effective control over their heating energy consumption.

The other statements in Fig. 4 show why this might be the case and how occupants typically take control of their heating consumption. 64 % report turning the heating off in unused rooms, and 80 % turn the heating down at night. This is supported by their ideas about how the heating works and how best to save energy: 50 % agree that keeping the heating at low levels and turning it up when feeling cold only will save most energy. Turning the heating down will not have negative consequences on thermal comfort only when occupants can expect vice versa fast feedback from their systems when feeling cold. Accordingly, 46 % of the occupants believe that turning the TRV to a higher setting will heat rooms faster, a belief that Goodhew et al. [102] called the warmer-faster model of heating.

Another indicator of residents being used to changing indoor thermal conditions on the fly with fast feedback expected is their typical reaction when feeling cold and hot (Fig. 5). While 41 % of the residents in conventional buildings report putting on something warmer as their

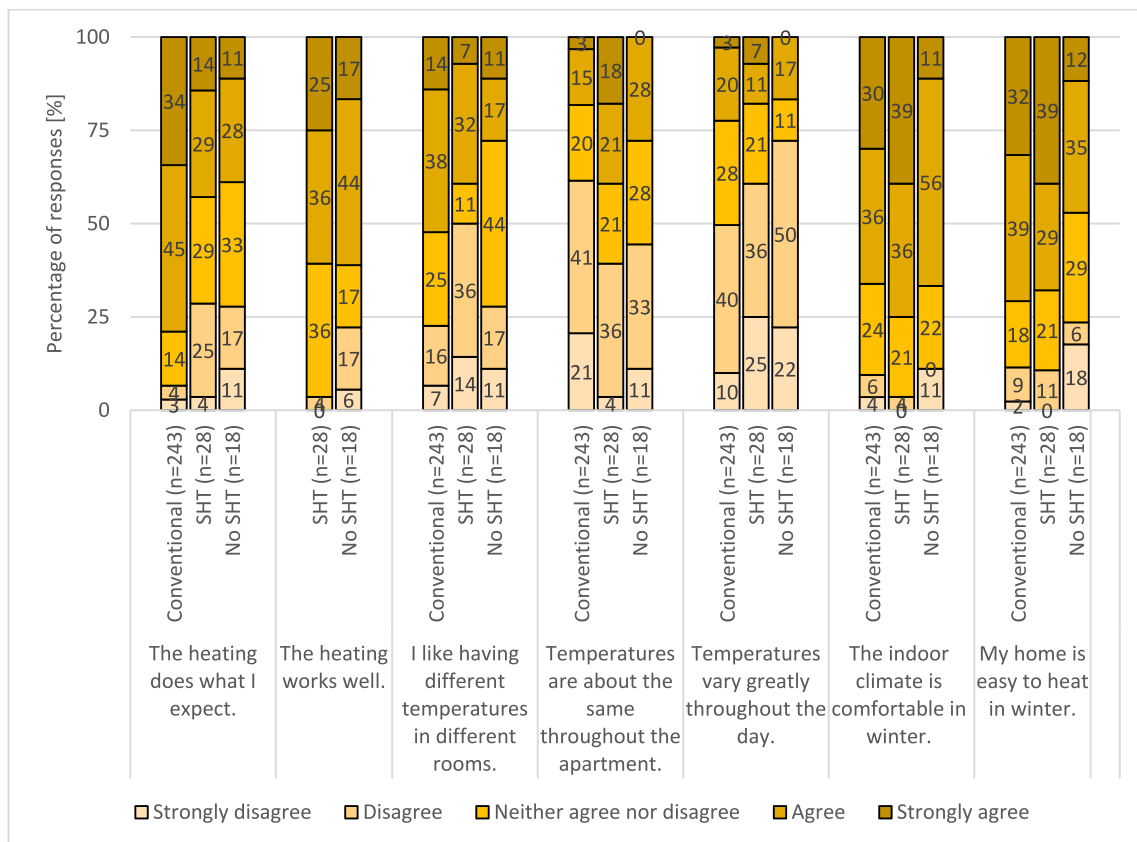


Fig. 3. Subjective assessments of the experiences with heating systems in energy-inefficient buildings (Conventional), in the energy-efficient case study buildings with SHT (SHT) and the energy-efficient reference buildings without SHT (no SHT).

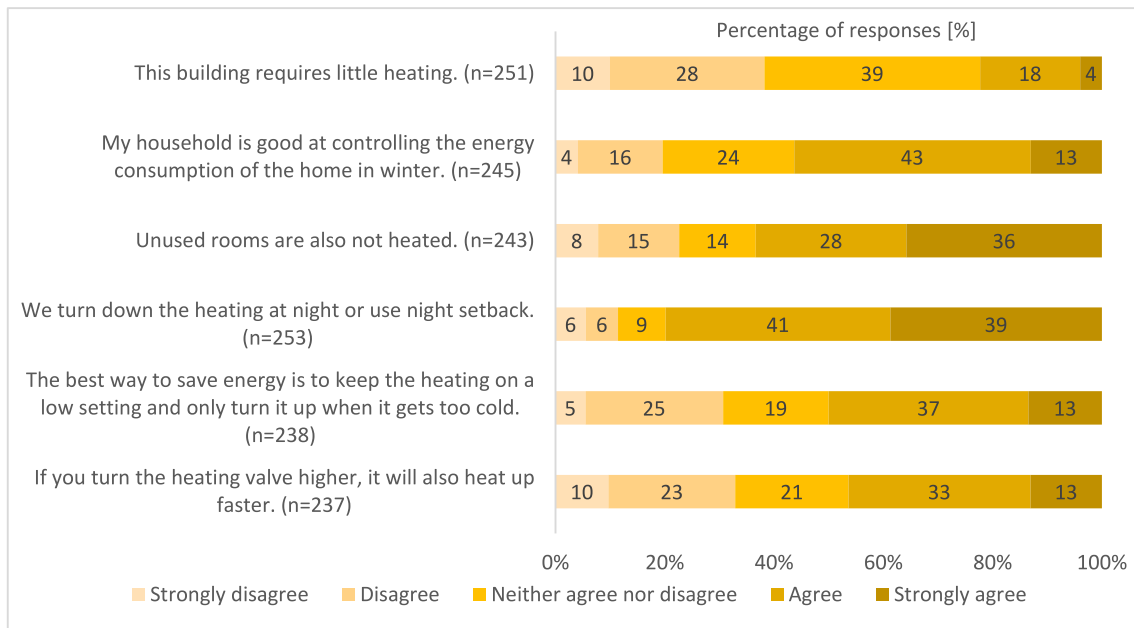


Fig. 4. Ideas about using building controls to save energy (Mental models of heating) in energy-inefficient buildings.

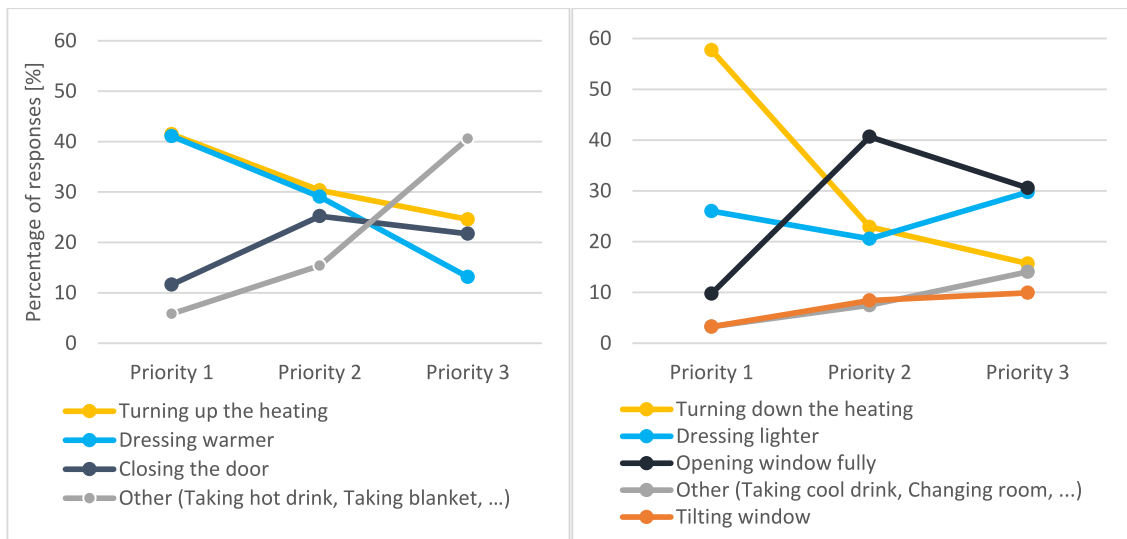


Fig. 5. a (Left side): Self-reported predominant reaction when feeling too cold ($n = 258$) and b (Right side): when feeling too warm ($n = 246$) in energy-inefficient buildings.

preferred action when feeling cold, another 41 % prioritise turning the heating on. Only 17 % of the respondents opt for another first reaction, such as closing the door, taking a blanket, or preparing a hot water bottle. Keeping the TRV setting low most of the time and turning it up only when a room needs to be warmed will only work with heaters that heat up fast and can raise the indoor temperature quickly. Although this is not the use of TRVs as intended by their designers, Kempton [97] has shown that using radiators like water valves can save energy compared to keeping them in the same setting all the time. Comfort can be achieved by feedback from hot radiators without having to raise the whole building mass to the preferred indoor temperature level. People often expect this rapid feedback when they turn up radiators when they feel cold. The equivalent response is for an occupant to open the window when they feel warm. Although this increases energy consumption, it is not an atypical reaction. It supports the argument that occupants are used to expecting fast feedback when interacting with building controls.

Self-reported thermostat settings (Fig. 6) illustrate what occupants specifically mean when they report adjusting the heating, whether by increasing or decreasing it, or by maintaining different settings across rooms. About half of the occupants report keeping their thermostats at the same level almost all the time but with different settings in different rooms. The other half reports different levels at different times and in different rooms. They also change settings in the living room during the night and when occupants are present during the day. This corresponds to the temperature differences observed in Table 2a.

Keeping doors closed is one important strategy to avoid wasting energy in differently heated apartments. From the measured (Table 2b) and reported (Fig. 7) differences between rooms, we can see that most occupants seem to have internalised this idea, with the largest share of households keeping doors to little heated bedrooms and well-heated living rooms closed. In sparsely insulated buildings, the resulting differences in indoor temperatures will also be a constant reminder to close

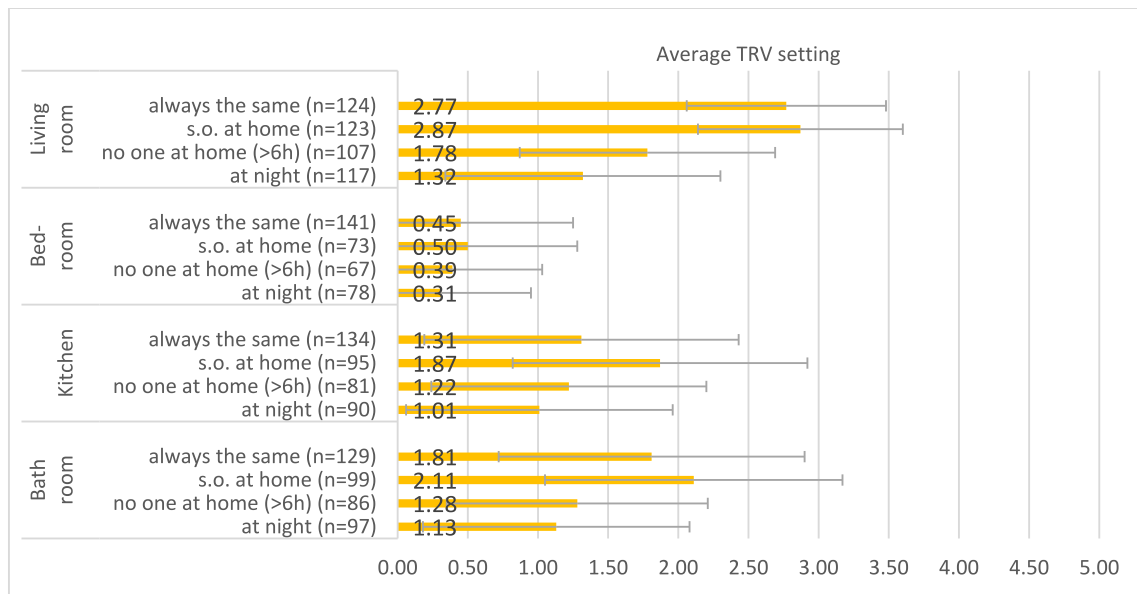


Fig. 6. Means of thermostatic radiator valve (TRV) settings (Bars) by room and occupancy pattern in energy-inefficient buildings. Distribution across households in standard deviations (Lines).

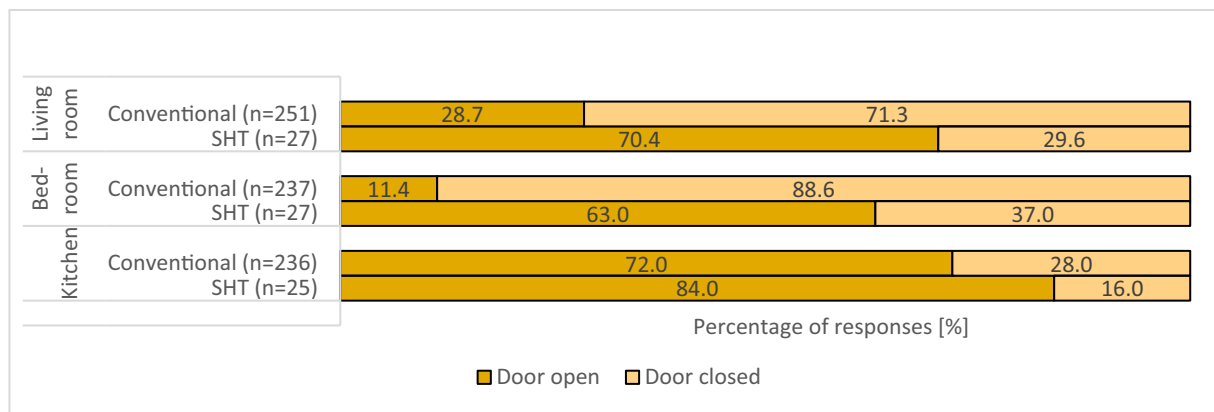


Fig. 7. Percent of self-reported door opening behaviour in energy-inefficient buildings vs case study buildings with SHT.

doors.

Keeping temperatures low and only heat when needed seems a practice so widespread that many representatives of housing companies in my interviews complained about their tenants turning the heating down too far, thereby increasing the risk of damaging the building through moisture and mould: *“The urge to save energy often leads people to heat their homes incorrectly. So in the belief of saving energy, the heaters are turned off, or entire rooms are not heated.”* (Housing representative 11).

However, the belief that energy can be saved by keeping rooms principally at different temperatures and low temperatures in times of non-use is firmly institutionalised and permanently reproduced in almost any energy-saving advice. On the website of the German Environment Agency [103], for example, it is recommended that heating be turned down and different temperatures maintained to save energy. According to them, the temperature in living and workrooms can be lowered by 4 to 5° at night. Similar energy-saving advice can not only be found on most German public websites, such as the most widely known German Consumer’s Association [104], but also internationally [105]: *“Make sure your heating is only on when you need it. A timer or programmer lets you set what time your central heating is on. You can save energy by setting your heating to only be on when you need it.”* Suggestions such as keeping bedrooms at lower temperatures (16–18 °C) [106] serve

residents as an anchor and rationale for what is reasonable to do, and it can indeed save energy in old buildings.

While in conventional buildings, energy saving is an important reason to keep thermostats in bedrooms or unoccupied rooms low, over time, different thermal conditions can also become valued for themselves. Particularly for sleeping, many occupants mentioned that they sleep better if the room is cold and, therefore, have their windows tilted. Thus, they are not only concerned about indoor air quality – a worry that might be relatively unfounded, particularly in older buildings where windows and facades are not tightly sealed – but like it cold. Keeping windows tilted seems widespread in old buildings, with more than half of all respondents saying that they prefer to sleep with tilted windows even during cold weather in winter. Moreover, of all multi-person households, >60 % of the respondents stated that someone in their household usually sleeps with an open or tilted window (Fig. 8). Although tilting windows at night will increase energy consumption, e.g. by increasing internal heat shifts [107], the impact may be less if these rooms are also not heated during the day, doors are kept closed at all times, and other rooms are only heated up when occupied.

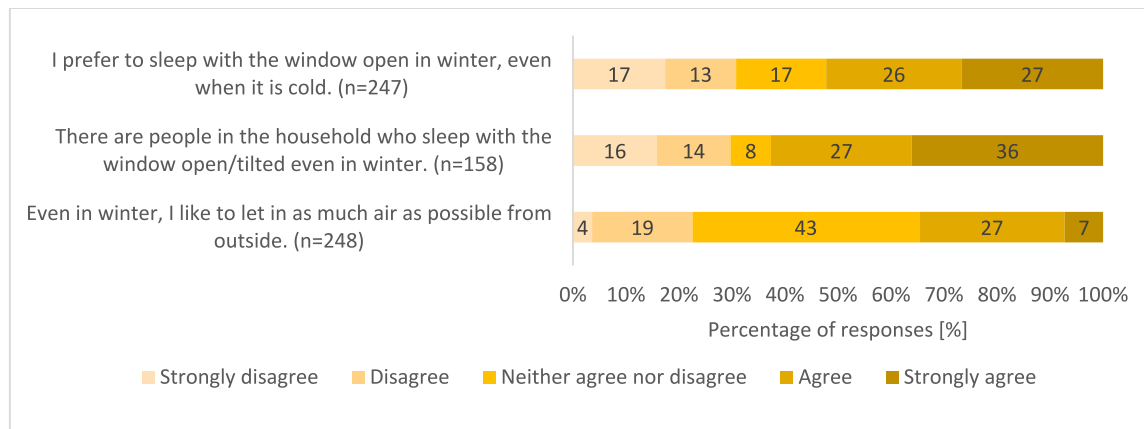


Fig. 8. Self-reported window opening practices and preferences for air exchange in energy-inefficient buildings.

4.5. Thermal variety and SHT – in-depth stories

So far, it has been shown that acquired routines and habits in the material setting of older, gas- and oil-heated and less-insulated buildings lead many occupants to expect variations in indoor temperatures within their homes. Furthermore, people are likely to associate this temperature variety with energy savings. These different comfort practices, on average, seemed to have worked quite well in the material settings of older buildings. The associated energy savings are indicated by the preboud effects [108].

In contrast, the following analysis shows that interaction problems can occur if these comfort practices are transferred to buildings with demand-side management and high insulation, leading to a homogenisation of thermal indoor conditions. While most households' comfort practices seem to align well with the material arrangements, some households retain their old practices in the new material settings, unaware of the consequences for energy consumption.

The following in-depth depiction of four smart building households shows the range of possible scenarios. I first show two households where comfort practices and material affordances seem to correspond well. Table 4 shows key indicators such as specific heating energy consumption or average indoor temperature for all four households.

4.5.1. Household A – thermal uniformity at a high level

A first example of a household whose comfort practices seem to match the building technologies quite well is Household A, a one-person household in a 43 m² one-room apartment located in the middle of the building and surrounded by other apartments. A distinctive characteristic of this household is the presence of tropical animals, which, according to the tenant, need constant temperatures around 22 °C day and night. Therefore, the resident had the smart home provider deactivate the night setback in her apartment, which would have lowered the setpoints in all rooms by 3°. Although she thinks the SHT is modern in a positive way, the most important thing for her is that the heating works.

During a visit in the autumn of 2022, the in-home display had been placed behind a shelf and some decorations, which suggests that she does not change the settings very often. Fig. 9 shows the heating pattern for four days. Temperatures remain relatively stable, with setpoint changes mainly resulting from the system detecting open windows and switching to frost protection. Over the heating period, indoor temperatures average around 22.5 °C.

From the designers' perspective, this heating control behaviour is desirable except for the missing night setback: The occupant has found her preferred temperature and interacted little with the system afterwards. The monitoring data show that the energy consumption is similar to that of the average household. However, the average indoor temperature is 22.7 °C and, therefore, well above the average indoor temperature of the building (21.5 °C). Although this household keeps temperatures constant – aligning with the materiality of the building technologies – they are at relatively high levels, which could point to both a habituation and a rebound effect.

4.5.2. Household B – thermal uniformity at a low level

Household B provides another example of a very homogeneous heating pattern. The tenant is relatively young, fully employed, and usually not home all day. She lives in a two-room apartment with a small balcony. While she is relatively satisfied with the indoor thermal conditions, she does not think the system works well. One reason is that she gained the impression that the algorithm for detecting open windows is not very accurate. Another reason is that she considers the system too complex for most of the tenants, which she has explained in an open comment: "I'm pretty sure many tenants here don't understand how the heating system works. Many of my neighbours have a migration background and can't cope with lengthy explanatory texts. (...) Unfortunately, the window-open detection system doesn't work properly. After about five minutes, the heating switches back to heating mode, even though the window is still fully open." However, she herself seems to cope quite well with the system.

Table 4

Table with flat size and indicators for temperature and heating energy consumption patterns in four sample households and the average household in the case study buildings (heating period 2021/22).

	Household A	Household B	Household C	Household D	Average household (of all 137)
Flatsize [m ²]	43	51	51	56	72
Space heating energy demand [kWh/m ² a]	35.3	54.7	48.8	49.9	51.4
Space heating energy consumption [kWh/m ² a]	53.5	21.2	72.6	71.8	53.5
Avg. apartment temperature Nov-Feb [°C]	22.8	20.7	19.5	19.3	21.5
Avg. apartment setpoint Nov-Feb [°C]	21.8	19.4	17.6	17.8	17.3
Avg. measured indoor temperature living room Nov-Feb [°C]	23.1	20.9	21.2	18.9	21.9
Avg. measured indoor temperature bedroom Nov-Feb [°C]	–	20.4	13.9	18.0	20.7
Avg. diurnal temperature difference within the apartment Nov-Feb [°C]	3.9	3.2	2.8	4.1	3.3
Avg. temperature difference between rooms Nov-Feb [°C]	1.3	1.2	8.5	3.0	3.1

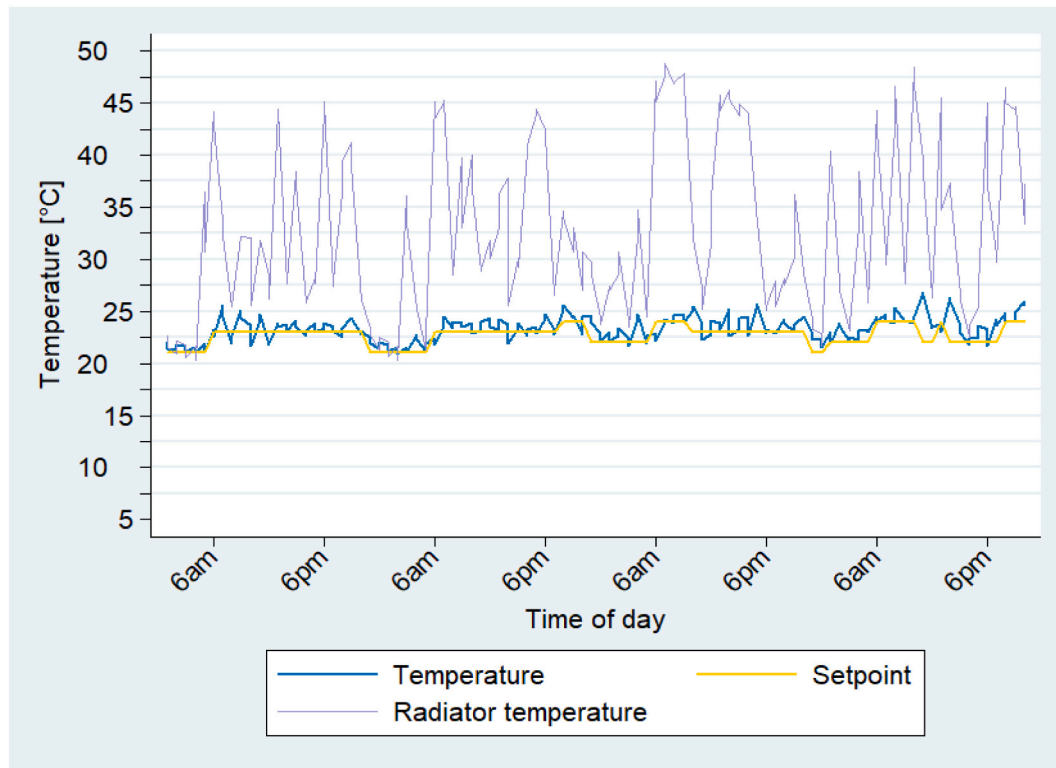


Fig. 9. Measured setpoint and indoor temperature for household A (bedroom) during four days in January with a preference for uniform indoor conditions.

Even though she stated in the survey that she likes differences between rooms and agrees that temperatures differ within the apartment, the monitoring data shows that the differences are relatively small compared to other households (1.2 °C). An obvious explanation is that doors in the apartment usually stay open. She also opens windows only briefly for shock ventilation, probably because she also cares about saving energy. With an average indoor temperature of 20.7 °C and relatively little fluctuations within the apartment (Table 4), this apartment needs only 21 kWh/m² for the heating season.

This case demonstrates that temperatures generally fluctuate little if occupants do not seek differences or feel the need to air their apartment excessively. Occupants can also keep energy consumption low if they keep setpoints at lower levels. Thus, energy-efficient buildings combined with such comfort practices would principally support the idea of load-shifting from SHT.

4.5.3. Household C – thermal variety between rooms

However, not all comfort practices match this material setting. The single Household C shares many characteristics with Household B, being relatively young, being out of home all day because of work and living in a two-room apartment. However, unlike Household B, the tenant smokes on the balcony, shares his flat with a four-legged friend, and ventilates heavily by tilting windows for long durations. Consequently, Household C differs heavily from Household B in the ensuing temperature patterns and heating consumption (Table 4).

Household C is also not very happy with the heating system. He thinks the system reacts rather slowly and does not do what he expects. In an open comment, he explained: “The heating cannot be controlled precisely; if you turn it to level 3 and it gets cooler outside, it changes or switches off, i.e. it shows that it is on level 3, but the radiator itself is ice cold.” In this quote, he is probably referring to the intermittent heating cycles that reduce the feedback from the radiators, which he also stated does not get warm enough. Several households have been confused by this heating pattern because, unlike conventional TRVs, the SHT decides when to turn it on, leaving little opportunity for residents to control the

heat flow. Although the occupant from Household C says that the temperatures within the apartment differ, and this is what he prefers, he usually leaves the doors open between rooms. This is probably because of his pet, as the survey data show that households with cats or dogs are much more likely to keep doors open between rooms. Furthermore, he prefers to sleep with windows tilted, and he keeps windows tilted in the bedroom and living room all day.

The monitoring data clearly shows that, while the average temperature in the home is relatively moderate (19.6 °C), there are significant variations between rooms. While the setpoint in the bedroom is always on frost protection (7 °C), it averages 21.2 °C in the living room. The resulting measured indoor temperatures are 21 °C in the living room and 13.9 °C in the bedroom. However, the average indoor temperature does not fluctuate much during the day. These patterns explain the high energy consumption of 72 kWh/m² for the whole season.

Although both Households C and B feel that the air in their home is often too sticky, they deal with it differently.

4.5.4. Household D – thermal variety during the day

Lastly, Household D prefers temperature variations throughout the day. While this is a two-person household in a 52m² apartment, each resident has a room, which they use for sleeping and living, with doors within the apartment usually closed. Because one tenant has relatively consistent and moderate temperatures and does not heat most of the time, I here concentrate on the comfort practice of the other resident. She describes herself as someone who generally feels hot quickly and needs varying indoor conditions depending on activity.

When I first spoke to her in the middle of the winter, she mentioned her concerns about her room overheating in the summer. However, she is confused by the intermittent heating and misses the feeling of a constantly warm radiator. Favouring the room to be warm when awake, she notices that the apartment does not cool down quickly when the heating is turned off but retains the warmth for a long time. This poses a problem because she likes to sleep in an ice-cold room under a thick duvet. Therefore, she fully opens or tilts her window when sleeping,

even with heavy frost outside. These descriptions are confirmed when looking at a four-day period when it has had minus degrees outside (Fig. 10). The setpoint temperatures have been regularly set to frost protection, and the room has cooled down quite heavily, sometimes to 15 °C. For the rest of the day, the heating system has to work continuously to bring the building envelope's thermal mass, which has given up much of its energy, back up to the required temperatures.

Even though she has mentioned the importance of keeping energy costs low and has said that she will most of the time not choose the highest settings so as not to waste energy, a look at the apartments' temperatures and heating energy consumption and the comparison to the average of all 137 apartments shows an interesting combination: The apartment needs almost 50 % more heating than the average household, even though the actual average indoor temperature is 2.2 °C lower. Here, high fluctuations in the one room seem to correspond to increased energy consumption.

The four in-depth depictions show how variations in the interactions between occupants and the material settings of their homes can lead to significant differences in heating energy consumption. Average indoor temperatures for the whole apartment alone are not only a weak indicator of what happens in a home – in line with what Marszał-Pomianowska et al. [67] have shown – but also a weak indicator of energy consumption. This is confirmed in the next chapter for the whole sample of smart households in the case study.

4.6. Interaction between thermal variety and SHT – regression analysis

Stepwise multivariate regression analysis with the main metering variables from the case study is conducted in the following subsection. It analyses more systematically the correlation between heating energy consumption and differences in heating patterns (Table 5). The temperature patterns are treated as indicators for different interactions between comfort practices and the material setting. The main explanatory variables are: First, the average temperature level; second, the average temperature differences within dwellings during the day; and third, the

Table 5

OLS stepwise regression for 118 apartments (with complete monitoring data available) over the heating period (Nov–Feb). T-Statistics in parentheses and p-values as stars (* $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$).

	(Model 1)	(Model 2)	(Model 3)	(Model 4)
	kWh/m ²	kWh/m ²	kWh/m ²	kWh/m ²
Flatsize [m ²]	−0.017 (−0.17)	−0.108 (−1.21)	−0.139 (−1.55)	−0.184* (−2.06)
Outside area [m ²]	0.208* (2.43)	0.224** (2.99)	0.236** (2.77)	0.216* (2.44)
Avg. apartment temperature [°C]		0.552*** (7.39)	0.452*** (6.48)	0.509*** (7.06)
Avg. diurnal temperature difference within the apartment [°C]			0.339*** (3.77)	0.281*** (3.43)
Avg. temperature difference between rooms [°C]				0.208* (2.35)
Obs.	118	118	118	118
Adjusted R ²	0.022	0.320	0.421	0.453

average differences between rooms. All models control for dwelling size and external area as the main differences in building physics. The results confirm that larger variability in thermal indoor conditions corresponds to higher heating energy consumption in a material setting of high insulation and load shifting from demand-side management.

The high variance in the heating consumption between apartments cannot be explained by living space and external area alone (Model 1). In this building, differences in building physics between apartments are entirely obscured by the variation of comfort practices in these apartments. In contrast, temperature level has a clear and significant effect, explaining nearly a third of the total variation (Model 2). As expected, the warmer the dwelling, the higher the energy consumption. However, consistently higher temperatures are less energy-intensive than higher temperatures with large fluctuations. Trying to achieve temperature differences during the day (Model 3) and keeping differences between

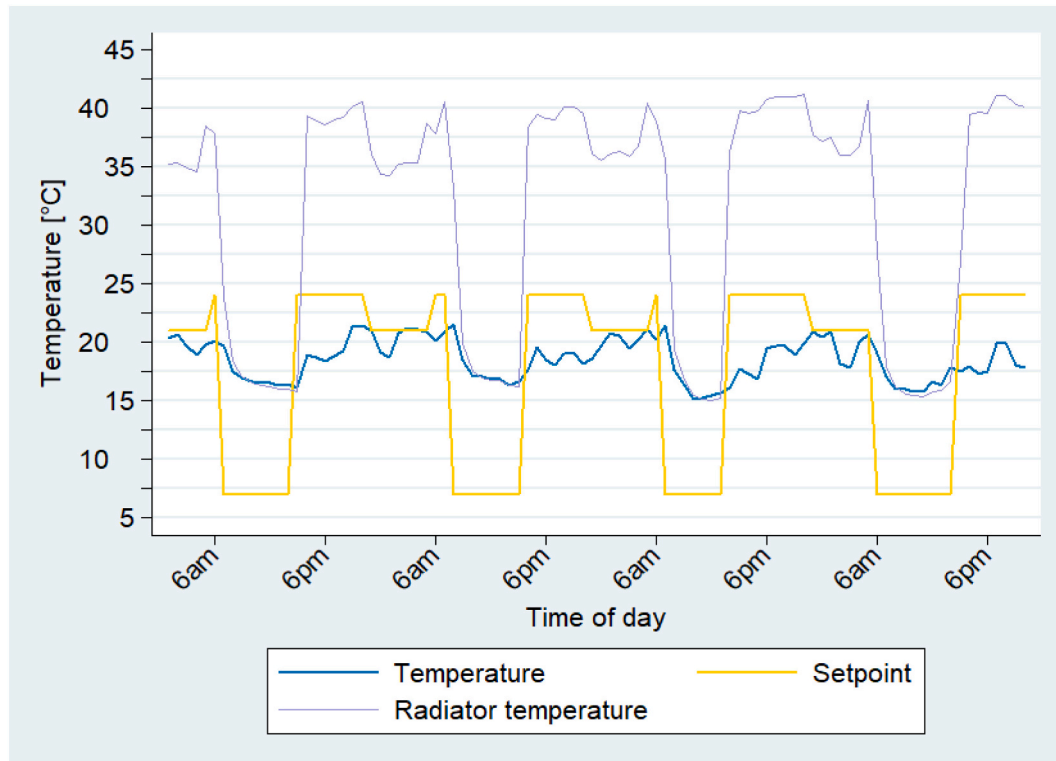


Fig. 10. Measured setpoint and indoor temperature for Household C (bedroom) over four days in January with a preference for high variation in indoor conditions.

rooms (Model 4) will lead to higher energy consumption, even if the overall temperature is constant. One explanation is internal heat shifts between rooms, particularly when doors are open. By contrast, if occupants set realistic setpoint temperatures between 18 and 25° in all rooms, the demand-side management would ensure that all available heating surfaces are used to keep the temperature level rather than one or two radiators heating the whole apartment.

The findings show that higher temperature differences correspond to increased heating energy consumption for the same average apartment temperature. Thus, buildings favouring uniform temperatures because of high insulation and SHT with demand-side management and temperature differences do not align well.

Conversely, more homogeneous temperatures align well with the SHT's idea for reducing heating energy consumption. In highly insulated buildings, occupants must actively release stored heating energy by opening windows to enjoy temperature differences indoors. The building's thermal mass acts as a buffer for changes in internal temperature and, therefore, must be actively cooled. Internal heat transfers between rooms and apartments further counteract differences in indoor temperatures [107,109]. When rooms need to be heated, the whole building mass must be brought to a new level. As the SHT is designed to save energy by reducing flow temperatures and load-shift demand, this reduces direct feedback from hot radiators and extends the time it takes to heat a room. As a result, these systems work towards relatively homogeneous temperatures – something that has been pointed out in previous research [13,59,67]. This also results in a trade-off between the energy saved by not heating or cooling on the one hand and the time and energy needed to return to a higher setpoint in a later period on the other hand.

Even though highly insulated buildings and SHT for demand-side management should fit well together, the heterogeneity of comfort practices in large multi-apartment buildings can substantially reduce the overall savings.

In a less insulated building, the effect of temperature changes is much less problematic because the indoor temperature drops much faster when the heating is turned off, reducing the energy that can be saved by keeping the thermal mass at a constant temperature. Therefore, such an environment contributes to the fluctuation of indoor temperatures and helps the occupants experience thermal variety.

5. Discussion

5.1. Summary and discussion of results

In this mixed methods case study, the implementation of an SHT, installed in 137 apartments in two multi-apartment buildings, was monitored for three years using survey, observational, interview and measurement data. Over the three years, annual savings below 10 % could be realised. The analysis shows that for a highly insulated building – a material setting that should generally be quite favourable for the application of demand-side management – the expectation that SHT will typically achieve 20–30 % savings could be exaggerated. This study argues that the main reason could be interaction problems between technological affordances and occupants' comfort practices: From SHT leading to a homogenisation of the indoor thermal conditions and comfort practices that seek and result in varying patterns.

Research suggests that SHTs, such as the one analysed in this paper, achieve their full efficiency potential through multi-zone control [110] and by shifting heat loads, reducing flow temperatures and limiting peak loads [4,13]. Such demand-side management also offers further potential by increasing the flexibility and overall efficiency of the energy grid by facilitating the integration of renewable energy, e.g., through the electrification of the heating supply or low-temperature district heat [4,63].

This study supports previous findings that these system characteristics have consequences for occupants: Due to the built-in inertia, the system behaviour requires more homogeneous indoor temperatures and

makes the system less flexible for occupants [61,66]. Because it responds more slowly to adjustments in the heating control, it is no longer possible to have fast feedback when adjusting the heating [13]. Thus, homogeneous temperatures and efficiency are mutually supportive. Furthermore, the system should align well with strong building insulation, which reduces heat loss and increases the inertia and homogeneity of indoor temperatures even further [107].

However, for a long time, occupants in Germany have mainly experienced the typical material setting of buildings with high energy demand (low insulation) and conventional heating systems (primarily gas and oil). In this setting, typical comfort practices have evolved: Occupants have become used to variations in indoor conditions and have learnt to regard them as a preferred state.

The analysis of the comfort practices of 265 households in conventional multi-apartment buildings lends further support to the prevalence of heterogeneity of temperature patterns within homes. And similar patterns can be found not only in Germany [67,68,81]. Different studies have provided insights into the many mechanisms that can lead to variations, not only in comfort practices but also in the ensuing temperature patterns within smart homes: From conflict within households [70] and caring practices [67] to the engagement of individuals with the building technologies itself [12].

Even though it is often argued that occupants waste much energy in old buildings, the prevalence of prebound effects [20,111] shows that, on average, occupants behave quite economically in these settings. Furthermore, if building technologies are upgraded, these practices will not automatically adjust to the material affordances, i.e. occupants will not necessarily behave as designers of demand-side management intend them to. It is, therefore, unclear how much savings can realistically be expected, and savings of 7 % do not seem so bad in this context, even though they are likely not economical.

By comparing old with new buildings and how comfort practices evolve with different material settings, this study also provides insights into the shifts from prebound effects to EPGs with increasing energy efficiency in building technologies [111]. In accordance with research on mental models of thermostat use [95,97,102] and on comfort practices in old buildings [112], this study implies that heating practices in many old buildings might not be as bad as often described by advocates of SHT. Galvin [112] argued that only a small proportion of households are responsible for the largest share of heating energy consumption and whose behaviour should, therefore, receive priority attention by energy policy. Although this statement has to be qualified somewhat in the light of interaction effects between dwellings, e.g. free-rider effects due to internal heat transfers [107,109,113], there could be a similar pattern in new buildings with smart heating controls. There will be many households whose practices will, after some time, align well with the technologies in place [12,72] due to the co-evolution between practices and material arrangements.

When SHT favours homogenisation, the temperature level at which this homogenisation occurs matters. There remains uncertainty as to what extent SHT can counteract the trend towards higher indoor temperatures in evenly heated homes. Previous research suggests that, in modern, well-insulated and centrally-heated buildings, average temperatures and, thus, energy consumption increases [114]. Research also shows that people become accustomed to these higher temperatures in the long term [53]. The inertia of SHT and the difficulties of adjusting temperature upwards for short times could support this trend: Occupants can become used to permanently heat at a higher level and open windows when seeking variation. Alternatively, SHT could offer the option of heating rooms only to a basic level, in which case occupants would have to make greater use of other adaptation options, such as keeping their bodies warm rather than whole spaces [66,115–117]. The results of this study indicate that – compared to a modern but conventionally heated building – SHT leads to average savings despite high consumption.

Future developments of heating energy consumption in buildings

thus depend on how comfort and the use of these technologies will be negotiated. Intermediaries such as building managers could support residents in finding a compromise between comfort and energy savings [11], e.g. by providing alternative means for achieving comfort [116,118]. Conversely, escalating expectations and co-evolving technologies could also pressure technology developers to prioritise comfort over savings, intensifying rebound effects.

5.2. Limitations

This study concentrated on what people do to achieve comfortable indoor conditions, how they interact with their building technologies, and how this affects heating energy consumption.

By focusing on doings, one limitation of the study is the reliance on self-reported behaviour when analysing habituated and routinised activities. This problem is addressed by triangulating data and methods. All in-depth cases have been chosen based on cross-validated evidence from survey, qualitative, and measurement data. Still, there remains ambiguity and interpretative flexibility, particularly for the measurement and survey data, regarding the detailed understanding of what happened in the households [119]. Likewise, uncertainty remains about why residents behave in specific ways. However, while many studies rely more on qualitative data to explain how different elements shape comfort practices, this study focuses more on the outcomes of comfort practices regarding behavioural patterns. Thus, while practices can be shaped by various ideas of comfort or other elements, the ensuing patterns are the focus here.

A major challenge, but also a strength, of this study is the nature of the varied data. The qualitative data - such as observations made during home visits with artisans or field notes collected while assisting residents with heating problems - is very diverse. The standardised survey, however, covers many aspects in detail but leaves many gaps regarding contextual knowledge, e.g., when figuring out why occupants tilt windows for long periods. Meaningful multivariate statistical analysis is impossible because of the amount of relevant and interacting variables and the small sample size. The sample size is due to the limited number of households in the case study buildings and the non-response rate. Response rates are restricted, among other things, by the length and detail of the questionnaire, which is particularly challenging for occupants with limited language skills. However, there are no signs of systematic bias among respondents.

Caution must also be paid to the long-term implications of how practices will evolve with the SHT. The study can only provide a first snapshot of the interactions with SHT. As practices are relatively stable but also constantly changing, more research is needed on how practices will evolve in relation to SHT in the long term. It is conceivable that practices will change if households attribute more relevance to heating energy consumption. In particular, steadily rising energy prices over long periods and more regular feedback - now mandatory in Germany in the form of monthly information on heating energy consumption - could help change comfort practices.

While energy prices have risen sharply in 2022/23 due to the Russian invasion of Ukraine and the ensuing energy crisis around Europe, this only temporarily affected household energy consumption patterns. In the heating season 2022/23, households across Germany significantly reduced their indoor temperatures and heating consumption [91], and this effect is also evident in the case study and reference buildings. The differences between the smart and reference buildings with conventional TRVs stayed constant, confirming the overall savings effect from the SHT. The principal analysis in this paper is not affected by this effect, using data from before the energy crisis. Since the general reduction of energy consumption should not affect the relationship between temperature patterns and heating energy consumption levels, the regression results should also not be affected. This was also confirmed when looking at the regression analysis for the previous year (not shown).

Lastly, it is essential to mention that the heating patterns described

here do not cover the entire spectrum of patterns apparent in the field. Instead, they represent extreme cases, and many households will fall between them. Furthermore, while this is a German case study, the discussion of the relevant literature on SHT [3,4,13,15,72] and patterns of indoor conditions in households [67,68,81,82,120] shows that the issues discussed are not specific to the German context. Certain aspects, such as the commonality of tilting windows [79,121] or the relevance of tenancy in multi-apartment buildings, are more specific to the German context. However, the main issue of SHT favouring homogeneity and comfort practices contributing to variation in indoor conditions seems to be a general one.

5.3. Policy implications

This study indicates that technical estimates of savings from SHT are based on assumptions of standardised and homogeneous user practices. These estimates do not sufficiently consider these practices' varied and diverse nature, which has evolved from specific spatial and temporal contexts. I suggest that a more realistic and robust assessment could, on the one hand, reduce mistrust on the part of potential customers (expectation management), such as housing companies. On the other hand, it could trigger a discussion about necessary accompanying measures. It could shift the focus from technical to social solutions, as it becomes clear that sustainability is not a purely technical task [122] but involves the redefinition of social practices [123].

Currently, interest in changing practices seems low. Instead, many stakeholders point out that technical solutions are not yet sufficiently mature and more technical development is needed: Occupants are trapped in existing mental models and habits. They often have little interest in learning how to use new technologies most efficiently. And many also think these technologies have little benefits and still suffer from many problems [73]. Landlords, however, are happy to continue to rely on established and robust technology that causes few problems for tenants. Manufacturers, again, are interested in selling SHT, but - innovating in the particularly intransparent market of building energy consumption - they often stick to their competitors' established marketing strategies, promising savings up to 30 % [4,9] and hope that the regulatory wind will shift in their favour. They also prefer to point to the technology's functionality and users' misbehaviour rather than dealing with the question of how they can adapt the technology to the contexts in which it is used. Consequently, the diffusion of these technologies remains low, and energy performance gaps prevail.

More generally, this includes a call for policymakers and technology developers: They should not aim for optimal solutions that only work under unlikely boundary conditions. Instead, they should search for robust technologies and how they can be aligned with other approaches to achieve the desired goals. There are some initial approaches in this direction, i.e., in architecture [124].

My research implies that SHT could play an essential role in the sustainability transformation of buildings, particularly in well-insulated buildings or those with high thermal mass, and when occupants seek a homogeneous but relatively low (at the lower end of the comfort scale) indoor climate. However, this would require shifting practices: From keeping spaces at high temperatures to alternative ways of achieving comfort [116]. Here, personalised adaptation options should receive greater attention, from warmer clothing to heating systems directed at the body instead of the room [115]. The success of SHT thus depends on being embedded and coupled with other technical and non-technical elements instead of reproducing energy-intensive ways of providing comfort [76].

Uncertainty remains about how SHT would work in older buildings with higher energy demand. A strategy where system feedback is significantly reduced seems to make less sense in buildings where occupants rely on fast feedback to heat rooms for shorter periods without keeping the whole building mass at high temperatures. Load shifting could still work depending on the thermal mass of the building,

particularly for residents who are at home most of the time. However, this would only make sense if energy is much cheaper in times of high supply. Occupancy detection – supporting occupants to lower temperatures during absence and turning heaters down in unoccupied rooms – could be promising for occupants who are little concerned with saving energy. As occupants often are not aware of what is best in which context, they could be supported on how to negotiate comfort and efficiency in practice. Intermediaries at the interface between technology and users can support these negotiations, thereby mediating between material and practical affordances [11]. In particular, building managers or – as has happened in this case study – support staff who understand occupants and technology are essential mediators. They should receive greater attention in energy policy.

Again, the research conducted here implies that focusing on one-size-fits-all solutions, technical potential, and technical innovation is too narrow. What matters is the interplay between technology and practices. Context-sensitive approaches are needed to bridge the gap between building vs. behaviour approaches.

CRedit authorship contribution statement

Simon Moeller: Writing – review & editing, Writing – original draft, Methodology, Investigation, Formal analysis, Data curation, Conceptualization.

Declaration of competing interest

The author declares that he has no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Acknowledgements

I would like to thank the German Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action (BMWK) for its financial support within the project ‘EffKom – energy-efficient residential comfort: user-oriented development of an automated system for the control of space heating’ (FKZ 67KF0098A). I would also like to thank Susanne Fejér, Bernhard Gill, Amelie Bauer and two anonymous reviewers for their valuable comments.

Data availability

The authors do not have permission to share data.

References

- [1] Eurostat, Energy consumption in households, Available from, https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_consumption_in_households, April 26, 2024.
- [2] Eurostat, Energy statistics - an overview, Available from, https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_statistics_-_an_overview#Final_energy_consumption, April 26, 2024.
- [3] C. McIlvennie, A. Sanguinetti, M. Pritoni, Of impacts, agents, and functions: an interdisciplinary meta-review of smart home energy management systems research, *Energy Res. Soc. Sci.* (2020) 68, <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101555>.
- [4] S.J. Darby, Smart technology in the home: time for more clarity, *Build. Res. Inf.* 46 (1) (2018) 140–147, <https://doi.org/10.1080/09613218.2017.1301707>.
- [5] B.K. Sovacool, D.D. Del Fursyfer Rio, Smart home technologies in Europe: a critical review of concepts, benefits, risks and policies, *Renew. Sustain. Energy Rev.* (2020) 120, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109663>.
- [6] Energy performance of buildings directive (EPBD): 2018/844/EU, in: *Official Journal of the European Union*, 2018, pp. 75–91.
- [7] P.H. Shaikh, N.B.M. Nor, P. Nallagownden, I. Elamvazuthi, T. Ibrahim, A review on optimized control systems for building energy and comfort management of smart sustainable buildings, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 34 (2014) 409–429, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.027>.
- [8] S. Beucker, S. Hinterholzer, Decarbonization potential of building automation: results of a German study and outlook, in: *2022 International Conference on ICT for Sustainability (ICT4S)*, IEEE, 2022, pp. 119–127.
- [9] S. Tirado Herrero, L. Nicholls, Y. Strengers, Smart home technologies in everyday life: do they address key energy challenges in households? *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 31 (2018) 65–70, <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2017.12.001>.
- [10] A.R. Hansen, G. Trotta, K. Gram-Hanssen, Smart home technology adoption in Denmark: diffusion, social differences, and energy consumption, *Energ. Effic.* (2024) 17, <https://doi.org/10.1007/s12053-024-10202-3>.
- [11] C. Grandclément, A. Karvonen, S. Guy, Negotiating comfort in low energy housing: the politics of intermediation, *Energy Policy* 84 (2015) 213–222, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.11.034>.
- [12] F. Guasselli, A. Vavouris, L. Stankovic, V. Stankovic, S. Didierjean, K. Gram-Hanssen, Smart energy technologies for the collective: time-shifting, demand reduction and household practices in a positive energy Neighbourhood in Norway, *Energy Res. Soc. Sci.* (2024) 110, <https://doi.org/10.1016/j.erss.2024.103436>.
- [13] S.P.A.K. Larsen, K. Gram-Hanssen, When space heating becomes digitalized: investigating competencies for controlling smart home technology in the energy-efficient home, *Sustainability* 12 (15) (2020), <https://doi.org/10.3390/su12156031>.
- [14] J.S. Matzat, *Die Energiewende in den eigenen vier Wänden*. Dissertation, Nomos Verlagsgesellschaft mbH & Co. KG, Baden-Baden, 2019.
- [15] B.K. Sovacool, J. Osborn, M. Martiskainen, M. Lipson, Testing smarter control and feedback with users: time, temperature and space in household heating preferences and practices in a living laboratory, *Glob. Environ. Chang.* (2020) 65, <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2020.102185>.
- [16] R. Galvin, M. Sunikka-Blank, Schatzkian practice theory and energy consumption research: time for some philosophical spring cleaning? *Energy Res. Soc. Sci.* 22 (2016) 63–68, <https://doi.org/10.1016/j.erss.2016.08.021>.
- [17] K. Gram-Hanssen, Residential heat comfort practices: understanding users, *Build. Res. Inf.* 38 (2) (2010) 175–186, <https://doi.org/10.1080/09613210903541527>.
- [18] S. Metzger, N. Walikewitz, K. Jahnke, M. Otto, A. Grondy, S. Fritz, *Wohnen und Sanieren: Empirische Wohngebäudedaten seit 2002*, Dessau-Roßlau, 2019.
- [19] BDEW, Entwicklung der Beheizungsstruktur des Wohnungsbestandes in Deutschland seit 1995, Available from, <https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/beheizungsstruktur-wohnungsbestand/>, January 06, 2022.
- [20] M. Sunikka-Blank, R. Galvin, Introducing the rebound effect: the gap between performance and actual energy consumption, *Build. Res. Inf.* 40 (3) (2012) 260–273, <https://doi.org/10.1080/09613218.2012.690952>.
- [21] R. Galvin, Making the ‘rebound effect’ more useful for performance evaluation of thermal retrofits of existing homes: defining the ‘energy savings deficit’ and the ‘energy performance gap’, *Energ. Buildings* 69 (2014) 515–524, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.004>.
- [22] A. Mahdavi, C. Berger, H. Amin, E. Ampatzi, R.K. Andersen, E. Azar, et al., The role of occupants in buildings’ energy performance gap: myth or reality? *Sustainability* 13 (6) (2021) <https://doi.org/10.3390/su13063146>.
- [23] R. Galvin, Humans and stuff: interweaving social and physical science in energy policy research, *Energy Res. Soc. Sci.* 26 (2017) 98–102, <https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.01.012>.
- [24] J.A. Love, *Understanding the Interactions between Occupants, Heating Systems and Building Fabric in the Context of Energy Efficient Building Fabric Retrofit in Social Housing*, UCL (University College London), 2014.
- [25] A. Reckwitz, Toward a theory of social practices: a development in culturalist theorizing, *Eur. J. Soc. Theory* 5 (2) (2002) 243–263, <https://doi.org/10.1177/1368431022225432>.
- [26] T.R. Schatzki, *Social Practices: A Wittgensteinian Approach to Human Activity and the Social*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1996.
- [27] A. Reckwitz, The status of the “material” in theories of culture: from “social structure” to “artefacts”, *J. Theory Soc. Behav.* 32 (2) (2002) 195–217, <https://doi.org/10.1111/1468-5914.00183>.
- [28] T.R. Schatzki, Materiality and social life, *Nat. Cult.* 5 (2) (2010) 123–149, <https://doi.org/10.3167/nc.2010.050202>.
- [29] K. Maréchal, Not irrational but habitual: the importance of “behavioural lock-in” in energy consumption, *Ecol. Econ.* 69 (5) (2010) 1104–1114, <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.12.004>.
- [30] E. Shove, *Comfort, Cleanliness and Convenience: The Social Organization of Normality*, Berg, Oxford, 2003.
- [31] E. Shove, M. Pantzar, M. Watson, *The Dynamics of Social Practice: Everyday Life and how it Changes*, SAGE, Los Angeles, 2012.
- [32] T.R. Schatzki, *Where the Action Is: On Large Social Phenomena Such as Sociotechnical Regimes*, University of Manchester, Manchester, 2011.
- [33] J.J. Gibson, *The Ecological Approach to Visual Perception*, Psychology Press, New York, NY, 2014.
- [34] F.J. de Feijter, B.J. van Vliet, Housing retrofit as an intervention in thermal comfort practices: Chinese and Dutch householder perspectives, *Energ. Effic.* 14 (1) (2021) 1–18, <https://doi.org/10.1007/s12053-020-09919-8>.
- [35] M. Akrich, The de-scription of technical objects, in: W.E. Bijker, J. Law (Eds.), *Shaping Technology/Building Society: Studies in Sociotechnical Change*, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1992, pp. 205–224.
- [36] B. Latour, Where are the missing masses? The sociology of a few mundane artifacts, in: W.E. Bijker, J. Law (Eds.), *Shaping Technology/Building Society: Studies in Sociotechnical Change*, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1992, pp. 225–258.
- [37] H. Rohrer, The role of users in the social shaping of environmental technologies, *Innovation Eur. J. Soc. Sci. Res.* 16 (2) (2003) 177–192, <https://doi.org/10.1080/13511610304516>.
- [38] T. Dant, *Material Culture in the Social World: Values, Activities, Lifestyles*, Open University Press, Buckingham, Philadelphia, 1999.

- [39] T.-K. Lehtonen, The domestication of new technologies as a set of trials, *J. Consum. Cult.* 3 (3) (2003) 363–385, <https://doi.org/10.1177/14695405030033014>.
- [40] D. Marikyan, S. Papagiannidis, E. Alamanos, A systematic review of the smart home literature: a user perspective, *Technol. Forecast. Soc. Chang.* 138 (2019) 139–154, <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.08.015>.
- [41] T.A. Nguyen, M. Aiello, Energy intelligent buildings based on user activity: a survey, *Energ. Buildings* 56 (2013) 244–257, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.09.005>.
- [42] S. Beucker, J.D. Bergesen, T. Gibon, Building energy management systems: global potentials and environmental implications of deployment, *J. Ind. Ecol.* 20 (2) (2016) 223–233, <https://doi.org/10.1111/jiec.12378>.
- [43] Z. Nagy, B. Gunay, C. Miller, J. Hahn, M.M. Ouf, S. Lee, et al., Ten questions concerning occupant-centric control and operations, *Build. Environ.* (2023) 242, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110518>.
- [44] Y. Strengers, *Smart Energy Technologies in Everyday Life: Smart Utopia?* Palgrave Macmillan UK, London, 2013.
- [45] T. Hargreaves, M. Nye, J. Burgess, Making energy visible: a qualitative field study of how householders interact with feedback from smart energy monitors, *Energy Policy* 38 (10) (2010) 6111–6119, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.05.068>.
- [46] H. Brynjarsdóttir, M. Håkansson, J. Pierce, E.P.S. Baumer, C. DiSalvo, P. Sengers, Sustainably unpersuaded: how Persuasion narrows our vision of sustainability, in: CHI '12: Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, 2012, pp. 947–956, <https://doi.org/10.1145/2207676.2208539>.
- [47] E. Shove, Beyond the ABC: climate change policy and theories of social change, *Environ. Plan. A* 42 (6) (2010) 1273–1285, <https://doi.org/10.1068/a42282>.
- [48] M.A. Delmas, M. Fischlein, O.I. Asensio, Information strategies and energy conservation behavior: a meta-analysis of experimental studies from 1975 to 2012, *Energy Policy* 61 (2013) 729–739, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.05.109>.
- [49] K. Buchanan, R. Russo, B. Anderson, The question of energy reduction: the problem(s) with feedback, *Energy Policy* 77 (2015) 89–96, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.12.008>.
- [50] O. Iweka, S. Liu, A. Shukla, Da Yan, Energy and behaviour at home: a review of intervention methods and practices, *Energy Res. Soc. Sci.* (2019) 57, <https://doi.org/10.1016/j.erss.2019.101238>.
- [51] E. Shove, Energy transitions in practice: the case of global indoor climate change, in: G. Verbong, D. Loorbach (Eds.), *Governing the Energy Transition: Reality, Illusion or Necessity?*, Routledge, New York, 2012, pp. 51–74.
- [52] J.K. Day, W. O'Brien, Oh behave! Survey stories and lessons learned from building occupants in high-performance buildings, *Energy Res. Soc. Sci.* 31 (2017) 11–20, <https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.05.037>.
- [53] M. Luo, B. Cao, W. Ji, Q. Ouyang, B. Lin, Y. Zhu, The underlying linkage between personal control and thermal comfort: psychological or physical effects? *Energ. Buildings* 111 (2016) 56–63, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.11.004>.
- [54] M.A. Humphreys, J.F. Nicol, Understanding the adaptive approach to thermal comfort, *ASHRAE Trans.* 104 (1998) 991–1004.
- [55] R. de Dear, G. Brager, Developing an adaptive model of thermal comfort and preference, *ASHRAE Trans.* 104 (1998) 1–18.
- [56] G.S. Brager, R.J. de Dear, Historical and cultural influences on comfort expectations, in: R. Cole, R. Lorch (Eds.), *Buildings, Culture and Environment: Informing Local and Global Practices*, Blackwell Pub, Oxford UK, Malden MA, 2003, pp. 177–201.
- [57] A.K. Mishra, M.G. Loomans, J.L. Hensen, Thermal comfort of heterogeneous and dynamic indoor conditions — an overview, *Build. Environ.* 109 (2016) 82–100, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.09.016>.
- [58] Energy performance of buildings - part 1: impact of building automation, *Control. Build. Man.* 15232-1 (2017).
- [59] A. Soleimanijavid, I. Konstantzos, X. Liu, Challenges and opportunities of occupant-centric building controls in real-world implementation: a critical review, *Energ. Buildings* (2024) 308, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.113958>.
- [60] W. Zeiler, D. Vissers, R. Maaßen, G. Boxem, Occupants' behavioural impact on energy consumption: 'human-in-the-loop' comfort process control, *Archit. Eng. Des. Manag.* 10 (1–2) (2014) 108–130, <https://doi.org/10.1080/17452007.2013.837252>.
- [61] L.M. Miu, C.M. Mazur, K.H. van Dam, R.S. Lambert, A. Hawkes, N. Shah, Going smart, staying confused: perceptions and use of smart thermostats in British homes, *Energy Res. Soc. Sci.* (2019) 57, <https://doi.org/10.1016/j.erss.2019.101228>.
- [62] S.P. Larsen, K. Gram-Hanssen, L.V. Madsen, In control or being controlled? Investigating the control of space heating in smart homes, *Sustainability* 15 (12) (2023), <https://doi.org/10.3390/su15129489>.
- [63] E. Guelpha, V. Verda, Demand response and other demand side management techniques for district heating: a review, *Energy* (2021) 219, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119440>.
- [64] S. Beucker, S. Hinterholzer, Einsparpotenziale aus der Optimierung von Heizungsanlagen in Wohngebäuden, 2022.
- [65] J. Rinkinen, Chopping, stacking and burning wood: Rhythms and variations in provision, in: E. Shove, F. Trentmann (Eds.), *Infrastructures in Practice: The Dynamics of Demand in Networked Societies*, Routledge Taylor & Francis Group, London, New York, 2019, pp. 48–57.
- [66] L. Kuijter, A. de Jong, Identifying design opportunities for reduced household resource consumption: exploring practices of thermal comfort, *J. Des. Res.* 10 (1/2) (2012) 67–84, <https://doi.org/10.1504/JDR.2012.046140>.
- [67] A. Marszał-Pomianowska, S.P.A.K. Larsen, K. Gram-Hanssen, P. Heiselberg, Thermal conditions in households and assessment of building's flexibility potential. Variations in time, space and between dwellings, *Build. Environ.* (2021) 206, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108353>.
- [68] T. Kane, S.K. Firth, K.J. Lomas, How are UK homes heated? A city-wide, socio-technical survey and implications for energy modelling, *Energ. Buildings* 86 (2015) 817–832, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.10.011>.
- [69] C. Wilson, T. Hargreaves, R. Hauxwell-Baldwin, Smart homes and their users: a systematic analysis and key challenges, *Pers. Ubiquit. Comput.* 19 (2) (2015) 463–476, <https://doi.org/10.1007/s00779-014-0813-0>.
- [70] B.K. Sovacool, M. Martiskainen, J. Osborn, A. Anaam, M. Lipson, From thermal comfort to conflict: the contested control and usage of domestic smart heating in the United Kingdom, *Energy Res. Soc. Sci.* (2020) 69, <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101566>.
- [71] L.V. Madsen, K. Gram-Hanssen, Understanding comfort and senses in social practice theory: insights from a Danish field study, *Energy Res. Soc. Sci.* 29 (2017) 86–94, <https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.05.013>.
- [72] T. Hargreaves, C. Wilson, R. Hauxwell-Baldwin, Learning to live in a smart home, *Build. Res. Inf.* 46 (1) (2017) 127–139, <https://doi.org/10.1080/09613218.2017.1286882>.
- [73] N. Balta-Ozkan, O. Amerighi, B. Boteler, A comparison of consumer perceptions towards smart homes in the UK, Germany and Italy: reflections for policy and future research, *Tech. Anal. Strat. Manag.* 26 (10) (2014) 1176–1195, <https://doi.org/10.1080/09537325.2014.975788>.
- [74] G. Wood, R. Day, E. Creamer, D. van der Horst, A. Hussain, S. Liu, et al., Sensors, sense-making and sensitivities: UK household experiences with a feedback display on energy consumption and indoor environmental conditions, *Energy Res. Soc. Sci.* 55 (2019) 93–105, <https://doi.org/10.1016/j.erss.2019.04.013>.
- [75] E. Shove, G. Walker, What is energy for? Social practice and energy demand, *Theory Cult. Soc.* 31 (5) (2014) 41–58, <https://doi.org/10.1177/0263276414536746>.
- [76] E. Shove, What is wrong with energy efficiency? *Build. Res. Inf.* 46 (7) (2018) 779–789, <https://doi.org/10.1080/09613218.2017.1361746>.
- [77] R. Martin, S.P.A.K. Larsen, “I never look at a temperature device, I just feel it”: practical knowledge, smart technologies, and heating and cooling practices between Denmark and Australia, *Energy Res. Soc. Sci.* (2024) 108, <https://doi.org/10.1016/j.erss.2023.103389>.
- [78] K. Gram-Hanssen, S.J. Darby, “Home is where the smart is”? Evaluating smart home research and approaches against the concept of home, *Energy Res. Soc. Sci.* 37 (2018) 94–101, <https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.09.037>.
- [79] R. Galvin, Impediments to energy-efficient ventilation of German dwellings: a case study in Aachen, *Energ. Buildings* 56 (2013) 32–40, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.10.020>.
- [80] Deutsche Energie-Agentur, DENA-GEBÄUDEREPORT 2022: Daten, Zahlen, Fakten, 2022.
- [81] G.M. Huebner, M. McMichael, D. Shipworth, M. Shipworth, M. Durand-Daubin, A.J. Summerfield, The shape of warmth: temperature profiles in living rooms, *Build. Res. Inf.* 43 (2) (2015) 185–196, <https://doi.org/10.1080/09613218.2014.922339>.
- [82] N.A. Bruce-Konuah, R.V. Jones, A. Fuentes, A Comparison between Thermostat and Thermostatic Radiator Valve Setpoint Temperatures in UK Social Housing, Dublin Institute of Technology, Dublin, Ireland, 2018.
- [83] EnEV, Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden: EnEV, 2014.
- [84] B. Flyvbjerg, Five misunderstandings about case-study research, *Qual. Inq.* 12 (2) (2006) 219–245, <https://doi.org/10.1177/1077800405284363>.
- [85] M. Hazas, Y. Strengers, Promoting smart homes, in: E. Shove, J. Rinkinen, J. Torriti (Eds.), *Energy Fables: challenging Ideas in the Energy Sector*, Routledge, Abingdon, Oxon, New York, NY, 2019, pp. 78–87.
- [86] T.J. Pinch, W.E. Bijker, The social construction of facts and artifacts: or how the sociology of science and the sociology of technology might benefit each other, in: W.E. Bijker, T.P. Hughes, T.J. Pinch (Eds.), *The Social Construction of Technological Systems: New Directions in the Sociology and History of Technology* 1987, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 2012, pp. 11–44.
- [87] B. Latour, Pandora's Hope: Essays on the Reality of Science Studies, Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 1999.
- [88] S.B. Merriam, *Qualitative Research: A Guide to Design and Implementation*, Jossey-Bass, San Francisco, 2009.
- [89] J. Love, A.C.G. Cooper, From social and technical to socio-technical: designing integrated research on domestic energy use, *Indoor Built Environ.* 24 (7) (2015) 986–998, <https://doi.org/10.1177/1420326X15601722>.
- [90] U. Kuckartz, *Qualitative Inhaltsanalyse. Methoden, Praxis, Computerunterstützung*, 4th ed., Beltz, Weinheim, 2018.
- [91] C. Bantle, J. Wiersich, Gasverbrauch: Heizen wir weniger als sonst?: Analyse des aktuellen Gasverbrauchs von Haushaltskunden und kleineren bis mittleren Gewerbekunden (SLP-Kunden), 2022.
- [92] T. Laasch, E. Laasch, *Haustechnik*, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2013.
- [93] P.O. Fanger, *Thermal Comfort. Analysis and Applications in Environmental Engineering*, Danish Technical Press, Copenhagen, 1970.
- [94] E. Halawa, J. van Hoof, The adaptive approach to thermal comfort: a critical overview, *Energ. Buildings* 51 (2012) 101–110, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.04.011>.
- [95] K.M.A. Revell, N.A. Stanton, Case studies of mental models in home heat control: searching for feedback, valve, timer and switch theories, *Appl. Ergon.* 45 (3) (2014) 363–378, <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2013.05.001>.

- [96] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, *Energieeffizienzstrategie Gebäude: Wege zu einem nahezu klimaneutralen Gebäudebestand*. Berlin, 2015.
- [97] W. Kempton, Two theories of home heat control*, *Cognit. Sci.* 10 (1) (1986) 75–90, https://doi.org/10.1207/s15516709cog1001_3.
- [98] D. Enescu, A review of thermal comfort models and indicators for indoor environments, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 79 (2017) 1353–1379, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.175>.
- [99] P. Devine-Wright, W. Wrapson, V. Henshaw, S. Guy, Low carbon heating and older adults: comfort, cosiness and glow, *Build. Res. Inf.* 42 (3) (2014) 288–299, <https://doi.org/10.1080/09613218.2014.883563>.
- [100] E. Halawa, J. van Hoof, V. Soebarto, The impacts of the thermal radiation field on thermal comfort, energy consumption and control—a critical overview, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 37 (2014) 907–918, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.040>.
- [101] G. Gan, Analysis of mean radiant temperature and thermal comfort, *Build. Serv. Eng. Res. Technol.* 22 (2) (2001) 95–101, <https://doi.org/10.1191/014362401701524154>.
- [102] J. Goodhew, S. Pahl, S. Goodhew, C. Boomsma, Mental models: exploring how people think about heat flows in the home, *Energy Res. Soc. Sci.* 31 (2017) 145–157, <https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.06.012>.
- [103] Umweltbundesamt, Richtig heizen, Available from, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/richtig-heizen>, April 28, 2024.
- [104] N.R.W. Verbraucherzentrale, Saving energy at home: cheap, good and healthy housing, Available from: <https://www.verbraucherzentrale.de/sites/default/files/2019-05/energy-saving-tips-english-VZ-NRW.pdf>, April 28, 2024.
- [105] Citizens Advice, Save money heating your home, Available from: <https://www.citizensadvice.org.uk/consumer/energy/energy-supply/save-energy-at-home/heat-your-home-efficiently/>, April 28, 2024.
- [106] BMWK, Clever Heizkosten Sparen, Available from, <https://www.bmwk-energie.wende.de/EWD/Redaktion/Newsletter/2022/09/Meldung/topthema.html>, April 28, 2024.
- [107] S. Moeller, I. Weber, F. Schröder, A. Bauer, H. Harter, Apartment related energy performance gap – how to address internal heat transfers in multi-apartment buildings, *Energ. Buildings* (2020) 215, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109887>.
- [108] R. Galvin, M. Sunikka-Blank, Quantification of (p)rebound effects in retrofit policies – why does it matter? *Energy* 95 (2016) 415–424, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.12.034>.
- [109] T.-A. Köiv, A. Hamburg, M. Thalfeldt, J. Fadejev, Indoor climate of an unheated apartment and its impact on the heat consumption of adjacent apartments, in: *Proceeding of the 3rd International Conference on Urban Sustainability, Cultural Sustainability, Green Development, Green Structures and Clean Cars (USCUDAR '12)*, 2012, pp. 52–58.
- [110] J. Cockroft, A. Cowie, A. Samuel, P. Strachan, Potential energy savings achievable by zoned control of individual rooms in UK housing compared to standard central heating controls, *Energ. Buildings* 136 (2017) 1–11, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.11.036>.
- [111] S. Cozza, J. Chambers, M.K. Patel, Measuring the thermal energy performance gap of labelled residential buildings in Switzerland, *Energy Policy* (2020) 137, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.111085>.
- [112] R. Galvin, Targeting 'behavers' rather than behaviours: a 'subject-oriented' approach for reducing space heating rebound effects in low energy dwellings, *Energ. Buildings* 67 (2013) 596–607, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.08.065>.
- [113] P. Michnikowski, Allocation of heating costs with consideration to energy transfer from adjacent apartments, *Energ. Buildings* 139 (2017) 224–231, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.01.020>.
- [114] F. Schröder, B. Gill, M. Güth, T. Teich, A. Wolff, Entwicklung saisonaler Raumtemperaturverteilungen von klassischen zu modernen Gebäudestandards – Sind Rebound-Effekte unvermeidbar? *Bauphysik* 40 (3) (2018) 151–160, <https://doi.org/10.1002/bapi.201810017>.
- [115] M. Sahakian, H. Rau, E. Grealis, L. Godin, G. Wallenborn, J. Backhaus, et al., Challenging social norms to recraft practices: a living lab approach to reducing household energy use in eight European countries, *Energy Res. Soc. Sci.* (2021) 72, <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101881>.
- [116] S. Laakso, C.L. Jensen, E. Vadovics, E.-L. Apajalahti, F. Friis, A. Szöllösy, Towards sustainable energy consumption: challenging heating-related practices in Denmark, Finland, and Hungary, *J. Clean. Prod.* (2021) 308, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127220>.
- [117] M. Veselý, W. Zeiler, Personalized conditioning and its impact on thermal comfort and energy performance – a review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 34 (2014) 401–408, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.024>.
- [118] H. Rau, P. Moran, R. Manton, J. Goggins, Changing energy cultures? Household energy use before and after a building energy efficiency retrofit, *Sustain. Cities Soc.* (2020) 54, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101983>.
- [119] P. Tolmie, A. Crabtree, T. Rodden, J.A. Colley, E.A. Luger, "This has to be the cats" – personal data legibility in networked sensing systems, in: D. Gergle, M. R. Morris, P. Bjørn, J. Konstan (Eds.), *Proceedings of the 19th ACM Conference on Computer-Supported Cooperative Work & Social Computing - CSCW '16*, ACM Press, New York, New York, USA, 2016, pp. 490–501.
- [120] D. Teli, S. Langer, L. Ekberg, J.-O. Dalenbäck, Indoor temperature variations in Swedish households: implications for thermal comfort, in: D. Johansson, H. Bagge, Å. Wahlström (Eds.), *Cold Climate HVAC 2018: Sustainable Buildings in Cold Climates*, Springer International Publishing, Cham, 2019, pp. 835–845.
- [121] A. Bauer, S. Möller, B. Gill, F. Schröder, When energy efficiency goes out the window: how highly insulated buildings contribute to energy-intensive ventilation practices in Germany, *Energy Res. Soc. Sci.* (2021) 72, <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101888>.
- [122] T. Trainer, Some inconvenient theses, *Energy Policy* 64 (2014) 168–174, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.06.008>.
- [123] N. Spurling, A. McMeekin, E. Shove, D. Southerton, D. Welch, *Interventions in Practice: Re-framing Policy Approaches to Consumer Behaviour*, 2013.
- [124] E. Haselsteiner (Ed.), *Robuste Architektur Lowtech Design*, Edition Detail, München, 2022.

Anhang B Weitere Veröffentlichungen

B.1 *GHG Emissions and the Rural-Urban Divide* (Gill & Moeller 2018)

Gill, Bernhard; Moeller, Simon (2018): GHG Emissions and the Rural-Urban Divide. A Carbon Footprint Analysis Based on the German Official Income and Expenditure Survey. In: Ecological Economics 145, S. 160–169.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.09.004>.

Wird der Klimawandel durch die anhaltende Urbanisierung automatisch abgeschwächt, wie es die Hypothese der „dichten Städte“ vorschlägt? In diesem Artikel wird die Frage auf Grundlage der deutschen amtlichen Einkommens- und Verbrauchsstichprobe (EVS) von 2013 untersucht. Dazu werden die Gesamtausgaben der Haushalte in 44 Konsumgüterkategorien (COICOP) aufgeschlüsselt und mit deren jeweiligen Treibhausgasintensitäten kombiniert, wie sie in Statistiken der umweltökonomischen Gesamtrechnung zu finden sind. Die Ergebnisse zeigen, dass der Dichteeffekt von Städten in Deutschland einige Treibhausgasemissionen einspart, aber die Singularisierung der Haushalte, höhere Einkommen und größere Konsummöglichkeiten in Städten in die entgegengesetzte Richtung wirken. Daher liegen kleinere und größere Gemeinden in Bezug auf die Pro-Kopf-Emissionen mehr oder weniger gleichauf. Haushalte auf dem Land sind jedoch stärker von Umweltsteuern betroffen, die im Zuge der deutschen Energiewende-Politik eher auf den direkten als auf den indirekten Energieverbrauch erhoben werden. Dies wird im Artikel als Problem der sozialen Gerechtigkeit zwischen Stadt und Land diskutiert.

B.2 *Enablers and Barriers to the Sustainable Transformation of Urban Districts* (Moeller et al. 2023)

Moeller, Simon; Leonhardt, Sven; Schneider, Michael (2023): Enablers and barriers to the sustainable transformation of urban districts. (Interim) results from six lighthouse projects. In: Sven Leonhardt, Tobias Nusser, Jürgen Görres, Sven Rosinger, Gerhard Stryi-Hipp und Martin Eckhard (Hg.): Innovations and challenges of the energy transition in smart city districts: DE GRUYTER, S. XV–LVIII.
DOI: <https://doi.org/10.1515/9783110777567>.

Innovative Lösungen für die Energiewende auf Quartiersebene zu entwickeln und in Leuchtturmprojekten umzusetzen, war das Ziel der Förderinitiative „Solares Bauen/Energieeffiziente Stadt“. In diesem Rahmen förderten das *Bundesministerium für Bildung und Forschung* sowie das *Bundesministerium für Wirtschaft und Energie* seit 2016 Kommunen, Forschungsinstitute

und Praxispartner. Ziel war es, durch interdisziplinäre Zusammenarbeit und die Partizipation von Bürgern innovative und nachhaltige Quartierskonzepte in Reallaboren zu entwickeln.

Der Artikel bietet einen Überblick über die sechs Projekte, ihren typischen Verlauf sowie Chancen und Hindernisse, die sich in der Projektlaufzeit hinsichtlich der Erreichung klimaneutraler Quartiere aufgetan haben. Inwiefern ist es den Projekten gelungen, dem Anspruch an Leuchtturmprojekte gerecht zu werden und welche Herausforderungen haben sich in der Zusammenarbeit, aber auch bei den äußeren Rahmenbedingungen gezeigt? Die Analyse zeichnet die Innovationsdynamik nach, beschreibt, welche Akteure zur Realisierung der Ziele besonders relevant sind und wie mit den Herausforderungen umgegangen wird.

Für die Analyse wurden zunächst Projektprotokolle und Präsentationen ausgewertet. Zusätzlich wurden zehn Interviews mit den Projektkoordinatoren und weiteren, von diesen empfohlenen Ansprechpartnern geführt und mithilfe qualitativer Inhaltsanalyse ausgewertet.

Die Ergebnisse zeigen die hohe Bedeutung von Bedarfsreduktionen im Bestand, der lokalen Erschließung aller verfügbaren Energiequellen sowie einer smarten Sektorenkopplung von Strom, Wärme und Mobilität für die nachhaltige Transformation von Quartieren. Zudem verdeutlichen die Ergebnisse, dass für eine erfolgreiche Umsetzung von Nachhaltigkeitstransformationen der Fokus von einzelnen Gebäuden weg hin zur Quartiersebene gelegt werden muss. In Bezug auf die Wohnungswirtschaft zeigt die Analyse, dass Wohnungsunternehmen eine zentrale Rolle bei der nachhaltigen Transformation der Quartiere einnehmen. Allerdings bewegen sie sich im Spannungsfeld zwischen wirtschaftlicher Tragfähigkeit, warmmietneutralen Mieten und Nachhaltigkeitszielen. In den Reallaboren stoßen innovative Energiesystemkonzepte, die auf hohen Heizenergiebedarfsreduktionen im bestehenden Gebäudebestand beruhen, daher häufig auf Widerstand von Seiten der Wohnungsunternehmen. Schwierigkeiten entstehen dort, wo technisch ambitionierte und innovative Konzepte der Forschung mit dem risikoaversen Ansatz vieler Wohnungsbaugesellschaften kombiniert werden müssen.

Die Untersuchung der Verlaufspfade der sechs Leuchtturmprojekte betont die Bedeutung eines gegenseitigen Vertrauensaufbaus und einer vertieften Zusammenarbeit zwischen Forschungsakteuren, Wohnungswirtschaft und anderen lokalen Akteuren, um Widerstände gegen die nachhaltige Transformation von Wohnquartieren abzubauen und realisierbare Lösungen zu entwickeln. Die Ergebnisse geben außerdem Hinweise darauf, wo Änderungen in den Rahmenbedingungen notwendig sind, um neue Konzepte für klimaneutrale Quartiere umzusetzen.

B.3 *Nutzerorientierte Technologieentwicklung am Beispiel eines „intelligenten“ Heizungssystems (Hickfang et al. 2020)*

Hickfang, Theo; Moeller, Simon; Schneider, Michael; Gill, Bernhard (2020): Nutzerorientierte Technologieentwicklung am Beispiel eines „intelligenten“ Heizungssystems. In: Tim Neumann, Uwe Ziesler und Tobias Teich (Hg.): Kooperation und Innovation für eine nachhaltige Stadtentwicklung. Forschung mit innovativen Kommunen. 1st ed. 2020. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden; Imprint: Springer Spektrum, S. 169–178. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-658-29554-7_10.

Die Entwicklung von Technologien zur Steigerung der Energieeffizienz in Wohngebäuden, wie etwa intelligenter Heizungssysteme, erfordert die Integration nutzerorientierter Ansätze, um Akzeptanz, Bedienfreundlichkeit und Effizienz sicherzustellen. Dieser Beitrag analysiert im Rahmen eines Reallabors zur Entwicklung nachhaltiger Energiesysteme auf Quartiersebene die vielfältigen Erwartungen und Bedürfnisse von Bewohnern, technischen Dienstleistern und Entwicklern, die mit der Umstellung auf intelligente Gebäudeautomationssysteme verbunden sind. Durch leitfadengestützte Interviews werden Perspektiven zur Automation und Benutzerkontrolle systematisch erfasst und darauf aufbauend die Haltungen in Akteurstypologien zusammengefasst. Dabei zeigt sich auf Nutzerseite zunächst ein Spannungsfeld zwischen technikdistanzierten Nutzern, die eine passive Haltung einnehmen und einfach zu bedienende, unkomplizierte Lösungen präferieren, und technikaffinen Anwendern, die Autonomie und eine größere Bandbreite an Funktionalitäten schätzen. Zusätzlich divergieren aber auch die Vorstellungen zwischen Gebäudedienstleistern, die vor allem die durch die Digitalisierung der Gebäudesysteme freigeschalteten Potenziale zur Fernwartung begrüßen, und IT-Entwicklern, die dezentrale, autonome und gegenüber äußeren Eingriffen abgeschirmte Systeme bevorzugen.

Die Diskussion zeigt, dass ein ausgewogener Kompromiss zwischen automatisierten und nutzerkontrollierten Lösungen notwendig ist, um die Akzeptanz verschiedener Akteursgruppen zu erhöhen und bedarfsgerechte Systeme zu entwickeln. Der Beitrag unterstreicht die Relevanz nutzerorientierter Ansätze für die Entwicklung intelligenter Heiztechnologien und liefert erste Impulse für zukünftige Design- und Implementierungsprozesse.

B.4 *When energy efficiency goes out the window (Bauer et al. 2021)*

Bauer, Amelie; Möller, Simon; Gill, Bernhard; Schröder, Franz (2021): When energy efficiency goes out the window: How highly insulated buildings contribute to energy-intensive ventilation practices in Germany. In: Energy Research & Social Science 72, Artikel 101888. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101888>.

Viele nationale und internationale Klimaziele konzentrieren sich auf die Senkung des Ressourcenverbrauchs im Gebäudesektor. In Deutschland besteht ein wesentlicher Ansatz zur Erreichung dieses Ziels in der erhöhten Wärmedämmung von Gebäuden. Dadurch sollen mit möglichst wenig Heizenergie durchschnittliche Raumtemperaturen von 19 °C erreicht werden. Untersuchungen zur Energy-Performance-Gap zeigen jedoch, dass die prognostizierten Heizenergieeinsparungen in der Realität selten erreicht werden.

Auf der Grundlage einer Fallstudie, die in sechs energieeffizienten Mehrfamilienhäusern in Süddeutschland durchgeführt wurde, bietet dieser Beitrag eine auf der Praxistheorie basierende Erklärung: Demnach ist es eine Diskrepanz zwischen den Komfortpraktiken der Haushalte und den Eigenschaften des Gebäudes, die zur Energy-Performance-Gap beiträgt. Während Haushalte unterschiedliche und sich ändernde Wärmebedürfnisse haben und eine schnelle Anpassung der Temperaturen wünschen, bieten energieeffiziente Gebäude homogene Temperaturen und träge Temperaturänderungen. Dies führt dazu, dass Haushalte ihre Fenster oft und über längere Zeiträume öffnen, um ihre thermischen Komfortbedürfnisse zu erfüllen – auch mitten im Winter. Die direkten und indirekten Verluste an Heizenergie durch die beobachteten Lüftungspraktiken können zur Energy-Performance-Gap energieeffizienter Gebäude beitragen.

Die Modellrechnung einer Zwei-Raum-Wohnung zeigt, dass unter bestimmten Voraussetzungen (Wärmedurchlasskoeffizient der Außenhülle, Außentemperatur und Temperaturspreizung der Innentemperaturen) Temperaturunterschiede zwischen Räumen trotz deutlich geringerer Durchschnittstemperaturen zu einer Erhöhung des Energieverbrauchs führen können.

Würden den Vorschriften für energieeffiziente Gebäude realistischere Annahmen über die Komfortpraktiken der Haushalte zugrunde gelegt, könnten Planer und Entwickler im Gebäudedesign darauf reagieren. So ließen sich realitätsnähere Energieeinsparungen berechnen, um zur Verringerung der Energy-Performance-Gap beizutragen.

B.5 *Energiesparend Heizen durch intelligente Steuerungstechnik* **(Moeller 2022)**

Moeller, Simon (2022): Energiesparend Heizen durch intelligente Steuerungstechnik – Die Bedeutung von Vertrauen, Verständlichkeit und Vermittlung in der Mensch-Technik-Interaktion. In: Sven Leonhardt, Tim Neumann, Daniel Kretz, Tobias Teich und Mirko Boddach (Hg.): Innovation und Kooperation auf dem Weg zur All Electric Society. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 239–288.

DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-658-38706-8_12

Mit über 17 % trägt allein die Versorgung des Wohngebäudesektors mit Raumwärme wesentlich zum Endenergieverbrauch in Deutschland bei. Um eine Elektrifizierung der Wärmeversorgung

in Wohngebäuden zu ermöglichen und dadurch eine rein regenerative Versorgung zu erleichtern, könnte die Steigerung der Energieeffizienz durch Digitalisierung und Automatisierung der Wärmeversorgung einen wichtigen Baustein bilden. In Wohngebäuden ist die Digitalisierung untrennbar mit den Stichworten Gebäudeautomatisierung, Smart-Home-Technologie und Energiemanagement verbunden. Allerdings fristen solche Ansätze im Wohngebäudesektor trotz der oft vorhergesagten Potenziale ein Nischendasein.

Der Beitrag untersucht anhand eines Pilotprojektes, bei dem in einem Gebäudekomplex mit 137 Wohneinheiten eine entsprechende Technologie implementiert wurde, inwieweit Gebäudeautomation durch Smart-Home-Technologien zu mehr Energieeffizienz im Wohngebäudesektor beitragen kann und welche Rolle die Mensch-Technik-Interaktion zum Erreichen dieses Ziels spielt. Hierzu werden zunächst vorhandene Studien und Potenzialanalysen herangezogen, bevor Ergebnisse aus einem Jahr Reallabor in dem Wohngebäudekomplex vorgestellt werden.

Die Ergebnisse verdeutlichen die Bedeutung der Interaktion zwischen verschiedenen Nutzergruppen und der Technik für die Entwicklung, Implementierung und Nutzung von Smart-Home-Technologien. In der Praxis zeigen sich vielfältige Probleme, die aus der Varianz von Alltagspraktiken, den unterschiedlichen Kompetenzen und Erfahrungen mit digitalen Technologien bis hin zu Kopplungsproblemen verschiedener Infrastrukturen resultieren. Einspareffekte hängen wesentlich davon ab, wie der Lernprozess bei Nutzern und Entwicklern verläuft und wie der gegenseitige Anpassungsprozess gestaltet wird. Bewohner müssen lernen, mit welchen technischen Eigenheiten sie es zu tun haben, während Entwickler lernen müssen, wie sie mit den unterschiedlichen Bedürfnissen der Bewohner umgehen können.

So lautet denn auch das Fazit, dass insbesondere die Vermittlung zwischen Bewohnern und Technik zentral ist, um diesen Technologien zum Durchbruch zu verhelfen und bedeutende Einspareffekte zu ermöglichen.

Literaturverzeichnis

- Abrahamse, Wokje; Steg, Linda; Vlek, Charles; Rothengatter, Talib (2005): A review of intervention studies aimed at household energy conservation. In: *Journal of Environmental Psychology* 25 (3), S. 273–291. DOI: 10.1016/j.jenvp.2005.08.002.
- Ahlrichs, Jakob; Rockstuhl, Sebastian; Tränkler, Timm; Wenninger, Simon (2020): The impact of political instruments on building energy retrofits: A risk-integrated thermal Energy Hub approach. In: *Energy Policy* 147, S. 1–17. DOI: 10.1016/j.enpol.2020.111851.
- Akrich, Madeleine (1992): The De-scription of Technical Objects. In: Wiebe E. Bijker und John Law (Hg.): *Shaping Technology/Building Society. Studies in Sociotechnical Change*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, S. 205–224, zuletzt geprüft am 25.06.2006.
- Alaa, Mussab; Zaidan, A. A.; Zaidan, B. B.; Talal, Mohammed; Kiah, M.L.M. (2017): A review of smart home applications based on Internet of Things. In: *Journal of Network and Computer Applications* 97, S. 48–65. DOI: 10.1016/j.jnca.2017.08.017.
- Andersen, Rune Korsholm; Olesen, Bjarne W.; Toftum, Jørn (2009): Occupant Behaviour with regard to Control of the Indoor Environment. Ph.D. Thesis. Technical University of Denmark (DTU), Kgs. Lyngby (Denmark).
- Aste, Niccolò; Manfren, Massimiliano; Marenzi, Giorgia (2017): Building Automation and Control Systems and performance optimization: A framework for analysis. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 75, S. 313–330. DOI: 10.1016/j.rser.2016.10.072.
- Ástmarsson, Björn; Jensen, Per Anker; Maslesa, Esmir (2013): Sustainable renovation of residential buildings and the landlord/tenant dilemma. In: *Energy Policy* 63, S. 355–362. DOI: 10.1016/j.enpol.2013.08.046.
- Auer, Thomas; Franke, Laura (2020): Robuste Architektur. In: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) (Hg.): *Lowtech im Gebäudebereich*. Fachsymposium TU Berlin 17.05.2019, Bd. 21. Bonn (für die Praxis, 21), S. 40–53.
- Auer, Thomas; Negelein, Bertram von (2023): Robust Building Design. In: Edeltraud Haselsteiner (Hg.): *Robust architecture. Low-tech design*. First edition. München: Edition Detail, S. 72–77.
- Aydin, Yusuf Cihat; Mirzaei, Parham A.; Akhavannasab, Sanam (2019): On the relationship between building energy efficiency, aesthetic features and marketability: Toward a novel policy for energy demand reduction. In: *Energy Policy* 128, S. 593–606. DOI: 10.1016/j.enpol.2018.12.036.
- Bauer, Amelie; Möller, Simon; Gill, Bernhard; Schröder, Franz (2021): When energy efficiency goes out the window: How highly insulated buildings contribute to energy-intensive ventilation practices in Germany. In: *Energy Research & Social Science* 72, Artikel 101888. DOI: 10.1016/j.erss.2020.101888.
- BDEW (2024): Entwicklung der Beheizungsstruktur des Wohnungsbestandes in Deutschland seit 1995. Online verfügbar unter <https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/beheizungsstruktur-wohnungsbestand/>, zuletzt aktualisiert am 06.01.2022, zuletzt geprüft am 06.01.2022.
- Beckert, Jens (2024): *Verkaufte Zukunft. Warum der Kampf gegen den Klimawandel zu scheitern droht | Der Wegweiser zu einer realistischen Klimapolitik*. Originalausgabe, 1. Auflage. Berlin: Suhrkamp.

- Behr, Sophie; Küçük, Merve; Neuhoﬀ, Karsten (2023): Energetische Modernisierung von Gebäuden sollte durch Mindeststandards und verbindliche Sanierungsziele beschleunigt werden. In: *DIW aktuell* (87), S. 1–7.
- Behr, Sophie M.; Köveker, Till; Küçük, Merve (2024): Wärmemonitor 2023: Trotz weiter gestiegener Preise sparen private Haushalte weniger Heizenergie.
- Berneiser, Jessica; Auerswald, Sven; Maier, Diana; Gözl, Sebastian; Carbonare, Nicolás; Pflug, Thibault (2024): Feeling the breeze? Ventilation practices and occupant requirements for mechanical ventilation in residential buildings. In: *Energy and Buildings* 302, S. 113702. DOI: 10.1016/j.enbuild.2023.113702.
- Beucker, Severin; Bergesen, Joseph D.; Gibon, Thomas (2016): Building Energy Management Systems: Global Potentials and Environmental Implications of Deployment. In: *Journal of Industrial Ecology* 20 (2), S. 223–233. DOI: 10.1111/jiec.12378.
- Beucker, Severin; Hinterholzer, Simon (2022): Decarbonization Potential of Building Automation: Results of a German Study and Outlook. In: 2022 International Conference on ICT for Sustainability (ICT4S). 2022 International Conference on ICT for Sustainability (ICT4S). Plovdiv, Bulgaria, 13.06.2022 - 17.06.2022: IEEE, S. 119–127.
- Blühdorn, Ingolfur (2020): Die Gesellschaft der Nicht-Nachhaltigkeit. Skizze einer umweltsoziologischen Gegenwartsdiagnose. In: Ingolfur Blühdorn (Hg.): Nachhaltige Nicht-Nachhaltigkeit. Bielefeld, Germany: transcript Verlag, S. 83–160.
- Bordass, Bill; Cohen, Robert; Field, John (2004): Energy performance of non-domestic buildings: closing the credibility gap. International Conference on Improving Energy Efficiency in Commercial Buildings. Frankfurt, Germany.
- Bourdieu, Pierre (1990): The Logic of Practice. Cambridge: Polity Press.
- Brager, Gail S.; de Dear, Richard J. (1998): Thermal adaptation in the built environment: a literature review. In: *Energy and Buildings* 27, S. 83–96.
- Brager, Gail S.; de Dear, Richard J. (2003): Historical and Cultural Influences on Comfort Expectations. In: Raymond Cole und Richard Lorch (Hg.): Buildings, culture and environment. Informing local and global practices. Oxford UK, Malden MA: Blackwell Pub, S. 177–201.
- Brehmer, Berndt (1992): Dynamic decision making: Human control in complex systems. In: *Acta Psychologica* 81, S. 211–241. DOI: 10.1016/0001-6918(92)90019-A.
- Bremer, Christina; Albrecht, Jeannie; Brush, A. J.; Hazas, Mike (2020): When Mental Models Grow (C)old: A Cognitive Perspective on Home Heating Automation. In: *IEEE Pervasive Comput.* 19 (4), S. 48–52. DOI: 10.1109/MPRV.2020.3019909.
- Bruce-Konuah, N. A.; Jones, R. V.; Fuertes, A. (2018): A comparison between thermostat and thermostatic radiator valve setpoint temperatures in UK social housing. SEEDS 2018: 4th International SEEDS Conference 2018 Sustainable Ecological Engineering Design for Society. Dublin, Ireland. Online verfügbar unter <https://dspace.plymouth.ac.uk/handle/10026.1/12464>.
- Brynjarsdóttir, Hrönn; Håkansson, Maria; Pierce, James; Baumer, Eric P. S.; DiSalvo, Carl; Sengers, Phoebe (2012): Sustainably Unpersuaded: How Persuasion Narrows Our Vision of Sustainability. In: *CHI '12: Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, S. 947–956. DOI: 10.1145/2207676.2208539.

- Buchanan, Kathryn; Russo, Riccardo; Anderson, Ben (2015): The question of energy reduction: The problem(s) with feedback. In: *Energy Policy* 77, S. 89–96. DOI: 10.1016/j.enpol.2014.12.008.
- Buildings Performance Institute Europe (BPIE) (Hg.) (2023): EU Buildings Climate Tracker: A call for faster and bolder action. Online verfügbar unter <https://www.bpie.eu/publication/eu-buildings-climate-tracker-a-call-for-faster-and-bolder-action/>, zuletzt geprüft am 07.11.2024.
- Burgess, Jacquelin; Nye, Michael (2008): Re-materialising energy use through transparent monitoring systems. In: *Energy Policy* 36 (12), S. 4454–4459. DOI: 10.1016/j.enpol.2008.09.039.
- Cali, Davide; Osterhage, Tanja; Streblow, Rita; Müller, Dirk (2016): Energy performance gap in refurbished German dwellings: Lesson learned from a field test. In: *Energy and Buildings* 127, S. 1146–1158. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.05.020.
- Candido, Christhina; de Dear, Richard J. (2012): From thermal boredom to thermal pleasure: a brief literature review. In: *Ambient. constr.* 12 (1), S. 81–90. DOI: 10.1590/S1678-86212012000100006.
- Chappells, Heather; Shove, Elizabeth (2005): Debating the future of comfort: environmental sustainability, energy consumption and the indoor environment. In: *Building Research & Information* 33 (1), S. 32–40. DOI: 10.1080/0961321042000322762.
- Chiu, Lai Fong; Lowe, Robert; Raslan, Rokia; Altamirano-Medina, Hector; Wingfield, Jez (2014): A socio-technical approach to post-occupancy evaluation: interactive adaptability in domestic retrofit. In: *Building Research & Information* 42 (5), S. 574–590. DOI: 10.1080/09613218.2014.912539.
- Clancey, William J. (1997): Situated cognition. On human knowledge and computer representations. Cambridge: Cambridge University Press (Learning in doing).
- Cole, Raymond J.; Brown, Zosia (2009): Reconciling human and automated intelligence in the provision of occupant comfort. In: *Intelligent Buildings International* 1 (1), S. 39–55. DOI: 10.3763/inbi.2009.0007.
- Cozza, Stefano; Chambers, Jonathan; Patel, Martin K. (2020): Measuring the thermal energy performance gap of labelled residential buildings in Switzerland. In: *Energy Policy* 137, Artikel 111085. DOI: 10.1016/j.enpol.2019.111085.
- D’Oca, Simona; Chen, Chien-Fei; Hong, Tianzhen; Belafi, Zsafia (2017): Synthesizing building physics with social psychology: An interdisciplinary framework for context and occupant behavior in office buildings. In: *Energy Research & Social Science* 34, S. 240–251. DOI: 10.1016/j.erss.2017.08.002.
- Darby, Sarah J. (2018): Smart technology in the home: time for more clarity. In: *Building Research & Information* 46 (1), S. 140–147. DOI: 10.1080/09613218.2017.1301707.
- Day, Julia K.; Gunderson, David E. (2015): Understanding high performance buildings: The link between occupant knowledge of passive design systems, corresponding behaviors, occupant comfort and environmental satisfaction. In: *Building and Environment* 84, S. 114–124. DOI: 10.1016/j.buildenv.2014.11.003.
- Day, Julia K.; Heschong, Lisa (2016): Understanding behavior potential: the role of building interfaces. ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings. Pacific Grove, CA, USA.

- Day, Julia K.; McIlvennie, Claire; Brackley, Connor; Tarantini, Marianonietta; Piselli, Cristina; Hahn, Jakob et al. (2020): A review of select human-building interfaces and their relationship to human behavior, energy use and occupant comfort. In: *Building and Environment* 178, S. 106920. DOI: 10.1016/j.buildenv.2020.106920.
- Day, Julia K.; O'Brien, William (2017): Oh behave! Survey stories and lessons learned from building occupants in high-performance buildings. In: *Energy Research & Social Science* 31, S. 11–20. DOI: 10.1016/j.erss.2017.05.037.
- de Dear, Richard J. (2011): Revisiting an old hypothesis of human thermal perception: alliesthesia. In: *Building Research & Information* 39 (2), S. 108–117. DOI: 10.1080/09613218.2011.552269.
- Delmas, Magali A.; Fischlein, Miriam; Asensio, Omar I. (2013): Information strategies and energy conservation behavior: A meta-analysis of experimental studies from 1975 to 2012. In: *Energy Policy* 61, S. 729–739. DOI: 10.1016/j.enpol.2013.05.109.
- dena (2016): Der dena-Gebäudereport 2016. Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand. Unter Mitarbeit von Uwe Bigalke, Aline Armbruster, Franziska Lukas, Oliver Krieger, Cornelia Schuch und Jan Kunde. Hg. v. Deutsche Energie-Agentur (dena). Berlin. Online verfügbar unter <https://www.dena.de/newsroom/publikationsdetailansicht/pub/broschuere-dena-gebaudereport-2016-printversion/>, zuletzt geprüft am 30.05.2021.
- dena (2023): DENA-GEBÄUDEREPORT 2024. Zahlen, Daten, Fakten zum Klimaschutz im Gebäudebestand. Hg. v. Deutsche Energie-Agentur (dena).
- Dörre, Klaus (2022): Gesellschaft in der Zangenkrise. Vom Klassen- zum sozial-ökologischen Transformationskonflikt. In: Klaus Dörre, Madeleine Holzschuh, Jakob Köster und Johanna Sittel (Hg.): Abschied von Kohle und Auto? Sozial-ökologische Transformationskonflikte um Energie und Mobilität. 2. Auflage. Weinheim: Campus Verlag (International Labour Studies, 26), S. 23–70.
- El-Shagi, Makram; Michelsen, Claus; Rosenschon, Sebastian (2014): Regulation, Innovation and Technology Diffusion: Evidence from Building Energy Efficiency Standards in Germany. In: *SSRN Journal*. DOI: 10.2139/ssrn.2432978.
- Enescu, Diana (2017): A review of thermal comfort models and indicators for indoor environments. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 79, S. 1353–1379. DOI: 10.1016/j.rser.2017.05.175.
- Eon, Christine; Breadsell, Jessica K.; Morrison, Gregory M.; Byrne, Joshua (2017a): The home as a system of practice and its implications for energy and water metabolism. In: *Sustainable Production and Consumption* 13, S. 48–59. DOI: 10.1016/j.spc.2017.12.001.
- Eon, Christine; Liu, Xin; Morrison, Gregory M.; Byrne, Joshua (2018): Influencing energy and water use within a home system of practice. In: *Energy and Buildings* 158, S. 848–860. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.10.053.
- Eon, Christine; Morrison, Gregory M.; Byrne, Joshua (2017b): Unraveling everyday heating practices in residential homes. In: *Energy Procedia* 121, S. 198–205. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.08.018.
- Fabi, Valentina; Andersen, Rune Vinther; Corgnati, Stefano; Olesen, Bjarne W. (2012): Occupants' window opening behaviour: A literature review of factors influencing occupant behaviour and models. In: *Building and Environment* 58, S. 188–198. DOI: 10.1016/j.buildenv.2012.07.009.

- Fang, L.; Clausen, G.; Fanger, P. O. (1998): Impact of Temperature and Humidity on the Perception of Indoor Air Quality. In: *Indoor Air* 8 (2), S. 80–90. DOI: 10.1111/j.1600-0668.1998.t01-2-00003.x.
- Fanger, P. O. (1970): Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering: Copenhagen: Danish Technical Press.
- Feijter, Frank J. de; van Vliet, Bas J.M. (2021): Housing retrofit as an intervention in thermal comfort practices: Chinese and Dutch householder perspectives. In: *Energy Efficiency* 14 (1), S. 1–18. DOI: 10.1007/s12053-020-09919-8.
- Felder, Lars; Haan, Peter; Bach, Stefan; Schill, Wolf-Peter (2023): Heating and Electricity Expenses: Saving Incentives Not Impacting Basic Income Recipients.
- Flyvbjerg, Bent (2006): Five Misunderstandings About Case-Study Research. In: *Qualitative Inquiry* 12 (2), S. 219–245. DOI: 10.1177/1077800405284363.
- Frederiks, Elisha; Stenner, Karen; Hobman, Elizabeth (2015): The Socio-Demographic and Psychological Predictors of Residential Energy Consumption: A Comprehensive Review. In: *Energies* 8 (1), S. 573–609. DOI: 10.3390/en8010573.
- Gafsi, Afef; Lefebvre, Gilles (2003): Stolen heating or cooling energy evaluation in collective buildings using model inversion techniques. In: *Energy and Buildings* 35 (3), S. 293–303. DOI: 10.1016/S0378-7788(02)00093-2.
- Galassi, Veronica; Madlener, Reinhard (2018): Shall I open the window? Policy implications of thermal-comfort adjustment practices in residential buildings. In: *Energy Policy* 119, S. 518–527. DOI: 10.1016/j.enpol.2018.03.015.
- Galvin, Ray (2013a): Impediments to energy-efficient ventilation of German dwellings: A case study in Aachen. In: *Energy and Buildings* 56, S. 32–40. DOI: 10.1016/j.enbuild.2012.10.020.
- Galvin, Ray (2013b): Targeting ‘behavers’ rather than behaviours: A ‘subject-oriented’ approach for reducing space heating rebound effects in low energy dwellings. In: *Energy and Buildings* 67, S. 596–607. DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.08.065.
- Galvin, Ray (2014): Making the ‘rebound effect’ more useful for performance evaluation of thermal retrofits of existing homes: Defining the ‘energy savings deficit’ and the ‘energy performance gap’. In: *Energy and Buildings* 69, S. 515–524. DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.11.004.
- Galvin, Ray (2017): Humans and stuff: Interweaving social and physical science in energy policy research. In: *Energy Research & Social Science* 26, S. 98–102. DOI: 10.1016/j.erss.2017.01.012.
- Galvin, Ray (2024): The economic losses of energy-efficiency renovation of Germany's older dwellings: The size of the problem and the financial challenge it presents. In: *Energy Policy* 184, S. 113905. DOI: 10.1016/j.enpol.2023.113905.
- Galvin, Ray; Sunikka-Blank, Minna (2016a): Quantification of (p)rebound effects in retrofit policies – Why does it matter? In: *Energy* 95, S. 415–424. DOI: 10.1016/j.energy.2015.12.034.
- Galvin, Ray; Sunikka-Blank, Minna (2016b): Schatzkian practice theory and energy consumption research: Time for some philosophical spring cleaning? In: *Energy Research & Social Science* 22, S. 63–68. DOI: 10.1016/j.erss.2016.08.021.

- Gibson, James J. (2014 (1979)): The Ecological Approach to Visual Perception. New York, NY: Psychology Press. Online verfügbar unter <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.4324/9781315740218/ecological-approach-visual-perception-james-gibson>.
- Giddens, Anthony (1986): The Constitution of Society. Outline of the theory of structuration. First paperback edition. Berkeley, Los Angeles: University of California Press.
- Gill, Bernhard; Moeller, Simon (2018): GHG Emissions and the Rural-Urban Divide. A Carbon Footprint Analysis Based on the German Official Income and Expenditure Survey. In: *Ecological Economics* 145, S. 160–169. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2017.09.004.
- Goodhew, Julie; Pahl, Sabine; Goodhew, Steve; Boomsma, Christine (2017): Mental models: Exploring how people think about heat flows in the home. In: *Energy Research & Social Science* 31, S. 145–157. DOI: 10.1016/j.erss.2017.06.012.
- Gram-Hanssen, Kirsten (2010): Residential heat comfort practices: understanding users. In: *Building Research & Information* 38 (2), S. 175–186. DOI: 10.1080/09613210903541527.
- Gram-Hanssen, Kirsten (2013): Efficient technologies or user behaviour, which is the more important when reducing households' energy consumption? In: *Energy Efficiency* 6 (3), S. 447–457. DOI: 10.1007/s12053-012-9184-4.
- Grandclément, Catherine; Karvonen, Andrew; Guy, Simon (2015): Negotiating comfort in low energy housing: The politics of intermediation. In: *Energy Policy* 84, S. 213–222. DOI: 10.1016/j.enpol.2014.11.034.
- Großmann, Katrin (2017): Energiearmut als multiple Deprivation vor dem Hintergrund diskriminierender Systeme. In: Katrin Großmann, André Schaffrin und Christian Smigiel (Hg.): Energie und soziale Ungleichheit. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 55–78.
- Grubler, Arnulf; Johansson, Thomas B.; Mundaca, Luis; Nakicenovic, Nebojsa; Pachauri, Shonali; Riahi, Keywan et al. (2012): Chapter 1 - Energy Primer. In: Global Energy Assessment - Toward a Sustainable Future. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA and the International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, S. 99–150. Online verfügbar unter www.globalenergyassessment.org.
- Guasselli, Fernanda; Vavouris, Apostolos; Stankovic, Lina; Stankovic, Vladimir; Didierjean, Sébastien; Gram-Hanssen, Kirsten (2024): Smart energy technologies for the collective: Time-shifting, demand reduction and household practices in a Positive Energy Neighbourhood in Norway. In: *Energy Research & Social Science* 110, Artikel 103436. DOI: 10.1016/j.erss.2024.103436.
- Guelpa, Elisa; Verda, Vittorio (2021): Demand response and other demand side management techniques for district heating: A review. In: *Energy* 219, Artikel 119440. DOI: 10.1016/j.energy.2020.119440.
- Guerra Santin, Olivia (2011): Behavioural Patterns and User Profiles related to energy consumption for heating. In: *Energy and Buildings* 43 (10), S. 2662–2672. DOI: 10.1016/j.enbuild.2011.06.024.
- Guerra Santin, Olivia (2013): Occupant behaviour in energy efficient dwellings: evidence of a rebound effect. In: *Journal of Housing and the Built Environment* 28 (2), S. 311–327. DOI: 10.1007/s10901-012-9297-2.

- Guerra Santin, Olivia (2017): Relationship Between Building Technologies, Energy Performance and Occupancy in Domestic Buildings. In: David V. Keyson, Olivia Guerra-Santin und Dan Lockton (Hg.): *Living Labs. Design and Assessment of Sustainable Living*: Springer International Publishing AG Switzerland, S. 333–344.
- Guerra-Santin, Olivia; Itard, Laure (2010): Occupants' behaviour: determinants and effects on residential heating consumption. In: *Building Research & Information* 38 (3), S. 318–338. DOI: 10.1080/09613211003661074.
- Gupta, Rajat; Barnfield, Laura (2014): Unravelling the unintended consequences of home energy improvements. In: *International Journal of Energy Sector Management* 8 (4), S. 506–526. DOI: 10.1108/IJESM-11-2013-0006.
- Hahn, Jakob; Schumacher, Peter; Lang, Werner; Jensch, Werner (2020): Performance gap and occupant behavior - Review and analysis of high-efficiency residential buildings in Germany. In: *33rd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, ECOS 2020*. Online verfügbar unter <https://portal.fis.tum.de/en/publications/performance-gap-and-occupant-behavior-review-and-analysis-of-high>.
- Hajer, Maarten A. (1995): *The Politics of Environmental Discourse. Ecological Modernization and the Policy Process*. Oxford, New York: Oxford University Press.
- Halawa, Edward; van Hoof, Joost (2012): The adaptive approach to thermal comfort: A critical overview. In: *Energy and Buildings* 51, S. 101–110. DOI: 10.1016/j.enbuild.2012.04.011.
- Hamilton, I. G.; O'Sullivan, A.; Huebner, G.; Oreszczyn, T.; Shipworth, D.; Summerfield, A.; Davies, M. (2017): Old and cold? Findings on the determinants of indoor temperatures in English dwellings during cold conditions. In: *Energy and Buildings* 141, S. 142–157. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.02.014.
- Hargreaves, Tom; Wilson, Charlie; Hauxwell-Baldwin, Richard (2017): Learning to live in a smart home. In: *Building Research & Information* 46 (1), S. 127–139. DOI: 10.1080/09613218.2017.1286882.
- Hauge, Bettina (2013): The air from outside: Getting to know the world through air practices. In: *Journal of Material Culture* 18 (2), S. 171–187. DOI: 10.1177/1359183513483908.
- Heidenreich, Felix (2023): *Nachhaltigkeit und Demokratie. Eine politische Theorie*. 1. Auflage. Berlin: Suhrkamp Verlag. Online verfügbar unter <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=7265540>.
- Hens, Hugo; Parijs, Wout; Deurinck, Mieke (2010): Energy consumption for heating and rebound effects. In: *Energy and Buildings* 42 (1), S. 105–110. DOI: 10.1016/j.enbuild.2009.07.017.
- Hickfang, Theo; Moeller, Simon; Schneider, Michael; Gill, Bernhard (2020): Nutzerorientierte Technologieentwicklung am Beispiel eines „intelligenten“ Heizungssystems. In: Tim Neumann, Uwe Ziesler und Tobias Teich (Hg.): *Kooperation und Innovation für eine nachhaltige Stadtentwicklung. Forschung mit innovativen Kommunen*. 1st ed. 2020. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden; Imprint: Springer Spektrum, S. 169–178.
- Hirschauer, Stefan (2016): Verhalten, Handeln, Interagieren. Zu den mikrosoziologischen Grundlagen der Praxistheorie. In: Hilmar Schäfer (Hg.): *Praxistheorie. Ein soziologisches Forschungsprogramm*. Bielefeld: Transcript (Sozialtheorie), S. 45–67.

- Hong, Tianzhen; Yan, Da; D'Oca, Simona; Chen, Chien-Fei (2017): Ten questions concerning occupant behavior in buildings: The big picture. In: *Building and Environment* 114, S. 518–530. DOI: 10.1016/j.buildenv.2016.12.006.
- Hossain, Mokter; Leminen, Seppo; Westerlund, Mika (2019): A systematic review of living lab literature. In: *Journal of Cleaner Production* 213, S. 976–988. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.12.257.
- Huebner, Gesche Margarethe; Cooper, Justine; Jones, Keith (2013): Domestic energy consumption—What role do comfort, habit, and knowledge about the heating system play? In: *Energy and Buildings* 66, S. 626–636. DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.07.043.
- Huebner, Gesche Margarethe; Hamilton, Ian; Chalabi, Zaid; Shipworth, David; Oreszczyn, Tadj (2015a): Explaining domestic energy consumption – The comparative contribution of building factors, socio-demographics, behaviours and attitudes. In: *Applied Energy* 159, S. 589–600. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.09.028.
- Huebner, Gesche Margarethe; McMichael, Megan; Shipworth, David; Shipworth, Michelle; Durand-Daubin, Mathieu; Summerfield, Alex J. (2015b): The shape of warmth: temperature profiles in living rooms. In: *Building Research & Information* 43 (2), S. 185–196. DOI: 10.1080/09613218.2014.922339.
- Humphreys, Michael A.; Nicol, J. Fergus (1998): Understanding the adaptive approach to thermal comfort. In: *ASHRAE transactions* 104, S. 991–1004.
- Ilmonen, Kaj (2004): The Use of and Commitment to Goods. In: *Journal of Consumer Culture* 4 (1), S. 27–50. DOI: 10.1177/1469540504040903.
- Ingold, Tim (2018): Back to the future with the theory of affordances. In: *HAU: Journal of Ethnographic Theory* 8 (1-2), S. 39–44. DOI: 10.1086/698358.
- Janda, Kathryn B. (2011): Buildings don't use energy: people do. In: *Architectural Science Review* 54 (1), S. 15–22. DOI: 10.3763/asre.2009.0050.
- Kane, T.; Firth, S. K.; Lomas, K. J. (2015): How are UK homes heated? A city-wide, socio-technical survey and implications for energy modelling. In: *Energy and Buildings* 86, S. 817–832. DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.10.011.
- Karjalainen, Sami (2007a): The characteristics of usable room temperature control. Online verfügbar unter <http://lib.tkk.fi/Diss/2008/isbn9789513870607/>, zuletzt geprüft am 28.03.2023.
- Karjalainen, Sami (2007b): Why It Is Difficult to Use a Simple Device: An Analysis of a Room Thermostat. In: Julie A. Jacko (Hg.): Human-computer interaction. 12th international conference, HCI International 2007, Beijing, China, July 22 - 27, 2007; proceedings, Part 1: Interaction design and usability. Berlin, Heidelberg, 2007. International Conference on Human Computer Interaction; HCI; International Conference on Human-Computer Interaction; HCI International. Berlin: Springer (Lecture notes in computer science, 4550), S. 544–548.
- Karjalainen, Sami (2009): Thermal comfort and use of thermostats in Finnish homes and offices. In: *Building and Environment* 44 (6), S. 1237–1245. DOI: 10.1016/j.buildenv.2008.09.002.
- Kasperbauer, T. J. (2017): The permissibility of nudging for sustainable energy consumption. In: *Energy Policy* 111, S. 52–57. DOI: 10.1016/j.enpol.2017.09.015.
- Kempton, Willett (1986): Two Theories of Home Heat Control*. In: *Cognitive Science* 10 (1), S. 75–90. DOI: 10.1207/s15516709cog1001_3.

- Kõiv, Teet-Andrus; Hamburg, Anti; Thalfeldt, Martin; Fadejev, Jevgeni (2012): Indoor climate of an unheated apartment and its impact on the heat consumption of adjacent apartments. In: *Proceeding of the 3rd International Conference on Urban Sustainability, Cultural Sustainability, Green Development, Green Structures and Clean Cars (USCUDAR '12)*, S. 52–58.
- Kuijer, Lenneke; de Jong, Annelise (2012): Identifying design opportunities for reduced household resource consumption: exploring practices of thermal comfort. In: *Journal of Design Research* 10 (1/2), S. 67–84. DOI: 10.1504/JDR.2012.046140.
- Laakso, Senja; Jensen, Charlotte Louise; Vadovics, Edina; Apajalahti, Eeva-Lotta; Friis, Freja; Szöllösy, Anita (2021): Towards sustainable energy consumption: Challenging heating-related practices in Denmark, Finland, and Hungary. In: *Journal of Cleaner Production* 308, Artikel 127220. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.127220.
- Laasch, Thomas; Laasch, Erhard (2013): *Haustechnik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Larsen, Simon Peter; Gram-Hanssen, Kirsten; Madsen, Line Valdorff (2023): In Control or Being Controlled? Investigating the Control of Space Heating in Smart Homes. In: *Sustainability* 15 (12), Artikel 9489. DOI: 10.3390/su15129489.
- Larsen, Simon Peter Aslak Kondrup; Gram-Hanssen, Kirsten (2020): When Space Heating Becomes Digitalized: Investigating Competencies for Controlling Smart Home Technology in the Energy-Efficient Home. In: *Sustainability* 12 (15), Artikel 6031. DOI: 10.3390/su12156031.
- Latour, Bruno (1992): Where Are the Missing Masses? The Sociology of a Few Mundane Artifacts. In: Wiebe E. Bijker und John Law (Hg.): *Shaping Technology/Building Society. Studies in Sociotechnical Change*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, S. 225–258.
- Latour, Bruno (1994): *We have never been modern*. [3. print.]. Cambridge, Mass: Harvard Univ. Press.
- Latour, Bruno (2019): *Wir sind nie modern gewesen. Versuch einer symmetrischen Anthropologie*. 7. Auflage. Frankfurt am Main: Suhrkamp (Suhrkamp Taschenbuch Wissenschaft, 1861).
- Lave, Jean (2004): Situating learning in communities of practice. In: Lauren B. Resnick, John M. Levine und Stephanie D. Teasley (Hg.): *Perspectives on socially shared cognition*. 4. printing. Washington, D.C.: American Psychological Association, S. 63–82.
- Law, John; Bijker, Wiebe E. (1992): Postscript: Technology, Stability, and Social Theory. In: Wiebe E. Bijker und John Law (Hg.): *Shaping Technology/Building Society. Studies in Sociotechnical Change*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, S. 290–308.
- Lehtonen, Turo-Kimmo (2003): The Domestication of New Technologies as a Set of Trials. In: *Journal of Consumer Culture* 3 (3), S. 363–385. DOI: 10.1177/14695405030033014.
- Levie, D.; Kluizenaar de, Y.; Hoes-van Oeffelen, E.C.M.; Hofstetter, H.; Janssen, S. A.; Spiekman, M. E.; Koene, F.G.H. (2014): Determinants of ventilation behavior in naturally ventilated dwellings: Identification and quantification of relationships. In: *Building and Environment* 82, S. 388–399. DOI: 10.1016/j.buildenv.2014.09.008.
- Ling, Jihong; Li, Qiang; Xing, Jincheng (2015): The influence of apartment location on household space heating consumption in multi-apartment buildings. In: *Energy and Buildings* 103, S. 185–197. DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.06.057.

- Love, Jennifer A. (2014): Understanding the interactions between occupants, heating systems and building fabric in the context of energy efficient building fabric retrofit in social housing: UCL (University College London).
- Love, Jenny; Cooper, Adam C. G. (2015): From social and technical to socio-technical: Designing integrated research on domestic energy use. In: *Indoor and Built Environment* 24 (7), S. 986–998. DOI: 10.1177/1420326X15601722.
- Lukić, Nebojša; Nikolić, Novak; Timotijević, S.; Tasić, S. (2017): Influence of an unheated apartment on the heating consumption of residential building considering current regulations—Case of Serbia. In: *Energy and Buildings* 155, S. 16–24. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.09.006.
- Luo, Maohui; de Dear, Richard J.; Ji, Wenjie; Bin, Cao; Lin, Borong; Ouyang, Qin; Zhu, Yingxin (2016): The dynamics of thermal comfort expectations: The problem, challenge and implication. In: *Building and Environment* 95, S. 322–329. DOI: 10.1016/j.buildenv.2015.07.015.
- Lutzenhiser, Loren (1993): Social and Behavioral Aspects of Energy use. In: *Annu. Rev. Environ. Resour.* (18), S. 247–289.
- Madsen, Line Valdorff (2018): Materialities shape practices and notions of comfort in everyday life. In: *Building Research & Information* 46 (1), S. 71–82. DOI: 10.1080/09613218.2017.1326230.
- Madsen, Line Valdorff; Gram-Hanssen, Kirsten (2017): Understanding comfort and senses in social practice theory: Insights from a Danish field study. In: *Energy Research & Social Science* 29, S. 86–94. DOI: 10.1016/j.erss.2017.05.013.
- Mahdavi, Ardeshir; Berger, Christiane; Amin, Hadeer; Ampatzi, Eleni; Andersen, Rune Korsholm; Azar, Elie et al. (2021): The Role of Occupants in Buildings' Energy Performance Gap: Myth or Reality? In: *Sustainability* 13 (6), Artikel 3146. DOI: 10.3390/su13063146.
- Marikyan, Davit; Papagiannidis, Savvas; Alamanos, Eleftherios (2019): A systematic review of the smart home literature: A user perspective. In: *Technological Forecasting and Social Change* 138, S. 139–154. DOI: 10.1016/j.techfore.2018.08.015.
- Marszal-Pomianowska, Anna; Larsen, Simon Peter Aslak Kondrup; Gram-Hanssen, Kirsten; Heiselberg, Per (2021): Thermal conditions in households and assessment of building's flexibility potential. Variations in time, space and between dwellings. In: *Building and Environment* 206, Artikel 108353. DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.108353.
- Martin, Rex; Larsen, Simon Peter Aslak Kondrup (2024): “I never look at a temperature device, I just feel it”: Practical knowledge, smart technologies, and heating and cooling practices between Denmark and Australia. In: *Energy Research & Social Science* 108, Artikel 103389. DOI: 10.1016/j.erss.2023.103389.
- Matzat, Johanna Sophie (2019): Die Energiewende in den eigenen vier Wänden. Dissertation. Baden-Baden: Nomos Verlagsgesellschaft mbH & Co. KG (Umweltsoziologie, Band 8).
- Mavrogianni, A.; Johnson, F.; Ucci, M.; Marmot, A.; Wardle, J.; Oreszczyn, T.; Summerfield, A. (2013): Historic Variations in Winter Indoor Domestic Temperatures and Potential Implications for Body Weight Gain. In: *Indoor + built environment : the journal of the International Society of the Built Environment* 22 (2), S. 360–375. DOI: 10.1177/1420326X11425966.

- McIlvennie, Claire; Sanguinetti, Angela; Pritoni, Marco (2020): Of impacts, agents, and functions: An interdisciplinary meta-review of smart home energy management systems research. In: *Energy Research & Social Science* 68, Artikel 101555. DOI: 10.1016/j.erss.2020.101555.
- Meyer, William B. (2002): Why Indoor Climates Change: A Case Study. In: *Climatic Change* 55, S. 395–407.
- Meyers, Robert J.; Williams, Eric D.; Matthews, H. Scott (2010): Scoping the potential of monitoring and control technologies to reduce energy use in homes. In: *Energy and Buildings* 42 (5), S. 563–569. DOI: 10.1016/j.enbuild.2009.10.026.
- Michnikowski, Paweł (2017): Allocation of heating costs with consideration to energy transfer from adjacent apartments. In: *Energy and Buildings* 139, S. 224–231. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.01.020.
- Mishra, Asit Kumar; Loomans, Marcel G.L.C.; Hensen, Jan L.M. (2016): Thermal comfort of heterogeneous and dynamic indoor conditions — An overview. In: *Building and Environment* 109, S. 82–100. DOI: 10.1016/j.buildenv.2016.09.016.
- Miu, Luciana M.; Mazur, Christoph M.; van Dam, Koen H.; Lambert, Romain S.C.; Hawkes, Adam; Shah, Nilay (2019): Going smart, staying confused: Perceptions and use of smart thermostats in British homes. In: *Energy Research & Social Science* 57, Artikel 101228. DOI: 10.1016/j.erss.2019.101228.
- Moeller, Simon (2022): Energiesparend Heizen durch intelligente Steuerungstechnik – Die Bedeutung von Vertrauen, Verständlichkeit und Vermittlung in der Mensch-Technik-Interaktion. In: Sven Leonhardt, Tim Neumann, Daniel Kretz, Tobias Teich und Mirko Bodach (Hg.): *Innovation und Kooperation auf dem Weg zur All Electric Society*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 239–288.
- Moeller, Simon (2024): Is it a match? Smart home energy management technologies and user comfort practices in German multi-apartment buildings. In: *Energy Research & Social Science* 118, S. 103794. DOI: 10.1016/j.erss.2024.103794.
- Moeller, Simon; Bauer, Amelie (2022): Energy (in)efficient comfort practices: How building retrofits influence energy behaviours in multi-apartment buildings. In: *Energy Policy* 168, S. 113123. DOI: 10.1016/j.enpol.2022.113123.
- Moeller, Simon; Leonhardt, Sven; Schneider, Michael (2023): Enablers and barriers to the sustainable transformation of urban districts. (Interim) results from six lighthouse projects. In: Sven Leonhardt, Tobias Nusser, Jürgen Görres, Sven Rosinger, Gerhard Stryi-Hipp und Martin Eckhard (Hg.): *Innovations and challenges of the energy transition in smart city districts*: DE GRUYTER, S. XV–LVIII.
- Moeller, Simon; Weber, Ines; Schröder, Franz; Bauer, Amelie; Harter, Hannes (2020): Apartment related energy performance gap – How to address internal heat transfers in multi-apartment buildings. In: *Energy and Buildings* 215, Artikel 109887. DOI: 10.1016/j.enbuild.2020.109887.
- Nagy, Zoltan; Gunay, Burak; Miller, Clayton; Hahn, Jakob; Ouf, Mohamed M.; Lee, Seungjae et al. (2023): Ten questions concerning occupant-centric control and operations. In: *Building and Environment* 242, Artikel 110518. DOI: 10.1016/j.buildenv.2023.110518.
- Norman, Donald A. (2013 (1988)): *The design of everyday things*. Revised and expanded edition. New York New York: Basic Books.

- Norman, Donald A. (2014 (1983)): Some Observations on Mental Models. In: Dedre Gentner und Albert L. Stevens (Hg.): *Mental Models*: Psychology Press, S. 7–14. Online verfügbar unter <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.4324/9781315802725-5/observations-mental-models-donald-norman>.
- Offenberger, Ursula (2016): Geschlecht und Gemütlichkeit. Paarentscheidungen über das Beheizte Zuhause. Berlin/Boston: Walter de Gruyter GmbH (Qualitative Soziologie Ser, v.21). Online verfügbar unter <https://ebookcentral.proquest.com/lib/gbv/detail.action?docID=5049102>.
- Offenberger, Ursula; Nentwich, Julia (2013): Home Heating, Technology and Gender: A Qualitative Analysis. In: Klaus Rennings, Bettina Brohmann, Julia Nentwich, Joachim Schleich, Thure Traber und Rolf Wüstenhagen (Hg.): *Sustainable energy consumption in residential buildings*. 1., 2012. Heidelberg, Neckar: Physica-Verlag (ZEW Economic Studies, 44), S. 193–211.
- Osterhage, Tanja; Davide, Cali; Müller, Dirk; Voß, Rouven (2016): Auswirkung von Wärmeverchiebungsvorgängen in energieeffizient sanierten Bestandswohngebäuden. In: *Bauphysik* 38 (1), S. 19–24. DOI: 10.1002/bapi.201610004.
- Parkinson, Thomas; de Dear, Richard J. (2015): Thermal pleasure in built environments: physiology of alliesthesia. In: *Building Research & Information* 43 (3), S. 288–301. DOI: 10.1080/09613218.2015.989662.
- Peffer, Therese; Pritoni, Marco; Meier, Alan; Aragon, Cecilia; Perry, Daniel (2011): How people use thermostats in homes: A review. In: *Building and Environment* 46 (12), S. 2529–2541. DOI: 10.1016/j.buildenv.2011.06.002.
- Pfaffenberger, Bryan (1992): Technological Dramas. In: *Science, Technology, & Human Values* 17 (3), S. 282–312. DOI: 10.1177/016224399201700302.
- Pinch, Trevor J.; Bijker, Wiebe E. (2012 (1987)): The Social Construction of Facts and Artifacts: Or How the Sociology of Science and the Sociology of Technology Might Benefit Each Other. In: Wiebe E. Bijker, Thomas P. Hughes und Trevor J. Pinch (Hg.): *The social construction of technological systems. New directions in the sociology and history of technology*. Anniversary ed (Online-Ausg.). Cambridge, Massachusetts: MIT Press (The MIT Press Ser), S. 11–44.
- Pritoni, Marco; Meier, Alan K.; Aragon, Cecilia; Perry, Daniel; Peffer, Therese (2015): Energy efficiency and the misuse of programmable thermostats: The effectiveness of crowdsourcing for understanding household behavior. In: *Energy Research & Social Science* 8, S. 190–197. DOI: 10.1016/j.erss.2015.06.002.
- Reckwitz, Andreas (2002a): The Status of the "Material" in Theories of Culture: From "Social Structure" to "Artefacts". In: *J Theory of Social Behaviour* 32 (2), S. 195–217. DOI: 10.1111/1468-5914.00183.
- Reckwitz, Andreas (2002b): Toward a Theory of Social Practices. A Development in Culturalist Theorizing. In: *European Journal of Social Theory* 5 (2), S. 243–263. DOI: 10.1177/13684310222225432.
- Rehdanz, Katrin; Stöwhase, Sven (2008): Cost Liability and Residential Space Heating Expenditures of Welfare Recipients in Germany*. In: *Fiscal Studies* 29 (3), S. 329–345. DOI: 10.1111/j.1475-5890.2008.00077.x.
- Revell, Kirsten M. A.; Stanton, Neville A. (2014): Case studies of mental models in home heat control: searching for feedback, valve, timer and switch theories. In: *Applied ergonomics* 45 (3), S. 363–378. DOI: 10.1016/j.apergo.2013.05.001.

- Revell, Kirsten M.A.; Stanton, Neville A. (2015): When energy saving advice leads to more, rather than less, consumption. In: *International Journal of Sustainable Energy* 36 (1), S. 1–19. DOI: 10.1080/14786451.2014.999071.
- Rijal, H. B.; Tuohy, P.; Humphreys, M. A.; Nicol, J. F.; Samuel, A.; Clarke, J. (2007): Using results from field surveys to predict the effect of open windows on thermal comfort and energy use in buildings. In: *Energy and Buildings* 39 (7), S. 823–836. DOI: 10.1016/j.enbuild.2007.02.003.
- Rinkinen, Jenny (2019): Chopping, stacking and burning wood. Rhythms and variations in provision. In: Elizabeth Shove und Frank Trentmann (Hg.): *Infrastructures in practice. The dynamics of demand in networked societies*. London, New York: Routledge Taylor & Francis Group, S. 48–57.
- Rohracher, Harald (2003): The Role of Users in the Social Shaping of Environmental Technologies. In: *Innovation: The European Journal of Social Science Research* 16 (2), S. 177–192. DOI: 10.1080/13511610304516.
- Røpke, Inge (2009): Theories of practice — New inspiration for ecological economic studies on consumption. In: *Ecological Economics* 68 (10), S. 2490–2497. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2009.05.015.
- Rupp, Ricardo Forgiarini; Vásquez, Natalia Giraldo; Lamberts, Roberto (2015): A review of human thermal comfort in the built environment. In: *Energy and Buildings* 105, S. 178–205. DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.07.047.
- Sahakian, Marlyne; Rau, Henrike; Grealis, Eoin; Godin, Laurence; Wallenborn, Grégoire; Backhaus, Julia et al. (2021): Challenging social norms to recraft practices: A Living Lab approach to reducing household energy use in eight European countries. In: *Energy Research & Social Science* 72, Artikel 101881. DOI: 10.1016/j.erss.2020.101881.
- Schatzki, Theodore R. (1996): *Social practices. A Wittgensteinian approach to human activity and the social*. Cambridge: Cambridge Univ. Press.
- Schatzki, Theodore R. (2006): On Organizations as they Happen. In: *Organization Studies* 27 (12), S. 1863–1873. DOI: 10.1177/0170840606071942.
- Schatzki, Theodore R. (2010): Materiality and Social Life. In: *Nature and Culture* 5 (2), S. 123–149. DOI: 10.3167/nc.2010.050202.
- Schatzki, Theodore R. (2011): *Where the Action is. On Large Social Phenomena Such as Sociotechnical Regimes*. Manchester: University of Manchester (Sustainable Practices Research Group Working Paper, 1).
- Schmitz, Hendrik; Madlener, Reinhard (2018): Heterogenität im Preisverhalten privater Haushalte für Raumheizung. In: Karin Schürmann und Diana Schumann (Hg.): *Mentalitäten und Verhaltensmuster im Kontext der Energiewende in NRW*. Jülich: Forschungszentrum Jülich GmbH Zentralbibliothek Verlag (Schriften des Forschungszentrums Jülich Reihe Energie & Umwelt, energy & environment, Band/volume 433), S. 105–133.
- Schröder, Franz; Gill, Bernhard; Güth, Martin; Teich, Tobias; Wolff, Anna (2018): Entwicklung saisonaler Raumtemperaturverteilungen von klassischen zu modernen Gebäudestandards - Sind Rebound-Effekte unvermeidbar? In: *Bauphysik* 40 (3), S. 151–160. DOI: 10.1002/bapi.201810017.
- Sears, Andrew; Jacko, Julie A. (2009): *Human-computer interaction*. Boca Raton: CRC Press (Human factors and ergonomics).

- Shi, Xing; Si, Binghui; Zhao, Jiangshan; Tian, Zhichao; Wang, Chao; Jin, Xing; Zhou, Xin (2019): Magnitude, Causes, and Solutions of the Performance Gap of Buildings: A Review. In: *Sustainability* 11 (3), S. 937. DOI: 10.3390/su11030937.
- Shove, Elizabeth (2010): Beyond the ABC: Climate Change Policy and Theories of Social Change. In: *Environ Plan A* 42 (6), S. 1273–1285. DOI: 10.1068/a42282.
- Shove, Elizabeth (2012): Energy Transitions in Practice. The Case of Global Indoor Climate Change. In: Geert Verbong und Derk Loorbach (Hg.): *Governing the energy transition. Reality, illusion or necessity?*, Bd. 4. New York: Routledge (Routledge studies in sustainability transitions, 4), S. 51–74.
- Shove, Elizabeth (2018): What is wrong with energy efficiency? In: *Building Research & Information* 46 (7), S. 779–789. DOI: 10.1080/09613218.2017.1361746.
- Shove, Elizabeth; Pantzar, Mika (2005): Consumers, Producers and Practices: Understanding the invention and reinvention of Nordic Waling. In: *Journal of Consumer Culture* 5 (1), S. 43–64. DOI: 10.1177/1469540505049846.
- Shove, Elizabeth; Pantzar, Mika; Watson, Matt (2012): *The dynamics of social practice. Everyday life and how it changes*. Los Angeles: SAGE.
- Shove, Elizabeth; Walker, Gordon (2014): What Is Energy For? Social Practice and Energy Demand. In: *Theory, Culture & Society* 31 (5), S. 41–58. DOI: 10.1177/0263276414536746.
- Simon, Herbert A. (1959): Theories of Decision-Making in Economics and Behavioral Science. In: *The American Economic Review* 49 (3), S. 253–283.
- Sonnberger, Marco; Gross, Matthias (2018): Rebound Effects in Practice: An Invitation to Consider Rebound From a Practice Theory Perspective. In: *Ecological Economics* 154, S. 14–21. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2018.07.013.
- Sorrell, Steve; Dimitropoulos, John (2008): The rebound effect: Microeconomic definitions, limitations and extensions. In: *Ecological Economics* 65 (3), S. 636–649. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2007.08.013.
- Sovacool, Benjamin K.; Del Furszyfer Rio, Dylan D. (2020): Smart home technologies in Europe: A critical review of concepts, benefits, risks and policies. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 120, Artikel 109663. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109663.
- Sovacool, Benjamin K.; Martiskainen, Mari; Osborn, Jody; Anaam, Amal; Lipson, Matthew (2020a): From thermal comfort to conflict: The contested control and usage of domestic smart heating in the United Kingdom. In: *Energy Research & Social Science* 69, Artikel 101566. DOI: 10.1016/j.erss.2020.101566.
- Sovacool, Benjamin K.; Osborn, Jody; Martiskainen, Mari; Lipson, Matthew (2020b): Testing smarter control and feedback with users: Time, temperature and space in household heating preferences and practices in a Living Laboratory. In: *Global Environmental Change* 65, Artikel 102185. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2020.102185.
- Stieß, Immanuel; van der Land, Victoria; Birzle-Harder, Barbara; Deffner, Jutta (2010): *Handlungsmotive, -hemmnisse und Zielgruppen für eine energetische Gebäudesanierung*. Frankfurt am Main.
- Strengers, Yolande (2013): *Smart Energy Technologies in Everyday Life. Smart Utopia?* London: Palgrave Macmillan UK (Consumption and Public Life).

- Sunikka-Blank, Minna; Galvin, Ray (2012): Introducing the prebound effect: the gap between performance and actual energy consumption. In: *Building Research & Information* 40 (3), S. 260–273. DOI: 10.1080/09613218.2012.690952.
- Teli, Despoina; Langer, Sarka; Ekberg, Lars; Dalenbäck, Jan-Olof (2019): Indoor Temperature Variations in Swedish Households: Implications for Thermal Comfort. In: Dennis Johansson, Hans Bagge und Åsa Wahlström (Hg.): *Cold Climate HVAC 2018. Sustainable Buildings in Cold Climates*. Cham, 2019. Cham: Springer International Publishing (Springer Proceedings in Energy), S. 835–845.
- Tirado Herrero, Sergio; Nicholls, Larissa; Strengers, Yolande (2018): Smart home technologies in everyday life: do they address key energy challenges in households? In: *Current Opinion in Environmental Sustainability* 31, S. 65–70. DOI: 10.1016/j.cosust.2017.12.001.
- Tweed, Chris (2013): Socio-technical issues in dwelling retrofit. In: *Building Research & Information* 41 (5), S. 551–562. DOI: 10.1080/09613218.2013.815047.
- Umishio, Wataru; Ikaga, Toshiharu; Fujino, Yoshihisa; Ando, Shintaro; Kubo, Tatsuhiko; Nakajima, Yukie et al. (2020): Disparities of indoor temperature in winter: A cross-sectional analysis of the Nationwide Smart Wellness Housing Survey in Japan. In: *Indoor Air* 30 (6), S. 1317–1328. DOI: 10.1111/ina.12708.
- Urban, Bryan; Gomez, Carla (2013): A case for thermostat user models. 13th Conference of International Building Performance Simulation Association.
- Vadodaria, K.; Loveday, D. L.; Haines, V. (2014): Measured winter and spring-time indoor temperatures in UK homes over the period 1969–2010: A review and synthesis. In: *Energy Policy* 64, S. 252–262. DOI: 10.1016/j.enpol.2013.07.062.
- van Raaij, W. Fred; Verhallen, Theo M. M. (1983): Patterns of residential energy behavior. In: *Journal of Economic Psychology* 4 (1-2), S. 85–106. DOI: 10.1016/0167-4870(83)90047-8.
- van Thillo, L.; Verbeke, S.; Audenaert, A. (2022): The potential of building automation and control systems to lower the energy demand in residential buildings: A review of their performance and influencing parameters. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 158, S. 112099. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112099.
- Verbruggen, Silke; Delghust, Marc; Laverge, Jelle; Janssens, Arnold (2021): Habitual window opening behaviour in residential buildings. In: *Energy and Buildings* 252, S. 111454. DOI: 10.1016/j.enbuild.2021.111454.
- Wallace, L. A.; Emmerich, S. J.; Howard-Reed, C. (2002): Continuous measurements of air change rates in an occupied house for 1 year: The effect of temperature, wind, fans and windows. In: *J Expo Sci Environ Epidemiol* 12 (4), S. 296–306. DOI: 10.1038/sj.jea.7500229.
- Warde, Alan (2005): Consumption and Theories of Practice. In: *Journal of Consumer Culture* 5 (2), S. 131–153. DOI: 10.1177/1469540505053090.
- Weber, Ines (2021): Interplay of building efficiency and households' ventilation behaviour: Evidence of an inverse U-shaped correlation. In: *Energy and Buildings* 252. DOI: 10.1016/j.enbuild.2021.111466.
- Weber, Ines; Schöнемann, Michael; Farny, Alexander; Schröder, Franz; Wolff, Anna; Gill, Bernhard (2017): Explaining flat-specific heating energy consumption by building physics and behaviour. An interdisciplinary approach (LoPa Working Paper). Online

verfügbar unter https://www.lokale-passung.de/wp-content/uploads/2017/05/WP_calculator.pdf, zuletzt geprüft am 19.06.2019.

- Weber, Ines; Wolff, Anna (2018): Energy efficiency retrofits in the residential sector – analysing tenants’ cost burden in a German field study. In: *Energy Policy* 122, S. 680–688. DOI: 10.1016/j.enpol.2018.08.007.
- Wei, Shen; Jones, Rory; Wilde, Pieter de (2014): Driving factors for occupant-controlled space heating in residential buildings. In: *Energy and Buildings* 70, S. 36–44. DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.11.001.
- Wilhite, Harold (2001): What can energy efficiency policy learn from thinking about sex. In: *Proceedings of European Council for an Energy Efficient Economy ECEEE*, S. 331–341.
- Wilhite, Harold (2008): New thinking on the agentive relationship between end-use technologies and energy-using practices. In: *Energy Efficiency* 1 (2), S. 121–130. DOI: 10.1007/s12053-008-9006-x.
- Wolff, Anna; Weber, Ines; Gill, Bernhard; Schubert, Johannes; Schneider, Michael (2017): Tackling the interplay of occupants’ heating practices and building physics: Insights from a German mixed methods study. In: *Energy Research & Social Science* 32, S. 65–75. DOI: 10.1016/j.erss.2017.07.003.
- Yin, Robert K. (2018): Case study research and applications. Design and methods. Sixth edition. Thousand Oaks, California: Sage Publications, Inc.
- Yohanis, Yigzaw Goshu; Mondol, Jayanta Deb (2010): Annual variations of temperature in a sample of UK dwellings. In: *Applied Energy* 87 (2), S. 681–690. DOI: 10.1016/j.apenergy.2009.08.003.
- Zeiler, Wim; Vissers, Derek; Maaijen, Rik; Boxem, Gert (2014): Occupants’ behavioural impact on energy consumption: ‘human-in-the-loop’ comfort process control. In: *Architectural Engineering and Design Management* 10 (1-2), S. 108–130. DOI: 10.1080/17452007.2013.837252.
- Zhao, Jing; Carter, Kate (2020): Do passive houses need passive people? Evaluating the active occupancy of Passivhaus homes in the United Kingdom. In: *Energy Research & Social Science* 64, S. 1–8.
- Zou, Patrick X.W.; Xu, Xiaoxiao; Sanjayan, Jay; Wang, Jiayuan (2018): Review of 10 years research on building energy performance gap: Life-cycle and stakeholder perspectives. In: *Energy and Buildings* 178, S. 165–181. DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.08.040.