

Gerhard Hausladen, Thomas Auer, Jakob Schneegans,
Klaus Klimke, Hana Riemer, Barbara Trojer, Linna Qian,
Manuel de Borja Torrejon

Lastverhalten von Gebäuden unter Berücksichtigung unterschiedlicher Bauweisen und technischer Systeme Speicher- und Lastmanagement- potenziale in Gebäuden

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung -BMVBS- im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2014

ISBN 978-3-8167-9352-6

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00
Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

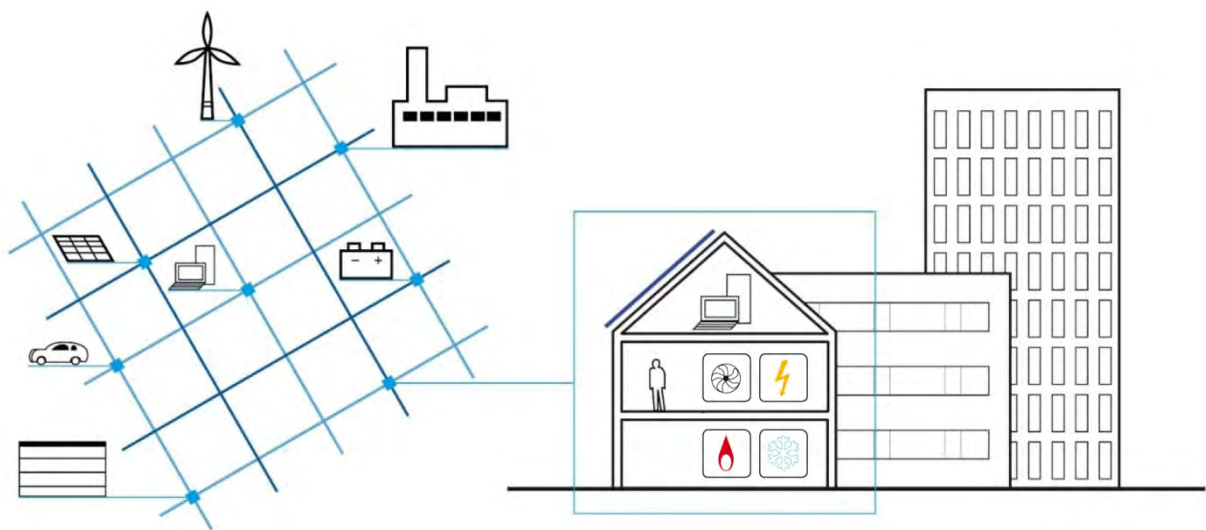
www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/bauforschung

Lastverhalten von Gebäuden unter Berücksichtigung unterschiedlicher Bauweisen und technischer Systeme

Speicher- und Lastmanagementpotenziale in Gebäuden

Endbericht



Lastverhalten von Gebäuden unter Berücksichtigung unterschiedlicher Bauweisen und technischer Systeme

Endbericht

Impressum:

Technische Universität München
Lehrstuhl für Bauklimatik und Haustechnik
Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Gerhard Hausladen
Prof. Dipl.-Ing. Thomas Auer

Dipl.-Ing. Jakob Schneegans
Dipl.-Wirt.-Ing. Klaus Klimke
Dipl.-Ing. Hana Riemer

Studentische Mitarbeiter:
Barbara Trojer
Linna Qian
Manuel de Borja Torrejón

München, Juni 2014

Das Forschungsvorhaben wurde unterstützt von:
Bayerischer Bauindustrieverband e.V., Bundesverband Wärmepumpe e.V., HEA – Fachgemeinschaft für
effiziente Energieanwendung e.V., Stiebel Eltron GmbH & Co. KG, Uponor GmbH

Das Forschungsvorhaben wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt-
und Raumforschung gefördert.

(Aktenzeichen: II 3-F20-11-1-047 / SWD-10.08.18.7-12.47)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichts liegt beim Autor.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	1
2. Allgemeine Grundlagen.....	3
2.1 Lastmanagement versus Energiemanagement	4
2.2 Anwendungsbereiche für Lastmanagement in Gebäuden	4
2.3 Potenziale von Gebäuden für die geplante Energiewende in Deutschland	5
2.4 Literaturrecherche	6
2.5 Untersuchungsmethodik	8
3. Sensitivitätsanalyse Speicherpotenzial in Gebäuden (SIM 1)	9
3.1 Allgemeine Vorgehensweise	9
3.2 Randbedingungen des Grundmodells	10
3.3 Heizfall.....	11
3.4 Kühlfall	18
3.5 Zusätzlicher Energiebedarf eines Zuschaltvorgangs.....	22
3.6 Fazit SIM 1	23
4. Gebäudetypologisierung Vorklassifizierung von Gebäuden	24
4.1 Vorgehensweise	24
4.2 Wohngebäude.....	27
4.3 Nichtwohngebäude	32
5. Untersuchung von Lastmanagementpotenzialen in Gebäuden (SIM 2).....	35
5.1 Randbedingungen.....	35
5.1.1 Gebäudemodelle.....	35
5.1.2 Wetterdaten Typtage.....	41
5.1.3 Berechnungsmethodik	42
5.2 Typtagspezifische Potenzialermittlung.....	48
5.2.1 Typtag <i>sehr kalt</i>	48
5.2.2 Typtag <i>kalt</i>	51
5.2.3 Typtag <i>kühl</i>	53
5.2.4 Typtag <i>gemäßigt</i>	57
5.2.5 Typtag <i>warm</i>	60
5.2.6 Typtag <i>heiß</i>	63
5.2.7 Typtag <i>sehr heiß</i>	65

5.3	Typtagbasierte Zusammenfassung	68
5.3.1	Gebäudekatalog	68
5.3.2	Monatsweise LM-Betrachtung	74
5.4	Parameteranalyse SIM 2	76
5.5	Fazit SIM 2	79
6.	Flächengewichtetes Lastmanagementpotenzial	81
6.1	Vorgehensweise und Randbedingungen	81
6.2	thermisches Potenzial	82
6.3	elektrisches Potenzial	84
7.	Fazit	87
8.	Ausblick	89
9.	Literaturverzeichnis	90
10.	Abbildungsverzeichnis	92
11.	Tabellenverzeichnis	95
12.	Anhang	96

1. Einleitung

In der derzeitigen Stromversorgungsstruktur richtet sich die Erzeugung nach dem Verbrauch. Kraftwerke reagieren zu jedem Zeitpunkt auf die Schwankungen der Nachfrage. Der Wunsch nach gleichmäßiger Auslastung von Kraftwerken wird durch den steigenden Anteil an volatilen Energieerzeugern erschwert, da der derzeitige Kraftwerkspark nicht schnell genug auf wetterbedingte Schwankungen der regenerativen Energien reagieren kann.

Die geplante Energiewende in Deutschland hin zu einer nachhaltigen Energieversorgung lässt in den nächsten Jahren einen Paradigmenwechsel vom gegenwärtigen Prinzip der verbrauchsorientierten Erzeugung hin zum erzeugungsorientierten Verbrauch erwarten. Dies ist vor allem auf die zunehmende Integration erneuerbarer Energien und deren fluktuierender Einspeisecharakteristik zurückzuführen. Die folgende Abb. 1.1 zeigt die prognostizierte Entwicklung der Kraftwerksleistung in Deutschland entsprechend dem Leitszenario 2011 des BMU [1]. Darin wird ersichtlich, dass der Anteil der planbaren Erzeugung über konventionelle Kraftwerke rückläufig und die fluktuierende Erzeugung über regenerative Energien bis 2050 zunehmend ist.

Ein solcher Wandel der Energieversorgung erfordert auch eine neue Infrastruktur, in der bisher passive Verbraucher, wie z.B. Gebäude, durch Lastmanagementmaßnahmen zu einem aktiven Teilnehmer des Energiesystems, des Smart Grids, werden.

Lastmanagement ist die gezielte Steuerung des Stromverbrauchs durch zeitliche Verschiebung von elektrischen Lasten. Ziel ist die Anpassung des Stromverbrauchs an die fluktuierende Stromerzeugung, um Residuallasten möglichst gering zu halten, die von konventionellen Kraftwerken gedeckt werden müssen. Um dies zu erreichen, werden elektrische Aggregate so gesteuert, dass ihr Betrieb vornehmlich zu Zeiten hoher Einspeisung von regenerativen Energien, z.B. durch Windräder und Photovoltaik, liegt. Bei geringer Stromerzeugung aus regenerativen Quellen (z.B. Nacht oder Windstille) sollen elektrische Verbraucher möglichst abgeschaltet werden können. Damit kann eine Stabilisierung des Stromversorgungsnetzes erreicht werden und zu einer zunehmenden Integration der erneuerbaren Energien beitragen. Zusammenfassend können mit Lastmanagementmaßnahmen Netz- und Erzeugungskapazitäten wirtschaftlicher und umweltfreundlicher genutzt werden [2].

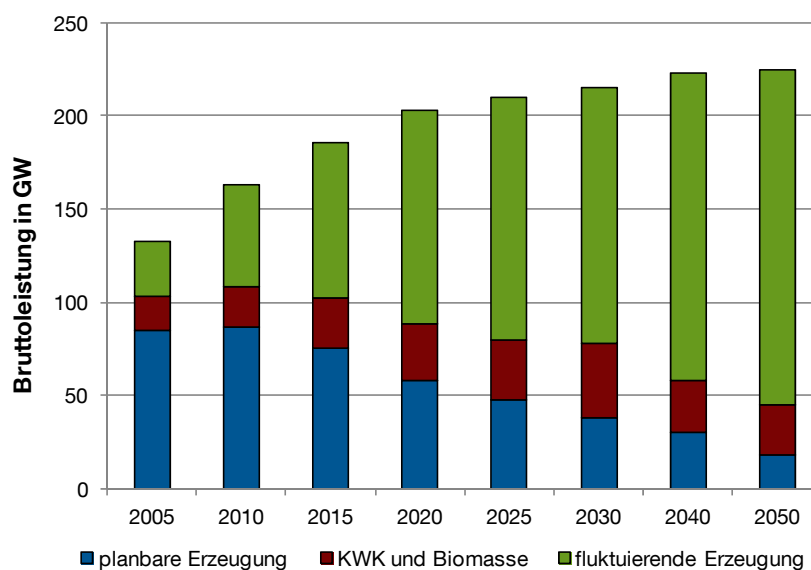


Abb. 1.1: Entwicklung der Kraftwerksleistung in Deutschland [1]

In Gebäuden steht ein großes passives Speicherpotenzial zur Verfügung, das bisher nicht für Lastmanagementmaßnahmen genutzt wird. Als geeignete Maßnahme wird vor allem die Nutzung von elektrischen Wärmepumpen gesehen [3]. Mittels dieser kann negative Regelleistung, also ein Überangebot an elektrischer Leistung, kostengünstig und effizient in Form von Wärme gespeichert werden. Das Lastmanagementpotenzial im Gebäudesektor ist dabei in hohem Maße von nutzerspezifischen Behaglichkeitskriterien abhängig. In der Heiz- oder Kühlperiode können unterschiedliche Toleranzbereiche zugelassen werden, die mit einer oberen und unteren Grenztemperatur ein Behaglichkeitsband um die Raum-Solltemperatur bilden. Dieses Behaglichkeitsband darf durch Lastmanagementmaßnahmen nicht verlassen werden und wirkt daher begrenzend auf das nutzbare Potenzial.

Die Umsetzung von Lastmanagement in Gebäuden wird sowohl durch die technische Gebäudeausrüstung (TGA), als auch durch die bauphysikalischen Eigenschaften des Baukörpers bestimmt. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens werden sowohl geeignete Anlagen der TGA, als auch verschiedene Gebäudetypen und Nutzungsarten mittels dynamischer Gebäudesimulation [4] untersucht.

In Kapitel 3 wird auf Basis einer Sensitivitätsanalyse („SIM 1“) der Einfluss verschiedener baulicher und anlagentechnischer Parameter (z.B. Dämmstandard, Speichermasse oder interne Wärmelasten) auf das Speicherpotenzial bzw. damit einhergehend das Lastmanagementpotenzial eines Modellraumes untersucht. Um diesen Einfluss quantifizieren und miteinander vergleichen zu können, werden stationäre Randbedingungen in der dynamischen Simulation hinterlegt. Aus dieser theoretischen Betrachtung lassen sich Erkenntnisse bezüglich dem Aufheiz- bzw. Auskühlverhalten eines Raumes ableiten und ein „optimales Raummodell“ bestimmen, welches für Speicher- und Lastmanagementmaßnahmen optimale Voraussetzungen darstellt.

Kapitel 4 behandelt eine Vorklassifizierung des Gebäudebestands in Deutschland mit Schwerpunkt im Hinblick auf Baukonstruktion, Flächenaufteilung, Baualter und TGA. Mittels einer Analyse der Wohn- und Nichtwohngebäudestruktur in Deutschland werden die relevanten Gebäudetypen systematisch untersucht und individuelle Charakteristika herausgearbeitet. Desweiteren dient die

Vorklassifizierung als Basis für den Aufbau unterschiedlicher Gebäudemodelle für das darauffolgende Kapitel.

Kapitel 5 bildet den Schwerpunkt dieser Studie. Hier werden verschiedene Gebäudetypen, welche repräsentativ für Gebäude innerhalb ihrer Typologie stehen, auf ihr Lastmanagementpotenzial untersucht. Hierfür werden die im vorangegangenen Kapitel definierten Gebäudemodelle mit entsprechender TGA simuliert und einzeln analysiert. Um jahreszeitliche Abhängigkeiten zu berücksichtigen, werden auf Basis von Wetterdaten sieben Typtage klassifiziert. Die ermittelten Lastmanagementpotenziale (LM-Potenziale) werden dabei für jeden Typtag ausgewertet und in einem Gebäudekatalog zusammengefasst. Der Katalog zeigt auf, welcher Gebäudetyp für welche Jahres- und Tageszeit für ein Lastmanagement empfehlenswert ist.

In Kapitel 6 wird das berechnete flächenspezifische LM-Potenzial auf den Gebäudebestand in Deutschland erweitert, um so eine Abschätzung der speicherbaren Energiemenge in der derzeit bestehenden Gebäudestruktur zu ermöglichen.

Anhand der Ergebnisse wird deutlich, welche Gebäudetypen wann und in welchem Ausmaß an einem Lastmanagement teilnehmen können.

2. Allgemeine Grundlagen

Für die zukünftige Stromversorgung in Deutschland kann Lastmanagement zu einer Harmonisierung der residualen Last, die von konventionellen Kraftwerken bereitgestellt werden muss, beitragen. Der elektrische Verbrauch muss dazu der wetterabhängigen regenerativen Stromerzeugung angepasst werden. Um das einleitend beschriebene Ziel der Stabilisierung eines nachfrageorientierten Energieversorgungsnetzes zu erreichen, ist eine Glättung und Steuerung der Stromnachfrage mittels Lastmanagement erforderlich, siehe Abb. 2.1.

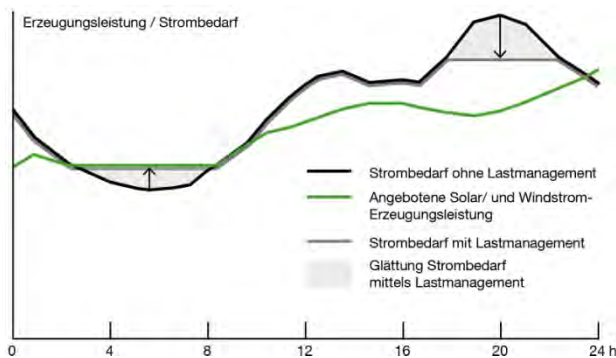


Abb. 2.1: Anpassung und Glättung des Stromverbrauchs während eines Tages mittels Lastmanagement [5]

In der Vergangenheit wurden bereits Nachtstarife und – im Gebäudebereich – Nachtspeicherheizungen eingeführt. Mittels wirtschaftlicher Anreize wurde so ein Teil des Stromverbrauchs vom Tag in die Nacht verschoben. Die für erneuerbare Energieträger typische Erzeugungscharakteristik erfordert allerdings keine reine Nachtspeicherung mehr, sondern Lastpuffer und schaltbare Verbraucher, die flexibel auf Schwankungen des elektrischen Energieangebots reagieren können. [3]

Grundsätzlich können für Lastmanagement drei Vorgehensweisen unterschieden werden [5]:

- Unterbrechung: ein Prozess (z.B. industrielle Fertigung) wird durch vollständige Abschaltung der Anlage unterbrochen und nach einer bestimmten Zeit wieder aufgenommen.
- Reduzierung: die Anlage läuft kontinuierlich weiter, aber bei einer niedrigeren Intensität. Auch hier kann ein Pufferspeichersystem zur Unterstützung eingesetzt werden.
- Verschiebung: die Anlage wird abgeschaltet, aber der Prozess wird durch die Unterstützung eines Pufferspeichersystems kontinuierlich fortgesetzt. Erst nach Verbrauch der Speicherkapazität wird die Anlage wieder eingeschaltet.

Die Differenzierung in drei Vorgehensweisen zeigt, dass die Verschiebbarkeit von Lasten stark von der Verfügbarkeit eines Pufferspeichers bestimmt wird. Die Speicher selbst lassen sich in zwei Kategorien klassifizieren:

- Ohne Verluste, z.B. Materialzwischenspeicher, Lager und Silos
- Mit Verlusten, z.B. Wärme- und Kältespeicher

Nach überschlägigen Berechnungen der Deutschen Energie Agentur [5] ergibt sich in Deutschland derzeit ein technisches Lastmanagementpotenzial von etwa 15 GW, siehe Tab. 2.1. Dieses Potenzial beinhaltet Anlagentechnik zur Klimatisierung von Gebäuden, genauso wie Anwendungen und Prozesse in Industrie und Gewerbe.

Tab. 2.1: technisches Lastmanagementpotenzial in Deutschland nach Sektoren [5]

Sektor	Technisches Lastmanagementpotenzial [GW]
Industrie	5,8
Gewerbe und Handel	2,1
Haushalt	7,3
Gesamt	15,2

Wie weit das technisch mögliche Potenzial auch wirtschaftlich genutzt werden kann, hängt von den Kosten der Erschließung und den damit zu erzielenden Erlösen ab. Diese sind stark mit der Entwicklung eines zukünftigen variablen Strompreises und der Struktur der anzuschließenden Geräte verbunden. Wirtschaftliche Anreize für einen erzeugungsabhängigen Verbrauch können vor allem durch zeitvariable Stromtarife gegeben werden.

In dieser Studie wird untersucht, inwiefern Gebäude zu einem zusätzlichen LM-Potenzial beitragen können.

2.1 Lastmanagement versus Energiemanagement

Neben Lastmanagement wird von Unternehmen auch Energiemanagement betrieben. Energiemanagement bedeutet, alle für Energieverbrauch und -kosten relevanten Vorgänge zusammenhängend zu betrachten und die lohnendsten Verbesserungsmaßnahmen zu ergreifen. Lastmanagement kann gegebenenfalls auch Bestandteil des Energiemanagements sein.

Vorrangiges Ziel des Energiemanagements ist Energieeinsparung. Bei Lastmanagementmaßnahmen steht dies Ziel nicht im Vordergrund. Energie- und Lastmanagement können sich gegenseitig beeinflussen. Eine Verschiebung von Lasten durch Zwischenspeicherung kann den Energieverbrauch aufgrund von Speicherverlusten sogar erhöhen. Nach Verschiebungen / Maßnahmen im Rahmen des Lastmanagements kann zudem eine höhere Spitzenlast benötigt werden, um verschobene Produktionsprozesse nachzuholen. Aufgrund von Lastmanagementmaßnahmen können Aggregate eventuell in Teillast abseits ihres optimalen Betriebspunktes betrieben werden, was wiederum den Energiebedarf des Aggregats erhöht. [5]

Die für den Gebäudebereich relevanten Prozesse werden im Folgenden näher erläutert.

2.2 Anwendungsbereiche für Lastmanagement in Gebäuden

Die Anwendungsbereiche für Lastmanagement werden in vielen Studien (siehe auch Kapitel 2.3) in die drei Sektoren Industrie, Gewerbe, Handel, Dienstleistung (GHD), sowie Haushalt gegliedert. Gemeinsamer Bestandteil aller drei Sektoren sind Gebäude, die (bis auf wenige Ausnahmen) thermisch konditioniert werden. Darüber hinaus ergeben sich in jedem Sektor noch gebäudeunabhängige Prozesse, die sich für Lastmanagement eignen. Als beispielhafte Industrieprozesse können die Elektrolyse, verschiedene Mahlprozesse oder eine Luftzerlegung genannt werden. Generell bilden die Mess- und Regelungstechnik sowie ein hoher Automatisierungsgrad von Prozessen eine wichtige Voraussetzung. Eine detaillierte Übersicht über gebäudeunabhängige Prozesse, die für ein Lastmanagement geeignet sind, werden u.a. in [6] behandelt.

Eine allgemeine Übersicht mit Schwerpunkt auf der Technischen Gebäudeausrüstung (TGA) ist in der folgenden Abb. 2.2 zusammengefasst. Als mögliche TGA-Prozesse können in Industriebauten das elektrische Heizen und Kühlen sowie die mechanische Lüftung identifiziert werden. In Gebäuden des GHD-Sektors wird das Lastmanagementpotenzial zusätzlich um die elektrische Warmwasserbereitung ergänzt. In Haushalten spielt die Raumkühlung nur eine untergeordnete Rolle; auch das Potenzial zur Nutzung einer mechanischen Lüftung für Lastmanagement ist hier vernachlässigbar gering. Für Wohngebäude können aus diesem Grund vorrangig das elektrische Heizen sowie die Warmwasserbereitung für Lastmanagementmaßnahmen identifiziert werden. Eine erste Abschätzung über das derzeitige Lastmanagementpotenzial für Trinkwarmwasser im Haushaltsbereich wurde in [7] durchgeführt und ein durchschnittliches Potenzial von 2,7 GW ermittelt.

In dieser Studie liegt der Untersuchungsschwerpunkt auf den Lastmanagementpotenzialen von ausgewählten Gebäudetypen durch Nutzung der vorhandenen Speichermasse.

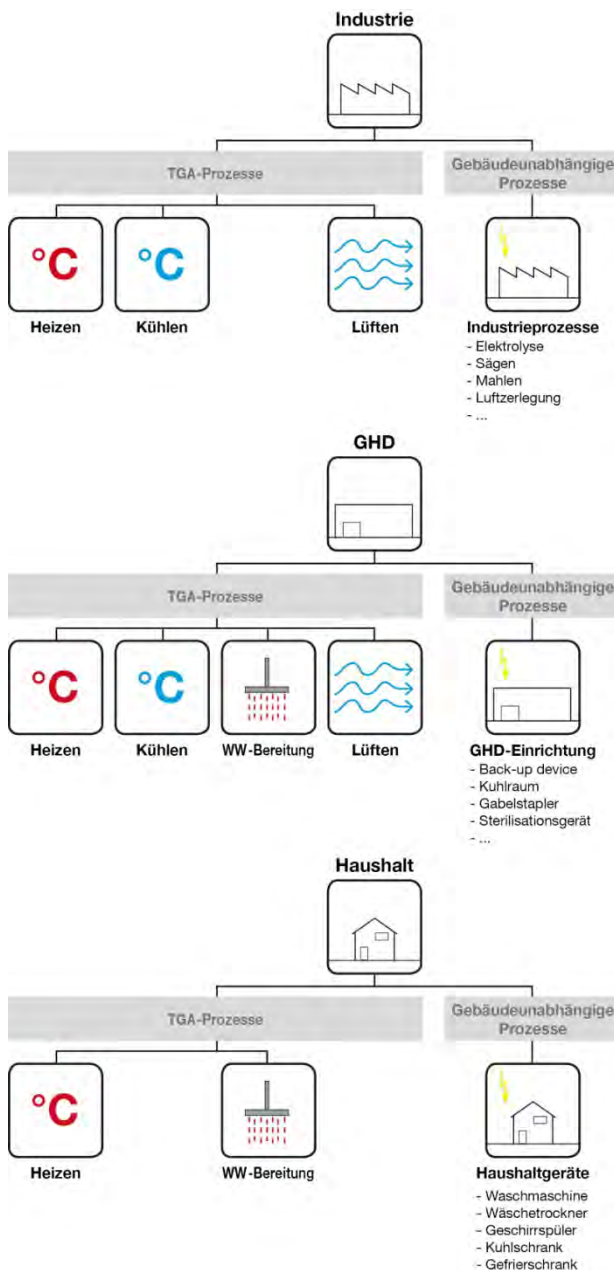


Abb. 2.2: Mögliche Lastmanagement-Prozesse in den Sektoren Industrie, GHD und Haushalt

2.3 Potenziale von Gebäuden für die geplante Energiewende in Deutschland

In bisherigen Studien, z.B. [3], [5], [6], [8], [7], [9], wird die These aufgestellt, dass intelligente Gebäude eine Schlüsselrolle in einem zukünftigen Stromnetz einnehmen werden und als flexible Teilnehmer eines Smart Grids zu einer verstärkten Integration fluktuierender Energieerzeugung beitragen können. Dazu muss sich die Charakteristik von Gebäuden verändern: wie bisher fungieren sie auch zukünftig primär als „Lasten“, zusätzlich können sie jedoch auch als Energiespeicher eingesetzt werden und kostenoptimiert auf Preisanreize reagieren. Um Schwankungen im Netzbetrieb aktiv zu dämpfen, können Gebäude an einem intelligenten Lastmanagement teilnehmen. Dabei wird der Prozesszustand der TGA-Anlage erkannt und verschiebbare Lasten zur Verfügung gestellt.

Mittels Lastmanagementmaßnahmen in Gebäuden soll flexibel auf kurzzeitige Schwankungen (im Bereich von mehreren Stunden) des elektrischen Energieangebots reagiert werden können. Für den Ausgleich jahreszeitlicher Angebotsschwankungen wäre hingegen thermische Speicherkapazität in größerem Umfang erforderlich. Für die elektrische Beheizung und Kühlung von Gebäuden liegt das größte Verlagerungspotenzial deshalb innerhalb eines Tageszyklus. Gründe dafür liegen in der fluktuierenden Einspeisung aus Photovoltaikanlagen und in den Tag-/ Nachtschwankungen auf der Nachfrageseite, für die unabhängig von der zukünftigen Stromerzeugung prinzipiell keine Änderungen zu erwarten sind. Zusätzlich kann die niedrige Stromnachfrage der Industrie am Wochenende durch Lastmanagement zur ökonomisch und ökologisch günstigen thermischen Konditionierung von Gebäuden genutzt werden.

Ein Vorteil von Lastmanagement in Gebäuden besteht darin, dass Bestandsgebäude mit einem elektrischen Heiz- bzw. Kühlsystem nutzbar sind, ohne dass eine Nachrüstung zusätzlicher Hardware notwendig wird. Lediglich die Steuerung bedarf einer Erweiterung um zusätzliche Schnittstellen. So benötigt eine intelligente Steuerung Informationen über die klimatischen Bedingungen und, für eine kostenoptimierte Betriebsweise, die Prognose des Strompreisverlaufs. Alternativ zur intelligenten Steuerung ist ein externes Steuersignal zum Schalten der elektrischen Lasten möglich. So kann beispielsweise der Betreiber eines Virtuellen Kraftwerks die

Soll-Lastkurve für einzelne Gebäude vorgeben. Dieser Input kann, alternativ zum zeitlich variablen Stromtarif, als Steuersignal für einen optimierten Heiz- oder Kühlbetrieb durch Lastmanagement fungieren.

Die Speicherung von Wärme im Gebäude ist grundsätzlich mit thermischen Verlusten verbunden. Die thermische Speicherfähigkeit der Gebäudemasse ist durch die Baustoffauswahl geprägt und kann gegebenenfalls durch den Einsatz von Phasenwechselmaterialien (PCM) erhöht werden [3]. Ähnlich wie bei der Isolierung eines Wassertanks können thermische Verluste der Gebäudemasse durch Wärmedämmung der Gebäudehülle reduziert werden. Im Rahmen der baulichen Optimierung von Gebäuden ist eine möglichst hohe Speicherkapazität bei geringen Wärmeverlusten durch Transmission anzustreben. Messergebnisse zeigen, dass sich nach Abschaltung der Heizung in Gebäuden mit Passivhausstandard lediglich ein Temperaturabfall von 1 K über 24 Stunden einstellt [10]. Bei derartig geringen Verlusten wäre eine zeitliche Entkopplung von Speicherentladung und -beladung als unkritisch anzusehen. Damit können Gebäude mit elektrischer Wärmepumpe einen wichtigen Beitrag für die Dämpfung der Stromschwankungen im Versorgungsnetz leisten [10].

2.4 Literaturrecherche

Die große Bedeutung der Energiesicherheit und der Entwicklung der Energiebereitstellungsstruktur spiegelt sich in der Vielzahl und Relevanz aktueller Veröffentlichungen wieder. In der Literatur und auf Fachtagungen nimmt Lastmanagement eine Schlüsselrolle in der Bewältigung der Frage der zukünftigen Energieversorgung ein. Zu Beginn der Forschungsarbeiten wurden umfangreiche Recherchearbeiten durchgeführt. Dieses Kapitel fasst die relevanten Kernaussagen einiger Veröffentlichungen zum Thema Lastmanagement zusammen.

[Die thermische Konditionierung von Gebäuden im Kontext eines zukünftigen Energieversorgungssystems. Lüking R., Hauser G.; 2011]

Die Studie unterstreicht die Notwendigkeit der Umstellung auf ein nachhaltiges Energieversorgungssystem mit hohem regenerativen Deckungsgrad. Fossile Energieträger sollen zukünftig vorrangig hinsichtlich ihres Potenzials als Regelreserve und zur Bedienung der residualen Lasten optimal genutzt werden. Damit verbunden soll eine Umstellung von verbrennungsbasierten Heizungsanlagen auf eine Wärmeversorgung auf Basis von Strom erfolgen. Die Autoren leiten aus ihrer Forderung her, dass dies aus ökonomischen und ökologischen Gründen exklusiv mittels Gas- und Dampfturbinen-Großkraftwerke in Kombination mit dezentral eingesetzten elektrischen Wärmepumpen anzustreben ist.

Nach einer ersten Abschätzung von [3] steht im Wohnungsbau etwa 1 TWh thermisches Speicherpotenzial zu Verfügung, wenn die Bauteiltemperatur um lediglich 1 K erhöht bzw. gesenkt wird. Der Autor kommt damit zu dem Schluss, dass „der thermische Energiebedarf von Gebäuden mehr als ausreichendes Potenzial (bietet), die für das Jahr 2050 zu erwartenden negativen Residuallasten, soweit sie in die Heizperiode fallen, vollständig zu nutzen“.

Im Rahmen der vorliegenden Studie wird in Kapitel 6 eine differenziertere Hochrechnung des Lastmanagement-Potenzials in Deutschland für die Gebäudetypologien Wohnen und Büro durchgeführt.

[Studie zu Potenzialen intelligenter Energiemanagementsysteme in Nichtwohngebäuden; sowie: Smart Buildings – flexible Teilnehmer in Smart Grids; Rös- sel, Jungwirth, et.al.; TUM, 2010 und 2012]

In Nichtwohngebäuden besteht ein großes Potenzial für Lastmanagementmaßnahmen. Die Studie analysiert folgende Anlagen und Geräte, die sich für die Einbindung in ein Lastmanagementsystem eignen: Lüftungssysteme, Aufzüge, Pumpen zum Füllen von Grauwasseranlagen für die Toilettenspülung, Sterilisationsgeräte in Krankenhäusern, sowie Luftentfeuchtungsanlagen in Hallenbädern. Die Studie weist nach, dass in Bürogebäuden bis zu 30% der Spitzenlast zeitlich verschoben werden können. Allerdings ist das Verschiebungspotenzial zeitlich begrenzt (maximal im Stunden Bereich). Lastmanagement kann, aufgrund eines teilweise hohen Leistungsbezugs nach einer Abschaltung, zu einem erhöhten Energiebedarf führen. Die Studie zeigt dabei Maßnahmen auf, inwieweit sich ein Lastmanagement in eine Gebäudeautomation integrieren lässt. Voraussetzung für die Umsetzung in realen Gebäuden ist die Fähigkeit, das thermische Gebäudeverhalten prognostizieren zu können. Dazu werden an der TU München in Zusammenarbeit mit Siemens adaptive Gebäudemodelle entwickelt und validiert.

[Handbuch Lastmanagement. Vermarktung flexibler Lasten: Erlöse erwirtschaften - zur Energiewende beitragen; Balanowski, J.; 2012]

Die Untersuchungen in der Studie zeigen auf, dass sich Spitzenlastmanagement für Industrie-Unternehmen mit einer Last ab ca. 500-1.000 kW lohnen können. Die technische Voraussetzung für Lastmanagement ist die Existenz einer Mess- und Regelungstechnik, mit der einzelne strombetriebene Anlagen gezielt gesteuert werden können. Viele Unternehmen verfügen bereits über Prozess- bzw. Gebäudeleittechnik und Energiemonitoringsysteme, die für ein Lastmanagement genutzt werden können. Stromerzeuger (BHKW) können ein wichtiger Bestandteil des Lastmanagement sein, da deren Leistung bei Bedarf erhöht werden kann, um den Netzbezug zu verringern.

Die Verschiebbarkeit von Lasten wird stark von der Verfügbarkeit eines Pufferspeichers bestimmt. Der Speicher kann entsprechend des Prozesses gestaltet sein. Beispiele hierfür sind: Lager für die in einem Arbeitsprozess

zu verarbeitenden Materialien, ein Kühlraum als Kältespeicher, oder Druckluftspeicher für Druckluftanlagen.

[Dynamische Simulation eines Lastmanagements und Integration von Windenergie in ein Elektrizitätsnetz. Dr. Klobasa, M.; 2009]

Die Studie analysiert Lastmanagementmaßnahmen in verschiedenen Anwendungsbereichen mit Schwerpunkt des technisch-ökonomischen Potenzials in Industrie, Gewerbe, Handel und Dienstleistungen, sowie im Haushaltsbereich. Der Autor vertieft die Regelung eines Energieversorgungssystems mit Integration von Windstrom. Zudem werden Unsicherheiten bei der Bestimmung von Lastmanagementpotenzialen und Ansätze zur Ermittlung der Kosten der Regelung aufgezeigt.

[Studie "Berlin 2037" - Intelligente Gebäude und Elektrofahrzeuge sind Schlüsselkomponenten für Smart Grids. Brinckmann, U.; 2011]

Die Studie zeigt Perspektiven für eine intelligente Stromversorgung für die Metropole Berlin im Jahr 2037. Dabei stehen auch Fragen zur flexiblen Konditionierung von Gebäuden und deren Integration in ein Smart-Grid im Fokus. Intelligente Gebäudeleittechnik berücksichtigt die für Lastmanagement benötigten Parameter, wie z.B. Nutzungsprofile, Echtzeit-Preissignale und Prioritäten-Entscheidungen für die Schaltung von Verbrauchern. Die Studie beschreibt auch die Entwicklung von lastmanagementfähigen Haushaltsgeräten und den Einsatz von Elektrofahrzeugen in Verbindung mit einem intelligenten Lademanagement.

Die wirtschaftlichste Art der Lastverschiebung ist laut der Studie die Nutzung der Speicherwirkung von Gebäuden.

2.5 Untersuchungsmethodik

Wie bereits mehrfach angemerkt, fokussiert sich diese Forschungsarbeit auf Untersuchungen hinsichtlich des thermischen Potenzials von Gebäuden, um an einem Lastmanagement teilnehmen zu können. Hierzu werden zwei theoretische Ansätze verfolgt, siehe Abb. 2.3:

- Dynamische Simulation eines Modellraumes unter stationären Randbedingungen (SIM 1, Kapitel 3)
- Dynamische Simulation repräsentativer Wohn- und Nichtwohngebäude-Modelle unter instationären Randbedingungen (SIM 2, Kapitel 5).

Beide Ansätze haben gemein, dass sich das ausgewiesene Potenzial auf die (passive) Speicherfähigkeit des Gebäudes bezieht. Hierzu ist es notwendig, einen „Toleranzbereich“ für die thermische Behaglichkeit zu definieren, welcher vom Nutzer als akzeptabel empfunden wird. Dieses Behaglichkeitsband ist vom jeweiligen Gebäudemodell sowie der Jahreszeit abhängig und wird in Kapitel 3.1 und Kapitel 5.1.3 definiert.

Innerhalb der Bearbeitungszeit dieser Studie wurden mehrere Methoden erarbeitet, um das Potenzial für Lastmanagement-Maßnahmen zu quantifizieren. Bereits veröffentlichte Studien (siehe Kapitel 2.4) weisen in der Regel das (technisch) mögliche Potenzial im Gebäudebereich über einen Leistungswert technischer Systeme (z.B.: Wärmepumpe, Kältemaschine in W/m^2) aus. Aus

Sicht der Autoren ist für eine exaktere Potenzialeinschätzung eine Bewertung aus Leistung und Dauer (und damit ein Energiewert) notwendig. Vor diesem Hintergrund wird in beiden Simulationsansätzen das Lastmanagementpotenzial über einen flächenspezifischen Energiewert (Wh/m^2) identifiziert.

Da für Lastmanagement-Maßnahmen grundsätzlich sowohl eine Netzentlastung durch Abschaltung technischer Systeme, als auch ein zusätzlicher Strombezug durch Zuschaltung berücksichtigt werden müssen, wird in den Simulationsberechnungen zwischen Zuschalten und Abschalten differenziert. Ein Zuschalten bewirkt eine Zuführung von zusätzlicher thermischer Energie in das Gebäude, wodurch – in Abhängigkeit des Wärme- bzw. Kälteübergabesystems – die Speichermasse beladen wird und sich gegebenenfalls Änderungen in der operativen Raumtemperatur ergeben. Weitere Erläuterungen folgen in Kapitel 3.1 bzw. Kapitel 5.1.3.

Desweiteren wird das thermische Potenzial in Gebäuden unabhängig vom jeweiligen Wärme- bzw. Kälteerzeuger ermittelt, um sich in der Potenzialermittlung nicht auf den derzeitigen Stand der Wärme- bzw. Kälteerzeugung zu beschränken. Es liegt jedoch auf der Hand, dass die theoretisch ermittelten Potenziale nur mit elektrischen Heiz- bzw. Kälteerzeugern (Wärmepumpe, Kompressionskältemaschine etc.) erschlossen werden können. Eine Abschätzung des elektrischen Potenzials erfolgt in Kapitel 6.3.

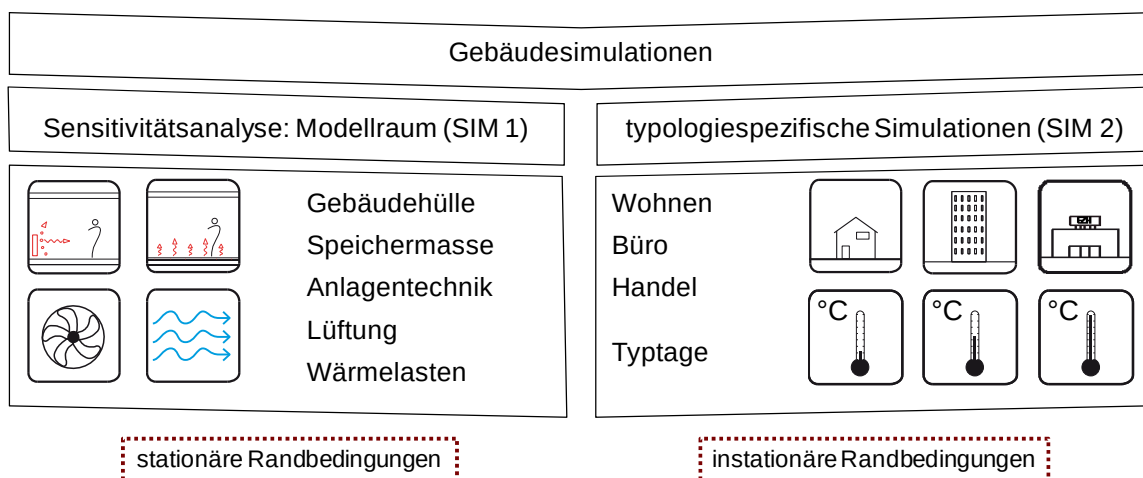


Abb. 2.3: Sensitivitätsanalyse (SIM 1) und typologiespezifische Simulationen (SIM 2)

3. Sensitivitätsanalyse | Speicherpotenzial in Gebäuden (SIM 1)

3.1 Allgemeine Vorgehensweise

Um den Einfluss verschiedener baulicher und anlagentechnischer Parameter auf das Speicherpotenzial zu quantifizieren, wird eine Sensitivitätsanalyse mittels thermischer Gebäudesimulation [4] anhand eines Modellraumes durchgeführt, siehe Abb. 3.1.

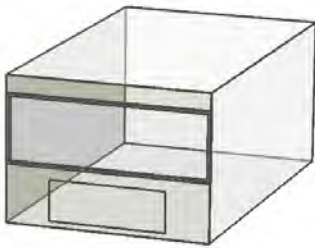


Abb. 3.1: Schematische Darstellung des Modellraumes

Betrachtet wird, ausgehend von einer definierten Ausgangstemperatur (Komforttemperatur), das thermische Aufheiz- bzw. Auskühlverhalten des Raumes in Abhängigkeit eines veränderten Parameters.

Die hierbei untersuchten Parameter sind:

- **Gebäudehülle (Dämmstandard)**
(Bestand / Neubau+)
- **Speichermasse**
(leicht: abgehängte Decke; leichte Innenwände
schwer: Decke freiliegend, massive Innenwände)
- **Wärmeübergabesystem**
(Heizkörper, Fußbodenheizung, Bauteilaktivierung)
- **Lüftung**
(mechanisch/ natürlich)
- **Wärmelasten**
(keine, mittel, hoch).

Desweiteren werden zur Analyse zwei stationäre Wetterbedingungen betrachtet, siehe Tab. 3.1.

Tab. 3.1: Wetterbedingungen innerhalb der Sensitivitätsanalyse

	Heizfall	Kühlfall
Außentemperatur	0 °C	23 °C
horizontale, diffuse Einstrahlung	0 W/m ²	350 W/m ²

Relevante Größe für die Beurteilung des Auskühl- bzw. Aufheizverhaltens des Raumes ist dabei die operative Raumtemperatur. Diese kann sich innerhalb definierter Grenzwerte bewegen, ohne dass von einer Verletzung der Behaglichkeitskriterien ausgegangen wird. Die operative Raumtemperatur (empfundene Temperatur) ist definiert als der Mittelwert aus Lufttemperatur und Strahlungstemperatur sämtlicher Oberflächen.

Für den Zeitpunkt *Winter* wird ein Behaglichkeitsband nach DIN EN 15251 („Büros und ähnlich genutzte Räume“, Kategorie II, [11], S.29) von 20-24 °C definiert. Die Ausgangs- bzw. Komforttemperatur liegt jeweils in der Mitte des Behaglichkeitsbandes. Für den Zeitpunkt *Sommer* wird ebenfalls ein Behaglichkeitsband über 4 K Temperaturdifferenz von 22-26 °C in Anlehnung an [11] bestimmt, siehe Abb. 3.2.

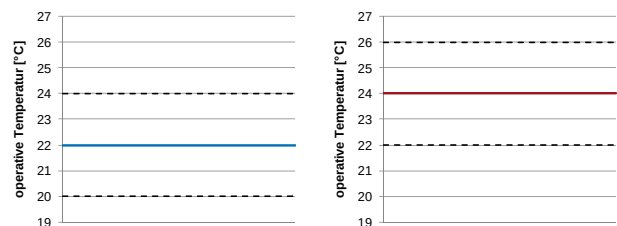


Abb. 3.2: thermisches Behaglichkeitsband im Winter (links) und Sommer (rechts)

Um bei den Untersuchungen eine hohe Vergleichbarkeit zu ermöglichen, werden stationäre Randbedingungen sowie ein eingeschwungenes, vorkonditioniertes Gebäudemodell in der Simulation hinterlegt. Dies bedeutet, dass verschiedene Randbedingungen wie z.B. Außentemperatur, solare Einstrahlung und interne Lasten über die Simulationsdauer zeitlich konstant sind. Das Gebäudemodell gilt als eingeschwungen, wenn alle Wärmeströme gleich bleibend sind.

Ausgehend von einem *Grundmodell* werden die baulichen und anlagentechnischen Parameter in Bezug auf Änderungen des Aufheiz- bzw. Auskühlverhaltens untersucht.

Potenzialermittlung

Die Parameterbewertung erfolgt durch Ermittlung der jeweiligen Zu- bzw. Abschaltdauer, bis ein Über- bzw. Unterschreiten des Behaglichkeitsbandes vorliegt. Desweiteren wird die zu- bzw. abschaltbare Heiz- bzw. Kühlleistung berechnet. Das für die Bewertung relevante Potenzial ergibt sich durch Integration der Leistung über die Dauer. Die errechneten Werte für das *Grundmodell* werden hierbei als Referenz mit 100 % angesetzt. Für eine verständliche Darstellung werden Dauer, Leistung und das resultierende Potenzial in Kategorien mittels Symbolen dargestellt, siehe Abb. 3.3.



Abb. 3.3: Legende zur Ergebnisdarstellung der Sensitivitätsanalyse

3.2 Randbedingungen des Grundmodells

Das *Grundmodell* des Modellraumes hat einen rechteckigen Grundriss, eine Fläche von 20 m² und ist in Abb. 3.1 dargestellt. An der Südseite des Raumes ist ein Fenster von 4,2 m² (50 % der Außenwand) vorhanden. Alle anderen Flächen werden als innenliegend und adiabatisch definiert, d.h. es fließen dort keine Wärmeströme. Der gewählte Dämmstandard im *Grundmodell* orientiert sich an den aktuell gültigen EnEV 2009-Anforderungen. Als Wärmeübergabesystem ist eine Radiatorheizung mit einer spezifischen Leistung von 50 W/m² vorgesehen. Für den Zeitpunkt im Sommer ist eine Luftkühlung mit einer Leistung von 50 W/m² hinterlegt.

Weitere Randbedingungen zum Gebäudemodell sind in Tab. 3.2 dargestellt.

Tab. 3.2: Bauliche und technische Kennwerte des *Grundmodells*

Parameter	Kennwerte		Anmerkungen
Außenwand	U-Wert [W/m²K]	0,28	Massiv: Innenputz 1 cm, Beton 20 cm, Wärmedämmung 15 cm, Außenputz 1cm
Innenwand	adiabat		Leicht: Gipskarton 2,6 cm, Luftspalt, Gipskarton 2,6 cm
Boden			Massiv: Bodenbelag 0,5 cm, Estrich 5 cm, Trittschalldämmung 2 cm, Betondecke 18 cm
Decke			Massiv: Bodenbelag 0,5 cm, Estrich 5 cm, Trittschalldämmung 2 cm, Betondecke 18 cm
Verglasung	U _g -Wert [W/m²K]	1,1	DIN V 18599_2, Tab 7, S. 68
	g-Wert [-]	0,59	DIN V 18599_2, Tab 7, S. 68
	τ-Wert; solar transmittance	0,52	DIN V 18599_2, Tab 7, S. 68
Wärmebrücken	ΔU _{WB} [W/m²K]	0,05	DIN 4108 und EnEV
Gebäudedichtheit I Infiltration	Infiltrationsrate durch Undichtigkeiten [1/h]	0,11	DIN V 18599, S. 51-53 (n ₅₀ -Wert entspricht 1,5)
Speichermasse	[Wh/m²K _{AB}]	94	mittel schwer, DIN V 18599_2, S. 82
Lüftung mit Wärmerückgewinnung	[1/h]	1,6	mechanisch
	WRG [%]	60	T _{zu_soll} = 22 °C
Wärmeübergabe	Radiator [W/m²]	50	T _{VL} = 45 °C, T _{RL} = 35 °C
Kälteübergabe	Luftkühlung [W/m²]	50	T _{Zuluft,min} = 15 °C
Interne Lasten	[W/m²]	10	Interne Wärmequellen wie Personen, Beleuchtung und Arbeitshilfen
Anzahl Außenwände	[-]	1	Süd

3.3 Heizfall

3.3.1 Grundmodell

In Abb. 3.4 sind die Ergebnisse des *Grundmodells* für den Heizfall dargestellt. Das resultierende Potenzial wird für den nun folgenden Parametervergleich als Referenzwert von 100 % angesetzt.

Zuschalten

Bei Betrachtung der möglichen Zuschaltdauer zeigt sich, dass ca. 3 Stunden benötigt werden, um den Raum bis zum oberen Grenzwert von 24 °C zu beheizen. Damit fällt die mögliche Zuschaltdauer in die Kategorie „2-4 h“. Hinterlegt ist eine konstante Außentemperatur von 0 °C sowie keine solare Einstrahlung. Bedingt durch den hohen Dämmstandard und der vergleichsweise milden Außenlufttemperatur kann über den Zeitraum eine Heizleistung von ca. 27 W/m² dem Raum zusätzlich zugeführt werden, welche in Abb. 3.4 damit in der Kategorie „20-30 W/m²“ liegt.

Abschalten

Im Fall einer Abschaltung der Radiatorheizung ergibt sich eine mögliche Abschaltdauer von ca. 20 h bis der untere Grenzwert von 20 °C erreicht wird. Die abschaltbare Leistung, die zuvor benötigt wurde, um das Gebäudemodell auf konstant 22 °C zu beheizen, beträgt hierbei rund 11 W/m² und liegt damit zwischen 10 und 20 W/m². Das resultierende Potenzial als Integration der abgeschalteten Leistung über die Abschaltdauer wird eben-

falls als Referenz für die folgenden Untersuchungen mit 100 % angesetzt.

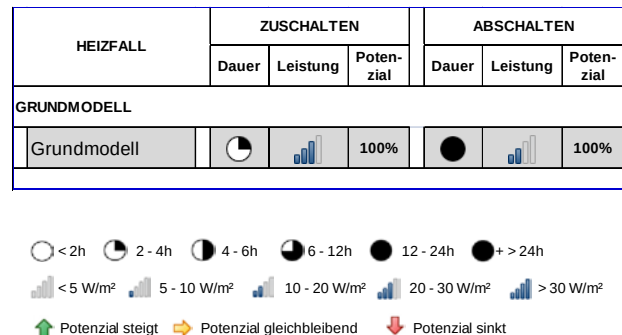


Abb. 3.4: Simulationsergebnisse für das Zuschalt- bzw. Abschaltpotenzial für das *Grundmodell*, Heizfall

3.3.2 Gebäudehülle

Um den Einfluss der Gebäudehülle auf das thermische Aufheiz- bzw. Auskühlverhalten bewerten zu können, werden – ausgehend vom *Grundmodell* – zwei Varianten *Bestand* (niedriger Dämmstandard) und *Neubau+* (sehr hoher Dämmstandard) untersucht. Durch die angepassten Dämmstärken werden ebenfalls die Heizleistungen neu bestimmt. Diese betragen nun 75 W/m² in der Variante *Bestand* und 40 W/m² in der Variante *Neubau+*. Die Variante *Neubau+* kennzeichnet neben höheren Dämmstärken eine dichtere Gebäudehülle sowie einen höheren Wärmerückgewinnungsgrad der mechanischen Lüftung aus. Weitere Randbedingungen sind in Tab. 3.3 und Tab. 3.4 angegeben. Die Ergebnisse der Simulationen sind in Abb. 3.5 dargestellt.

Tab. 3.3: Baukonstruktive und technische Kennwerte der Variation *Bestand* zum *Grundmodell*

Parameter	Kennwerte		Anmerkungen
Außenwand	U-Wert [W/m ² K]	0,89	Innenputz 1cm, Beton 20 cm, Wärmedämmung 15 cm, Außenputz 1 cm
	U _g -Wert [W/m ² K]	2,9	DIN V 18599_2, Tab 7
Verglasung	g-Wert [-]	0,78	DIN V 18599_2, Tab 7
	τ-Wert; solar transmittance	0,73	DIN V 18599_2, Tab 7
Wärmebrücken	ΔU _{WB} [W/m ² K]	0,1	DIN 4108 und EnEV
Gebäudedichtheit I Infiltration	Infiltrationsrate durch Undichtigkeiten [1/h]	0,42	DIN V 18599, S. 51-53 (n ₅₀ Wert entspricht 6)
Speichermasse	[Wh/m ² K _{AB}]	94	mittel schwer, DIN V 18599_2, S. 82
Wärmerückgewinnung	maschinelle Lüftung [WRG]	0,6	T _{ZU_soll} = 22 °C
Wärmeübergabe	Radiator [W/m ²]	75	T _{VL} = 65 °C, T _{RL} = 55 °C

Tab. 3.4: Baukonstruktive und technische Kennwerte der Variation *Neubau+* zum *Grundmodell*

Parameter	Kennwerte		Anmerkungen
Außenwand	U-Wert [W/m²K]	0,15	Innenputz 1 cm, Beton 20 cm, Wärmedämmung 15 cm, Außenputz 1 cm
Verglasung	U _g -Wert [W/m²K]	0,7	DIN V 18599_2, Tab 7
	g-Wert [-]	0,5	DIN V 18599_2, Tab 7
	τ-Wert; solar transmittance	0,39	DIN V 18599_2, Tab 7
Wärmebrücken	ΔU _{WB} [W/m²K]	0,05	DIN 4108 und EnEV
Gebäudedichtheit I Infiltration	Infiltrationsrate durch Undichtigkeiten [1/h]	0,04	DIN V 18599, S. 51-53 (n ₅₀ Wert entspricht 0,6)
Speichermasse	[Wh/m²K _{AB}]	94	mittel schwer, DIN V 18599_2, S. 82
Wärmerückgewinnung	maschinelle Lüftung [WRG]	0,75	T _{zu_soll} = 22 °C
Wärmeübergabe	Radiator [W/m²]	40	T _{VL} = 45 °C, T _{RL} = 35 °C

HEIZFALL	ZUSCHALTEN			ABSCHALTEN		
	Dauer	Leistung	Poten- zial	Dauer	Leistung	Poten- zial
GRUNDMODELL						
Grundmodell			100%			100%
GEBÄUDEHÜLLE						
Bestand			↓ -31%			↓ -59%
Neubau+			↓ -9%			↓ -5%



Abb. 3.5: Simulationsergebnisse für das Zuschalt- bzw. Abschaltpotenzial bei Variation der Gebäudehülle, Heizfall

Zuschalten

Grundsätzlich zeigt sich bei beiden Varianten eine kurze Aufheizzeit unter 2 h (*Bestand*) bzw. 2-4 h (*Neubau+*), bis der obere Temperaturgrenzwert von 24 °C überschritten wird. Grund hierfür ist zum einen die verhältnismäßig milde Außentemperatur von 0 °C, zum anderen die schnelle Reaktionszeit des eingesetzten Heizkörpers. In der Variante *Bestand* mit einem geringen Dämmstandard kann im Vergleich zum *Grundmodell* eine sehr hohe Leistung von mehr als 30 W/m² zugeschaltet werden. Das resultierende Potenzial ist jedoch aufgrund der kürzeren Zuschaltdauer deutlich geringer als im *Grundmodell* und sinkt um 31 %. In der Variante *Neubau+* ergibt sich gegenüber dem *Grundmodell* aufgrund der gering-

fügig kürzeren Zuschaltdauer ein marginal kleineres Potenzial, welches um 9 % sinkt.

Abschalten

Im Vergleich zum *Grundmodell* sinkt das Potenzial in der Variante *Bestand* um 59 %, was auf die deutlich kürzere Abschaltdauer aufgrund höherer Wärmeverluste zurückzuführen ist. Diese beträgt nun zwischen 2 und 4 h. In der Variante *Neubau+* kann aufgrund sehr geringer Wärmeverluste länger als 24 h abgeschaltet werden. Da der Leistungsbezug für die Einhaltung der Ausgangstemperatur von 22 °C weniger als 5 W/m² beträgt und die Potenzialbewertung sich aus Dauer und Leistung errechnet, ergibt sich ein geringfügig niedrigeres Potenzial im Vergleich zum *Grundmodell*.

3.3.3 Speichermasse

Die Speichermasse dient dazu, momentan nicht benötigte Energiegewinne zu speichern und bei Bedarf wieder abzugeben. Sie sorgt dafür, dass Schwankungen der Raumtemperatur bei wechselnden externen Einflüssen über den Tagesverlauf „geglättet“ werden. Aus diesem Grund werden zwei Varianten untersucht: bei der Variante *leichtes Gebäude* (Speichermasse 45 Wh/m²K_{AB}) wird das *Grundmodell* um eine abgehängte Decke erweitert, sodass eine thermische Trennung zwischen dem Raum und der Speichermasse der Betondecke vorliegt. Bei der Variante *schweres Gebäude* (Speichermasse 147 Wh/m²K_{AB}) werden neben der bereits vorhandenen

Betondecke die Zwischenwände als massive Bauteile ausgeführt, wodurch sich die Speichermasse im Raum erhöht.

HEIZFALL	ZUSCHALTEN			ABSCHALTEN		
	Dauer	Leistung	Poten- zial	Dauer	Leistung	Poten- zial
GRUNDMODELL						
Grundmodell			100%			100%
SPEICHERMASSE						
leichtes Gebäude			↓ -66%			↓ -71%
schweres Gebäude			↑ 114%			↑ 46%

< 2h
 2 - 4h
 4 - 6h
 6 - 12h
 12 - 24h
 > 24h

< 5 W/m²
 5 - 10 W/m²
 10 - 20 W/m²
 20 - 30 W/m²
 > 30 W/m²

↑ Potenzial steigt
 → Potenzial gleichbleibend
 ↓ Potenzial sinkt

Abb. 3.6: Simulationsergebnisse für das Zuschalt- bzw. Abschaltpotenzial bei Variation der Speichermasse, Heizfall

Zuschalten

Aus Abb. 3.6 wird ersichtlich, dass bei der Variante *leichtes Gebäude* das Zuschaltpotenzial um 66 % gegenüber dem *Grundmodell* sinkt. Dies ist auf die deutlich kürzere Zuschaltdauer von unter 2 h zurückzuführen. Der sich einstellende Temperaturverlauf bei Zuschaltung zeigt Abb. 3.7. Grund hierfür ist die thermische Trennung der massiven Decke, welche nicht mehr „beladen“ werden kann.

In der Variante *schweres Gebäude* kann das Zuschaltpotenzial durch Aktivierung der schweren Bauteile Decke und Wände um mehr als das Doppelte erhöht werden.

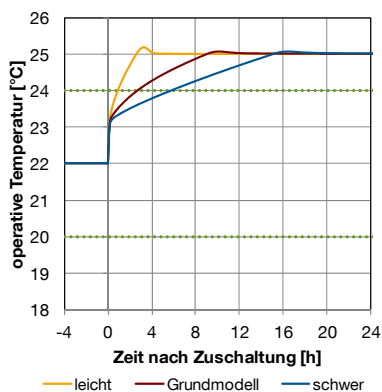


Abb. 3.7: Simulationen zur maximal möglichen Zuschaltdauer in Abhängigkeit der Speichermasse, Heizfall

Abschalten

Wie in der vorangegangenen Betrachtung wirken Speichermassen auch bei einem Abschalten des Heizsystems als thermischer Puffer, wodurch der Abfall der Raumtemperatur verlangsamt wird.

Es zeigt sich, dass bei der Variante *leichtes Gebäude* das Potenzial aufgrund der deutlich kürzeren Abschaltdauer um 70 % sinkt. Hingegen kann bei der Variante *schweres Gebäude* das Heizsystem um mehr als 24 h abgeschaltet werden, wodurch eine Erhöhung des Speicherpotenzials von 46 % resultiert. Die Temperaturverläufe sind in Abb. 3.8 dargestellt.

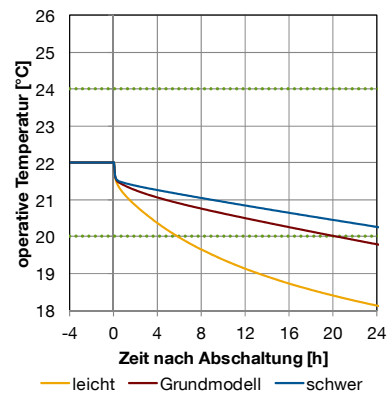


Abb. 3.8: Simulationen zur maximal möglichen Abschaltdauer in Abhängigkeit der Speichermasse, Heizfall

3.3.4 Wärmeübergabesystem

Neben der Untersuchung der baulichen Parameter *Gebäudehülle* und *Speichermasse* wird im Folgenden das Wärmeübergabesystem variiert. Ausgehend vom *Grundmodell*, für das eine spezifische Heizlast von 50 W/m² ermittelt wurde, werden eine *Fußbodenheizung (FBH)* und eine *Bauteilaktivierung (BTA)* dimensioniert und mittels Simulation hinsichtlich des Zu- und Abschaltpotenzials untersucht.

Die Dimensionierung des Massenstroms der *FBH* wird anhand einer Temperaturspreizung von 5 K zwischen Vorlauf und Rücklauf bei einer konstanten Vorlauftemperatur von 35 °C bei einer Abgabeleistung von 50 W/m² bestimmt. Die Rohrschlangen sind 2 cm unter der Oberfläche in der Estrichschicht des Bodens verlegt. Der Wärmeübergangskoeffizient zwischen Rohr und umliegender Estrichschicht wird auf 15 W/m²K festgelegt.

Bei der *BTA* wird ebenfalls der erforderliche Massenstrom bei einer Temperaturspreizung von 5 K festgelegt, die Vorlauftemperatur beträgt hierbei 30 °C. Die Rohrschlangen befinden sich 9 cm unter der Deckenoberfläche in der Betonschicht. Der Wärmeübergangskoeffizient zwischen Rohr und umliegender Betonschicht beträgt 30 W/m²K.

In Abb. 3.9 sind die Ergebnisse der Simulation für die unterschiedlichen Wärmeübergabesysteme dargestellt.

HEIZFALL	ZUSCHALTEN			ABSCHALTEN		
	Dauer	Leistung	Poten- zial	Dauer	Leistung	Poten- zial
GRUNDMODELL						
Grundmodell			100%			100%
WÄRMEÜBERGABESYSTEM						
Fußbodenheizung			↑ 136%			↑ 13%
Bauteilaktivierung			↑ 343%			↑ 53%

< 2h 2 - 4h 4 - 6h 6 - 12h 12 - 24h > 24h
 < 5 W/m² 5 - 10 W/m² 10 - 20 W/m² 20 - 30 W/m² > 30 W/m²
 Potenzial steigt Potenzial gleichbleibend Potenzial sinkt

Abb. 3.9: Simulationsergebnisse für das Zuschalt- bzw. Abschaltpotenzial bei Variation des Wärmeübergabesystems, Heizfall

Zuschalten

Sowohl bei der *BTA*, als auch bei der *FBH* ist eine deutliche Erhöhung des Zuschaltpotenzials gegenüber dem *Grundmodell* mit Heizkörper infolge längerer Zuschaltdauern ersichtlich.

Bei einer Flächenheizung werden zunächst die umliegenden Bauteile (Estrich, Beton) erwärmt, bevor diese über Strahlung und Konvektion Wärme an den Raum abgeben. Aufgrund dieser systembedingten Trägheit ergibt sich bei der *FBH* ein deutlich langsamerer Anstieg der operativen Raumtemperatur von mehr als 6 h, bis der Temperaturgrenzwert von 24 °C überschritten wird. Bei der *BTA* ergibt sich eine Zuschaltdauer von mehr als 12 h. Ebenfalls wird ein nochmals trägerer Anstieg der operativen Raumtemperatur ersichtlich, siehe Abb. 3.10.

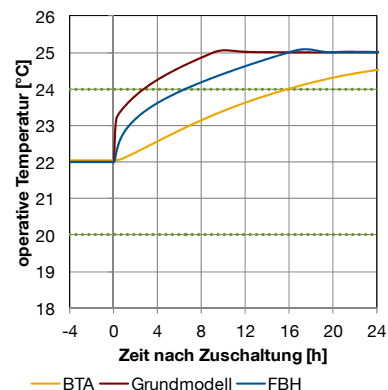


Abb. 3.10: Simulationen zur maximal möglichen Zuschaltdauer in Abhängigkeit des Wärmeübergabesystems, Heizfall

Abschalten

Bei einer Abschaltung des Heizsystems zeigt sich insbesondere bei der *BTA* eine Potenzialerhöhung von 53 % gegenüber dem *Grundmodell* mit Heizkörper. Durch die Vortemperierung des Raumes auf den „eingeschwungenen Zustand“ von 22 °C stellen sich bei beiden Varianten (*BTA* und *FBH*) höhere Bauteiltemperaturen ein, wodurch bei Abschaltung des Heizsystems der Temperaturabfall im Raum gedämpft wird. Insbesondere bei Aktivierung der Decke durch eine *BTA* ergibt sich eine sehr träge Auskühlung des Raumes bei einer Abschaltdauer von mehr als 24 h, siehe Abb. 3.11.

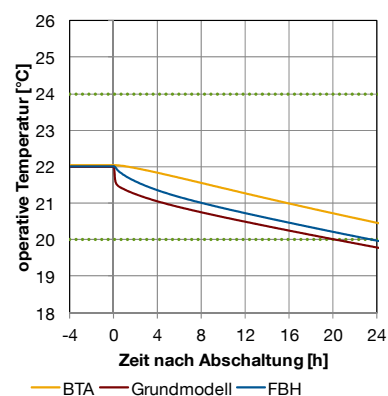


Abb. 3.11: Simulationen zur maximal möglichen Abschaltdauer in Abhängigkeit des Wärmeübergabesystems, Heizfall

3.3.5 Lüftung

In diesem Kapitel werden die Lüftungsart und die Höhe des Luftwechsels untersucht. Im *Grundmodell* wurde, wie bereits in Tab. 3.2 aufgeführt, eine mechanische Lüftung mit einem 1,6-fachen Luftwechsel festgelegt. Um den Einfluss des Luftwechsels auf das Zu- und Abschaltpotenzials des Raumes bei mechanischer Lüftung zu untersuchen, werden zwei Varianten mit einem *mittleren* (1,2 1/h) und *geringen* (0,5 1/h) Luftwechsel simuliert.

Für die Varianten mit natürlicher Lüftung werden Luftwechselraten in der gleichen Höhe wie bei mechanischer Lüftung angesetzt, siehe Abb. 3.12.

HEIZFALL	ZUSCHALTEN			ABSCHALTEN		
	Dauer	Leistung	Poten- zial	Dauer	Leistung	Poten- zial
GRUNDMODELL						
Grundmodell			100%			100%
MECHANISCHE LÜFTUNG						
gering (0,5 1/h)			↓ -77%			↑ 15%
mittel (1,2 1/h)			↓ -31%			↑ 13%
NATÜRLICHE LÜFTUNG						
gering (0,5 1/h)			↓ -56%			↓ -9%
mittel (1,2 1/h)			↑ 41%			↓ -74%
hoch (1,6 1/h)			↑ 193%			↓ -84%

< 2h
 2 - 4h
 4 - 6h
 6 - 12h
 12 - 24h
 > 24h

< 5 W/m²
 5 - 10 W/m²
 10 - 20 W/m²
 20 - 30 W/m²
 > 30 W/m²

↑ Potenzial steigt
→ Potenzial gleichbleibend
↓ Potenzial sinkt

Abb. 3.12: Simulationsergebnisse für das Zuschalt- bzw. Abschaltpotenzial bei Variation der Lüftungsart und Höhe des Luftwechsels, Heizfall

Zuschalten

Grundsätzlich zeigt sich, dass das Potenzial für das Zuschalten unabhängig der Luftwechselrate bei mechanischer Lüftung geringer ausfällt als bei natürlicher Lüftung. Grund hierfür ist die im mechanischen Lüftungssystem integrierte Wärmerückgewinnung, welche die Lüftungswärmeverluste maßgeblich reduziert. Dadurch ergeben sich kürzere Zuschaltdauern gegenüber der natürlichen Lüftung. Selbst bei einem *hohen* Luftwechsel von 1,6 1/h, welcher im *Grundmodell* hinterlegt ist, wird bereits nach weniger als 4 h der obere Temperaturgrenzwert von 24 °C erreicht. Bei der natürlichen Lüftung beträgt die Zuschaltdauer bei diesem Luftwechsel mehr als 12 h, da die Lüftungswärmeverluste zu einem höhe-

ren Heizwärmebedarf führen und entsprechend weniger Heizleistung zugeschaltet werden kann. Der Raum heizt sich deshalb deutlich langsamer auf.

Hierbei ist anzumerken, dass aufgrund einer höheren zuschaltbaren Leistung bei Räumen mit mechanischer Lüftung das Zuschaltpotenzial bei kurzfristigen Lastmanagementmaßnahmen höher als bei natürlicher Lüftung ausfallen kann.

Unabhängig der Lüftungsart steigt das Zuschaltpotenzial mit zunehmendem Luftwechsel aufgrund höherer Lüftungswärmeverluste und damit längeren Zuschaltdauern.

Abschalten

In der Variante *natürliche Lüftung* zeigt sich, dass mit einer Erhöhung der Luftwechselrate das Abschaltpotenzial sinkt. Hier verringert sich die mögliche Abschaltdauer aufgrund höherer Lüftungswärmeverluste, und der Raum kühlt schneller aus. Insbesondere bei einem *hohen* Luftwechsel von 1,6 1/h ergibt sich eine Auskühlung des Raumes von unter 2 h, siehe Abb. 3.13. Entsprechend hoch ist die abgeschaltete Leistung in dieser Variante, was – zumindest für einen sehr kurzen Betrachtungszeitraum – für ein Lastmanagement dennoch sinnvoll sein kann. Bei der mechanischen Lüftung ist das Abschaltpotenzial tendenziell gleichbleibend. Bei zunehmender Luftwechselrate erhöht sich die abschaltbare Leistung bei abnehmender Dauer, im resultierenden Potenzial gleichen sich beide Größen aus.

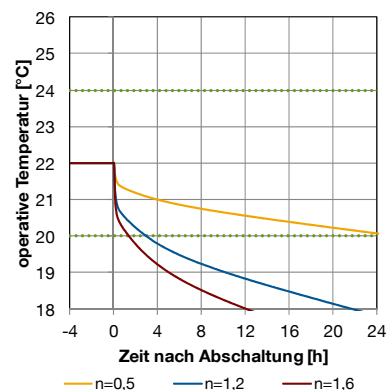


Abb. 3.13: Simulationen zur maximal möglichen Abschaltdauer in Abhängigkeit der Luftwechselrate bei natürlicher Lüftung, Heizfall

3.3.6 Wärmelasten

Technische Geräte, Beleuchtung und Personen stellen Wärmequellen im Raum dar und verringern damit den Heizbedarf. In Abb. 3.14 sind die Simulationsergebnisse für das Zu- und Abschaltpotenzial in Abhängigkeit der Wärmelast dargestellt.

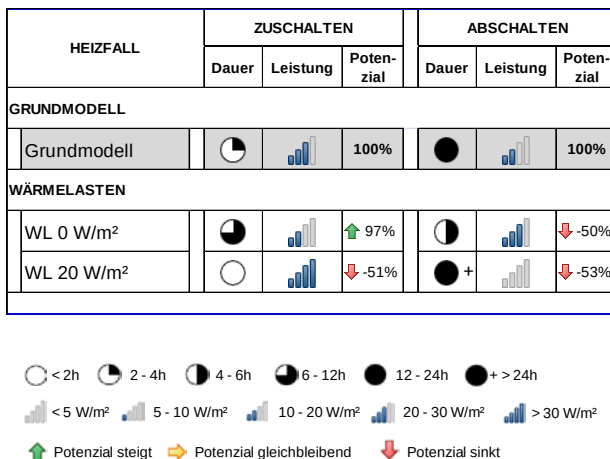


Abb. 3.14: Simulationsergebnisse für das Zuschalt- bzw. Abschaltpotenzial bei Variation der internen Wärmelast, Heizfall

Zuschalten

Wird die Wärmelast, ausgehend von 10 W/m² im *Grundmodell*, auf 20 W/m² verdoppelt, so zeigt sich eine Verringerung des Zuschaltpotenzials um 51 %. Zwar kann eine Heizleistung von mehr als 30 W/m² zugeschaltet werden, jedoch wird der obere Temperaturgrenzwert in weniger als 2 h erreicht. Diese kurze Zuschaltdauer überwiegt anteilmäßig gegenüber der höheren zugeschalteten Leistung in der Potenzialbewertung.

Wenn keine Wärmelast im Raum vorhanden ist, erhöht sich das Potenzial um 97 %, was auf die deutlich längere Zuschaltdauer von rund 8 h zurückzuführen ist. Dies fällt damit in die Kategorie „6 bis 12 h“. Bedingt durch die benötigte höhere Heizleistung bereits vor dem Zuschaltvorgang (Einhaltung der Komforttemperatur bei nicht vorhandener Wärmelast) ist die zuschaltbare Leistung geringer als im *Grundmodell*, was sich prinzipiell mindernd auf das resultierende Potenzial auswirkt. In der Potenzialbewertung hat überproportional längere Zuschaltdauer einen größeren Einfluss als die verringerte zuschaltbare Leistung, und das Potenzial steigt.

Abschalten

Grundsätzlich gilt: umso geringer die Wärmelast, desto weniger Wärme wird im Gebäude freigesetzt. Letztlich zeigt sich dies in einer schnelleren Auskühlung des Raumes. Bei nicht vorhandener Wärmelast (0 W/m²) beträgt die Abschaltdauer weniger als 6 h, bevor die untere Raumtemperaturgrenze von 20 °C unterschritten wird. Die abschaltbare Leistung, welche im Bereich von 20 bis 30 W/m² liegt, ist aufgrund dem fehlendem Wärmeeintrag jedoch höher als im *Grundmodell*. Die deutlich kürzere Abschaltdauer überwiegt gegenüber der höheren abschaltbaren Leistung, wodurch das Potenzial um 50 % sinkt.

Im Falle höherer Wärmelasten (20 W/m²) zeigt sich, dass die Abschaltdauer mehr als 24 h beträgt. Durch die höheren Wärmeeinträge wird die benötigte Heizleistung deutlich reduziert und liegt unter 5 W/m². Diese „minimale“ abschaltbare Leistung überwiegt anteilmäßig gegenüber der sehr langen Abschaltdauer. Das Potenzial sinkt aus diesem Grund um 53 %.

Abschließend zeigt sich, dass die im *Grundmodell* gewählte interne Wärmelast von 10 W/m² prinzipiell den „best case“ in der Potenzialbewertung darstellt.

3.3.7 Optimiertes Gebäudemodell

Anhand der durchgeführten Parametervariation konnte der Einfluss auf das Speicherpotenzial hinsichtlich einer zusätzlichen Energiespeicherung im Raum („Zuschalten“) bzw. einer Abschaltung des Heizsystems („Abschalten“) ermittelt werden.

In der nun folgenden Betrachtung werden aus den einzelnen Parametervariationen die Varianten kombiniert, die sowohl das Zu- als auch das Abschaltpotenzial erhöhen. Aufbauend auf den Erkenntnissen der vorangegangenen Simulationen wird für das *optimierte Gebäudemodell* eine schwere Bauweise, eine BTA sowie die bereits im *Grundmodell* gewählte mechanische Lüftung mit 1,6-fachem Luftwechsel, gleichem Dämmstandard und einer Wärmelast von 10 W/m^2 festgelegt.

In Abb. 3.15 sind die Ergebnisse des optimierten Modells dargestellt.

HEIZFALL	ZUSCHALTEN			ABSCHALTEN		
	Dauer	Leistung	Potenzial	Dauer	Leistung	Potenzial
GRUNDMODELL						
Grundmodell			100%			100%
OPTIMIERT						
BTA+schwer			↑ 536%			↑ 92%

< 2h
 2 - 4h
 4 - 6h
 6 - 12h
 12 - 24h
 + > 24h

< 5 W/m²
 5 - 10 W/m²
 10 - 20 W/m²
 20 - 30 W/m²
 > 30 W/m²

Potenzial steigt
 Potenzial gleichbleibend
 Potenzial sinkt

Abb. 3.15: Simulationsergebnisse für das Zuschalt- bzw. Abschaltpotenzial beim optimiertem Gebäudemodell, Heizfall

Zuschalten

Es zeigt sich, dass insbesondere das Zuschaltpotenzial durch Kombination einer schweren Bauweise (erhöhte Speichermasse im Raum) mit einer BTA um mehr als das fünffache gegenüber dem *Grundmodell* ansteigt. Bei einer gleichbleibenden zuschaltbaren Leistung zwischen 20 und 30 W/m^2 kann die mögliche Zuschaltdauer mehr als versechsfacht werden. Der sich ergebende Temperaturverlauf bei Zuschaltung ist in Abb. 3.16 dargestellt.

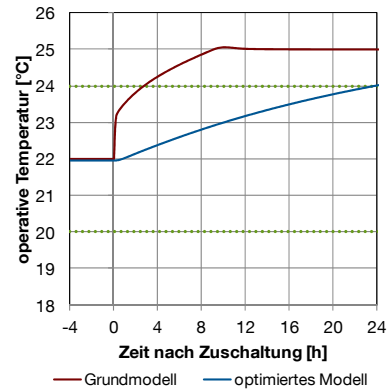


Abb. 3.16: Simulationen zur maximal möglichen Zuschaltdauer des optimierten Gebäudemodells im Vergleich zum *Grundmodell*, Heizfall

Abschalten

Ebenfalls wird das Abschaltpotenzial um 92 % gegenüber dem *Grundmodell* erhöht. Die zusätzliche Einbringung von Speichermasse im Raum sowie das träge Wärmeübergabesystem dämpfen den Auskühlvorgang, sodass die Abschaltdauer bei gleichbleibender abschaltbarer Leistung nun deutlich mehr als 24 h beträgt, siehe Abb. 3.17.

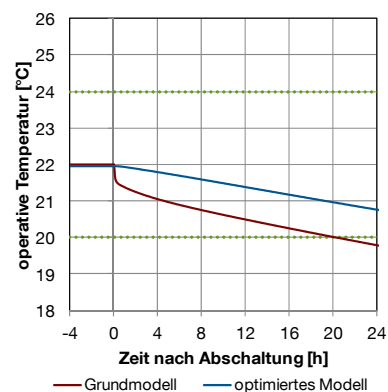


Abb. 3.17: Simulationen zur maximal möglichen Abschaltdauer des optimierten Gebäudemodells im Vergleich zum *Grundmodell*, Heizfall

3.4 Kühlfall

3.4.1 Grundmodell

Analog zur vorangegangenen Betrachtung des Heizfalls werden in den folgenden Unterkapiteln die Ergebnisse des Betrachtungszeitpunkts *Sommer* dargestellt. Das für die Potenzialbewertung relevante Behaglichkeitsband ist dabei zwischen 22 und 26 °C operativer Temperatur bei einer Außentemperatur von 23 °C und solarer Einstrahlung (diffus) von 350 W/m² definiert. Im *Grundmodell* ist eine Luftkühlung implementiert, welche mit einer Leistung von 50 W/m² nach der maximalen Kühllast des Gebäudemodells ausgelegt ist. Das Gebäudemodell selbst ist auf eine mittlere operative Raumtemperatur von 24 °C eingeschwungen.

In Abb. 3.18 sind die Ergebnisse des *Grundmodells* für den Kühlfall dargestellt. Das resultierende Potenzial aus Dauer und Leistung wird im *Grundmodell* als Referenzwert von 100 % definiert.

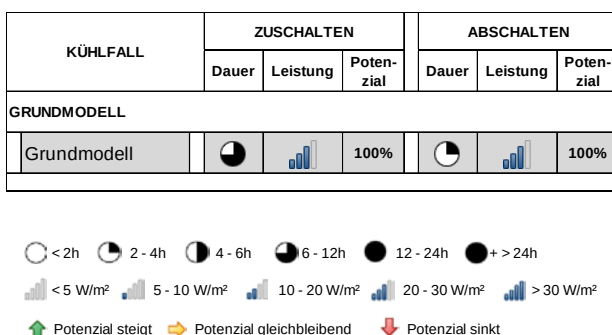


Abb. 3.18: Simulationsergebnisse für das Zuschalt- bzw. Abschaltpotenzial für das *Grundmodell*, Kühlfall

Zuschalten

Die mögliche Zuschaltdauer der Luftkühlung beträgt zwischen 6 und 12 h, bis der untere Temperaturgrenzwert von 22 °C erreicht wird, die zuschaltbare Leistung zwischen 20 und 30 W/m². Vereinfacht ausgedrückt wird rund 50 % der maximal möglichen Kühlleistung zur Einhaltung der Komforttemperatur von 24 °C benötigt.

Abschalten

Insbesondere die konstante diffuse Einstrahlung, aber auch die hinterlegten internen Wärmequellen machen eine Kühlung notwendig. Die Kühlleistung liegt dabei zwischen 20 und 30 W/m², um das Gebäudemodell auf

die Komforttemperatur von 24 °C zu temperieren. Diese Kühlleistung kann für rund 2 bis 4 h abgeschaltet werden, bis der obere Temperaturgrenzwert von 26 °C erreicht wird. Das resultierende Potenzial als Integration der abgeschalteten Leistung über die Abschaltdauer wird als Referenz für die folgenden Untersuchungen mit 100 % angesetzt.

3.4.2 Gebäudehülle

Um den Einfluss der Gebäudehülle zu untersuchen, werden die bereits für den Heizfall definierten Varianten *Bestand* und *Neubau+* untersucht, siehe Tab. 3.3 und Tab. 3.4.

Die Ergebnisse der Simulationen sind in Abb. 3.19 dargestellt.

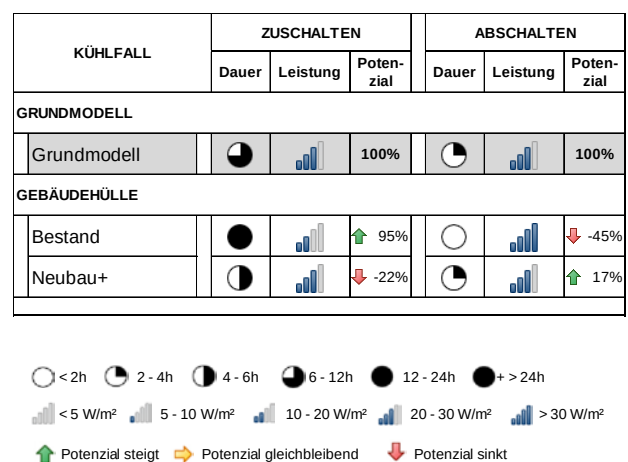


Abb. 3.19: Simulationsergebnisse für das Zuschalt- bzw. Abschaltpotenzial bei Variation der Gebäudehülle, Kühlfall

Zuschalten

In der Variante *Bestand* ergibt sich eine Potenzialerhöhung um 95 % gegenüber dem *Grundmodell*, da mehr Zeit benötigt wird, um den Raum auf den unteren Temperaturgrenzwert zu kühlen. Die zuschaltbare Leistung beträgt zwischen 10 und 20 W/m² bei einer Zuschaltdauer von über 12 h. In der Variante *Neubau+* ist die Zuschaltdauer aufgrund einer höheren zuschaltbaren Leistung von 20 bis 30 W/m² durch den höheren Dämmstandard deutlich kürzer. In der abschließenden Bewertung sinkt das Potenzial gegenüber dem *Grundmodell* um 22 %.

Abschalten

Aufgrund des geringeren Wärmeeintrags bei höherem Dämmstandard in der Variante *Neubau+* heizt sich der Raum langsamer auf als bei einem geringen Dämmstandard. Bei der Variante *Neubau+* beträgt die Dauer, bis der obere Temperaturgrenzwert erreicht wird, 2-4 h, bei der Variante *Bestand* weniger als 2 h. Aufgrund der höheren Kühllast liegt dort die abschaltbare Kühlleistung bei über 30 W/m². Das resultierende Potenzial sinkt jedoch um 45 %, da dieses hier stärker von der Dauer als von der Leistung abhängig ist. Umgekehrt erhöht sich das Potenzial in der Variante *Neubau+* gegenüber dem *Grundmodell* um 17 % aufgrund der etwas längeren Abschaltdauer.

3.4.3 Speichermasse

Die Ergebnisse der Simulationen bei Variation der Speichermasse sind in Abb. 3.20 dargestellt.

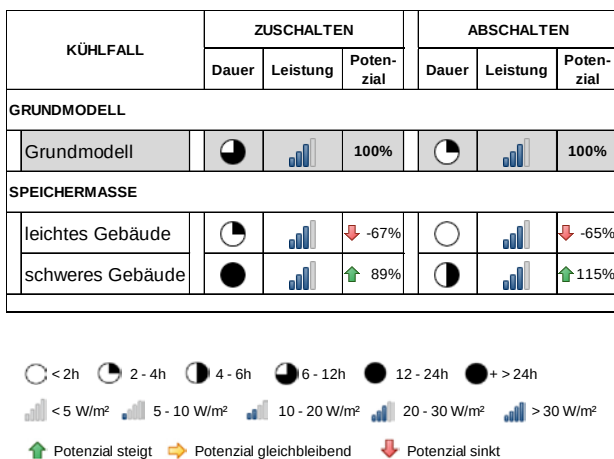


Abb. 3.20: Simulationsergebnisse für das Zuschalt- bzw. Abschaltpotenzial bei Variation der Speichermasse, Kühlfall

Zuschalten

Umso mehr „aktivierbare Speichermasse“ im Raum vorhanden ist, desto träger reagiert der Raum auf Temperaturänderungen. Wird die Raum-Solltemperatur durch ein Zuschalten von Kühlleistung auf eine operative Solltemperatur von 22 °C gesenkt, erhöht sich in der Variante *schweres Gebäude* auch die mögliche Zuschaltdauer, da dort die massiven Bauteile (Decke, Boden, Wände) als Speichermasse genutzt werden können. Die zuschaltbare Leistung ist unabhängig von der vorhandenen Speichermasse, weshalb das resultierende Zuschaltpotenzial nur von der Zuschaltdauer abhängig

ist. Aufgrund der möglichen Zuschaltdauer von über 12 h steigt das Potenzial um 89 % gegenüber dem *Grundmodell*. In der Variante *leichtes Gebäude* sinkt das Potenzial aufgrund der kürzeren Zuschaltdauer von unter 4 h um 67 %.

Abschalten

Bei Abschaltung des Kühlsystems wirken die verfügbaren Speichermassen als thermischer Puffer, wodurch der Temperaturanstieg verlangsamt wird. Es wird ersichtlich, dass in der Variante *leichtes Gebäude* die Abschaltdauer weniger als 2 h beträgt, wodurch das resultierende Potenzial um 65 % fällt. Bei der Variante *schweres Gebäude* hingegen kann das Potenzial durch eine mögliche Abschaltdauer von 4 bis 6 h mehr als verdoppelt werden.

3.4.4 Kälteübergabesystem

Im folgenden Kapitel wird als weitere Variante eine *Bauteilaktivierung (BTA)* als Kälteübergabesystem untersucht. Ausgehend vom *Grundmodell*, in welcher eine spezifische Kühllast des Raumes von 50 W/m² ermittelt wurde, wird die *BTA* dimensioniert und mittels Simulationen das Zu- und Abschaltpotenzial bestimmt.

Die Dimensionierung des Massenstroms der *BTA* wird anhand einer Temperaturspreizung von 5 K zwischen Vorlauf und Rücklauf bei einer konstanten Vorlauftemperatur von 16 °C bei einer Abgabeleistung von 50 W/m² bestimmt. Die Rohrschlangen befinden sich 9 cm unter der Deckenoberfläche in der Betonschicht. Der Wärmeübergangskoeffizient zwischen Rohr und umliegender Betonschicht beträgt 30 W/m²K.

Abb. 3.21 zeigt die Simulationsergebnisse bei Verwendung einer *BTA*.

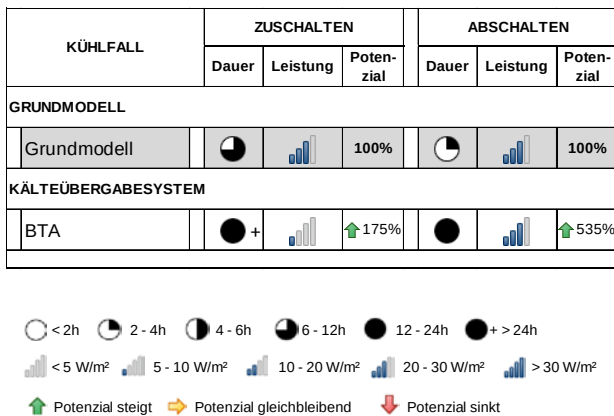


Abb. 3.21: Simulationsergebnisse für das Zuschalt- bzw. Abschaltpotenzial bei Variation des Kälteübergabesystems, Kühlfall

Zuschalten

Aufgrund der systembedingten Trägheit reagiert die *BTA* deutlich langsamer als die Luftkühlung, welche bei einer Zuschaltung sofort spürbar die Lufttemperatur senkt. Es wird ersichtlich, dass bei den gewählten Randbedingungen selbst nach über 24 h der untere Temperaturgrenzwert von 22 °C nicht unterschritten wird. Die geringere zuschaltbare Leistung der *BTA*, die zwischen 5 und 10 W/m² liegt, ergibt sich aus der kleineren Temperaturdifferenz zwischen Raum- und Vorlauftemperatur.

Abschalten

Aufgrund der vortemperierten Speichermasse der Decke durch die integrierte *BTA* heizt sich der Raum deutlich langsamer auf als bei einer Luftkühlung, bei welcher der eingeschwungene Zustand von 24 °C insbesondere durch eine niedrigere Lufttemperatur, aber höheren Bauteiltemperaturen erreicht wird. Die niedrigeren Bauteiltemperaturen bei der Variante *BTA* wirken als thermischer Puffer, wodurch die operative Raumtemperatur deutlich langsamer ansteigt.

Die Dauer, bis der obere Temperaturgrenzwert von 26 °C erreicht wird, beträgt nun mehr als 12 h. Aufgrund der hohen abschaltbaren Leistung über den gesamten Zeitraum ergibt sich eine Potenzialerhöhung von 535 %.

3.4.5 Lüftung

Analog zum Heizfall (siehe Kapitel 7.5.5) erfolgt eine Untersuchung von Lüftungsart und Luftwechselrate für den Kühlfall. Eine Bewertung des Zu- bzw. Abschaltpotenzials gestaltet sich hier nach der bisherigen Methodik als schwierig, da die für den Betrachtungszeitpunkt definierte Außenlufttemperatur von 23 °C – in Abhängigkeit der Raumtemperatur – eine Wärmesenke oder Wärmequelle darstellt. Aus diesem Grund wird für diese Untersuchung eine qualitative Potenzialeinschätzung vorgenommen.

Für den Fall, dass die Außenlufttemperatur niedriger als die Raumtemperatur ist ($T_a < T_i$), steigt mit der Höhe der Luftwechselrate der Lüftungswärmeverlust. Dieser ist bei Verwendung einer mechanischen Lüftung mit WRG prinzipiell geringer als bei natürlicher Lüftung, wodurch längere Zuschaltdauern bei geringerer zuschaltbarer Leistung resultieren als bei natürlicher Lüftung. Analog ergibt sich bei der mechanischen Lüftung mit WRG eine höhere abschaltbare Leistung mit kürzerer Abschaltdauer.

Für den Fall, dass die Außenlufttemperatur höher als die Raumtemperatur ist ($T_a > T_i$), stellt die Außenluft eine Wärmequelle dar. Für die mechanische Lüftung werden die Wärmegewinne – im Vergleich zur natürlichen Lüftung – durch die WRG geringer ausfallen. Daraus resultieren höhere zuschaltbare Leistungen der Kühlung bei kürzerer Zuschaltdauer, bzw. geringere abschaltbare Leistungen bei längerer Abschaltdauer. Mit zunehmender Luftwechselrate steigt in beiden Varianten der Kühlbedarf, wodurch die zuschaltbare Leistung sinkt.

3.4.6 Wärmelasten

Technische Geräte, Beleuchtung und Personen stellen eine Wärmequelle im Raum dar und können den Kühlbedarf deutlich erhöhen. Für das *Grundmodell* wurde eine interne Wärmelast von 10 W/m² angesetzt. In Abb. 3.22 sind die Simulationsergebnisse für das Zu- und Abschaltpotenzial in Abhängigkeit der Wärmelast dargestellt.

KÜHLFALL	ZUSCHALTEN			ABSCHALTEN		
	Dauer	Leistung	Poten- zial	Dauer	Leistung	Poten- zial
GRUNDMODELL						
Grundmodell			100%			100%
WÄRMELASTEN						
WL 0 W/m²			↓ -48%			↑ 111%
WL 20 W/m²			↑ 111%			↓ -60%



Abb. 3.22: Simulationsergebnisse für das Zuschalt- bzw. Abschaltpotenzial bei Variation der internen Wärmelast, Kühlfall

Zuschalten

Bei einer Verdopplung der Wärmelast von 10 W/m² des *Grundmodells* auf 20 W/m² ergibt sich eine deutliche Erhöhung des Zuschaltpotenzials um 111 %, bedingt durch höhere Zuschaltdauern von mehr als 24 h bei einer zuschaltbaren Leistung zwischen 10 und 20 W/m². Liegen hingegen keine Wärmelasten vor, sinkt das Zuschaltpotenzial um 48 %. Dies ist im Wesentlichen auf die auf die kürzere Zuschaltdauer von 2 bis 4 h zurückzuführen, bis der untere Temperaturgrenzwert von 22 °C erreicht ist. Die zuschaltbare Leistung liegt prinzipiell im gleichen Bereich wie das *Grundmodell* zwischen 20 und 30 W/m².

Die Zuschaltdauer steigt demnach verhältnismäßig höher an, als die zuschaltbare Leistung fällt. Da die Potenzialbewertung als Integration der Leistung über die Dauer definiert ist, steigt mit höherer Wärmelast auch das Zuschaltpotenzial.

Abschalten

Je höher die Wärmelast, desto mehr Wärme wird im Gebäude freigesetzt, was tendenziell zu höheren (abschaltbaren) Kühlleistungen und kürzeren Abschaltdauern führt. Bei nicht vorhandener Wärmelast (0 W/m²) liegt die Abschaltdauer zwischen 6 und 12 h, bevor die obere Temperaturgrenze von 26 °C überschritten wird. Bei Verdopplung der Wärmelast auf 20 W/m² gegenüber dem *Grundmodell* ergibt sich Abschaltdauer von weniger als 2 h. Dies zeigt den enormen Einfluss von Wärmelasten auf die mögliche Abschaltdauer. Die abschaltbare Leistung liegt dabei über 30 W/m². Hinsichtlich des re-

sultierenden Potenzials ergibt sich für die Variante 0 W/m² eine Erhöhung um 111 % gegenüber dem *Grundmodell* aufgrund der höheren Abschaltdauer. In der Variante 20 W/m² sinkt entsprechend das Potenzial um 60 %. Der Einfluss der möglichen Abschaltdauer überwiegt in der Potenzialbewertung demzufolge gegenüber der abschaltbaren Leistung.

3.4.7 Optimierte Gebäudemodell

Wie auch für den Heizfall wird ein *optimiertes Gebäudemodell* als Kombination von schwerer Bauweise und eine BTA festgelegt. In Abb. 3.23 sind die Ergebnisse des optimierten Modells dargestellt.

KÜHLFALL	ZUSCHALTEN			ABSCHALTEN		
	Dauer	Leistung	Poten- zial	Dauer	Leistung	Poten- zial
GRUNDMODELL						
Grundmodell			100%			100%
OPTIMAL						
BTA+schwer			↑ 175%			↑ 727%



Abb. 3.23: Simulationsergebnisse für das Zuschalt- bzw. Abschaltpotenzial beim optimierten Gebäudemodell, Kühlfall

Zuschalten

Die zusätzliche Einbringung von Speichermasse im Raum sowie das träge Wärmeübergabesystem führen zu einer deutlich längeren Zuschaltdauer von mehr als 24 h. Trotz der geringeren zuschaltbaren Leistung aufgrund der geringen Differenz zwischen Raumtemperatur und Vorlauftemperatur der BTA ergibt sich eine Potenzialerhöhung von 175 %.

Abschalten

Es zeigt sich, dass insbesondere durch Kombination einer schweren Bauweise mit einer BTA das Potenzial um mehr als das siebenfache erhöht werden kann. Bei gleichbleibender abschaltbarer Leistung zwischen 20 und 30 W/m² beträgt die mögliche Abschaltdauer mehr als 12 h.

3.5 Zusätzlicher Energiebedarf eines Zuschaltvorgangs

Durch einen Zuschaltvorgang wird im Rahmen dieser Studie der Modellraum bis zur definierten oberen (Heizfall) bzw. unteren (Kühlfall) Temperaturgrenze des Behaglichkeitsbandes beheizt bzw. gekühlt. Hierbei entstehenden zusätzliche energetische Verluste bei der Speicherung der Wärme bzw. Kälte.

Für eine Abschätzung wird im Folgenden untersucht, wie hoch der energetische Mehraufwand während eines Zuschaltvorgangs ausfällt. Hierzu wird im Heizfall der Energiebedarf durch einen Zuschaltvorgang auf 24 °C mit anschließendem Auskühlen bis auf die Komforttemperatur mit dem Energiebedarf bei stetiger Einhaltung der Komforttemperatur (22 °C) verglichen. Als Gebäudemodell dient das Grundmodell mit Heizkörper, siehe Kapitel 3.2

Abb. 3.24 links zeigt den Temperaturverlauf als rote Linie bei einem Zuschaltvorgang bis auf 24 °C. Nach Erreichen dieser Temperatur wird das Heizsystem abgeschaltet und die ursprüngliche Komforttemperatur als Regelgröße an das Heizsystem übergeben. Die graue Linie stellt die abgegebene Heizleistung des Heizkörpers an den Raum dar. Es zeigt sich, dass nach ca. 36 h die Heizleistung nahezu konstant verläuft und das Modell

damit wieder auf 22 °C operativer Raumtemperatur eingeschwungen ist. Die abgegebene Heizenergie während des gesamten Zu- bzw. Abschaltvorgangs ist hierbei als graue Fläche unter der Linie der Heizleistung dargestellt und beträgt rund 8,1 kWh. Für den Fall einer konstanten Einhaltung der Komforttemperatur (Abb. 3.24 rechts) beträgt die über den Zeitraum abgegebene Energie rund 7,9 kWh. Der energetische Mehraufwand beträgt somit in diesem Vergleich lediglich 2 %. Somit kann der durch eine kurzfristige Lastmanagement-Maßnahme resultierende höhere Energiebedarf prinzipiell als „moderat“ bezeichnet werden.

Jedoch sei an dieser Stelle angemerkt, dass der durch Lastmanagement-Maßnahmen entstehende Mehraufwand eine schwer zu kalkulierende Größe darstellt: sowohl die gebäudespezifischen Parameter (Gebäudehülle, Dämmstandard, Speichermassen etc.), als auch anlagentechnische Eigenschaften (Wärmeübergabesystem, Lüftungsart etc.) beeinflussen die Verluste bei der Speicherung der Wärme bzw. Kälte. Desweiteren kommt bei dieser Betrachtung erschwerend hinzu, dass eine hohe Zeitabhängigkeit besteht. Wird beispielsweise zusätzliche Energie durch Zuschalten an Heizleistung in den Bauteilen gespeichert, indem der Raum über einen längeren Zeitraum auf einem höheren Temperaturniveau gehalten wird, so werden hier auch höhere Wärmeverluste anfallen.

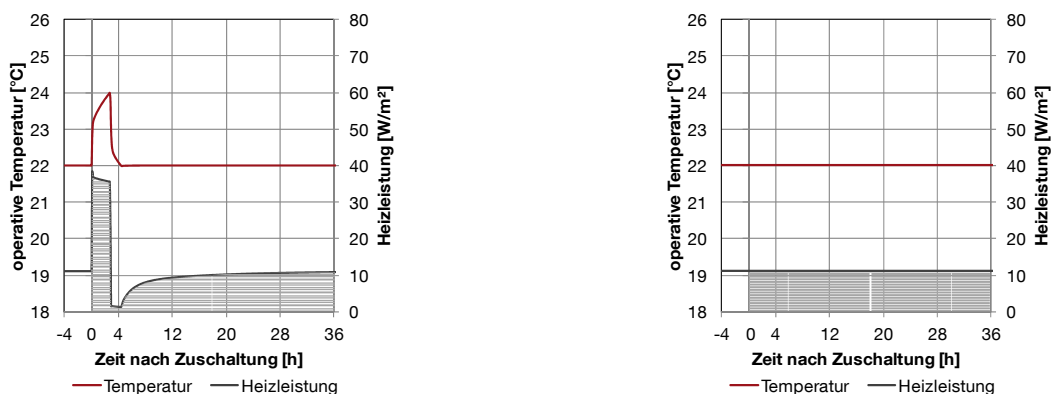


Abb. 3.24: Simulationen zum zusätzlichen Energiebedarf eines Zuschaltvorgangs. Links: Zuschaltung auf 24 °C mit anschließendem Auskühlen und Einschwingen auf die Komforttemperatur. Rechts: Kein Zuschaltvorgang, konstante Einhaltung der Komforttemperatur.

3.6 Fazit SIM 1

Die durchgeführten Untersuchungen zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten im Jahr (*Winter, Sommer*) führen zu der Erkenntnis, dass das Speicherpotenzial eines Gebäudes – und damit auch das Lastmanagementpotenzial – aus Dauer und Leistung bewertet werden sollte. Die ermittelten Zu- und Abschalt Dauern stehen in direktem Zusammenhang mit der Leistung des Heiz- bzw. Kühlsystems, welche zu bzw. abgeschaltet werden kann.

Grundsätzlich zeigt sich, dass bei kurzer Dauer eine hohe Leistung, bei langer Dauer wenig Leistung zu- bzw. abgeschaltet werden kann.

Die untersuchten Parameter haben zum Teil erheblichen Einfluss auf das resultierende Potenzial. Insbesondere bauliche Maßnahmen wie verfügbare Speichermasse im Raum und Art des Wärmeübergabesystems, aber auch nutzungsabhängige Parameter wie Wärmelasten und Lüftungsart können sowohl das Zu- als auch das Abschaltpotenzial um mehr als 100 % beeinflussen.

Durch die Kombination aus hoher Speichermasse und flächigem Wärmeübergabesystem (BTA) kann das Zu- und Abschaltpotenzial zu beiden betrachteten Zeitpunkten wesentlich erhöht werden (*optimiertes Gebäudemodell*). Der gewählte Dämmstandard des *Grundmodells* nach EnEV 2009 erwies sich hinsichtlich des Potenzials als „optimal“: bei niedrigerem Dämmstandard ergeben sich zwar meist höhere zu- bzw. abschaltbare Leistungen, jedoch kürzere Zu- bzw. Abschalt Dauern, die sich negativ auf das resultierende Potenzial auswirken können. Höhere Dämmstandards führen zu geringeren zu- bzw. abschaltbaren Leistungen, sodass insbesondere das Abschaltpotenzial aufgrund sehr geringer abschaltbarer Leistung verringert wird.

Die Erkenntnisse der Sensitivitätsanalyse bestätigen die Notwendigkeit, Lastmanagementpotenziale separat für unterschiedliche Gebäudetypologien zu untersuchen. Dies erfolgt in Kapitel 5.

4. Gebäudetypologisierung | Vorklassifizierung von Gebäuden

4.1 Vorgehensweise

„Eine Typologie fasst ähnliche, aber nicht hundertprozentig identische Objekte in Gruppen zusammen.“[12]

Die Untersuchung eines Lastmanagements auf Gebäudeebene fokussiert auf das Speichervermögen von Gebäuden, insbesondere unter der Berücksichtigung ihrer bauphysikalischen Eigenschaften, der technischen Ausstattung und der Speicherfähigkeit der Baukonstruktion.

Basierend auf der Literaturrecherche und weiteren Voruntersuchungen [6] werden folgende Kriterien für die Auswahl von Modellgebäuden (siehe Kapitel 5) angewendet:

- Gebäudetypologie und Struktur
- Gebäudealter
- Baukonstruktion
- Integrierte technische Systeme I
Energieversorgungssysteme
- bestehende Stromnutzungsstruktur

Gebäudetypologie und Struktur

Innerhalb einer Vorklassifizierung werden sowohl der Wohnbau als auch der Nicht-Wohnbau hinsichtlich ihrer Eignung für Lastmanagement untersucht (s. Tab. 4.1). Der Schwerpunkt der detaillierten Untersuchung mittels thermischer Gebäudesimulation (SIM2 in Kapitel 5) liegt auf folgenden drei Gebäudetypologien:

- *Wohnen (Einfamilien- und Mehrfamilienhaus)*
- *Büro und Verwaltung*
- *Handel*

Innerhalb der Gebäudetypologien werden anhand von positiven Indikatoren für Lastmanagement, wie z.B. Flächenanteil und Gebäudeanzahl, Wärmespeicherfähigkeit von Bauteilen, aktive Speichermasse im Gebäude wie z.B. Fußbodenheizung, sowie geeignete Energieversorgungssysteme, weiterführende Analysen anhand statistischer Daten und Forschungsberichten durchgeführt, um jeweils geeignete Modellgebäude zu definieren.

Die Häufigkeit von bestimmten Typologien, gemessen an der Gebäudeanzahl und der genutzten Fläche in m², wird anhand von statistischen Jahresberichten ermittelt. Gut

aufbereitete Berichte, wie sie es für den Bereich des Wohnungsbaus gibt, sind für den Sektor Nichtwohngebäude selten. Vorhandene statistische Daten, eigene Erfahrungen und Kennwerte aus realen Projekten dienen dann als Datengrundlage.

Für die Bildung von Modellgebäuden (siehe Kapitel 5.1.1) ist die Definition des Umfangs der Nutzungseinheit wichtig, da diese die Bilanzgrenzen für die Simulation festlegt. Bei kleinen Wohngebäuden im Ein- und Zweifamilienhausbereich (EFH) umfasst die Nutzfläche das gesamte Gebäude, das heißt die Nutzungseinheit entspricht dem gesamten Gebäude. Andere Typologien, wie Mehrfamilienhäuser (MFH) oder Büro- und Verwaltungsgebäude hingegen bestehen aus einer „Reihung“ von einzelnen Hauptnutzungseinheiten. So besteht z.B. der Grundriss eines Stockwerkes eines Büro- und Verwaltungsgebäudes oder einer Schule aus einzelnen Büro- oder Klassenräumen, welche im mehr oder weniger regelmäßigen Muster angeordnet sind. Die Größe der Büroräume oder Schulklassenräume und die Beschaffenheit der übrigen genutzten Räumlichkeiten sind ähnlich.

Die definierten Modelle für diese Gebäudetypologien bilden deshalb einzelne typische Räume der Hauptnutzung ab. Die Abbildung ganzer Gebäude führt in diesen Fällen nicht zu einem genaueren Ergebnis, da weitere Randbedingungen bezüglich der Größe, des Volumens und der Gebäudeform festgelegt werden müssten und das Ergebnis somit weniger übertragbar ist. Zusätzlich würde der Simulationsaufwand deutlich erhöht.

Jede Gebäudetypologie weist Eigenschaften aus, welche abhängig von der jeweiligen Nutzung sind. Für die Definition der Modellgebäude und Modellräume werden die Randbedingungen der Nutzung anhand von normierten Werten, wie z.B. den Kennwerten der DIN 18599 [13], definiert. Für die vorliegende Untersuchung werden folgende Randbedingungen bzw. Indikatoren mit entsprechenden Kennwerten berücksichtigt:

- Nutzungsart (interne Lasten)
- Größe der Nutzungseinheit
- Belegungsprofil (Belegungszeiten und Belegungsdichte)
- Behaglichkeitsmodell und -kategorie

Erstes und wichtigstes Auswahlkriterium für zu untersuchende Typologien ist deren Häufigkeit. Die in der Tab. 4.1 **blau gekennzeichneten** Typologien bzw. Kategorien werden in Kapitel 5 detaillierter untersucht.

Tab. 4.1: Gebäudekategorien und Gebäudetypologien, abgeändert nach [12]

Wohngebäude	Einfamilienhäuser, Mehrfamilienhäuser
Büro- und Verwaltungsgebäude	Banken, Versicherungen, Regierungsgebäude, Ämter
Handel	Einzelhandelsgebäude
Bildungsgebäude	Schulgebäude, Kindertagesstätten, Hochschulen
Fabrikgebäude	Großunternehmen, Fabrikationshallen
Werkstattgebäude	Handwerk, Gewerbe
Heilbehandlungsgebäude	Krankenhäuser, Polikliniken
Lagerhallen	Zentrallager, Versandlager
Sporthallen	Schul- und Hochschulsportanlagen, Tennishallen
Schwimmbäder	Spaßbäder, kleine Schwimmsportanlagen
Kulturgebäude	Oper, Theater, Kino, Ausstellungsgebäude
Beherbergungsgebäude	Hotel, Gaststättengebäude, freistehend

Energieeffizienz

Die geltende EnEV und deren zukünftige Entwicklung entsprechend der EU- Effizienzrichtlinie unterstützen die Entwicklung von Neubauten zu einem effizienten Betrieb. Fest steht, dass zukünftig sowohl die Wohn- als auch die Nichtwohngebäude im Neubau mit effizienter Gebäudetechnologie ausgestattet werden und die Gebäudehülle einen hohen thermischen Standard aufweisen wird.

Im Bestand (bis 2002) liegt das Augenmerk auf der Auswahl von Gebäudetypologien, welche hohes Sanie-

rungspotenzial aufweisen. Dies ist sowohl in der Sanierungsfähigkeit als auch in dem zu sanierenden Volumen begründet.

Indikatoren:

- Sanierungsvolumen und Sanierungsfähigkeit
- Gebäudesubstanz

Um zukünftige Entwicklungen im Bauwesen zu berücksichtigen, werden energetische Annahmen für den Neubau und für den Bestand getroffen. Im Hinblick auf die Zielsetzung der EU Direktive 2010/31/EU wird der Neubaustandard, sowohl in Wohn- als auch in Nichtwohngebäuden, als „Nearly- Zero-Energy Standard 2020“ festgesetzt. Im konkreten Fall heißt dies, dass Bauteile soweit ertüchtigt werden, dass die Transmissionswärmeverluste minimiert werden und die Integration von Niedertemperatursystemen bei Wärme- und Kälteübergabe breitere Anwendung findet. Darüber hinaus wird eine optimierte Luftdichtigkeit angenommen.

Indikatoren:

- U-Wert
- Luftdichtigkeit
- Integration technischer Versorgungssysteme

Baukonstruktion

Die hohe Verfügbarkeit von Speichermassen lässt ein großes Potenzial für Lastmanagement erwarten. Gebäude mit minimierten Transmissionswärmeverlusten und hoher Speicherfähigkeit der Bauteile sind träge und reagieren langsamer auf veränderte Konditionen, wie z.B. einen reduzierten Heizbetrieb. Die hohe Passivität der Gebäude ermöglicht es weiterhin, über einen längeren Zeitraum behagliche Innenraumkonditionen aufrechtzuerhalten und somit die Abschaltdauer gebäudetechnischer Anlagen zu verlängern. Bei der Modellbildung für die Simulation sind deshalb Untersuchungen hinsichtlich des Potenzials und der Nutzbarkeit der speicherfähigen Baumassee von großer Bedeutung.

Indikatoren:

- Bauweise der Konstruktion
- Speicherkapazität von Bauteilen
- Raumproportionen

Energieversorgungssysteme

Das Kriterium der Energieversorgung, bzw. das Konzept der technischen Systeme im Gebäude und auf Raumebene, beeinflusst maßgeblich das nutzbare Potenzial eines strombasierten Lastmanagements. Der Fokus der Forschungsarbeit basiert auf der Quantifizierung des theoretisch möglichen thermischen Speicherpotenzials. In der Vorklassifizierung werden sowohl Systeme, welche sich für eine energieeffiziente strombasierte Energieversorgung eignen, wie z.B. Wärmepumpen verbunden mit bauteilintegrierten Wärme- bzw. Kälteübergabesystemen, als auch gängige technische Systeme im Bestand (bspw. ein elektrischer Heizstab) berücksichtigt.

Indikatoren:

- Arten der Wärme- und Kälteübergabesysteme
- Systemtemperaturen
- Leistungsbereiche | Leistungsabnahme

Stromnutzungsstruktur

Das gerätebasierte Lastmanagementpotenzial von typischen technischen Ausstattungsmustern, wie z.B. Waschmaschinen und Spülmaschinen im Wohnungsbau und der Option zur zeitweiligen Abschaltung ohne Funktionsverlust, Arbeits- oder Komfortausfall wurde bereits in mehreren Studien [6], [7] untersucht und ist kein Teil der vorliegenden Forschungsarbeit. In die Bildung der Modelle gehen jedoch die Werte des typischen Ausstattungsgrades einer Wohn- oder Büroeinheit ein. Sie werden als interne Lasten abgebildet. Hierbei wird nach Beleuchtung und Arbeitsgeräten unterschieden. Dadurch werden die Spezifika der verschiedenen Gebäudetypologien dargestellt.

Indikatoren:

- Nutzungsstruktur
- Nutzungsdauer
- Ausstattungsgrad und -art mit Geräten

Als allgemeine Übersicht zum Netto-Stromverbrauch in Deutschland dient die Tab. 4.2. Hier wird der Strombedarf einzelner Sektoren in Deutschland und die Entwicklung der eigenen Stromproduktion für die Jahre 2001 und 2010 abgebildet. Hieraus wird ersichtlich, dass die Industrie und private Haushalte die am stärksten vertretenen Verbrauchergruppen sind.

Tab. 4.2: Netto-Stromverbrauch der Verbrauchergruppen in Deutschland nach [14]

Verbraucher	2001 [Mio. kWh]	2010 [Mio. kWh]
Industrie	240.300	250.200
Haushalte	134.400	141.700
Handel und Gewerbe	68.000	76.500
Öffentliche Einrichtungen	41.000	47.000
Landwirtschaft	8.000	9.000
Verkehr	16.000	16.700
Insgesamt	507.700	541.100
Selbsterzeugung durch Eigenanlagen/ Industrie	16.222	24.498

Abb. 4.1 zeigt die prozentuale Verteilung des Endenergieverbrauchs in Deutschland nach Sektoren. Demgegenüber zeigt die nachfolgende Abb. 4.2 die Aufteilung nach einzelnen Anwendungsbereichen über alle Sektoren hinweg, inkl. Verkehr, was den hohen Anteil an mechanischer Energie insgesamt erklärt. In den folgenden Textabschnitten zu den jeweiligen Gebäudetypologien werden die spezifischen Verhältnisse nochmals deutlicher ausgearbeitet.

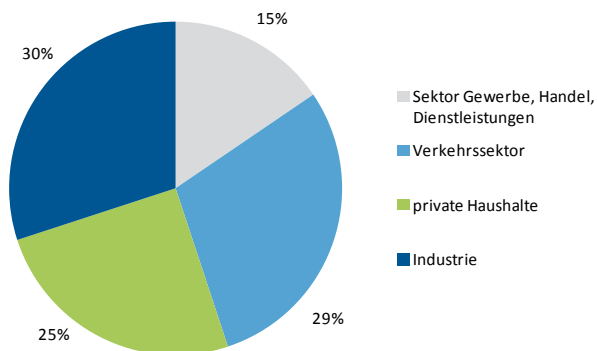


Abb. 4.1 Gesamt-Endenergieverbrauch nach Sektoren 2011. [15]

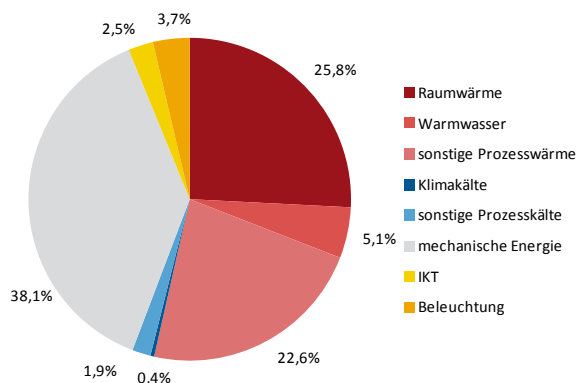


Abb. 4.2 Endenergieverbrauch nach Anwendungsbereichen in Deutschland 2011. [15]

4.2 Wohngebäude

Insgesamt 27 % des Endenergieverbrauchs Deutschlands im Jahre 2008 beruht auf privaten Haushalten (2011: 25 %). Entsprechend [16, p. 63ff.] entfällt der Großteil (77 %) des Energieverbrauchs in Haushalten in 2008 auf die Erzeugung von Raumwärme (siehe Tab. 4.3.). Zukünftige Szenarien dieser Studie gehen von einer Reduzierung des Anteils auf ca. 73 % bis 65 % in 2050 aus. Diese Entwicklung wird neben effizienteren Heizungsanlagen und Ersatzneubau vor allem durch die Sanierung des Bestandes erwirkt. Die Tab. 4.3 zeigt die Anteile des Endenergieverbrauchs in privaten Haushalten und deren potenzielle Entwicklung bis 2050.

Tab. 4.3: Endenergieverbrauch der privaten Haushalte 2008 bis 2050. Anteile des Endenergieverbrauchs nach Verwendungszwecken ohne Mobilität nach [16].

Gesamtverbrauch private Haushalte	2008	2020	2030	2040	2050
insgesamt [TWh]	695	632	593	563	524
Raumwärme [%]	77	75	72-74	69-74	65-73
Warmwasser [%]	10	10-11	11-13	12-15	12-16
Kochen [%]	2	2	2	2	2-3
Elektrogeräte[%]	11	12	12-13	13-14	13-15

Der Wohnungsbau spielt in der Gesamtenergiebilanz Deutschlands (siehe Abb. 4.1) und in der Gebäudestruktur (Tab. 4.7) insgesamt eine große Rolle. Daher wird dieser Typologie ein großes Potenzial für Lastmanagement zugesprochen [17].

Gebäudetypologie und Struktur

Entsprechend der Recherche der verfügbaren statistischen Daten wurden die am stärksten vertretenen Kategorien des Wohnungsbaus für die weitere Potenzialermittlung in Kapitel 5 ausgewählt. Entsprechend der IWU Studie TABULA ([18] und [19]) liegt der Anteil der Ein- und Zweifamilienhäuser an allen Wohngebäuden in Deutschland bei ca. 78 %. Das freistehende Einfamilienhaus ist die am häufigsten vertretene Gebäudekategorie mit über 40 % Wohnflächenanteil. Dieser ist vergleichbar mit dem Wohnflächenanteil in Mehrfamilienhäusern mit ca. 41%. Auch bei Betrachtung der Anzahl an Wohngebäuden nehmen die freistehenden Einfamilienhäuser mit ca. 57 % den größten Anteil ein. Die Summe der Gebäude des mehrgeschossigen Wohnungsbaus beträgt dagegen etwa 17 % [20].

Somit eignet sich das Einfamilienhaus aufgrund der hohen Gebäudeanzahl und des Wohnflächenanteils für eine weitergehende Untersuchung hinsichtlich des Potenzials zu Lastmanagement. Der sogenannte „kleine mehrgeschossige Wohnungsbau“, also Gebäude mit 3 bis 12 Wohneinheiten [21], wird aufgrund seines großen Wohnflächenanteils ebenfalls betrachtet.

Bei den Modellen des individuellen Wohnungsbaus *EFH-Neubau* und *EFH-Bestand*, siehe Kapitel 5.1, wird das gesamte Gebäude abgebildet. Die Belegung der 180 m² großen „Nutzungseinheit“ wird mit 4 Personen angesetzt.

Das Simulationsmodell der *MFH* basiert auf der Annahme einer Reihung von zwei Wohneinheiten auf einem Stockwerk. Es wird das Modell einer Nutzungseinheit/Wohneinheit dargestellt, welche es ermöglicht, diese Gebäudetypologie mit vertretbarem Simulationsaufwand abzubilden und doch das Verhältnis der Wohnfläche zur Außenwand richtig abzubilden. Die Einheit ist 110 m² groß und wird mit 3 Personen belegt.

Gebäudealter

Die IWU Studie TABULA differenziert den Bestand nach „Altbau“ (=bis 1978), „Baujahr 1979-2004“ und „Neubau“ ab 2004. Nach [21] werden Wohnhäuser ab dem Jahr 2000 als Neubau bezeichnet. In der vorliegenden Untersuchung bildet *Neubau* die Altersklasse ab 2002 ab, während die älteren Baujahre als *Bestand* zusammengefasst werden.

Auf die Gebäudeanzahl bezogen, beträgt die Neubaurate im Wohngebäudebereich ca. 0,45 %. Der Anteil von EFH und MFH, die nach dem Jahr 2002 fertiggestellt wurden, entspricht etwa 233 Mio. m² und damit ca. 4 % der Gesamtwohnfläche Deutschlands (s Abb. 6.2) [19].

Um bessere Vergleichbarkeit zwischen den Modellen herzustellen, wurden die Gebäudekubaturen für Neubau und Bestand als identisch abgebildet.

In Deutschland sind insbesondere die Nachkriegsjahrgänge 1958-1978 sowohl im Bereich der EFH (mit insgesamt etwa 29 % Wohnflächenanteil) als auch im Bereich der MFH (mit etwa 35 %) die am stärksten vertretenen Gebäudealter [12]. Aus diesem Grund wird für das Gebäudemodell EFH-Bestand der Dämmstandard dieser Bauperiode gewählt. In der Sanierungsstudie der dena [22, p. 17] wird diese Altersklasse in die Gruppen „1958-1968: Wirtschaftlicher Aufschwung“ und „1969-1978: erste Ergänzungen der DIN 4108 um energetische Mindestanforderungen“ eingeteilt.

Baukonstruktion

Der überwiegende Anteil von etwa 60% der Wohngebäude in Deutschland besteht aus einschaligem Mauerwerk. Rund ein Drittel der Wohngebäude besteht aus zweischaligem Mauerwerk. Zwar nimmt der prozentuale Anteil an Holzbaukonstruktionen im Neubaubereich deutlich zu und beträgt hier 13 % gegenüber 7,5 % in der Altersklasse 1979-2004 und lediglich 1,5 % im Altbaubestand bis 1978. Holzbaukonstruktionen werden jedoch wie die Leichtbaukonstruktionen der „Fertighäuser“ der 70-er und 80-er Jahre für die Untersuchung außer Acht gelassen, weil beide Konstruktionsarten zukünftig kaum dominant werden.

Auch bei isolierter Betrachtung der Konstruktionstypen im Bereich des MFH überwiegen die monolithische und die zweischalige Mauerwerksbauweise gegenüber der Betonfertigteilbauweise. Unter der Annahme, dass das Potenzial zur Lastverschiebung abhängig von der Verfügbarkeit von Speichermassen ist und der monolithische Konstruktionstyp im Wohngebäudebereich mit über 60 % überwiegt [20], werden in den nachfolgenden Untersuchungen die Gebäudemodelle *EFH* und *MFH* in massiver Bauweise mit einschaligem Mauerwerk und Stahlbetondecken abgebildet. Eine weitere Detaillierung typischer baukonstruktiver Merkmale für MFH der Jahre

1959-1968 ist der dena Studie [22] entnommen und in folgender Tabelle, Tab. 4.4, zusammengestellt. Der Dachaufbau wird nicht dargestellt, da im Bestand der überwiegende Anteil an Dächern nicht ausgebaut ist und die oberste Geschossdecke den oberen Gebäudeabschluss bildet (Vgl. [22])

Tab. 4.4: Typische baukonstruktive Merkmale für ein Mehrfamilienhaus der 60-er Jahre.

MFH-Bestand Bauteil	Beschreibung	U-Wert [W/m²K]
Außenwand	Ziegelbauweise, Gitterziegel verputzt	1,2
Kellerdecke	Stahlbetondecke, Trittschall, Estrich	0,9
Geschossdecken	Stahlbeton, Estrich schwimmend	1,4
Fenster	2-Scheiben Isolierverglasung (Holz oder Kunststoff)	2,6

Die spezifischen Transmissionswärmeverluste des unsanierten Bestandes sind nach [22] sehr hoch. Durchschnittlich betragen sie für EFH der Jahrgangsklassen 1958 bis 1968 und 1969 bis 1978 ca. 0,25 W/m²K nach Modernisierung. Vor der Modernisierung liegen die Werte im Bereich von 1,11 W/m²K und 1,41 W/m²K, was in etwa dem Vierfachen entspricht.

Die spezifischen Transmissionsverluste der MFHs der Jahrgänge 1958-1968 und 1969-1978 bewegen sich vor der Modernisierung im Bereich zwischen 1,55 und 1,2 W/m²K. Nach der Modernisierung sinken diese auf Werte zwischen 0,25-0,3 W/m²K. Entsprechend hoch fallen auch die mittleren Endenergieverbrauchskennwerte der ARGE Studie [21] für Ein- und Zweifamilienhäuser aus. Der vergleichbare Wert für MFHs liegt bei ca. 144 kWh/m²a und damit unter dem Wert für Einfamilienhäuser mit ca. 172 kWh/m²a für Heizwärme und Warmwasserbereitung.

Angelehnt an die dena Studie [22] wird der zukunftsorientierte sanierte Zustand der Bestandsgebäude auf dem Niveau KfW Effizienzhaus 70 angesiedelt. Dies bedeutet, dass der Primärenergiebedarf max. 70 % des Referenzgebäudes und die spezifischen Transmissionswärmeverluste max. 85 % des Referenzgebäudes nach EnEV 2009

betragen dürfen. Dies stellt sowohl technisch als auch wirtschaftlich eine Herausforderung dar. Jedoch erscheint dies erforderlich, um einerseits die gesteckten Primärenergie- und CO₂-Einsparungsziele im Rahmen des Klimaschutzes zu erreichen, aber auch die Möglichkeit für die Nutzung von Niedrigtemperaturheiz- und -kühlsystemen zu ermöglichen. Diese gelten im Allgemeinen als energieeffizient, weil sie die Einbindung von regenerativen Energieressourcen, wie Geothermie, Solarthermie, Abwärme etc. ermöglichen, insbesondere bei der Nutzung von Wärmepumpen.

Tab. 4.5: Referenz und Bestszenario des spezifischen Heizenergiebedarfs im Bestand und in sanierten Gebäuden [16]

spez. Heizenergiebedarf [kWh/m²a]	2008	2020	2030	2040	2050
Bestand	150	114-106	97-77	84-52	74-33
Sanierter Altbau	117	90-71	76-34	67-24	59-19

Für den Neubaubereich EFH und MFH werden die Werte der Referenzausführung der EnEV 2009 angesetzt. Der Heizwärmebedarf EFH liegt bei 52,3 kWh/m²a bei einer gemittelten Heizlast von 37,5 W/m² Wohnfläche. Laut der Szenariestudie der Bundesregierung sinkt der spezifische Heizwärmebedarf von Neubauten von derzeit 53 kWh/m²a in 2008 auf zunächst 12-23 kWh/m²a in 2020 und auf 4-12 kWh/m²a in 2050. Der spezifische Wärmeleistungsbedarf sinkt von 30 W/m² auf bis zu 10 W/m² ab [16].

Energieversorgungssysteme

Der überwiegende Anteil an Wohngebäuden im Neubau und Bestand, aber auch nach Durchführung von Sanierungsmaßnahmen wird weiterhin durch eine Gas-Zentralheizung beheizt. Jedoch ist seit 2000 ein eindeutiger Trend hin zu vermehrter Wärmepumpeninstallation im Neubaubereich festzustellen. Betrachtet man den Neubaubereich der EFHs der Jahre 2000-2012, nehmen Wärmepumpen 24,5 % der installierten Wärmeversorgungsanlagen ein [23]. Ein leichter Anstieg der Fernwärmeanschlüsse und Biomasse ist ebenfalls auszumachen. Die Gaskesselinstallation ist weiterhin vergleichbar hoch. Heizölanlagen spielen kaum mehr eine Rolle. Wärmepumpen werden überwiegend in neuen Ein- und Zweifamilienhausbereich installiert. In großen MFH und Nichtwohngebäuden spielt diese Technologie bislang eine untergeordnete Rolle [24], [25].

Nichtsdestoweniger ist davon auszugehen, dass die Anzahl der Neuanschlüsse im Neubaubereich, aber auch im hoch sanierten Bestand, entsprechend dem Trend weiterhin steigen wird. In Tab. 4.6 wird ersichtlich, dass für das Jahr 2030 rund 2,3 Mio. Wohneinheiten in Deutschland mit Wärmepumpen beheizt werden.

Im Bestand bestehen bislang Hindernisse für die Installation von Wärmepumpen. Ein effizienter Betrieb von Wärmepumpen ist grundsätzlich mit Niedertemperatursystemen möglich. Die Umstellung auf Flächenheizsysteme ist im Bestand oft mit einem hohen Sanierungs- und Umbauaufwand verbunden. Bis 2020 wird jedoch von einer Steigerung der Sanierungsrate bis auf 2 % ausgegangen [24]. Diese verbleibt dann bis 2050 auf diesem Niveau. Dadurch wird der Großteil der heutigen Bestandsgebäude bis 2050 saniert sein. Der spezifische Heizwärmebedarf und die Heizlast werden aufgrund verbesserter Dämmeigenschaften und zusätzlicher Wärmerückgewinnung deutlich reduziert [16, p. 66 ff]. Somit erhöht sich die durchschnittliche die Anlageneffizienz, bei Wärmepumpen gemessen an der Jahresarbeitszahl (JAZ).

Abgesehen von Wärmepumpen sind durchaus auch weitere Modelle für den Einsatz von Strom zur Gebäudebeheizung denkbar, wie z.B. die Direktbeheizung von Nah- bzw. Fernwärmenetzen bei Stromüberschüssen im Netz. Somit können weitere zentral angeschlossene Wohngebäude erreicht werden, bzw. wird dadurch das

beheizte Flächenpotenzial hinsichtlich des Lastmanagements in Gebäuden sowohl im Neubau, als auch im Bestand erweitert.

Tab. 4.6: Prognose-Berechnungen zur Anzahl der Wohneinheiten unterschieden nach Gebäudegröße, welche mit Wärmepumpen beheizt werden nach [24]

Wohneinheiten mit WP *1000	2010	2015	2020	2025	2030
1 WE und 2 WE / (EFH und ZFH)	278	595	976	1.357	1.760
3 -12 WE / (kleine MFH)	77	158	253	349	448
13 und mehr WE (große MFH)	18	37	59	81	104
Gesamt	374	790	1.288	1.787	2.312

Aktuell haben mehr als 13 % der Ein- und Zweifamilienhäuser eine Solarthermieanlage installiert. Davon sind etwa 38 % sowohl für Heizungsunterstützung, als auch für die Warmwasserbereitung ausgelegt. Ca. 60 % der installierten Solarthermieanlagen in privaten Haushalten sind für die Warmwasserbereitung dimensioniert. Die mittlere Kollektorfläche liegt zwischen 6,8 m² und 11,4 m². Demgegenüber sind nur etwa 3% der Mehrfamilienhäuser mit Solarthermie ausgestattet [26].

Der Untersuchungsschwerpunkt der Forschungsarbeit ist das Zusammenwirken der Gebäudehülle und der raumorientierten Techniksysteme unter Berücksichtigung der nutzungsspezifischen Randbedingungen. Aus diesem Grund werden im Rahmen dieser Studie keine weiteren Untersuchungen hinsichtlich der Integration von Solarthermie und PV durchgeführt. Jedoch können diese Aspekte auf einer übergeordneten Ebene insbesondere unter dem Aspekt der verstärkten Integration von regenerativen Energien im gesamtdeutschen Strommarkt eine zunehmend wichtige Rolle spielen.

Strombedarfsstruktur in Wohnungsbau

Der durchschnittliche Stromverbrauch in Haushalten ist von der Anzahl der dort lebenden der Personen abhängig. Der durchschnittliche Verbrauch eines Singlehaushalts liegt bei etwa 1.900 kWh/a, der Verbrauch einer 4-köpfigen Familie liegt bei derzeit ca. 4.900 kWh/a [26]. So brauchen 32 % der deutschen Haushalte Strom für Warmwasserbereitung. Beinahe 94 % der Haushalte kochen mit Strom. 3,6 % der Haushalte heizen mit strombasierten Systemen, Stromdirektheizungen und Wärmepumpenanlagen inbegriffen [26]. Der Endenergieverbrauch von Strom wird bis 2050 je nach Szenario insgesamt um 30% bis zu 60 % sinken. Dies ist insbesondere auf die steigende Effizienz der Haushaltsgeräte zurückzuführen [16]. Die Anzahl der elektronischen Geräte wächst zwar, wird aber andererseits durch sinkende Verbräuche kompensiert.

Ergänzend sei der Anteil der deutschen Wohngebäude mit installierten PV-Anlagen erwähnt. Dieser lag im Jahr 2012 bei 5,5 % gegenüber 1,8 % in 2006. Die mittlere Stromerzeugung der privat installierten Anlagen betrug 4.400 kWh/a und erreichte damit knapp den durchschnittlichen jährlichen Stromverbrauch einer 4-köpfigen Familie [26].

Abb. 4.3 zeigt die Verhältnisse der einzelnen durchschnittlichen Verbrauchsanteile des Endenergieverbrauchs in deutschen Haushalten für Wärme und Strom. Hieraus wird der bedeutende Anteil des Bedarfs an Raumwärme ersichtlich.

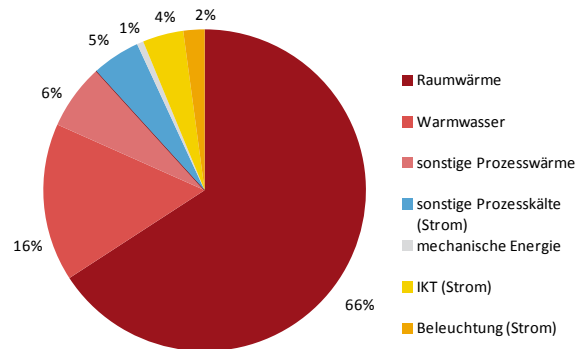


Abb. 4.3 Endenergieverbrauch nach Anwendungsbereichen in privaten Haushalten.[15]

4.3 Nichtwohngebäude

Die Flächenanteile für Lager-, Landwirtschafts- sowie Fabrikgebäude sind in der folgenden Tab. 4.7 unter „Hallengebäude“ zusammengefasst. Der relativ hohe Flächenanteil von ca. 17% liegt u.a. darin begründet, dass diese Typologien gemäß ihrer Funktion großen Raumbedarf beanspruchen. Bei Hallengebäuden kann aber davon ausgegangen werden, dass aufgrund der Gebäudekubatur und der vorwiegend leichten Baukonstruktion, gekoppelt mit einem niedrigen flächenspezifischen Heizbedarf, das wirksame thermische Speicherpotenzial gering ausfällt. Der Anteil der Bildungsgebäude an der gesamten beheizten Fläche in Deutschland ist mit 4 % eher gering. Die Typologie Hotels und Gaststätten ist zu divers und kaum abbildbar. Daher werden in der weiteren Untersuchung Hallen-, Bildungsgebäude sowie Hotels unter „Sonstige“ zusammengefasst (s. Abb. 6.2) und nicht näher auf ihr LM-Potenzial untersucht.

Büro- und Verwaltungsgebäude sowie Einzelhandelsbauten werden in Kapitel 5.1.1 als eigene Gebäudemodelle für die dynamische Simulation „SIM 2“ in Kapitel 5.2 typologisiert.

In Tab. 4.7 ist die Flächenverteilung der Nichtwohngebäude sowie der Wohngebäude in Deutschland in Abhängigkeit der Baualtersklasse dargestellt.

Tab. 4.7: Nutzfläche des Gebäudebestands Stand 2011 in Deutschland [Mio. m²] nach [18], [19], [25] und [27]

Baualtersklasse	bis 1918	1919- 1948	1949- 1957	1958- 1968	1969- 1978	1979- 1983	1984- 1994	1995- 2001	2002- 2011 Neubau	Bestand gesamt bis 2001	Stand 2011	Anteil [%]
MFH	135	151	162	281	236	108	160	119	47	1358	1405	41%
EFH	249	264	184	297	291	158	214	214	186	1856	2042	59%
Wohnen gesamt	384	415	346	578	527	266	374	333	233	3214	3446	100%
Baualtersklasse	bis 1918	1919- 1948	1949-1965	1966- 1978	1979- 1988	1989- 1998	1999- 2001	2002- 2011 Neubau	Bestand gesamt bis 2001	Stand 2011	Anteil [%]	
Büro / Verwaltung	90	39	55	45	92	150	40	34	511	545	22%	
Bildungsgebäude	83	35	50	24	17	12	3	12,6	223	236	9%	
Hotels und Gast- stätten	84	35,8	51	39	65	28	3,4	4,9	306	310	12%	
Einzelhandel	68	29	41	32	41	66	32	87	307	394	16%	
Hallengebäude	247	106	150	95	173	107	13	133	893	1025	41%	
Gesamt NWG	571	245	348	235	387	363	91,2	271	2240	2511	100%	

Baukonstruktion

Laut der BMVBS-Studie „Typologie und Bestand beheizter Nichtwohngebäude in Deutschland“ [12] und der „Bekanntmachung der Regeln zur Datenaufnahme und Datenverwendung im Nichtwohngebäudebestand“ (Stand 30. Juli 2009) [28] lassen sich die baukonstruktiven Eigenschaften der Nichtwohngebäude wie folgt zusammenfassend darstellen, siehe Tab. 4.8.

Tab. 4.8: Baukonstruktiver Kennwert (U-Wert) von Bauteilen massiver Bauweise im Bestand von Nichtwohngebäuden nach Altersklassen nach [12]. Die Werte in kursiv und in Klammern beziehen sich auf [28].

Konstruktio- nen	Außen- wand [W/m²K]	Fenster [W/m²K]	Decken Dächer [W/m²K]	Boden- platten [W/m²K]
bis 1918	2 (1,7-1)	2,9 (2,7)	1,0	1,2
1919-1976	1,5			
1977-1983	1,2 (0,8)		0,45	0,85
1984-1994	0,85 (0,6)	1,9	0,3	0,4
ab 1995	0,35 (0,5)	1,3 (1,6)		(0,6)

Energieversorgungs- und Stromnutzungsstruktur

Entsprechend der BMWi Studie [26] zum Energieverbrauch im GHD Sektor kann festgestellt werden, dass Büro- und Verwaltungsgebäude den größten Anteil an Endenergieverbrauch im GHD Sektor haben. Die Sektoren Beherbergung, Gaststätte und Heime und mit etwas geringerem Anteil Handel folgen nach. Schulen rangieren an vierter Stelle und sind im ähnlichen Umfang wie Krankenhäuser und Bäder vertreten. Aufgrund der großen Varianz der Nutzungsarten der Schultypen und dem verhältnismäßig geringen Anteil wird diese Gebäudetypologie nicht in der Forschungsarbeit berücksichtigt.

Tab. 4.9 fasst die häufigsten Energiebereitstellungssysteme der verschiedenen Nutzungstypologien im Bestand zusammen.

Tab. 4.9: Übersicht der gängigsten Raumkonditionierungssysteme im Bestand für unterschiedliche Gebäudetypologien. Stand 1991 nach [29]

Typologie	Wärmeer- zeugung	Wärme- übergabe	WW- erzg.	Lüf- tung
Schulen	Heizkessel Öl-/Gas	statische Heizflächen	dez. el.	nat.
Sporthallen	Heizkessel Öl-/Gas	statische Flächen, Luftheizung, Flächenhgz.	zentral	nat./ mech.
Büro- und Verwaltung	Heizkessel Öl-/Gas	statische Heizflächen	dez. el.	nat./ mech.
Fabrik- gebäude	Heizkessel Öl-/Gas	statische Flächen, Lufthzg, Flächenhgz.	zent- ral, dez el.	mech.
Lager- hallen	Heizkessel Öl-/Gas	statische Flächen, Lufthzg, Flächenhgz.	dez. el.	nat./ mech.
Handels- gebäude	Heizkessel Öl-/Gas	statische Flächen, Luftheizung	dez. el.	mech.

Büro- und Verwaltungsgebäude

In diese Gebäudetypologie werden Nutzungen privater und öffentlicher Dienstleistungen mit büroähnlichen Betriebsprozessen zusammengefasst.

Energietechnisch gesehen weisen die zusammengefassten Bereiche ähnliche Strukturen auf. Wie Abb. 4.4. zeigt, wird der Endenergiebedarf im GHD Sektor von Raumwärme, Beleuchtung, sowie mechanische Energie für Lüftung dominiert [25].

Die Betriebsgrößen im Büro- und Verwaltungsbereich sind sehr unterschiedlich, bedingt durch die große Heterogenität dieser Gebäudetypologie. In der BMVBS – Typologiestudie [12] werden die häufig vorkommenden Grundrisstypen in Form von Riegel, Hof, Kamm und Flügel als Modellgebäude abgebildet. Unter Variationen des A/V Verhältnisses und der unterschiedlichen Baualtersklassen werden die Endenergieverbräuche für Heizung, Lüftung, Beleuchtung und Warmwasser berechnet. Es wurden Gebäude zwischen 2 und 10 Geschossen und mit ca. 1.100 m² und 33.000 m² NGF berechnet. Damit wurden unterschiedliche A/V Verhältnisse zwischen 0,19 und 0,43 abgebildet, wobei sich die überwiegende Anzahl der Modelle im Bereich von 0,23 bis 0,31 befindet. Die Schwankungen des Endenergiebedarfs innerhalb einer Altersklasse sind in Abhängigkeit des A/V Verhältnisses geringer, als zwischen den unterschiedlichen Altersklassen. Daher ist festzustellen, dass bei steigender Dämmqualität der Gebäudehülle das A/V Verhältnis kaum noch Einfluss auf den resultierenden Endenergiebedarf hat.

Als Simulationsmodell für das vorliegende Forschungsprojekt wird eine Büroeinheit mit 20 m² Grundfläche sowie „mittel schwerer Baukonstruktion“ nach [11] und [27] gewählt. Weitere Randbedingungen sind in Kapitel 5.1.1 ersichtlich.

Büro- und Verwaltungsgebäude zeichnen sich durch hohe interne Lasten aufgrund der installierten Arbeitshilfen aus. Ein Potenzial für effiziente Stromnutzung liegt dabei in der Einsparung durch Verwendung von Bürogeräten mit hoher Effizienzklasse und sparsamen Leuchtmitteln. Aktives Lastmanagement kann voraussichtlich nur auf der Gebäude- und Gebäudetechnikenebene stattfinden.

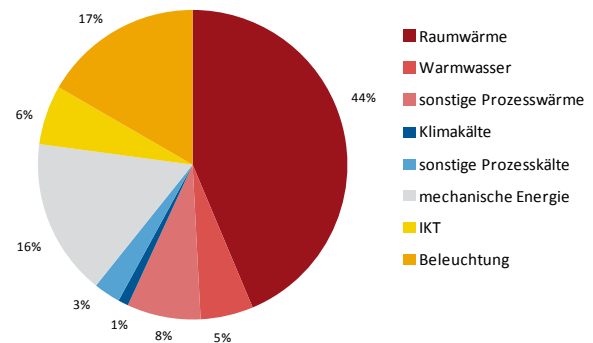


Abb. 4.4: Endenergieverbrauch nach Anwendungsbereichen im Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen in Prozent für 2011. [15]

5. Untersuchung von Lastmanagementpotenzialen in Gebäuden (SIM 2)

Nachdem in Kapitel 3 die Speicherpotenziale in der Gebäudespeichermasse für einen Modellraum ermittelt wurden, erfolgt ab hier die Berechnung von Lastmanagement-Potenzialen von repräsentativen Gebäudetypologien mit ausgewählten realen Wetterbedingungen. Dazu werden detaillierte Gebäudemodelle mit deren technischer Gebäudeausrüstung und Nutzungszeiten mit der Software IDA ICE [4] nachgebildet. Um jahreszeitabhängige Randbedingungen zu simulieren, wurden Wetterdaten aus dem Testreferenzjahr für den Standort München in sieben Typtage klassifiziert. Die typtagspezifische Betrachtung des Lastmanagement-Potenzials erfolgt in Kapitel 5.2. Die Ergebnisse werden flächenspezifisch miteinander verglichen und in einem Gebäudekatalog zusammengefasst. In Kapitel 6 wird das berechnete spezifische LM-Potenzial auf den Gebäudebestand in Deutschland erweitert, um so eine Abschätzung der

speicherbaren Energiemenge in der bestehenden Gebäudespeichermasse zu ermöglichen. Dazu werden hier zunächst die Randbedingungen der Gebäudetypologien festgelegt und die Berechnungsmethodik erläutert.

5.1 Randbedingungen

5.1.1 Gebäudemodelle

Entsprechend den Kriterien der Gebäudeklassifizierung im Kapitel 4 wurden folgende Gebäudekategorien für die Untersuchungen hinsichtlich des Lastmanagementpotenzials ausgewählt, siehe Abb. 5.1:

- Wohnungsbau (*EFH*, *MFH*)
- Büro- und Verwaltungsgebäude (*Büro*)
- Einzelhandel (*EH*)

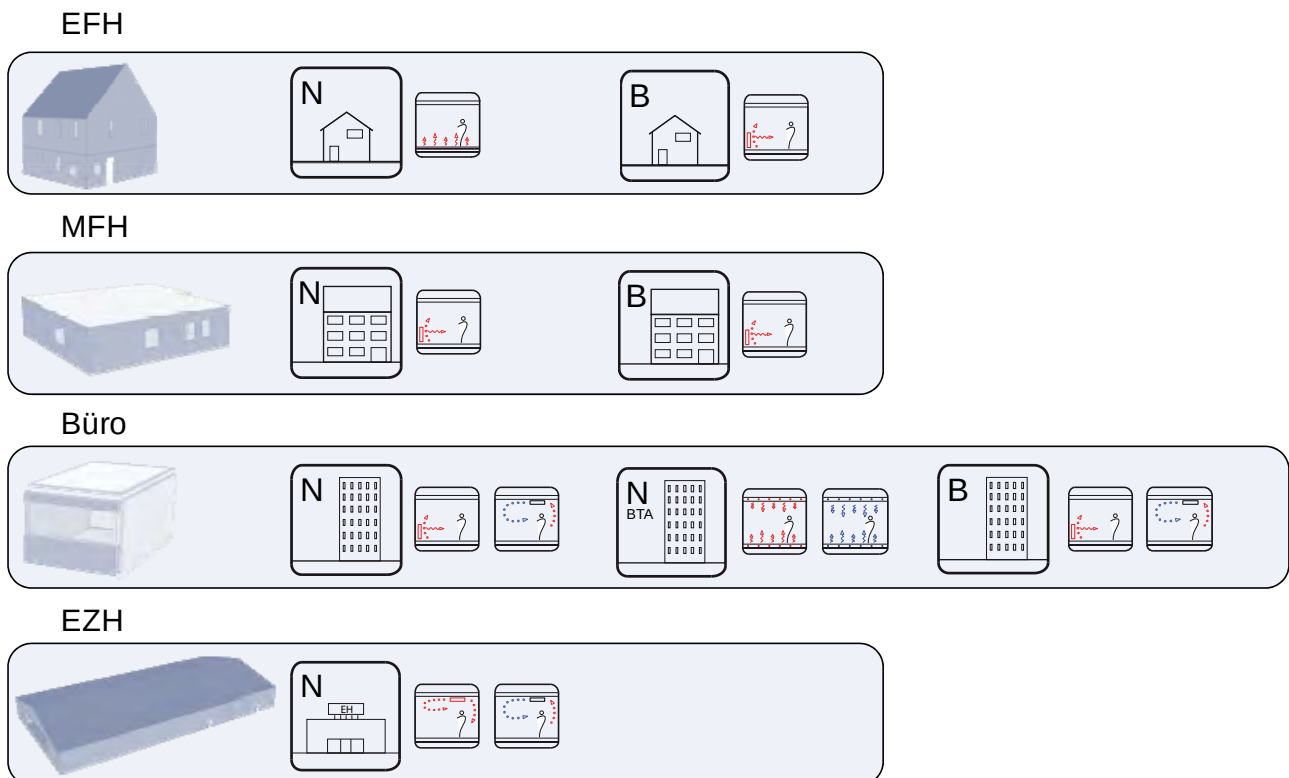
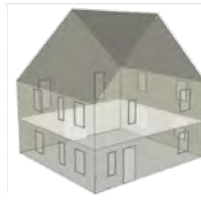


Abb. 5.1: Entwickelte Gebäudemodelle für Einfamilien- und Mehrfamilienhäuser, Büro- und Verwaltungsgebäude sowie Einzelhandel

In den Kategorien Wohnungsbau und Büro- und Verwaltung wurden sowohl Modelle für den Neubau als auch für den Bestand untersucht. Im Neubaubereich wurden Werte für die Gebäudehülle unter EnEV Standard 2009 angenommen. Für den Bestand wurden hinsichtlich der bauphysikalischen Kennwerte, der typischen konstruktiven Merkmale und der haustechnischen Versorgungssysteme charakteristische Werte aus einschlägigen Studien vgl. [12], [22], [28] angenommen. Bei der Auswahl von geeigneten Gebäudetypologien wurde insbesondere das Kriterium der Häufigkeit stark gewichtet, sodass die besonders häufig in Deutschland vertretenen Typologien durch entsprechende Modelle den Bestand gut abbilden (siehe Kapitel 4.2 bzw. 4.3). Das Einzelhandelsgebäude (Supermarkt/Discounter) wird als Neubau abgebildet.

EFH-Neubau und EFH-Bestand

Das Modell *EFH* entspricht hinsichtlich seiner Größe und Gebäudeform der Typologie eines durchschnittlichen



freistehenden Einfamilienhauses [18]. Das *EFH* hat die Maße von 9,1*9,8m und eine Grundfläche von ca. 90 m². Die Wohnfläche beträgt insgesamt 180 m² bei einem Volumen von 490 m³ im Bestand und

709 m³ im Neubau. Der Unterschied ist der Annahme begründet, dass im Neubau der Dachspitz ausgebaut und offen zum Obergeschoss ist. Sowohl im Neubau als auch im Bestand handelt sich um einen 4-Personen Haushalt. Der Fensterflächenanteil der Außenwand beträgt 11 %. Das Gebäude ist Nord-Süd orientiert mit einem Ost-West orientierten Satteldach. Als Wärmeübergabesystem im Bestand dient eine Radiatorheizung mit einer spezifischen Leistung von 75 W/m², im Neubau wurde eine Fußbodenheizung mit der spezifischen Heizleistung von 30 W/m² abgebildet. Die Gebäude des Neubaus und des Bestandes werden natürlich belüftet. Weitere Randbedingungen zum Gebäudemodell sind in Tab. 5.1 dargestellt.

Tab. 5.1: Baukonstruktive und technische Kennwerte der Modelle *EFH-Neubau* und *Bestand*

Parameter	Kennwerte		Anmerkungen		Anmerkungen
		Neubau			Bestand
Außenwand	U-Wert [W/m ² K]	0,2	Innenputz 15 mm Ziegel 24 cm Wärmedämmung 16 cm Außenputz 2,5 cm	1,2	Innenputz 15 mm Ziegel 30 cm Außenputz 2,5 cm
Verglasung	U _g -Wert [W/m ² K]	0,6	DIN V 18599_2, Tab 7, S. 68 ff.	2,9	DIN V 18599_2, Tab 7, S. 68 ff. Annahme 1. Sanierungszyklus
	g-Wert; [-]	0,59	DIN V 18599_2, Tab 7, S. 68 ff.	0,76	DIN V 18599_2, Tab 7, S. 68 ff. Annahme 1. Sanierungszyklus
	τ-Wert; solar transmittance	0,52	DIN V 18599_2, Tab 7, S. 68 ff.	0,7	DIN V 18599_2, Tab 7, S. 68 ff. Annahme 1. Sanierungszyklus
Türen	U-Wert [W/m ² K]	1,8	DIN V 18599_2, Tab 7, S. 68 ff.	1,8	DIN V 18599_2, Tab 7, S. 68 ff. Annahme 1. Sanierungszyklus
Dach	U-Wert [W/m ² K]	0,18	Sparrendach: Dachdeckung, Wärmedämmung 18 cm; Holzlattung; Gipskarton	0,7	Dachdeckung, Luftschicht 3,5cm; Wärmedämmung 5cm; Holzlattung
Grundplatte	U-Wert [W/m ² K]	0,21	Parkettbelag 2 cm; Estrich 5 cm Trittschalldämmung 2 cm Stahlbetondecke 25 cm Dämmung 12 cm	0,82	Holzparkett 2 cm, Estrich 4 cm, Trittschalldämmung 2 cm, Stahlbetondecke 14 cm
Wärmebrücken	ΔU _{WB} [W/m ² K]	0,05	DIN 4108 und EnEV	0,1	DIN 4108 und EnEV
Gebäudedichtheit I Infiltration	Infiltrationsrate durch Undichtigkeiten [1/h]	0,11	DIN V 18599-2, S. 51-53 (n ₅₀ Wert entspricht 1,5)	0,42	DIN V 18599-2, S. 51-53 (n ₅₀ Wert entspricht 6)
Speichermasse	[Wh/m ² K _{AB}]	147	schwer, DIN 18599_2, S. 82	130	schwer, DIN 18599_2, S. 82
Wärmeübergabe	FBH/Radiator [W/m ²]	30	FBH; T _{VL} = 45 °C, T _{RL} = 35 °C	75	Radiator, T _{VL} = 65 °C, T _{RL} = 55 °C
Interne Lasten	W/m ²	2,18	Geräte, gemittelter Tageswert	2,18	Geräte, gemittelter Tageswert
	W/m ²	1	gemittelter Tageswert für Personen nach Anwesenheit	1	gemittelter Tageswert für Personen nach Anwesenheit
	W/m ²	1,2	installierte Leistung für Beleuchtung (Anwesenheit- und tageslichtabhängig)	1,2	installierte Leistung für Beleuchtung (Anwesenheit- und tageslichtabhängig)
Orientierung (AW)	[-]	4	Hauptausrichtung Süd	4	Hauptausrichtung Süd

MFH-Neubau und MFH-Bestand

Die Modelle Neubau und Bestand der Typologie *Mehrfamilienhaus* werden anhand einer Wohnungseinheit von 110 m² Wohn-

fläche mit 3 Außenwänden untersucht, einer Wohnungstrennwand und einer Treppenhauswand. Die Typologie der Wohnungseinheit ist von der Zeilenbebauung der 60-er und 70-er Jahre abgeleitet, jedoch auch auf Neubau-

typologien eines Mehrfamilienhauses übertragbar vgl. [18, p. 50ff]. Das Volumen der Wohneinheit beträgt 286 m³, in dem 3 Personen wohnen. Das Wärmeübergabesystem ist eine Radiatorheizung mit einer spezifischen Leistung von 30 W/m² im Neubau bzw. 50 W/m² im Bestand. Die Wohnungen werden natürlich belüftet. Ergänzende Kennwerte und Festlegungen zu den Gebäudemodellen sind in Tab. 5.2 dargestellt.

Tab. 5.2: Baukonstruktive und technische Kennwerte der Modelle *MFH-Neubau* und *Bestand*

Parameter	Kennwerte		Anmerkungen		Anmerkungen
		Neubau			Bestand
Außenwand	U-Wert [W/m ² K]	0,2	Innenputz 15 mm Ziegel 24 cm Wärmedämmung 16 cm Außenputz 2,5 cm	1,2	Innenputz 15 mm Ziegel 30 cm Außenputz 2,5 cm
Innenwand	adiabat		Massiv: Putz 1 cm, Beton 20 cm, Putz 1 cm		Massiv: Innenputz 2,5 cm, Ziegel- mauerwerk 20 cm, Putz 1,5 cm
Boden	U-Wert; [W/m ² K]	0,84	Massiv: Bodenbelag 0,5 cm, Estrich 5 cm, Trittschalldämmung 2 cm, Betondecke 18 cm	0,84	Massiv: Bodenbelag und 0,5 cm, Estrich 5 cm, Trittschalldämmung 2 cm, Betondecke 18 cm
Decke	U-Wert; [W/m ² K]	0,84	Massiv: Bodenbelag 0,5 cm, Estrich 5 cm, Trittschalldämmung 2 cm, Betondecke 18 cm	0,84	Massiv: Bodenbelag 0,5 cm, Estrich 5 cm, Trittschalldämmung 2 cm, Betondecke 18 cm
Verglasung	U _g -Wert [W/m ² K]	0,6	DIN V 18599_2, Tab 7, S.68 ff.	2,9	DIN V 18599_2, Tab 7, S.68 ff. Annahme 1. Sanierungszyklus
	g-Wert; [-]	0,59	DIN V 18599_2, Tab 7, S.68 ff.	0,76	DIN V 18599_2, Tab 7, S.68 ff. Annahme 1. Sanierungszyklus
	τ-Wert; solar transmittance	0,52	DIN V 18599_2, Tab 7, S.68 ff.	0,7	DIN V 18599_2, Tab 7, S.68 ff. Annahme 1. Sanierungszyklus
Wärmebrücken	ΔU _{WB} [W/m ² K]	0,05	DIN 4108 und EnEV	0,1	DIN 4108 und EnEV
Gebäudedichtheit I Infiltration	Infiltrationsrate durch Undichtigkeiten [1/h]	0,11	DIN ISO 13790, S. 51-53 (n ₅₀ Wert entspricht 6)	0,42	DIN ISO13790 und 18599-2, S. 51-53 (n ₅₀ Wert entspricht 6)
Speichermasse	[Wh/m ² K _{AB}]	147	schwer, DIN 18599_2, S. 82	130	schwer, DIN 18599_2, S. 82
Lüftung	[1/h]	0,4	natürlich, DIN 1946-6:2009-05	0,4	natürlich, DIN 1946-6:2009-05
Wärmeübergabe	Radiator [W/m ²]	30	T _{VL} = 45 °C, T _{RL} = 35 °C	50	T _{VL} = 65 °C, T _{RL} = 55 °C
Interne Lasten	W/m ²	4,86	inkl. Licht und Personen	4,86	inkl. Licht und Personen
Interne Lasten	W/m ²	3,4	Geräte, gemittelter Tageswert	3,4	Geräte, gemittelter Tageswert
	W/m ²	1,2	gemittelter Tageswert für Personen nach Anwesenheit	1,2	gemittelter Tageswert für Personen nach Anwesenheit
	W/m ²	1,3	installierte Leistung für Beleuchtung durch energieeffizienten Leuchtmittel (Anwesenheit und tageslichtabhängig)	1,3	installierte Leistung für Beleuchtung durch energieeffizienten Leuchtmittel (Anwesenheit und tageslichtabhängig)

Büro-Neubau und Büro-Bestand

Die Modelleinheit des Büros hat eine Grundfläche von 20 m² und entspricht hinsichtlich der Raumform einer typischen Zwei-Personen-Büroeinheit. Die Fassa-

de hat einen Fensterflächenanteil von 50 %. Die Orientierung der Außenwand wird in einer Simulation in alle vier Himmelsrichtungen variiert. Dadurch können die LM-Potenziale des Modellraums auf ein fiktives Bürogebäude extrapoliert werden, dessen quadratischer Grundriss Fenster in alle vier Himmelsrichtungen aufweist. Dazu wurde sowohl für den Neubau als auch den Bestand die

Heiz- und Kühlleistung als Mittelwert der vier Ausrichtungsvarianten bestimmt. Die gezeigten *Bürobau* Potenziale sind daher als „orientierungs-neutral“ zu werten.

Es werden übliche Nutzungszeiten von 07:00 bis 18:00 Uhr angenommen, mit einer Kernarbeitszeit, welche einer Vollbelegung mit 2 Personen von 09:00 Uhr bis 15:00 Uhr entspricht. Der Büroraum wird durch einen Radiator mit einer spezifischen Leistung von 50 W/m² für das Modell Neubau und 75 W/m² für das Bestandsmodell beheizt. Die Kühlung für den Sommerfall wird im Neubau- sowie im Bestandsmodell durch eine Luftkühlung sichergestellt. Weitere Randbedingungen und Variationen der Modellbildung sind in Tab. 5.3 dargestellt.

Tab. 5.3: Baukonstruktive und technische Kennwerte der Modelle *Büro-Neubau* und *Bestand*

Parameter	Kennwerte		Anmerkungen		Anmerkungen
			Neubau		Bestand
Außenwand	U-Wert [W/m ² K]	0,28	Innenputz 1 cm Beton 20 cm Wärmedämmung 15 cm Außenputz 1 cm	0,89	Innenputz 1 cm Beton 20 cm Wärmedämmung 3 cm Außenputz 1 cm
Innenwand	adiabat		Leicht: Gipskarton 2,6 cm, Luftspalt, Gipskarton 2,6 cm		Leicht: Gipskarton 2,6 cm, Luftspalt, Gipskarton 2,6 cm
Boden / Decke	U-Wert; [W/m ² K]	0,84	Massiv: Bodenbelag 0,5 cm, Estrich 5 cm, Trittschaldämmung 2 cm, Betondecke 18 cm	0,84	Massiv: Bodenbelag 0,5 cm, Estrich 5 cm, Trittschaldämmung 2 cm, Betondecke 18 cm
Verglasung	Ug-Wert [W/m ² K]	1,1	DIN V 18599_2, Tab 7, S.68 ff.	2,9	DIN V 18599_2, Tab 7, S.68 ff. Annahme 1. Sanierungszyklus
	g-Wert; [-]	0,59	DIN V 18599_2, Tab 7, S.68 ff.	0,78	DIN V 18599_2, Tab 7, S.68 ff. Annahme 1. Sanierungszyklus
	t-Wert; solar transmittance	0,52	DIN V 18599_2, Tab 7, S.68 ff.	0,73	DIN V 18599_2, Tab 7, S.68 ff. Annahme 1. Sanierungszyklus
Sonnenschutz	außenliegend; fc-Wert [-]	0,25	DIN 4108-2 Tabelle 8	0,25	DIN 4108-2 Tabelle 8
Wärmebrücken	ΔU_{WB} [W/m ² K]	0,05	DIN 4108 und EnEV	0,1	DIN V 18599_2, Tab 7, S.68 ff. Annahme 1. Sanierungszyklus
Gebäudedichtheit I Infiltration	Infiltrationsrate durch Undichtigkeiten, [1/h]	0,11	18599-2, S. 51-53 (n ₅₀ Wert entspricht 1,5)	0,42	18599-2, S. 51-53 (n ₅₀ Wert entspricht 6)
Speichermasse	[Wh/m ² K _{AB}]	93	mittel schwer, DIN 18599_2, S. 82	93	mittel schwer, DIN 18599_2, S. 82
Lüftung	[1/h]	1,6	mechanisch	1,6	mechanisch
Wärmerückgewinnung	WRG [%]	60	T _{zu_soll} =22° C	60	T _{zu_soll} =22° C
Wärmeübergabe	Radiator [W/m ²]	40	T _{VL} = 45 °C, T _{RL} = 35 °C	70	T _{VL} = 65 °C, T _{RL} = 55 °C
Kälteübergabe	Luftkühlung [W/m ²]	40	Luftkühlung	50	Luftkühlung
Interne Lasten	[W/m ²]	10	installierte Leistung für anwesenheits- und tageslichtabhängige Beleuchtungssteuerung	10	installierte Leistung für anwesenheits- und tageslichtabhängige Beleuchtungssteuerung
	[W/m ²]	7,5	Arbeitshilfen während der Nutzungszeit	7,5	Arbeitshilfen während der Nutzungszeit
	[W/m ²]	11	Personen während der Nutzungszeit	11	Personen während der Nutzungszeit
Nutzungszeit	[h]	11	07:00 -18:00 Uhr mit einer Kernarbeitszeit (Vollbelegung) von 09:00 - 15:00 Uhr	11	07:00 -18:00 Uhr mit einer Kernarbeitszeit (Vollbelegung) von 09:00 - 15:00 Uhr

Systemvariante Büro-BTA

Für die Untersuchung des Einflusses eines flächigen Wärme- bzw. Kälteübergabesystems auf das thermische Lastmanagementpotenzial wurde eine Variation des *Büro-Neubaus* entwickelt. Anstelle von Radiatorheizung und Luftkühlung wurde das Wärme- und Kälteübergabesystem als Bauteilaktivierung (BTA) abgebildet. Die Randbedingungen der Varianten sind in der nachfolgenden Tab. 5.4 zusammengestellt.

Tab. 5.4: Technische Kennwerte der Variation Büro-BTA

Parameter	Kennwerte		Anmerkungen
Wärmeübergabe	[W/m ²]	38	Flächenheizung durch BTA, $T_{VL} = 30\text{ °C}$
Kälteübergabe	[W/m ²]	40	Flächenkühlung durch BTA, $T_{VL} = 16\text{ °C}$

Da die ermittelten LM-Potenziale dieser Variante deutlich von denen anderer Wärmeübergabesysteme abweichen, soll im Folgenden die Regelung und besonderen Randbedingungen der trägen BTA näher erläutert werden.

Regelung der BTA

In der vorliegenden Studie beruhen LM-Maßnahmen auf dem Ansatz, durch Zwischenspeicherung von Energie in der Gebäudemasse das Heiz- oder Kältesystem für einige Zeit mit einer abweichenden Leistung betreiben zu können, ohne die operative Temperatur im Raum stark spürbar zu verändern.

Ziel der Regelung in allen Gebäudemodellen ist primär die Einhaltung der Behaglichkeitsgrenzen im Raum, siehe Kapitel 5.1.3. Diese exakte Vorgabe kann im Fall der BTA regelungstechnisch nicht zu jedem Zeitpunkt gewährleistet werden.

Das Problem bei der Regelung der Bauteilaktivierung auf die exakte Komforttemperatur liegt in der Trägheit der aktivierbaren Speichermasse. Diese führt zu einer zeitlichen Verschiebung zwischen der Wärmezufuhr und der spürbaren Wärmeabgabe in den Raum. Das träge System einer BTA kann daher nicht auf schnelle Temperaturänderungen im Raum reagieren, beispielsweise durch

solare Einstrahlung. So sollte, je nach Verfügbarkeit von Speichermassen, die Vorkonditionierung durch die BTA mehrere Stunden vor einer starken Temperaturveränderung (z.B. durch interne Wärmequellen oder Außenbedingungen) erfolgen.

Zielwert in dieser Studie ist eine möglichst nahe Einhaltung der Komforttemperatur von 22 °C im Winter und 24 °C im Sommer, ohne dass die operative Temperatur im Tagesverlauf um mehr als 1,5 K schwankt.

Der Temperaturverlauf im Auslegungsfall ist in Abb. 5.2 mit einer blauen Linie für den *kühlen* Typtag dargestellt, die Heizleistung in rot. Hier wird erkennbar, dass unter diesen Randbedingungen lediglich in der Nacht geheizt werden muss. Obwohl die Heizleistung bereits um 2:00 Uhr abgeschaltet wird, steigt die Raumtemperatur am Mittag über 23 °C an.

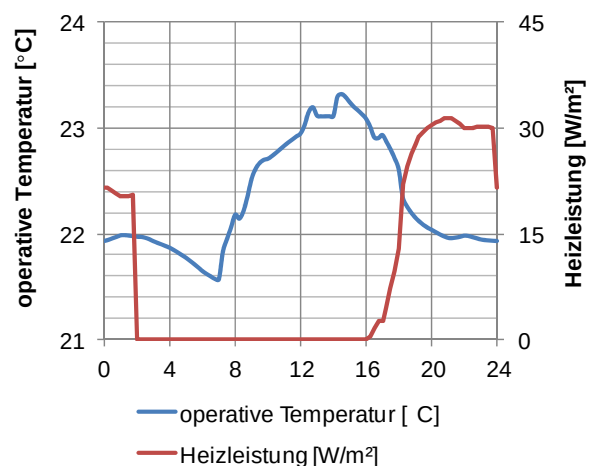
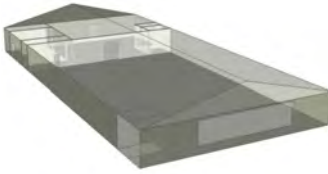


Abb. 5.2: Verlauf von operativer Temperatur und spezifischer Heizleistung im Gebäudemodell Büro-BTA am kühlen Typtag

Der *kühle* Typtag wurde für diese Betrachtung als Beispiel gewählt, da hier das Büromodell mit BTA das höchste Lastmanagement-Potenzial aller Gebäudetypologien im Heizfall erreicht. Die genaue Erläuterung und Berechnung des Potenzials erfolgt im zugehörigen Kapitel 5.2.3.

Einzelhandel

Das Modell entspricht dem Typus eines sogenannten Lebensmittel-discounters bzw. Supermarktes. Die Verkaufsfläche eines Lebensmittel-

discounters liegt unter 1000 m², die eines Supermarktes zwischen 400 m² und 2500 m². Es werden Lebensmittel und Nonfood-Artikel angeboten. Die Grundfläche des Verkaufsbereichs im untersuchten Modell beträgt 830 m² und das entsprechende Raumvolumen etwa 3310 m³.

Mit Nutz- und Nebenräumen wie Kühl- und Tiefkühlzelle, Lager, Aufenthaltsraum für Angestellte, Technik und Küche beträgt die Gesamtgrundfläche des Gebäudes ca. 1150 m². [18, p. 73ff.]

Die Typologie EH diente als Grundlage für eine weiterführende Masterarbeit an der TU München [30].

Tab. 5.5: Baukonstruktive und technische Kennwerte des Modells *Einzelhandel*

Parameter	Kennwerte		Anmerkungen
		Grundmodell	
Außenwand	U-Wert [W/m ² K]	0,3	Sandwich Paneel: Mineralwolle (d = 14cm) zwischen 2 Stahlblechen
Innenwand zum Kühlraum	U-Wert [W/m ² K]	0,6	Leichtbauweise: Gipskarton: 2,6 cm, Luftspalt: 3 cm, Wärmedämmung: 3 cm, Luftspalt 3 cm und Gipskarton: 2,6 cm
Verglasung	U _g -Wert [W/m ² K]	2,86	Double Clear Air
	g-Wert; [-]	0,7	Double Clear Air
	τ-Wert; solar transmittance	0,6	Double Clear Air
Türen	U-Wert [W/m ² K]	1,26	Schleuse; 2-flügelig, Alu-Rahmen
Dach	U-Wert [W/m ² K]	0,26	Dachpaneel: Polyurethandämmung (d = 10 cm) zwischen 2 Stahlblechen
Grundplatte	U-Wert [W/m ² K]	0,32	Bodenbelag 0,5cm, PE- Folie, Stahlbetondecke 15 cm, Dämmung 10cm
Wärmebrücken	ΔU _{WB} [W/m ² K]	0,05	DIN 4108 und EnEV
Gebäudedichtheit I Infiltration	[m ³ /hm ²]	2	DIN 18599-2, S.53
Speichermasse	[Wh/m ² K _{AB}]	59	leicht bis mittelschwer, DIN 18599_2, S. 82
Lüftung	[m ³ /hm ²]	2,5	Mechanisch, erforderlicher hygienischer Mindestluftwechsel
Wärmeübergabe	[W/m ²]	59	Luftheizung
Kälteübergabe	[W/m ²]	45	Luftkühlung
Interne Lasten	[W/m ²]	10	Beleuchtung: Installierte Leistung während der Öffnungszeiten
	[W/m ²]	-6	Kühlvittrinen
	[W/m ²]	14	Personen gemittelt während der Öffnungszeiten
Nutzungszeit	[h]	11	Öffnungszeiten an Werktagen: 08:00 Uhr -20:00 Uhr
Orientierung (AW)	[-]		Nord-Süd

Das Temperaturbehaglichkeitsband im Sommerfall liegt zwischen 21 °C und 25 °C und im Winter zwischen 17 °C und 21 °C und weicht somit von den übrigen Typologien ab. Die Absenkung der Innentemperaturen im Winter ist insbesondere aufgrund des erhöhten Aktivitäts- und Bekleidungsgrades der Nutzer (Kunden) begründet. Das Gebäude wird Sommer wie Winter klimatisiert. Die Konstruktion ist in leichter Bauweise ausgeführt. Eine Erhöhung der wirksamen Speichermasse unter der Berücksichtigung der Möblierung und der gelagerten Ware wird im Kapitel 5.4 untersucht.

Bedingt durch das hohe Kundenaufkommen wird ein erhöhter Luftwechsel durch die Eingangstüren nach [31] berücksichtigt. Hier wird von einer anteiligen Öffnungszeit von 28 min/h der Eingangstüren ausgegangen.

5.1.2 Wetterdaten | Typtage

Um praxisnahe Aussagen über Potenziale für Lastmanagement-Maßnahmen treffen zu können, werden bei diesem Simulationsansatz „SIM 2“ reale Wetterdaten abgebildet. Als Basis dient das Testreferenzjahr aus Meteonorm [32] für den Standort München. Die Wetterdaten, die in der Simulation hinterlegt sind, beinhalten:

- Außentemperatur
- Relative Feuchte
- Windgeschwindigkeiten und
- Solare Einstrahlung (direkt und diffus)

Um das Potenzial in Abhängigkeit der Jahreszeiten ermitteln zu können, wird das Jahr in 7 Kategorien gegliedert, die die Außenbedingungen von repräsentativen „Typtagen“ abbilden. Die Aufteilung erfolgt sowohl nach Außentemperatur, als auch Strahlungswerten. So wurden beispielsweise alle Tage des Jahres mit einer Durchschnittstemperatur unter -5 °C zur Kategorie *sehr kalt* zusammengefasst. Für diese 14 kältesten Tage des Jahres wurde der Mittelwert aus direkter und indirekter Strahlung gebildet, sowie der Durchschnitt der Tagesmitteltemperatur. Diese beiden Mittelwerte dienen als Grundlage, einen repräsentativen Tag aus dieser Kategorie bestimmen zu können. In diesem Fall wurden reale Tageswerte des 31. Januar des Testreferenzjahres als *sehr kalter* Typtag ausgewählt. Dieser Tag hat eine mittlere Außentemperatur von etwa -7 °C und der Mittelwert der solaren Einstrahlung beträgt rund 23 W/m^2 . Der Verlauf der Temperatur sowie der solaren Strahlung der Typtage ist im Kapitel 5.2 dargestellt, das Beispiel des sehr kalten Typtags in Abb. 5.12. Die Zusammenfassung in Tab. 5.6 zeigt deutlich den jahreszeitlichen Anstieg der Außentemperatur und Strahlung aller sieben Typtage.

Die Wetterdaten der Typtage *sehr kalt*, *kalt* und *kühl* repräsentieren mit einer Anzahl von etwa 120 Tagen die Außenbedingungen des Winters, während die Kategorie *gemäßigt* stellvertretend für die vier Monate der Übergangszeit steht. Das restliche Drittel der Wetterdaten (*warm*, *heiß* und *sehr heiß*) repräsentiert den Zeitraum des Jahres in dem nicht geheizt werden muss, beziehungsweise in den Nicht-Wohnbauten gekühlt wird.

Tab. 5.6: Übersicht der sieben Typtage und deren mittlere Außentemperatur und Strahlung, sowie deren Häufigkeit im Jahr

Typtag	Mittlere Außen- temperatur [°C]	Mittlere gesamt Strahlung [W/m²]	Anzahl im Jahr
<i>sehr kalt</i>	-7,7	23	14
<i>kalt</i>	-1,8	43	36
<i>kühl</i>	2,1	71	72
<i>gemäßigt</i>	9,2	110	123
<i>warm</i>	15,5	175	68
<i>heiß</i>	19,8	210	29
<i>sehr heiß</i>	21,6	270	23

Hierbei ist anzumerken, dass die gewählten Wetterdaten einen realen Tagesverlauf der jeweiligen Kategorie darstellen, nicht jedoch die Extremwerte wie den kältesten oder heißesten Tag des Jahres. Die Auslegung von Heiz- bzw. Kühlleistung erfolgt allerdings für diese Maximalwerte, beispielsweise für den kältesten Tag mit einer Durchschnittstemperatur von $-11,2\text{ °C}$. Daher kann bei der Potenzialberechnung aller Typtage, selbst des *sehr kalten* Typtags, zusätzliche Heizleistung, als Differenz von maximaler Auslegungsleistung und tatsächlicher Leistung, zugeschaltet werden. Die Randbedingungen, unter welchen diese verfügbare Leistungsreserve für LM-Maßnahmen genutzt werden kann, wird im folgenden Kapitel zur Berechnungsmethodik dargelegt.

5.1.3 Berechnungsmethodik

Thermische Behaglichkeit

Grundlage für LM-Potenzial in dieser Studie ist, wie bereits in Kapitel 3.1 erläutert, die thermische Behaglichkeit. Daher werden keine detaillierten Untersuchungen über LM an nutzungsfreien Wochenenden und Feiertagen für die Gebäudemodelle *Büro* und *Einzelhandel* angestrebt. Als allgemeine Aussage kann jedoch festgehalten werden, dass die Einhaltung der Behaglichkeit eine einschränkende Randbedingung darstellt. Ohne die Einhaltung von Temperaturgrenzen an nutzungsfreien Tagen oder ein kurzzeitiges Verlassen der thermischen Behaglichkeit könnte, wie in Kapitel 5.4 dargestellt, beispielsweise die Gebäudespeichermasse in höherem Maße für LM-Maßnahmen genutzt werden.

Bei den Gebäudemodellen wird vereinfacht angenommen, dass die Nutzung über die Woche und das Jahr gleichbleibend ist. Lediglich für die Werktage Mo bis Fr wird ein operativer Ablauf üblicher Arbeits- bzw. Abwesenheitszeiten hinterlegt. Desweiteren wird aufgrund der vielfältigen Arbeitszeitmodelle sowie der familiären Lebenskonstellationen eine Einhaltung der Behaglichkeit ganztägig (24 Stunden) angesetzt. Für einen Vergleich der Gebäudetypologien unter gleichen Randbedingungen wird auch im Nichtwohnbau eine durchgehende konstante Behaglichkeitsgrenze definiert. Unter der Annahme, dass diese Gebäude für ein Lastmanagement genutzt werden, erscheint dies aus Sicht der Autoren sinnvoll - denn gerade eine nächtliche Vorkonditionierung wäre mit einer Nachtabenkung nur schwer umsetzbar bzw. erfordert eine individuelle Regelung. Die durchgehende Einhaltung der Behaglichkeitsgrenzen erscheint auch durch betriebliche Einzelfalllösungen als gerechtfertigt. Als Beispiel sei die Untersuchung des Objekts aus [9] genannt, indem ein Sicherheitsdienst das Gebäude ganztägig bestreift und daher keine relevante Nachtabenkung der Raumtemperatur umgesetzt wurde. In Tab. 5.7 sind die definierten Behaglichkeitsgrenzwerte für die Gebäudemodelle, unterschieden in Winter und Sommer, dargestellt. Die Grenzwerte orientieren sich an Richtwerten der DIN EN 15251 Kat. II Tabelle A.3 ([11]), wobei zur besseren Vergleichbarkeit der Gebäudemodelle das Behaglichkeitsband jeweils auf 4 K beschränkt wird.

Tab. 5.7: Übersicht der Behaglichkeitsgrenzen für die untersuchten Gebäudemodelle

Gebäudemodell	Winter	Sommer
Büro	20 – 24 °C	22 – 26 °C
EH	17 – 21 °C	21 – 25 °C
EFH / MFH	20 – 24 °C	-

Die Methodik zur Berechnung des Lastmanagementpotenzials der Gebäudemodelle wird anhand eines Beispiels hergeleitet. Als Gebäudetypologie wird *Büro-Neubau* und der Typtag *sehr kalt* gewählt. Der Übersicht halber erfolgt die Berechnung hier lediglich für den Abschaltfall.

Lastmanagement-Dauer

Als mögliche Lastmanagement-Dauer für den Abschaltfall wird der Zeitraum zwischen Abschalten der Heizung und Unterschreiten der unteren Behaglichkeitsgrenze betrachtet. Die variierenden Außenbedingungen und die mit der Nutzungszeit einhergehenden internen Wärmelasten führen dazu, dass der Raum nach Abschaltung der Heizung in der Nacht deutlich schneller auskühlt als tagsüber. Diese tageszeitabhängige Lastmanagement-Dauer wird in Abb. 5.3 für die untersuchte Gebäudetypologie *Büro-Neubau* dargestellt. Bei der Betrachtung des Heizfalls im Winter erfolgt eine Vorkonditionierung auf die Komforttemperatur von 22 °C; die untere Behaglichkeitsgrenze liegt bei 20 °C.

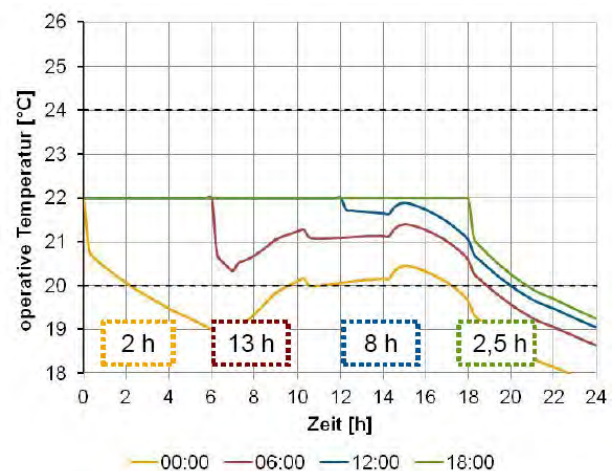


Abb. 5.3: Auskühlung des Raumes nach Abschalten der Heizung zu verschiedenen Uhrzeiten

Die farbigen Linien zeigen den Verlauf der operativen Temperatur nach Heizungsabschaltung zu verschiedenen Uhrzeiten. Wird die Heizung um 0:00 Uhr ausgeschaltet (gelbe Kurve), so ist ein sehr schneller Temperaturabfall innerhalb der ersten halben Stunde zu verzeichnen. Dies ist durch das schnelle Abkühlen der Raumluft zu erklären. Erst danach tritt der dämpfende Effekt der Gebäudemasse ein, sodass die operative Temperatur langsamer absinkt. Ohne interne Wärmelasten und bei etwa konstant bleibenden Wetterbedingungen stellt sich eine annähernd lineare Auskühlkurve dar. Bei dem gewählten Zeitpunkt des Abschaltens um 0:00 Uhr und dem Unterschreiten der 20 °C Grenze um 2:00 Uhr beträgt die Lastmanagement-Dauer maximal 2 Stunden. Wird der vorkonditionierte Zustand bis 6:00 Uhr beibehalten, so fällt die operative Temperatur nach Abschaltung der Heizung erst gegen 19:00 Uhr unter die Behaglichkeitsgrenze. Im *Büromodell* führen von 7:00 bis 18:00 Uhr interne Wärmequellen von Personen und elektrischen Geräten zu einer Erwärmung des Raumes. Beim betrachteten *sehr kalten* Typtag kommen während den Mittagsstunden noch geringe solare Gewinne durch diffuse Einstrahlung hinzu. Dies führt zu einem zwischenzeitlichen Anstieg der Raumtemperatur, so dass um 6:00 Uhr die Heizung für bis zu 13 Stunden abgeschaltet bleiben kann. Bei einer Abschaltung um 12:00 Uhr beträgt die Lastmanagement-Dauer etwa 8 h und um 18:00 Uhr ca. 2,5 h.

Zusammenfassung zu einer LM-Dauer-Funktion

Für jede Kombination von Gebäudemodell und Typtag wurde der Abschaltvorgang zu mindestens sieben Uhrzeiten simuliert. Die Ergebnisse der tageszeitabhängigen Lastmanagement-Dauern sind für das beispielhaft gewählte Büromodell in Abb. 5.4. zusammengefasst. Die vier in Abb. 5.3. gezeigten Temperaturverläufe werden hier durch farbige Punkte markiert, die deren Lastmanagement-Dauern repräsentieren. Der Einfluss der gewählten Temperatur-Grenzen auf die LM-Dauer wird in Kapitel 5.4 gesondert untersucht.

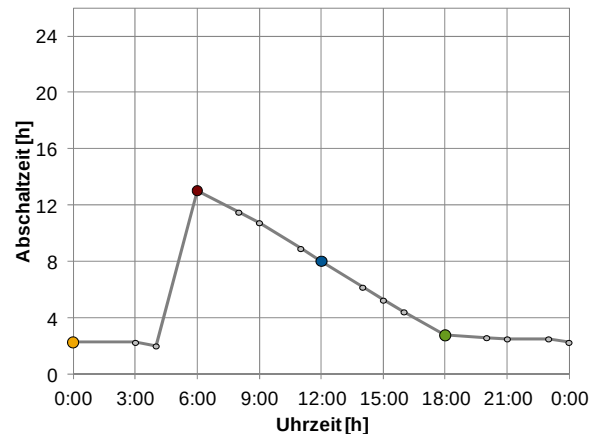


Abb. 5.4: Tageszeitabhängiger Verlauf der Abschaltzeit

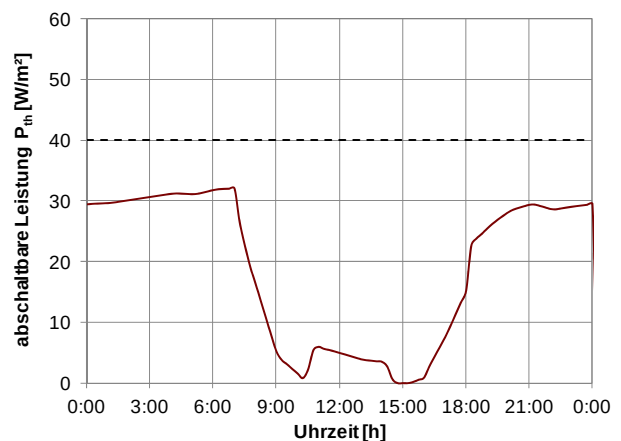


Abb. 5.5: Tagesverlauf der abschaltbaren Leistung

Ab- und zuschaltbare Leistung

Als Ausgangsbasis für mögliche Zuschalt- bzw. Abschaltpotenziale wird die jeweilige Leistung zugrundegelegt, die im Tagesverlauf benötigt wird, um die Komforttemperatur stets einzuhalten. Im Abschaltfall ist dies die Leistung, die bis zum Verlassen des Behaglichkeitsbandes abgeschaltet werden kann.

Dabei ist zu beachten, dass der Leistungsbedarf zeitlich nicht konstant ist. Beispielsweise sinkt die Heizleistung mit internen Wärmelasten und solaren Gewinnen. Daher stellt sich ein tageszeitabhängiger thermischer Lastgang ein. Abb. 5.5 zeigt am Beispiel *Büro-Neubau* die Leistungskurve, die an einem *sehr kalten* Typtag vom Heizsystem gedeckt werden muss und damit tageszeitabhängig für einen Abschaltvorgang verfügbar ist.

Die Tageszeitabhängigkeit ist bei den Büromodellen aufgrund der internen Wärmelasten während der Nut-

zungszeit besonders stark ausgeprägt. Während den Nachtstunden verläuft die Leistung jedoch weitgehend konstant. Für die Potenzialbetrachtung und den Vergleich der acht Gebäudemodelle untereinander wird ausgehend vom stundenweisen thermischen Lastgang eine Reduzierung der Komplexität auf einen Tages- und einen Nachtwert durchgeführt. Als Tageszeitraum wurde die Nutzungszeit des *Einzelhandels* von 8:00 bis 20:00 Uhr gewählt, die auch die hinterlegten *Büro*-Betriebszeiten mit einschließt.

Die gestrichelte Linie in Abb. 5.5 zeigt die Auslegungsleistung des Gebäudemodells, die in einer Jahressimulation bestimmt wurde. Das Heizsystem ist derart ausgelegt, dass die untere Temperaturgrenze von 20 °C am kältesten Tag ohne interne Wärmelasten im Raum eingehalten werden kann. Für die Gebäudetypologie des *Büro-Neubaus* wurde in Kapitel 5.1.1 eine spezifische Auslegungsleistung von 40 W/m² hinterlegt. Dies entspricht der maximalen thermischen Leistung, die theoretisch unter zusätzlicher Berücksichtigung einer geeigneten Anlagentechnik auch elektrisch erzeugt werden kann (z.B. mit einer Wärmepumpe siehe Kapitel 6.3). Als zuschaltbare Leistung wird allerdings nur gewertet, was das Wärmeerzeugungssystem - neben der Heizleistung für den Normalbetrieb mit Komforttemperatur – zusätzlich bereitstellen kann.

Wie Abb. 5.6 zeigt, kann am *sehr kalten* Typtag die Auslegungsleistung lediglich um 15:00 Uhr voll zugeschaltet werden, da hier interne Wärmelasten und solare Gewinne ausreichen, die Komforttemperatur von 22 °C zu halten. Zu allen anderen Zeiten bildet die Differenz zwischen momentaner Heizleistung und Auslegungsleistung eine Lastreserve, die bei Erzeugungsspitzen im Netz zugeschaltet werden kann.

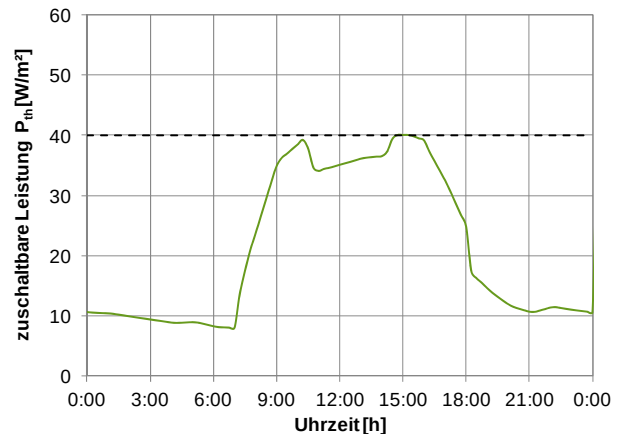


Abb. 5.6: Tagesverlauf der zuschaltbaren Leistung

Die zu- bzw. abschaltbaren Leistungen der acht Gebäudemodelle zu den sieben Typtagen sind im Anhang 12.1 zusammengefasst.

Berechnung des Lastmanagement-Potenzials

Für die Bewertung eines Gebäudes an Lastmanagement-Maßnahmen teilzunehmen, wird in dieser Studie sowohl die LM-Dauer, als auch die zu- bzw. abschaltbare Leistung berücksichtigt. Da der Lastgang tageszeitabhängig ist, ist die Berechnung des Lastmanagementpotenzials als Produkt aus Dauer und momentaner Heizleistung nicht zulässig. Stattdessen erfolgt eine Integration des Leistungsverlaufs über die LM-Dauer. Dies soll wie im vorherigen Kapitel am Beispiel eines Abschaltvorgangs mit der Gebäudetypologie *Büro-Neubau* erläutert werden.

In Abb. 5.7 sind die LM-Dauer (schwarz) und der tageszeitabhängige Lastgang (rot, gestrichelt), wie sie in diesem Kapitel hergeleitet wurden, zusammengefasst. Hier können zu jedem Zeitpunkt Abschaltdauern und der Verlauf der Leistung abgelesen werden. Die rot markierte Fläche repräsentiert die Integration der Leistung bei einer 13-stündigen Abschaltung um 6:00 Uhr. Obwohl die Leistung in den folgenden Stunden deutlich abnimmt, ergibt die Berechnung zu diesem Zeitpunkt aufgrund der langen Abschaltdauer das maximale LM-Potenzial. Während den Nachtzeiten mit hohem Heizbedarf sind lediglich Abschaltzeiten im Bereich von 3 Stunden möglich.

Abb. 5.8. zeigt, dass mit Ausnahme dieses Maximums das Abschaltpotenzial in diesem Beispielfall im Tagesverlauf annähernd konstant verläuft. Diese Beobachtung

tritt allerdings nur bei wenigen Kombinationen von Typtag und Gebäudemodell auf. Wie die Untersuchungen gezeigt haben, kann das Langzeitpotenzial innerhalb eines Typtags, vor allem bei der Typologie *Bürogebäude*, stark variieren. Um auch ohne Einblick in die stündlichen Schwankungen eine Abschätzung des theoretisch möglichen Potenzials zu geben, erfolgt die Auswertung anhand von Kursdiagrammen, die sowohl Maxima wie Minima, als auch das durchschnittliche Lastmanagement-Potenzial des untersuchten Typtags abbilden. Dies soll anhand der Beispielgrafik Abb. 5.9 erläutert werden.

Die Tagesmittelwerte der acht untersuchten Gebäudetypologien sind mit farblich markierten Quadraten dargestellt. In Abb. 5.9 wird beispielhaft der *Büro-Neubau* hervorgehoben. Potenzialsitzen werden durch den oberen Punkt repräsentiert (in Abb. 5.9 grün markiert), der niedrigste Wert des Typtags mit dem unteren Ende (in Abb. 5.9 rot markiert). Für den Beispielfall des *Büro-Neubaus* am *sehr kalten* Typtag variiert das Langzeitpotenzial beim Abschalten der Heizung zwischen ca. 60 und 125 Wh/m² und beträgt im Mittel etwa 75 Wh/m².

Für die Untersuchung des Langzeitpotenzials werden Zu- und Abschalten in separaten Grafiken dargestellt.

Durch hohe Ab- und Zuschaltdauern von weit mehr als 12 Stunden ist bei der Berechnung des Langzeitpotenzials keine Unterscheidung von Tag und Nacht möglich. Ein Abschaltvorgang, der wie im Beispiel aus Abb. 5.7 um 6:00 Uhr in der Nacht eingeleitet wird, wird bei einer maximal möglichen Abschaltdauer von ca. 13 h eben auch von internen Wärmelasten der Tagesstunden beeinflusst. Bei kurzen Ab- und Zuschaltdauern haben die Nutzungszeiten und Außenbedingungen jedoch einen großen Einfluss auf die, im folgenden Unterkapitel behandelte, Berechnung des Kurzzeitpotenzials.

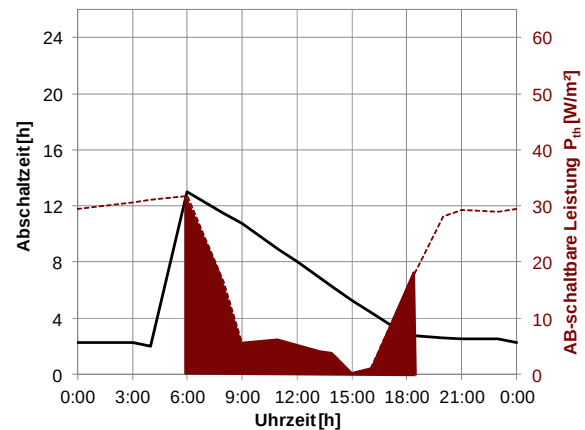


Abb. 5.7: Integration der abschaltbaren Heizleistung über die maximale Abschaltdauer

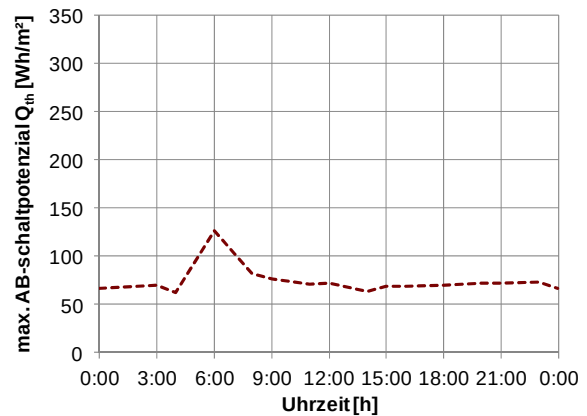


Abb. 5.8: Verlauf des Langzeit-Abschaltpotenzials

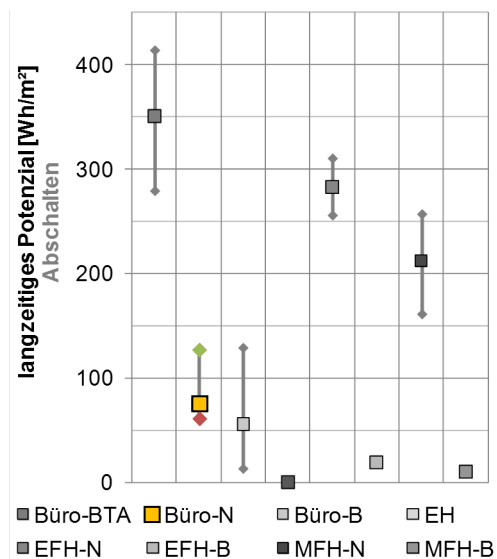


Abb. 5.9: Darstellung des minimalen, durchschnittlichen und maximalen Langzeitpotenzials

Kurzzeitiges Potenzial

Neben den maximal möglichen Ab- und Zuschaltzeiten soll in dieser Studie vor allem die Möglichkeit untersucht werden, mit Lastmanagement in Gebäuden das Stromnetz kurzzeitig zu entlasten. Dazu wird ein „kurzzeitiges Lastmanagementpotenzial“ auf Basis kurzer Ab- und Zuschaltzeiten definiert. Als Betrachtungszeitraum wird hierzu eine Lastmanagement-Dauer von maximal 2 Stunden gewählt. Mit dieser gewählten Kurzzeitbetrachtung lassen sich die Gebäudetypologien, trotz ihrer unterschiedlichen Nutzungsarten, gut miteinander vergleichen.

In Analogie zum Unterkapitel zur Leistung wird auch beim Kurzzeitpotenzial eine stundenweise Betrachtung zugunsten einer tageszeitbasierten Reduktion der Komplexität gewählt. Im dargestellten Beispiel des *Büro-Neubaus* (Abb. 5.10) ist ein annähernd konstantes Abschaltpotenzial zwischen 21:00 und 6:00 Uhr festzustellen. Während den Betriebszeiten sinkt dieses jedoch aufgrund der internen Wärmelasten stark ab, was eine vereinfachte Aufteilung in Tag und Nacht ermöglicht.

Im gewählten Beispielmmodell des *Büro-Neubaus* am *sehr kalten* Typtag bewegt sich das kurzzeitige Abschalt-Potenzial zwischen etwa 10 Wh/m² als Mittelwert für den Tag und 60 Wh/m² nachts. Damit ergibt sich für den Nacht-Wert keine sichtbare Reduzierung gegenüber dem Langzeitpotenzial (vgl. Abb. 5.8). Die kurzzeitige, auf 2 h begrenzte Betrachtung führt dazu, dass vor allem während der Vormittagszeit die langen möglichen Abschalt-dauern, die bis in die Nachtstunden reichen könnten, nicht genutzt werden. Daher stehen lediglich die geringen Heizleistungen während der Nutzungszeit zum Abschalten zur Verfügung. Die Kurzzeitbetrachtung führt damit beispielsweise um 15:00 Uhr zu keinem nutzbaren Abschalt-Potenzial. Diese zeitlich höher aufgelösten Werte können für Netzbetreiber von höherer Relevanz als die Maximalwerte der Langzeitig-Betrachtung sein, da für die Regelung des Stromnetzes meist kurzzeitige Entlastungen relevant sind, vgl. [9].

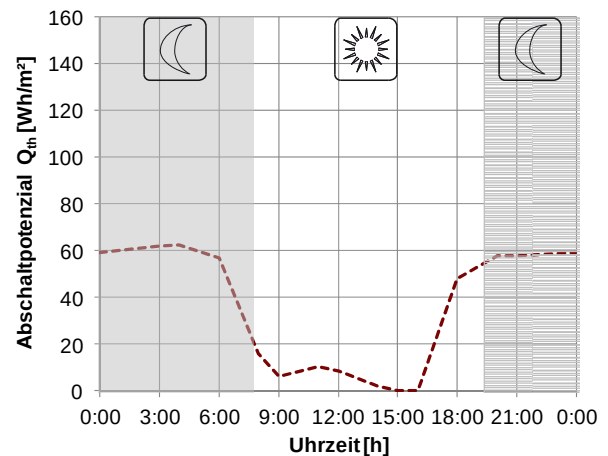


Abb. 5.10: Tageszeitlicher Verlauf des kurzzeitigen Abschaltpotenzials mit Segmentierung in Tag und Nacht

Zusammenfassung der Gebäudemodelle in eine gemeinsame Vergleichsgrafik

Um die gezeigten Abschaltpotenziale mit den weiteren Gebäudemodellen in Vergleich zu setzen, werden alle acht untersuchten Gebäudetypologien in einer Grafik zusammengefasst.

Dies soll anhand der folgenden Abb. 5.11 beispielhaft erläutert werden. Dazu sind die bisher behandelten Potenziale des *Büro-Neubaus* farblich hervorgehoben. Die Grafik ist vertikal in Tag und Nacht aufgeteilt. Die rechte, grau hinterlegte Hälfte zeigt die nächtlichen Durchschnittswerte von 20:00 bis 8:00 Uhr, die linke Hälfte den Tag von 8:00 bis 20:00 Uhr. Dabei kann zusammenfassend festgehalten werden, dass Wohngebäude keinen messbaren Unterschied zwischen Tag und Nacht aufweisen, da hier die internen Wärmelasten nur eine untergeordnete Rolle spielen.

Die horizontale Aufteilung trennt das Zu- und Abschaltpotenzial. Die Werte oberhalb der Nulllinie repräsentieren eine zusätzliche Leistungsentnahme aus dem Stromnetz durch Zuschalten von Heiz- bzw. Kühlleistung. Eine Entlastung des Stromnetzes durch Abschalten des Wärmeübergabesystems wird in der unteren Hälfte des Diagramms dargestellt.

Gebäude mit einem Potenzialbalken, der sowohl oberhalb als auch unterhalb der Nulllinie deutlich ausgeprägt ist, eignen sich besonders gut für ausgleichende LM-Maßnahmen. Diese Gebäudetypen besitzen gute thermische Speichereigenschaften und eine hohe Flexibilität. Mit einem geeigneten elektrischen Wärme- bzw. Kälteerzeugungssystem (s. Kapitel 6.3) könnten sie sowohl Leistungs-Überschüsse aus dem Stromnetz aufnehmen, als auch bei einer zu geringen Erzeugungsleistung das Netz durch Abschaltung der TGA entlasten.

Als Hinweis werden Potenziale, bei denen die LM-Dauer weniger als 2 Stunden beträgt, mit einem „!“ gekennzeichnet. Dies sind meist Fälle, in denen Leistungsspitzen im Bereich von 15 bis 60 Minuten kurzzeitig zu- bzw. abgeschaltet werden können. Diese treten insbesondere in den Bestandsmodellen auf.

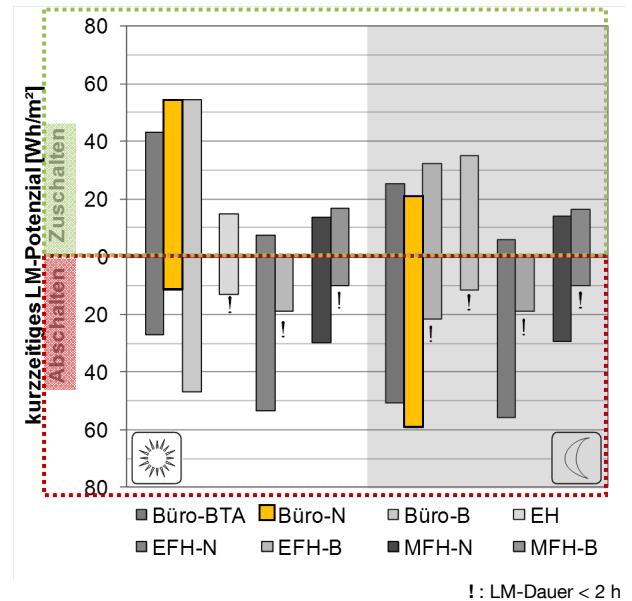


Abb. 5.11: Vergleichsgrafik für kurzzeitiges LM-Potenzial mit Segmentierung in Tag/ Nacht und Ab/Zuschalten

An dieser Stelle soll darauf hingewiesen werden, dass im Rahmen dieser Studie die Abschalt- und Zuschaltpotenziale als unabhängig voneinander betrachtet werden. Nach einer Aufheizung des Gebäudemodells bis zur oberen Temperaturgrenze ist eine deutlich längere Abschaltdauer bis zum Erreichen des unteren Grenzwertes möglich, als wenn der Abschaltvorgang standardmäßig von der Komforttemperatur ausgeht. Ebenso erhöht sich das mögliche Zuschaltpotenzial nach einer zeitweisen Abschaltung der Heizung. Die hier gezeigten Potenziale stellen daher einen tageszeitabhängigen Richtwert dar, der durch eine sinnvolle Kombination von LM-Maßnahmen weiter gesteigert werden kann.

5.2 Typtagspezifische Potenzialermittlung

Wie in der Berechnungsmethodik in Kapitel 5.1.3 erläutert, erfolgt die Berechnung der LM-Potenziale anhand von sieben repräsentativen Typtagen. Im folgenden Kapitel werden besondere Merkmale des jeweiligen Typtags erläutert. Die Berechnung des Potenzials erfolgt durch Integration der zu- bzw. abschaltbaren Leistung über die Lastmanagement-Dauer. Dabei erfolgt eine Unterteilung in das maximal mögliche Langzeitpotenzial und ein Kurzzeitpotenzial, bei dem die LM-Dauer auf 2 h begrenzt ist. Die Ergebnisse der Typtage werden in Kapitel 5.3 zu einem Gebäudekatalog zusammengefasst.

5.2.1 Typtag *sehr kalt*

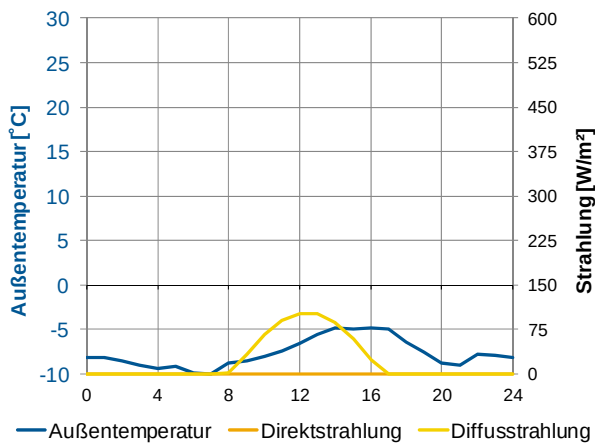


Abb. 5.12: Außenbedingungen des Typtags *sehr kalt*

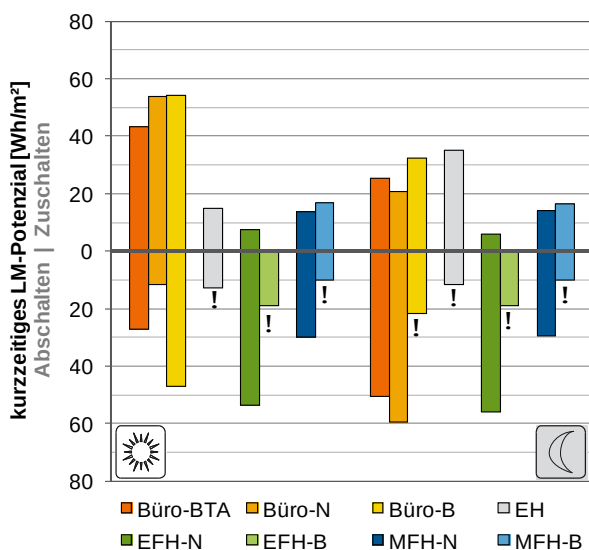


Abb. 5.13: Vergleich der Gebäudetypologien: kurzzeitiges LM-Potenzial des Typtags *sehr kalt*

Der Übersicht halber sind die Grafiken der ab- und zuschaltbaren Leistung und der LM-Dauer im Anhang 12.1 zusammengefasst. Anhand des Zusammenspiels dieser beiden Größen lässt sich das LM-Potenzial entsprechend der Berechnungsmethodik aus Kapitel 5.1.3 bestimmen.

Kurzzeitiges Lastmanagementpotenzial

Die untersuchten Gebäudemodelle benötigen am *sehr kalten* Typtag die höchste Heizleistung, die meist sehr knapp unterhalb der maximalen Auslegungsleistung des kältesten Tages des Jahres (Extremum) liegt. Daher steht an diesem Typtag vor allem nachts die geringste freie Heizleistung zum Zuschalten zur Verfügung. Beispielhaft sei der hohe spezifische Heizbedarf im *EFH-Bestand* genannt. Dieser erreicht an *sehr kalten* Typtagen die Auslegungsleistung des Heizsystems von etwa 75 W/m^2 . Daher bestehen hier weder tagsüber noch nachts Zuschaltpotenziale.

In Bürogebäuden besteht jedoch, bedingt durch die internen Wärmelasten während der Nutzungszeit, tagsüber ein freies Heizleistungspotenzial. Dieses kann aufgrund der kalten Außentemperaturen in allen untersuchten *Büro*-Typologien für 4 h zugeschaltet werden, ohne das Behaglichkeitsband zu verlassen. Da während der Nacht in den Büros keine internen Wärmelasten vorhanden sind, werden hohe spezifische Heizleistungen benötigt. Im *Büro-Neubau* können diese kurzzeitig abgeschaltet werden. Beim *Büro-Bestand* fällt die Temperatur allerdings bereits nach weniger als einer halben Stunde unter die Behaglichkeitsgrenze, was zu einem geringen Abschaltpotenzial führt. Im Wohnbau-Bestand ist lediglich ein kurzzeitiges Abschalten im Bereich von 15 Minuten möglich. Das in der Grafik sichtbare Potenzial beruht auf den hohen spezifischen Heizleistungen, die jedoch nur zur Regelung der Minutenreserve genutzt werden könnten. Demgegenüber werden im Wohnungs-Neubau aufgrund der guten Dämmung sowohl tagsüber als auch nachts Abschaltdauern der Heizung von etwa 10 h erreicht, was zu einer wirksamen Regelung des Stromnetzes genutzt werden kann. Während für das kurzzeitige Potenzial nur Dauern bis 2 h berücksichtigt werden, wird im Folgenden die Ausnutzung des vollen Langzeitpotenzials untersucht.

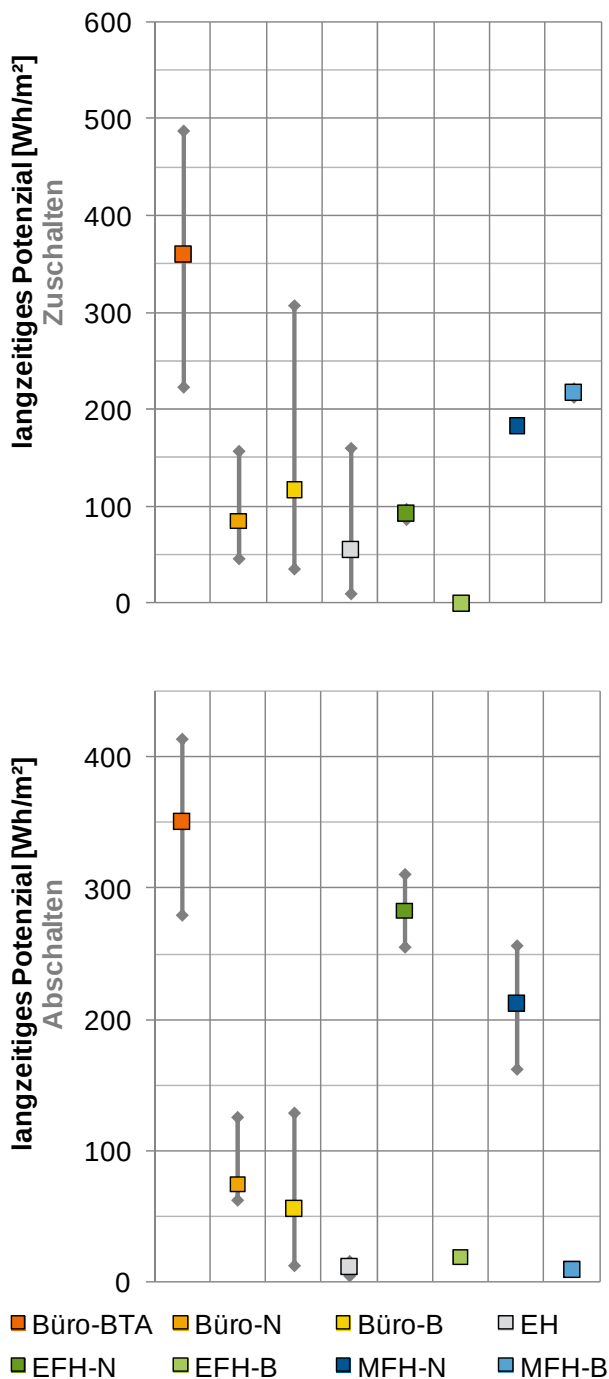


Abb. 5.14: Vergleich der Gebäudetypologien: maximales Langzeit-Potenzial- sehr kalt

Langzeitpotenzial

Bei der Berechnung des Langzeitpotenzials wird die Leistung über die maximale Ab- bzw. Zuschaltdauer integriert. Hier werden demnach die Unterschiede zwischen sehr kurzen (min. eine Viertelstunde) und sehr langen (bis max. 26 Stunden) LM-Dauern stärker berücksichtigt als beim Kurzzeitpotenzial.

Der im vorangegangenen Absatz beschriebene Vergleich des Abschaltvorgangs zwischen Neubau und Bestand im Wohnungsbau wird in der langzeitigen Betrachtung noch deutlicher sichtbar. An einem *sehr kalten* Tag fällt das Potenzial von *EFH-B* und *MFH-B* vernachlässigbar gering aus, da die Heizung höchstens für eine Viertel Stunde abgeschaltet werden kann. Die beiden Neubauvarianten mit Abschaltdauern von 10 h (*EFH-N*) und 14 h (*MFH-N*) weisen demgegenüber Abschaltpotenziale über 200 Wh/m² auf. Aufgrund der sich ändernden Außentemperaturen und Einstrahlungen kann das Potenzial im *Einfamilienhaus Neubau* je nach Abschaltzeitpunkt zwischen 250 und 310 Wh/m² variieren.

Die Tageszeitabhängigkeit ist bei den Bürobauten aufgrund der von 8:00-18:00 Uhr begrenzten Nutzungszeit besonders prägnant. Der Verlauf des tageszeitabhängigen Langzeitpotenzials wird am Beispiel des *Büro-Bestandsgebäudes* in Abb. 5.15 verdeutlicht. Bei dieser Gebäudetypologie besteht je nach Abschaltzeitpunkt ein mit ca. 13 Wh/m² vernachlässigbar geringes Potenzial, bis hin zu um eine Größenordnung größeren Regelenergien von etwa 130 Wh/m². Der geringe Wert tritt um 3:00 Uhr auf und ist mit den kältesten Außentemperaturen ohne interne Wärmelasten begründet. Um 9:00 Uhr ist eine Vollbelegung der dem Gebäudemodell unterstellt und es folgt eine lange Zeit mit hohen internen Wärmelasten, so dass die Heizung hier für mehr als 5 h abgeschaltet werden kann, ohne dass die operative Temperatur unter die Behaglichkeitsgrenze von 20 °C sinkt. Dies führt zu einer Erhöhung des Abschaltpotenzials.

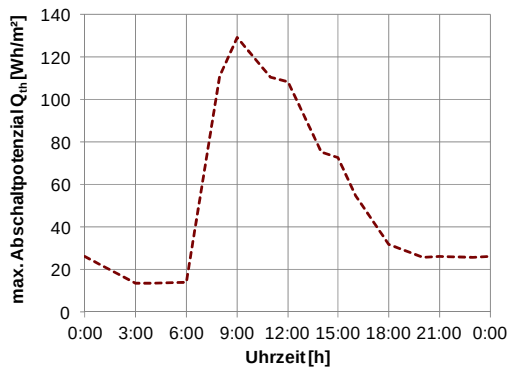


Abb. 5.15: Tageszeitabhängigkeit des Langzeitpotenzials beim Abschalten am Bsp. Büro-B, sehr kalter Typtag

Die Tageszeitabhängigkeit der langzeitigen Potenziale ist bei Zuschaltvorgängen in Bürogebäuden noch deutlicher ausgeprägt. Dies liegt hier weniger an der Zuschaltdauer, als an der zuschaltbaren Leistung, die während den Nutzungszeiten in deutlich höherem Maße verfügbar ist. Demgegenüber sind die langzeitigen Zuschaltpotenziale im Wohnungsbau unabhängig von der Tageszeit, so dass in Abb. 5.14 keine Spannweiten aufgezeigt werden. Begründet wird dies mit dem oben erläuterten maximalen Heizbedarf an sehr kalten Tagen, so dass keine nennenswerten Leistungsreserven zum Zuschalten verfügbar sind.

Das *Einzelhandelsmodell* mit Luftheizung liegt bei der Langzeitbetrachtung etwa im Bereich der Bürogebäude mit Radiator. Die hohen spezifischen Leistungen der Luftheizung führen durch Integration über vergleichsweise kurze Ab- und Zuschaltdauern zu einem Langzeitpotenzial, das bei etwa 100 Wh/m² im Mittel liegt.

Bei der Langzeitbetrachtung kommen die Vorteile eines trägen Flächen-Wärmeübergabesystems voll zum Tragen. Mit über 400 Wh/m² weist das *BTA-Büromodell* am *sehr kalten* Typtag die höchsten Abschaltpotenziale aller untersuchten Gebäudetypologien und Typtage auf. Hier kann um 21:00 ein Abschalt-Zeitpunkt gefunden werden, an dem die Gebäudemasse durch die BTA ausreichend geladen wurde, so dass die operative Temperatur zwar langsam sinkt, aber durch Einsetzen der internen Wärmequellen knapp oberhalb der Behaglichkeitsgrenze wieder steigt und erst nach etwa 22 h unter 20 °C fällt. Gleichzeitig kann in dieser Zeitspanne eine sehr hohe, an das Auslegungsmaximum grenzende, Heizleistung ab-

geschaltet werden, die zum Einhalten der Komforttemperatur von 22 °C benötigt würde.

Die Trägheit der Betonkernaktivierung zeigt sich auch in einem sehr hohen Langzeit-Zuschaltpotenzial. Da (nach einer nächtlichen Vorkonditionierung der Gebäudemasse) die Heizung während der Nutzungszeit bis zum Nachmittag nicht in Betrieb gehen muss, steht in dieser Zeit die volle installierte Leistung zum Zuschalten zur Verfügung. Die zugeschaltete Heizleistung erwärmt anfangs vor allem die Gebäudemasse und führt erst in der Nacht zu einem spürbaren Temperaturanstieg, der wiederum von den kalten Außentemperaturen gedämpft wird.

Da gerade Zuschaltdauern von 24 h oder mehr für die Integration fluktuierender Energieerzeugung hinsichtlich der Netzstabilität schwer zu bewerten sind, liegt der Schwerpunkt dieser Studie auf den kurzzeitigen Lastmanagementpotenzialen. Der Vergleich der Gebäudetypologien unter den Randbedingungen des *sehr kalten* Typtags wird in einem Gebäudekatalog in Kapitel 5.3 zusammengefasst.

5.2.2 Typtag kalt

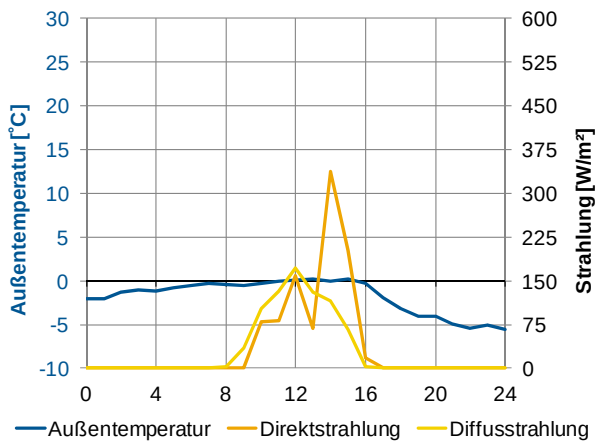


Abb. 5.16: Außenbedingungen des Typtags kalt

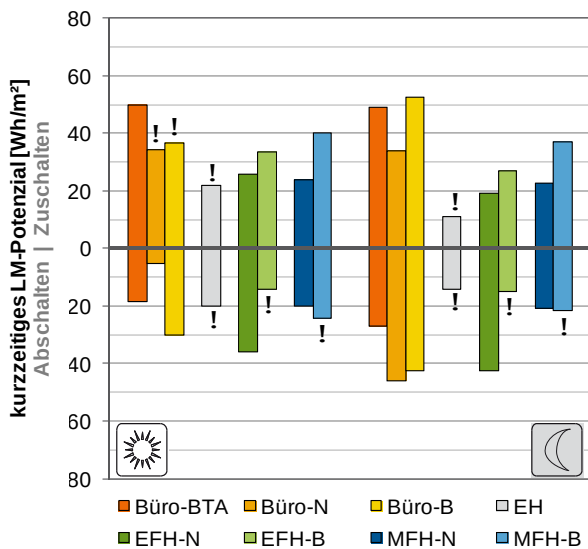


Abb. 5.17: Vergleich der Gebäudetypologien: kurzzeitiges LM-Potenzial des Typtags kalt

Kurzzeitiges Lastmanagementpotenzial

Betrachtet man in Abb. 5.17 den zweiten Quadranten, also den Fall des Zuschaltens am Tag, fallen die drei „!“ auf, die anzeigen, dass sowohl im *Büro-Neubau*- wie *Bestand* als auch im *Einzelhandel* nach kurzer Zeit die Raumtemperatur über die Behaglichkeitsgrenze steigt und die Lastmanagementdauer weniger als 2 h beträgt. Trotzdem bestehen im *Büro* hohe Zuschaltpotenziale von etwa 35 Wh/m². Dies ist damit zu erklären, dass kurzfristig hohe Heizleistungen zugeschaltet werden können. Beim *Büro-Neubau* reichen die internen Wärme-

lasten während der Nutzungszeit weitgehend aus, die Behaglichkeitstemperatur zu halten. Daher besteht von 9:00 bis 17:00 die volle installierte Auslegungsleistung von 40 W/m² als zuschaltbare Netzentlastung zur Verfügung. Beim *Büro-Bestand* werden im gleichen Zeitraum nur etwa 10 W/m² benötigt um die Komforttemperatur von 22 °C zu halten, so dass fast 60 W/m² spezifische Heizleistung zugeschaltet werden können.

Das Zuschaltpotenzial der Wohngebäude liegt am Tag zwischen 25 und 40 Wh/m² und damit deutlich höher als am *sehr kalten* Typtag. Hier führen die milderen Außentemperaturen, die tagsüber mindestens 5 °C höher als beim *sehr kalten* Tag sind, und messbare Solarstrahlung dazu, dass zuschaltbare Leistungskapazitäten bestehen. Diese verfügbare Leistung kann im *Wohnbau* sowohl tagsüber wie auch nachts für sehr lange Zeit zugeschaltet werden, da aufgrund der kalten Außenbedingungen Wärmeverluste die Erwärmung des Raumes dämpfen. Da die Zuschaltdauern bei der Betrachtung des Kurzzeitpotenzials auf 2 h begrenzt sind, lässt sich das höhere Zuschaltpotenzial der *Bestandsmodelle* allein durch deren höhere Auslegungsleistung erklären, die eine höhere zuschaltbare Leistung ermöglichen.

Beim Abschaltvorgang sind im *Wohnbau-Bestand* zwar ebenfalls höhere Heizleistungen für LM-Maßnahmen verfügbar, jedoch sind hier aufgrund des geringeren Dämmstandards auch deutlich kürzere Abschaltdauern als im *Neubau* möglich. Sowohl bei *EFH-B* als auch *MFH-B* liegen die Abschaltdauern unter 1 Stunde, während im *Neubau* sowohl tagsüber wie auch nachts die Heizung für durchschnittlich 15 Stunden abgeschaltet bleiben kann.

Die LM-Dauern des *Einzelhandelsmodells* liegen in allen vier Fällen bei maximal einer Stunde. Daher fällt dieses Gebäudemodell in der Langzeitbetrachtung gegenüber den anderen Modellen noch deutlicher zurück.

Langzeitpotenzial

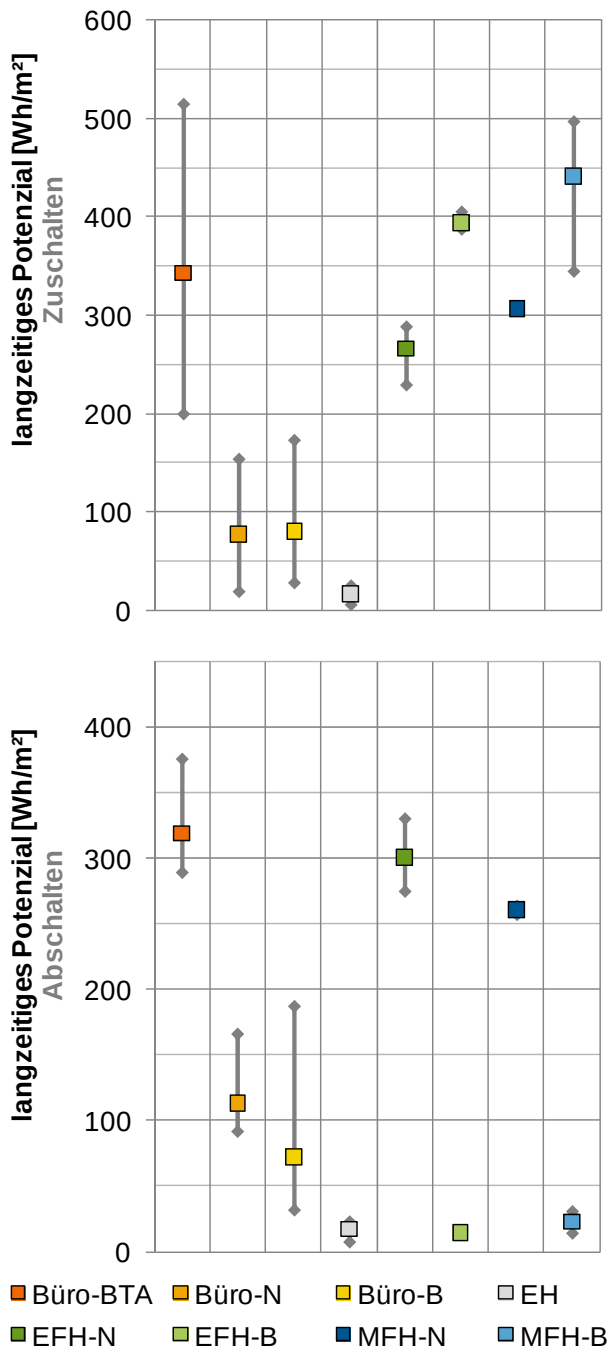


Abb. 5.18: Vergleich der Gebäudetypologien: maximales Langzeit-Potenzial- kalt

Zuschalten

Die geringen Zuschaltpotenziale der Gebäudemodelle *Büro-B*, *Büro-N* sowie *EH* lassen sich aufgrund ihrer kurzen Zuschaltdauern unter 2 Stunden erklären.

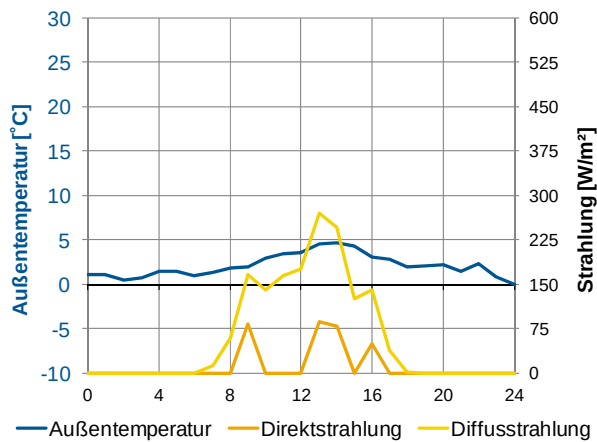
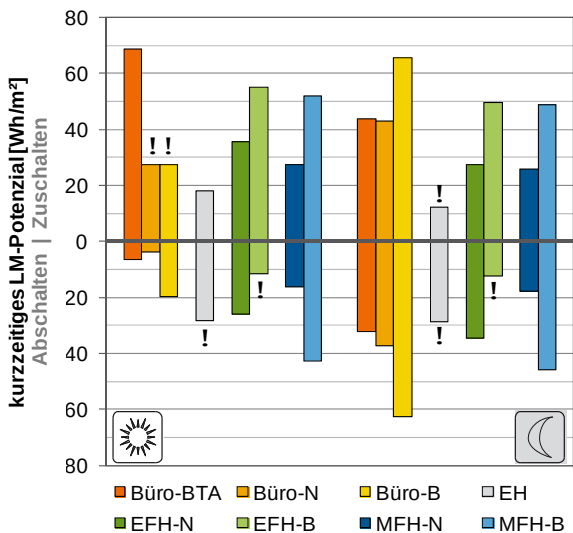
Obwohl die zuschaltbare Heizleistung der Wohnbaumodelle durchwegs geringer ausfällt, haben diese ein deutlich höheres Zuschaltpotenzial in der Langzeitbetrachtung als die Nichtwohnbaumodelle. Hier kommen lange Zuschaltdauern von über 20 Stunden voll zum Tragen. Am Beispiel des *EFH-B* kann aufgezeigt werden, wie eine relativ geringe zuschaltbare Leistung, die jedoch konstant über den ganzen Tag vorliegt, ein sehr hohes Langzeitpotenzial von 400 Wh/m² ermöglicht. In diesem Fall kann aufgrund der hohen Wärmeverluste die Heizung zu jedem Zeitpunkt mit voller Auslegungsleistung über 24 Stunden betrieben werden, ohne dass die operative Temperatur über die Behaglichkeitsgrenze steigt.

Abschalten

Begründet mit den hohen Wärmeverlusten aufgrund eines geringen Dämmstandards weisen die Wohnbau-Bestandsmodelle *EFH-B* und *MFH-B* nur ein geringes langzeitiges Abschaltpotenzial auf. Ebenso das Gebäudemodell *Einzelhandel* aufgrund der hohen Wärmeverluste über den Luftwechsel. Bei diesen drei Modellen liegt die Abschaltdauer unter 2 Stunden. Die besser gedämmten Neubaumodelle *EFH-N* und *MFH-N* bieten mit Abschaltdauern über 15 Stunden hohe Potenziale zum Abschalten der Heizsysteme.

Die geringen Minima der *Büro*-Modelle lassen sich mit den geringen abschaltbaren Leistungen am Tag, aufgrund von internen Wärmequellen, erklären. Nachts liegen auch hier mit hohen Heizleistungen und Abschaltdauern günstige Bedingungen für Lastmanagement-Maßnahmen vor.

5.2.3 Typtag *kühl*

Abb. 5.19: Außenbedingungen des Typtags *kühl*Abb. 5.20: Vergleich der Gebäudetypologien: kurzzeitiges LM-Potenzial des Typtags *kühl*

Kurzzeitiges Lastmanagementpotenzial

Nach einer detaillierten Beschreibung der Typtage *sehr kalt* und *kalt*, erfolgt die Analyse des Typtags *kühl* im relativen Vergleich zu diesen.

Wohnbau

Das Zuschaltpotenzial im Wohnbau nimmt gegenüber den beiden kälteren Typtagen zu. Dies liegt an der höheren zuschaltbaren Heizleistung. Während am *sehr kalten* Typtag zur Temperierung des Raumes auf Komforttemperatur fast die vollständige Auslegungsleistung benötigt wird, sinkt die Heizleistung am *kalten* Typtag, so dass zwischen 10 und 20 W/m² als zuschaltbare Leistung zur Verfügung stehen. Am *kühlen* Tag sinkt die benötigte Heizleistung im Wohnungsbau um etwa weitere 10% der Auslegungsleistung, so dass in Bestandsgebäuden die zuschaltbare Leistung auf ca. 25 W/m² steigt. Auf der anderen Seite nimmt mit mildereren Außentemperaturen die Zuschaltdauer ab. Während diese beim *sehr kalten* und *kalten* Typtag über 20 Stunden beträgt, kann am *kühlen* Tag in allen Wohnungsmodellen die maximal verfügbare Heizleistung noch für mindestens 8 Stunden zugeschaltet werden. Bei einer Kurzzeit-Begrenzung auf 2 Stunden hat diese sinkende Zuschaltdauer demnach keinen Einfluss, so dass die höheren verfügbaren Leistungen zu einem gesteigerten kurzzeitigen Lastmanagementpotenzial am *kühlen* Tag führen.

Vergleicht man das Abschaltpotenzial der Wohngebäude des *kühlen* Typtags mit den beiden kälteren Typtagen, so ist eine Abnahme des Potenzials aufgrund sinkender Heizleistungen festzustellen. Einzige Ausnahme bildet hierbei das Modell *MFH-B*. Während die Neubaumodelle an allen Wintertyptagen eine Abschaltdauer von über 10 Stunden aufweisen, lag der Hauptgrund für die geringen Abschaltpotenziale im *Wohnbau-Bestand* bei kurzen Abschaltdauern. Beim *MFH-B* steigt diese am *kühlen* Typtag auf knapp 4 h am Tag und über 2 h in der Nacht, wodurch trotz geringerer Heizleistung von ca. 20 W/m² über den gesamten Zeitraum von 2 h abgeschaltet werden kann. Dies führt zu einer Erhöhung des Abschaltpotenzials. (Die abschaltbare Leistung nimmt beim *MFH-B* von knapp 40 W/m² am *sehr kalten* Typtag, 30 W/m² am *kalten* und etwa 20 W/m² am *kühlen* Tag deutlich ab. Demgegenüber steigt das Abschaltpotenzial von 10 Wh/m² auf über 40 Wh/m².)

Büro und Einzelhandel

Bei den Nichtwohnbau-Modellen unterscheiden sich weiterhin die Potenziale zur Nacht- und Tagzeit. Das Abschaltpotenzial am Tag nimmt mit wärmeren Außenbedingungen ab. Im *Büro* reichen internen Wärmelasten sowie die solare Einstrahlung am *kühlen* Typtag fast vollständig zur Einhaltung der Komforttemperatur aus. Bei Wegfall dieser Wärmequellen in der Nacht besteht jedoch weiterhin Heizbedarf. Besonderes Augenmerk soll hier auf die Gebäudetypologie *Büro-B* und den Vergleich zwischen nächtlichem Abschaltpotenzial am *kalten* und *kühlen* Typtag gelegt werden. Das kurzzeitige Potenzial am *kühlen* Tag ist mit rund 60 Wh/m^2 fast 50% höher als am *kalten*. Dies ist auf den ersten Blick in die Leistungs- und Dauerdiagramme (im Anhang 12.1 zusammengefasst) nicht zu erklären, da an beiden Typtagen die durchschnittliche Abschaltdauer über der 2-Stunden-Grenze liegt, die abschaltbare Leistung beim *kalten* Tag jedoch höher ist. Die Erklärung liegt in der Mittelwertbildung der nächtlichen Abschaltdauern, in der eine Spitze von 11 h um 6 Uhr die ansonsten unter 2 h liegende Abschaltdauer anhebt. Dies unterstreicht die Vorteile der gewählten stundenweisen Auflösung und Integration zur Potenzialermittlung.

Das Gebäudemodell des *Büro-Bestands* eignet sich bei den Randbedingungen des *kühlen* Typtags, der etwa 20% des Jahres repräsentiert, außergewöhnlich gut für Lastmanagement Maßnahmen. Hier kann sowohl überschüssiger Strom aus dem Netz zwischengespeichert, als auch für mehr als 2 Stunden das Netz von Heizlasten entlastet werden. Das Lastmanagementpotenzial in der Nacht ist besonders hoch. Hier können über 60 Wh/m^2 sowohl zu- als auch abgeschaltet werden. Aber auch die 24-Stunden Betrachtung als Summe aus Zu- und Abschaltpotenzialen am Tag und in der Nacht, ergibt beim *Büro-B* das zweithöchste Gesamtpotenzial. Das höchste LM-Potenzial liegt ebenfalls am *kühlen* Typtag vor: hier erfüllt die Gebäudetypologie *MFH-B* am besten das Kriterium, möglichst flexibel innerhalb von 24 h einmal zu- und einmal abzuschalten und dabei das Stromnetz (innerhalb von höchstens zwei Stunden) maximal zu entlasten. Im Tagesmittel können hier sowohl 44 Wh/m^2 ab- als auch 50 Wh/m^2 zugeschaltet werden, ohne die Behaglichkeitsgrenzen zu verlassen.

Langzeitpotenzial

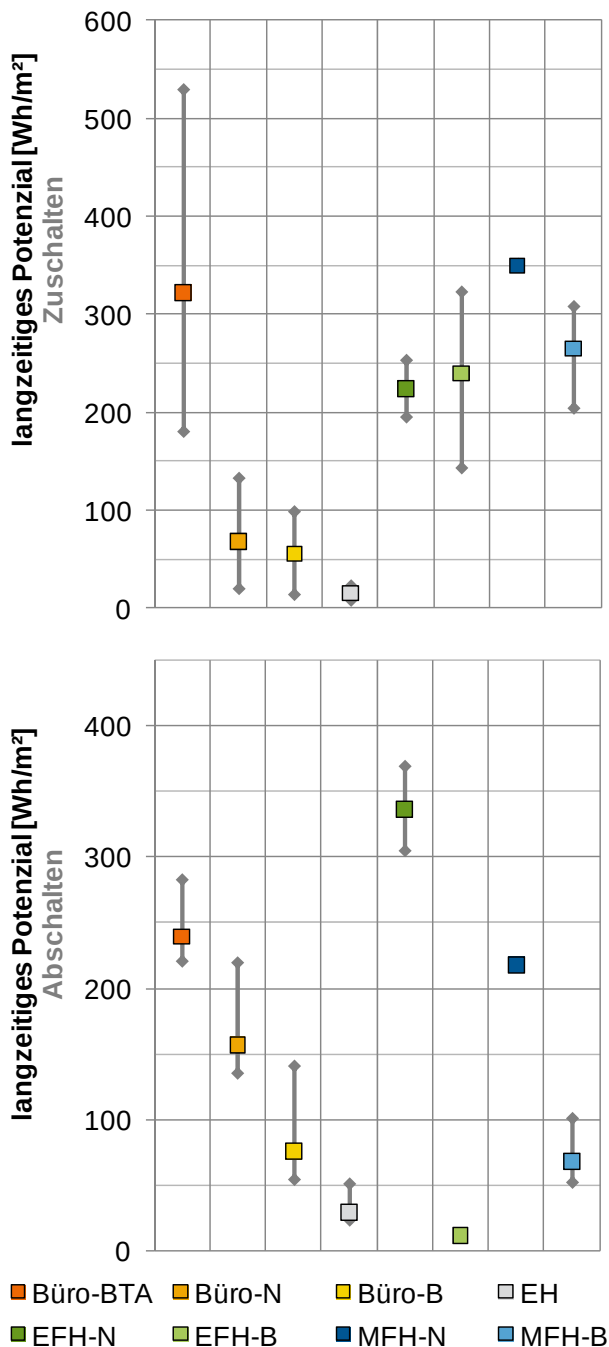


Abb. 5.21: Vergleich der Gebäudetypologien: maximales Langzeit-Potenzial am *kühlen* Typtag

Zuschalten

Beim maximal möglichen Langzeit-Potenzial ist der Einfluss der kürzeren Zuschaltdauer des *kühlen* Typtags gegenüber dem *kalten* Typtag sichtbar. Im Wohnbau liegen die zuschaltbaren Leistungen am *kühlen* Typtag erwartungsgemäß höher als bei kälteren Außentemperaturen. Mit Ausnahme des *MFH-N* kann am *kühlen* Typtag die Auslegungsleistung jedoch nur deutlich verkürzt zugeschaltet werden, bis der Raum zu warm wird. In den beiden Bestandsmodellen *MFH-B* und *EFH-B* verdoppelt sich am *kalten* Typtag die Zuschaltdauer sogar.

An beiden Typtagen weist der Wohnbau ein deutlich höheres Zuschaltpotenzial als die Nichtwohn-Modelle auf. Eine Ausnahme bildet hierbei allein das träge Wärmeübergabesystem der BTA. Der Mittelwert des Zuschaltpotenzials des *Büro-BTA* Modells liegt etwa im Größenbereich der Wohnmodelle. Bei der Bauteilaktivierung besteht jedoch eine sehr große Spanne zwischen maximalem und minimalem Zuschaltpotenzial, als Indiz der Abhängigkeit von der Tageszeit und im Fall der BTA von internen Wärmelasten während der Nutzungszeit. Das maximale Zuschaltpotenzial steigt in diesem Modell am *kühlen* Typtag sprunghaft auf etwa 530 Wh/m². Dies entspricht dem Lastmanagement-Maximum aller Gebäudetypologien im Heizfall und soll daher im Folgenden näher behandelt werden.

Der Temperaturverlauf im Auslegungsfall am betrachteten *kühlen* Typtag ist in Abb. 5.22 mit einer roten Linie dargestellt. Zur Erklärung der tolerierten Abweichung von der Komforttemperatur sei auf den Sonderfall der Regelung der BTA in Kapitel 5.1.1 hingewiesen.

Wie die blaue Linie in Abb. 5.22 zeigt, kann der Zuschaltvorgang um 12:00 Uhr für knapp 20 Stunden erfolgen, bevor die operative Temperatur um etwa 7 Uhr das Behaglichkeitsband verlässt. Die Integration der zuschaltbaren Leistung in diesem Zeitraum, wie in Abb. 5.23 dargestellt, führt zu dem Zuschaltpotenzial Maximum von 530 Wh/m².

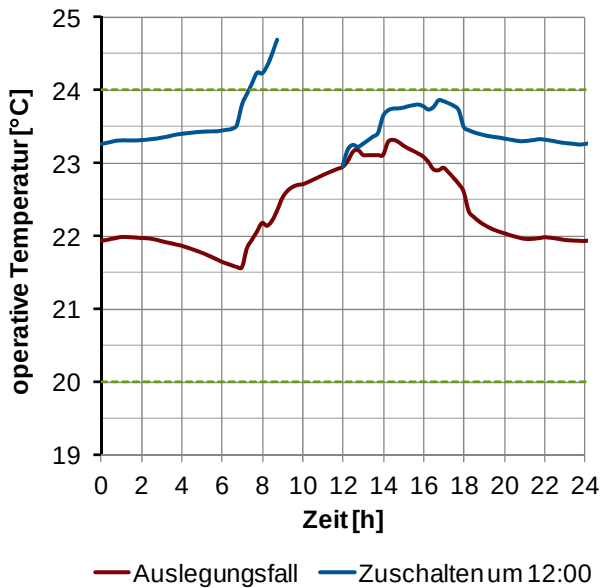


Abb. 5.22: Temperaturverlauf beim Zuschalten der Heizung um 12:00 Uhr bei der Gebäudetypologie Büro-BTA am kühlen Typtag

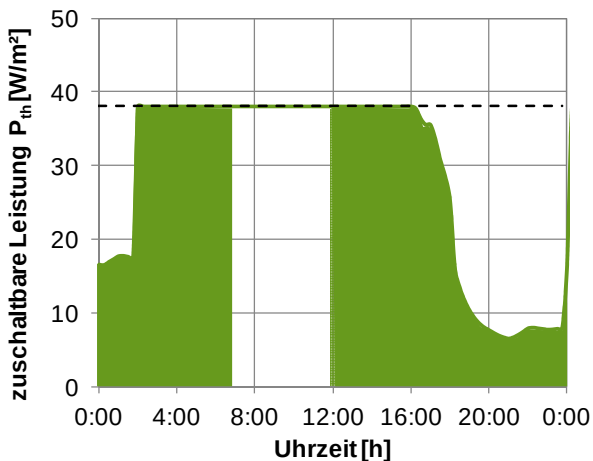


Abb. 5.23: Integration der zuschaltbaren Leistung von 12:00 bis 7:00 Uhr

Abschalten

Obwohl die abschaltbare Leistung im Büro-B etwa 10 W/m² höher als im Büro-N liegt, hat das Neubaumodell ein etwa doppelt so hohes Abschaltpotenzial in der Langzeitbetrachtung. Hier macht sich der bessere Dämmstandard des Neubaus bemerkbar, der im Mittel um 10 Stunden längere Abschaltdauern ermöglicht.

Der hohe Einfluss langer Abschaltdauern auf das maximal mögliche LM-Potenzial zeigt sich sehr deutlich am Gebäudemodell *Einzelhandel*. Hier liegen gerade am Tag hohe abschaltbare Heizleistungen vor. Während den Nutzungszeiten sind jedoch auch der Luftwechsel und damit der Wärmeverlust recht hoch. Daher sinken die vergleichsweise kurzen Abschaltdauern des *Einzelhandel*-Modells am Tag noch weiter. Am kühlen Typtag kann die Luftheizung lediglich für etwa 2 Stunden abgeschaltet werden, was zu einem vernachlässigbar geringen Langzeit-Potenzial führt.

Sowohl beim kalten, als auch beim kühlen Typtag weist das Abschaltpotenzial von EFH-B und MFH-N keine Spanne auf. Hier beträgt der Unterschied zwischen Tagesmaximum und Minimum weniger als 5 Wh/m². Bei beiden Gebäudemodellen bleibt die mögliche Abschaltdauer für den gesamten Typtag konstant. Auch die Leistung unterscheidet sich nicht messbar zwischen Tag und Nacht.

Das Langzeit-Abschaltpotenzial des EFH-N ist am kühlen Typtag besonders hoch. Mit einem Tagesmittelwert von 370 Wh/m² erreicht dies das Maximum der Abschaltpotenziale aller untersuchten Wohnungsbau-Modelle. Nach einer Vorkonditionierung auf Komforttemperatur kann die Heizung zu jeder Tageszeit für über 20 Stunden abgeschaltet werden. Durch das Zulassen einer sinkenden Raumtemperatur bis auf 20 °C kann dabei gegenüber der Heizung auf Komforttemperatur eine spezifische Leistung zwischen 10 und 20 W/m² abgeschaltet werden.

5.2.4 Typtag gemäßigt

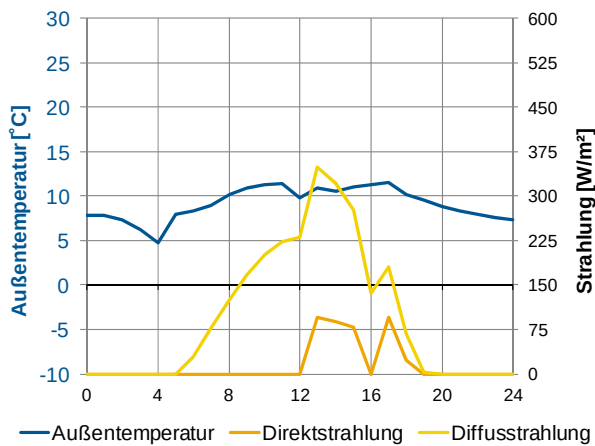


Abb. 5.24: Außenbedingungen des Typtags gemäßigt

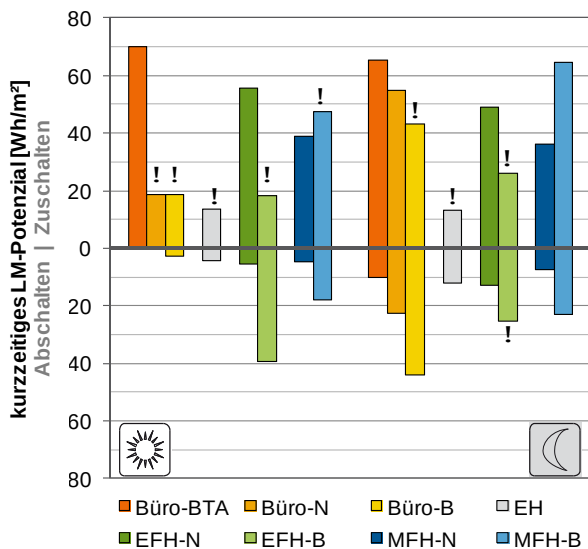


Abb. 5.25: Vergleich der Gebäudetypologien: kurzzeitiges LM-Potenzial-gemäßigt

Kurzzeitiges Lastmanagementpotenzial

Der *gemäßigte* Typtag repräsentiert die Außenbedingungen von 123 Tagen und somit einem Drittel des Referenz-Jahres. Damit fällt diesem Typtag die höchste anteilmäßige Bedeutung zu. Allerdings zeigt die Untersuchung des Lastmanagementpotenzials, dass die *gemäßigten* Außenbedingungen der Übergangsmonate aufgrund des geringen Heizbedarfs kaum zum Ausgleich von Leistungsspitzen im Stromnetz geeignet sind.

Im Nichtwohnbau reichen tagsüber die internen Wärmelasten aus um die Komforttemperatur zu halten, was zu einem vernachlässigbar geringen Abschaltpotenzial führt. Auch in den Wohnbaumodellen führen die milden Außentemperaturen zu einem deutlich reduzierten Heizbedarf und damit der geringen Möglichkeit das Stromnetz zu entlasten. Mit der einzigen Ausnahme des *EFH-B* während den Nachtstunden, liegen die Abschaltauern aufgrund einer langsamen Auskühlung der Modelle oberhalb von 2 Stunden. Das Aufheizverhalten durch Zuschalten der maximalen Heizleistung erfolgt jedoch, aufgrund der reduzierten Wärmeverluste gegenüber der Umgebung, verhältnismäßig schnell. Die „!“ in Abb. 5.25 zeigen an, dass bei den meisten Gebäudetypologien bereits nach unter 2 h die operative Raumtemperatur über die obere Temperaturgrenze steigt. Erfolgt die Erwärmung durch ein träges Wärmeübergabesystem (*Büro-BTA*) oder eine relativ geringe spezifische Heizleistung (der Neubaumodelle), so kann trotz der *gemäßigten* Außenbedingungen ein gutes Zuschaltpotenzial erreicht werden. Das sehr hohe kurzzeitige Zuschaltpotenzial des *MFH-B*, gerade während der Nacht, lässt sich mit einer Zuschaltdauer von genau 2 Stunden bei einer hohen zuschaltbaren Heizleistung von über 35 W/m² erklären.

Die geringen Abschaltpotenziale im *Einzelhandel* begründen sich durch die ungünstige Kombination von langen Abschaltauern mit vernachlässigbar geringen abschaltbaren Leistungen unter 5 W/m². Die geringen Zuschaltpotenziale sind durch die Verbindung von sehr hohen Leistungen bei vernachlässigbar kurzen Zuschaltdauern von weniger als 15 Minuten bedingt.

Langzeitpotenzial

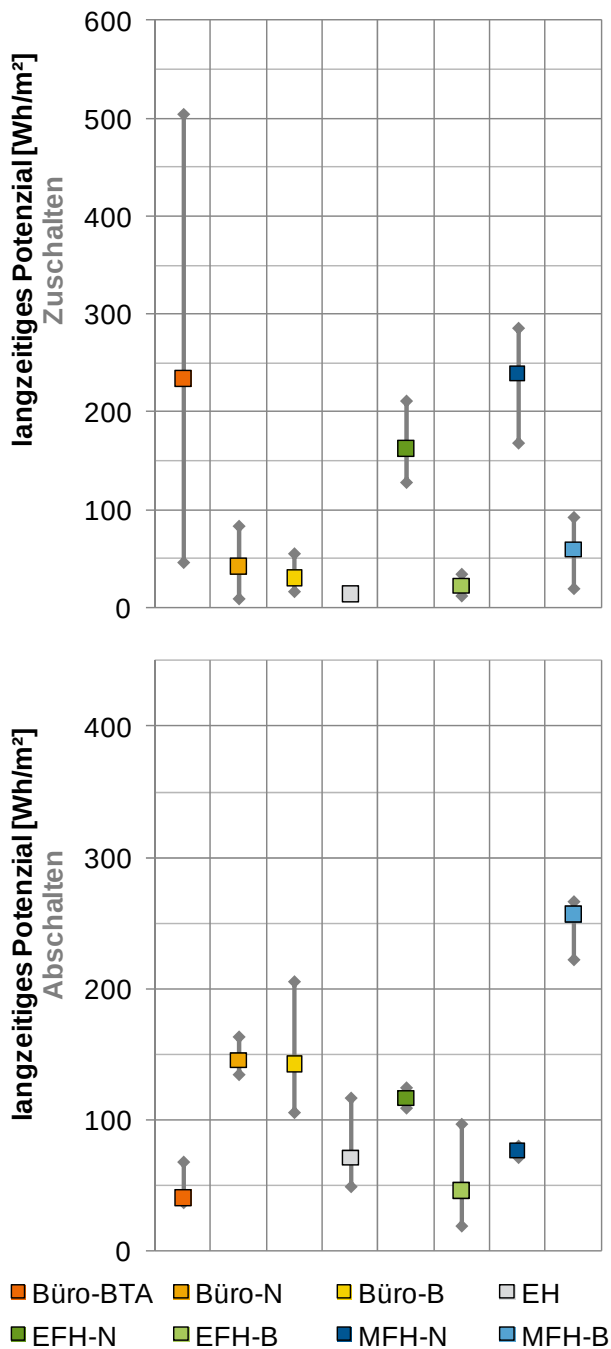


Abb. 5.26: Vergleich der Gebäudetypologien: maximales Langzeit-Potenzial- *gemäßigt*

Wie bei den anderen Typtagen, weist auch bei *gemäßigten* Außenbedingungen eine BTA das höchste Langzeit-Zuschaltpotenzial auf. Daher wird auf diese hier nicht genauer eingegangen.

Bei der Betrachtung des kurzzeitigen Zuschaltpotenzials fielen die hohen Werte des *MFH-B* auf. Bei der Langzeitbetrachtung fällt das Zuschaltpotenzial dieser Gebäudetypologie gegenüber den beiden Neubaumodellen im Wohnbau zurück. Zwar haben die Bestandsgebäude eine höhere zuschaltbare Leistung, die Zuschaltdauer liegt jedoch bei höchstens 2 Stunden. Bei den Gebäudemodellen *EFH-N* und *MFH-N* sind jedoch Zuschaltdauern zwischen 5 und 13 Stunden möglich, was zu einem langzeitigen Zuschaltpotenzial von 130 bis 290 Wh/m² führt. Demgegenüber ist der Unterschied zwischen kurzzeitigem und maximal möglichem Zuschaltpotenzial im Wohnbau-Bestand recht gering. Daher eignen sich an *gemäßigten* Typtagen vor allem *EFH-N* und *MFH-N* um längerfristige Stromüberschüsse im Netz auszugleichen und thermisch zwischen zu speichern.

Aufgrund der sehr kurzen Zuschaltdauern eignen sich die beiden Büromodelle mit Radiator, sowie der *Einzelhandel* mit Luftheizung, am *gemäßigten* Typtag kaum zum Ausgleich von längeren Stromüberschüssen. Zu einer Entlastung des Stromnetzes bei Energiemangel können die betrachteten Büromodelle jedoch einen Beitrag von durchschnittlich 150 Wh/m² beitragen. Durch die gute Dämmung des *Büro-Neubaus* kann die Heizung durchgängig über 26 Stunden abgeschaltet werden, ohne dass die Raumtemperatur spürbar abkühlt. Die tiefste Auskühlung des Raumes wird bei einer Abschaltung der Heizung um 0:00 Uhr erreicht. Hier sinkt die operative Temperatur in den frühen Morgenstunden unter 21 °C, bevor die internen Wärmelasten und die solare Einstrahlung sogar zu einer Erwärmung auf 23 °C am Nachmittag führen. Beim Modell des *Büro-Bestands* verläuft diese Auskühlkurve nach Abschaltung der Heizung ähnlich, jedoch aufgrund des geringeren Dämmstandards um etwa 1 K nach unten versetzt. Daher wird hier in den frühen Morgenstunden das Komfortband nach unten verlassen, so dass die maximale Abschaltdauer auf ca. 20 Stunden (um 3:00 Uhr) begrenzt ist. Bei einer Abschaltung der Heizung um 0:00 Uhr beträgt diese sogar lediglich 4,5 Stunden. In Kombination mit der tageszeitvariablen abschaltbaren Leistung des *Büro-B* führt dies zu einer Bandbreite des Abschaltpotenzials zwischen 100 und 200 Wh/m².

Das Abschaltpotenzial des *Büro-BTA* hat am *gemäßigten* Tag sein Minimum aller sieben Typtage. Die in Kapitel 5.1.1 erläuterte Toleranz in der Regelung der BTA führt dazu, dass bei *gemäßigten* Außenbedingungen aufgrund der hohen internen Wärmequellen des Bürobetriebs lediglich zwischen 21:00 und 2:00 Uhr leicht geheizt werden muss. Daher stehen auch so gut wie keine abschaltbaren Leistungen zur Entlastung des Stromnetzes zur Verfügung.

5.2.5 Typtag warm

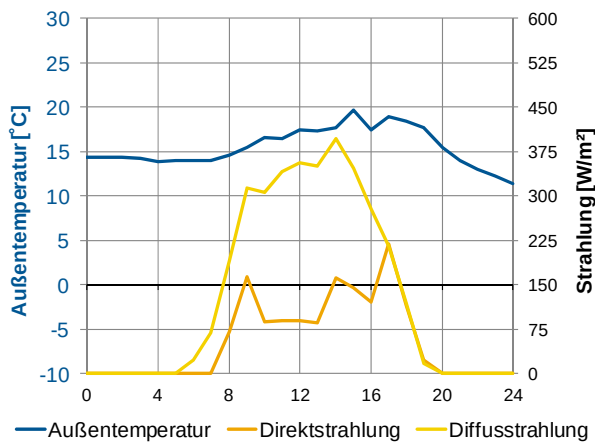


Abb. 5.27: Außenbedingungen des Typtags warm

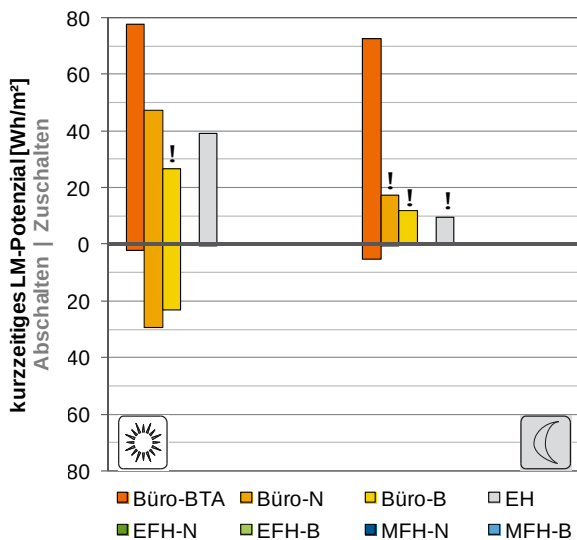


Abb. 5.28: Vergleich der Gebäudetypologien: kurzzeitiges LM-Potenzial-warm

Kurzzeitiges Lastmanagementpotenzial

Der Typtag *warm* ist der erste Fall, in dem das Lastmanagement-Potenzial für eine Gebäudekühlung untersucht wird. Da im Wohnbau keine Kühlsysteme implementiert sind, werden im Kühlfall lediglich die Gebäudemodelle *Büro* und *Einzelhandel* betrachtet.

Wie bereits in Kapitel 5.1.3 dargestellt, wird für den Kühlfall eine höhere Behaglichkeitstemperatur für die jeweiligen Gebäudemodelle definiert.

Hier liegt nun der Fall vor, dass bei einer Zuschaltung von Kühlleistung die Raumtemperatur sinkt und der Zeitraum bis zum Erreichen der unteren Behaglichkeitsgrenze betrachtet wird. Bei einer Abschaltung des Kühlsystems wird die Dauer berücksichtigt, bis interne Wärmelasten und solare Einstrahlung zu einer Erwärmung der operativen Raumtemperatur über den oberen Grenzwert führen.

Die Außenbedingungen des *warmen* Typtags führen zu einem langsamen Temperaturanstieg, so dass die Abschaltdauern bei den vier betrachteten Gebäudetypologien durchgehend über 26 Stunden liegen. Zwar erreicht die Diffusstrahlung im Tagesverlauf durchaus hohe Werte, die erstmals 350 W/m^2 übersteigen, die Direktstrahlung erreicht jedoch noch nicht die Intensität eines *heißen* Sommertags und die Außentemperatur bleibt unter 20°C . Selbst bei dem gut gedämmten *Büro-Neubau*-Modell steigt daher die operative Temperatur nach Abschaltung der Kühlung auf maximal $25,7^\circ\text{C}$, im Bestandsmodell liegt sie sogar ein halbes Kelvin darunter. In den Nachtstunden ist in diesen beiden Gebäudetypologien keine Kühlung notwendig. Die Kühlleistung am Tag liegt im Durchschnitt bei 15 bzw. 10 W/m^2 , was zu einem moderaten Abschaltpotenzial führt.

Der geringfügige Kühlbedarf ermöglicht das kurzzeitige Zuschalten hoher Kühllasten. Da die Kühlsysteme nach der maximalen Kühllast ausgelegt werden, stehen in der Nacht bei allen vier Gebäudetypologien zuschaltbare Leistungen von rund 40 W/m^2 zur Verfügung (vergleiche Auslegung der Modelle in Kapitel 5). Da hier die Dauern bis zur Unterschreitung der Komforttemperatur sehr kurz sind, meist unter einer halben Stunde, stehen nachts nur geringe Zuschaltpotenziale zur Verfügung. Tagsüber ermöglichen die internen Wärmelasten und solare Gewinne ein längeres Betreiben der Kühlsysteme unter

Vollast, so dass lediglich im *Büro-B* die Kurzzeitbetrachtung von 2 Stunden unterschritten wird. Die resultierenden Zuschaltpotenziale liegen über 25 Wh/m^2 und können zu einer Entlastung des Netzes, beispielsweise bei hoher Einspeisung von Photovoltaik-Strom, beitragen.

Beim Modell des *Einzelhandels* fällt auf, dass keinerlei Kühlleistung benötigt wird. Dies liegt vor allem an dem hohen Luftwechsel in Kombination mit Außentemperaturen um 15°C , was zu einer natürlichen Kühlung des Raumes beiträgt.

Die Regelung der trägen BTA toleriert höhere Abweichungen von der Komforttemperatur. Hier wird lediglich zwischen 5:00 und 8:00 Uhr die Gebäudemasse vorgekühlt, was zu einem vernachlässigbaren Abschaltpotenzial führt. Die Auslegungsleistung von 40 W/m^2 kann, mit Ausnahme dieser dreistündigen Betriebszeit, zu jeder Zeit des Tages für Dauern zwischen 5 und 15 Stunden zugeschaltet werden. Das auf 2 Stunden begrenzte Zuschaltpotenzial beträgt daher fast durchgängig 80 Wh/m^2 . Da die Betriebszeit der Vorkühlung sowohl in die Segmentierung von Tag als auch Nacht fällt, reduziert sich das durchschnittliche Zuschaltpotenzial in beiden Fällen auf knapp unter 80 Wh/m^2 .

Langzeitpotenzial

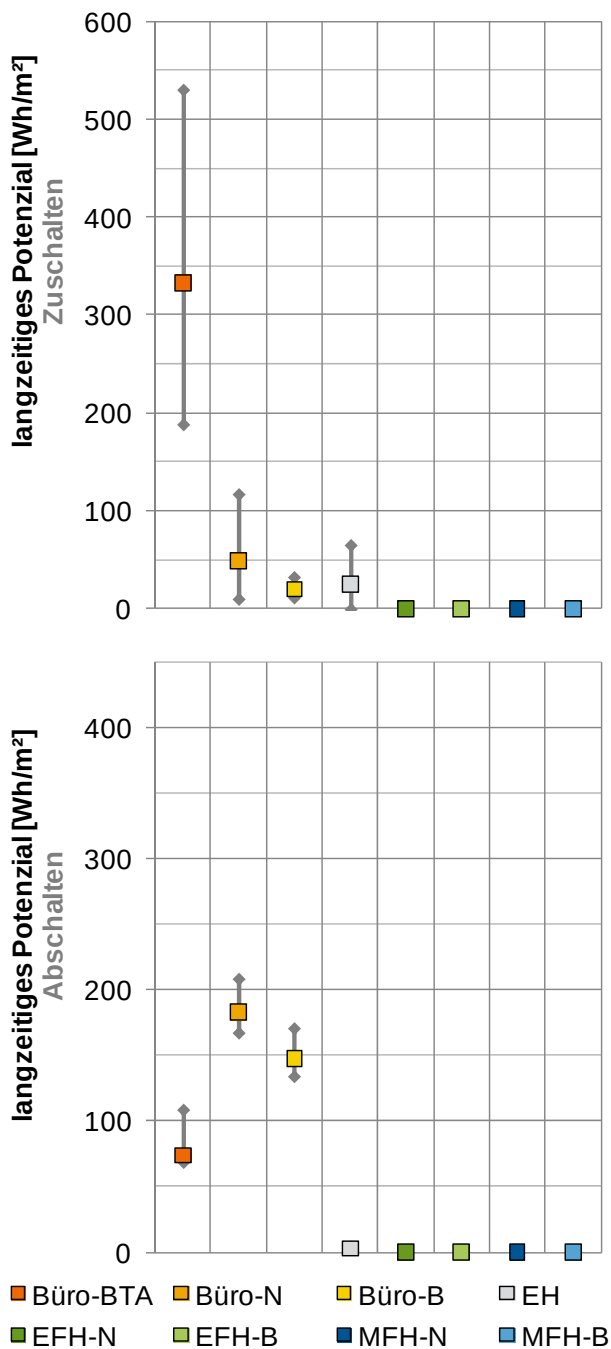


Abb. 5.29: Vergleich der Gebäudetypologien: maximales Langzeit-Potenzial- warm

Das sehr hohe Zuschaltpotenzial des *Büro-BTA* lässt sich mit den Erläuterungen des letzten Absatzes der Kurzzeitbetrachtung erklären. Das träge Kälteübergabesystem erlaubt sehr lange Zuschaltdauern und die warmen Außenbedingungen ermöglichen zuschaltbare Leistungen die fast durchgängig der Auslegungsleistung entsprechen. Die Integration führt zu einem langzeitigen Zuschaltpotenzial zwischen ca. 200 und 540 Wh/m². Die Zuschaltpotenziale der anderen drei Nicht-Wohnbau-Modelle sind aufgrund der schnellen Abkühlung Raumluft und damit dem frühen Verlassen der Behaglichkeitsgrenzen vernachlässigbar gering.

Wie bereits bei der Kurzzeit-Betrachtung erklärt wurde, benötigt der *Einzelhandel* an einem warmen Typtag keine zusätzliche Kühlleistung, daher steht auch hier kein Abschaltpotenzial zur Verfügung.

Auch der Kühlbedarf des *Büro-N* und *Büro-B* ist sehr gering und nachts sogar Null. Trotzdem besteht aufgrund der sehr langen Abschaltdauern, die durchgehend über 26 Stunden liegen, die Möglichkeit eines Lastmanagements. Durch sehr lange Abschaltmaßnahmen kann das Stromnetz um mindestens 135 Wh/m² im Bestand und zwischen 160 und 210 Wh/m² im *Büro-Neubau* entlastet werden.

5.2.6 Typtag *heiß*

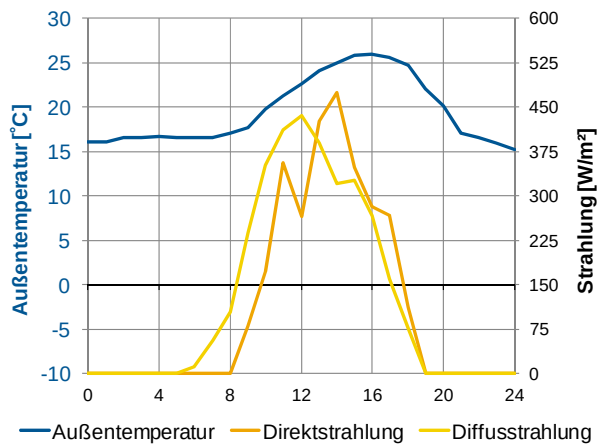
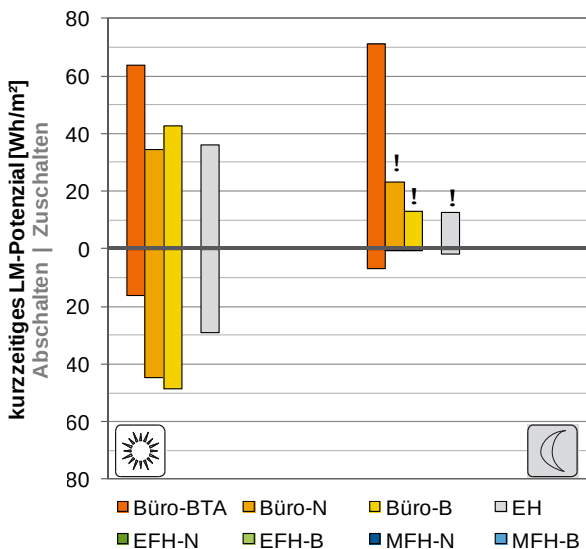
Abb. 5.30: Außenbedingungen des Typtags *heiß*

Abb. 5.31: Vergleich der Gebäudetypologien: kurzzeitiges LM-Potenzial-heiß

Kurzzeitiges Lastmanagementpotenzial

Die Außenbedingungen des Typtags *heiß* weisen durchgehend Temperaturen über 15 °C auf. Die hohen Werte der diffusen und direkten Solarstrahlung verstärken den Unterschied zwischen den Tag- und Nachtpotenzialen. Allerdings sei hier darauf hingewiesen, dass die drei *Büro*-Gebäudemodelle mit einem außenliegenden steuerbaren Sonnenschutz modelliert wurden. Daher ist bei diesen Modellen zu beobachten, dass die internen Wärmelasten durch solare Einstrahlung in den Morgenstunden ansteigen, bei Überschreiten des Grenzwertes zur Aktivierung des Sonnenschutzes jedoch durch die Verschattung wieder sinken können.

Nacht

Zusammenfassend kann, aufgrund des fehlenden Kühlbedarfs, das kurzzeitige Abschaltpotenzial in der Nacht als vernachlässigbar betrachtet werden. Die geringen Zuschaltpotenziale in der Nacht (mit Ausnahme des Sonderfalls BTA) sind begründet durch die kurzen Zuschaltdauern, die unter einer Stunde liegen.

Tag

In den Stunden zwischen 8:00 und 20:00 Uhr stehen im Nichtwohnbau sowohl hohe Zu- wie auch Abschaltpotenziale zur Verfügung. Zur Kühlung der *Büros* wird tagsüber etwa die halbe Auslegungsleistung benötigt. Hier können Leistungen von rund 20 W/m² für etwa 5 Stunden zugeschaltet und über 10 Stunden abgeschaltet werden. Da bei der Kurzzeitbetrachtung nur LM-Dauern bis zu 2 Stunden betrachtet werden sind die Ab- und Zuschaltpotenziale etwa gleich groß. Die Summe aus Abschalt- und Zuschaltpotenzial, als Maß für die Flexibilität, ist beim *Büro-B* Modell mit ca. 90 Wh/m² beachtlich hoch.

Auch im Modell des *Einzelhandels* sind das kurzzeitige Ab- und Zuschaltpotenzial vergleichbar groß und betragen im Tagesmittel in beiden Fällen etwa 30 Wh/m².

An einem Sommertag mit *heißen* Außenbedingungen besteht ein hohes Potenzial, durch Ab- oder Zuschalten von Kühlsystemen, sowohl Lastspitzen als auch Erzeugungsspitzen im Stromnetz kurzzeitig auszugleichen.

Langzeitpotenzial

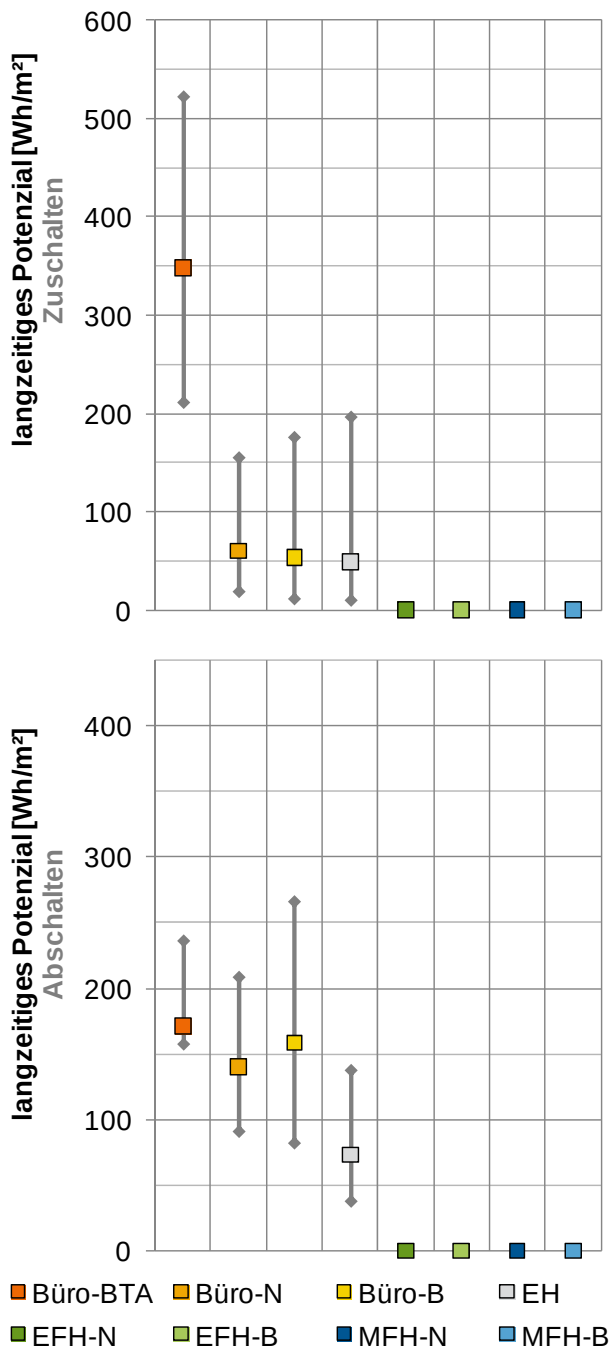


Abb. 5.32: Vergleich der Gebäudetypologien: maximales Langzeit-Potenzial- heiß

Die großen Unterschiede zwischen Tag und Nacht werden auch in der Langzeitbetrachtung deutlich, erkennbar an der großen Spanne zwischen minimalem und maximalem Potenzial.

Im 24 h-Mittel steht im Nichtwohnbau ein Zuschaltpotenzial von etwa 50 Wh/m² zur Verfügung. Die Abschalt-dauern liegen mit 5 bis 15 Stunden deutlich höher als die Zuschaltdauern (die in der Nacht vernachlässigbar kurz sind und tagsüber im Mittel etwa 5 Stunden betragen). Bei beiden Büro-Modellen kann daher im Mittel dreimal mehr Energie abgeschaltet als zugeschaltet werden.

Das langfristige Abschaltpotenzial des *Einzelhandels* ist mit einem Mittelwert von ca. 70 Wh/m² etwa halb so groß wie das der Büro-Modelle. Auch die Spanne zwischen Tagesminimal- wie Maximalwert fällt geringer aus. Gerade in den Nachtstunden ist das Abschaltpotenzial gering, da hier kein Kühlbedarf vorliegt. Die Zeiten mit Kühlbetrieb liegen am heißen Tag nur zwischen 12:00 und 21:00 Uhr. Zum Vergleich: Beim Büro-N wird die Kühlung bereits sechs Stunden früher in Betrieb genommen. Allerdings läuft diese hier in den Morgenstunden mit einer geringeren Leistung, so dass der spezifische Kühlbedarf des Büro-N nur knapp 20% höher als der des Einzelhandel-Modells ist. Der Hauptgrund für das geringere Abschaltpotenzial ist die im Mittel ca. 2,5 Stunden kürzere Abschaltdauer des Einzelhandel-Modells gegenüber dem Büro-N. Die Temperatur steigt im Einzelhandel schneller an, als im Büro-Modell. Dies lässt sich mit den höheren Wärmelasten durch Personen (gerade zu Spitzenzeiten in den Abendstunden) und Beleuchtung (die im EH durchgängig von 8:00-20:00 Uhr angeschaltet ist) begründen. Die Raumtemperaturerhöhung wird im Einzelhandel jedoch durch den hohen Luftwechsel und durch die abgebildeten Kühlregale gedämpft, so dass die Abschaltdauern zwischen 3 und 22 Stunden liegen.

5.2.7 Typtag sehr heiß

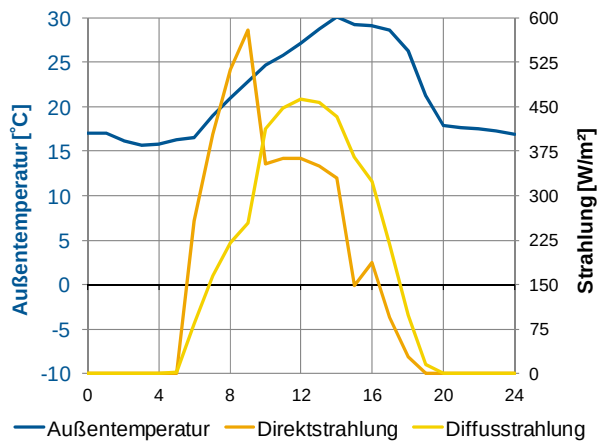


Abb. 5.33: Außenbedingungen des Typtags sehr heiß

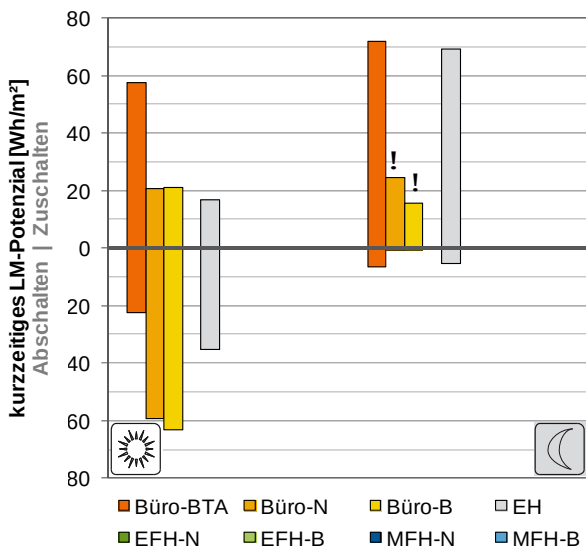


Abb. 5.34: Vergleich der Gebäudetypologien: kurzzeitiges LM-Potenzial-sehr heiß

Kurzzeitiges Lastmanagementpotenzial

Der Typtag *sehr heiß* repräsentiert einen Sommertag mit sehr hoher Einstrahlung (mit Spitzen der Direktstrahlung über 500 W/m^2) und einer Durchschnittstemperatur von etwa 22°C . Dies führt zu einem sehr hohen Kühlbedarf in den Tagstunden. Da die Auslegung des Kältesystems allerdings für die Kühllast mit höherer Temperatur und Einstrahlung erfolgt, steht auch zur Tageszeit des *sehr heißen* Typtags eine (geringfügige) zuschaltbare Leistung zur Verfügung.

Zuschalten

Die kurzzeitigen Zuschaltpotenziale von *Büro-N* und *Büro-B* sind zur Tageszeit in etwa gleich. Bei beiden Modellen ist eine Zuschaltdauer über 2 Stunden möglich. Die höhere Auslegungsleistung des Bestands wird durch geringere Dämmung ausgeglichen, so dass beide Gebäudemodelle die gleiche zuschaltbare Leistung aufweisen.

In der Nacht ist bei *Büro-N* und *Büro-B* nur ein kurzzeitiges Zuschalten der maximalen Kühlleistung möglich (höchstens für eine dreiviertel Stunde). Dementsprechend gering sind auch die Zuschaltpotenziale.

Besonderes Augenmerk soll hier auf das Modell des *Einzelhandels* gelegt werden. Dies weist ein sehr hohes Zuschaltpotenzial in der Nacht von 70 Wh/m^2 auf. Im Vergleich mit den Typtagen *warm* und *heiß* nimmt die zuschaltbare Leistung am *sehr heißen* Tag leicht ab. Der Anstieg des Zuschaltpotenzials bei höheren Außentemperaturen liegt in der steigenden Zuschaltdauer begründet. Diese liegt bei den anderen beiden Sommertagen unterhalb von einer halben Stunde, am *sehr heißen* Typtag jedoch durchgängig bei mindestens 1,5 Stunden, im nächtlichen Durchschnitt (aufgrund einer Spitze um 6:00 Uhr) sogar über 3 Stunden.

Aufgrund der hohen Wärmelasten entsteht ein sehr hoher Kühlbedarf. Zwischen 15:00 und 18:00 Uhr wird sogar die volle Auslegungsleistung zur Konditionierung auf die Komforttemperatur von 23°C benötigt. Die zuschaltbare Leistung fällt entsprechend gering aus, was zu einem geringen Zuschaltpotenzial am Tag führt. Aber selbst in den eben erwähnten Nachmittagsstunden mit maximalem Kühlbedarf kann das Kältesystem für mindestens eine dreiviertel Stunde vollständig abgeschaltet werden ohne das Komfortband zu verlassen. Daher kann

der *Einzelhandel* tagsüber dazu beitragen, das Stromnetz sowohl positiv wie negativ zu entlasten.

Abschalten

Die größte Entlastung des Stromnetzes kann durch Abschalten der Kühlung am Tag im *Büro-Bestandsmodell* erfolgen. Hier wird am Nachmittag fast die komplette Auslegungsleistung zum Kühlen auf Komforttemperatur benötigt. Das Zulassen einer Erwärmung der Raumtemperatur bis 26 °C erlaubt eine Abschaltung am Tag von durchschnittlich 9 Stunden. Die Abschaltdauer schwankt dabei zwischen einer Stunde kurz vor Spitzenlast um 14:00 Uhr bis zu 21 Stunden nach Überschreitung dieses Maximalpunktes. Das Durchschnittspotenzial am Tag kann mit ca. 60 Wh/m² betrachtet werden. Das kurzzeitige Abschaltpotenzial des *Büro-Neubaumodells* ist vergleichbar hoch.

Langzeitpotenzial

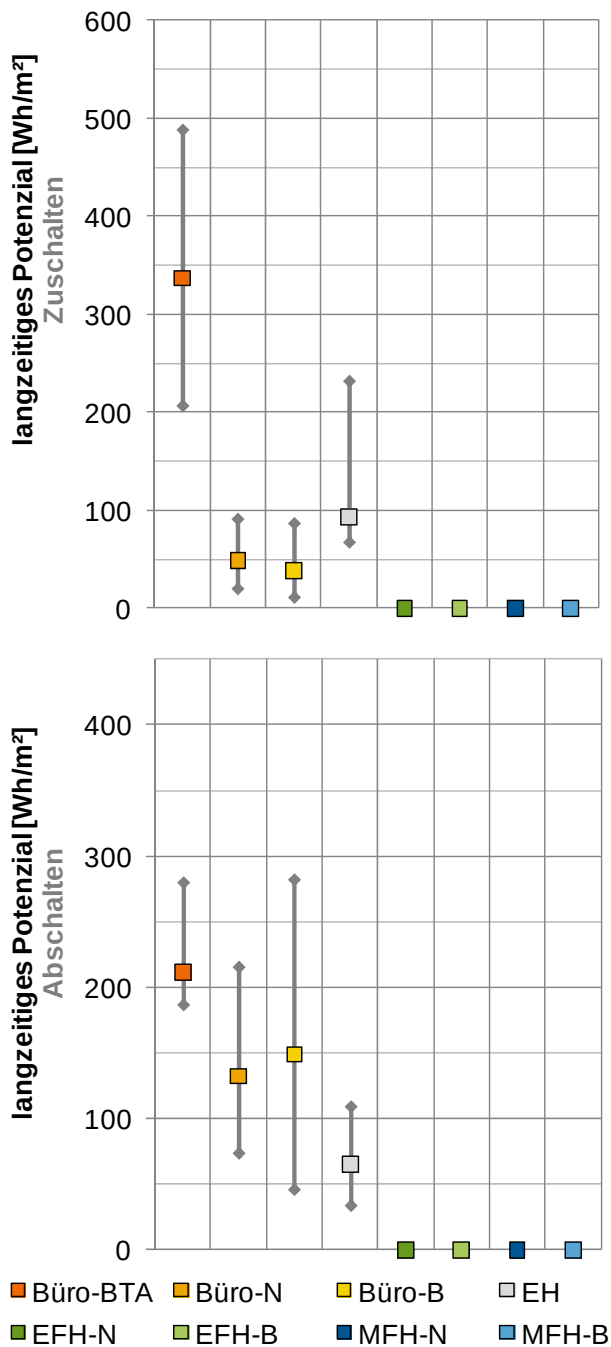


Abb. 5.35: Vergleich der Gebäudetypologien: maximales Langzeit-Potenzial- sehr heiß

Zuschalten

Der hohe Maximalwert des Zuschaltpotenzials des *Einzelhandel*-Modells ergibt sich durch eine „Spitze“ der Zuschaltdauer um 6:00 Uhr, die zu einem Zeitpunkt ohne Kühlbedarf vorliegt. Daher können hier bis zu 230 Wh/m² zugeschaltet werden. Im 24-Stunden Durchschnitt liegt das Langzeit-Zuschaltpotenzial des *Einzelhandels* bei etwa 100 Wh/m².

Die Spanne des Zuschaltpotenzials der Gebäudemodelle *Büro-N* und *Büro-B* fällt deutlich schmäler aus und liegt zwischen 10 und 90 Wh/m² und im Mittel bei 50 bzw. 40 Wh/m².

Das größte Potenzial weist - mit Abstand - das Büro-BTA auf. Hier kommt wie bereits beschrieben die Trägheit der aktivierbaren Speichermasse zum Tragen.

Abschalten

Die beim Kurzzeitpotenzial beschriebenen Schwankungen der maximal möglichen Abschaltdauer der *Büro*-Modelle von 1 bis 21 Stunden führen zu einer hohen Schwankungsbreite bei der Langzeitbetrachtung. Im *Büro Bestand* beträgt der Unterschied zwischen minimalem und maximalem Abschaltpotenzial sogar 240 Wh/m². Der Mittelwert in einer 24 h Betrachtung liegt bei beiden *Büro*-Modellen knapp unter 150 Wh/m². Die höchsten langzeitigen Abschaltpotenziale liegen am Nachmittag bis in die Abendstunden vor. Damit können *Büro*-Gebäude an einem *sehr heißen* Typtag gut dazu dienen, das Stromnetz bei einem Wegfall fluktuierender Einspeisung (beispielsweise bei starker Bewölkung) durch Abschalten der Kühlsysteme zu entlasten.

5.3 Typtagbasierte Zusammenfassung

5.3.1 Gebäudekatalog

Dieses Kapitel dient der Zusammenfassung der Ergebnisse der Potenzialbestimmung aller acht Gebäudemodelle. Dazu wird ein typtagspezifischer Gebäudekatalog erstellt. In diesem erfolgt eine qualitative Bewertung des kurzzeitigen (auf 2h begrenzten) LM-Potenzials.

Entsprechend den Vergleichsgrafiken in Kapitel 5.2 werden auch bei den Gebäudekatalogen Ab- und Zuschalten jeweils am Tag und bei Nacht einzeln bewertet.

Die Bewertung erfolgt zwischen „gering“, bei einem errechneten Potenzial bis zu 10 Wh/m^2 , und „sehr hoch“ über 50 Wh/m^2 . Die Bewertungsgrenzwerte sind in Tab. 5.8 dargestellt.

Tab. 5.8: Bewertung der Kurzzeitpotenziale

Bewertung	Symbol	Grenzwert [Wh/m ²]
gering	-	bis 10
bedingt	o	bis 25
hoch	+	bis 50
sehr hoch	++	über 50

Der Gebäudekatalog soll sowohl einem Gebäude- wie auch einem Stromnetzbetreiber eine schnelle Übersicht geeigneter LM-Maßnahmen ermöglichen. Hier soll beispielhaft der Anwendungsfall für einen Netzbetreiber erläutert werden. Dieser kann anhand der Wetterprognose feststellen, dass am folgenden Tag z.B. die Außenbedingungen eines *sehr kalten* Typtags vorliegen werden. Anhand seines Kraftwerksparks kann der Netzbetreiber damit eine Prognose für den Verlauf der tageszeitabhängigen Stromerzeugung treffen.

Ein Abgleich mit dem zu erwartenden Verbrauch zeigt mögliche Erzeugungsüberschüsse oder Zeiten von Stromknappheit. Diese können mit dem Gebäudekatalog des *sehr kalten* Typtags in Abb. 5.36 verglichen werden, um passende LM-Maßnahmen im Gebäudebereich zu finden.

Wird beispielsweise für den kommenden Tag eine Wolkenfront prognostiziert, die zu einem Einbruch der Photovoltaik-Erzeugung führt, kann der Netzbetreiber gezielt die *Einfamilienhaus-Neubauten* in seinem Netz ansprechen, um eine Abschaltmaßnahme deren elektrischer Heizung am Tag einzuleiten.

Bei dem gegensätzlichen Fall, dass tagsüber mit Stromüberschuss zu rechnen ist und nachts mit Einspeisungstälern, kann der Netzbetreiber anhand des Gebäudekatalogs die am besten geeigneten Gebäude für eine Entlastung des Stromnetzes bestimmen. So können in diesem Fall die eingebundenen *Büro-Neubauten* am Tag vor-konditioniert werden, so dass deren elektrische Heizsysteme während der Nacht vorübergehend abgeschaltet werden können. Eine derart gezielte Lastmanagementmaßnahme kann zur Integration erneuerbarer Energien beitragen und die Betriebsstunden von Reservekraftwerken reduzieren.

Der Gebäudekatalog des *sehr kalten* Typtags ist in Abb. 5.36 dargestellt. Hier können zwei Zuschaltpotenziale und vier Abschaltpotenziale mit „sehr hoch“ bewertet werden, da die entsprechenden Berechnungen einen Wert von über 50 Wh/m^2 ergeben haben (vgl. auch Abb. 5.13).

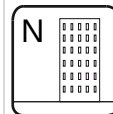
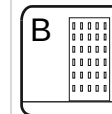
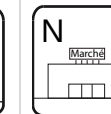
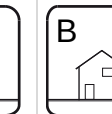
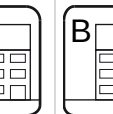
sehr kalt 	 Büro BTA Neubau	 Büro Neubau	 Büro Bestand	 Einzelhandel Neubau	 Einfamilienh. Neubau	 Einfamilienh. Bestand	 Mehrfam. Neubau	 Mehrfam. Bestand
Zuschalten Tag 	+	++	++	0	-	-	0	0
Zuschalten Nacht 	+	0	+	+	-	-	0	0
Abschalten Tag 	+	0	+	0	++	0	+	-
Abschalten Nacht 	++	++	0	0	++	0	+	-

Abb. 5.36: Vergleich der Gebäudetypologien hinsichtlich ihres Kurzzeitpotenzials am Typtag *sehr kalt*

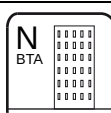
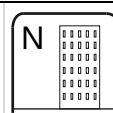
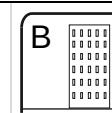
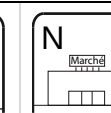
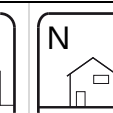
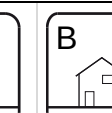
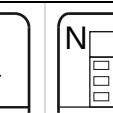
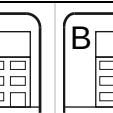
kalt 	 Büro BTA Neubau	 Büro Neubau	 Büro Bestand	 Einzelhandel Neubau	 Einfamilienh. Neubau	 Einfamilienh. Bestand	 Mehrfam. Neubau	 Mehrfam. Bestand
Zuschalten Tag 	+	+	+	0	+	+	0	+
Zuschalten Nacht 	+	+	++	0	0	+	0	+
Abschalten Tag 	0	-	+	0	+	0	0	0
Abschalten Nacht 	+	+	+	0	+	0	0	0

Abb. 5.37: Vergleich der Gebäudetypologien hinsichtlich ihres Kurzzeitpotenzials am Typtag *kalt*

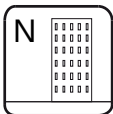
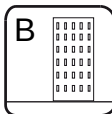
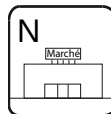
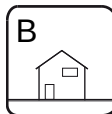
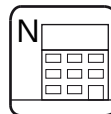
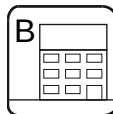
kühl 	 Büro BTA Neubau	 Büro Neubau	 Büro Bestand	 Einzelhandel Neubau	 Einfamilienh. Neubau	 Einfamilienh. Bestand	 Mehrfam. Neubau	 Mehrfam. Bestand
Zuschalten Tag 	++	+	+	0	+	++	+	++
Zuschalten Nacht 	+	+	++	0	+	+	+	+
Abschalten Tag 	-	-	0	+	+	0	0	+
Abschalten Nacht 	+	+	++	+	+	0	0	+

Abb. 5.38: Vergleich der Gebäudetypologien hinsichtlich ihres Kurzzeitpotenzials am Typtag *kühl*

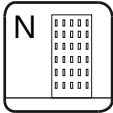
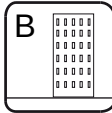
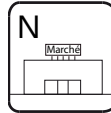
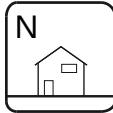
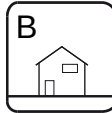
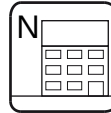
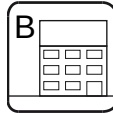
gemäßigt 	 Büro BTA Neubau	 Büro Neubau	 Büro Bestand	 Einzelhandel Neubau	 Einfamilienh. Neubau	 Einfamilienh. Bestand	 Mehrfam. Neubau	 Mehrfam. Bestand
Zuschalten Tag 	++	0	0	0	0	0	+	+
Zuschalten Nacht 	++	++	+	0	0	+	+	++
Abschalten Tag 	-	-	-	-	-	+	-	0
Abschalten Nacht 	0	0	+	0	0	+	-	0

Abb. 5.39: Vergleich der Gebäudetypologien hinsichtlich ihres Kurzzeitpotenzials am Typtag *gemäßigt*

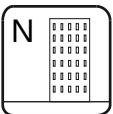
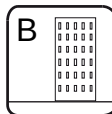
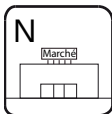
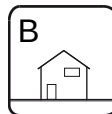
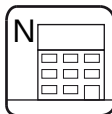
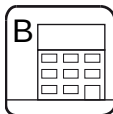
warm 	 Büro BTA Neubau	 Büro Neubau	 Büro Bestand	 Einzelhandel Neubau	 Einfamilienh. Neubau	 Einfamilienh. Bestand	 Mehrfam. Neubau	 Mehrfam. Bestand
Zuschalten Tag 	++	+	+	+	-	-	-	-
Zuschalten Nacht 	++	0	0	-	-	-	-	-
Abschalten Tag 	-	+	0	-	-	-	-	-
Abschalten Nacht 	-	-	-	-	-	-	-	-

Abb. 5.40: Vergleich der Gebäudetypologien hinsichtlich ihres Kurzzeitpotenzials am Typtag *warm*

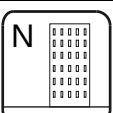
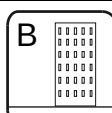
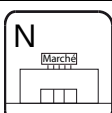
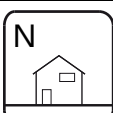
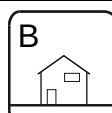
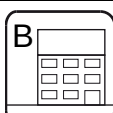
heiß 	 Büro BTA Neubau	 Büro Neubau	 Büro Bestand	 Einzelhandel Neubau	 Einfamilienh. Neubau	 Einfamilienh. Bestand	 Mehrfam. Neubau	 Mehrfam. Bestand
Zuschalten Tag 	++	+	+	+	-	-	-	-
Zuschalten Nacht 	++	0	0	0	-	-	-	-
Abschalten Tag 	0	+	+	+	-	-	-	-
Abschalten Nacht 	-	-	-	-	-	-	-	-

Abb. 5.41: Vergleich der Gebäudetypologien hinsichtlich ihres Kurzzeitpotenzials am Typtag *heiß*

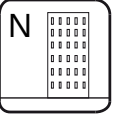
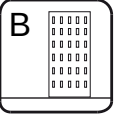
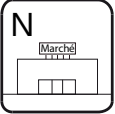
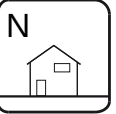
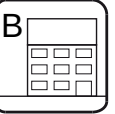
sehr heiß 	 Büro BTA Neubau	 Büro Neubau	 Büro Bestand	 Einzelhandel Neubau	 Einfamilienh. Neubau	 Einfamilienh. Bestand	 Mehrfam. Neubau	 Mehrfam. Bestand
Zuschalten Tag  	++	0	0	0	-	-	-	-
Zuschalten Nacht  	++	0	0	++	-	-	-	-
Abschalten Tag  	0	++	++	+	-	-	-	-
Abschalten Nacht  	-	-	-	-	-	-	-	-

Abb. 5.42: Vergleich der Gebäudetypologien hinsichtlich ihres Kurzzeitpotenzials am Typtag *sehr heiß*

Gebäudespezifische Zusammenfassung

In diesem Kapitelabschnitt werden die Ergebnisse der Potenzialberechnung noch weiter zusammengefasst. In der folgenden Abb. 5.43 ist eine Übersicht der Potenziale aller Typtage in einem einzigen Gebäudekatalog gezeigt. Dazu werden lediglich die Gebäudemodelle abgebildet, die an dem jeweiligen Typtag (Ab- oder Zuschalten bei Tag oder Nacht) ein „hohes“ und „sehr hohes“ Lastmanagementpotenzial aufweisen. Gebäudemodelle mit

einem „hohen“ Potenzial (zwischen 25 und 50 Wh/m²) werden ausgegraut dargestellt.

Dieser Gebäudekatalog ermöglicht einem Netzbetreiber eine schnelle Übersicht, welche Gebäude unter welchen Außenbedingungen am besten für Abschalt- bzw. Zuschaltmaßnahmen geeignet sind. Die Übersicht fasst die Erkenntnisse aus Kapitel 5.2 zusammen.

	sehr heiß	heiß	warm	gemäßigt	kühl	kalt	sehr kalt
Zuschalten Tag 		 	 	 	 	 	 
Zuschalten Nacht 	 			 	 	 	 
Abschalten Tag 	 	 			 	 	 
Abschalten Nacht 				 	 	 	 

Abb. 5.43: Gebäudekatalog mit den typtagabhängig am besten und gut geeigneten Gebäudemodellen

5.3.2 Monatsweise LM-Betrachtung

Die vorangegangene typtagbasierte Berechnung basiert auf ausgewählten realen Tages-Wetterdaten. Diese können zu einer Hochrechnung des LM-Potenzials im Jahresverlauf erweitert werden. Dazu werden die untersuchten Typtage den Monaten zugewiesen und deren Tageswerte entsprechend ihrer Häufigkeit zu einem Monats-Potenzial addiert. So beinhaltet beispielsweise der Januar des Testreferenzjahres 7 *sehr kalte*, 7 *kalte*, 15 *kühle* und nur 2 *gemäßigte* Typtage. Die Addition zu einem Monatspotenzial erfolgt unter der Randbedingung, dass an jedem Tag und in jeder Nacht eine kurzzeitige (max. 2h) LM-Maßnahme eingeleitet wird. Abb. 5.44 zeigt die Monatspotenziale für die drei Bestands-Gebäudemodelle *Büro-B*, *EFH-B* und *MFH-B*. Hier wird der Einfluss der Jahreszeiten auf die verschiedenartigen Gebäudetypologien deutlich erkennbar. Charakteristisch ist das voneinander abweichende Potenzial in den Sommermonaten. Während im Wohnbau keine Kühlpotenziale erschlossen werden können, führt der Kühlbetrieb im Büromodell zu hohen Zu- und Abschaltpotenzialen. Die ausgewiesenen LM-Potenziale im Juni beinhalten sowohl Kühl- als auch Heizfälle. Die statistische Auswertung des Testreferenzjahres weist für einen repräsentativen Monat Juni auch 7 Tage mit milden Außentemperaturen bis 13 °C auf. Diese werden im Rahmen dieser Studie als *gemäßigter* Typtag klassifiziert, bei dem die Gebäudemodelle *EFH-B* und *MFH-B* zur Einhaltung der Komforttemperatur einen messbaren Heizbedarf aufweisen. Dieser Umstand führt dazu, dass auch im Wohnbau-Bestand geringe LM-Potenziale im Juni vorliegen. In der Praxis endet die Heizperiode üblicherweise im Mai, da einzelne kühlere Tage (mit Raumtemperaturen knapp unterhalb der mittleren Komforttemperatur) für gewöhnlich toleriert werden.

Die monatsweise Betrachtung unterstreicht den festgestellten starken Einfluss der internen Wärmequellen im *Nicht-Wohnbau*. Im Winter führen diese zu einem deutlich reduzierten Heizbedarf während der Nutzungszeit.

Im Sommer stellen Personen, elektrische Geräte und solare Einstrahlung zusätzliche Wärmelasten dar, die die Kühlleistung am Tag erhöhen, während nachts so gut wie kein Kühlbedarf besteht. Dies erklärt den zwischen Tag und Nacht gegensätzlichen Verlauf der LM-Potenziale beim *Büro*-Modell.

Die Jahresübersicht der Nachtstunden zeigt einen ähnlichen Verlauf der LM-Potenziale. Wobei hier quantitativ das *EFH-B* geringere spezifische LM-Potenziale gegenüber dem *Büro-B* aufweist, was auch in den Gebäudekatalogen ersichtlich ist und in der Zusammenfassung 5.4 näher erläutert wird. Während im *Büro-B* und *EFH-B* das Potenzial von Oktober bis April weitgehend konstant bleibt, können im *MFH-B* gerade in den Nachtstunden der Übergangsmonate steigende Zuschaltpotenziale erschlossen werden. Die durchweg hohen nächtlichen Zuschaltpotenziale während der Heizperiode eignen sich sehr gut für eine Vorkonditionierung der Gebäudemasse, um den Heizbedarf des Tages senken zu können. Die Jahresübersicht zeigt, dass auch in den kalten Wintermonaten in Summe Möglichkeiten für LM-Maßnahmen bestehen. Wie bereits erwähnt, kann nach einem Zuschaltvorgang die mögliche Dauer einer Abschaltung verlängert werden, was zu höheren Potenzialen einer anschließenden Abschaltmaßnahme führt. Die in dieser Studie nachgewiesenen Langzeitpotenziale mit LM-Dauern von teilweise über 20 Stunden können genutzt werden, einzeln auftretende kalte Tage durch eine Vorkonditionierung zu überbrücken um hohe Heizleistungsspitzen zu vermeiden. Allerdings sei hier darauf hingewiesen, dass in einer Kälteperiode üblicherweise mehrere sehr kalte Tage aufeinander folgen. In dieser Studie bilden daher isolierte typtagbasierte Potenziale die Basis für ein grundlegendes LM-Potenzial.

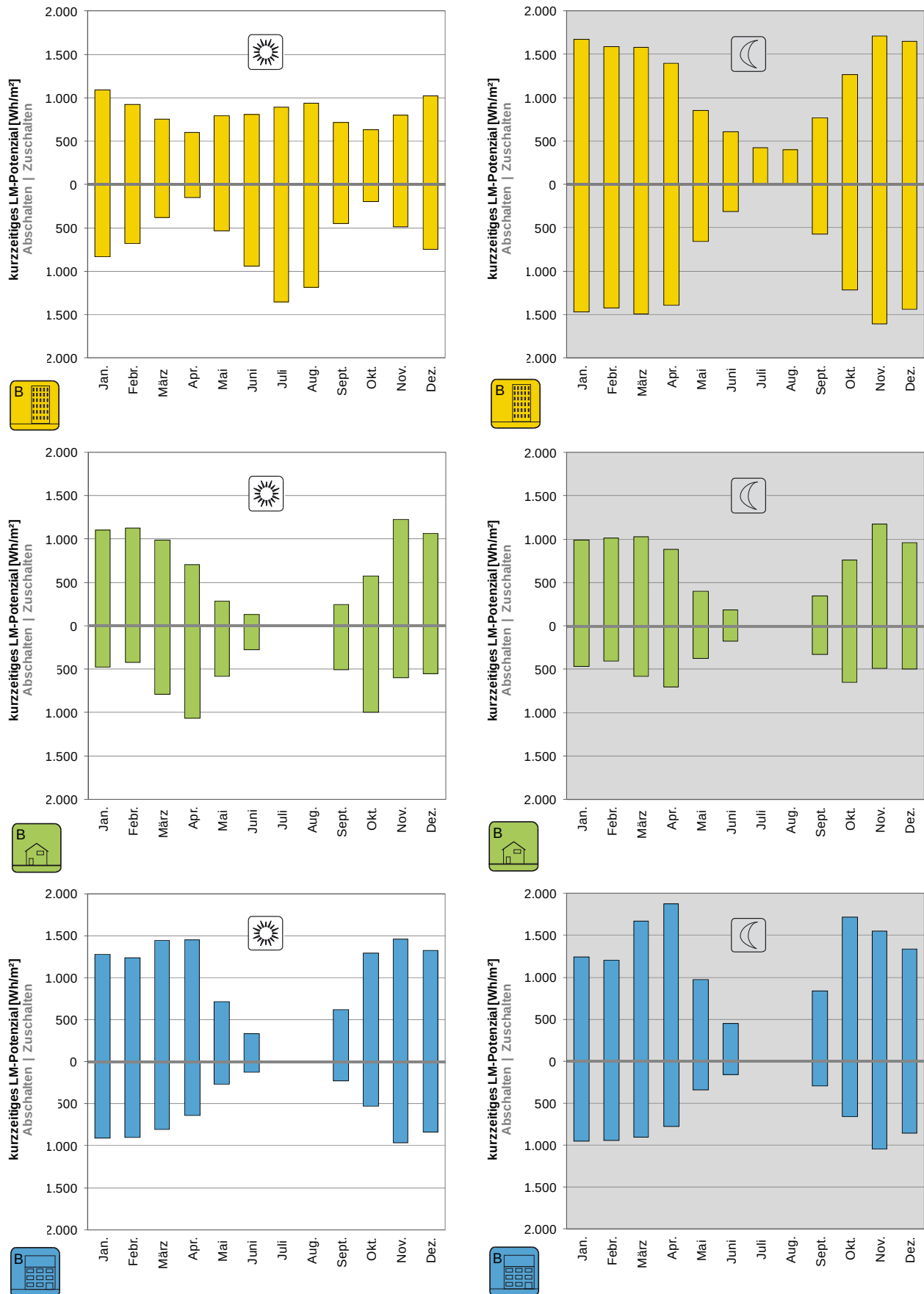


Abb. 5.44: Monatsweise LM-Betrachtung der Bestands-Gebäudemodelle Büro, Einfamilienhaus und Mehrfamilienhaus

5.4 Parameteranalyse SIM 2

In diesem Kapitel erfolgt eine Analyse von Parametern, die sich innerhalb der Bearbeitung dieser Studie als signifikant auf das Lastmanagement-Potenzial herausgestellt haben. Dazu zählen vor allem die gewählten Temperaturgrenzwerte sowie zusätzliche nutzungsbedingte Speichermassen, wie beispielsweise Büroeinrichtung oder Lagergut.

Nutzungsbedingte Speichermasse (Lagergut)

Der Einfluss zusätzlicher nutzungsbedingter Speichermassen auf das thermische Verhalten und damit die LM-Potenziale eines Gebäudes wird anhand des Gebäude-modells *Einzelhandel* untersucht. Hier ist dieser Parameter besonders relevant, da die modellierte Luftheizung sehr schnell reagiert und aufgrund der leichten Bauweise thermische Massen kaum zu einem trägen Verhalten führen.

Aufgrund der Bandbreite und Variation der repräsentierten Einzelhandelsgebäude ist es hier besonders schwierig abzuschätzen, wie hoch die Speichermasse innerhalb eines typischen Supermarktes ist. Darüber hinaus haben auch die Anordnung und damit die Oberfläche des Lagergutes sowie der Wärmeübergangswiderstand dieser nutzungsbedingten Speichermassen einen hohen Einfluss auf kurzzeitige Aufheiz- oder Auskühlvorgänge. Hierbei ist weiterhin zu beachten, dass gekühlte Ware eine Wärmesenke und somit eine negativ geladene Speichermasse darstellt. Diese wirkt beim Auskühlen des Gebäudes verstärkend, beim Aufheizen dämpfend. Die Summe dieser Argumente begründet, warum in dieser Studie nutzungsbedingte Speichermassen einheitlich in allen Gebäudemodellen nicht abgebildet wurden. Anhand der folgenden Abbildungen wird daher der Einfluss von Speichermasse abgeschätzt. Eine Detailbetrachtung kann nur für jede Gebäudetypologie einzeln erfolgen.

Die hier getroffene Variation der Speichermasse erfolgt anhand des Richtwertes aus [30] und beträgt 200 Tonnen bei einem Volumen von 100 m³. Dies entspricht etwa einem Lagergut von 330 Europaletten.

Abb. 5.45 zeigt deutlich die dämpfende Wirkung der zusätzlichen Speichermasse, beispielhaft an einem Abschalten der Heizung am *sehr kalten* Typtag. Im Fall der

Simulation eines leeren Verkaufsraumes ohne Lagergut fällt die operative Raumtemperatur innerhalb einer halben Stunde um 2 Kelvin. In der Simulation mit Speichermassen führt die deutlich höhere Wärmekapazität zu einem langsamen Abkühlen des Raumes. Anfangs erfolgt ebenfalls ein kurzes, rasches Absinken der Lufttemperatur. Da bei der Berechnung der operativen Raumtemperatur aber auch Oberflächentemperaturen und damit Strahlungswärme berücksichtigt werden, dauert es bei der Simulation mit nutzungsbedingter Speichermasse etwa 5 Stunden, bis der untere Temperaturgrenzwert unterschritten wird. Dies ermöglicht eine längere Abschaltungsdauer und damit, wie in Abb. 5.46 gezeigt, ein höheres LM-Potenzial.

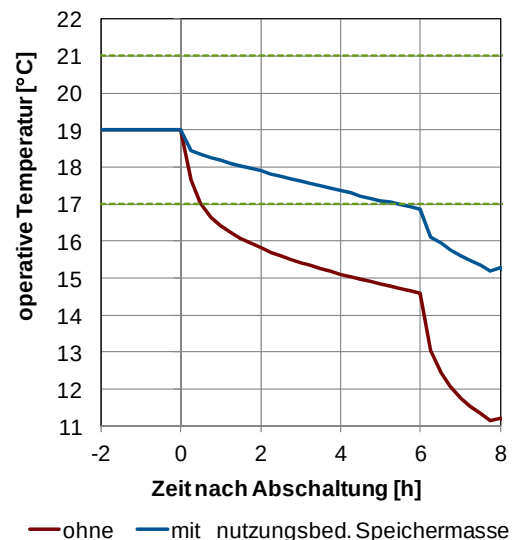


Abb. 5.45: Einfluss von nutzungsbedingter Speichermasse auf das Auskühlverhalten der Gebäudetypologie *Einzelhandel* bei einem Abschalten der Heizung um 0:00 Uhr am *sehr kalten* Typtag

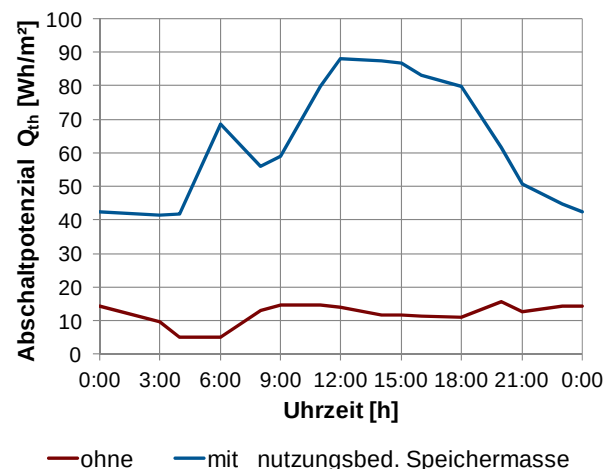


Abb. 5.46: Einfluss von nutzungsbedingter Speichermasse auf das kurzzeitige Abschaltpotenzial der Gebäudetypologie *Einzelhandel* am *sehr kalten* Typtag

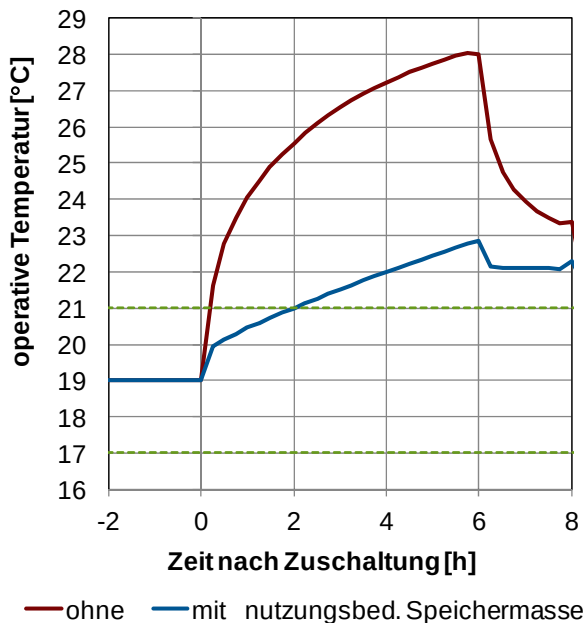


Abb. 5.47: Einfluss von nutzungsbedingter Speichermasse auf das Aufheizverhalten der Gebäudetypologie *Einzelhandel* bei einem Zuschalten der Heizung um 0:00 Uhr am *sehr kalten* Typtag

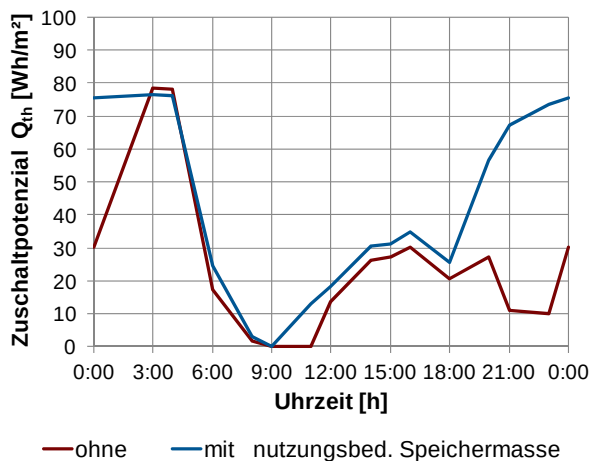


Abb. 5.48: Einfluss von nutzungsbedingter Speichermasse auf das kurzzeitige Zuschaltpotenzial der Gebäudetypologie *Einzelhandel* am *sehr kalten* Typtag

Während das Abschaltpotenzial ohne nutzungsbedingte Speichermasse über den Tagesverlauf annähernd konstant bei lediglich 10 Wh/m² liegt, hat das Lagergut nicht nur eine verstärkende Wirkung auf das LM-Potenzial, sondern führt zusätzlich zu einer stärkeren Tageszeitabhängigkeit. So liegt das kurzzeitige Abschaltpotenzial in der Nacht bei durchschnittlich 50 Wh/m² und steigt in den Tagesstunden deutlich an, auf durchschnittlich 80 Wh/m².

Diese starke Tageszeitabhängigkeit wird beim Zuschalten noch deutlicher. Abb. 5.47 zeigt das sehr schnelle

Aufheizen der Raumluft in einem leeren Verkaufsraum. Mit nutzungsbedingter Speichermasse führt die zugeführte Energie gleichzeitig zur Erwärmung des Lagergutes und daher zu einem trägeren Anstieg der operativen Temperatur. Allerdings zeigt diese Beispielgrafik ein Zuschalten der Heizung um 0:00 Uhr nachts. Tagsüber führt vor allem der hohe Luftwechsel während der Nutzungszeit zu einer schnellen Abfuhr der zugeschalteten Heizenergie. Daher erhöht die zusätzliche nutzungsbedingte Speichermasse das Zuschaltpotenzial am Tag lediglich um etwa 5 Wh/m². Demgegenüber steigt das durchschnittliche Zuschaltpotenzial in der Nacht von 35 Wh/m² auf etwa 65 Wh/m² bei Berücksichtigung des Lagergutes (s. Abb. 5.48).

Im Sommer zeigt sich der Einfluss zusätzlicher nutzungsbedingter Speichermasse noch deutlicher, da sich hier auch die maximal benötigte Kühlleistung ändert. Ohne den dämpfenden Einfluss des Lagergutes führen interne Wärmelasten und die hohe solare Einstrahlung im Sommer zu einer schnellen Erwärmung des Raumes. Um zu jedem Zeitpunkt die Behaglichkeit einhalten zu können, benötigt das Modell ohne zusätzliche Speichermasse daher eine höhere Auslegungsleistung des Kühlsystems.

Generell kann unabhängig vom untersuchten Gebäudemodell festgehalten werden, dass eine höhere Speichermasse zu einer trägeren Änderung der operativen Temperatur führt und damit das Lastmanagement-Potenzial erhöht.

Einfluss der Temperatur-Grenzen auf die LM-Dauer

Diese Studie untersucht ein flexibles Zu- und Abschalten von Heiz- und Kühlsystemen, die in einer Veränderung der operativen Raumtemperatur resultieren. Um die thermische Behaglichkeit einzuhalten, wird eine Temperaturschwankung nur innerhalb von festen Behaglichkeitsgrenzen zugelassen. In diesem Kapitel wird der Einfluss dieser Temperaturgrenzen auf das nutzbare Lastmanagementpotenzial betrachtet.

Als Beispiel wird eine Abschaltung der Heizung im *Büro-Neubau* aus dem vorangegangenen Kapitel gewählt und die Auskühlung bis 19,5 °C und 20,5 °C untersucht (s. Abb. 5.49). Durch diese Grenzwertverschiebung ändert sich auch die mögliche Lastmanagement-Dauer. Bei Zulassen von geringen Komforteinbußen durch Absen-

kung der Mindesttemperatur von $20,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ auf $19,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ kann die Heizung im Tagesdurchschnitt um ca. 1,8 h länger abgeschaltet bleiben. Bei schärferen Komfortgrenzen, bei denen die Heizung bereits bei $20,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ wieder eingeschaltet wird, reduziert sich die mittlere Abschaltdauer um etwa 1,5 h.

Besonders auffällig ist der sprunghafte Anstieg der Abschaltdauer um 6:00 Uhr. Dies kann anhand des Temperaturverlaufs (rote Linie) in Abb. 5.3 erklärt werden. Nach Abschalten der Heizung um 6:00 Uhr fällt die Lufttemperatur sehr stark ab, bevor die Gebäudemasse einen dämpfenden Einfluss aufweist und ab Beginn der Nutzungszeit die Temperatur wieder ansteigt. Der untere Wendepunkt des Temperaturverlaufs liegt um 7 Uhr bei etwa $20,3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ein reduziertes Behaglichkeitsband bis $20,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ würde demnach bereits nach 45 Minuten verlassen werden. Begründet mit der solaren Einstrahlung und internen Wärmelasten sinkt die operative Temperatur erst am späten Nachmittag ab und fällt gegen 19:00 Uhr, nach 13 h, unter die $20,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ Grenze. Hier verläuft die Auskühlkurve annähernd linear und eine verringerte Behaglichkeitsgrenze von $19,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ wird nach weiteren 1,25 h unterschritten.

Die folgenden Grafiken Abb. 5.50 und Abb. 5.51 zeigen den starken Einfluss, den die Temperaturgrenzwerte auf das mögliche LM-Potenzial haben. So würde beispielsweise das Absenken der tolerierten Mindesttemperatur um $0,5\text{ K}$ auf $19,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ das langzeitige Abschaltpotenzial im Tagesmittel um etwa 50 Wh/m^2 steigern. Demgegenüber würde eine striktere Einhaltung der Behaglichkeit durch eine auf $23,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ reduzierte Obergrenze das mögliche Zuschaltpotenzial um etwa 20 Wh/m^2 mindern.

Beim gewählten Gebäudemodell *Büro-Neubau* kann man in Abb. 5.3 erkennen, dass es beispielsweise in den kalten Morgenstunden vor Eintreffen der Personen zu einem schnellen Temperaturabfall vor einem raschen Anstieg der Temperatur kommen kann. Gerade bei einem derartigen, meist nur einmal auftretenden, Extrempunkt kann das Tolerieren eines kurzzeitigen Verlassens der Behaglichkeit zu einem deutlich erhöhten Lastmanagementpotenzial führen. In dieser Studie wird das Potenzial jedoch immer anhand der definierten Grenzen der Behaglichkeitsbereiche nach DIN EN 15251 nach Kategorie II [11, p. 29] berechnet.

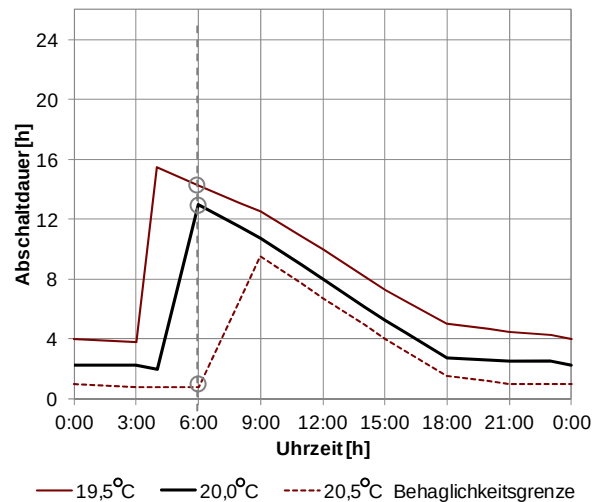


Abb. 5.49: Abschaltzeit in Abhängigkeit der unteren Behaglichkeitsgrenze (Gebäudetypologie *Büro-Neubau* am sehr kalten Typtag)

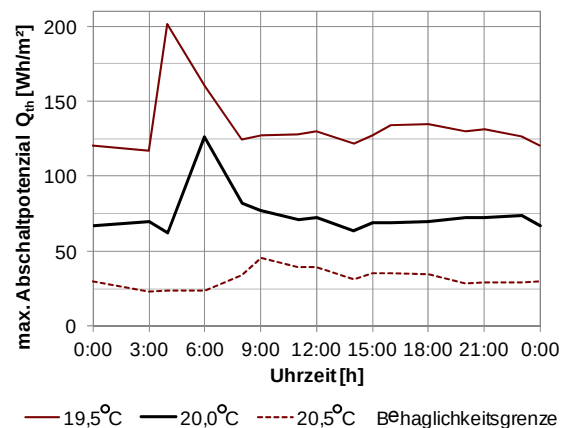


Abb. 5.50: Einfluss der unteren Behaglichkeitsgrenze auf das Langzeit-Potenzial (Gebäudetypologie *Büro-Neubau* am sehr kalten Typtag)

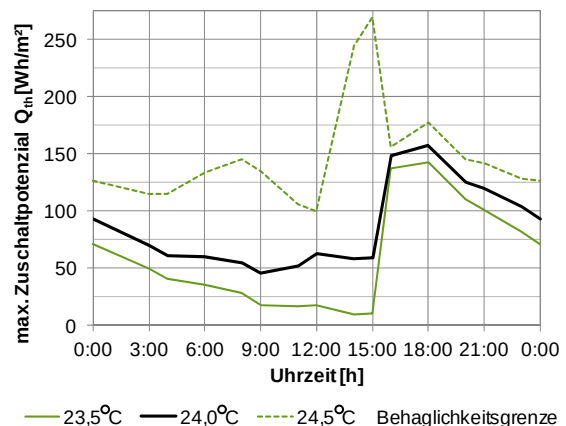


Abb. 5.51: Einfluss der oberen Behaglichkeitsgrenze auf das Langzeit-Potenzial (Gebäudetypologie *Büro-Neubau* am sehr kalten Typtag)

5.5 Fazit SIM 2

In diesem Zwischenfazit werden die zahlreichen Ergebnisse der Potenzialberechnung zusammengefasst und interpretiert. In Tab. 5.9 wird die Häufigkeit gelistet, wie oft die jeweilige Gebäudekatalog-Bewertung aus Kapitel 5.3.1 bei den 8 untersuchten Gebäudemodellen an den 7 Typtagen vorkommt (gesamt 224 Fälle). Die hohe Anzahl an „-“ Bewertungen, als Anzeichen, dass hier kein Potenzial nutzbar ist, liegt darin begründet, dass die Wohngebäudemodelle über keine Kühlsysteme verfügen und daher in der Sommerzeit (48 Fälle) nicht am Lastmanagement teilnehmen können. Wird der Wohnbau im Kühlfall nicht berücksichtigt, kann die Hälfte der betrachteten LM-Potenziale mit „hoch“ oder „sehr hoch“ bewertet werden.

Tab. 5.9: Bewertung der Kurzzeitpotenziale und deren Häufigkeit

Bewertung	Symbol	Gewichtung	Häufigkeit
gering	-	0	79
bedingt	o	1	57
hoch	+	3	62
sehr hoch	++	6	26

Die Zusammenfassung aller Bewertungen des kurzzeitigen LM-Potenzials erfolgt anhand einer Gewichtung, um eine qualitative Bewertung, z.B. „sehr hoch“, auch quantitativ zu einem Gesamtwert zusammen fassen zu können. In Tab. 5.9 ist diese Gewichtung dargestellt. Hat ein Gebäudemodell beispielsweise an einem Typtag ein „sehr hohes“ LM-Potenzial beim Zuschalten am Tag, so erhält es dafür 6 Punkte. Ein geringes Potenzial wird mit 0 Punkten gewichtet. Mit der Betrachtung der vier Fälle, Zu- und Abschalten bei Tag und bei Nacht, kann ein Gebäudemodell demnach in Summe zwischen 0 und 24

Punkte pro Typtag erhalten. Aus den drei Typtagen *sehr kalt*, *kalt* und *kühl* wird ein Durchschnittswert für den Winter gebildet. Der Mittelwert des *gemäßigten* Typtags repräsentiert die Übergangszeit und die verbleibenden drei Typtage den Sommer. Die gemittelten Tagesbewertungen der Jahreszeiten (zwischen 0 und 6 Punkten) sowie eine Summe zum Vergleich des LM-Potenzials des gesamten Jahres sind für die acht Gebäudemodelle in Tab. 5.10 zusammengefasst. Das am besten bewertete Gebäudemodell wird jeweils grün hervorgehoben, die minimale Punktebewertung in rot.

Die beste Gesamtbewertung erhält das *Büromodell mit BTA*. Hier liegt zu jeder Jahreszeit durchschnittlich ein „hohes“ LM-Potenzial vor. Die guten Ergebnisse der trägen BTA bestätigen die Ergebnisse der SIM 1 aus Kapitel 3. Durch die aktivierbare Speichermasse eignet sich die BTA besonders gut, thermische Energie zwischenspeichern um das Stromnetz zu entlasten. Eine Luftheizung, die nur eine sehr geringe effektive Eindringtiefe in die Gebäudemasse besitzt, ist für LM-Maßnahmen eher ungeeignet. Daher schneidet das Modell *Einzelhandel*, trotz moderaten Bewertungen im Sommer, in einer Jahresbetrachtung eher schlecht ab. Das Gebäudemodell mit der geringsten Punktebewertung im Jahr ist der *Mehrfamilienhaus-Neubau*. Dies ist die einzige Gebäudetypologie, die an keinem Typtag ein „sehr hohes“ LM-Potenzial erzielen kann. Dies ist vorrangig damit begründet, dass in diesem Modell ein hoher Dämmstandard sowie als Wärmeübergabesystem (WÜG) eine Radiatorheizung hinterlegt ist. Beim *EFH-N* werden bei gleichem Dämmstandard deutlich höhere Ergebnisse erzielt, da dort mit der Fußbodenheizung ein träges WÜG simuliert wird (vgl. Untersuchung des Einflusses des WÜG in Kapitel 3.3.4). Beim *MFH-B* ermöglicht die doppelt so hohe Auslegungsleistung des Heizsystems, aufgrund der höheren Wärmeverluste des geringeren Dämmstandards, höhere Zu- und Abschaltpotenziale.

Tab. 5.10: Zusammenfassende Jahreszeit-Bewertung der kurzzeitigen LM-Potenziale der untersuchten Gebäudetypologien

								
Winter	3,1	2,7	3,7	1,5	2,8	1,8	1,7	2,1
Übergangszeit	3,3	2	1,8	0,8	2,5	2,5	1,5	2,8
Sommer	3,2	1,8	1,7	1,7	0	0	0	0
Summe Jahr	9,5	6,5	7,1	3,9	5,3	4,3	3,2	4,8

Die Erkenntnisse der Potenzialberechnung werden in folgenden Stichpunkten zusammengefasst:

- *Bestands-Modelle* weisen gegenüber den *Neubau-Modellen* eine höhere spezifische Leistung aufgrund des geringeren Dämmstandards auf. Dies führt zum einen zu einer höheren abschaltbaren Leistung, zum anderen aber zu einer kürzeren Abschaltdauer.
- Der Unterschied zwischen Bestand und Neubau wird bei der Betrachtung der Langzeitpotenziale noch deutlicher als beim Kurzzeitpotenzial. Hier kann der Wert um mehr als 100% variieren.
- Das Tolerieren einer größeren Abweichung von der Komforttemperatur kann das nutzbare LM-Potenzial deutlich erhöhen (Kapitel 5.4). Oft würde durch eine LM-Maßnahme das Behaglichkeitsband nur einmal am Tag kurzzeitig verlassen werden.
- Eine Erhöhung von nutzungsbedingter Speichermasse (z.B. Lagergut) führt zur Dämpfung einer Temperaturänderung, was zu einem höheren LM-Potenzial führt (Kapitel 5.4).
- Nach einem Abschaltvorgang steigt das LM-Potenzial eines nachfolgenden Zuschaltvorgangs (und anders herum), da nun eine höhere Temperaturdifferenz zur jeweiligen Behaglichkeitsgrenze vorliegt. In dieser Studie werden die LM-Maßnahmen jedoch unabhängig voneinander untersucht (Kapitel 5.1.3).
- Bei kurzzeitigen LM-Maßnahmen nimmt die schaltbare Leistung eine übergeordnete Rolle ein. Bei Betrachtung über eine längere Zeit kann die LM-Dauer stärker zur Berechnung des LM-Potenzials beitragen (Kapitel 5.1.3). In dieser Studie liegt der Schwerpunkt auf der Bewertung von kurzzeitigen LM-Potenzialen mit einem Betrachtungszeitraum von zwei Stunden.
- **Tag-Nacht Unterscheidung:**
Bei den untersuchten Wohnbau-Modellen verteilt sich das LM-Potenzial weitgehend konstant über den Tagesverlauf. Der Unterschied zwischen Tag und Nacht beträgt bei der Kurzzeitbetrachtung weniger als 10 Wh/m².
Im Nicht-Wohnbau besteht, bedingt durch interne Wärmelasten die nur während den Nutzungszeiten vorliegen, ein hoher Unterschied zwischen Tag und Nacht. Da interne Wärmequellen dazu führen, dass die Heizleistung

tagsüber mindestens um die Hälfte reduziert werden kann, sinkt im Winter das Abschaltpotenzial am Tag gegenüber der Nacht. Die einzige Ausnahme bildet *Büro-Bestand* am *sehr kalten* Typtag. Hier führen niedrige Außentemperaturen in Kombination mit einem geringen Dämmstandard dazu, dass die benötigte Heizleistung nur vernachlässigbar kurz abgeschaltet werden kann.

- Obwohl die zuschaltbare Heizleistung der Wohnbaumodelle durchwegs geringer ausfällt, haben diese im Mittel ein höheres Zuschaltpotenzial in der Langzeitbetrachtung als die Modelle des Nicht-Wohnbaus. Hier werden die langen Zuschaltdauern im Wohnbau deutlich, die am *sehr kalten* und *kalten* Typtag über 20 Stunden betragen.
- Im Wohnbau steigen die kurzzeitigen Zuschaltpotenziale bei gemäßigteren Außentemperaturen gegenüber dem *sehr kalten* Typtag. Als Grund hierfür kann die steigende zuschaltbare Heizleistung identifiziert werden. Für den Heizfall trifft dies ebenfalls für die Büromodelle zu.
- Das höchste Langzeit-Abschaltpotenzial dieser Studie tritt am *sehr kalten* Typtag bei *Büro-BTA* auf und beträgt ca. 410 Wh/m². Das maximale Langzeit-Zuschaltpotenzial von ca. 530 Wh/m² tritt am *kühlen* Typtag ebenfalls beim Modell *Büro-BTA* auf.
- Hohe LM-Potenziale der BTA begründen sich auch mit der trägen Regelung, die eine Abweichung von der Komforttemperatur bereits beim Vorkonditionieren nötig macht (s. Kapitel 5.1.1).
- Die geringen LM-Potenziale des Gebäudemodells *Einzelhandel* liegen vor allem in den hohen Wärmeverlusten begründet. Diese entstehen durch den sehr hohen Luftwechsel während der Nutzungszeit (Kundenverkehr).
- **Kühlfall:**
Da im Wohnbau keine Kühlsysteme üblich sind, werden keine LM-Potenziale im Sommer untersucht.
Im Nicht-Wohnbau liegen keine Abschaltpotenziale in der Nacht vor, da hier kein Kühlbedarf besteht. Nachts sind im *Büro-B* und *Büro-N* nur sehr kurze Zuschaltdauern (unter 1 h) möglich. Tagsüber steigen die Zuschaltdauern jedoch deutlich an und können so das Stromnetz bei hoher PV-Einspeisung entlasten.

6. Flächengewichtetes Lastmanagementpotenzial

6.1 Vorgehensweise und Randbedingungen

Bisher wurde das flächenspezifische LM-Potenzial einzelner Gebäudemodelle [Wh/m^2] betrachtet. Hierdurch konnte ein qualitativer Vergleich der Gebäudemodelle untereinander erfolgen. In diesem Kapitel werden die Ergebnisse zu einer quantitativen Bewertung erweitert. Anhand einer vereinfachten Hochrechnung der untersuchten Gebäudemodelle des *Wohn-* und *Bürobaus* aus Kapitel 5 wird das theoretisch mögliche Potenzial des Flächenbestands in Deutschland abgeschätzt.

Die relevanten Gebäudemodelle sowie deren derzeitiges Flächenverhältnis in Deutschland sind in Abb. 6.2 dargestellt. Für die flächengewichtete Potenzialbetrachtung wird das Gebäudemodell *Büro-BTA* mit der Fläche des Gebäudemodells *Büro-Neubau* zusammengefasst, die wiederum nur einen sehr kleinen Anteil (unter 1%) der bestehenden Fläche in Deutschland ausmacht. Auch das Gebäudemodell des *Einzelhandels* wird in der Hochrechnung nicht weiter dargestellt. Wie in Kapitel 5.4 gezeigt wurde, haben gerade im Einzelhandel die internen Speichermassen der Handelsware einen enormen Einfluss auf das LM-Potenzial. Daher sollen deren qualitative Abschätzungen nicht in die flächengewichtete Potenzialermittlung mit eingehen.

Damit entsprechen die in den folgenden Berechnungen berücksichtigten Gebäudemodelle etwa 67% des Flächenbestands in Deutschland.

Für die Berechnung des flächengewichteten Potenzials werden die spezifischen Potenziale der Gebäudemodelle *Büro*, *EFH* und *MFH* (jeweils *Neubau* und *Bestand*) aus Kapitel 5.2 mit ihrem zugehörigen Flächenbestand (siehe Abb. 6.2) multipliziert, um eine quantitative Abschätzung von Lastmanagement-Potenzialen in Deutschland treffen zu können. Zum besseren Verständnis für die folgenden Ergebnisse ist die Flächenverteilung der berücksichtigten Gebäudemodelle in Abb. 6.1 dargestellt.

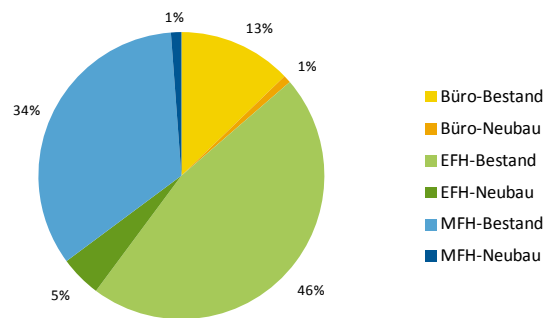


Abb. 6.1: Flächenverteilung der berücksichtigten Gebäudetypologien *Büro*, *EFH* und *MFH*

Hier wird ersichtlich, dass der Anteil der *Bestandsbauten* von *EFHs* und *MFHs* mit ca. 80 % der Fläche der berücksichtigten Gebäudetypologien dominiert. Die Neubauten von *Büro*, *EFH* und *MFH* machen in der Hochrechnung derzeit nur ca. 7 % der berücksichtigten Fläche aus.

	Büro		EFH		MFH		sonstige bebaute Fläche
Verhältnis Neubau zu Bestand	N	B	N	B	N	B	
Fläche in Deutschland [Mio m^2]	34	511	186	1856	47	1358	1965
Anteil an Gesamtfläche in Deutschland	9%		34%		24%		33%

Abb. 6.2: Verteilung der Flächenanteile der untersuchten Gebäudetypologien. Zur Aufteilung der Flächen siehe Tab. 4.7 in Kapitel 4.3.

6.2 thermisches Potenzial

Die flächengewichteten Potenziale aller Typtage sind im Anhang 12.4 zusammengefasst. Beispielhaft wird an dieser Stelle auf die Ergebnisse des *kalten* Typtags eingegangen, da eine allgemeine Tendenz für alle Typtage erkennbar ist.

Wie beim flächenspezifischen Potenzial kann auch hier zwischen einer auf 2 Stunden begrenzten Kurzzeitbetrachtung und einem maximalen Langzeitpotenzial unterschieden werden. In beiden Fällen wird weiterhin das Zuschaltpotenzial (obere Bildhälfte) und Abschaltpotenzial (untere Bildhälfte) unterschieden. Bei der Kurzzeitbetrachtung (Abb. 6.3) erfolgt eine vertikale Aufteilung der Tag- und Nacht-Potenziale. Die Langzeitbetrachtung (Abb. 6.4) unterscheidet zwischen dem minimalen und maximalen Ab- bzw. Zuschaltpotenzial, das innerhalb von 24 h erzielt werden kann.

Die flächengewichteten Ergebnisse für die jeweiligen Typtage (siehe Anhang 12.4) zeigen deutlich das dominierende Potenzial der Gebäudemodelle des *Bestands*, insbesondere der *EFHs* und *MFHs*. Anhand der Abb. 6.1 wird ersichtlich, dass insbesondere der hohe Flächenanteil der Bestandsbauten zu diesem großen Potenzial führt. So existieren in Deutschland etwa 10-mal mehr Einfamilienhäuser mit Bestandsniveau als EFHs mit Neubaustandard. Unter der getroffenen Annahme, dass alle hier berücksichtigen Gebäude für LM-Maßnahmen genutzt werden könnten, lassen sich aufgrund des größeren Flächenanteils in Bestandsgebäuden deutlich höhere Energiemengen zwischenspeichern.

Darüber hinaus wird die beherrschende Rolle des Wohnungsbaus deutlich. Gerade beim flächengewichteten Langzeitpotenzial können die untersuchten *Büro*-Modelle nur einen kleinen Anteil zur Entlastung der Stromnetze beitragen. An *kalten* Wintertagen ist ein theoretisches Maximum des thermischen Zuschaltpotenzials von bis zu 1.600 GWh möglich, siehe Abb. 6.4. Das höchste Abschaltpotenzial wird mit etwa 680 GWh an einem *gemäßigten* Typtag erreicht. Aufgrund des geringen Flächenanteils der Gebäudemodelle mit Kühlung, ist das theoretisch nutzbare Potenzial im Sommer deutlich geringer. Die in Deutschland bestehende Büro-Fläche ermöglicht ein Zuschalten von knapp 100 GWh bzw. ein Abschalten von bis zu 150 GWh.

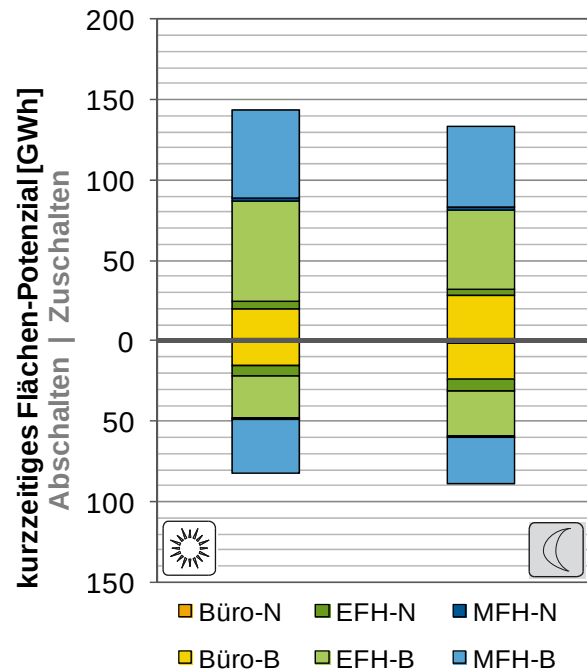


Abb. 6.3: kurzzeitiges LM-Potenzial für den Gebäudebestand in Deutschland; Typtag kalt

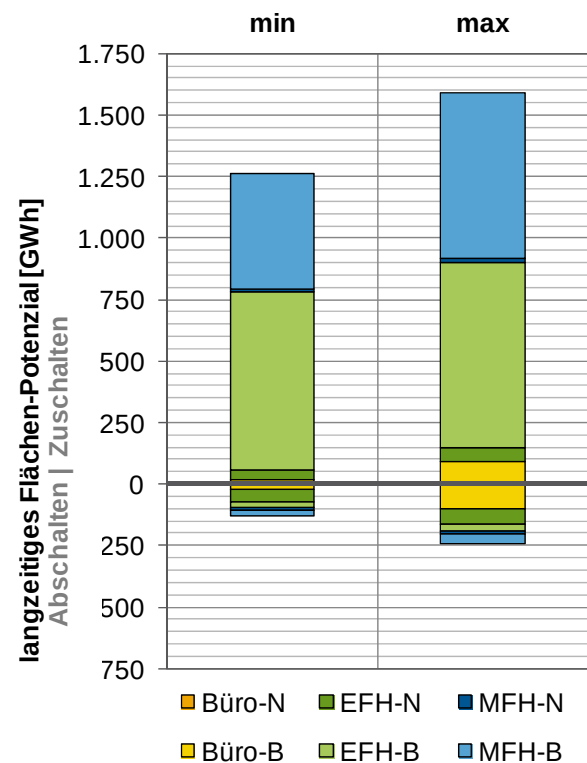


Abb. 6.4: Langzeit-Potenzial für den Gebäudebestand in Deutschland; Typtag kalt

In der nachfolgenden Abb. 6.5 werden die kurzzeitigen Potenziale der berücksichtigten Gebäudemodelle zu einem Gesamtpotenzial der bestehenden Gebäudefläche

zusammengefasst und für den jeweiligen Typtag dargestellt. Schwerpunkt soll hierbei auf das kurzzeitige 2h-Potenzial gelegt werden.

[GWh_th]	sehr heiß	heiß	warm	gemäßigt	kühl	kalt	sehr kalt
Zuschalten Tag  	11	23	15	122	196	143	55
Zuschalten Nacht  	9	7	7	172	201	133	42
Abschalten Tag  	34	26	13	99	95	82	84
Abschalten Nacht  	0	0	0	103	125	89	73

Abb. 6.5: Zusammenfassung des thermischen Potenzials für die bestehende Fläche des Wohn- sowie Bürobaus in Deutschland auf Basis der 2-stündigen Potenzialberechnung

Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass das Potenzial der berücksichtigten Gebäudemodelle (*Büro*, *EFH*, *MFH*) für Lastmanagement-Maßnahmen in der Heizperiode an den *gemäßigten* und *kühlen* Typtagen am höchsten ist. Das hohe Zuschaltpotenzial liegt in den hohen verfügbaren zuschaltbaren Leistungen aller Gebäudemodelle begründet. Insbesondere in der Nacht kann viel Energie in den Gebäuden zwischengespeichert werden. Ebenso ist ein hohes Abschaltpotenzial vorhanden, da im Regelfall in allen Gebäudemodellen über den gesamten Betrachtungszeitraum von 2 h das Heizsystem abgeschaltet werden kann.

Desweiteren ist an den *gemäßigten*, *kühlen* und *kalten* Typtagen das Abschaltpotenzial in der Nacht geringfügig höher als am Tag. Dies ist auf die kälteren Außenbedingungen sowie der fehlenden solaren Einstrahlung in der

Nacht zurückzuführen, wodurch höhere Heizleistungen zur Aufrechterhaltung der Komforttemperatur benötigt werden.

Die Summe aller Zuschaltpotenziale ist an *gemäßigten*, *kühlen* und *kalten* Typtagen, unabhängig der Tageszeit, deutlich höher als die Abschaltpotenziale. Dies lässt sich mit dem dominierenden Flächenanteil des *EFH-Bestands* erklären. Dieses Gebäudemodell hat an den genannten drei Typtagen nur sehr geringe Abschaltpotenziale, begründet durch sehr kurze Abschalt Dauern, die fast durchgehend unter 2 Stunden liegen.

An den Extremtagen (Typtag *sehr heiß*, *sehr kalt*) ergibt sich ein bedeutend geringeres Potenzial für LM-Maßnahmen als an allen anderen Typtagen. Zur Einhaltung der jeweiligen Komforttemperatur werden grund-

sätzlich hohe Heiz- bzw. Kühlleistungen benötigt. Für das LM-Potenzial bedeutet dies, dass prinzipiell hohe Leistungen abgeschaltet werden können, jedoch nur für eine sehr kurze Zeitspanne, die häufig unter einer Stunde beträgt. Hingegen können nur geringe bis keine Leistungen zugeschaltet werden. Das Potenzial an diesen Tagen könnte jedoch erhöht werden, wenn eine kurzzeitige Über- bzw. Unterschreitung der Behaglichkeitsgrenzen vom Nutzer toleriert wird.

Das Potenzial innerhalb der Kühlperiode (Typtage *warm*, *heiß* und *sehr heiß*) ist vergleichsweise gering gegenüber der Heizperiode. Hauptgrund hierfür ist, dass für die *Wohngebäude*modelle keine aktive Kühlung vorgesehen wurde (siehe Kapitel 5.1.1). Entsprechend sind nur Potenziale für die Modelle des *Bürobaus* und *Einzelhandels* vorhanden, die wiederum nur einen geringen Teil der betrachteten Gebäudefläche ausmachen. In einem Vergleich des Anteils der Klimatisierung am Endenergiebedarf in Deutschland zeigt sich, dass dieser lediglich etwa 0,4 % beträgt (siehe Abb. 4.2). Ein flächengewichtetes Lastmanagementpotenzial von Gebäuden innerhalb der Kühlperiode kann somit – zumindest in einer übergeordneten Betrachtung – als verhältnismäßig gering eingestuft werden.

Dabei soll hierbei nochmals die wichtige Randbedingung betont werden, dass die bisher simulierten LM-Maßnahmen ein rein thermisches Potenzial abbilden. Daher wird im folgenden Kapitel ein Ansatz verfolgt, das elektrische Potenzial abschätzen zu können.

6.3 elektrisches Potenzial

Um eine direkte Entlastung der Stromnetze untersuchen zu können, werden die bisher errechneten thermischen Potenziale in einem einfachen Ansatz auf ein elektrisches Potenzial extrapoliert. Als Grundlage wird die Vereinfachung getroffen, eine konstante Leistungszahl (COP) der Wärmeerzeuger und eine ebenfalls lastunabhängige Leistungszahl der Kompressionskältemaschine anzusetzen. Um eine jahreszeitunabhängige statische Berechnung zu ermöglichen, wird eine Jahresarbeitszahl von 3 [33] für eine Wärmepumpe im *Neubau* zu Grunde gelegt. Für die Wärmeerzeugung in den simulierten *Bestandsgebäuden* wird eine direkte Stromheizung (z.B. durch einen elektrischen Heizstab) mit einem COP von 1 angesetzt. Als Richtwert für die Umrechnung des Strombedarfs der Kältemaschine wird eine Leistungszahl von 3,5 nach [34] zu Grunde gelegt.

Die flächengewichteten elektrischen Potenziale aller Typtage sind im Anhang 12.5 zusammengefasst. Analog zum vorangegangenen Kapitel erfolgt in Abb. 6.6 eine zusammenfassende Darstellung des kurzzeitigen elektrischen Gesamtpotenzials für die sieben Typtage. Die zuvor ausgewiesenen thermischen Potenziale sind als ausgegraute Werte ebenfalls in Abb. 6.6 dargestellt.

Hinweis:

Der hier gewählte Ansatz zur Abschätzung eines theoretisch möglichen elektrischen Potenzials basiert auf der Vereinfachung, dass der gesamte Gebäudebestand zu 100% mit elektrischen Heiz- und Kühlsystemen ausgestattet wäre.

[GWh _{el}] ([GWh _{th}])	sehr heiß	heiß	warm	gemäßigt	kühl	kalt	sehr kalt
Zuschalten Tag  	3 (11)	7 (23)	4 (15)	113 (122)	190 (196)	138 (143)	52 (55)
Zuschalten Nacht  	3 (9)	2 (7)	2 (7)	163 (172)	195 (201)	129 (133)	40 (42)
Abschalten Tag  	10 (34)	8 (26)	4 (13)	98 (99)	91 (95)	77 (82)	76 (84)
Abschalten Nacht  	0 (0)	0 (0)	0 (0)	101 (103)	119 (125)	82 (89)	64 (73)

Abb. 6.6: Zusammenfassung des elektrischen (schwarz) sowie thermischen (grau) Potenzials für die bestehende Fläche des Wohn- sowie Bürobaus in Deutschland auf Basis der 2-stündigen Potenzialberechnung

In der Heizperiode liegt das ermittelte elektrische Potenzial in der gleichen Größenordnung wie das thermische Potenzial. Dies ist mit dem dominierenden Flächenanteil der Bestandsgebäude sowie der für diese Gebäudemodelle festgelegten Leistungszahl eines elektrischen Heizsystems (COP von 1) begründet. Die geringeren spezifischen Heizleistungen der Neubaumodelle werden durch die höhere Effizienz der Wärmeerzeuger (COP von 3) gegenüber den Bestandsmodellen weiter reduziert. Daher wird bei einer flächengewichteten Betrachtung das Potenzial des Neubaus noch geringer. In der Kühlperiode ergibt sich – bedingt durch die sowohl für Bestand wie Neubau einheitlich angesetzte Leistungszahl von 3,5 – eine größere Differenz zwischen elektrischem und thermischem Potenzial. Ein höheres Potenzial hinsichtlich Zu- und Abschalten ist prinzipiell an *heißen* und *sehr heißen* Tagen als an *warmen* zu erwarten. Da der Anteil der gekühlten Fläche des hier betrachteten Flächenbestands nur ca. 14 % ausmacht (*Büro-Modelle Neubau* und *Bestand*, siehe Abb. 6.1), sind die LM-Potenziale grundsätzlich um ein Vielfaches geringer als in der Heiz-

periode, in der auch die Gebäudemodelle des Wohnbaus berücksichtigt sind.

Um eine grobe Vorstellung von der theoretisch möglichen speicherbaren Energiemenge (LM-Potenzial) in Gebäuden zu erhalten, wird der Vergleich mit einem Elektro-Auto gezogen. Dieses kann in ähnlicher Weise zur Entlastung des Stromnetzes beitragen. So kann das Laden eines Elektro-Fahrzeugs aus dem Stromnetz mit dem Zuschalten zusätzlicher Heizleistung verglichen werden. Das Abschalten von Leistung kann nur mit der Unterbrechung und dem Pausieren eines Ladevorganges in Relation gesetzt werden. Im Gegensatz zu reinen Stromverbrauchern wie elektrischen Heiz- und Kühlsystemen, kann ein Elektro-Auto unter gewissen Randbedingungen theoretisch auch Energie ins Netz einspeisen. Dieser Vorgang wird im vorliegenden Vergleich nicht berücksichtigt.

Zur Bewertung des elektrischen LM-Potenzials von Gebäuden wird dieses mit einem elektrischen Kleinwagen verglichen. Als Referenz wird in dieser Studie eine Speicherkapazität von 15 kWh elektrischer Energie angesetzt¹. Die Speicherkapazität von 1 GWh_{el} entspricht dem Laden von rund 67.000 Elektroautos.

Wie in Abb. 6.6 ersichtlich, liegt insbesondere am *kühlen* Typtag das höchste Zuschaltpotenzial zur Tages- wie auch Nachtzeit vor. Unter der theoretischen Annahme, dass der Flächenbestand von *Bürogebäuden*, *Einfamilien-* und *Mehrfamilienhäusern* gleichzeitig mit der jeweiligen maximal installierten Auslegungsleistung für maximal 2 Stunden während des Tages zugeschaltet wird, ergibt sich für den *kühlen* Typtag ein zuschaltbares Potenzial am Tag von ca. 190 GWh, welches in etwa der Energie zum Laden von rund 12,7 Millionen Elektrofahrzeugen benötigt wird.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass Lastmanagement nicht zum Ziel einer Energieeinsparung eingesetzt wird. Gerade ein Zuschalten verfügbarer Leistungsreserven kann zu einem höheren Energieverbrauch führen. Derzeit kommt es in Deutschland jedoch regelmäßig zu der Situation, dass bestehende Windräder abgeschaltet werden müssen, da das Stromnetz den momentan erzeugten Strom nicht aufnehmen kann. Durch Lastmanagement kann diese „verlorene“, nicht genutzte regenerative Energiemenge in Zeiten geringer Erzeugerleistung verschoben werden, in der ansonsten Reservekraftwerke hochgefahren werden müssten.

¹ als Grundlage dient die Speicherkapazität des BMW i3 mit 18,8 kWh bzw. der Elektro-Smart mit einem vergleichbaren Speicher von 17,6 kWh. Unter der Berücksichtigung eines Tiefentladeschutzes wird die Annahme getroffen, dass maximal 80% der Batteriekapazität für LM-Maßnahmen genutzt werden können.

7. Fazit

Der stetige Ausbau von erneuerbaren Energien in Deutschland erfordert eine flexible Strominfrastruktur, um die Versorgungssicherheit auch zukünftig zu gewährleisten. Stromangebot und -nachfrage müssen aus diesem Grund besser aufeinander abgestimmt werden. Um dies zu erreichen, können beispielsweise Speicher dazu beitragen, Angebot und Nachfrage anzugleichen. Eine weitere Möglichkeit ist der Einsatz flexibler Kraftwerke, welche bei kurzzeitigen Lastspitzen zusätzliche Energie ins Netz einspeisen. Desweiteren können flexible Verbraucher zu einer höheren Versorgungssicherheit beitragen – mittels Lastmanagement.

Lastmanagement ist die gezielte Steuerung des Verbrauchs durch zeitliche Verschiebung elektrischer Lasten. Ein bisher wenig beachtetes Potenzial liegt in der Möglichkeit, Gebäudemasse als thermischen Speicher zu nutzen. Mittels der Umwandlung von elektrischer in thermische Energie („power-to-heat“) könnte dieses Potenzial erschlossen und das Gebäude somit Teil eines Smart Grid, eines intelligenten Netzes werden.

Gegenstand dieses Forschungsvorhabens ist die Untersuchung von Lastmanagement-Potenzialen in Gebäuden unter der Voraussetzung, dass die Gebäudemasse als thermischer Speicher genutzt wird. Die durchgeführten Untersuchungen basieren dabei auf dem Ansatz, dass sich die operative (empfundene) Temperatur eines Raumes innerhalb festgelegter Grenzwerte bewegen darf. Da für Lastmanagement-Maßnahmen grundsätzlich sowohl eine Netzentlastung durch Abschaltung technischer Systeme, als auch ein zusätzlicher Strombezug durch Zuschaltung berücksichtigt werden müssen, wird in den durchgeführten Untersuchungen zwischen Zuschalten und Abschalten differenziert.

Hierzu wurde in einem ersten Schritt in einer Sensitivitätsanalyse (SIM 1) verschiedene gebäudespezifische und anlagentechnische Parameter wie Dämmstandard, Speichermasse oder Wärmeübergabesystem anhand eines Modellraumes untersucht mit dem Ziel, den Einfluss auf das thermische Aufheiz- bzw. Auskühlverhalten bewerten zu können, siehe Kapitel 3. Es konnte gezeigt werden, dass das Lastmanagement-Potenzial in Gebäuden stets aus Dauer und Leistung bewertet werden soll-

te. Eine hohe ab- bzw. zuschaltbare Heiz- bzw. Kühlleistung führt meist zu einer raschen Temperaturänderung im Raum, was wiederum in einer kurzzeitigen Ab- bzw. Zuschaltdauer resultiert. Hingegen kann bei langer Dauer meist nur eine geringe Leistung ab- bzw. zugeschaltet werden. Die untersuchten Parameter können das Potenzial für ein Lastmanagement in Gebäuden maßgeblich beeinflussen. Insbesondere die Gebäudehülle und die Art des Wärmeübergabesystems können zu einer Änderung des Potenzials um mehr als 100 % führen. Die Kombination aus trägem Wärmeübergabesystem (Bauteilaktivierung), hoher verfügbarer Speichermasse im Raum und einem Dämmstandard nach EnEV 2009 erwies sich – im Hinblick auf das bewertete Lastmanagement-Potenzial aus Dauer und Leistung – als besonders geeignet. Im Falle eines Zuschaltvorgangs konnte eine Potenzialerhöhung um mehr als das fünffache erreicht werden. Bei einem Abschalten des Heizsystems führte die Kombination zu einer näherungsweisen Verdopplung des Potenzials.

Neben der Sensitivitätsanalyse wurde in einem nächsten Schritt eine Vorklassifizierung des Gebäudebestands in Deutschland durchgeführt. Anhand von verschiedenen Kriterien wie *Gebäudetypologie und Struktur*, *Gebäudealter* oder *Baukonstruktion* wurde der Wohn- bzw. Nicht-Wohnbau systematisch untersucht, siehe Kapitel 4. Die Analyse bildete die Grundlage für die Entwicklung unterschiedlicher Gebäudemodelle für die Bereiche Wohnen, Büro und Verwaltung sowie Einzelhandel.

In einem weiteren Schritt wurden die entwickelten Gebäudemodelle auf ihr instationäres Lastmanagement-Potenzial untersucht. Die Ergebnisse der dynamischen Simulation (Kapitel 5, SIM 2) bestätigen die Erkenntnisse aus der Sensitivitätsanalyse (SIM 1). Träge Flächen-Wärmeübergabesysteme, wie eine Bauteilaktivierung (die die höchsten Potenziale dieser Studie aufweist), sind deutlich besser für Lastmanagement-Maßnahmen geeignet als Heizsysteme, die die Speichermasse des Gebäudes nur in geringem Maße nutzen können (geringe thermische Eindringtiefe), wie bspw. eine Luftheizung. Beispielsweise kann im Gebäudemodell *Einzelhandel* aufgrund geringer baukonstruktiver Speichermassen (Leichtbauweise) nur wenig thermische Energie gespei-

chert werden. Dies führt zu einem raschen Aufheiz- bzw. Auskühlverhalten, was sich nachteilig auf mögliche LM-Maßnahmen auswirkt. In Kapitel 5.4 konnte anhand des Gebäudemodells *Einzelhandel* der positive Einfluss von zusätzlicher nutzungsbedingter Speichermasse (Lagergut) auf das LM-Potenzial nachgewiesen werden.

Ein weiteres Ergebnis dieser Studie ist der starke Einfluss von internen Wärmequellen. Dieser führt im *Nicht-Wohnbau*, aufgrund der charakteristischen Nutzungszeiten zwischen 7:00 und 18:00 Uhr, zu einem voneinander abweichenden Verlauf der LM-Potenziale zwischen Tag und Nacht. Gerade im *Bürobau* reduzieren interne Wärmelasten den Heizbedarf während der Nutzungszeit deutlich. Im Winter liegt daher die für Abschaltmaßnahmen verfügbare Leistung (als Differenz zur Auslegungs-Heizleistung) am Tag etwa doppelt so hoch wie in der Nacht. Im Sommer führen Personen, elektrische Geräte und solare Einstrahlung zu einer höheren Kühllast am Tag, während nachts nahezu kein Kühlbedarf besteht. Im Kühlfall liegen daher im *Nicht-Wohnbau* keine Abschaltpotenziale in der Nacht vor. Im *Wohnbau* bestehen keine LM-Potenziale im Sommer, da hier kein Kühlsystem abgebildet wird.

Um den hohen Einfluss von Wetterbedingungen zu berücksichtigen, werden die Gebäudemodelle an sieben repräsentativen Typtagen (*sehr kalt* bis *sehr heiß*) untersucht, die die Außentemperatur und solare Einstrahlung eines Referenzjahres widerspiegeln. Die Bewertungen der Zu- und Abschaltpotenziale bei Tag und Nacht werden in einem Gebäudekatalog zusammengefasst. Der Katalog zeigt auf, welcher Gebäudetyp für welche Jahres- und Tageszeit für ein Lastmanagement empfehlenswert ist.

In dieser Studie hat sich der Ansatz bewährt, LM-Potenziale durch Integration der ab- oder zuschaltbaren Leistung über die LM-Dauer zu bestimmen. Neben einem maximal möglichen Langzeitpotenzial wird ein auf 2 Stunden begrenztes Kurzzeitpotenzial berechnet. Gerade mit letzterem wird ein Vergleich der divergenten Gebäudetypologien möglich.

Im Kühlfall beträgt die zuschaltbare spezifische Leistung der *Büro*-Gebäudemodelle im Tagesmittel zwischen 10 und 35 W/m² (am *sehr heißen* bzw. *warmen* Typtag). Durch eine kurzzeitige Zuschaltung, beispielsweise bei Einspeisungsspitzen durch Photovoltaik, kann das

Stromnetz gut entlastet werden (im Tagesmittel zwischen 20 und 50 Wh/m²). Die mögliche Abschaltdauer der Kühlsysteme beträgt meist deutlich mehr als 2 Stunden. Damit kann durch eine Abschaltung der Kühlung in Bürobauten das Stromnetz auch längerfristig ausgeglichen werden, beispielsweise bei anhaltender Bewölkung oder Windflauten, was sich wiederum im Langzeitpotenzial (über 200 Wh/m²) widerspiegelt.

Allerdings wird in Deutschland nur ein geringer Anteil der Gebäude gekühlt. Ein deutlich höheres Potenzial für Lastmanagement-Maßnahmen besteht im Heizfall. Rund ein Viertel des derzeitigen Endenergieverbrauchs in Deutschland entfällt auf die Beheizung von Gebäuden [15]. Hier können vor allem Wohnhäuser zur Integration fluktuierender Energien beitragen.

Um ein quantitatives Gesamtpotenzial [GWh] der bestehenden Gebäude in Deutschland abschätzen zu können, wurde das flächenspezifisch ermittelte LM-Potenzial [Wh/m²] auf den Flächenbestand der jeweiligen Gebäudemodelle extrapoliert, siehe Kapitel 6. Die Aktivierung der Heizsysteme der Einfamilien- und Mehrfamilienhäuser, die zusammen über die Hälfte der bebauten Fläche ausmachen, versprechen das größte Potenzial. Bei einer auf 2 Stunden begrenzten Kurzzeitbetrachtung könnten am *kalten* Typtag tagsüber 120 GWh und nachts etwa 100 GWh an Heizwärme zwischengespeichert werden. An diesem Typtag wird das höchste langzeitige LM-Potenzial dieser Studie erreicht. Unter idealen Bedingungen der Langzeitbetrachtung steigt das thermische Zuschaltpotenzial aller bestehenden Wohngebäude auf rund 1.500 GWh. Bei Einbezug der Büro-Gebäude steigt das LM-Potenzial um weitere 100 GWh. Die Voraussetzung, mit dieser zwischenspeicherbaren Energie das Stromnetz entlasten zu können, ist eine flächendeckende Umrüstung auf elektrische Heizsysteme, da über 90% der Wohngebäude Bestandsbauten mit meist konventionellen Heizsystemen sind. Der Anteil an Wärmepumpen nimmt gerade im Neubau stark zu, daher ist mit einem wachsenden Potenzial für Lastmanagement in Gebäuden zu rechnen.

Der entwickelte Ansatz, mit ausgewählten Wetterdaten das nutzer- und zeitabhängige Lastmanagement-Potenzial von verschiedenen Gebäudemodelle zu analysieren, liefert Antwort auf die Frage: Wann kann in Gebäuden wie viel Leistung für wie lange zu- oder abgeschaltet werden?

8. Ausblick

Welche Überlappungseffekte ergeben sich zwischen der künftig stärker fluktuierenden Energieerzeugung und den ermittelten jahreszeit- und tageszeitabhängigen Lastmanagementpotenzialen der Gebäude?

Die Analyse des LM-Potenzials auf Basis realer Wetterdaten ermöglicht in einem weiterführenden Schritt den Vergleich mit dem Erzeugungsprofil eines bestehenden sowie prognostizierten Kraftwerksparks. Somit könnten die stundenweise ermittelten Potenziale an den Typtagen, anhand gemessener Tagesverläufe, auf Synergien mit möglichen Lastspitzen der regenerativen Energieerzeugung überprüft werden. Auf diese Weise ist es möglich abzuschätzen, zu welchen Tages- und Jahreszeiten welche Gebäude besonders gut mit der fluktuierenden Energieerzeugung harmonieren.

Als Beispiel wird hier der Verlauf des monatlichen Lastmanagement-Potenzials zur Tageszeit der Gebäudetypologie *Büro-Bestand* in Abb. 8.1 gewählt. Der Jahresverlauf zeigt hohe flächenspezifische Zu- und Abschalt-potenziale besonders in den Sommermonaten. Gerade an Tagen mit hoher solarer Einstrahlung besteht tagsüber eine hohe Erzeugungsleistung von Photovoltaikanlagen. Hier könnten Bürogebäude gut dazu beitragen Erzeugungsspitzen auszugleichen, indem die Gebäudemasse mit Stromüberschüssen vorgekühlt wird. Aber auch bei einem kurzfristigen Ausfall von PV-Einspeisung, bspw. bei Bewölkung, könnten elektrische Kühlsysteme abgeschaltet werden, um den Verbrauch der Erzeugung anzupassen und somit das Stromnetz zu stabilisieren.

Aber auch in den Wintermonaten und in den Nachtstunden besitzen die untersuchten Gebäudemodelle Potenziale, eine fluktuierende Erzeugung auszugleichen. Hier wäre insbesondere die Bestimmung von Synergien mit dem Ausbau der Windkraft von hohem Interesse.

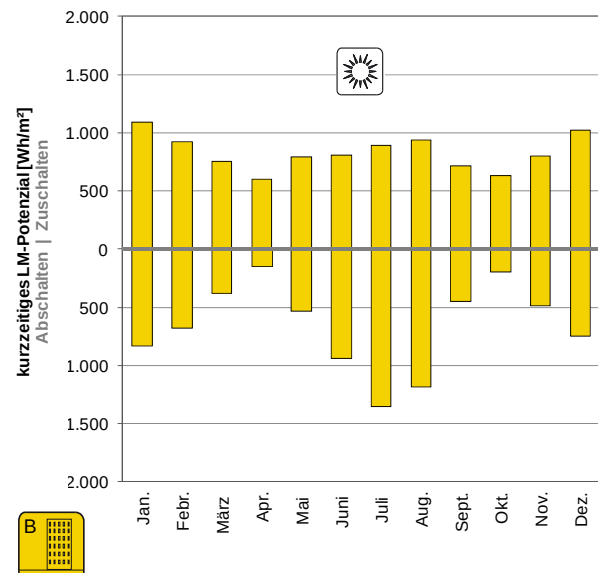


Abb. 8.1: Monatliche Betrachtung des kurzzeitigen LM-Potenzials des Gebäudemodells *Büro-Bestand* zur Tageszeit

Wie lassen sich Bestandsgebäude im Sinne eines Lastmanagements konzeptionell sinnvoll in die zukünftige Energieversorgungsstruktur einbinden?

Aufgrund des dominierenden Flächenanteils weisen Bestandsgebäude (s. Kapitel 6) den größten Einfluss auf den Gesamtheizbedarf auf. Mithilfe von energetischen Sanierungsmaßnahmen bzw. -strategien könnte ein hohes Lastmanagement-Potenzial von bestehenden Gebäuden erschlossen werden. Die Forcierung von angepassten Sanierungsstrategien gibt dem Gesetzgeber die Möglichkeit, Maßnahmen zur Integration von fluktuierenden Energien zu ergreifen. Um das Ziel einer Stabilisierung des Stromnetzes durch Lastmanagement zu erreichen, könnten vor allem die Förderung und der Ausbau von elektrischen Heizsystemen eine Schlüsselrolle zur Erschließung von Speicher- und Lastmanagement-Potenzialen in Gebäuden einnehmen.

9. Literaturverzeichnis

- [1] J. Nietsch, T. Pregger, T. Naegler, D. Heide, D. L. de Tena, F. Trieb, Y. Scholz, K. Nienhaus, N. Gerhardt, M. Sterner, T. Trost, A. von Oehsen, R. Schwinn, C. Pape, H. Hahn, M. Wickert und B. Wenzel, „Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global,“ Stuttgart, 2012.
- [2] HEA - Fachgemeinschaft für effiziente Energieanwendungen e.V., „elektro-plus.com,“ [Online]. Available: <http://www.elektro-plus.com/energieeffizienz>. [Zugriff am August 2013].
- [3] R. Lüking und G. Hauser, „Die thermische Konditionierung von Gebäuden im Kontext eines zukünftigen Energieversorgungssystems,“ Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2011.
- [4] EQUA Solutions AG, *IDA Indoor Climate and Energy 4 Expert Edition Version 4.51*.
- [5] Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), Handbuch Lastmanagement, Berlin, 2012.
- [6] T. Rössel, M. Fischer, J. Jungwirth und U. Wehmhörner, „Studie zu Potenzialen intelligenter Energiemanagementsysteme in Nichtwohngebäuden,“ Technische Universität München, München, 2010.
- [7] M. Klobasa, „Dynamische Simulation eines Lastmanagements und Integration von Windenergie in ein Elektrizitätsnetz,“ Fraunhofer IRB Verlag, Zurich, 2007.
- [8] U. Brickmann, „Studie "Berlin 2037" - Intelligente Gebäude und Elektrofahrzeuge sind Schlüsselkomponenten für Smart Grids,“ 2011, pp. 65-73.
- [9] J. Jungwirth, T. Rössel, S. Herzog, F. Sängler und J. Schneegans, „Smart Buildings - Implementierung von Lastmanagementsysteme,“ Technische Universität München, München, 2013.
- [10] W. e. a. Feist, *Passivhaus Projektierungspaket*, Passivhaus Institut Darmstadt, 2007.
- [11] DIN EN 15251, *Deutsche Fassung EN 15251:2007*.
- [12] BMVBS, „Typologie und Bestand beheizter Nichtwohngebäude in Deutschland,“ Online-Publikation 16/11, 2011.
- [13] DIN V 18599, *DIN V 18599*, Berlin, 2011.
- [14] BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., „bdeW,“ [Online]. Available: http://www.bdew.de/internet.nsf/id/DE_Energiedaten. [Zugriff am August 2013].
- [15] „Bundesministerium für Wirtschaft und Energie,“ [Online]. Available: <http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/energiedaten.html>. [Zugriff am 21.05.2014].
- [16] M. a. Schlesinger, „Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung,“ Basel/Köln/Osnabrück, 2010.
- [17] M. Fisch, T. Wilken, F. Bockelmann und C. Stähr, „Netto-Plusenergie-Gebäude mit Stromlastmanagement und Elektro-Mobilität,“ Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2013.
- [18] S. Klauß, Entwicklung einer Datenbank mit Modellgebäuden für energiebezogene Untersuchungen, insbesondere der Wirtschaftlichkeit, Bonn: BMVBS, 2010.
- [19] BMVBS, „Wohnen und Bauen in Zahlen. 7. Auflage,“ Bonn, 2012.
- [20] T. Loga, N. Diefenbach und B. R., Deutsche Gebäudetypologie. Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden, Darmstadt: TABULA, 2011.
- [21] D. Walberg, A. Holz, T. Gniewchwitz und T. Schulze, Wohnungsbau in Deutschland-2011. Modernisierung oder Bestandsersatz., Kiel: ARGE, 2011.
- [22] H. Discher, E. Hinz und A. Enseling, „Wirtschaftlichkeit energetischer Modernisierung im Mietwohnungsbestand,“ Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), Berlin, 2010.

- [23] AG Energiebilanzen e.V., „AGEB,“ [Online]. Available: <http://www.ag-energiebilanzen.de/viewpage.php?idpage=118>. [Zugriff am August 2013].
- [24] ECOfYS; Prognos AG, „Potenziale der Wärmepumpe zum Lastmanagement im Strom und zur Netzintegration erneuerbarer Energien,“ 2011.
- [25] Schlomann, B. et al, „Energieverbrauch des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) für die Jahre 2004 bis 2006,“ Karlsruhe / München / Nürnberg, 2009.
- [26] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, [Online]. Available: <http://www.bmwi.de/DE/Mediathek/publikationen,did=578830.html>. [Zugriff am August 2013].
- [27] Statistisches Bundesamt destatis, „Destatis,“ [Online]. Available: <http://tinyurl.com/StatistischesBundesamt1>. [Zugriff am August 2013].
- [28] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, „Bekanntmachung der Regeln für Energieverbrauchskennwerte und der Vergleichswerte im Nichtwohngebäudebestand vom 30. Juli 2009,“ Berlin, 2009.
- [29] C. Stolte, H. Marcinek, H. Discher, E. Hinz und A. Enseling, „Wirtschaftlichkeit energetischer Modernisierung in selbstgenutzten Wohngebäuden,“ Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), Berlin, 2012.
- [30] L. Qian, Lastmanagement von Einzelhandelsgebäuden unter Berücksichtigung der Gebäude- und Anlagentechnik, München: TU München, 2013.
- [31] J. Rosenkranz, B. Mailach, R. Gritzki, J. Kaiser, A. Perschk, M. Rösler, J. Seifert, B. Oschatz und F. Otto, „Gesamtanalyse Energieeffizienz von Hallengebäuden - Abschlussbericht,“ Dresden, 2011.
- [32] Meteotest: Meteonorm 6.10.20, , Bern, 2010.
- [33] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Erneuerbare Energien, Innovationen für eine nachhaltige Zukunft, Berlin, 2011.
- [34] C. Müller, „reftec,“ [Online]. Available: www.reftec.ch/downloads/Leistungszahlen.pdf.
- [35] ARGE, „Studie Wohnungsbau Deutschland 2011,“ Kiel, 2011.
- [36] DIN V 4108-6:2003-06: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden.
- [37] U. Wagner, Elektrische Kraftwerkstechnik, München, 2009.
- [38] Statistisches Bundesamt, „Destatis,“ [Online]. Available: <http://tinyurl.com/StatistischesBundesamt2>. [Zugriff am August 2013].
- [39] Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden, Bundesministerium der Justiz.

10. Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1: Entwicklung der Kraftwerksleistung in Deutschland [1]	1
Abb. 2.1: Anpassung und Glättung des Stromverbrauchs während eines Tages mittels Lastmanagement [5]	3
Abb. 2.2: Mögliche Lastmanagement-Prozesse in den Sektoren Industrie, GHD und Haushalt	5
Abb. 2.3: Sensitivitätsanalyse (SIM 1) und typologiespezifische Simulationen (SIM 2)	8
Abb. 3.1: Schematische Darstellung des Modellraumes	9
Abb. 3.2: thermisches Behaglichkeitsband im Winter (links) und Sommer (rechts)	9
Abb. 3.3: Legende zur Ergebnisdarstellung der Sensitivitätsanalyse	10
Abb. 3.4: Simulationsergebnisse für das Zuschalt- bzw. Abschaltpotenzial für das <i>Grundmodell</i> , Heizfall	11
Abb. 3.5: Simulationsergebnisse für das Zuschalt- bzw. Abschaltpotenzial bei Variation der Gebäudehülle, Heizfall	12
Abb. 3.6: Simulationsergebnisse für das Zuschalt- bzw. Abschaltpotenzial bei Variation der Speichermasse, Heizfall	13
Abb. 3.7: Simulationen zur maximal möglichen Zuschaltdauer in Abhängigkeit der Speichermasse, Heizfall	13
Abb. 3.8: Simulationen zur maximal möglichen Abschaltdauer in Abhängigkeit der Speichermasse, Heizfall	13
Abb. 3.9: Simulationsergebnisse für das Zuschalt- bzw. Abschaltpotenzial bei Variation des Wärmeübergabesystems, Heizfall	14
Abb. 3.10: Simulationen zur maximal möglichen Zuschaltdauer in Abhängigkeit des Wärmeübergabesystems, Heizfall	14
Abb. 3.11: Simulationen zur maximal möglichen Abschaltdauer in Abhängigkeit des Wärmeübergabesystems, Heizfall	14
Abb. 3.12: Simulationsergebnisse für das Zuschalt- bzw. Abschaltpotenzial bei Variation der Lüftungsart und Höhe des Luftwechsels, Heizfall	15
Abb. 3.13: Simulationen zur maximal möglichen Abschaltdauer in Abhängigkeit der Luftwechselrate bei natürlicher Lüftung, Heizfall	15
Abb. 3.14: Simulationsergebnisse für das Zuschalt- bzw. Abschaltpotenzial bei Variation der internen Wärmelast, Heizfall	16
Abb. 3.15: Simulationsergebnisse für das Zuschalt- bzw. Abschaltpotenzial beim optimiertem Gebäudemodell, Heizfall	17
Abb. 3.16: Simulationen zur maximal möglichen Zuschaltdauer des optimierten Gebäudemodells im Vergleich zum <i>Grundmodell</i> , Heizfall	17
Abb. 3.17: Simulationen zur maximal möglichen Abschaltdauer des optimierten Gebäudemodells im Vergleich zum <i>Grundmodell</i> , Heizfall	17
Abb. 3.18: Simulationsergebnisse für das Zuschalt- bzw. Abschaltpotenzial für das <i>Grundmodell</i> , Kühlfall	18
Abb. 3.19: Simulationsergebnisse für das Zuschalt- bzw. Abschaltpotenzial bei Variation der Gebäudehülle, Kühlfall	18
Abb. 3.20: Simulationsergebnisse für das Zuschalt- bzw. Abschaltpotenzial bei Variation der Speichermasse, Kühlfall	19
Abb. 3.21: Simulationsergebnisse für das Zuschalt- bzw. Abschaltpotenzial bei Variation des Kälteübergabesystems, Kühlfall	20
Abb. 3.22: Simulationsergebnisse für das Zuschalt- bzw. Abschaltpotenzial bei Variation der internen Wärmelast, Kühlfall	21
Abb. 3.23: Simulationsergebnisse für das Zuschalt- bzw. Abschaltpotenzial beim optimiertem Gebäudemodell, Kühlfall	21
Abb. 3.24: Simulationen zum zusätzlichen Energiebedarf eines Zuschaltvorgangs. Links: Zuschaltung auf 24 °C mit anschließendem Auskühlen und Einschwingen auf die Komforttemperatur. Rechts: Kein Zuschaltvorgang, konstante Einhaltung der Komforttemperatur.	22
Abb. 4.1 Gesamt-Endenergieverbrauch nach Sektoren 2011. [15]	27
Abb. 4.2 Endenergieverbrauch nach Anwendungsbereichen in Deutschland 2011. [15]	27
Abb. 4.3 Endenergieverbrauch nach Anwendungsbereichen in privaten Haushalten.[15]	31
Abb. 4.4: Endenergieverbrauch nach Anwendungsbereichen im Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen in Prozent für 2011. [15]	34
Abb. 5.1: Entwickelte Gebäudemodelle für Einfamilien- und Mehrfamilienhäuser, Büro- und Verwaltungsgebäude sowie Einzelhandel	35

Abb. 5.2: Verlauf von operativer Temperatur und spezifischer Heizleistung im Gebäudemodell <i>Büro-BTA</i> am <i>kühlen</i> Typtag	39
Abb. 5.3: Auskühlung des Raumes nach Abschalten der Heizung zu verschiedenen Uhrzeiten	42
Abb. 5.4: Tageszeitabhängiger Verlauf der Abschaltdauer	43
Abb. 5.5: Tagesverlauf der abschaltbaren Leistung	43
Abb. 5.6: Tagesverlauf der zuschaltbaren Leistung	44
Abb. 5.7: Integration der abschaltbaren Heizleistung über die maximale Abschaltdauer	45
Abb. 5.8: Verlauf des Langzeit-Abschaltpotenzials	45
Abb. 5.9: Darstellung des minimalen, durchschnittlichen und maximalen Langzeitpotenzials	45
Abb. 5.10: Tageszeitlicher Verlauf des kurzzeitigen Abschaltpotenzials mit Segmentierung in Tag und Nacht ...	46
Abb. 5.11: Vergleichsgrafik für kurzzeitiges LM-Potenzial mit Segmentierung in Tag/ Nacht und Ab/Zuschalten	47
Abb. 5.12: Außenbedingungen des Typtags <i>sehr kalt</i>	48
Abb. 5.13: Vergleich der Gebäudetypologien: kurzzeitiges LM-Potenzial des Typtags <i>sehr kalt</i>	48
Abb. 5.14: Vergleich der Gebäudetypologien: maximales Langzeit- Potenzial- <i>sehr kalt</i>	49
Abb. 5.15: Tageszeitabhängigkeit des Langzeitpotenzials beim Abschalten am Bsp. <i>Büro-B</i> , <i>sehr kalter Typtag</i>	50
Abb. 5.16: Außenbedingungen des Typtags <i>kalt</i>	51
Abb. 5.17: Vergleich der Gebäudetypologien: kurzzeitiges LM-Potenzial des Typtags <i>kalt</i>	51
Abb. 5.18: Vergleich der Gebäudetypologien: maximales Langzeit- Potenzial- <i>kalt</i>	52
Abb. 5.19: Außenbedingungen des Typtags <i>kühl</i>	53
Abb. 5.20: Vergleich der Gebäudetypologien: kurzzeitiges LM-Potenzial des Typtags <i>kühl</i>	53
Abb. 5.21: Vergleich der Gebäudetypologien: maximales Langzeit- Potenzial am <i>kühlen</i> Typtag	55
Abb. 5.22: Temperaturverlauf beim Zuschalten der Heizung um 12:00 Uhr bei der Gebäudetypologie <i>Büro-BTA</i> am <i>kühlen</i> Typtag	56
Abb. 5.23: Integration der zuschaltbaren Leistung von 12:00 bis 7:00 Uhr	56
Abb. 5.24: Außenbedingungen des Typtags <i>gemäßigt</i>	57
Abb. 5.25: Vergleich der Gebäudetypologien: kurzzeitiges LM-Potenzial- <i>gemäßigt</i>	57
Abb. 5.26: Vergleich der Gebäudetypologien: maximales Langzeit- Potenzial- <i>gemäßigt</i>	58
Abb. 5.27: Außenbedingungen des Typtags <i>warm</i>	60
Abb. 5.28: Vergleich der Gebäudetypologien: kurzzeitiges LM-Potenzial- <i>warm</i>	60
Abb. 5.29: Vergleich der Gebäudetypologien: maximales Langzeit- Potenzial- <i>warm</i>	62
Abb. 5.30: Außenbedingungen des Typtags <i>heiß</i>	63
Abb. 5.31: Vergleich der Gebäudetypologien: kurzzeitiges LM-Potenzial- <i>heiß</i>	63
Abb. 5.32: Vergleich der Gebäudetypologien: maximales Langzeit- Potenzial- <i>heiß</i>	64
Abb. 5.33: Außenbedingungen des Typtags <i>sehr heiß</i>	65
Abb. 5.34: Vergleich der Gebäudetypologien: kurzzeitiges LM-Potenzial- <i>sehr heiß</i>	65
Abb. 5.35: Vergleich der Gebäudetypologien: maximales Langzeit- Potenzial- <i>sehr heiß</i>	67
Abb. 5.36: Vergleich der Gebäudetypologien hinsichtlich ihres Kurzzeitpotenzials am Typtag <i>sehr kalt</i>	69
Abb. 5.37: Vergleich der Gebäudetypologien hinsichtlich ihres Kurzzeitpotenzials am Typtag <i>kalt</i>	69
Abb. 5.38: Vergleich der Gebäudetypologien hinsichtlich ihres Kurzzeitpotenzials am Typtag <i>kühl</i>	70
Abb. 5.39: Vergleich der Gebäudetypologien hinsichtlich ihres Kurzzeitpotenzials am Typtag <i>gemäßigt</i>	70
Abb. 5.40: Vergleich der Gebäudetypologien hinsichtlich ihres Kurzzeitpotenzials am Typtag <i>warm</i>	71
Abb. 5.41: Vergleich der Gebäudetypologien hinsichtlich ihres Kurzzeitpotenzials am Typtag <i>heiß</i>	71
Abb. 5.42: Vergleich der Gebäudetypologien hinsichtlich ihres Kurzzeitpotenzials am Typtag <i>sehr heiß</i>	72
Abb. 5.43: Gebäudekatalog mit den typtagabhängig am besten und gut geeigneten Gebäudemodellen	73
Abb. 5.44: Monatsweise LM-Betrachtung der Bestands-Gebäudemodelle <i>Büro</i> , <i>Einfamilienhaus</i> und <i>Mehrfamilienhaus</i>	75
Abb. 5.45: Einfluss von nutzungsbedingter Speichermasse auf das Auskühlverhalten der Gebäudetypologie <i>Einzelhandel</i> bei einem Abschalten der Heizung um 0:00 Uhr am <i>sehr kalten</i> Typtag	76
Abb. 5.46: Einfluss von nutzungsbedingter Speichermasse auf das kurzzeitige Abschaltpotenzial der Gebäudetypologie <i>Einzelhandel</i> am <i>sehr kalten</i> Typtag	76
Abb. 5.47: Einfluss von nutzungsbedingter Speichermasse auf das Aufheizverhalten der Gebäudetypologie <i>Einzelhandel</i> bei einem Zuschalten der Heizung um 0:00 Uhr am <i>sehr kalten</i> Typtag	77
Abb. 5.48: Einfluss von nutzungsbedingter Speichermasse auf das kurzzeitige Zuschaltpotenzial der Gebäudetypologie <i>Einzelhandel</i> am <i>sehr kalten</i> Typtag	77
Abb. 5.49: Abschaltzeit in Abhängigkeit der unteren Behaglichkeitsgrenze (Gebäudetypologie <i>Büro-Neubau</i> am <i>sehr kalten</i> Typtag)	78
Abb. 5.50: Einfluss der unteren Behaglichkeitsgrenze auf das Langzeit- Potenzial (Gebäudetypologie <i>Büro-Neubau</i> am <i>sehr kalten</i> Typtag)	78

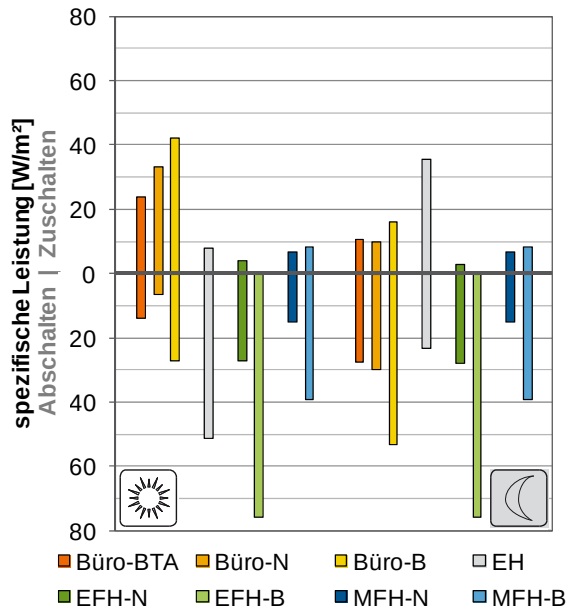
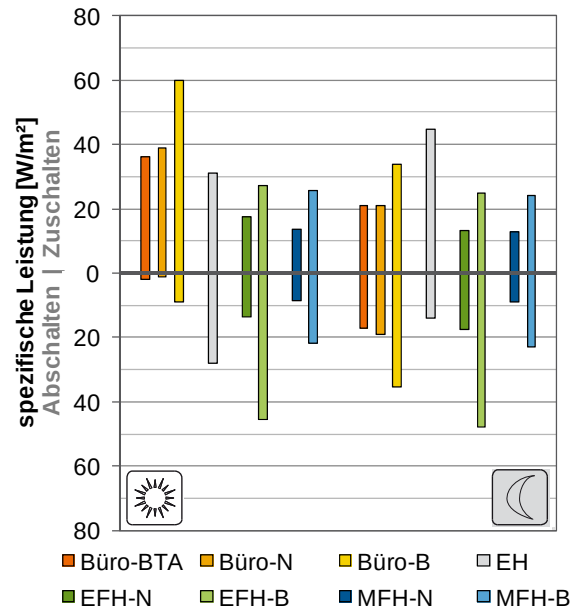
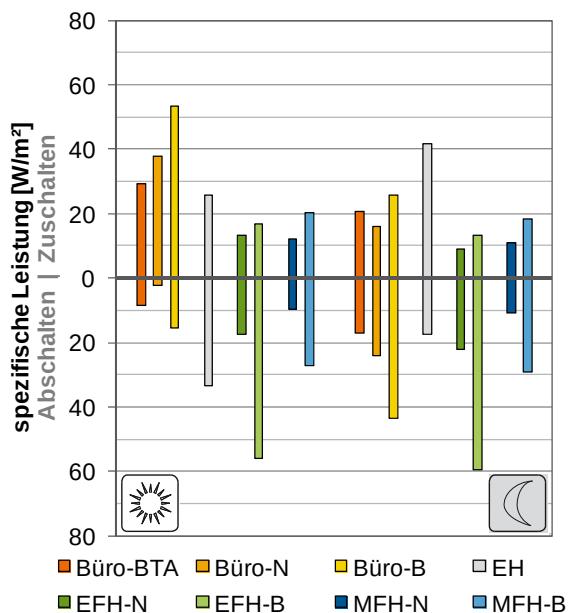
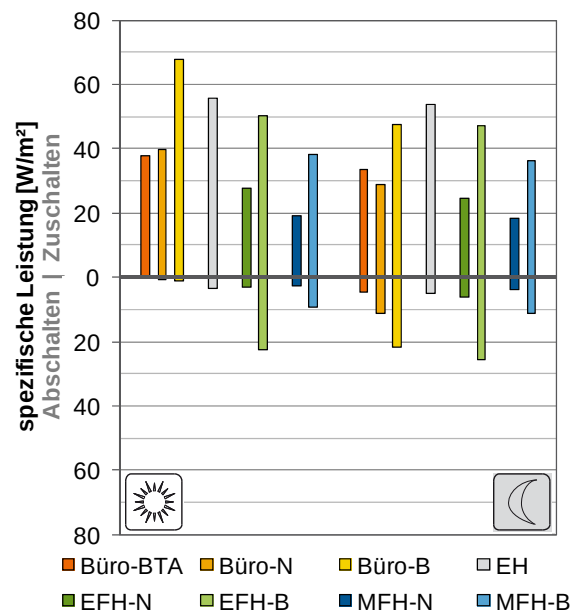
Abb. 5.51: Einfluss der oberen Behaglichkeitsgrenze auf das Langzeit- Potenzial (Gebäudetypologie <i>Büro-Neubau</i> am <i>sehr kalten</i> Typtag).....	78
Abb. 6.1: Flächenaufteilung der berücksichtigten Gebäudetypologien <i>Büro</i> , <i>EFH</i> und <i>MFH</i>	81
Abb. 6.2: Verteilung der Flächenanteile der untersuchten Gebäudetypologien. Zur Aufteilung der Flächen siehe Tab. 4.7 in Kapitel 4.3.	81
Abb. 6.3: kurzzeitiges LM-Potenzial für den Gebäudebestand in Deutschland; Typtag <i>kalt</i>	82
Abb. 6.4: Langzeit-Potenzial für den Gebäudebestand in Deutschland; Typtag <i>kalt</i>	82
Abb. 6.5: Zusammenfassung des thermischen Potenzials für die bestehende Fläche des <i>Wohn-</i> sowie <i>Bürobaus</i> in Deutschland auf Basis der 2-stündigen Potenzialberechnung	83
Abb. 6.6: Zusammenfassung des elektrischen (schwarz) sowie thermischen (grau) Potenzials für die bestehende Fläche des <i>Wohn-</i> sowie <i>Bürobaus</i> in Deutschland auf Basis der 2-stündigen Potenzialberechnung	85
Abb. 8.1: Monatliche Betrachtung des kurzzeitigen LM-Potenzials des Gebäudemodells <i>Büro-Bestand</i> zur Tageszeit	89
Abb. 12.1: Ab- und zuschaltbare Leistung; Typtag <i>sehr kalt</i>	96
Abb. 12.2: Ab- und zuschaltbare Leistung; Typtag <i>kalt</i>	96
Abb. 12.3: Ab- und zuschaltbare Leistung; Typtag <i>kühl</i>	96
Abb. 12.4: Ab- und zuschaltbare Leistung; Typtag <i>gemäßigt</i>	96
Abb. 12.5: Ab- und zuschaltbare Leistung; Typtag <i>warm</i>	97
Abb. 12.6: Ab- und zuschaltbare Leistung; Typtag <i>heiß</i>	97
Abb. 12.7: Ab- und zuschaltbare Leistung; Typtag <i>sehr heiß</i>	97
Abb. 12.8: Dauer; Typtag <i>sehr kalt</i>	98
Abb. 12.9: Dauer; Typtag <i>kalt</i>	98
Abb. 12.10: Dauer; Typtag <i>kühl</i>	98
Abb. 12.11: Dauer; Typtag <i>gemäßigt</i>	98
Abb. 12.12: Dauer; Typtag <i>warm</i>	99
Abb. 12.13: Dauer; Typtag <i>heiß</i>	99
Abb. 12.14: Dauer; Typtag <i>sehr heiß</i>	99
Abb. 12.15: Kurzzeitiges LM-Potenzial im Flächenbestand; Typtag <i>sehr kalt</i>	100
Abb. 12.16: Kurzzeitiges LM-Potenzial im Flächenbestand; Typtag <i>kalt</i>	100
Abb. 12.17: Kurzzeitiges LM-Potenzial im Flächenbestand; Typtag <i>kühl</i>	100
Abb. 12.18: Kurzzeitiges LM-Potenzial im Flächenbestand; Typtag <i>gemäßigt</i>	100
Abb. 12.19: Kurzzeitiges LM-Potenzial im Flächenbestand; Typtag <i>warm</i>	101
Abb. 12.20: Kurzzeitiges LM-Potenzial im Flächenbestand; Typtag <i>heiß</i>	101
Abb. 12.21: Kurzzeitiges LM-Potenzial im Flächenbestand; Typtag <i>sehr heiß</i>	101
Abb. 12.22: Langzeit-Potenzial im Flächenbestand; Typtag <i>sehr kalt</i>	102
Abb. 12.23: Langzeit-Potenzial im Flächenbestand; Typtag <i>kalt</i>	102
Abb. 12.24: Langzeit Potenzial im Flächenbestand: Typtag <i>kühl</i>	102
Abb. 12.25: Langzeit Potenzial im Flächenbestand: Typtag <i>gemäßigt</i>	102
Abb. 12.26: Langzeit Potenzial im Flächenbestand: Typtag <i>warm</i>	103
Abb. 12.27: Langzeit Potenzial im Flächenbestand: Typtag <i>heiß</i>	103
Abb. 12.28: Langzeit Potenzial im Flächenbestand: Typtag <i>sehr heiß</i>	103
Abb. 12.29: elektrisches Kurzzeitpotenzial am Typtag <i>sehr kalt</i>	104
Abb. 12.30: elektrisches Kurzzeitpotenzial am Typtag <i>kalt</i>	104
Abb. 12.31: elektrisches Kurzzeitpotenzial am Typtag <i>kühl</i>	104
Abb. 12.32: elektrisches Kurzzeitpotenzial am Typtag <i>gemäßigt</i>	104
Abb. 12.33: elektrisches Kurzzeitpotenzial am Typtag <i>warm</i>	105
Abb. 12.34: elektrisches Kurzzeitpotenzial am Typtag <i>heiß</i>	105
Abb. 12.35: elektrisches Kurzzeitpotenzial am Typtag <i>sehr heiß</i>	105
Abb. 12.36: elektrisches Langzeit-Potenzial im Flächenbestand am Typtag <i>sehr kalt</i>	106
Abb. 12.37: elektrisches Langzeit-Potenzial im Flächenbestand am Typtag <i>kalt</i>	106
Abb. 12.38: elektrisches Langzeit-Potenzial im Flächenbestand am Typtag <i>kühl</i>	106
Abb. 12.39: elektrisches Langzeit-Potenzial im Flächenbestand am Typtag <i>gemäßigt</i>	106
Abb. 12.40: elektrisches Langzeit-Potenzial im Flächenbestand am Typtag <i>warm</i>	107
Abb. 12.41: elektrisches Langzeit-Potenzial im Flächenbestand am Typtag <i>heiß</i>	107
Abb. 12.42: elektrisches Langzeit-Potenzial im Flächenbestand am Typtag <i>sehr heiß</i>	107

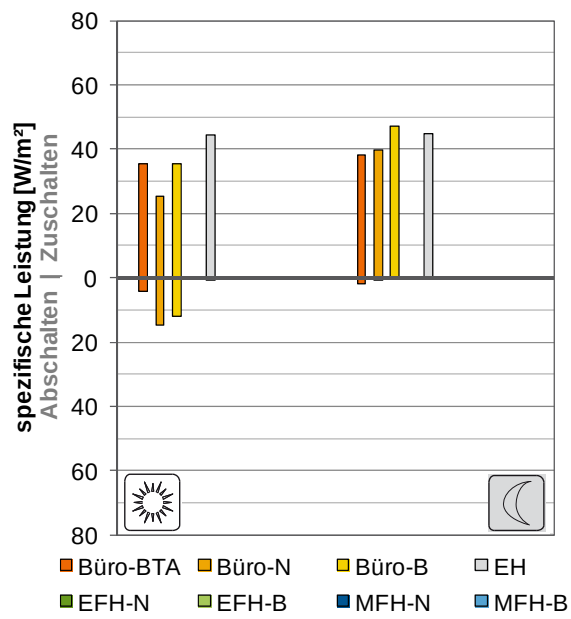
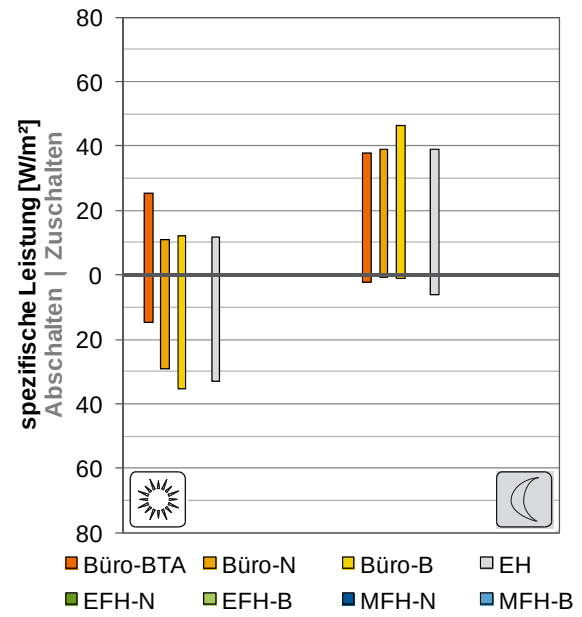
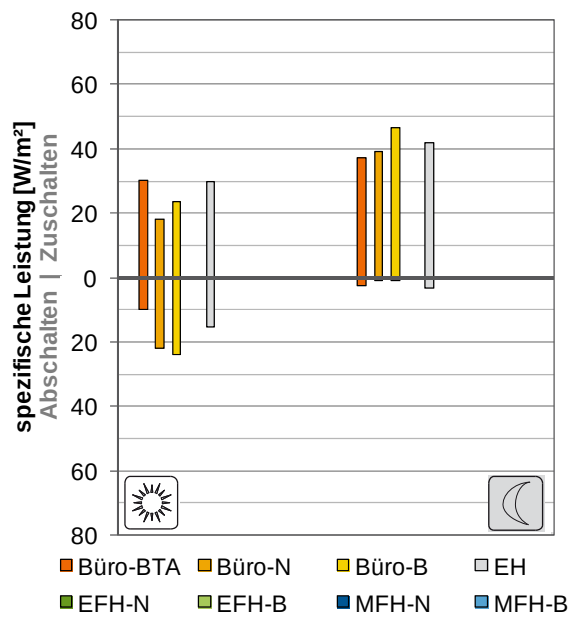
11. Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1: technisches Lastmanagementpotenzial in Deutschland nach Sektoren [5]	3
Tab. 3.1: Wetterbedingungen innerhalb der Sensitivitätsanalyse.....	9
Tab. 3.2: Bauliche und technische Kennwerte des <i>Grundmodells</i>	10
Tab. 3.3: Baukonstruktive und technische Kennwerte der Variation <i>Bestand</i> zum <i>Grundmodell</i>	11
Tab. 3.4: Baukonstruktive und technische Kennwerte der Variation <i>Neubau+</i> zum <i>Grundmodell</i>	12
Tab. 4.1: Gebäudekategorien und Gebäudetypologien, abgeändert nach [12].....	25
Tab. 4.2: Netto-Stromverbrauch der Verbrauchergruppen in Deutschland nach [14].....	26
Tab. 4.3: Endenergieverbrauch der privaten Haushalte 2008 bis 2050. Anteile des Endenergieverbrauchs nach Verwendungszwecken ohne Mobilität nach [16].....	27
Tab. 4.4: Typische baukonstruktive Merkmale für ein Mehrfamilienhaus der 60-er Jahre.	29
Tab. 4.5: Referenz und Bestszenario des spezifischen Heizenergiebedarfs im Bestand und in sanierten Gebäuden [16]	29
Tab. 4.6: Prognose-Berechnungen zur Anzahl der Wohneinheiten unterschieden nach Gebäudegröße, welche mit Wärmepumpen beheizt werden nach [24].....	30
Tab. 4.7: Nutzfläche des Gebäudebestands Stand 2011 in Deutschland [Mio. m ²] nach [18], [19], [25] und [27].	32
Tab. 4.8: Baukonstruktiver Kennwert (U-Wert) von Bauteilen massiver Bauweise im Bestand von Nichtwohngebäuden nach Altersklassen nach [12]. Die Werte in kursiv und in Klammern beziehen sich auf [28].	33
Tab. 4.9: Übersicht der gängigsten Raumkonditionierungssysteme im Bestand für unterschiedliche Gebäudetypologien. Stand 1991 nach [29]	33
Tab. 5.1: Baukonstruktive und technische Kennwerte der Modelle <i>EFH-Neubau</i> und <i>Bestand</i>	36
Tab. 5.2: Baukonstruktive und technische Kennwerte der Modelle <i>MFH-Neubau</i> und <i>Bestand</i>	37
Tab. 5.3: Baukonstruktive und technische Kennwerte der Modelle <i>Büro-Neubau</i> und <i>Bestand</i>	38
Tab. 5.4: Technische Kennwerte der Variation <i>Büro-BTA</i>	39
Tab. 5.5: Baukonstruktive und technische Kennwerte des Modells <i>Einzelhandel</i>	40
Tab. 5.6: Übersicht der sieben Typtage und deren mittlere Außentemperatur und Strahlung, sowie deren Häufigkeit im Jahr	41
Tab. 5.7: Übersicht der Behaglichkeitsgrenzen für die untersuchten Gebäudemodelle	42
Tab. 5.8: Bewertung der Kurzzeitpotenziale.....	68
Tab. 5.9: Bewertung der Kurzzeitpotenziale und deren Häufigkeit	79
Tab. 5.10: Zusammenfassende Jahreszeit-Bewertung der kurzzeitigen LM-Potenziale der untersuchten Gebäudetypologien	79

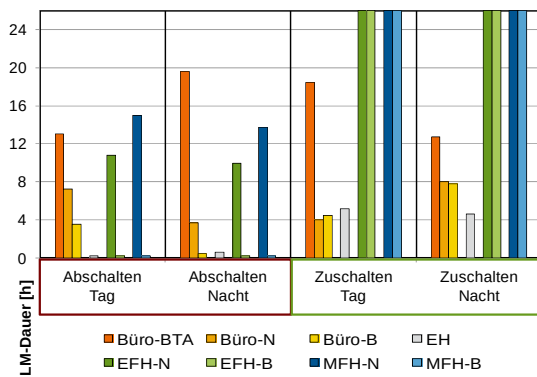
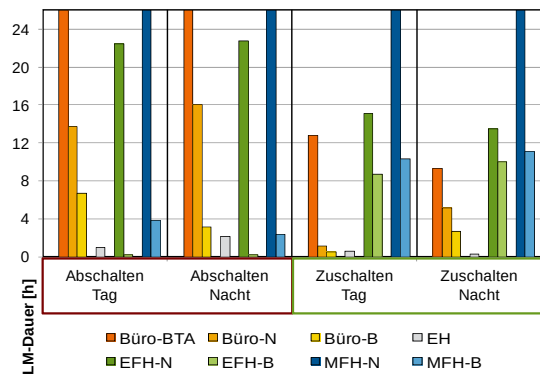
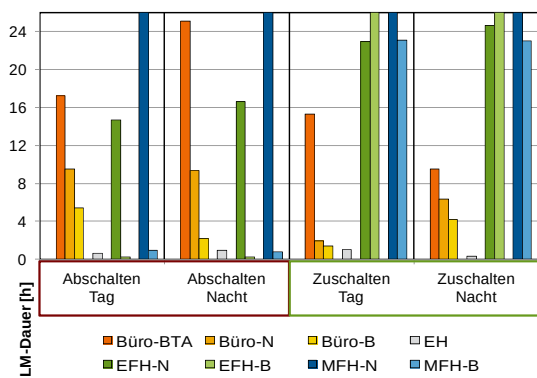
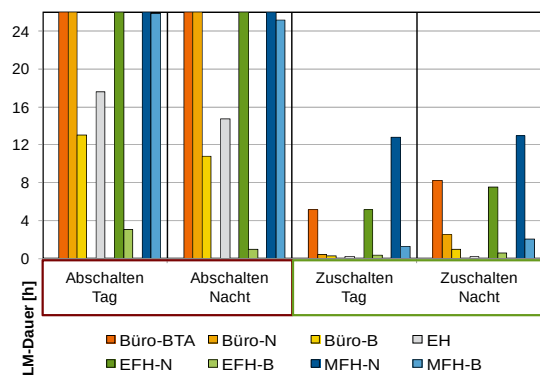
12. Anhang

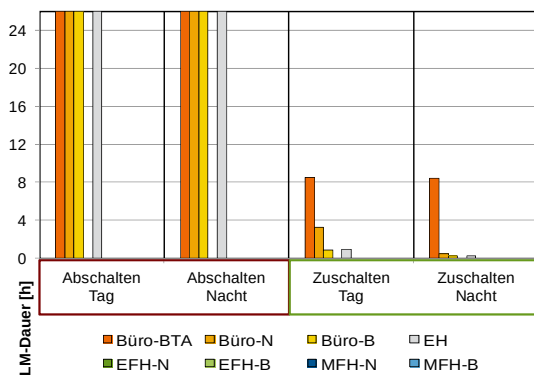
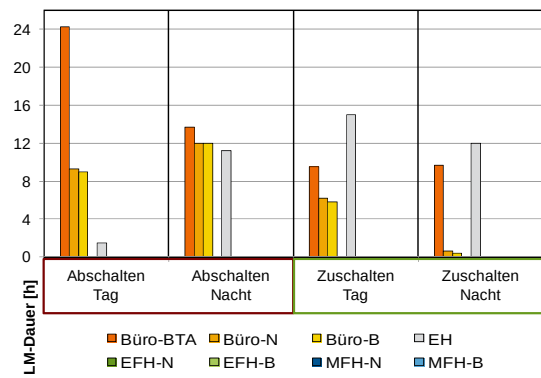
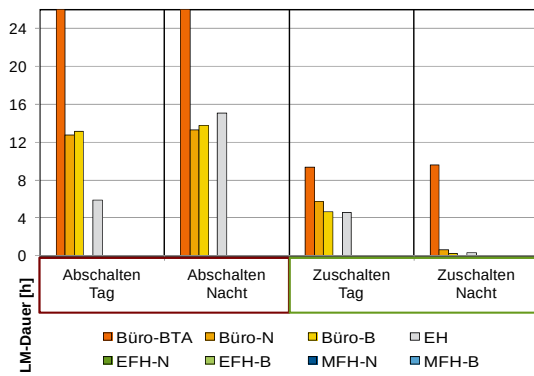
12.1 LM-Leistung

Abb. 12.1: Ab- und zuschaltbare Leistung; Typtag *sehr kalt*Abb. 12.3: Ab- und zuschaltbare Leistung; Typtag *kühl*Abb. 12.2: Ab- und zuschaltbare Leistung; Typtag *kalt*Abb. 12.4: Ab- und zuschaltbare Leistung; Typtag *gemäßigt*

Abb. 12.5: Ab- und zuschaltbare Leistung; Typtag *warm*Abb. 12.7: Ab- und zuschaltbare Leistung; Typtag *sehr heiß*Abb. 12.6: Ab- und zuschaltbare Leistung; Typtag *heiß*

12.2 LM-Dauer

Abb. 12.8: Dauer; Typtag *sehr kalt*Abb. 12.10: Dauer; Typtag *kühl*Abb. 12.9: Dauer; Typtag *kalt*Abb. 12.11: Dauer; Typtag *gemäßigt*

Abb. 12.12: Dauer; Typtag *warm*Abb. 12.14: Dauer; Typtag *sehr heiß*Abb. 12.13: Dauer; Typtag *heiß*

12.3 Kurzzeitiges LM-Potenzial im Flächenbestand

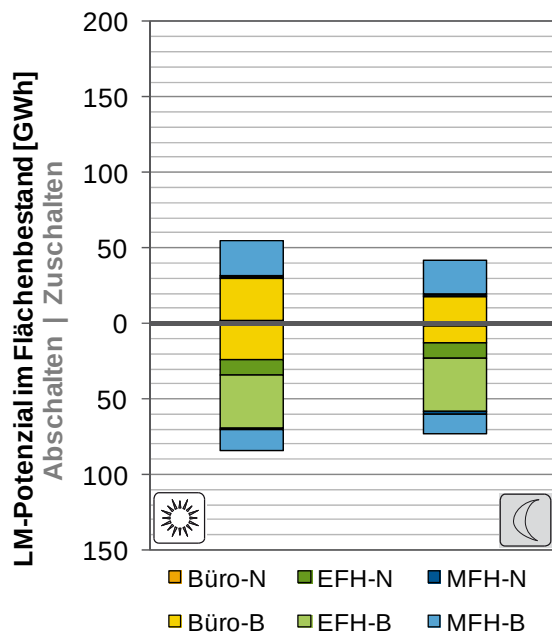


Abb. 12.15: Kurzzeitiges LM-Potenzial im Flächenbestand; Typtag sehr kalt

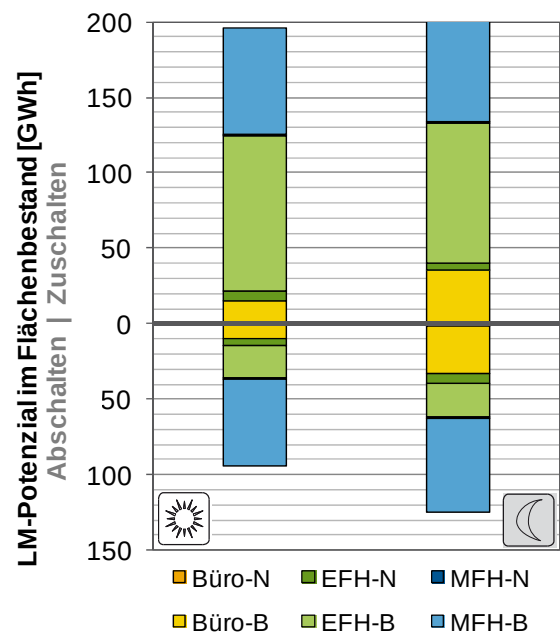


Abb. 12.17: Kurzzeitiges LM-Potenzial im Flächenbestand; Typtag kühl

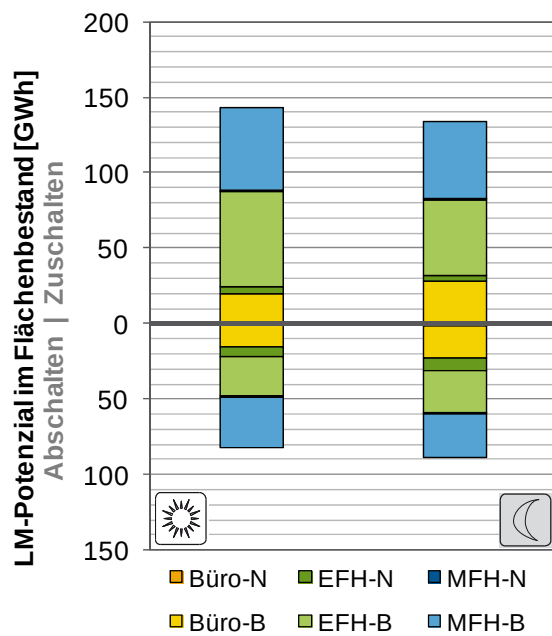


Abb. 12.16: Kurzzeitiges LM-Potenzial im Flächenbestand; Typtag kalt

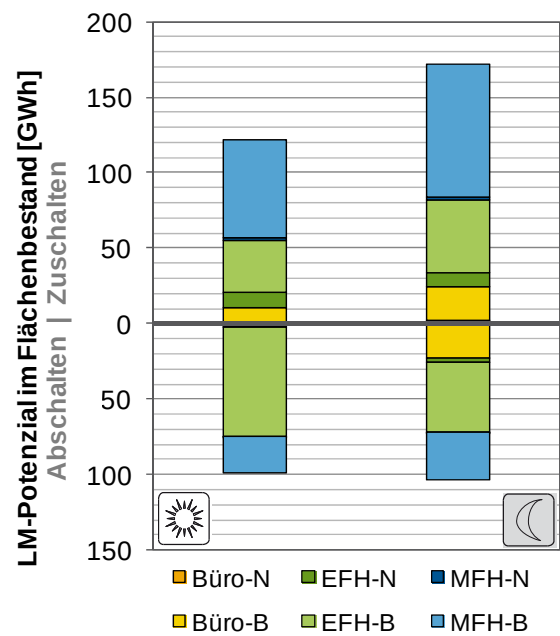


Abb. 12.18: Kurzzeitiges LM-Potenzial im Flächenbestand; Typtag gemäßigt

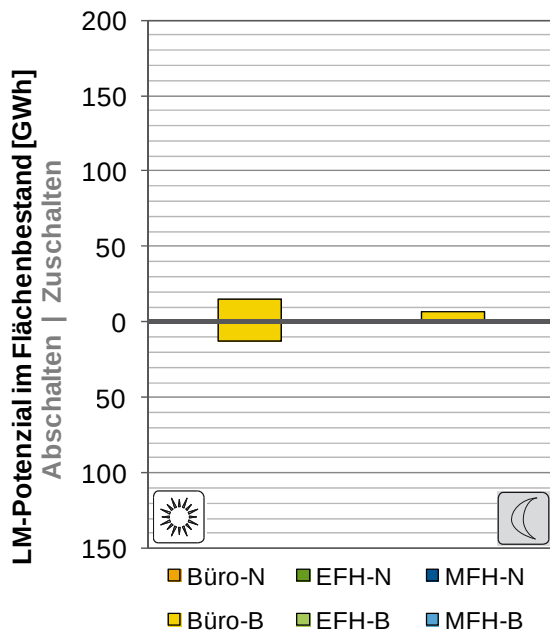


Abb. 12.19: Kurzzeitiges LM-Potenzial im Flächenbestand; Typtag warm

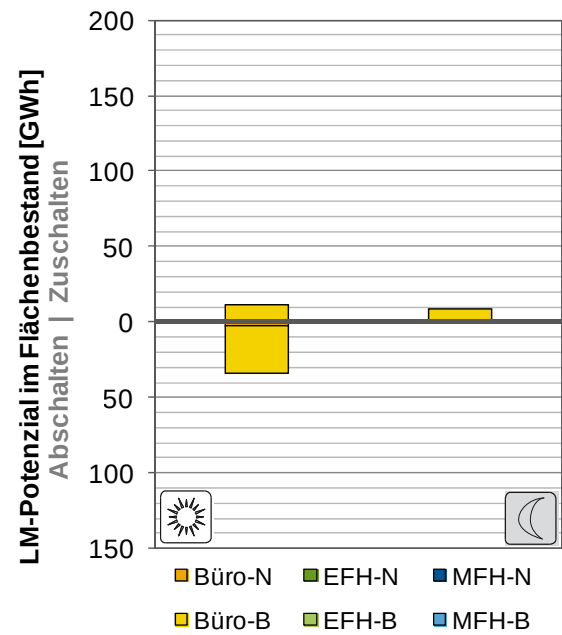


Abb. 12.21: Kurzzeitiges LM-Potenzial im Flächenbestand; Typtag sehr heiß

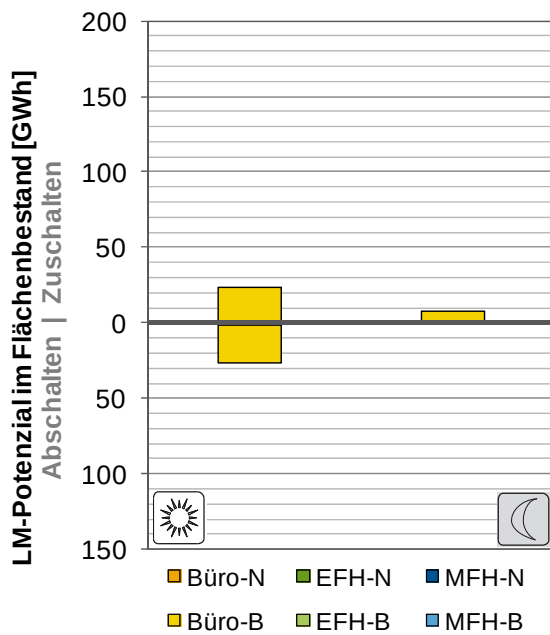
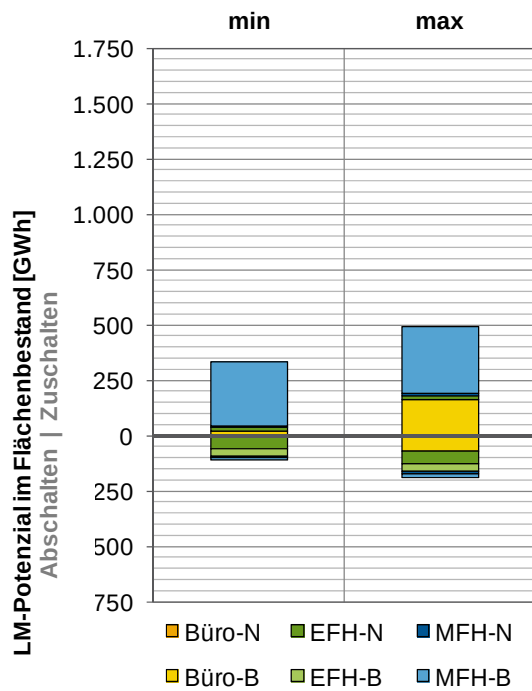
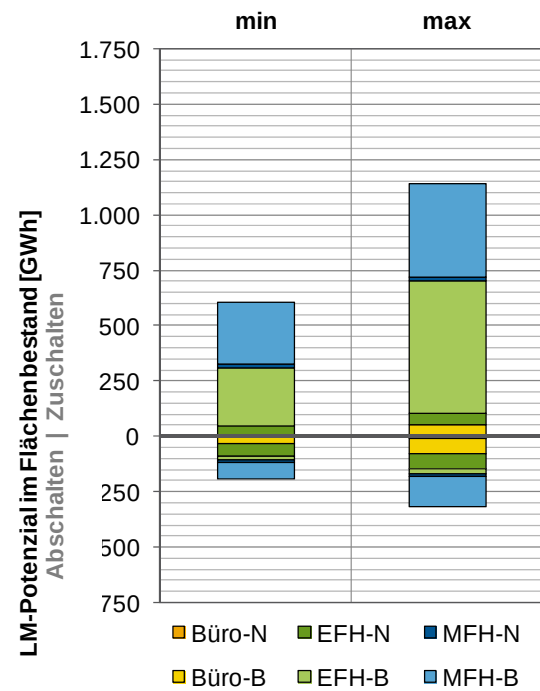
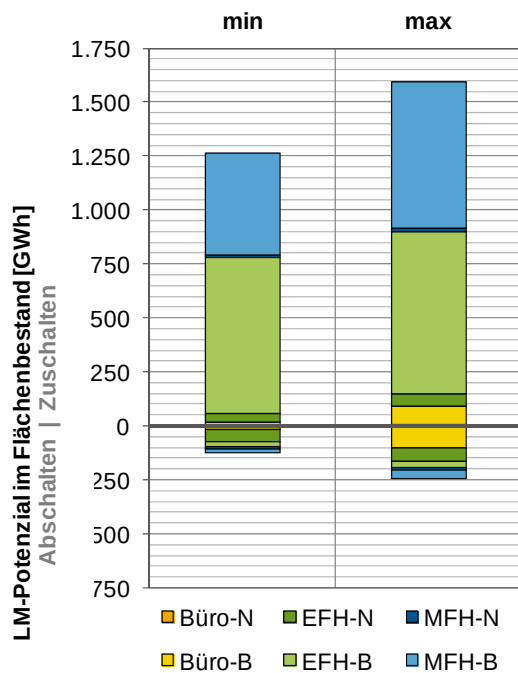
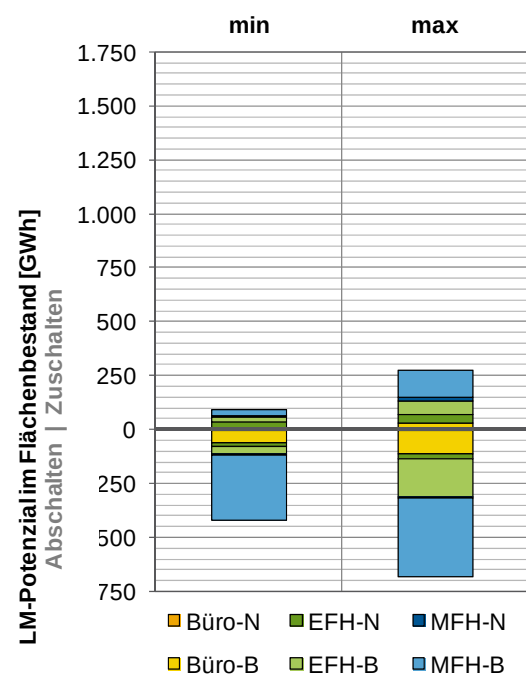
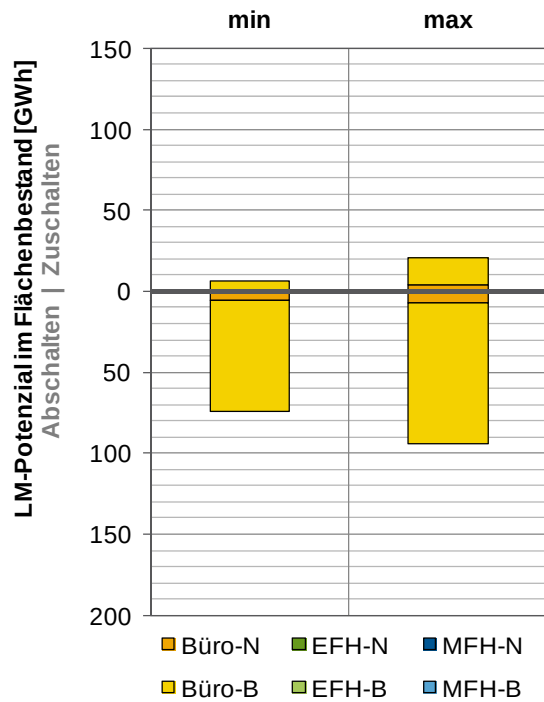
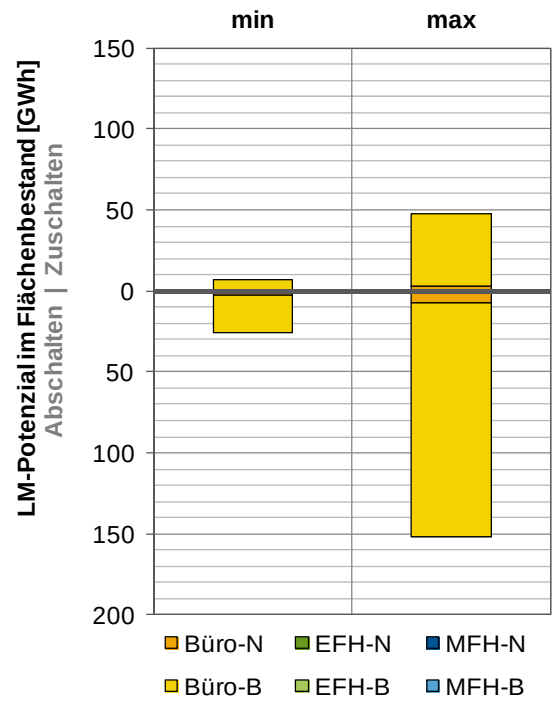
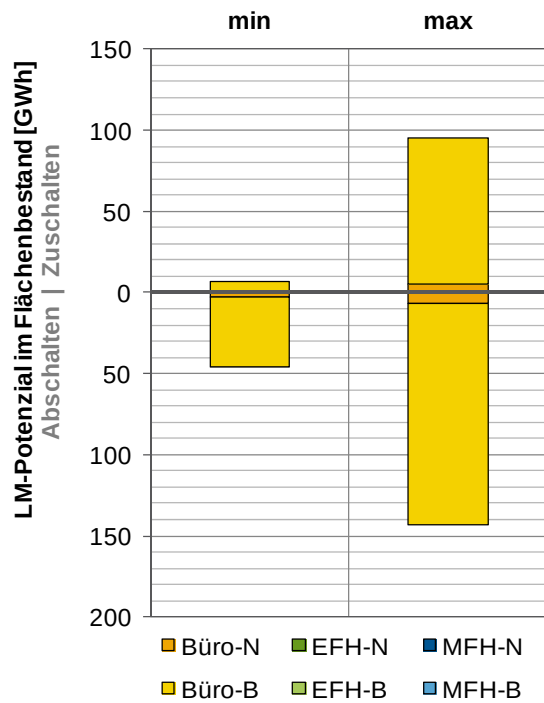


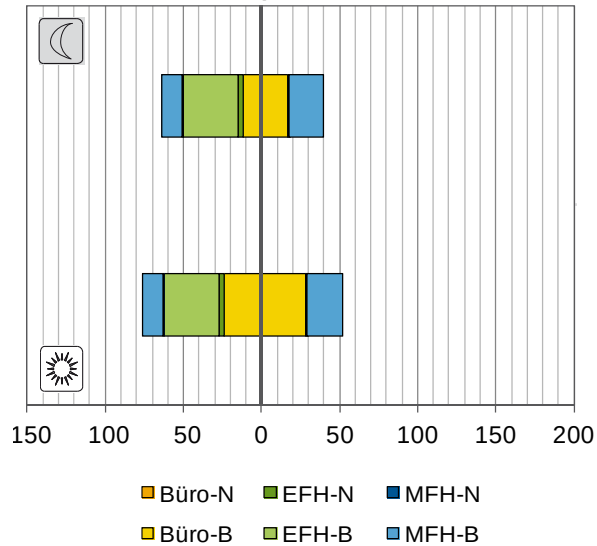
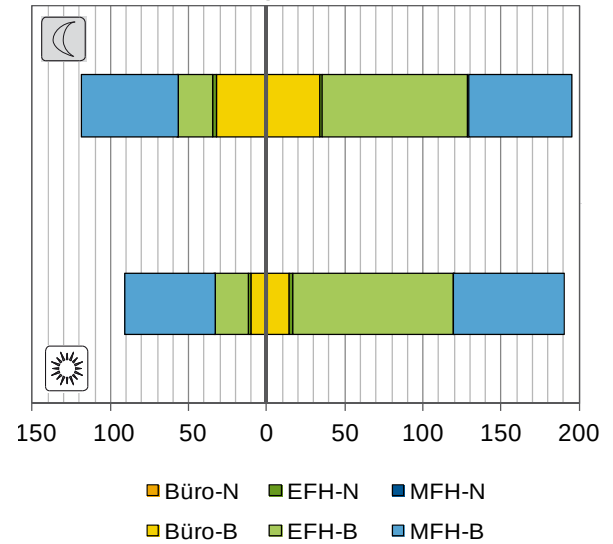
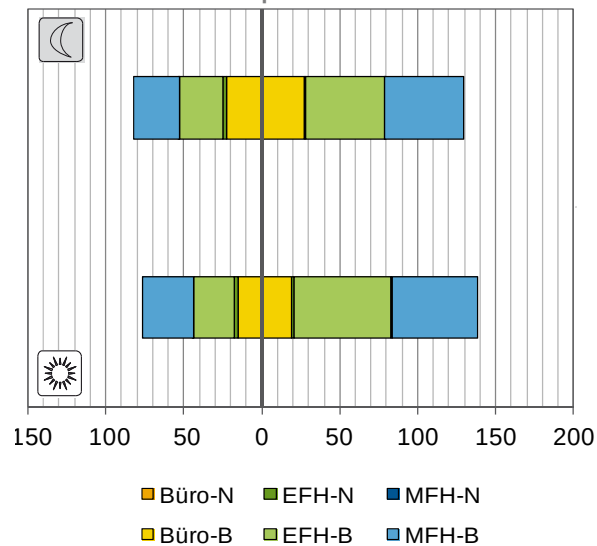
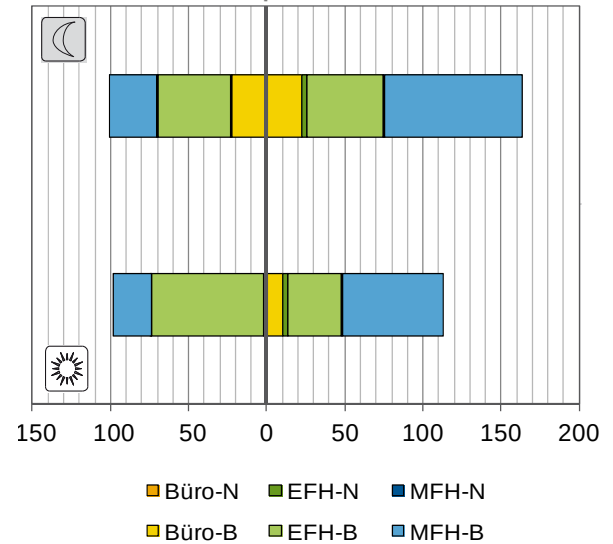
Abb. 12.20: Kurzzeitiges LM-Potenzial im Flächenbestand; Typtag heiß

12.4 Langzeitpotenzial im Flächenbestand

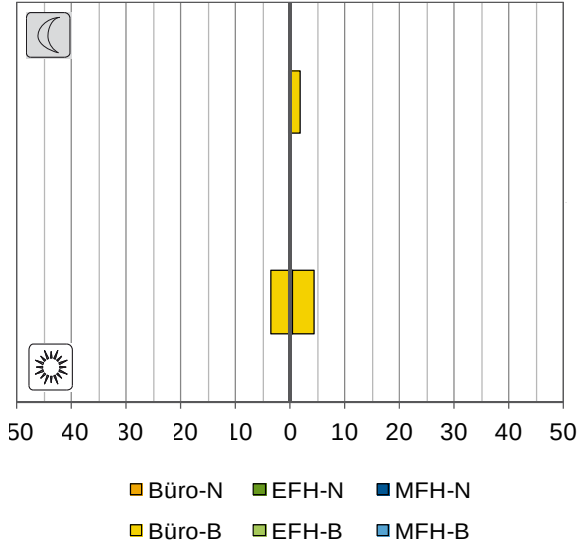
Abb. 12.22: Langzeit-Potenzial im Flächenbestand; Typtag *sehr kalt*Abb. 12.24: Langzeit Potenzial im Flächenbestand; Typtag *kühl*Abb. 12.23: Langzeit-Potenzial im Flächenbestand; Typtag *kalt*Abb. 12.25: Langzeit Potenzial im Flächenbestand; Typtag *gemäßigt*

Abb. 12.26: Langzeit Potenzial im Flächenbestand: Typtag *warm*Abb. 12.28: Langzeit Potenzial im Flächenbestand: Typtag *sehr heiß*Abb. 12.27: Langzeit Potenzial im Flächenbestand: Typtag *heiß*

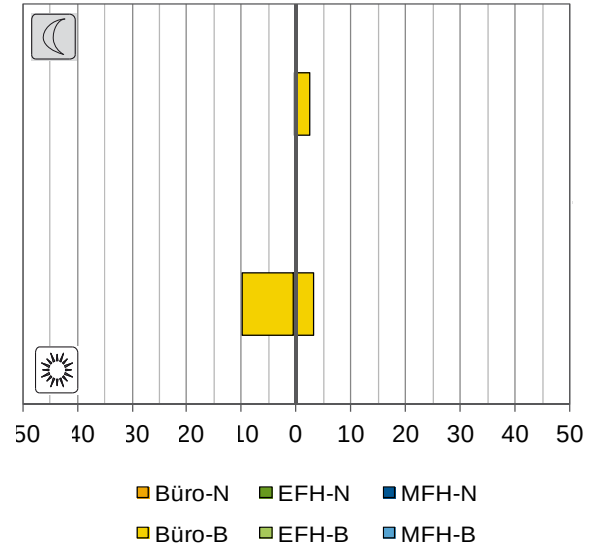
12.5 Elektrisches Kurzzeitpotenzial

elektrisches Potenzial im Flächenbestand [GWh]
Abschalten | ZuschaltenAbb. 12.29: elektrisches Kurzzeitpotenzial am Typtag *sehr kalt*elektrisches Potenzial im Flächenbestand [GWh]
Abschalten | ZuschaltenAbb. 12.31: elektrisches Kurzzeitpotenzial am Typtag *kühl*elektrisches Potenzial im Flächenbestand [GWh]
Abschalten | ZuschaltenAbb. 12.30: elektrisches Kurzzeitpotenzial am Typtag *kalt*elektrisches Potenzial im Flächenbestand [GWh]
Abschalten | ZuschaltenAbb. 12.32: elektrisches Kurzzeitpotenzial am Typtag *gemäßigt*

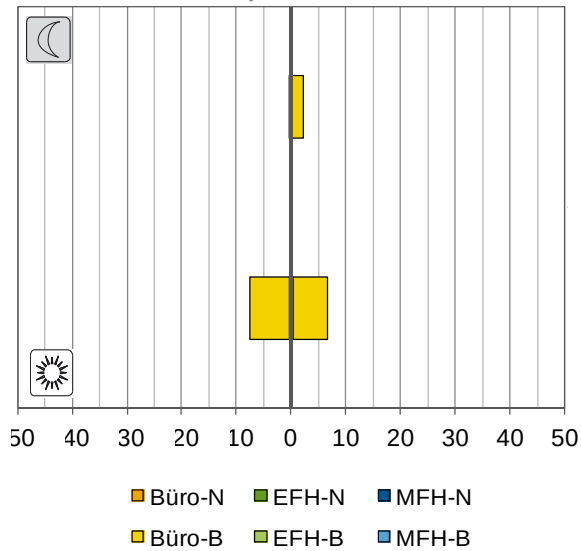
elektrisches Potenzial im Flächenbestand [GWh]
Abschalten | Zuschalten

Abb. 12.33: elektrisches Kurzzeitpotenzial am Typtag *warm*

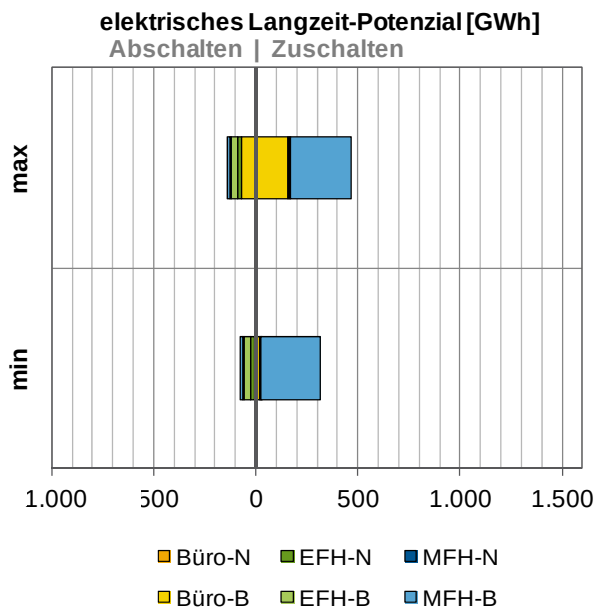
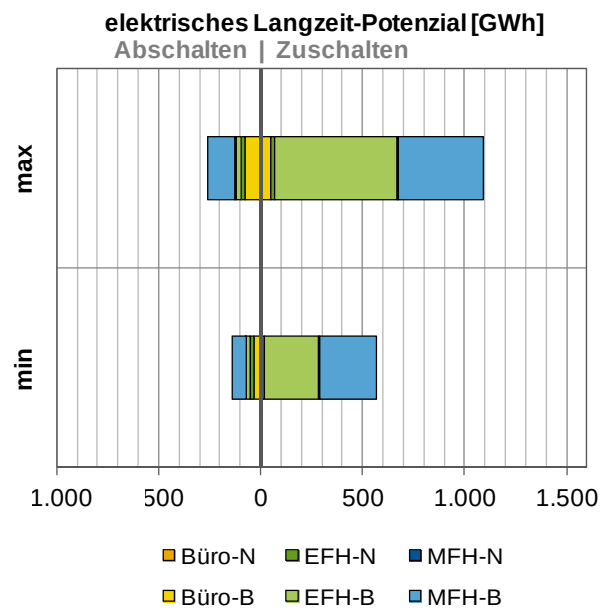
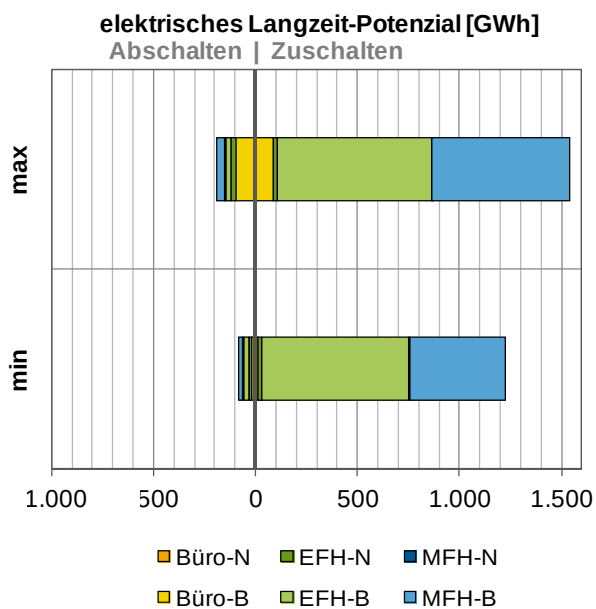
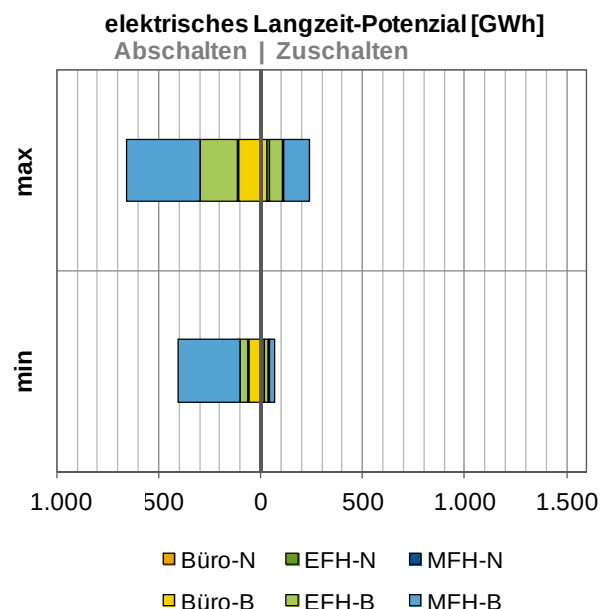
elektrisches Potenzial im Flächenbestand [GWh]
Abschalten | Zuschalten

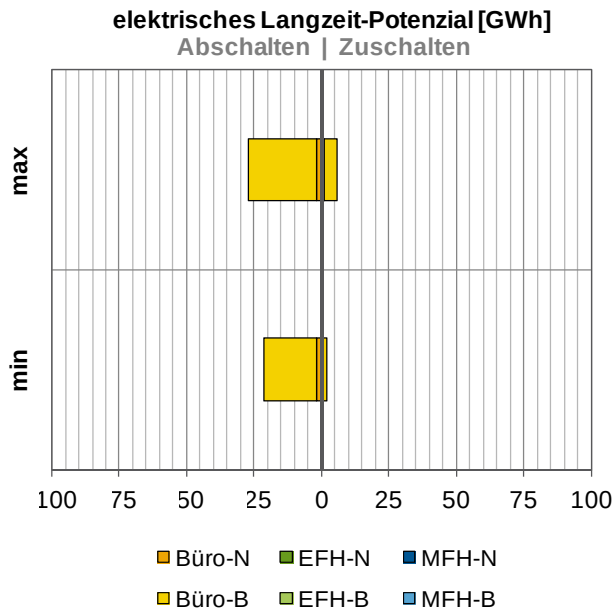
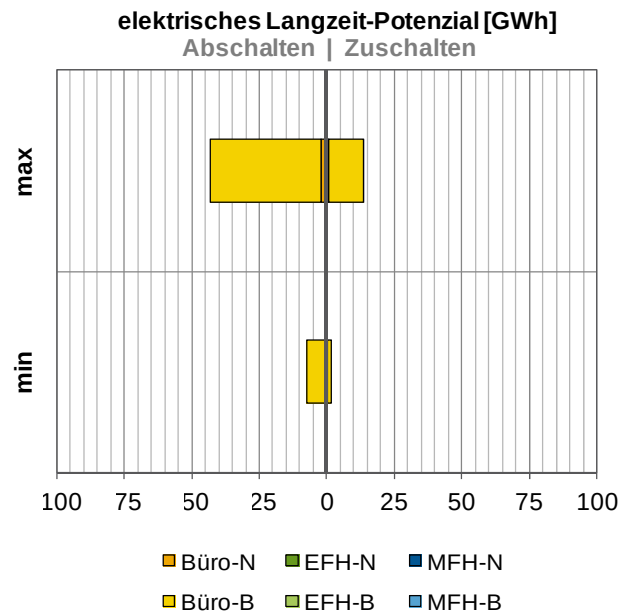
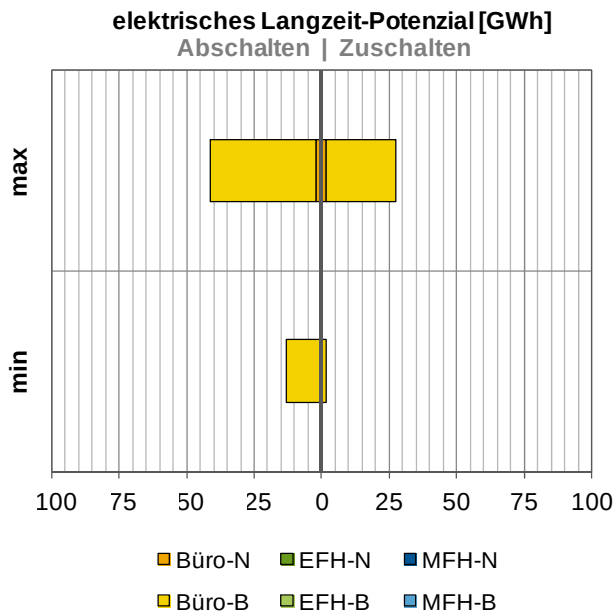
Abb. 12.35: elektrisches Kurzzeitpotenzial am Typtag *sehr heiß*

elektrisches Potenzial im Flächenbestand [GWh]
Abschalten | Zuschalten

Abb. 12.34: elektrisches Kurzzeitpotenzial am Typtag *heiß*

12.6 Elektrisches Langzeit-Potenzial

Abb. 12.36: elektrisches Langzeit-Potenzial im Flächenbestand am Typtag *sehr kalt*Abb. 12.38: elektrisches Langzeit-Potenzial im Flächenbestand am Typtag *kühl*Abb. 12.37: elektrisches Langzeit-Potenzial im Flächenbestand am Typtag *kalt*Abb. 12.39: elektrisches Langzeit-Potenzial im Flächenbestand am Typtag *gemäßigt*

Abb. 12.40: elektrisches Langzeit-Potenzial im Flächenbestand am Typtag *warm*Abb. 12.42: elektrisches Langzeit-Potenzial im Flächenbestand am Typtag *sehr heiß*Abb. 12.41: elektrisches Langzeit-Potenzial im Flächenbestand am Typtag *heiß*