

BAUFORSCHUNG FÜR DIE PRAXIS, BAND 107

Gerhard Hausladen, Klaus Klimke, Jakob Schneegans, Timm Rössel

Unterschiedliche Torsysteme in Industriegebäuden unter Berücksichtigung energetischer, bauklimatischer und wirtschaftlicher Aspekte

Die vorliegende Arbeit wurde unter dem Förderkennzeichen
II 3-F20-11-1-051/SWD-10.08.18.7-12-08 vom Bundesinstitut für Bau,- Stadt- und
Raumforschung, Bonn, mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau gefördert.
Für den Inhalt sind allein die Verfasser verantwortlich.

Druck und Weiterverarbeitung:

IRB Mediendienstleistungen des
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB, Stuttgart

Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

© by **Fraunhofer IRB Verlag**, 2013

ISBN 978-3-8167-9155-3

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB

Postfach 80 04 69, 70504 Stuttgart

Telefon 0711 970-2500, Telefax 0711 970-2508

E-Mail info@irb.fraunhofer.de

URL www.baufachinformation.de

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk ist einschließlich seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Fraunhofer IRB Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warennamen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen werden oder aus ihnen zitiert werden, so kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.



Unterschiedliche Torsysteme in Industriegebäuden unter Berücksichtigung energetischer, bauklimatischer und wirtschaftlicher Aspekte

Endbericht



Unterschiedliche Torsysteme in Industriegebäuden unter Berücksichtigung energetischer, bauklimatischer und wirtschaftlicher Aspekte

Endbericht

Impressum:

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

Dipl.-Wirt.-Ing. Klaus Klimke
Dipl.-Ing. Jakob Schneegans
Dipl.-Ing. (FH) Timm Rössel, M.Sc.

Studentische Mitarbeiter:
Johannes Scholten
Christine Hans

München, Juni 2013

Das Forschungsvorhaben wurde unterstützt von:

ASO GmbH Antriebs- und Steuerungstechnik, BEA s.a., Bundesverband Antriebs- und Steuerungstechnik.Tore (BAS.T), Entrematic Germany GmbH, FEIG ELECTRONIC GmbH, GfA-Gesellschaft für Antriebstechnik, Dr.-Ing. Hammann GmbH & Co. KG, HÖRMANN KG Antriebstechnik, Marantec Antriebs- und Steuerungstechnik GmbH & Co. KG, MFZ Antriebe GmbH & Co. KG, Novoferm tormatic GmbH, SOMMER Antriebs- und Funktechnik GmbH

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

(Aktenzeichen: II 3-F20-11-1-051 / SWD-10.08.18.7-12.08)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichts liegt beim Autor.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	6
2. Zielbeschreibung	7
3. Grundlagen	8
3.1 Wärmeverluste durch Tore	8
3.2 Unterschiedliche Tore in Industriegebäuden	9
3.3 Torsteuerung und Sensorik	12
4. Untersuchungsmethodik	14
4.1 Thermische Gebäudesimulation	14
4.2 Überprüfung des Rechenansatzes anhand von Messung und Simulation	17
5. Entwicklung unterschiedlicher Gebäudemodelle	20
5.1 Vielseitigkeit von Industriegebäuden	20
5.2 Gebäudemodell <i>Fertigung</i>	21
5.3 Gebäudemodell <i>Werkstatt</i>	22
5.4 Gebäudemodell <i>Lager</i>	23
5.5 Wärme- und Kühlbedarf der Gebäudemodelle ohne Tore in der Fassade	24
6. Energetische Beurteilung der torspezifischen Einflussgrößen	25
6.1 Einleitung	25
6.2 Variation der Öffnungsdauer	25
6.3 Variation des U-Werts und der Luftdurchlässigkeitsklasse	28
6.4 Raumtemperaturabfall bei geöffnetem Tor	31
6.5 Einfluss von mehrseitig geöffneten Toren	34
6.6 Elektrischer Energiebedarf von Torsteuerung, Sensorik und Antrieb	35
6.7 Zusammenfassung	39
7. Szenarioentwicklung und nutzungsbezogene Toröffnungscharakteristik	40
7.1 Szenarioübersicht und Vorgehensweise	40
7.2 Erläuterung der Szenario-Energiegrafik	42
7.3 Erläuterung der Szenario-Kostengrafik	43
7.4 Szenarien des Gebäudemodells <i>Fertigung</i>	44
7.5 Szenarien des Gebäudemodells <i>Werkstatt</i>	50
7.6 Szenarien des Gebäudemodells <i>Lager</i>	56
7.7 Zusammenfassung	61

8. Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz und des thermischen Komforts.....	62
8.1 Maßnahmenübersicht und Vorgehensweise.....	62
8.2 Erläuterung der Energieeinspargrafik.....	63
8.3 Verringerung längerer Offenstehzeiten durch schnell laufende Tore	64
8.4 Verringerung längerer Offenstehzeiten durch LKW Be-/ Entladung im Gebäude.....	66
8.5 Verringerung der Lüftungswärmeverluste durch objektgrößenangepasste Toröffnung	67
8.6 Verringerung der Lüftungswärmeverluste durch Schleusen.....	69
8.7 Erhöhung des thermischen Komforts durch Luftschleier-/ Luftwandanlagen.....	73
8.8 Zusammenfassung.....	77
9. Fazit.....	78
10. Quellenverzeichnis.....	80
11. Abbildungsverzeichnis	82
12. Tabellenverzeichnis	86
13. Anhang	87
13.1 Fragebogen „Torsysteme im Industriebau“	87
13.2 Druckbeiwerte der Gebäudemodelle <i>Fertigung, Werkstatt, Lager</i>	90

1. Einleitung

Das nachhaltige Bauen hat in Deutschland mittlerweile eine hohe Bedeutung erlangt. Das Anforderungsniveau hinsichtlich energiesparendem Wärmeschutz und effizienter Anlagentechnik von Immobilien hat sich im Zuge der Novellierungen der Energieeinsparverordnung [EnEV 2009] stetig erhöht. Insbesondere Forderungen an eine dichte Gebäudehülle und eine hohe Wärmedämmung zur Verringerung der Wärmeverluste sind dabei zu nennen.

Industriegebäude zeichnen sich im Gegensatz zum Wohn- bzw. Verwaltungsbau durch hohe Wärmelasten sowie eine große Bandbreite unterschiedlicher Nutzungen aus, was auf die Vielfältigkeit der dort stattfindenden Prozesse zurückzuführen ist [Rössel et al. 2012, 17]. Die Treibhausgasemissionen der Sektoren Industrie und Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) betragen ca. 50 % der in Deutschland verursachten Emissionen. Dabei wird im Sektor Industrie rund 40 % des eingesetzten Brennstoffes für die Erzeugung von Raumwärme, Prozesswärme, mechanischer Energie sowie die Prozesswärmeerzeugung mit Strom sowie für Informations- und Kommunikationsanwendungen benötigt [Wietschel et al. 2010, 691].

Nach einer aktuellen Studie beläuft sich der Bestand an beheizten Hallengebäuden auf etwa 215.000, die zwischen den Jahren 1980 und 2009 errichtet wurden. Schätzungsweise 40 % davon sind Fabrik- und Werkstattgebäude. Dabei beläuft sich in einer ersten Hochrechnung der Gesamtheizenergieverbrauch von (beheizten) Hallengebäuden auf rund 61 Mrd. kWh/a – dies entspricht ca. 30 % des Jahresendenergieverbrauchs an Raumwärme für Nichtwohngebäude [Oschatz et al. 2011, 42, 51].

Gemeinsamer Bestandteil aller Gebäude dieser Typologie sind Industrietore. Diese verhindern Luftströmungen durch Öffnungen in der Gebäudehülle, die für die Zulieferung und den Abtransport von Gütern erforderlich sind, und stellen somit sicher, dass keine unnötigen Wärmeverluste entstehen. Öffnungen in der Gebäudehülle können sich demnach - abhängig von der geographischen Lage des Gebäudes - negativ auf die Energiebilanz und die raumklimatische Situation auswirken. Beim Offenstehen eines Tores wirken diverse Einflussfaktoren, wie zum Beispiel hohe Volumenströme bei großen Temperaturdifferenzen zwischen Innen und Außen, insbesondere zur

kalten Jahreszeit. Dies führt zu einer unbehaglichen Raumklimasituation und erhöht den Heizbedarf des Gebäudes.

Ein bedeutendes Potential zur Energieeinsparung erschließt sich durch die Verringerung der Wärmeverluste von Toren, z.B. durch eine Reduktion der Öffnungsdauer, wie in dieser Studie aufgezeigt wird. Technische Systeme wie Sensoren können durch einen automatisierten Torbetrieb helfen, unerwünschte Toröffnungen zu vermeiden und die Öffnungsdauer auf ein notwendiges Minimum zu begrenzen.

Mit der Entwicklung von mehreren, an der Praxis orientierten Szenarien hinsichtlich der Toröffnungshäufigkeit und Offenstehdauer ist es möglich, effiziente Tortypen unter energetischen und wirtschaftlichen Aspekten zu identifizieren.

Zusätzlich werden verschiedene Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz und des thermischen Komforts, z.B. ein bedarfsgerechtes, höhenvariables Öffnen untersucht. Ziel hierbei ist die Erarbeitung von konkreten Vorschlägen, um die Energieeffizienz der Gebäude zu erhöhen.

Die Studie richtet sich in erster Linie an Planer, Errichter und Betreiber von Gebäuden, um den energetischen Einfluss von Toren im täglichen Gebäudebetrieb aufzuzeigen.

2. Zielbeschreibung

Gegenstand der Studie ist die Untersuchung von Torsystemen und den damit verbundenen energetischen, raumklimatischen und wirtschaftlichen Auswirkungen auf das Gebäude.

Betrachtet man die auf dem Markt gängigen Torsysteme, gibt es hier große Unterschiede hinsichtlich Aufbau, Material, Dämmung, Öffnungs- und Schließgeschwindigkeiten und Steuerungstechniken, die in der Studie untersucht und deren Wechselwirkungen mit dem Gebäude analysiert werden.

Basis der Forschungsarbeit bilden Simulationsrechnungen mit einem thermischen Gebäudesimulationsmodell, welches sowohl gebäudespezifische Parameter (z.B. unterschiedliche Nutzungszeiten, interne Wärmelasten, Temperaturschichtung) als auch torspezifische Eigenschaften (z.B. U-Werte, Leckagen, Öffnungs- und Schließgeschwindigkeit) berücksichtigt. Für die Volumenstromberechnung bei einem einseitig geöffneten Tor wurde hierfür ein neues Lüftungsmodell in die Simulationssoftware implementiert, welches sowohl den thermisch bedingten als auch den windinduzierten Luftwechsel in der Berechnung des resultierenden Volumenstroms berücksichtigt.

Ergebnisse der Simulationsrechnungen sind energetische Größen wie z.B. der Heizwärme- und Kühlbedarf des Gebäudes sowie Transmissions- und Lüftungswärmeverluste der Tore.

In einem ersten Schritt werden anhand der definierten Gebäudemodelle (siehe Kapitel 5) die verschiedenen torspezifischen Parameter wie z.B. der Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) und verschiedene Öffnungsdauern untersucht, um deren Einfluss auf die Energiebilanz des Gebäudes bestimmen zu können, siehe Abbildung 1. Diese Zusammenhänge werden im Kapitel 6 behandelt.

Nach Identifikation der Einflussgrößen werden mehrere, an der Praxis orientierte Szenarien mit entsprechenden Toröffnungszyklen und Öffnungsdauern in den Simulationen abgebildet, siehe Kapitel 7. Ziel ist es, für das jeweilige Szenario effiziente Tortypen zu identifizieren, siehe Abbildung 2.

Darüber hinaus werden geeignete Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz und des thermischen Komforts in Kapitel 8 aufgezeigt, z.B. eine Verringerung von Lüftungswärmeverlusten durch eine objektgrößenangepasste Toröffnung oder eine Verkürzung der Offenstehzeiten durch Verwendung eines schnell laufenden Tores.

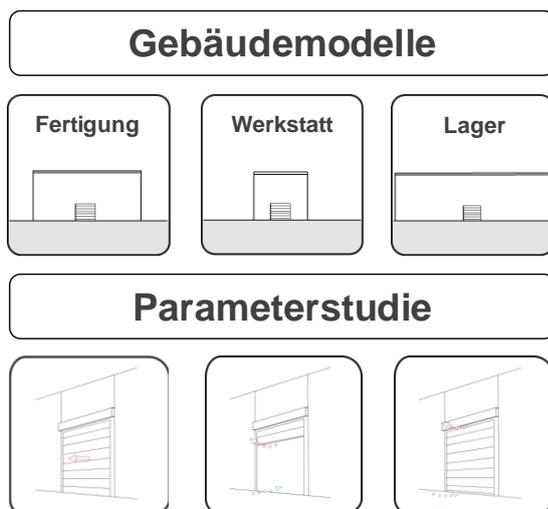


Abbildung 1: Vorgehensweise in der Parameterstudie: Untersuchung verschiedener torspezifischer Parameter, z.B. U-Wert, Öffnungsdauer und Leckagen (Luftdurchlässigkeit) des Tores

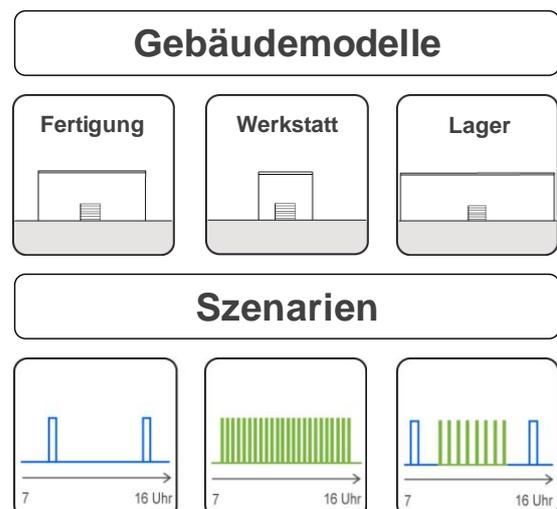


Abbildung 2: Szenarioentwicklung für die definierten Gebäudemodelle *Fertigung, Werkstatt, Lager*

3. Grundlagen

3.1 Wärmeverluste durch Tore

Wärmeverluste entstehen zum einen durch Wärmeleitung (Transmission) und Undichtigkeiten (Leckagen) bei geschlossenen Toren und zum anderen durch Lüftungswärmeverluste bei offenstehenden Toren. Bei geöffneten Toren tritt ein natürlicher Luftwechsel auf, der im Wesentlichen von der Öffnungsdauer, den Torabmessungen sowie der Temperaturdifferenz zwischen Innen und Außen und der Windgeschwindigkeit und Windrichtung beeinflusst wird.

3.1.1 Transmissionswärmeverluste



Für die Berechnung der Transmissionswärmeverluste ist der Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) des Tores relevant. Dieser wird für Tore nach [DIN EN 12428] bestimmt und liegt derzeit in

Abhängigkeit des jeweiligen Tortyps zwischen Werten von $0,5 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ (hochwärmedämmtes Sektionaltor) bis $5,9 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ (Folien-Rolltor), siehe Kapitel 3.2.

Hierbei ist anzumerken, dass der Wärmedurchgangskoeffizient von Toren verschiedener Hersteller nur eingeschränkt zu vergleichen ist. Bei den durchgeführten Literaturarbeiten stellte sich heraus, dass es keine „Einheitsgröße“ für Tore gibt, auf die sich die jeweiligen U-Werte beziehen. In der Angabe des U-Wertes ist die Torgröße jedoch ein nicht zu vernachlässigender Faktor, da sich das Verhältnis von Torblatt zu Rahmen mit steigender Torgröße ändert und das Torblatt in der Regel einen höheren Wärmedurchlasswiderstand gegenüber dem Torrahmen aufweist.

3.1.2 Wärmeverluste durch Leckagen



Tore weisen wie jedes mehrteilige Bauobjekt Fugen (Leckagen) auf, durch welche Luft ein- und ausdringen kann. Je nach Tortyp können diese Leckagen variieren. Aus diesem Grund wird die

Luftdurchlässigkeit von Toren allgemein nach [DIN EN 12426] bestimmt. Die europäische Norm legt dabei eine Klassifizierung für den Widerstand gegen die Luftdurchlässigkeit von Toren in geschlossenem Zustand fest. In Tabelle 1 sind die nach DIN EN 12426 festgelegten Luftdurchlässigkeitsklassen dargestellt. Die Luftdurchlässig-

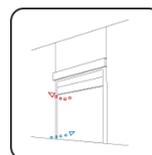
keitswerte beziehen sich dabei auf eine Druckdifferenz von 50 Pa und werden spezifisch in $\text{m}^3 \text{ Luft pro m}^2 \text{ Torfläche und Stunde}$ angegeben.

Tabelle 1: Luftdurchlässigkeitsklassen von Toren nach [DIN EN 12426]

Klasse	Luftdurchlässigkeit bei 50 Pa [$\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$]	Festlegung
0		keine Leistung bestimmt
1	24	
2	12	
3	6	
4	3	
5	1,5	
6		außergewöhnlich

Generell gilt: umso höher die Luftdurchlässigkeitsklasse, desto dichter ist das Tor. Marktübliche, außenliegende Tore liegen hierbei in den Luftdurchlässigkeitsklassen von 0 bis 3, siehe Kapitel 3.2.

3.1.3 Lüftungswärmeverluste



Wärmeverluste infolge eines geöffneten Tores haben in der Regel größere Auswirkungen auf die Wärmebilanz des Gebäudes als der Wärmeverlust durch Transmission oder Leckagen. Es steht

deshalb außer Frage, dass insbesondere zur kalten Jahreszeit eine Minimierung von Öffnungszyklen und der jeweiligen Öffnungsdauer nicht nur unter energetischen, sondern auch unter raumklimatischen und wirtschaftlichen Aspekten zu empfehlen ist. Dies kann über eine konsequent manuell durchgeführte Schließung des Tores nach der zweckbezogenen Toröffnung oder über geeignete automatisierende Systeme erfolgen. Für den Fall einer automatisierten Torschließung bieten sich verschiedene sensorische Systeme an, die in Kapitel 3.3 beschrieben werden.

3.2 Unterschiedliche Tore in Industriegebäuden

Die allgemeine Definition eines Tores ist nach [DIN EN 12433-1, 2]:

„Einrichtung, um eine Öffnung zu schließen, die für die Durchfahrt von Fahrzeugen und den Durchgang von Personen vorgesehen ist.“

Die Norm liefert eine Auflistung der vorhandenen Bauarten von Toren. Hierbei werden die folgenden Tortypen unterschieden:

- Drehflügeltore
- Pendeltore
- Faltgelenktore
- Falttore
- Schiebefalttore
- Schiebetore
- Hub-/ Senktore
- Sektionaltore
- Rolltore
- Kipptore
- Faltkipptore.

Zu Beginn der Forschungsarbeit wurden vielfältige Grundlagenermittlungen durchgeführt. Diese Untersuchungen erfolgten anhand eines Fragebogens, der an verschiedene Tor-, Antriebs- und Steuerungshersteller gerichtet war. Die so erstellte Produktdatenbank wurde

durch eine eigene Recherche ergänzt. Somit wird eine Herstellerneutralität der Untersuchung gewährleistet.

In diesem Fragebogen wurden spezifische Eigenschaften der Tore, wie z.B. U-Wert, Öffnungsgeschwindigkeit oder Listenpreis, abgefragt (siehe Anhang). Die Hersteller wurden aufgefordert, eine große Bandbreite an unterschiedlichen Toren zu berücksichtigen.

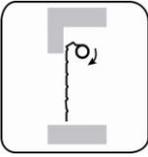
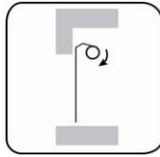
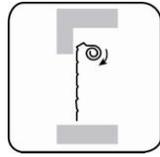
Gemeinsam mit den im Projekt beteiligten Unternehmen des Bundesverbands für Antriebs- und Steuerungstechnik (BAST) wurden im Rahmen des Projekts zwei Workshops durchgeführt, um die Vorgehensweise und erste Ergebnisse zu diskutieren. Dabei wurde festgelegt, sich auf die im Industriebereich meistgenutzten Tortypen zu konzentrieren: Sektionaltor, Rolltor und Schnelllaufspiraltor. Laut einer Studie von [B+L 2010, 61, 67] decken diese drei Tortypen im Industriebau einen Marktanteil von über 90 % ab.

Die Auswertung der Fragebögen mit der partiell unterstützten Eigenrecherche ergab eine Datenbank mit 28 Toren der Typen Sektionaltor, Schnelllaufspiraltor, Falttor und Rolltor. In Tabelle 2 sind die wichtigsten Erkenntnisse als Durchschnittswerte bzw. Minimal-Maximal-Werte des jeweiligen Tortyps zusammengefasst.

Desweiteren wurde für die weiterführenden Untersuchungen eine Torgröße von $4 \cdot 4 \text{ m}^2$ angenommen.

In den Unterkapiteln 3.2.1 bis 3.2.3 werden die untersuchten Tortypen näher beschrieben.

Tabelle 2: spezifische Eigenschaften der untersuchten Tortypen Sektionaltor, Rolltor und Schnellaufspiraltor nach Auswertung der Fragebögen und partiell unterstützender Eigenrecherche

	Sektionaltor	Rolltor		Schnellaufspiraltor
		Lamellen	Folie	
				
Bestandteile	Sektionen Gelenke Laufrollen Führungsschienen	Rolltorpanzer Laufrollen Führungsschienen Welle	Rolltorfolie Laufrollen Führungsschienen Welle	Lamellen Laufrollen Führungsschienen Spirale
U-Wert [W/(m²·K)]^{1,2} (Durchschnitt, gewichtet)	0,5-3,6 (1,8)	4,1-5,0 (4,7)	5,9 (5,9)	0,9-5,9 (1,9)
Geschwindigkeit Öffnen [m/s] (Durchschnitt, gewichtet)¹	0,2-0,44 (0,31)	0,2-0,3 (0,23)	0,8-3,0 (1,5)	0,5-2,5 (1,6)
Geschwindigkeit Schließen [m/s] (Durchschnitt, gewichtet)¹	0,2-0,25 (0,21)	0,2-0,3 (0,23)	0,5-1,0 (0,6)	0,5-1,0 (0,75)
Luftdurchlässigkeitsklasse^{1,3}	2-3 (2)	0 (0)	0 (0)	0-3 (2)
Maximalgröße¹ (b·h) [m²]	10 · 8	12 · 10	6 · 7	8 · 8
Investition^{3,4} [€] (Durchschnitt, gewichtet)	2.900 - 6.500 (4.700)	2.500 - 4.100 (3.100)	4.600 - 5.500 (4.800)	8.000 - 16.000 (11.000)
Wartungsintervall¹ [a]	0,5	0,5		1

¹ die spezifischen Werte wurden aus den Rückläufern der ausgegebenen Fragebögen sowie den Datenblättern von Toren verschiedener Hersteller ermittelt und stellen somit eine typische Bandbreite dar.

² der U-Wert bezieht sich auf eine Torgröße von 4 · 4 m² nach [DIN EN 12428].

³ Luftdurchlässigkeitsklasse nach [DIN EN 12426].

⁴ die Investition bezieht sich auf eine Torgröße von 4·4 m² und den Listenpreis des Herstellers inklusive Steuerung und dem standardmäßig dazu gelieferten Antrieb. Dieser kann je nach Ausstattung (z.B. bei zunehmend verglastem Flächenanteil des Torblattes) zum Teil erheblich variieren.

3.2.1 Sektionaltor



Der Tortyp, der im Industriebau am häufigsten eingesetzt wird, ist das Sektionaltor [B+L 2010, 61]. Es besteht aus einer Anzahl von horizontal miteinander verbundenen Sektionen, die den Torflügel ergeben. Das Tor wird in der Regel beim Öffnen vertikal angehoben, die Ablage des Flügels in der oberen Öffnungsposition kann waagrecht, senkrecht oder gefaltet erfolgen [ASR A1.7, 6].

Beim Sektionaltor sind die Sektionen durch Gelenke wie eine Kette aneinandergesetzt. Diese haben seitlich Laufrollen, die in Schienen geführt werden. Durch die Ausführung des Tores mit vergleichsweise wenigen Elementen, dafür bis zu 80 mm starken wärmeisolierten Sektionen können hohe Dämmstandards und Luftdichtigkeiten erreicht werden. Die Sektionen können dabei aus lichtdurchlässigen Elementen bestehen, die neben der Einbringung von Tageslicht auch unter Sicherheitsaspekten sinnvoll sein können. Der Bereich unmittelbar hinter dem geschlossenen Tor ist dann von Außen und Innen sichtbar.

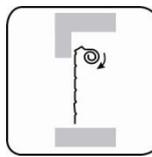
3.2.2 Rolltore



Rolltore gehören neben Sektionaltoren zu den Hauptvertretern von Industrietoren und werden sowohl im Innen- als auch im Außenbereich eingesetzt. Diese können als Folien-Rolltore oder als Rolltore mit wärmeisolierten Lamellen sowie als Schnell-

oder Langsamläufer ausgeführt werden [Teckentrup 2012]. Der Rolltorpanzer, bestehend aus zahlreichen schmalen Lamellen, bzw. die Folie des Rolltors werden beim Öffnen durch seitlich angebrachte Führungsschienen auf eine Wickelwelle gerollt. Im Gegensatz zum Sektionaltor wird durch den Aufrollmechanismus keine zusätzliche Fläche oberhalb des Tores benötigt. Rolltore haben im Vergleich zu den anderen untersuchten zwei Tortypen meist die geringste Investition.

3.2.3 Schnellaufspiraltor



Das Schnellaufspiraltor ist der jüngst entwickelte Tortyp. Im Gegensatz zum Sektionaltor besteht das Torblatt nicht aus wenigen breiten Sektionen, sondern aus feinmaschigen Lamellen. Diese werden beim Öffnen jedoch nicht wie bei dem zuvor beschriebenen Rolltor übereinander auf eine Welle gerollt, sondern ohne aufeinander zu reiben in eine feste Spirale eingeführt. Die Konstruktion erlaubt daher hohe Öffnungs- und Schließgeschwindigkeiten, niedrige Betriebsgeräusche sowie eine lange Lebensdauer, auch bei hochfrequentem Torbetrieb [VDI 2409, 12].

Ein weiterer Vorteil dieses Tortyps liegt in der Verknüpfung von hohen Öffnungsgeschwindigkeiten mit der Möglichkeit, die Lamellen wärmeisoliert auszuführen. Im Vergleich zum Sektionaltor und Rolltor weisen Schnellaufspiraltore in der Regel die höchste Investition auf.



Abb 3: Sektionaltor



Abb. 4: Folien-Rolltor



Abb. 5: Lamellen-Rolltor



Abb. 6: Schnellaufspiraltor

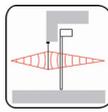
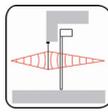
3.3 Torsteuerung und Sensorik

Die Steuerung eines Tores zur Einleitung eines Öffnungs- bzw. Schließvorgangs kann durch eine Totmannschaltung, einen manuell getätigten Impuls und/oder automatisch mittels eines sensorischen Systems erfolgen.

Die verschiedenen Möglichkeiten zur Torsteuerung sind in Tabelle 3 dargestellt.

In den folgenden Unterkapiteln werden die einzelnen Steuerungssysteme näher erläutert.

Tabelle 3: Eigenschaften möglicher Torsteuerungen nach Auswertung der Fragebögen

	Totmannsteuerung		Manuelle Impulsgeber		Automatische Impulsgeber		
	Taster	Taster	Funksteuerung	Lichtschranke	Induktionsschleife	Radar	Laser
							
Vorfeldüberwachung	-	-	-	- ^I	-	- ^{II}	+
Ausblendung von Querverkehr	-	-	-	-	+ ^{III}	+	+
Personen- / und Fahrzeugerkennung	-	-	-	-	+ ^{IV}	+	+
objektgrößenangepasstes Öffnen	-	-	-	-	-	-	+

+ möglich
- nicht möglich

^I nur bei Verwendung als Sicherheitseinrichtung
^{II} nur in Kombination mit geeigneter Sicherheitseinrichtung
^{III} bei Kombination von mehreren Schleifen
^{IV} nur metallische Objekte werden erfasst

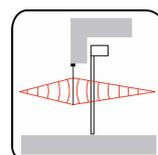
3.3.1 Totmannsteuerung / Zug- bzw. Druckschalter



Die Totmannsteuerung ist eine Steuerung ohne Selbsthaltung, es erfordert eine kontinuierliche Betätigung für den Öffnungs- und Schließvorgang und erfolgt mittels Taster.

Beim Zug- bzw. Druckschalter wird ein Impuls zur Toröffnung bzw. -schließung durch manuelle Betätigung des Schalters ausgelöst, das Tor öffnet und schließt nach Impulsgebung selbstständig.

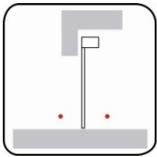
3.3.2 Funk



Durch eine Funksteuerung werden drahtlos Signale mit Hilfe elektromagnetischer Wellen von einem Sender zum Empfänger übermittelt. Die Empfänger-einheit ist am Tor platziert. Vorteil dieser

manuellen Steuerung ist die Möglichkeit, das Tor bereits „aus Distanz“ zu öffnen. Die Reichweite ist jedoch stark von Störfaktoren abhängig (z.B. hoher Anteil an Stahlbeton in der Umgebung) [Litzmann 2012].

3.3.3 Lichtschranke

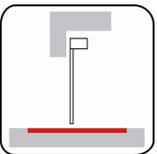


Die Lichtschranke ist ein elektronisch-optisches System, das die Unterbrechung eines Lichtstrahls erkennt und besteht aus einer Lichtstrahlenquelle (Sender) und einem Sensor (Empfänger).

Üblicherweise werden mehrere Lichtschranken als Sicherheitseinrichtung verwendet (Lichtgitter). Dabei wird die automatische Schließung des Tores gestoppt, sobald ein Lichtstrahl durch Personen oder Fahrzeuge unterbrochen wird [Stricker 2012-1].

Bei Verwendung einer Lichtschranke als automatischen Impulsgeber wird die Lichtstrahlenquelle am Tor und die Empfangseinheit im Bereich vor dem Tor angebracht, um bei einer Unterbrechung des Lichtstrahls eine Toröffnung einzuleiten.

3.3.4 Induktionsschleife



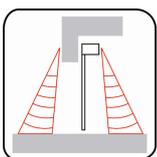
Die Induktionsschleife nutzt die Feldänderung eines elektromagnetischen Feldes durch Metalle zur Erfassung von Fahrzeugen und bietet sich damit zur automatisierten Öffnung von Toren an.

Bei der Überquerung der Induktionsschleife werden Fahrzeuge wie Hubwagen, PKW und LKW erfasst.

Die Technologie ermöglicht eine präzise Abgrenzung des Erfassungsfeldes und blendet technisch bedingt Personen aus.

Induktionsschleifen müssen in den Boden verlegt werden. Die Kabelschleifen werden dabei in rechteckiger Form in den Boden vor dem Tor eingelassen, was einen zusätzlichen Aufwand darstellt und nicht bei allen Bodenbelägen angewendet werden kann [BEA 2012-1], [Stricker 2012-2].

3.3.5 Radar



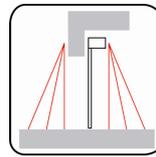
Der Radarmelder sendet in einem definierten Bereich durchgehend Mikrowellen bei konstanter Frequenz aus. Bei einer Bewegung im Erfassungsfeld durch z.B. Personen oder Fahrzeuge

werden die ausgestrahlten Wellen mit einer veränderten Frequenz an den Melder zurück gesendet und lösen damit eine Erfassung aus.

Durch die Differenzierung zwischen einer sich dem Tor nähernden bzw. sich entfernenden Bewegung sowie der damit verbundenen Möglichkeit zur Erkennung von

Querverkehr können unnötige Öffnungen vermieden werden [BEA 2012-2].

3.3.6 Laser



Die Lasertechnologie basiert auf dem Prinzip der Lichtlaufzeitmessung. Dabei wird ein Lichtimpuls ausgestrahlt und die Zeit bis zur Rückkehr der Reflexion gemessen.

Durch die hochaufgelöste Abtastung wird die Anwesenheit von Fahrzeugen oder Fußgängern in der Erfassungszone des Lasers überwacht. Der Schließmechanismus wird sofort ausgelöst, wenn sich weder Personen noch Fahrzeuge oder Gegenstände in diesem Bereich befinden und bietet so die Möglichkeit, die Offenstehzeit des Tores auf ein Minimum zu reduzieren.

Durch den Einsatz von Lasertechnologie wird neben der automatisierten Toröffnung bzw. -schließung ein bisher unerreichtes Absicherungsniveau erreicht [BEA 2012-3], [Stricker 2012-3].

Anmerkung: eine Verknüpfung der Öffnungsdauerreduktion mittels eines sensorischen Systems und der Öffnungsdauer ohne ein solches System lässt sich nach Auswertung der in Kapitel 3.2 beschriebenen Fragebögen sowie Expertengesprächen nicht ohne weiteres allgemein darstellen. Vielmehr liegt es am jeweiligen Immobilienbetreiber und den Erfahrungen im täglichen Fertigungsbetrieb, nach welcher „zusätzlichen Offenhaltezeit“ das Tor wieder geschlossen werden soll. Diese wurde zwischen 8 s und 200 s angegeben und weist damit einen großen zeitlichen Wertebereich auf.

4. Untersuchungsmethodik

4.1 Thermische Gebäudesimulation

Basis der Forschungsarbeit bilden Simulationsrechnungen mit einem thermischen Gebäudesimulationsmodell, welches mit der Software [IDA ICE 2012] erstellt wurde. Für die Volumenstromberechnung bei einem einseitig geöffneten Tor wurde ein neues Lüftungsmodell in die Simulationsumgebung implementiert, welches sowohl den thermisch bedingten als auch den windinduzierten Luftwechsel berücksichtigt, siehe Kapitel 4.1.1.

Um Aussagen über den Energiebedarf des Gebäudes infolge von Transmissionswärmeverlusten durch die Gebäudehülle und Lüftungswärmeverlusten durch die Gebäudetore treffen zu können, werden ganzjährige Simulationen unter Verwendung der Wetterdaten aus Testreferenzjahren durchgeführt [DWD 2011].

Dies erfordert einen umfassenden und validierten Aufbau von Simulationsmodellen, die sowohl tor- wie auch gebäudespezifische Parameter abbilden. Die physikalische Berechnungsgrundlage liefert hierfür ein Mehrzonen-Modell, siehe Abbildung 7. Vorteil gegenüber einem Ein-Zonen-Modell ist, dass der Luftraum in mehrere Zonen unterteilt wird, zwischen denen Luftaustauschvorgänge berechnet werden. Innerhalb einer Zone herrscht dabei ein homogener Luftzustand. Um Aussagen zum lokalen Temperaturfeld in der Halle, insbesondere im umliegenden Bereich des Tores, treffen zu können, wird zur angenäherten Berechnung von Strömungsvorgängen und der Temperaturverteilung ein Strömungsnetzwerk in die instationäre Gebäudesimulation eingekoppelt. Darüber können erste Aussagen über eine Temperaturverteilung in den definierten Zonen bei noch akzeptabler Rechenzeit für den Untersuchungszeitraum von einem Jahr getroffen werden. Energetische Größen wie z.B. der Heizwärme- und Kühlbedarf des Gebäudes sowie Transmissions- und Lüftungswärmeverluste der Tore können ebenfalls berechnet und analysiert werden. Da insbesondere in Hallengebäuden eine vertikale Temperaturschichtung durch thermisch bedingten Auftrieb vorliegt, wird für jede Zone ein vertikaler Temperaturgradient definiert. Dieser ist abhängig von der Hallenhöhe, den internen Wärmelasten sowie der eingesetzten Heiz- und Raumlufttechnik und deshalb von Gebäude zu Gebäude verschieden. Anhaltswerte über typische Temperaturgradienten bei unterschiedlichen Gebäudetypen und

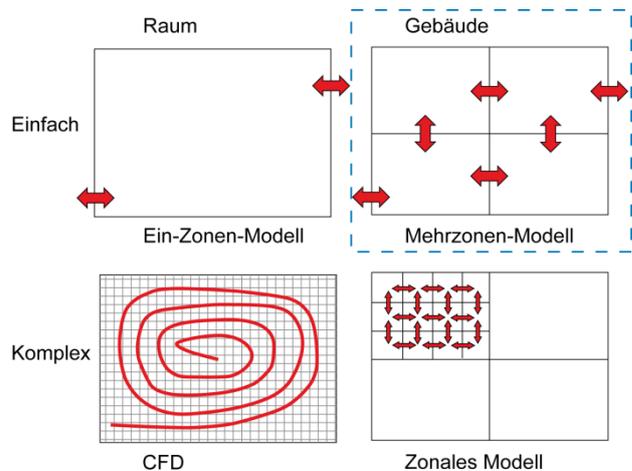


Abbildung 7: Modelltypen zur Abbildung von Raumluftströmungen nach [Flieger et al. 2013]

Anlagentechniken finden sich in [FVLR 10, 6] sowie in [Oschatz et al. 2011, 101].

Eine weitere Möglichkeit zur Untersuchung von Raumluftströmungen sind Computer Fluid Dynamics-Modelle (CFD-Modelle), die auf der Anwendung der numerischen Strömungsmechanik basieren. Der zu untersuchende Raum wird hier in viele kleine Volumen diskretisiert und meist mit dem numerischen Lösungsansatz der Finite-Elemente-Methode (FEM) gelöst.

Ähnlich zu diesem Ansatz wird beim zonalen Modell der Raum ebenfalls in kleine Einzelvolumen unterteilt, jedoch in einer geringeren Anzahl als beim CFD-Ansatz [Flieger et al. 2013].

Die Anwendung von CFD- wie auch zonalen Modellen ist für diesen Anwendungsfall nicht zu empfehlen, da der höhere Detaillierungsgrad zu einem unverhältnismäßig hohen Rechenaufwand führt. Folglich sind diese Modelle für lediglich spezielle Einzelfalluntersuchungen empfehlenswert.

Jedoch sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass detaillierte Aussagen über lokale Strömungsverhältnisse im Gebäude mit dem gewählten Mehrzonen-Modell nicht möglich sind. Derartige lokale Effekte erfordern einen wesentlich genaueren Rechenansatz, welcher nur mit CFD- bzw. zonalen Modellen lösbar ist. Da in diesem Forschungsvorhaben der Schwerpunkt auf einer Jahresbetrachtung liegt und energetische Größen wie der Heizwärmebedarf des Gebäudes ermittelt werden, kann das angewandte Simulationsmodell als angemessen genau betrachtet werden.

4.1.1 Berechnung des Volumenstroms bei geöffnetem Tor

Für die Volumenstromberechnung bei einem einseitig geöffneten Tor wurde erstmalig ein Lüftungsmodell in die Simulationssoftware implementiert, welches sowohl den thermisch bedingten als auch den windinduzierten Luftwechsel berücksichtigt. Dieser Rechenansatz wurde erstmals durch experimentelle Untersuchungen an Fensteröffnungen von [Phaff et al. 1982] entwickelt. In verschiedenen Forschungsarbeiten wurden mithilfe von experimentellen Versuchen und numerischen Methoden der Ansatz auf Gültigkeit überprüft und teilweise um weitere Eigenschaften wie eine windrichtungsabhängige Berechnung des Volumenstroms [Larsen 2006], [Freire et al. 2009] ergänzt oder für andere Anwendungsfälle wie in [Maas 1995] für kleine Fensteröffnungswinkel modifiziert. Ebenfalls wird dieser Ansatz in der deutschen Norm „Lüftung von Gebäuden“ [DIN EN 15242] verwendet. Im Rechenansatz wird davon ausgegangen, dass bei einer einseitigen Öffnung ein bidirektionaler Luftaustausch stattfindet, und die Luft durch jeweils eine Hälfte der Öffnung ein- und austritt.

In allgemeiner Form lautet die Berechnungsgleichung:

$$\dot{V}_{zu} = \dot{V}_{ab} = \frac{1}{2} \cdot A_{\text{Öffnung}} \cdot \sqrt{C_1 \cdot v_{\text{Wind}}^2 + C_2 \cdot h_{\text{Öffnung}} \cdot \Delta T + C_3} \quad (4.1)$$

mit

\dot{V}_{zu}	Zuluftvolumenstrom in [m ³ /s],
\dot{V}_{ab}	Abluftvolumenstrom in [m ³ /s],
$A_{\text{Öffnung}}$	Öffnungsfläche in [m ²],
v_{Wind}	Windgeschwindigkeit in [m/s],
$h_{\text{Öffnung}}$	Öffnungshöhe in [m],
ΔT	Temperaturdifferenz Innen Außen in [K].

Die Koeffizienten C_1 , C_2 und C_3 wurden hierbei mittels experimentellen Messungen durch [Phaff et al. 1982] wie folgt ermittelt und in den Arbeiten von [Larsen 2006, 28, 100 f] und [Freire et al. 2009, 1043] angewandt:

$C_1 = 0,001$	Koeffizient zur Berücksichtigung der Windturbulenzen [-]
$C_2 = 0,0035$	Koeffizient zur Berücksichtigung des thermischen Auftriebs [m/(s ² ·K)]
$C_3 = 0,01$	Koeffizient zur Berücksichtigung der Windturbulenzen [m ² /s ²].

In Abbildung 8 sind beispielhaft resultierende Volumenströme bei Anwendung von Gleichung (4.1) für eine quadratische Öffnungsfläche von 16 m² in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten von 0, 5 und 10 m/s dargestellt.

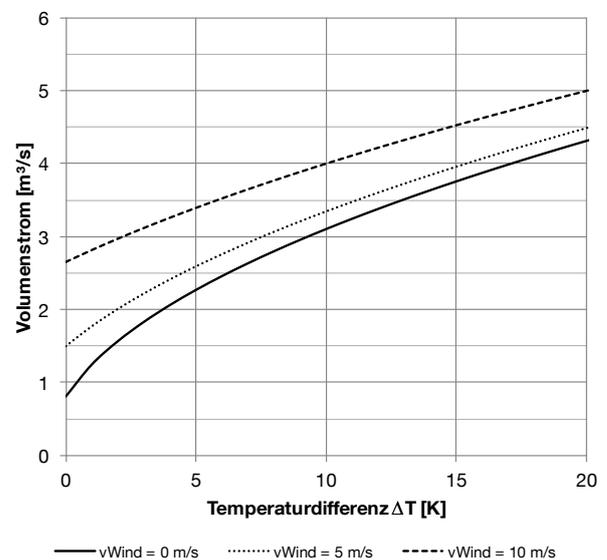


Abbildung 8: Luftvolumenströme in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz für unterschiedliche durchschnittliche Windgeschwindigkeiten bei einer quadratischen Öffnungsfläche von 16 m²

Es wird ersichtlich, dass mit zunehmender Temperaturdifferenz der Einfluss der Windgeschwindigkeit auf den resultierenden Volumenstrom geringer wird, die Kurven nähern sich stetig an.

Um die Anwendbarkeit des Rechenansatzes für größere Öffnungsflächen sowie die von [Phaff et al. 1982] ermittelten Koeffizienten zu überprüfen, wurden Messungen in einer dem Lehrstuhl für Bauklimatik und Haustechnik angegliederten Werkzeughalle durchgeführt, siehe dazu Kapitel 4.2.

4.1.2 Berechnung des Volumenstroms durch Leckagen bei geschlossenem Tor

Für die Berechnung der Undichtigkeiten (Leckagen) des Tores wird der folgende Rechenansatz nach [Hensen 1991, 4.18] in der Simulationsumgebung verwendet:

$$\dot{V}_{Leck} = \frac{c}{\rho_{Luft}} \cdot \Delta p^n \quad (4.2)$$

mit

\dot{V}_{Leck}	Volumenstrom durch die Leckage in [m ³ /s],
c	Durchflusskoeffizient in [kg/(s·Pa)],
ρ_{Luft}	Dichte der Luft in [kg/m ³],
Δp	Druckdifferenz Innen – Außen in [Pa],
$n = 0,6$	Fließexponent [-].

Da die Undichtigkeit eines Tores nach [DIN EN 12426] bei einer Druckdifferenz von 50 Pa bekannt ist (siehe Kapitel 3.1.2), kann unter Verwendung von Gleichung (4.2) und der Vereinfachung $\rho_{Luft} = 1,2 \text{ kg/m}^3$ der Durchflusskoeffizient c als einzige Unbekannte bestimmt werden. Für die unterschiedlichen Luftdurchlässigkeitsklassen (LDK) kann damit der in Abbildung 9 dargestellte Zusammenhang zwischen Druckdifferenz Δp und resultierendem Volumenstrom \dot{V}_{Leck} hergestellt werden. Dabei zeigt sich, dass mit zunehmender Druckdifferenz der resultierende Volumenstrom degressiv ansteigt. Ersichtlich wird zudem, dass sich bei LDK größer 3 die Volumenströme bei steigender Druckdifferenz nur geringfügig unterscheiden.

In der Simulation wird die resultierende Druckdifferenz Δp zwischen Innen und Außen in Abhängigkeit des Staudruckes infolge der Windanströmung sowie durch die Temperaturdifferenz zwischen Innen und Außen dynamisch berechnet.

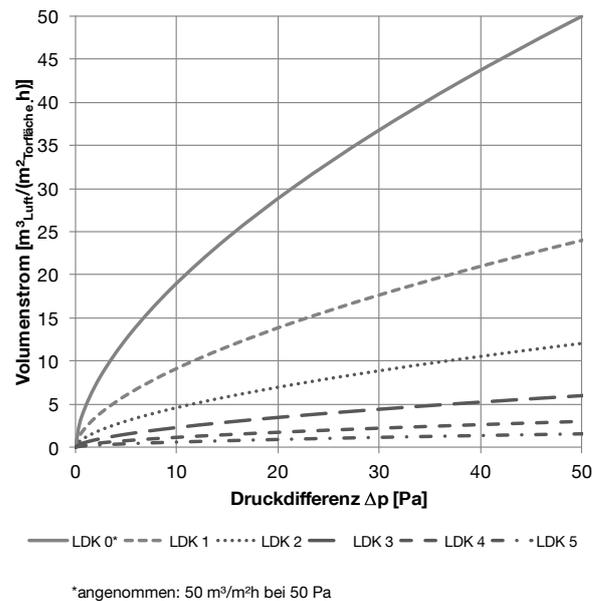


Abbildung 9: Zusammenhang zwischen Druckdifferenz Innen - Außen und dem resultierenden Volumenstrom in $\text{m}^3_{Luft}/(\text{m}^2_{Torfläche} \cdot \text{h})$ für unterschiedliche Luftdurchlässigkeitsklassen (LDK) nach [DIN EN 12426]

4.2 Überprüfung des Rechenansatzes anhand von Messung und Simulation

Um die Simulationsrechnungen überprüfen zu können, werden in einer dem Lehrstuhl angegliederten Halle Temperaturmessungen vorgenommen und mit einer dynamischen Gebäudesimulation abgeglichen.

4.2.1 Werkzeughalle des Lehrstuhls

Die in Abbildung 10 dargestellte Halle mit einem Sektionaltor bietet mit einem Volumen von rund 320 m³ gute Voraussetzungen für die Untersuchungen am Gebäude-Tor-Komplex. Die Halle weist drei beheizte Nachbarräume und eine Außenwand auf und wird indirekt von diesen erwärmt. Desweiteren dient die Halle lediglich der Lagerung von Werkzeug. Interne Wärmelasten sowie eine Klimatisierung sind nicht vorhanden.

4.2.2 Versuchsaufbau

Für die Messung werden Thermoelemente vom Typ K verwendet, die, wie in Abbildung 11 dargestellt, räumlich angeordnet sind. Mit diesem Versuchsaufbau kann die Raumtemperatur auf drei vertikalen Ebenen erfasst werden: im Bodenbereich, auf 1,4 m Höhe, sowie auf Torabschlussene.



Abbildung 10: Blick in die für die Temperaturmessungen genutzte Halle des Lehrstuhls für Bauklimatik und Haustechnik

Um den Einfluss von eindringenden Luftvolumenströmen in der Raumtiefe darstellen zu können, wird eine zweite Messebene im hinteren Hallenbereich angeordnet.

Die Außentemperatur sowie die Windgeschwindigkeit werden ebenfalls messtechnisch erfasst. Weitere Randbedingungen zur Messung sind in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Randbedingungen der Temperaturmessung

Temperaturmessgerät	Thermoelemente Typ K, Almemo Datenlogger 2390-8
Messpunkte	1 Sensor Außen, 18 Sensoren Innen
Aufzeichnungsbeginn	08. Februar 2013, 12:30 Uhr
Aufzeichnungsende	08. Februar 2013, 14:40 Uhr
Aufzeichnungsintervall	je 10 s
Ø Öffnungsgeschwindigkeit Tor [m/s]	0,2
Ø Schließgeschwindigkeit Tor [m/s]	0,2
Ø Windgeschwindigkeit [m/s]	1,2
maximale Windgeschwindigkeit [m/s]	4,8
Ø Außenlufttemperatur [°C]	1,7

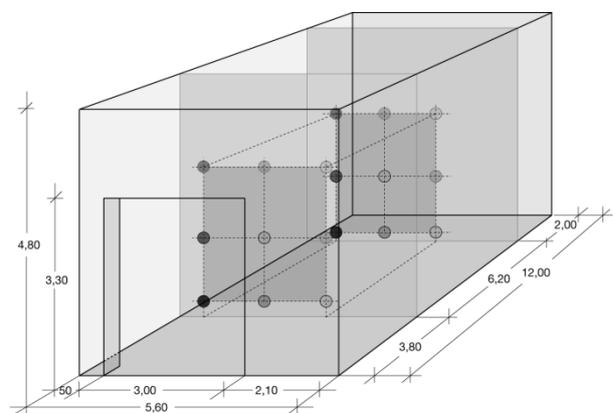


Abbildung 11: Versuchsaufbau und Messanordnung der Thermoelemente

4.2.3 Ergebnisse der Messung

In Abbildung 12 sind die gemessenen Raumlufttemperaturen der vorderen Messebene in Form von roten Linien, der hinteren Messebene durch gelbe Linien sowie die gemittelte Raumtemperatur von beiden Messebenen als grüne Linie dargestellt. Die hier dargestellten Messpunkte befinden sich auf einer Höhe von 1,4 m.

Zum Zeitpunkt $t = 0$ min wird das Sektionaltor geöffnet. Die Raumtemperatur beträgt zu Beginn sowohl im vorderen als auch im hinteren Bereich ca. $14\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ersichtlich wird der sehr rasche Temperaturabfall der Raumtemperatur nach der Toröffnung, bedingt durch die kalten Außentemperaturen. Innerhalb weniger Minuten fällt die mittlere, als grüne Linie dargestellte Raumtemperatur um ca. 8 K . Deutlich wird ebenfalls ein Temperaturanstieg bei Torschließung. Die Temperaturen pendeln sich bei ca. $11\text{ }^{\circ}\text{C}$ im Raum ein. Der Temperaturanstieg wird durch die noch warmen Oberflächen des Raumes sowie durch die beheizten Nachbarräume hervorgerufen.

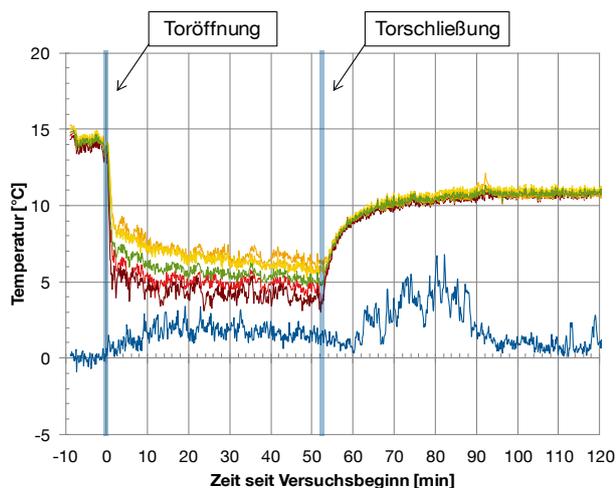


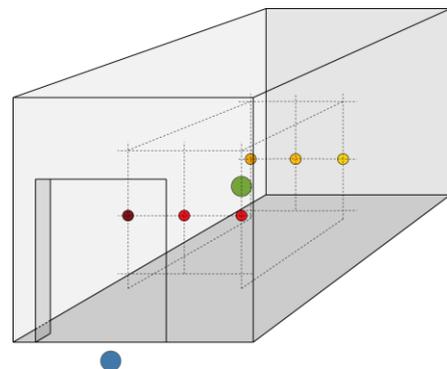
Abbildung 12: Temperaturprofil bei Öffnung des Tores der Werkzeughalle. Die hier dargestellten Temperaturen beziehen sich auf die Messpunkte im vorderen (rote Linien) und hinteren (gelbe Linien) Bereich der Halle auf einer Höhe von 1,4 m. Desweiteren wird eine gemittelte Raumtemperatur aus den 6 positionierten Thermoelementen in Form einer grünen Linie sowie die gemessene Außentemperatur als blaue Linie abgebildet

4.2.4 Randbedingungen des Gebäudemodells der Simulation

Die gemessene Außentemperatur sowie die Windgeschwindigkeit dienen als Eingangsparameter für die Simulationsrechnung. Weitere Randbedingungen des Gebäudemodells sind in Tabelle 5 beschrieben.

Tabelle 5: Randbedingungen des Gebäudemodells zur Validierung der vorgenommenen Temperaturmessung

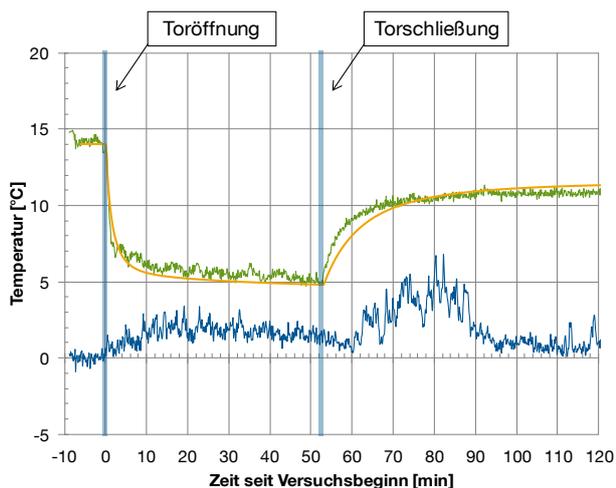
Abmessungen (b-l-h) [m]	5,6 · 12 · 4,8
Grundfläche [m ²]	67
Volumen [m ³]	322
interne Wärmelasten [W/m ²]	keine
U-Wert Innenwände [W/(m ² ·K)]	1,6
U-Wert Außenwand [W/(m ² ·K)]	0,6
U-Wert Dach [W/(m ² ·K)]	0,6
Abmessungen Tor (b-h) [m ²]	3 · 3,4
U-Wert Tor [W/(m ² ·K)]	5,8
Temperatur angrenzende Räume [°C]	18
natürliche Infiltration [1/h]	0,5 bei 50 Pa
mechanische Lüftung	-
Zonierung	1-Zonenmodell
Simulationszeitschritt	dynamisch (hochaufgelöst bei Toröffnung), ~1 s



4.2.5 Ergebnisse der Simulation

In Abbildung 13 sind die gemittelte Raumtemperatur aus der Messung als grüne Linie, die simulierte Raumlufttemperatur als gelbe Linie sowie die gemessene Außentemperatur als blaue Linie dargestellt. Zum Zweck der Überprüfung des Simulationsmodells mit dem in Kapitel 4.1.1 beschriebenen Ansatz zur Volumenstromberechnung wird die gemittelte Raumtemperatur (grüne Linie) aus der Messung verwendet, da das Simulationsmodell als 1-Zonen-Modell simuliert ist.

Ersichtlich wird eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation. Sowohl der Verlauf des Temperaturabfalls bei Öffnung des Tores als auch der sich einstellende Temperaturanstieg nach der Schließung des Tores durch die warmen Raumumschließungsflächen werden in der Simulation korrekt abgebildet.



4.2.6 Zusammenfassung

Anhand der durchgeführten Messung mit anschließender Simulation konnte sowohl die Art der Simulationemethodik als auch das implementierte Lüftungsmodell überprüft und bestätigt werden. Hierbei zeigt sich, dass die Simulation im Vergleich zur Messung gute Resultate liefert und für weiterführende Untersuchungen mit Fokus auf der energetischen Wechselwirkung zwischen Torsystem und Gebäude geeignet ist.

Wie in Kapitel 4.1 begründet wurde, kann die dynamische Gebäudesimulation keine numerischen Simulationen (CFD) oder eine Windkanalmessung ersetzen. Jedoch ist im Hinblick auf energetische Zielgrößen, wie der Lüftungswärmeverlust eines Tores oder der Wärmebedarf einer Halle, die Simulation als zielführendes Werkzeug zu sehen.

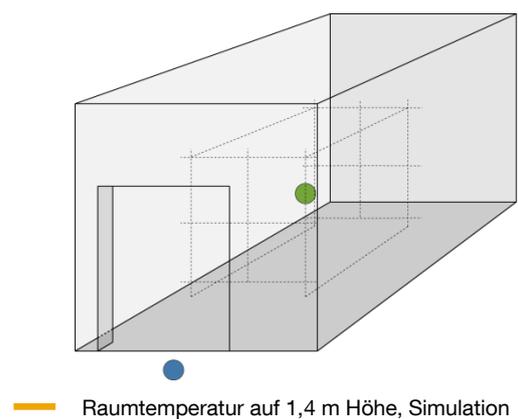


Abbildung 13: Vergleich des Raumtemperaturverlaufs von Messung (grüne Linie) und Simulation (gelbe Linie) bei Toröffnung und Torschließung

5. Entwicklung unterschiedlicher Gebäudemodelle

5.1 Vielseitigkeit von Industriegebäuden

Industriegebäude weisen eine große Bandbreite unterschiedlicher Nutzungen und Produktionsprozesse auf. Daneben unterscheiden sich die Gebäude in baulichen Eigenschaften wie z.B. der Gebäudegrundfläche, Höhe, Alter und Dämmstandard oder in der installierten Anlagentechnik.

Für die in den Kapiteln 6 und 7 beschriebenen Untersuchungen werden drei Gebäudemodelle *Fertigung*, *Werkstatt* und *Lager* entwickelt, welche sich in ihren Abmessungen, der vorherrschenden Nutzung und der damit

verbundenen Freisetzung von Wärme, den angestrebten Temperaturniveaus sowie der Nutzungszeit unterscheiden und typische Gebäude innerhalb ihrer Kategorie darstellen, siehe Abbildung 14.

Durch die Gebäudemodelle mit unterschiedlichen Randbedingungen kann der energetische und raumklimatische Einfluss von Toren für jeden Gebäudetyp untersucht werden.

In den Kapiteln 5.2 bis 5.4 werden die Gebäudemodelle näher erläutert.

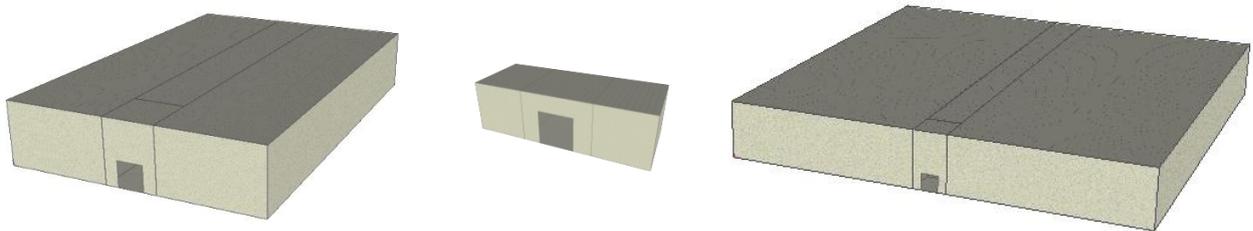


Abbildung 14: Gebäudemodelle *Fertigung*, *Werkstatt* und *Lager* in [IDA ICE 2012]

5.2 Gebäudemodell *Fertigung*



In Abbildung 15 ist das Gebäudemodell *Fertigung* dargestellt. Ersichtlich wird im Schnitt die gewählte Zonierung in horizontaler Ebene. Aufgrund der großen Anzahl an Simulationen wird zur Reduzierung der Rechenzeit ein 4-Zonen-Gebäudemodell erstellt. Für die Untersuchung des sich einstellenden Raumtemperaturabfalls bei einem offenstehenden Tor in Kapitel 6.4 wird eine feinere Zonierung vorgenommen, da hier der Simulationszeitraum lediglich eine Toröffnung beträgt.

Unmittelbar hinter dem Tor wird eine $8 \cdot 8 \text{ m}^2$ große „Torzone“ definiert, siehe Abbildung 15. Vorteil dieser zusätzlichen Zone ist die Möglichkeit, für die weiterführenden Untersuchungen die Temperatur unmittelbar „hinter“ dem Tor erfassen zu können. So lassen sich erste Aussagen über den sich einstellenden Temperaturabfall, bei unterschiedlichen Toröffnungsdauern treffen. Für das Gebäude wird in Anlehnung an [DIN V 18599-10, Tabelle A.24] für gewerbliche und industrielle Hallen eine Raum-Solltemperatur von 20 °C bei einer leichten, überwiegend sitzenden Tätigkeit für Fertigung, Produktion, Montage sowie eine tägliche Nutzungszeit von 7:00 Uhr bis 16:00 Uhr von Montag bis Freitag vorgesehen, siehe Tabelle 6. Das Gebäude wird dabei als Neubau unter Einhaltung der aktuellen [EnEV 2009] in Sandwich-Paneelbauweise für die Außenwände sowie das Dach aufgebaut. Um sich nicht auf ein Heizsystem zu beschränken, wird ein ideales Heizsystem mit einer spezifischen Leistung⁵ von 100 W/m^2 verwendet. Damit wird sichergestellt, dass die definierte minimale Raum-Solltemperatur (bei geschlossenen Toren) eingehalten wird.

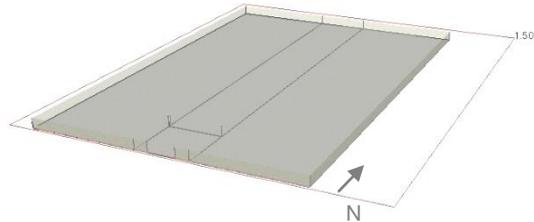


Abbildung 15: Schnitt durch das Gebäudemodell *Fertigung* in [IDA ICE 2012] mit Darstellung der Zonierung

Tabelle 6: Randbedingungen des Gebäudemodells *Fertigung*

Abmessungen (b-l-h) [m]	40 · 60 · 10
Grundfläche [m ²]	2.400
Volumen [m ³]	24.000
interne Wärmelasten (inkl. Beleuchtung) [W/m ²]	40
min. Raum-Solltemperatur in 1,4 m Höhe [°C]	20
max. Raum-Solltemperatur in 1,4 m Höhe [°C]	28
A/V-Verhältnis	0,28
vertikaler Temperaturgradient [1/m]	0,5
Dämmstandard	EnEV 2009, Sandwich-Paneele
natürliche Gebäudeinfiltration (bei 50 Pa) [m ³ /(m ² ·h)]	8,2 ($n_{50} = 1,5$)
Nutzungszeit	Mo-Fr, 7-16 Uhr
Klimadaten	TRY 13, Schwäbisch-fränkisches Stufenland und Alpenvorland ⁶
Druckbeiwerte	exponierte Lage (siehe Anhang 13.2)

⁵ das Gebäudemodell wurde zunächst ohne interne Wärmelast mit einer unlimitierten Leistung des idealen Heizsystems simuliert, um die notwendige Leistung zur Einhaltung der Raum-Solltemperatur von 20 °C bei der im Simulationszeitraum kältesten Außentemperatur während der Nutzungszeit bestimmen zu können.

⁶ als Klimadatensatz wird das Testreferenzjahr (TRY) 13 aufgrund der kalten Winterperiode aus [DWD 2011] gewählt. Das Klima wird in [DWD 2011, 52] beschrieben als: „Winter: kühl; Sommer: gemäßigt bis warm. Unterschied zwischen tiefstem und höchstem mittleren Monatsmittel der Lufttemperatur an der Repräsentanzstation: von $-1,1 \text{ °C}$ bis $18,1 \text{ °C}$ “.

5.3 Gebäudemodell *Werkstatt*



Abbildung 16 zeigt das Gebäudemodell *Werkstatt*. Aufgrund der vergleichsweise geringen Abmessungen wird eine Zonierung des Gebäudes in drei Zonen vorgenommen. Die im bereits vorangegangenen Kapitel erwähnte „Torzone“ hat die gleichen Abmessungen von $8 \cdot 8 \text{ m}^2$, um eine Vergleichbarkeit bei der Analyse von Temperaturen zwischen den Gebäudemodellen zu gewährleisten. Die spezifische Leistung des idealen Heizers wird für dieses Gebäude auf 125 W/m^2 an die Raum-Solltemperatur von 15 °C angepasst⁷.

Für das Gebäude werden verschiedene Randbedingungen wie Nutzungszeit und Raum-Solltemperatur für eine „schwere Arbeit, stehende Tätigkeit“ in Anlehnung an [DIN V 18599-10, Tabelle 22] herangezogen. Wesentliche Unterschiede zum Gebäudemodell *Fertigung* sind die geringeren Abmessungen, dem kleineren Luftvolumen, geringere interne Wärmelasten und eine reduzierte Raum-Solltemperatur, siehe Tabelle 7.

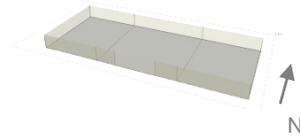


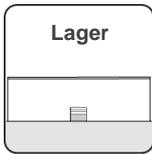
Abbildung 16: Schnitt durch das Gebäudemodell *Werkstatt* in [IDA ICE 2012] mit Darstellung der Zonierung

Tabelle 7: Randbedingungen des Gebäudemodells *Werkstatt*

Abmessungen (b-l-h) [m]	20 · 8 · 6
Grundfläche [m ²]	160
Volumen [m ³]	960
interne Wärmelasten (inkl. Beleuchtung) [W/m ²]	20
min. Raum-Solltemperatur in 1,4 m Höhe [°C]	15
max. Raum-Solltemperatur in 1,4 m Höhe [°C]	28
vertikaler Temperaturgradient [1/m]	0,5
A/V-Verhältnis	0,68
Dämmstandard	EnEV 2009, Sandwich-Paneele
natürliche Gebäudeinfiltration (bei 50 Pa) [m ³ /(m ² ·h)]	8,2 ($n_{50} = 4,2$)
Nutzungszeit	Mo-Fr, 7-16 Uhr
Klimadaten	TRY 13, Schwäbisch-fränkisches Stufenland und Alpenvorland
Druckbeiwerte	exponierte Lage (siehe Anhang 13.2)

⁷ die notwendige Leistung zur Einhaltung der Raum-Solltemperatur von 15 °C ist beim Gebäudemodell *Werkstatt* aufgrund des wesentlich höheren A/V-Verhältnisses gegenüber dem Gebäudemodell *Fertigung* trotz geringerer Raum-Solltemperatur höher.

5.4 Gebäudemodell *Lager*



In Abbildung 17 ist das Gebäudemodell *Lager* dargestellt. Das Gebäude beschreibt mit den gewählten Abmessungen ein typisches Flachlager. Grundlage des Gebäudemodells liefert hier nicht

die [DIN V 18599-10, Tabelle A.43] für Logistikhallen, da hier davon ausgegangen wird, dass kein Personal dauerhaft beschäftigt ist und die Halle deshalb auf lediglich 12 °C temperiert wird [HLH 2013]. Auf Basis des am Lehrstuhl für Bauklimatik und Haustechnik in Kooperation mit dem Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik parallel laufenden Forschungsvorhabens „Das CO₂-neutrale Logistikzentrum - Entwicklung von ganzheitlichen Handlungsempfehlungen für energieeffiziente Logistikzentren“ wird unter der Annahme, dass sich die Beschäftigten im gesamten Gebäude aufhalten, eine minimale Raum-Solltemperatur von 17 °C festgelegt. Da Lagergebäude häufig nicht in einem 1-Schichtbetrieb sondern einem 2-Schichtbetrieb betrieben werden, wird an diesem Gebäudetyp der Einfluss von unterschiedlichen Nutzungszeiten auf den Wärmeverlust von Toren in den entwickelten Szenarien untersucht, siehe Kapitel 7.6.

Die spezifische Leistung⁸ des idealen Heizers beträgt für dieses Gebäudemodell 65 W/m². Die internen Wärmelasten werden mit lediglich 6 W/m² durch eine flächige Grundbeleuchtung während der Nutzungszeit angesetzt. Zusätzliche Wärmelasten (z.B. industrielle Prozesswärme) sind nicht vorhanden.

Weitere Randbedingungen sind der Tabelle 8 zu entnehmen.

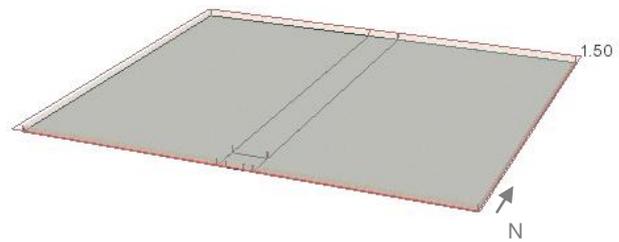


Abbildung 17: Schnitt durch das Gebäudemodell *Lager* in [IDA ICE 2012] mit Darstellung der Zonierung

Tabelle 8: Randbedingungen des Gebäudemodells *Lager*

Abmessungen (b-l-h) [m]	100 · 100 · 14
Grundfläche [m ²]	10.000
Volumen [m ³]	140.000
interne Wärmelasten (inkl. Beleuchtung) [W/m ²]	6
min. Raum-Solltemperatur in 1,4 m Höhe [°C]	17
max. Raum-Solltemperatur in 1,4 m Höhe [°C]	28
vertikaler Temperaturgradient [1/m]	0,5
A/V-Verhältnis	0,18
Dämmstandard	EnEV 2009, Sandwich-Paneele
natürliche Gebäudeinfiltration (bei 50 Pa) [m ³ /(m ² ·h)]	8,2 (n ₅₀ = 0,9)
Nutzungszeit	1-Schicht: Mo-Fr, 7-16 Uhr 2-Schicht: Mo-Fr, 6-22 Uhr
Klimadaten	TRY 13, Schwäbisch-fränkisches Stufenland und Alpenvorland
Druckbeiwerte	exponierte Lage (siehe Anhang 13.2)

⁸ bedingt durch das niedrige A/V-Verhältnis des Gebäudemodells *Lager* ist die benötigte spezifische Leistung des idealen Heizers zur Einhaltung der Raum-Solltemperatur von 17 °C trotz einer höheren Raum-Solltemperatur von 2 K gegenüber dem Gebäudemodell *Werkstatt* geringer.

5.5 Wärme- und Kühlbedarf der Gebäudemodelle ohne Tore in der Fassade

Um den Einfluss eines Tores und den resultierenden Mehrbedarf an Wärme in Zusammenhang mit dem Gebäude beurteilen zu können, werden zunächst die Gebäudemodelle ohne Öffnungen in der Fassade simuliert. Diese Untersuchungen dienen hierbei als Referenz für die Gebäudemodelle mit Toren.

In Abbildung 18 ist der spezifische Nutzenergiebedarf für Wärme (roter Balken) und für Kälte (blauer Balken) der verschiedenen Gebäudemodelle dargestellt.

Wie aus Abbildung 18 ersichtlich, beträgt der Wärmebedarf des Gebäudemodells *Fertigung* ohne Tore lediglich rund $15 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ ⁹. Desweiteren fällt aufgrund der anfallenden internen Wärmelasten ein Kühlbedarf von ca. $10 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ an, um die maximale Raum-Solltemperatur von $28 \text{ }^\circ\text{C}$ nicht zu überschreiten.

Beim Gebäudemodell *Werkstatt* ergibt sich ein spezifischer Wärmebedarf von rund $35 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ ¹⁰. Dieser ist damit mehr als doppelt so hoch im Vergleich zum Gebäudemodell *Fertigung*. Grund hierfür sind die verringerten internen Wärmelasten sowie das ungünstigere A/V-Verhältnis. Auch fällt nahezu kein Bedarf an Kälte an, die maximale Raum-Solltemperatur von $28 \text{ }^\circ\text{C}$ wird nicht erreicht.

Beim Gebäudemodell *Lager* liegt der spezifische Wärmebedarf im Vergleich zu den beiden anderen Gebäudemodellen am höchsten bei ca. $50 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ ¹¹, ein Kühlbedarf ist nicht vorhanden. Wesentlicher Unterschied ist hierbei der kaum vorhandene Wärmeeintrag durch interne Wärmelasten, da lediglich eine künstliche Grundbeleuchtung von 6 W/m^2 angesetzt wird.

Bei einer Unterstellung eines 2-Schicht-Betriebs für das Gebäudemodell *Lager* erhöht sich der jährliche Wärmebedarf um lediglich 7 %. Diese relativ geringfügige Erhöhung des Wärmebedarfs lässt sich durch die hochwärmedämmte und dichte Fassade begründen. Ist die Lagerhalle auf die Raum-Solltemperatur beheizt, kann diese mit einem geringen Mehrbedarf an Wärme auf dem Raum-Solltemperaturniveau gehalten werden. Begünstigt wird dieser Umstand durch die dauerhaft eingeschaltete Beleuchtung (interne Wärmelast) während der Nutzungszeit.

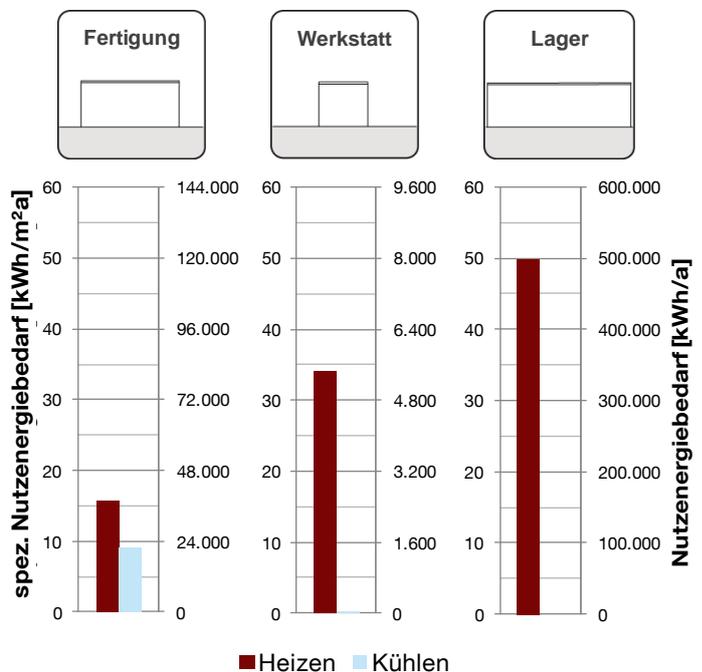


Abbildung 18: spezifischer und absoluter Nutzenergiebedarf für Wärme und Kälte des Gebäudemodells *Fertigung*, *Werkstatt* und *Lager* bei 1-Schichtbetrieb

⁹ bei Simulation des Gebäudemodells *Fertigung* ohne interne Wärmelasten beträgt der Wärmebedarf rund $80 \text{ kWh/m}^2\text{a}$, Kühlbedarf ist nicht vorhanden. Dies zeigt den hohen Einfluss der internen Wärmelasten auf die Energiebilanz des Gebäudes, der Wärmebedarf wird um das ca. 5-fache reduziert.

¹⁰ bei Simulation des Gebäudemodells *Werkstatt* ohne interne Wärmelasten beträgt der Wärmebedarf rund $65 \text{ kWh/m}^2\text{a}$. Der Wärmebedarf wird somit durch die internen Wärmelasten halbiert.

¹¹ bei Simulation des Gebäudemodells *Lager* ohne interne Wärmelasten beträgt der Wärmebedarf rund $60 \text{ kWh/m}^2\text{a}$. Da lediglich eine Beleuchtung von ca. 150 lx bzw. 6 W/m^2 als interne Wärmelast angesetzt ist, reduziert sich der Wärmebedarf unter Berücksichtigung der Beleuchtungswärme nur um ca. 20 %.

6. Energetische Beurteilung der torspezifischen Einflussgrößen

6.1 Einleitung

In diesem Kapitel werden die torspezifischen Einflussgrößen auf die Energiebilanz – insbesondere den Wärmebedarf – quantifiziert. Ausgehend von den in Kapitel 5 beschriebenen Gebäudemodellen werden die einzelnen Parameter eines Tores (z.B. U-Wert, Öffnungsdauer) variiert und (wenn nicht anders ausdrücklich erwähnt) auf ein Tor in der Fassade bezogen, da die Anzahl an Toren nicht nur vom Gebäudetyp, sondern auch von der Nutzungsart des Gebäudes abhängig ist und deshalb allgemeingültige Aussagen nur schwer möglich sind.

Der Flächenanteil eines Tores im Verhältnis zur Fassadenfläche beträgt für die untersuchten Gebäudemodelle:

	<i>Fertigung</i>	<i>Werkstatt</i>	<i>Lager</i>
Anteil Torfläche zu Fassadenfläche	16 m ² / 2.000 m ² <u>0,8 %</u>	16 m ² / 336 m ² <u>4,8 %</u>	16 m ² / 5.600 m ² <u>0,3 %</u>

Bei mehreren Toren in der Fassade erhöht sich der Wärmeverlust bzw. der resultierende Mehrbedarf an Wärme entsprechend um die Anzahl der vorhandenen Tore, wobei der Einfluss einer Gebäudedurchströmung bei z.B. gegenüberliegend geöffneten Toren berücksichtigt werden muss. Dieser Effekt wird für das Gebäudemodell *Fertigung* in Kapitel 6.5 untersucht.

6.2 Variation der Öffnungsdauer

Um eine erste Abschätzung der Wärmeverluste durch Tore vornehmen zu können, wird in einem vereinfachten Schritt eine pauschale Öffnungsdauer während der Nutzungszeit angesetzt. Dazu wird ein 4 · 4 m² großes Tor mit „durchschnittlichen technischen Eigenschaften“ in der südausgerichteten Fassade des Gebäudemodells eingefügt.

Dabei wird ein U-Wert von 3 W/m²K, eine Luftdurchlässigkeitsklasse von 1 nach [DIN EN 12426] (siehe Kapitel 3.1.2) angesetzt und in einem nächsten Schritt die Öffnungsdauer von 0 min/h (Tor stets geschlossen) bis 20 min/h (Tor pauschal 20 min/h während der Nutzungszeit geöffnet) variiert.

6.2.1 Wärmeverlust und Mehrbedarf an Wärme

In Abbildung 19 ist der jährliche Wärmeverlust des Tores durch Transmission, Leckage und Öffnung sowie der darauf zurückzuführende Mehrbedarf an Wärme in Abhängigkeit der (pauschalen) Öffnungsdauer (ÖD) pro Stunde des Tores dargestellt. Der prozentuale Mehrbedarf an Wärme in Relation zum jeweiligen Gebäudemodell ohne Tor ist in den Diagrammen über dem roten Balken angegeben. Der absolute Mehrbedarf an Wärme in kWh/a ist aus den Diagrammen abzulesen.

Bei stets geschlossenem Tor (Öffnungsdauer 0 min/h) erhöht sich der Wärmebedarf des Gebäudes gegenüber dem jeweiligen Gebäudemodell ohne Tor aufgrund des schlechteren U-Wertes (3 W/m²K) im Vergleich zur Fassade (0,24 W/m²K) und der gewählten Luftdurchlässigkeitsklasse. Beim Gebäudemodell *Fertigung* beträgt der Mehrbedarf an Wärme 5 % bzw. rund 1.300 kWh/a, beim Gebäudemodell *Werkstatt* 19 % bzw. rund 1.000 kWh/a sowie beim Gebäudemodell *Lager* um 0,5 % bzw. rund 2.400 kWh/a¹².

Bei zunehmender pauschaler Öffnungsdauer zeigt sich insbesondere bei den Gebäudemodellen *Fertigung* und *Lager* ein hoher Anstieg des Mehrbedarfs an Wärme. So bewirkt eine sechsminütige Öffnung pro Stunde während der Nutzungszeit beim Gebäudemodell *Fertigung* einen Mehrbedarf an Wärme von 27 % bzw. rund 10.200 kWh/a (Gebäudemodell *Lager*: 1,9 % bzw. 9.700 kWh/a). Der Wärmeverlust durch das geöffnete Tor ist dabei aufgrund des großen Luftvolumens bei beiden Gebäuden weitestgehend proportional zur Öffnungsdauer.

¹² der prozentual geringe Einfluss beim Gebäudemodell *Lager* erklärt sich durch den flächenmäßig sehr kleinen Anteil des Tores zur Fassade. Da in Lagergebäuden der Flächenanteil von Toren in der Fassade zum Teil erheblich ist, erhöht sich entsprechend der Anzahl der Tore auch der Mehrbedarf an Wärme des Gebäudes. Im Vergleich zu den beiden anderen Gebäudemodellen ist der Mehrbedarf an Wärme bei geschlossenem Tor sogar höher, da die internen Wärmelasten geringer sind (2.400 kWh/a gegenüber 1.300 kWh/a beim Gebäudemodell *Fertigung* bzw. 1.000 kWh/a beim Gebäudemodell *Werkstatt*).

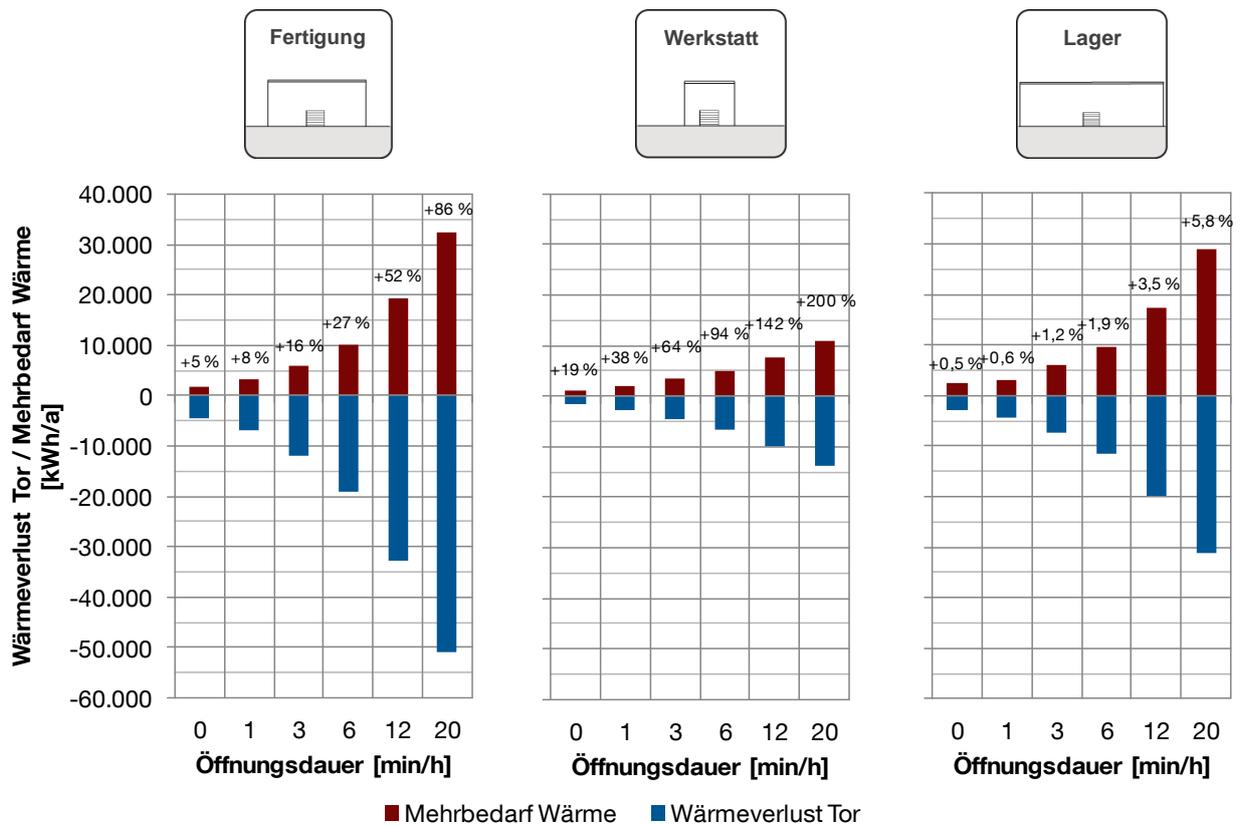


Abbildung 19: Wärmeverlust durch Transmission, Leckage und Öffnung des Tores sowie resultierender Mehrbedarf an Wärme gegenüber dem simulierten Gebäude ohne Tor in Abhängigkeit einer pauschalen Öffnungsdauer für die Gebäudemodelle *Fertigung*, *Werkstatt* und *Lager* über ein Jahr

Beim Gebäudemodell *Werkstatt* ist der Einfluss auf den Wärmebedarf in absoluten Zahlen geringer. Dies ist auf folgende Unterschiede der Modelle zurückzuführen:

- das Raumvolumen des Gebäudemodells ist mit 960 m³ wesentlich geringer als bei den Gebäudemodellen *Fertigung* und *Lager* und kühlt deshalb schneller aus
- die Raum-Solltemperatur beträgt lediglich 15 °C (*Fertigung*: 20 °C, *Lager*: 17 °C), der Luftaustausch infolge Thermik ist geringer

Bedingt durch die geringen Gebäudeabmessungen der *Werkstatt* ist der spezifische (prozentuale) Einfluss des Tores auf den Wärmebedarf des Gebäudes jedoch wesentlich höher.

Der Zusammenhang zwischen Öffnungsdauer und Lüftungswärmeverlust ist für die drei Gebäudemodelle in Abbildung 20 dargestellt. Es zeigt sich, dass bei den Gebäudemodellen *Fertigung* und *Lager* der Lüftungswärmeverlust aufgrund des großen Raumvolumens weitestgehend proportional zur Öffnungsdauer ist. Beim Gebäudemodell *Werkstatt* stellt sich aufgrund der genannten Unterschiede ein regressiver Verlauf ein.

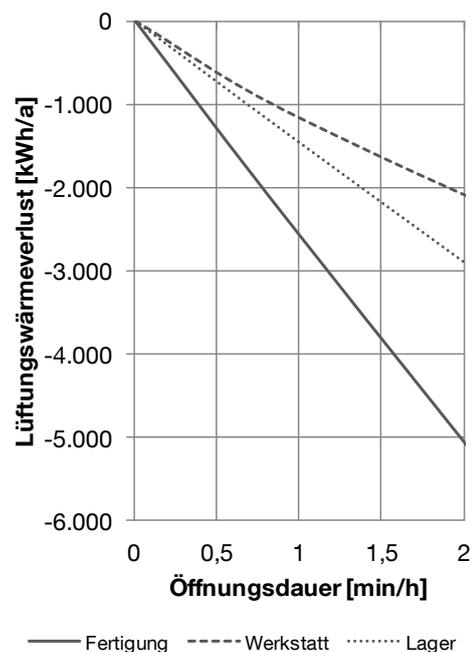


Abbildung 20: Lüftungswärmeverlust in Abhängigkeit der Öffnungsdauer für die Gebäudemodelle *Fertigung*, *Werkstatt* und *Lager*

Desweiteren fällt auf, dass beim Gebäudemodell *Fertigung* der Wärmeverlust des Tores (blauer Balken) deutlich höher ist als der Mehrbedarf an Wärme (roter Balken). Grund hierfür ist eine „Kompensation“ der Wärmeverluste durch die internen Wärmelasten. In einer Monatsbetrachtung wird dies exemplarisch für eine pauschale Toröffnungsdauer von 6 min/h in Abbildung 21 dargestellt.

Insbesondere in den Übergangsmonaten, aber auch in den Sommermonaten Juni bis August entsteht ein Wärmeverlust durch das Tor, wenn die Außentemperatur niedriger als die Hallentemperatur ist. Die Raum-Solltemperatur von 20 °C wird jedoch nicht unterschritten, was die Voraussetzung für das Einschalten des idealen Heizsystems ist. Dieser Effekt ist vorrangig beim Gebäudemodell *Fertigung* ersichtlich, da die internen Wärmelasten das Gebäude zusätzlich aufheizen.

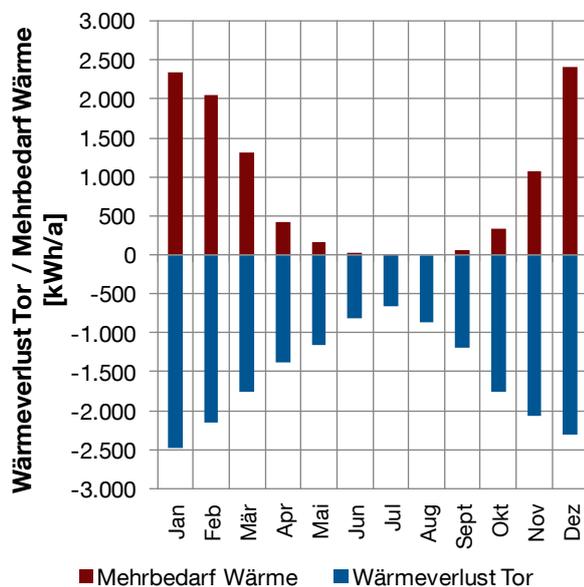


Abbildung 21: Mehrbedarf an Wärme sowie Wärmeverlust durch Transmission, Leckage und Öffnung des Tores gegenüber dem Gebäudemodell ohne Tor über ein Jahr bei einer pauschalen Öffnungsdauer von 6 min/h während der Nutzungszeit, Gebäudemodell *Fertigung*

6.2.2 Anteil von Transmission, Leckage und Öffnung des torbedingten Wärmeverlusts

In Abbildung 22 ist die prozentuale Verteilung der Wärmeverluste durch Transmission, Leckage und Öffnung des Tores in Abhängigkeit der pauschalen Toröffnungsdauer exemplarisch für das Gebäudemodell *Fertigung* dargestellt.

Bei den gewählten Randbedingungen für Tor und Gebäude überwiegen bei stets geschlossenem Tor die Transmissionswärmeverluste gegenüber den Wärmeverlusten durch Leckagen. Es zeigt sich jedoch, dass bereits bei einer dreiminütigen Öffnungsdauer pro Stunde die Lüftungswärmeverluste überwiegen.

Die Aussage, dass Lüftungswärmeverluste bereits ab wenigen Minuten gegenüber den Wärmeverlusten durch Transmission und Leckage überwiegen, gilt auch für die beiden Gebäudemodelle *Werkstatt* und *Lager*. Die prozentuale Verteilung der Wärmeverluste entspricht der der *Fertigung*.

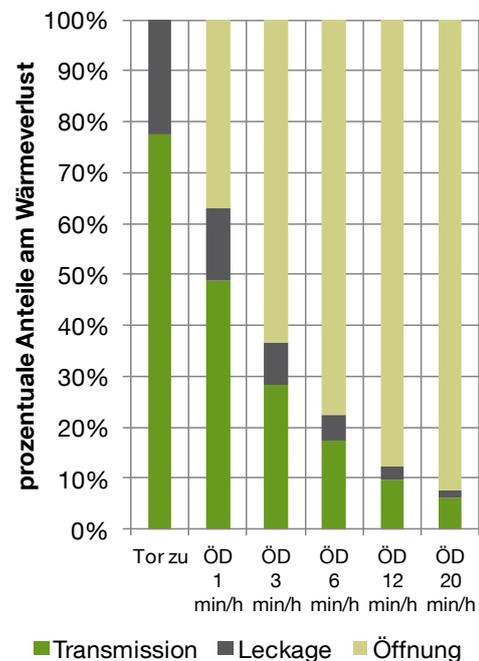


Abbildung 22: prozentuale Verteilung der Wärmeverluste durch Transmission, Leckage und Öffnung des Tores in Abhängigkeit der pauschalen Toröffnungsdauer im Gebäudemodell *Fertigung* über ein Jahr

6.3 Variation des U-Werts und der Luftdurchlässigkeitsklasse

Da Tore auch über einen längeren Zeitraum (z.B. an Wochenenden) geschlossen sind, wird der Einfluss von Wärmeverlusten durch Transmission und Leckagen in diesem Kapitel unabhängig voneinander untersucht.

Der U-Wert dient als Kenngröße für den Wärmeverlust infolge Transmission, siehe Kapitel 3.1.1. Je niedriger der U-Wert, desto geringer der Transmissionswärmeverlust. Die Dichtheit eines Tores wird durch die Luftdurchlässigkeitsklasse angegeben, siehe Kapitel 3.1.2. Hier gilt: je höher die Klasse, desto dichter das Tor.

Da beide Verlustarten nur bei geschlossenem Tor auftreten können, wird für die folgende Untersuchung der „ungünstigste Fall“, ein über das Jahr stets geschlossenes Tor, angesetzt.

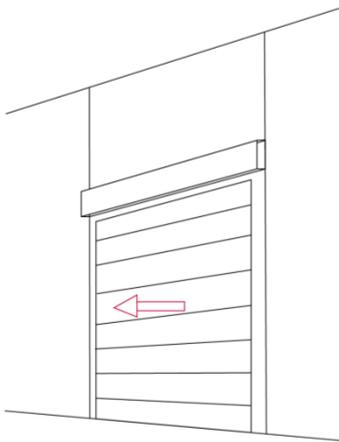


Abbildung 23: Transmissionswärmeverlust

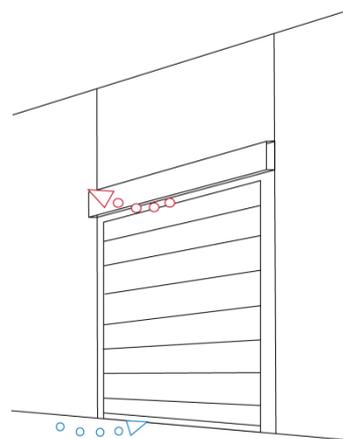


Abbildung 24: Wärmeverlust durch Leckagen

6.3.1 Variation des U-Werts

Der Einfluss der Variation des U-Werts in einem Bereich von 1 W/m²K (hochwärmegedämmtes Tor) bis 5 W/m²K (gering gedämmtes Tor) ist in Abbildung 25 ersichtlich.

Im Gebäudemodell *Fertigung* beträgt der Unterschied des Mehrbedarfs an Wärme zwischen einem U-Wert von 1 W/m²K und 5 W/m²K ca. 5 % bzw. rund 1.700 kWh/a. Ähnlich wie in der vorangegangenen Untersuchung bei Variation der Öffnungsdauer zeigt sich, dass der Wärmeverlust durch Transmission größer ist als der resultierende Mehrbedarf an Wärme. Bei Raumtemperaturen oberhalb der Raum-Solltemperatur von 20 °C treten Transmissionswärmeverluste auf, die nicht zu einem Mehrbedarf an Wärme führen.

Beim Gebäudemodell *Werkstatt* beträgt der Unterschied des Mehrbedarfs an Wärme zwischen minimalem und maximalem U-Wert auf ca. 18 % bzw. rund 1.000 kWh/a. Der Transmissionswärmeverlust des Tores, und folglich auch der Mehrbedarf an Wärme, ist im Vergleich zum Gebäudemodell *Fertigung* geringer. Hauptursache ist die

niedrigere Soll-Raumtemperatur von 15 °C (Gebäudemodell *Fertigung*: 20 °C) und damit die einhergehenden verringerten Transmissionswärmeverluste. Desweiteren liegen Wärmeverlust und resultierender Mehrbedarf an Wärme in ihrer Größenordnung näher zusammen als beim Gebäudemodell *Fertigung*. Dies ist mit der verringerten internen Wärmelast begründet. Das ideale Heizsystem muss in höherem Maße die Transmissionswärmeverluste des Tores kompensieren.

Im Gebäudemodell *Lager* beläuft sich der Unterschied des Mehrbedarfs an Wärme zwischen minimalem und maximalem U-Wert auf ca. 0,4 % bzw. rund 1.870 kWh/a. Obwohl der Wärmeverlust durch Transmission geringer als beim Gebäudemodell *Fertigung* ist, ist der Mehrbedarf an Wärme geringfügig höher. Die im Gebäudemodell *Lager* angesetzte geringe interne Wärmelast (lediglich Beleuchtung mit 6 W/m²) trägt kaum zu einer Kompensation der Transmissionswärmeverluste durch das Tor bei. Der ideale Heizer muss in höherem Maße die Transmissionswärmeverluste des Tores ausgleichen.

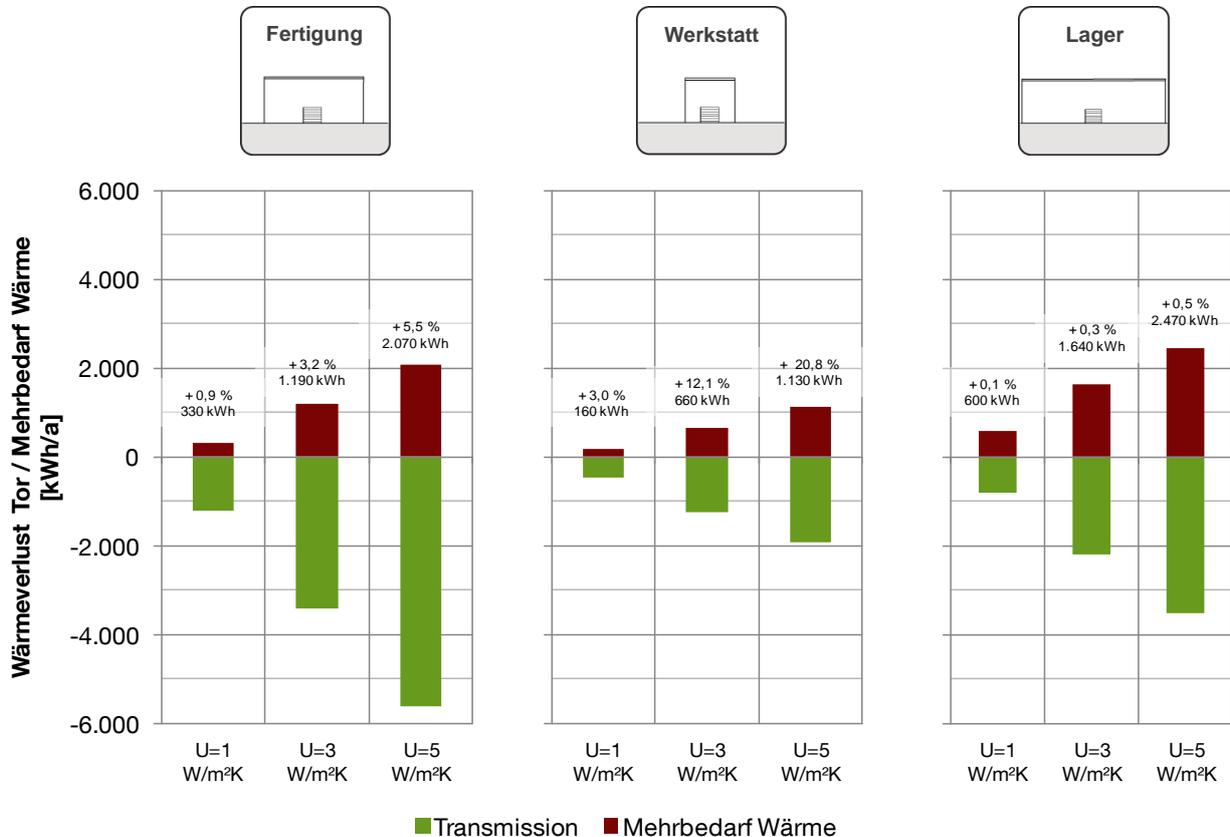


Abbildung 25: Variation des U-Werts des Tores von 1 W/m²K bis 5 W/m²K für die Gebäudemodelle *Fertigung*, *Werkstatt* und *Lager*

6.3.2 Variation der Luftdurchlässigkeitsklasse

Für die Betrachtung der Wärmeverluste durch Leckagen gilt, wie für die Variation des U-Werts, die Voraussetzung eines stets geschlossenen Tores. Da in der [DIN EN 12426] für die Luftdurchlässigkeitsklasse (LDK) 0 kein entsprechender Wert der Luftdurchlässigkeit angegeben ist, wird vereinfacht eine Luftdurchlässigkeit von $50 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ bei 50 Pa Druckdifferenz angesetzt. Die Luftdurchlässigkeit ist damit mehr als doppelt so hoch als bei einem Tor mit der LDK 1.

In Abbildung 26 ist der Einfluss unterschiedlicher LDK des Tores für die Gebäudemodelle *Fertigung*, *Werkstatt* und *Lager* dargestellt.

Grundsätzlich zeigt sich, dass der Wärmeverlust durch Leckagen unter den gesetzten Randbedingungen der Gebäudemodelle geringer einzustufen ist als der Transmissionswärmeverlust durch das Tor. Bei hoher Luftdichtheit des Tores ($\text{LDK} > 3$) lässt sich, aufgrund des komplexen Wirkgefüges innerhalb des Gebäudemodells, ein Mehrbedarf an Wärme mit der Simulation nicht mehr explizit darstellen.

Im Gebäudemodell *Fertigung* beträgt der Unterschied des Mehrbedarfs an Wärme zwischen einer LDK von 0 und 3 ca. 3 % bzw. rund 1.100 kWh/a . Auch hier zeigt

sich, dass der Wärmeverlust durch Leckagen größer als der resultierende Mehrbedarf an Wärme ist, da nur bei einer Unterschreitung der Raum-Solltemperatur das Heizsystem aktiviert wird.

Beim Gebäudemodell *Werkstatt* beläuft sich der Unterschied des Mehrbedarfs an Wärme zwischen einer LDK von 0 und 3 auf ca. 14 % bzw. rund 800 kWh/a . Der Wärmeverlust durch Leckagen des Tores, und demzufolge auch der Mehrbedarf an Wärme, ist aufgrund der niedrigen Raum-Solltemperatur von $15 \text{ }^\circ\text{C}$ geringer als beim Gebäudemodell *Fertigung*.

Der Unterschied des Mehrbedarfs an Wärme liegt beim Gebäudemodell *Lager* zwischen einer LDK von 0 und 3 bei ca. 0,3 % bzw. rund 1.550 kWh/a . Der Wärmeverlust durch Leckagen ist aufgrund der verringerten Raum-Solltemperatur von $17 \text{ }^\circ\text{C}$ gegenüber dem Gebäudemodell *Fertigung* (Raum-Solltemperatur $20 \text{ }^\circ\text{C}$) zwar für die jeweilige LDK kleiner, der Mehrbedarf an Wärme ist jedoch geringfügig höher. Dies zeigt, dass die im Gebäudemodell *Lager* angesetzte geringe interne Wärmelast (lediglich Beleuchtung mit 6 W/m^2) kaum zu einer Kompensation der Wärmeverluste durch die Leckagen des Tores beiträgt. Der ideale Heizer muss in höherem Maße die Wärmeverluste durch das Tor ausgleichen, anders als beim Gebäudemodell *Fertigung*.

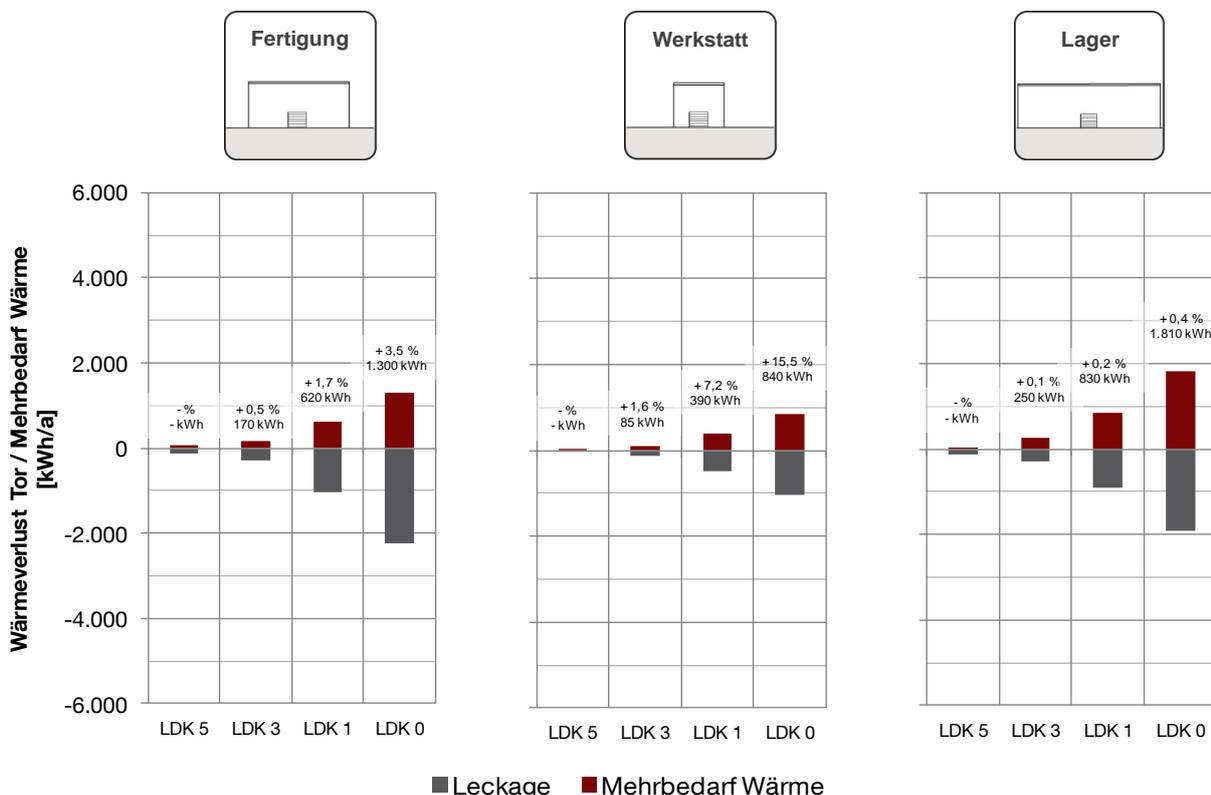


Abbildung 26: Variation der Luftdurchlässigkeitsklasse (LDK) des Tores von Klasse 5 bis 0 für die Gebäudemodelle *Fertigung*, *Werkstatt* und *Lager*

6.4 Raumtemperaturabfall bei geöffnetem Tor

In den folgenden Kapiteln soll der Temperaturabfall in Abhängigkeit der Öffnungsdauer des Tores untersucht werden. Hierzu ist eine feinere Zonierung ($8 \cdot 8 \text{ m}^2$ -Raster) der Gebäudemodelle als in den vorangegangenen Untersuchungen gewählt, da der Simulationszeitraum auf wenige Minuten beschränkt ist.

Die Untersuchung des Temperaturabfalls bei Toröffnung wird exemplarisch für einen kalten Wintertag vorgenommen. Vor der Toröffnung ($t = 0 \text{ min}$) herrscht eine einheitliche Temperaturverteilung im Gebäude.

6.4.1 Gebäudemodell *Fertigung*

In Abbildung 27 ist die Raumtemperaturverteilung für das Gebäudemodell *Fertigung* auf einer Höhe von 1,4 m in Abhängigkeit der Öffnungsdauer dargestellt. Hierzu wird das Gebäudemodell in insgesamt 35 Zonen eingeteilt, zwischen denen Luftaustauschvorgänge simuliert werden. Entsprechend der Gesetzmäßigkeiten des zonalen Simulationsmodells herrschen innerhalb einer Zone homogene Luftzustände mit der Besonderheit, dass ein vertikaler Temperaturgradient von $0,5 \text{ K/m}$ berücksichtigt

wird. Das gewählte Zonierungsraster beträgt $8 \cdot 8 \text{ m}^2$. Die Außentemperatur liegt bei $-8,1 \text{ °C}$, die Raumtemperatur zu $t = 0 \text{ min}$ bei $20,2 \text{ °C}$. Die durchschnittliche Windgeschwindigkeit beträgt $0,5 \text{ m/s}$.

In Abbildung 27 wird ersichtlich, dass erwartungsgemäß in der Zone, in der das Tor eingefügt ist („Torzone“), der größte Temperaturabfall zu verzeichnen ist. Mit zunehmender Gebäudetiefe nimmt der Einfluss der Öffnung ab. Bei den hier gewählten Randbedingungen des Gebäudemodells (interne Wärmelasten, Wärmeleistung des idealen Heizers, Temperaturgradient über die Gebäudehöhe etc., siehe Kapitel 5.2) sowie des Untersuchungszeitraums zeigt sich, dass die effektive Eindringtiefe der Außenluft bei geöffnetem Tor ca. 24 m beträgt. Nach rund 10-minütiger Öffnungsdauer fällt die Temperatur in allen Zonen nur noch geringfügig ab.

An dieser Stelle muss jedoch angemerkt werden, dass das Simulationsmodell nur eine grobe Tendenz für die Temperaturverteilung im Gebäude liefern kann, da viele strömungsrelevante Aspekte wie lokale Turbulenzeffekte innerhalb des Mehrzonen-Modells (siehe Kapitel 4.1) nicht berücksichtigt werden können.

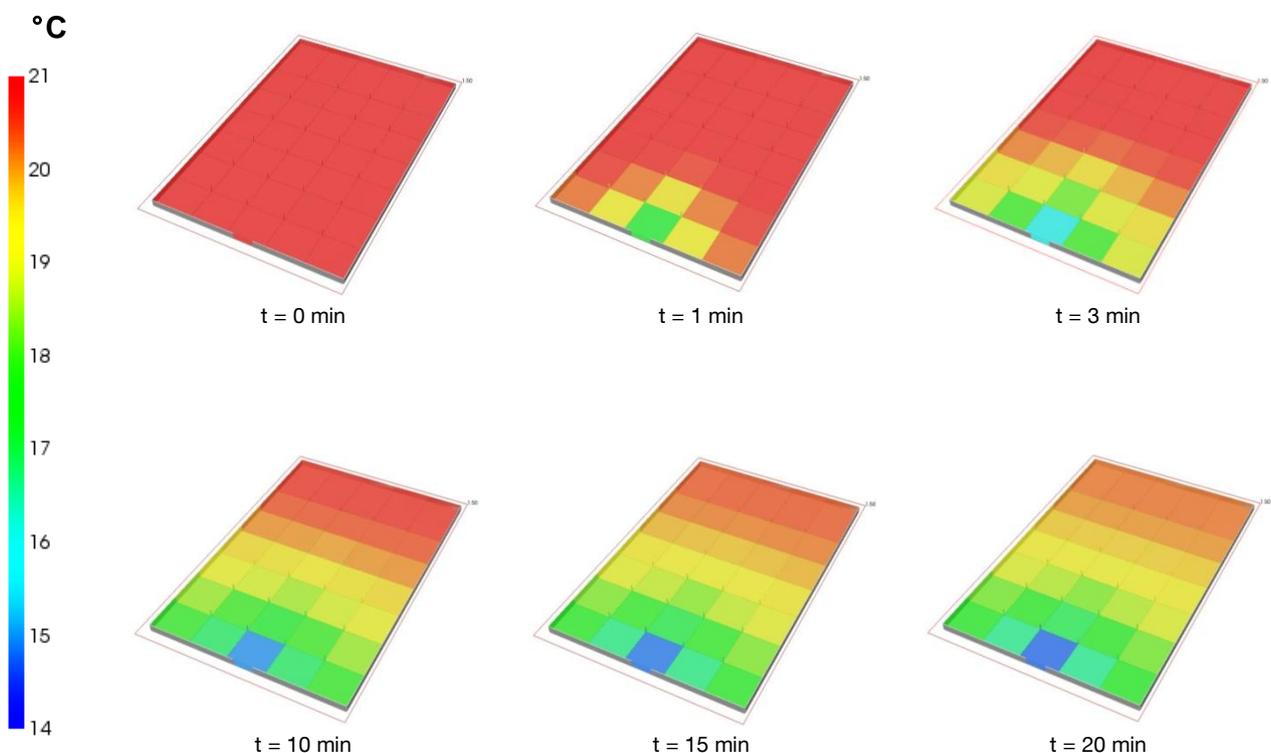


Abbildung 27: simulierter Raumtemperaturabfall bei geöffnetem Tor beim Gebäudemodell *Fertigung* am 16. Januar zwischen 8:00 – 8:20 Uhr

6.4.2 Gebäudemodell *Werkstatt*

Für das Gebäudemodell *Werkstatt* wird für den gleichen Betrachtungszeitraum ebenfalls ein Raumtemperaturprofil erstellt. Aufgrund der geringen Grundfläche dieses Gebäudemodells beschränkt sich die Anzahl der Zonen auf lediglich drei, siehe Abbildung 28. Dargestellt ist die Temperatur auf einer Höhe von 1,4 m. Die Außentemperatur liegt bei $-8,1\text{ °C}$, die Raumtemperatur zu $t = 0\text{ min}$ bei $15,0\text{ °C}$. Die durchschnittliche Windgeschwindigkeit beträgt $0,5\text{ m/s}$.

Bedingt durch das geringe Raumvolumen ist der Temperaturabfall bei geöffnetem Tor wesentlich größer als im

Vergleich zum Gebäudemodell *Fertigung*. Ein ähnlich extremer Temperaturabfall wurde auch in der Messung unter Realbedingungen (siehe Kapitel 4.2) festgestellt. Insbesondere in den ersten Minuten fällt die Raumtemperatur bei geöffnetem Tor sehr schnell. Beträgt die Raumtemperatur auf der Nutzebene von $1,4\text{ m}$ bei $t = 0\text{ min}$ noch einheitlich 15 °C , so sinkt die Temperatur bereits nach 3-minütiger Toröffnungsdauer um 7 K unter 8 °C . Demnach sollte die Öffnungsdauer eines Tores auf ein Minimum begrenzt werden, um ein rasches Auskühlen der Halle zu verhindern.

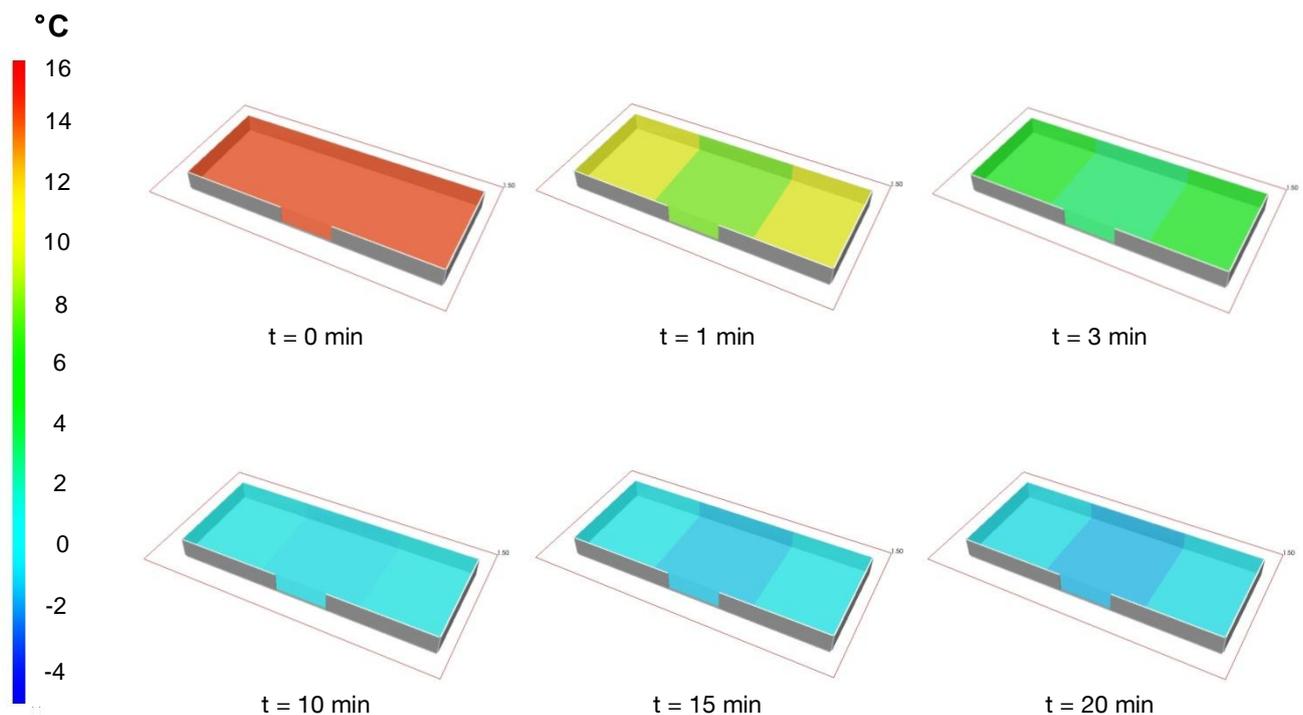


Abbildung 28: simulierter Raumtemperaturabfall bei geöffnetem Tor beim Gebäudemodell *Werkstatt* am 16. Januar zwischen 8:00 – 8:20 Uhr

6.4.3 Gebäudemodell *Lager*

Für das Gebäudemodell *Lager* wird die Gebäudegrundfläche in insgesamt 169 Zonen unterteilt, siehe Abbildung 29. Dargestellt ist die Temperatur auf einer Höhe von 1,4 m. Das gewählte Zonierungsrastrer beträgt $8 \cdot 8 \text{ m}^2$. Die Außentemperatur liegt bei $-8,1 \text{ °C}$, die Raumtemperatur zu $t = 0 \text{ min}$ bei $17,0 \text{ °C}$. Die durchschnittliche Windgeschwindigkeit beträgt $0,5 \text{ m/s}$.

Zunächst kann festgestellt werden, dass der Temperatureinfluss des geöffneten Tores zu Beginn der Öffnungsdauer am größten ist, ähnlich wie bei den Gebäudemodellen *Fertigung* und *Werkstatt*. Desweiteren wird ersichtlich, dass die temperaturwirksame Eindringtiefe der kalten Luft bei den gewählten Randbedingungen

(siehe Kapitel 5.4) annähernd wie beim Gebäudemodell *Fertigung* mit ca. 24 m angegeben werden kann. Der Temperaturabfall beträgt in der „Torzone“ nach 10-minütiger Öffnungsdauer rund 4 K , die Temperatur auf $1,4 \text{ m}$ Höhe fällt auf ca. 13 °C .

Durch die für einen kalten Wintertag vorgenommene Untersuchung zeigt sich, dass ein hoher Temperaturabfall im umliegenden Torbereich zu verzeichnen ist, welcher neben den energetischen Auswirkungen insbesondere das Raumklima negativ beeinflusst. Aus diesem Grund sollten deshalb schon in der Planungsphase eines industriell genutzten Gebäudes mögliche Optimierungsmaßnahmen hinsichtlich der Reduzierung des Kaltluftetrags berücksichtigt werden, siehe Kapitel 8.

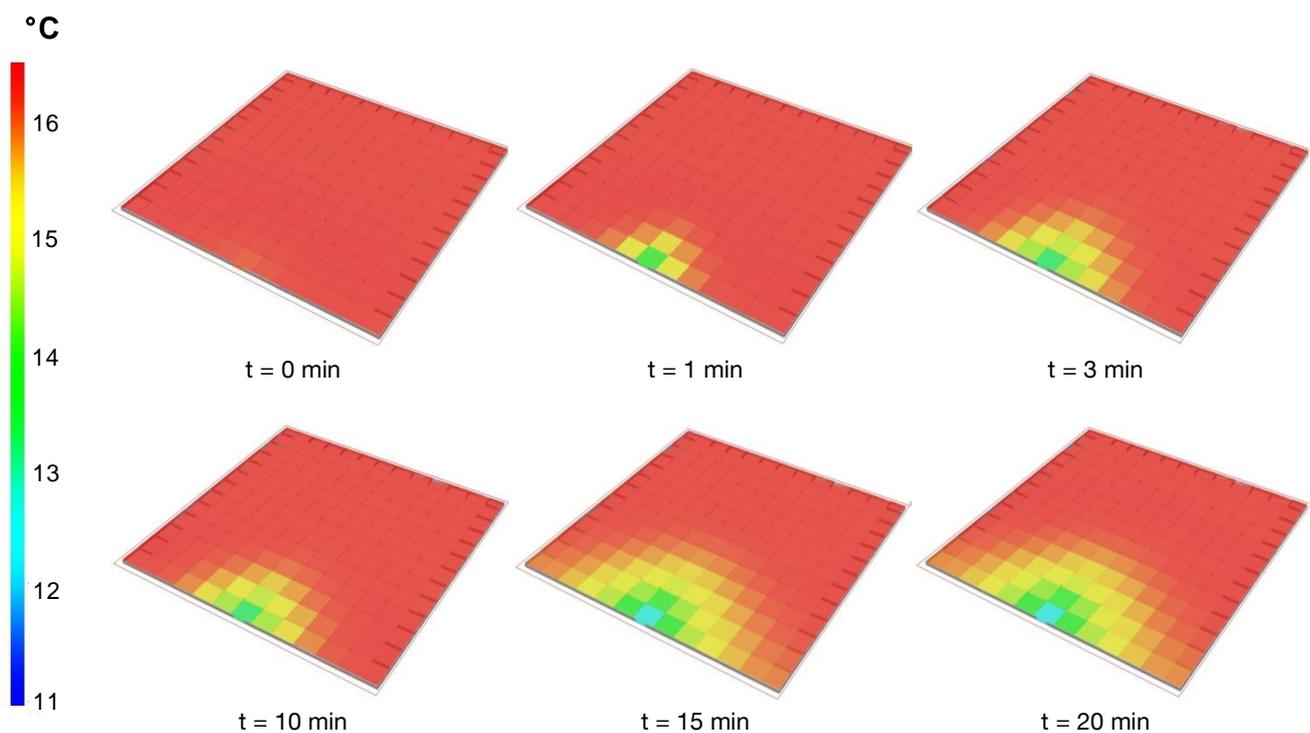
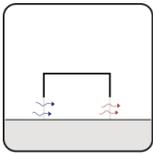


Abbildung 29: simulierter Raumtemperaturabfall bei geöffnetem Tor beim Gebäudemodell *Lager* am 16. Januar zwischen 8:00 – 8:20 Uhr

6.5 Einfluss von mehrseitig geöffneten Toren



Der Einfluss von geöffneten Toren auf gegenüberliegenden Gebäudeseiten wird in diesem Kapitel exemplarisch für das Gebäudemodell *Fertigung* untersucht. Dazu wird eine weitere „Torzone“ mit einem zweiten Tor in das in Kapitel 5.2 beschriebene 4-Zonen-Gebäudemodell eingefügt, siehe Abbildung 30. Wichtig ist hierbei, dass das in Kapitel 4.1.1 beschriebene Lüftungsmodell für einen einseitigen bidirektionalen Luftaustausch beim zeitgleichen Öffnen gegenüberliegender Tore nicht mehr zweckmäßig ist. Für die Berechnung bei zeitgleich offenstehenden Toren wird das in [IDA ICE 2012] vorhandene Lüftungsmodell genutzt. Diese ermittelt über ein Strömungsnetzwerk innerhalb der Gebäudezonen mit hinterlegten Durchflusskoeffizienten sowie Druckbeiwerte der Fassade (siehe Anhang) die Ein- und Austrittsvolumenströme. In Anlehnung an die Untersuchungsmethodik bei der Variation der Öffnungsdauer in Kapitel 6.2 wird hier der Vergleich zwischen zwei zeitgleich geöffneten Toren und einem zeitversetzten Öffnen der Tore simuliert. Hierzu werden durchschnittliche Toröffnungsdauern von 1, 3 und 6 min/h während der Nutzungszeit angesetzt. Öffnungs- und

Schließgeschwindigkeiten werden vernachlässigt. Beide Tore weisen dieselben torspezifischen Eigenschaften wie das beschriebene Tor in Kapitel 6.2 auf.

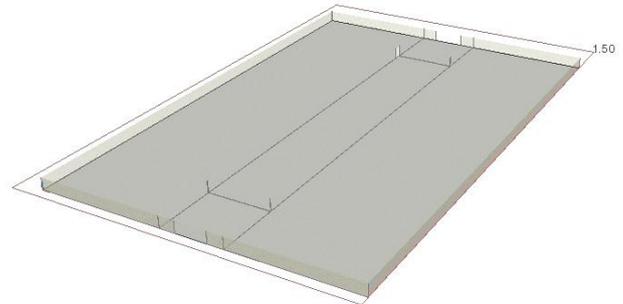


Abbildung 30: Schnitt durch das Gebäudemodell *Fertigung* mit 2 Toren auf gegenüberliegenden Seiten und Darstellung der Zonierung in [IDA ICE 2012]

In Abbildung 31 ist der Wärmeverlust der Tore bzw. der resultierende Mehrbedarf an Wärme gegenüber dem Gebäudemodell ohne Tore bei nacheinander geöffneten Toren (linkes Diagramm) und gleichzeitig geöffneten Toren in Nord-Süd-Orientierung (mittleres Diagramm) bzw. Ost-West-Orientierung (rechtes Diagramm) dargestellt.

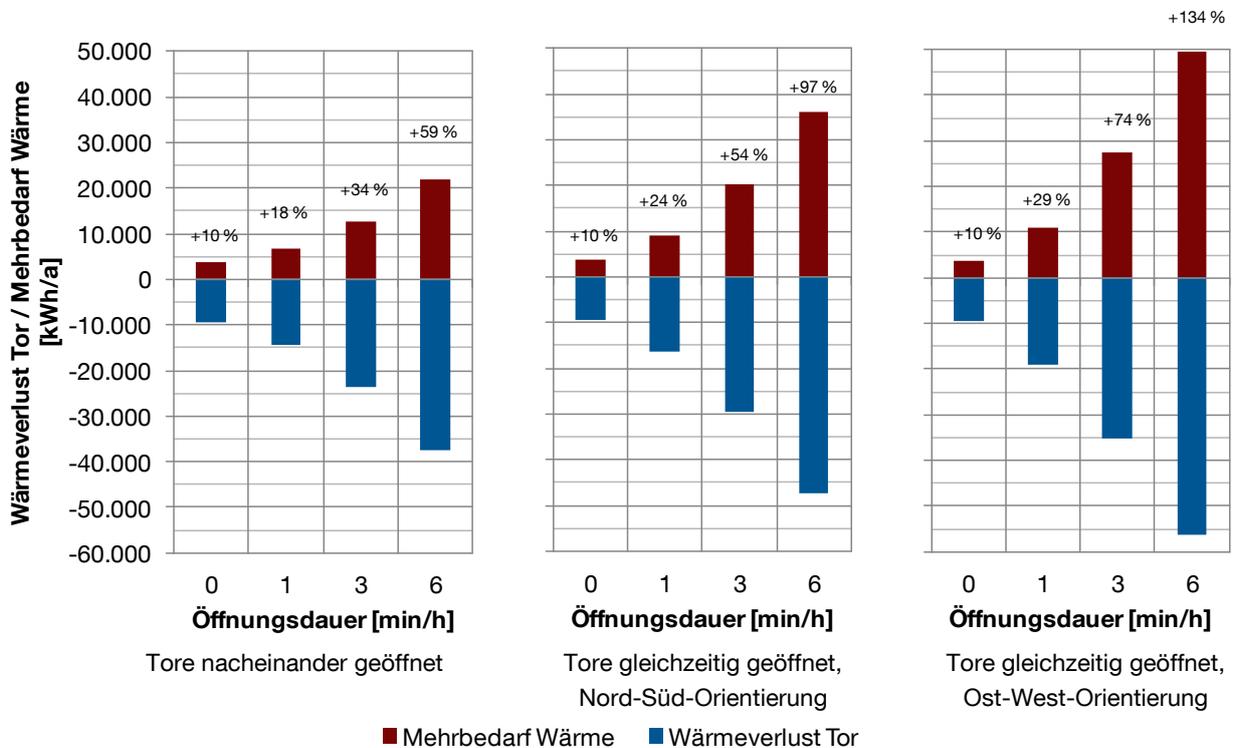


Abbildung 31: Mehrbedarf an Wärme gegenüber dem simulierten Gebäude ohne Tor, sowie der Wärmeverlust durch Transmission, Leckage und Öffnung der Tore in Abhängigkeit einer pauschalen Öffnungsdauer über ein Jahr. Diagramm Links: die Tore werden nacheinander geöffnet. Diagramm Mitte: die Tore werden gleichzeitig geöffnet bei Nord-Süd-Orientierung. Diagramm Rechts: die Tore werden gleichzeitig geöffnet bei Ost-West-Orientierung

Grundsätzlich zeigt sich, dass erwartungsgemäß bei gleichzeitig geöffneten Toren ein deutlich höherer Wärmeverlust bzw. Mehrbedarf an Wärme anfällt. Als grober Orientierungswert kann festgehalten werden, dass der Mehrbedarf an Wärme pro 1-minütiger Öffnungsdauer bei Nord-Süd-Orientierung der Tore um ca. 6 % gegenüber dem Gebäudemodell mit nacheinander geöffneten Toren ansteigt. Noch offensichtlicher zeigt sich der Einfluss bei Ost-West-Orientierung der Tore. Der Mehrbedarf an Wärme beläuft sich hier um mehr als 11 % pro 1-minütiger Öffnungsdauer gegenüber dem Gebäudemodell mit nacheinander geöffneten Toren. Der recht große Unterschied zwischen Nord-Süd- bzw. Ost-West-Orientierung ist in der Hauptwindrichtung aus Ost-West des gewählten Testreferenzjahres begründet, siehe Abbildung 32.

Die Ergebnisse zeigen, dass ein gleichzeitiges Offenstehen gegenüberliegender Tore nicht nur aus Gründen der Behaglichkeit aufgrund hoher Luftgeschwindigkeiten im Gebäude, sondern auch aus energetischer Sicht vermieden werden sollte. Dabei stellt die Windrichtung einen nicht zu vernachlässigenden Einflussfaktor dar. Wenn gegenüberliegende Tore aus planerischer Sicht der Logistik nicht vermeidbar sind, sollten Möglichkeiten zur Verhinderung von gleichzeitig offenstehenden Toren, z.B. über eine Sperrfunktion der Torsteuerung oder ein Ampelsystem überprüft werden.

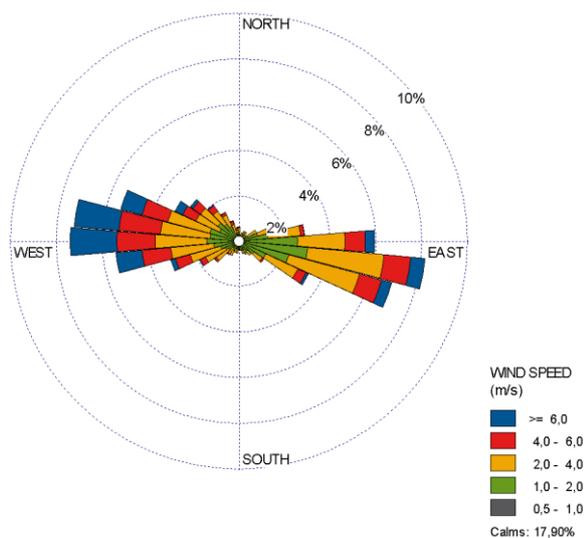


Abbildung 32: Windrose mit Darstellung der jährlichen Windrichtungs- und Windgeschwindigkeitsverteilung des verwendeten Testreferenzjahres 13 [DWD 2011], [WRPLOT 2011]

6.6 Elektrischer Energiebedarf von Torsteuerung, Sensorik und Antrieb

Je nach Tortyp, Torabmessungen und dem damit verbundenen Gewicht, der Anzahl an Öffnungszyklen sowie der Ausprägung als schnell oder langsam laufende Toranlage unterscheiden sich Antriebe im Aufbau und ihrer Funktionsweise.

Nach [VDI 2409, 16] wird dabei zwischen

- pneumatischen Antrieben
- hydraulischen Antrieben
- elektrischen Antrieben
- (Handbetätigung)

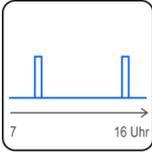
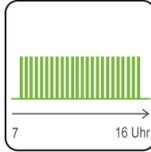
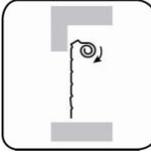
unterschieden. Da der Schwerpunkt der Studie die Untersuchung von Torsystemen als Gesamteinheit und in Rückkopplung mit dem Gebäude ist, werden die verschiedenen Antriebssysteme an dieser Stelle nicht weiter behandelt.

In folgenden zwei Rechenbeispielen wird eine Abschätzung des elektrischen Energieverbrauchs von Steuerung, Sensorik und Antrieb im Verhältnis zum jährlichen Mehrbedarf an Wärme durch Toröffnungen durchgeführt. Hierfür werden beispielhaft die Szenarien *LKW Be- und Entladung* sowie *regelmäßiger Staplerverkehr* für das Gebäudemodell *Fertigung* herangezogen. Eine detaillierte Beschreibung der Szenarien erfolgt in Kapitel 7.4. Die Randbedingungen der vergleichenden Energiebetrachtungen sind in Tabelle 9 zusammengefasst.

Torsteuerungen sowie sensorische Systeme weisen einen ständigen Standby-Verbrauch auf. Die Leistungsaufnahme liegt nach Rücksprache mit Herstellern typischerweise zwischen 10 und 20 W, in Abhängigkeit der installierten Systeme. Für den folgenden Vergleich wird eine Standby-Leistung von 15 W in beiden Anwendungsfällen angesetzt (5 W Steuerung und 10 W Sensorik, z.B. Laserabtastung auf beiden Torseiten). Damit errechnet sich der jährliche elektrische Energiebedarf für Steuerung und Sensorik auf 131 kWh unter der Annahme, dass diese Geräte auch außerhalb der Betriebszeiten nicht abgeschaltet werden.

Der zweite elektrische Verbraucher, der in die Energieberechnung mit eingeht, ist der Antrieb des Tores. Für diesen werden die folgenden zwei Anwendungsfälle betrachtet.

Tabelle 9: Vergleich des Energieverbrauchs von Antrieb, Steuerung, Sensorik und Mehrbedarf an Wärme für die Szenarien *LKW Be-/Entladung* und *regelmäßiger Staplerverkehr* im Gebäudemodell *Fertigung*

	LKW Be-/ Entladung	regelmäßiger Staplerverkehr
Szenario (siehe Kapitel 7.4)		
Tortyp (siehe Kapitel 7.1)		
Betriebszeit	261 Arbeitstage à 9 h	
Öffnungen / Tag	2	270
∅ Öffnungsgeschwindigkeit [m/s]	0,25	1,5
∅ Schließgeschwindigkeit [m/s]	0,25	0,8
Steuerung und Sensorik		
Leistung [W]	15	
Nutzenergie (8760 h Standby) [kWh _{elektrisch} /a]	131	
Primärenergie (Faktor 2,6 nach [ENEV 2009]) [kWh _{elektrisch} /a]	342	
Antrieb		
Leistung [W]	550	2.200
Nutzenergie [kWh _{elektrisch} /a]	2,6	330
Primärenergie (Faktor 2,6 nach [ENEV 2009]) [kWh _{elektrisch} /a]	6,6	858
Wärme		
Mehrbedarf an Wärme [kWh _{thermisch} /a]	5.970	14.130
Primärenergie (Faktor 1,1 nach [ENEV 2009] / 0,85 Effizienz Wärme (Gas-Brennwertkessel)) [kWh _{thermisch} /a]	7.726	18.286

6.6.1 Anwendungsfall 1: Sektionaltor und Szenario LKW Be-/ Entladung

Die erste energetische Betrachtung bildet einen Anwendungsfall mit seltenen Toröffnungen ab. Hier wird ein Sektionaltor lediglich morgens und abends für jeweils 15 min geöffnet. Unter Berücksichtigung der in Kapitel 7.4.2 genannten Randbedingungen, beträgt der Mehrbedarf an Wärme im Vergleich zu einem stets geschlossenen Tor 5.970 kWh/a.

Die Leistung eines typischen Antriebs für Sektionaltore wurde mit Hilfe des in Kapitel 3.2 behandelten Fragebogens mit 550 W ermittelt. Hier wird die Vereinfachung getroffen, dass der Antrieb während der Öffnungsdauer von durchschnittlich 16 s und dem Schließvorgang von 16 s eine konstante Leistungsaufnahme aufweist. Dies führt zu einem Energiebedarf von ca. 5 Wh pro Torzyklus. Aufgrund der geringen Anzahl von Zyklen summiert sich der elektrische Jahresenergiebedarf des Antriebs lediglich auf rund 2,6 kWh.

Antrieb, Steuerung und Sensorik benötigen elektrische Energie. Der Wärmeverlust bei geöffnetem Tor muss allerdings mit thermischer Energie ausgeglichen werden. Um einen einheitlichen Vergleich zu ermöglichen, wird der Energieverbrauch in Primärenergie berechnet. Für Strom wird ein Primärenergiefaktor von 2,6 nach [ENEV 2009] zu Grunde gelegt.

Bei der Wärmeerzeugung beträgt der Primärenergiefaktor 1,1. Allerdings wird hier zusätzlich ein Wirkungsgrad von 0,85 für einen Gas-Brennwertkessel berücksichtigt. In diesem Anwendungsfall beträgt der Mehrbedarf an Wärme zum Ausgleich der Lüftungswärmeverluste demnach 7.726 kWh/a, gemessen in Primärenergie. Das Primärenergie-Äquivalent von Antrieb, Steuerung und Sensorik beträgt in Summe rund 350 kWh/a. Setzt man den Primärenergiebedarf von Heizung, Steuerung und Sensorik sowie des Tor-Antriebs in Relation, so ist der Anteil des Antriebs mit 0,1 % vernachlässigbar gering, siehe Abbildung 33. Die vergleichende Betrachtung zeigt, dass bei zwei Öffnungen pro Tag der Mehrbedarf an Wärme gegenüber den elektrischen Verbrauchern deutlich überwiegt, und rund 96 % des Energieverbrauchs ausmacht.

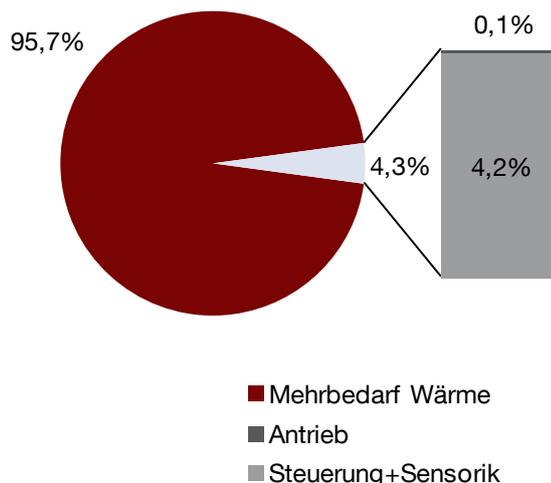


Abbildung 33: Vergleich des Energieverbrauchs von Heizung, Antrieb sowie Steuerung und Sensorik. Anwendungsfall 1 Sektionaltor bei LKW Be- und Entladung, gewichtet nach Primärenergie

6.6.2 Anwendungsfall 2: Schnelllaufspiraltor und Szenario *regelmäßiger Staplerverkehr*

Der zweite Anwendungsfall bildet ein häufiges Öffnen und Schließen des Tores ab, wie es beispielsweise beim Einsatz von regelmäßigem Staplerverkehr vorliegt. Die Randbedingungen dieses Szenarios werden in Kapitel 7.4.3 detailliert beschrieben. In solchen Fällen kommen in der Praxis meist schnell laufende Tore zum Einsatz. Für den Energieverbrauch-Vergleich wird hier ein Schnelllauf-Spiraltor mit einer Antriebsleistung von 2.200 W zu Grunde gelegt. Mit der im Anwendungsfall 1 geschilderten Vereinfachung einer konstanten Antriebsleistung berechnet sich der Energiebedarf von einem Toröffnungszyklus auf 4,7 Wh (Leistung 2.200 W, Öffnungsdauer 2,7 s, Schließdauer 5,0 s). Dieser errechnete Wert wurde mit Messungen an sechs Schnelllauf-Spiraltoren in den Werken eines großen Automobilherstellers abgeglichen und liegt in der gemessenen Größenordnung. Aufgrund der deutlich höheren Zyklenzahl ist der jährliche Energiebedarf des Antriebs mit 330 kWh erheblich größer als in Anwendungsfall 1.

Allerdings führen das häufige Öffnen und die – in Summe – lange Offenstanddauer des Tores zu hohen Lüftungswärmeverlusten. Dies erhöht den Wärmebedarf gegenüber einem stets geschlossenen Tor um 14.130 kWh/a.

Wie beim ersten Anwendungsfall werden für einen Vergleich sowohl der elektrische wie auch der thermische Energiebedarf auf Primärenergie umgerechnet.

Die elektrischen Verbraucher fallen mit 6,2 % wie in der ersten vergleichenden Energiebetrachtung nur wenig ins Gewicht, siehe Abbildung 34. Deutlich wird auch, dass selbst beim regelmäßigen Staplerverkehr der Antrieb zwar einen höheren Energieverbrauch als die Steuerung und Sensorik verursacht, jedoch im Vergleich zum Wärmebedarf durch Lüftungsverluste nur eine untergeordnete Rolle einnimmt.

Die durchgeführte Berechnung zeigt, dass mit den getroffenen Randbedingungen in beiden (deutlich voneinander abweichenden) Anwendungsfällen die elektrischen Verbraucher nur einen geringen Anteil in der Energiebilanz einnehmen. Auch der Austausch von schnell laufenden mit langsamen Toren führt in beiden Anwendungsfällen (*LKW Be-/ Entladung* oder *regelmäßiger Staplerverkehr*) zu weitestgehend identischen Ergebnissen. Die Betrachtungen zeigen deutlich, dass der Energieverbrauch des elektrischen Torantriebs sowie der dauerhafte Stand-by-Betrieb von Steuerung und Sensorik im Vergleich zum Wärmebedarf durch Lüftungsverluste nur eine untergeordnete Rolle einnehmen.

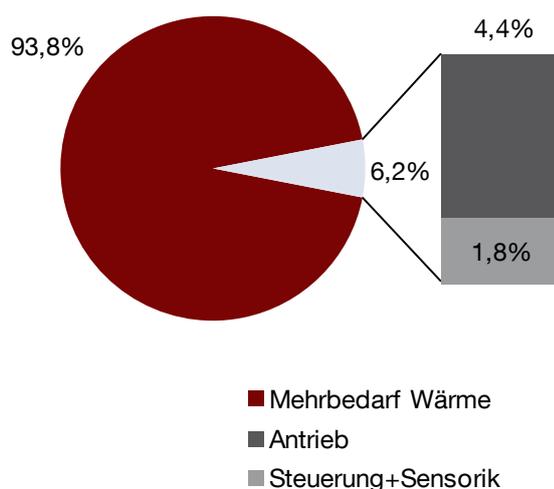


Abbildung 34: Vergleich des Energieverbrauchs von Heizung, Antrieb sowie Steuerung und Sensorik. Anwendungsfall 2 Schnelllauf-Spiraltor bei *regelmäßigem Staplerverkehr*, gewichtet nach Primärenergie

6.7 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde eine energetische Beurteilung der torspezifischen Einflussgrößen vorgenommen. Folgende Ergebnisse können hierbei unter Berücksichtigung der in Kapitel 4 und 5 getroffenen Annahmen festgehalten werden:

- die angegebenen Werte für Wärmeverlust bzw. Mehrbedarf an Wärme beziehen sich auf ein Tor. Deshalb muss der prozentuale Einfluss auf den Wärmebedarf des Gebäudes immer in Bezug auf die Fassadenfläche gesehen werden; bei mehreren Toren in der Fassade erhöht sich der errechnete Wärmeverlust bzw. der resultierende Mehrbedarf an Wärme entsprechend um die Anzahl der vorhandenen Tore. Hierbei können sich die Luftvolumenströme in Abhängigkeit der Gebäudegeometrie und dem Abstand der Tore gegenseitig beeinflussen. Der Effekt von gleichzeitig geöffneten Toren auf gegenüberliegenden Seiten bewirkt eine zusätzliche Erhöhung des Wärmebedarfs.
- der öffnungsbedingte Lüftungswärmeverlust übersteigt bereits bei einer 3-minütigen Öffnungsdauer pro Stunde während der Nutzungszeit den Wärmeverlust durch Transmission und Leckagen des Tores, unabhängig des Gebäudemodells.
- der Wärmeverlust durch das Tor, bestehend aus Transmission, Leckagen und Lüftung ist höher als der daraus entstehende Mehrbedarf an Wärme, um das Gebäude auf dem geforderten Temperaturniveau zu halten. Der Effekt wird durch interne Wärmelasten verstärkt.
- der Einfluss von U-Wert und Luftdurchlässigkeit kann insbesondere bei einer hohen Anzahl von Toren in der Fassade beträchtlich sein, vor allem dann, wenn die Tore nur selten geöffnet werden. Der Unterschied zwischen einem hochwärmegedämmten und einem geringfügig gedämmten Tor bzw. einem Tor mit hoher Dichtheit gegenüber geringer Dichtheit kann bis zu 1.900 kWh/a betragen.
- der Wärmeverlust durch Transmission hat meist einen größeren Einfluss als der Wärmeverlust durch Leckagen des Tores.
- der Wärmeverlust durch das geöffnete Tor ist beim Gebäudemodell *Fertigung* und *Lager* aufgrund des großen Raumluftvolumens weitestgehend proportional zur Öffnungsdauer. Im Gegensatz dazu kühlt das Gebäudemodell *Werkstatt* aufgrund des wesentlich geringeren Volumens sehr schnell aus und der Effekt des Temperaturabfalls ist am größten, wobei hier ein regressiver Zusammenhang zwischen Wärmeverlust und Öffnungsdauer besteht.
- innerhalb der ersten Minuten ist die Abnahme der Raumtemperatur bei geöffnetem Tor am größten; der Volumenstrom nimmt mit zunehmender Öffnungsdauer aufgrund des kleiner werdenden Temperaturunterschieds zwischen Innen und Außen ab. Dies zeigt, dass vor allem bei kurzen Toröffnungen Optimierungspotential bezüglich der Behaglichkeit (spürbarer Temperaturabfall, Zugerscheinungen) und der Energieeinsparung durch eine geeignete Sensorik besteht, um Toröffnungen so kurz wie möglich zu halten.
- die Eindringtiefe der Außenluft bei geöffnetem Tor ist grundsätzlich einzelfallabhängig und wird von vielen gebäude- wie standortbezogenen Faktoren beeinflusst. Diese kann in erster Annäherung und unter Zugrundelegung der beschriebenen vereinfachten Annahmen bei den Gebäudemodellen *Fertigung* und *Lager* auf ca. 24 m Raumtiefe beziffert werden.
- bei gleichzeitigem Öffnen von gegenüberliegenden Toren erhöhen sich Wärmeverlust und resultierender Mehrbedarf an Wärme deutlich gegenüber nacheinander geöffneten Toren mit gleicher Öffnungsdauer. Als grobe Richtwerte können für eine Gebäudedurchströmung in Nord-Süd-Richtung ein Mehrbedarf an Wärme von rund 6 % und in Ost-West-Richtung von ca. 11 % gegenüber dem hintereinander erfolgten Öffnen der Tore angegeben werden.
- der elektrische Energiebedarf für den Torbetrieb, bestehend aus Antrieb, Steuerung und Sensorik ist, gegenüber den Wärmeverlusten des Tores als geringfügig anzusehen.

7. Szenarioentwicklung und nutzungsbezogene Toröffnungscharakteristik

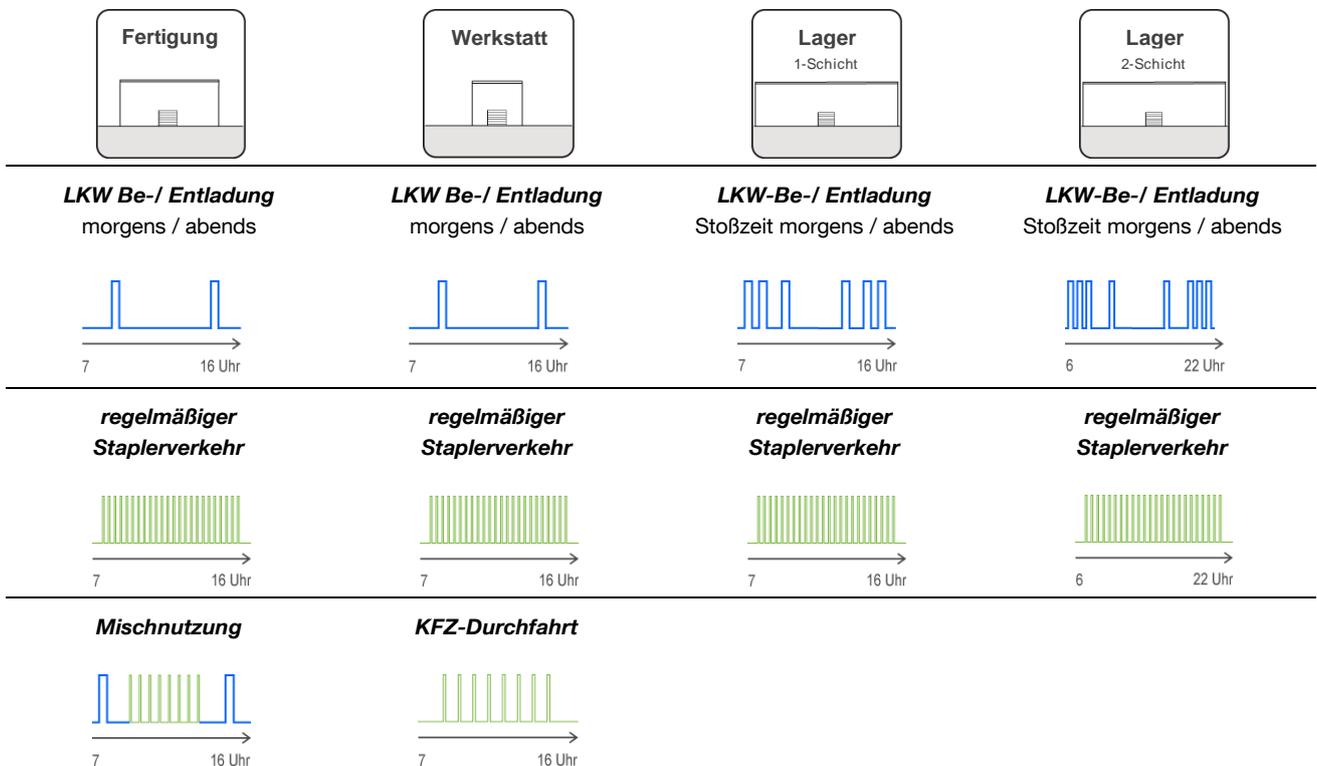
7.1 Szenarioübersicht und Vorgehensweise

Dieses Kapitel behandelt die Entwicklung mehrerer, an der Praxis orientierter Szenarien für die Gebäudemodelle *Fertigung*, *Werkstatt* und *Lager* mit entsprechenden Toröffnungszyklen und Öffnungsdauern. Mittels der entwickelten Szenarien ist es möglich, verschiedene Anwendungsfälle konkret untersuchen zu können. Verschiedene Nutzergruppen wie Betreiber von Immobilien, aber auch Herstellerfirmen von Torsystemen können sich leicht in den Szenarien wiederfinden. Die Szenarien wurden anhand von Besichtigungen bei einem großen Automobilhersteller sowie anhand des Fragebogens (siehe Anhang) entwickelt. Ziel ist es, für das jeweilige Szenario effiziente Tortypen unter energetischen und wirtschaftlichen Aspekten zu identifizieren.

Eine schematische Übersicht der Szenarien ist in Tabelle 10 dargestellt. Detaillierte Informationen zu den Toröffnungszyklen und Öffnungsdauern sind den Unterkapiteln 7.4 bis 7.6 zu entnehmen.

Für jedes Szenario werden verschiedene Tortypen untersucht: ein fiktives „ideales Tor“ (iT) dient als Referenz zur Beurteilung der realen Tore. Das ideale Tor kennzeichnet sich durch ideale Eigenschaften, d.h. keine Öffnungs- und Schließdauer, gleicher U-Wert wie die Gebäudefassade und absolute Dichtigkeit im geschlossenen Zustand. In Tabelle 11 sind die wichtigsten Eigenschaften der Tore zusammengefasst.

Tabelle 10: schematische Übersicht der entwickelten Szenarien für die Gebäudemodelle *Fertigung*, *Werkstatt* und *Lager*



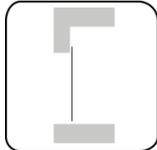
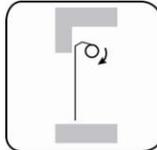
Für die realen Tore wurden hierbei folgende Annahmen getroffen:

- die U-Werte der realen Tore entsprechen den ermittelten Durchschnittswerten aus der Auswertung des Fragebogens (siehe Kapitel 3.2).
- die Werte für die Luftdurchlässigkeit (LDK) der realen Tore stellen Durchschnittswerte aus der Auswertung des Fragebogens (siehe Kapitel 3.2) dar. Da für die LDK 0 nach [DIN EN 12426] kein Luftdurchlässigkeitswert angegeben ist, wird für die beiden Rolltore eine Luftdurchlässigkeit von $50 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ bei einer Druckdifferenz von 50 Pa angenommen. Für die Tore ST und SST beträgt der Luftdurchlässigkeitswert $12 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ bei 50 Pa.

- da die Öffnungs- und Schließgeschwindigkeit vom jeweiligen Tor und dessen Antrieb sowie vom jeweiligen Anwendungsfall abhängig ist, werden durchschnittliche Öffnungs- und Schließgeschwindigkeiten angesetzt. Diese betragen für den Öffnungsvorgang bei den schnell laufenden Toren SST und RT-F $1,5 \text{ m/s}$ (Schließen: $0,8 \text{ m/s}$), bei den langsam laufenden Toren ST und RT-L $0,25 \text{ m/s}$ (Schließen: $0,25 \text{ m/s}$).

Desweiteren wird für das ideale Heizsystem ein durchgehender Betrieb auch während eines Öffnungsvorgangs unterstellt, da in der Realität das Heizsystem ebenfalls nicht abgeschaltet wird.

Tabelle 11: spezifische Eigenschaften der simulierten Tore „ideales Tor“ (iT), Sektionaltor (ST), Schnelllaufspiraltor (SST), Lamellen-Rolltor (RT-L) und Folien-Rolltor (RT-F)

	ideales Tor (iT)	Sektionaltor (ST)	Schnelllaufspiraltor (SST)	Lamellen-Rolltor (RT-L)	Folien-Rolltor (RT-F)
					
U-Wert [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]	0,24	1,8	1,9	4,7	5,9
LDK [-]	dicht	2	2	0	0
Öffnen \varnothing [m/s]	∞	0,25	1,5	0,25	1,5
Schließen \varnothing [m/s]	∞	0,25	0,8	0,25	0,8
Investition [€]	-	2.900 - 6.500	8.000 - 16.000	2.500 - 4.100	4.600 - 5.500

7.2 Erläuterung der Szenario-Energiegrafik

In Abbildung 35 ist die „Szenario-Energiegrafik“ erläutert, die für jedes Szenario den energetischen Einfluss des jeweiligen Tores aufzeigt. Der Wärmeverlust durch Transmission, Leckage und Öffnung ist durch einen Balken in negativer, der resultierende Mehrbedarf an Wärme in positiver Richtung aufgetragen. Die oberhalb der Balken stehenden roten Prozentwerte geben den prozentualen Mehrbedarf an Wärme gegenüber dem „idealen Tor“ (iT) an. Darüber steht der prozentuale bzw. absolute Mehrbedarf an Wärme gegenüber dem Gebäudemodell ohne Tor. Die weiße, nicht farbig ausgefüllte Fläche bei den Balken der realen Tore entspricht dem Wärmeverlust bzw. dem Mehrbedarf an Wärme des iT. So lässt sich auf einen Blick der energetische Einfluss des jeweiligen Tores gegenüber dem iT erkennen.

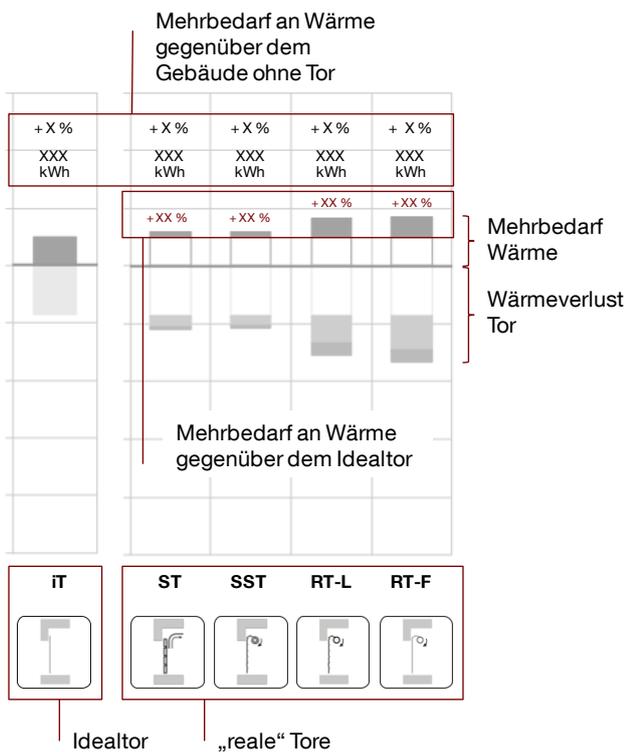


Abbildung 35: Erläuterung der Szenario-Energiegrafik

7.3 Erläuterung der Szenario-Kostengrafik

In Abbildung 36 ist die „Szenario-Kostengrafik“ dargestellt. Grundlage für die Berechnung einer Kostenentwicklung sind der Listenpreis der untersuchten Tortypen und die torbedingten resultierenden Wärmekosten. Für eine tendenzielle Aussage zur Kostenentwicklung der Tore werden folgende Randbedingungen festgelegt:

- einen durchschnittlichen Preis für den jeweiligen Tortyp zu ermitteln ist nicht möglich, da das Forschungsvorhaben hersteller- bzw. produktneutral durchgeführt wird und die Listenpreise je nach Ausstattung (z.B. hoher Verglasungsanteil im Torblatt) erheblich schwanken können. Aus diesem Grund wird eine Spanne der minimalen bzw. maximalen Investition angegeben. Die Werte sind hierbei aus der Auswertung des Fragebogens in Kapitel 3.2 ermittelt und beziehen sich auf Listenpreise für eine Torgröße von 16 m² inklusive Steuerung und dem standardmäßig dazu gelieferten Antrieb.
- die Investition wird zum Zeitpunkt „0“ getätigt.
- der Betrachtungszeitraum für die Kostenentwicklung beträgt 20 Jahre.
- das unterstellte Nutzungsszenario ändert sich während des Betrachtungszeitraums nicht.
- für die Energieerzeugung wird ein typischer Gas-Brennwertkessel angesetzt, der Wirkungsgrad wird in [Hausladen et al. 2011] zwischen 90 und 95 % angegeben. Unter der Annahme weiterer systembedingter Verluste (Leitungen etc.) wird ein System-Wirkungsgrad von 85 % angenommen.
- der Gaspreis für die Industrie weicht wesentlich vom Gaspreis für Haushalte ab und ist von der Abnahmemenge und den vertraglichen Rahmenbedingungen zwischen Energielieferant und Industriekunde abhängig. Für die Kostenbetrachtung wird ein Gaspreis für kleine Industriekunden von ca. 4 ct/kWh angesetzt [Frontier 2010, 118]. Die durchschnittliche Steigerung des Gaspreises betrug im Zeitraum von 1998 bis 2008 jährlich ca. 7 % und wird für die zukünftige Entwicklung weiterhin mit 7 %/a angenommen [Frontier 2010, 118].
- die Instandhaltungskosten, bestehend aus Inspektion, Wartung und Instandsetzung für Tore sind von der Nutzungsart, der Anzahl an Toröffnungen sowie den individuell zwischen Betreiber und Torhersteller festgelegten Konditionen abhängig. Aufgrund dessen werden die stark betriebs- und herstellerab-

hängigen Kosten der Instandhaltung nicht berücksichtigt.

- der elektrische Energiebedarf von Torsteuerung, Sensorik und Antrieb wird aufgrund des vergleichsweise untergeordneten Einflusses gegenüber den entstehenden Wärmeverlusten des Tores vernachlässigt (siehe Kapitel 6.6).

Die dargestellten „Szenario-Kostengrafiken“ zeigen die Kostenentwicklung über einen Zeitraum von 20 Jahren mit der anfänglichen Investition als Minimal-/ Maximalpreisspanne und den jährlichen torbedingten Wärmekosten bei einer angenommenen Gaspreissteigerung von 7 %/a.

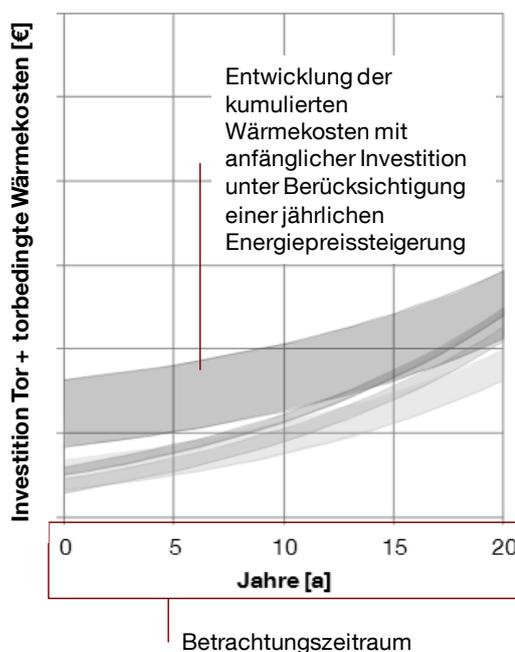


Abbildung 36: Erläuterung der Szenario-Kostengrafik

7.4 Szenarien des Gebäudemodells *Fertigung*



Für das Gebäudemodell *Fertigung* werden drei sich voneinander abgrenzende Szenarien in Bezug auf deren Toröffnungscharakteristik untersucht.

Das Szenario *LKW Be-/ Entladung* stellt eine sehr geringe Toröffnungsfrequenz mit nur zwei Öffnungen morgens/ abends am Tag dar, die Offenstehdauer beträgt pro Öffnung 15 min.

Im Szenario *regelmäßiger Staplerverkehr* wird ein häufiges Öffnen und Schließen der Tore simuliert. Die Toröff-

nungsfrequenz beträgt in der Nutzungszeit 30 Öffnungen pro Stunde, die Offenstehdauer wird hierbei mit 15 s pro Öffnung angesetzt.

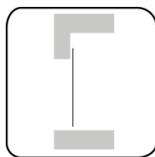
Das Szenario *Mischnutzung* repräsentiert eine LKW Be-/ Entladung mit gelegentlichem Staplerverkehr mit zwei längeren Öffnungen morgens und abends und einer gemäßigten Toröffnungsfrequenz von 6 Öffnungen pro Stunde während der Nutzungszeit.

In Tabelle 12 ist eine zusammenfassende Übersicht der drei Szenarien abgebildet.

Tabelle 12: Übersicht der simulierten Szenarien für das Gebäudemodell *Fertigung*

	LKW Be-/ Entladung morgens / abends	regelmäßiger Staplerverkehr	Mischnutzung
Öffnungscharakteristik	zweimalige Toröffnung morgens / abends	häufige Toröffnungen durch Staplerverkehr	zweimalige Toröffnung für je 15 min morgens / abends, während übriger Nutzungszeit gelegentlicher Staplerverkehr
Öffnungszeiten	8:00 - 8:15, 15:00 - 15:15	regelmäßig von 7:00 bis 16:00, 30 Öffnungen pro Stunde	8:00 - 8:15, 15:00 - 15:15, zwischen 9:00 bis 15:00 6 Öffnungen pro Stunde
Offenstehdauer pro Öffnung	15 min	15 s	15 min (morgens/abends), 15 s (übrige Nutzungszeit)
Öffnungen/ Tag	2	270	38

7.4.1 Vergleich der Szenarien des Gebäudemodells *Fertigung* bei Verwendung des „idealen Tores“



In einem ersten Schritt werden die drei Szenarien bei Verwendung des „idealen Tores“ (iT) miteinander verglichen. In Abbildung 37 ist der jährliche Wärmeverlust des Tores (beim iT lediglich öf-fnungsbedingter Lüftungswärmeverlust) sowie der darauf zurückzuführende Mehrbedarf an Wärme für die Szenarien *LKW Be-/ Entladung*, *regelmäßiger Staplerverkehr* und *Mischnutzung* dargestellt.

Der in den Kapiteln 6.2 und 6.3 bereits aufgezeigte Effekt eines höheren Wärmeverlusts des Tores gegenüber dem Mehrbedarf an Wärme im Gebäudemodell *Fertigung* spiegelt sich auch in den Szenarien wieder. Der Mehrbedarf an Wärme gegenüber dem Gebäudemodell ohne Tor (siehe Kapitel 5.5) beträgt für das Szenario *LKW Be-/ Entladung* mit den gewählten Randbedingungen 13 % bzw. rund 5.000 kWh/a bei Verwendung des iT. Ein wesentlich höherer Mehrbedarf an Wärme fällt bei der Nutzung eines *regelmäßigen Staplerverkehrs* an. Der Mehrbedarf an Wärme steigt um 27 % bzw. rund 10.200 kWh/a. Für eine angenommene *Mischnutzung* aus einer zweimaligen längeren Toröffnung morgens und abends sowie gelegentlichem Staplerverkehr liegt der Mehrbedarf an Wärme bei 17 % bzw. rund 6.400 kWh/a.

Vergleicht man die summierte Öffnungsdauer pro Tag, so zeigt sich beim Szenario *regelmäßiger Staplerverkehr* mit 67,5 min/d eine deutlich höhere Öffnungsdauer als bei den anderen Szenarien (*LKW Be-/ Entladung*: 30 min/d, *Mischnutzung*: 39 min/d).

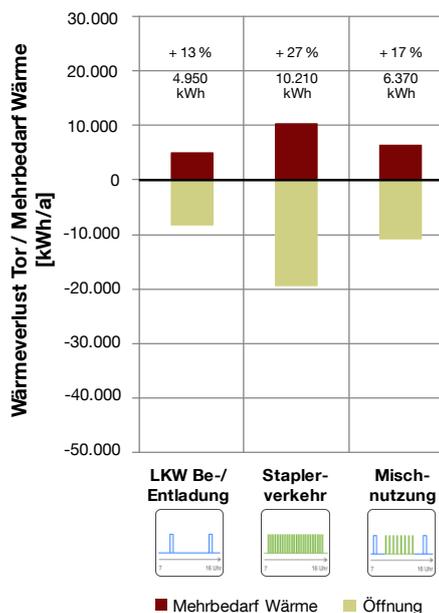


Abbildung 37: Vergleich der Szenarien *LKW Be-/ Entladung*, *regelmäßiger Staplerverkehr* und *Mischnutzung* in Bezug auf den Mehrbedarf an Wärme sowie den Wärmeverlust beim „idealen Tor“, Gebäudemodell *Fertigung*

Dies erklärt den höheren Mehrbedarf an Wärme dieses Szenarios gegenüber den beiden anderen Szenarien bei Verwendung des iT.

Wie in der Erläuterung des Gebäudemodells in Kapitel 5.2 beschrieben, wird in Tornähe eine 8 · 8 m² große „Torzone“ definiert. Vorteil dieser „Torzone“ ist die Möglichkeit, für die verschiedenen Szenarien die Temperatur unmittelbar im Bereich des Tores erfassen zu können. So lassen sich vereinfacht erste Aussagen über die Temperaturverteilung bei unterschiedlichen Toröffnungsdauern während der Nutzungszeit über ein Jahr treffen, siehe Abbildung 38.

Der erste Balken stellt die Temperaturverteilung in der „Torzone“ des Gebäudemodells *Fertigung* mit geschlossenem Tor dar, wobei 1 % rund 24 h Nutzungszeit entspricht¹³. Der behagliche Temperaturbereich wird zwischen 20 °C und 26 °C auf einer Höhe von 1,4 m angesetzt. Hier zeigt sich, dass bei geschlossenem Tor zu rund 40 % der Nutzungszeit Temperaturen oberhalb von 26 °C herrschen, vorrangig an warmen Sommertagen. Die internen Wärmelasten im Gebäudemodell erhöhen die Temperaturen zusätzlich. Ab einer Raumtemperatur von 28 °C auf einer Höhe von 1,4 m wird mittels eines idealen Kühlsystems gekühlt, siehe Kapitel 5.2. Desweiteren wird ersichtlich, dass stets die geforderte minimale Raum-Solltemperatur von 20 °C eingehalten wird.

Da für die „Torzone“ eine „mittlere“ Temperatur in der Zone berechnet wird (siehe Grundlagen des Simulationsmodells, Kapitel 5.2), fällt diese bei den untersuchten Szenarien nur selten unter 18 °C. Bei einer feineren Auflösung der Zone würden jedoch unmittelbar am Tor deutlich kältere Temperaturen herrschen.

Bedingt durch das zweimalige Öffnen des Tores für jeweils 15 min im Szenario *LKW Be-/ Entladung* treten zu etwa 10 % bzw. rund 240 h/a in der „Torzone“ Temperaturen unterhalb der Raum-Solltemperatur auf. Beim Szenario *regelmäßiger Staplerverkehr* erhöht sich der Anteil an Temperaturen unterhalb der 20 °C-Grenze auf etwa 30 % und rund 720 h/a. Der Anteil an Temperaturen unter 18 °C innerhalb der „Torzone“ ist aufgrund der kürzeren Öffnungsdauer pro Öffnung im Vergleich zum Szenario *LKW Be-/ Entladung* geringer. Beim Szenario *Mischnutzung* erhöht sich der Anteil an Temperaturen unterhalb der Raum-Solltemperatur gegenüber dem Szenario *LKW Be-/ Entladung* nur geringfügig, da neben den zwei längeren Öffnungen des Tores morgens und abends nur 6 kurze Öffnungen pro Stunde von jeweils 15 s anfallen.

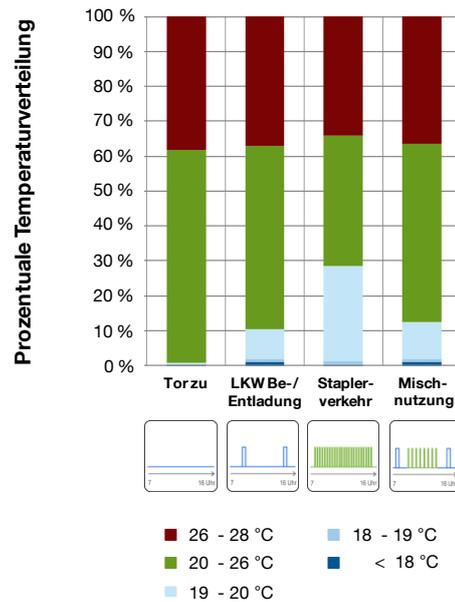


Abbildung 38: Temperaturverteilung der Szenarien des Gebäudemodells *Fertigung* in der „Torzone“ bei Verwendung des „idealen Tores“ auf einer Raumhöhe von 1,4 m während der Nutzungszeit. Der Simulationszeitschritt beträgt 30 s, der Betrachtungszeitraum ist ein Jahr

Im Folgenden werden die realen Tortypen für jedes Szenario aus energetischer sowie wirtschaftlicher Sicht untersucht.

¹³ der Simulation ist eine tägliche Nutzungszeit des Gebäudes von 9 h von Montag bis Freitag zugrunde gelegt, siehe Kapitel 5.

7.4.2 Szenario LKW Be-/ Entladung, Gebäudemodell Fertigung

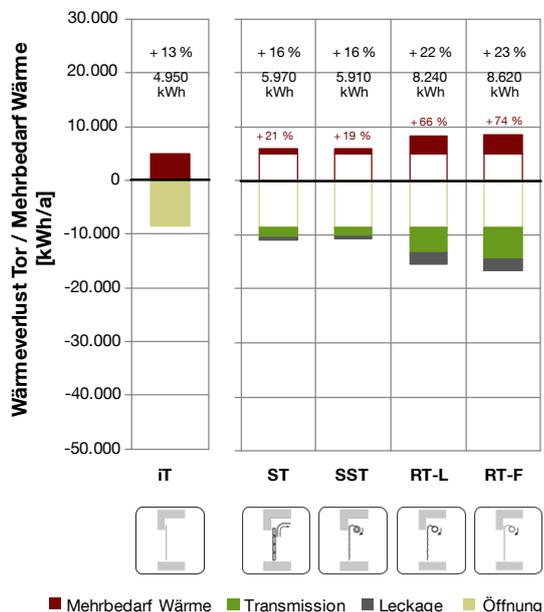


Abbildung 39: Mehrbedarf an Wärme bzw. gesamter Wärmeverlust des jeweiligen Tores im Szenario LKW Be-/ Entladung

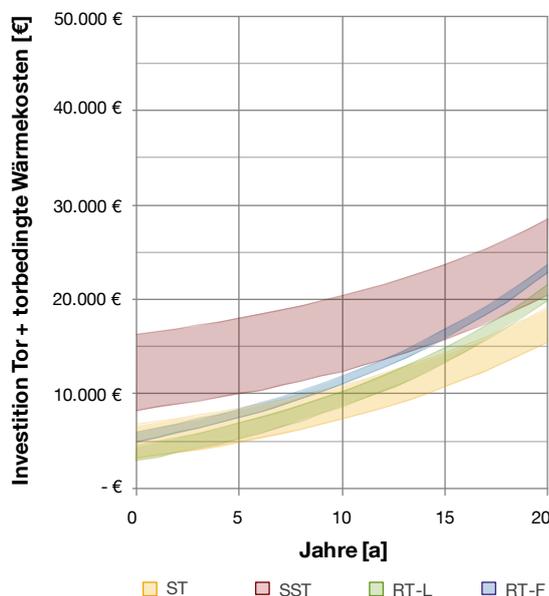


Abbildung 40: torspezifische Investition und kumulierte Wärmekosten über 20 Jahre im Szenario LKW Be-/ Entladung

Das Szenario *LKW Be-/ Entladung* stellt eine sehr geringe Toröffnungsfrequenz mit nur zwei Öffnungen morgens/ abends am Tag dar. Die Offenstehdauer beträgt pro Öffnung 15 min.

In Abbildung 39 ist der energetische Einfluss der verschiedenen Tortypen für das Szenario *LKW Be-/ Entladung* des Gebäudemodells *Fertigung* dargestellt.

Bei Verwendung des iT entspricht der Mehrbedarf an Wärme gegenüber dem Gebäudemodell ohne Tor 13 % bzw. rund 5.000 kWh/a. Die Tortypen ST (Sektionaltor) und SST (Schnellaufspiraltor) schneiden in diesem Szenario aufgrund der besseren Dämmeigenschaften und der höheren Dichtheit aus energetischer Sicht besser als die beiden Rolltore ab. Zusätzliche Lüftungswärmeverluste gegenüber dem iT während den Öffnungs- und Schließvorgängen haben aufgrund der geringen Anzahl an Öffnungen bei allen Tortypen keinen effektiven Einfluss. Der Mehrbedarf an Wärme erhöht sich bei den Toren ST und SST gegenüber dem iT um lediglich 21 % und 19 % bzw. rund 1.000 kWh/a. Desweiteren zeigt sich, dass in diesem Szenario das SST gegenüber dem ST nur marginal energieeffizienter ist, da die höhere Öffnungs- und Schließgeschwindigkeit des SST bei lediglich 2 Öffnungen am Tag keinen energetischen Vorteil bringt. Beim metallausgeführten Rolltor aus Lamellen (RT-L) beträgt der Mehrbedarf gegenüber dem iT 66 % bzw. rund 3.300 kWh/a. Das zwar schnell laufende, jedoch ungedämmte Folien-Rolltor (RT-F) stellt mit einem Mehrbedarf an Wärme von 74 % bzw. rund 3.700 kWh/a gegenüber dem iT in diesem Szenario den aus energetischer Sicht ungünstigsten Tortyp dar.

Abbildung 40 zeigt die kumulierten Kosten der Tore, bestehend aus der Investition sowie den torspezifischen Wärmekosten (siehe Erläuterungen in Kapitel 7.3). Das ST weist aufgrund hoher Dämmung und Dichtheit mit zunehmender Zeit die geringsten kumulierten Kosten auf. Das RT-L hat im Vergleich zu den anderen Tortypen die geringste Investition. Die höheren jährlichen Wärmekosten führen jedoch ab ca. 10 Jahren zu höheren kumulierten Kosten als das ST. Die beiden schnell laufenden Tore haben in diesem Szenario die höchsten kumulierten Kosten – das SST aufgrund der hohen anfänglichen Investition – das RT-F aufgrund der erhöhten Wärmekosten infolge der geringen Dämmung bzw. Dichtheit.

Eine Erhöhung der Energieeffizienz der schnell laufenden Tore SST und RT-F durch mehrfaches Öffnen und Schließen während eines LKW Be-/ Entladungsvorgangs wird in Kapitel 8.3 erläutert.

7.4.3 Szenario *regelmäßiger Staplerverkehr*, Gebäudemodell *Fertigung*

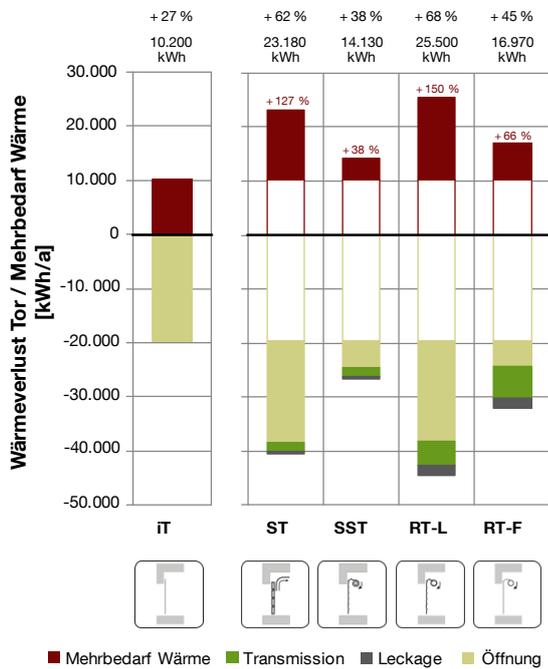


Abbildung 41: Mehrbedarf an Wärme bzw. gesamter Wärmeverlust des jeweiligen Tores im Szenario *regelmäßiger Staplerverkehr*

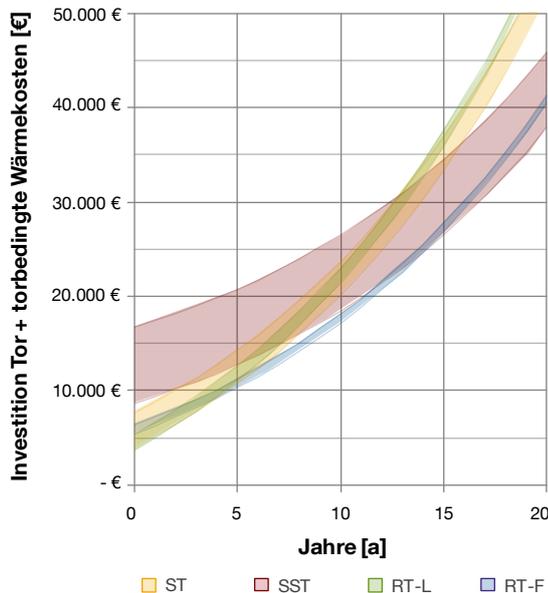


Abbildung 42: tor-spezifische Investition und kumulierte Wärmekosten über 20 Jahre im Szenario *regelmäßiger Staplerverkehr*

Das Szenario *regelmäßiger Staplerverkehr* beschreibt ein häufiges Öffnen und Schließen des Tores bei kurzen Offenhaltezeiten.

In Abbildung 41 ist der Mehrbedarf an Wärme bzw. der gesamte Wärmeverlust des jeweiligen Tores für das Szenario *regelmäßiger Staplerverkehr* dargestellt. Im Falle des iT entspricht der Mehrbedarf an Wärme gegenüber dem Gebäudemodell ohne Tor 27 % bzw. rund 10.200 kWh/a. Die beiden schnell laufenden Tore SST und RT-F weisen bei diesem Szenario mit kurzen Öffnungsvorgängen deutliche Energieeinsparpotentiale gegenüber den langsam laufenden Toren ST und RT-L auf. Der Mehrbedarf an Wärme erhöht sich beim SST gegenüber dem iT um 38 % bzw. rund 3.900 kWh/a und beim RT-F um 66 % bzw. rund 7.800 kWh/a. Sowohl beim ST als auch beim RT-L führt der Lüftungswärmeverlust, der zusätzlich zur notwendigen Offenstehdauer von 15 s während dem Öffnungs- und Schließvorgang entsteht, zu einer wesentlichen Erhöhung des Wärmebedarfs: gegenüber dem iT erhöht sich der Mehrbedarf an Wärme beim gut gedämmten ST um mehr als das Doppelte auf 127 % bzw. rund 13.000 kWh/a, beim RT-L sogar um 150 % bzw. rund 15.300 kWh/a.

Betrachtet man beim SST die zusätzlichen Anteile des Wärmeverlusts gegenüber dem iT, so sind diese während der Öffnungs- und Schließvorgänge als verhältnismäßig gering einzustufen. Eine weitere Verbesserung der Dämmeigenschaften (U-Wert) erscheint aufgrund des geringen Einsparpotentials gegenüber dem anfallenden Lüftungswärmeverlust während der Offenstehzeit als nur bedingt empfehlenswert. Für eine Erhöhung der Energieeffizienz sollte der Fokus für dieses Szenario auf eine Reduzierung der notwendigen Toröffnungen oder eine objektgrößenangepasste Toröffnung gelegt werden, siehe Kapitel 8.5.

Abbildung 42 zeigt die kumulierten Kosten der Tore, bestehend aus der Investition sowie den tor-spezifischen Wärmekosten. Die beiden schnell laufenden Tore SST und RT-F weisen in diesem Szenario aufgrund der geringeren Wärmekosten deutlich geringere kumulierte Kosten als das ST und das RT-L auf.

Für dieses Szenario sei angemerkt, dass sich insbesondere aus logistischer Sicht schnell laufende Tore eignen. Bei der angenommenen Offenstehzeit von 15 s je Öffnung fällt die Öffnungs- und Schließdauer bei den langsam laufenden Toren ST und RT-L von jeweils 16 s um mehr als doppelt so hoch aus. Dies kann den betrieblichen Ablauf stark beeinträchtigen.

7.4.4 Szenario *Mischnutzung*, Gebäudemodell *Fertigung*

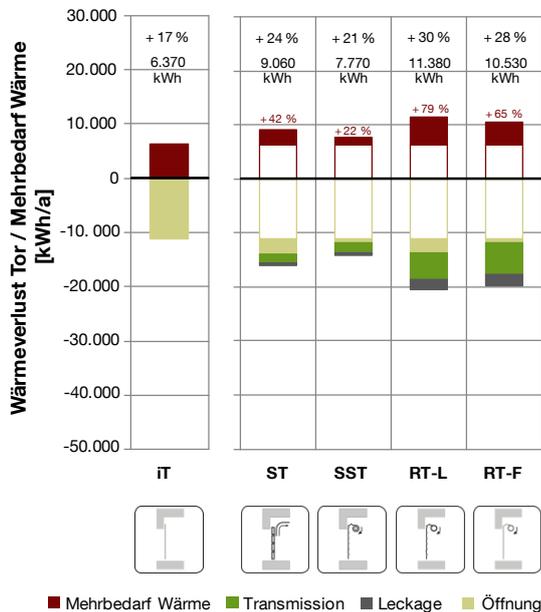


Abbildung 43: Mehrbedarf an Wärme bzw. gesamter Wärmeverlust des jeweiligen Tores im Szenario *Mischnutzung*

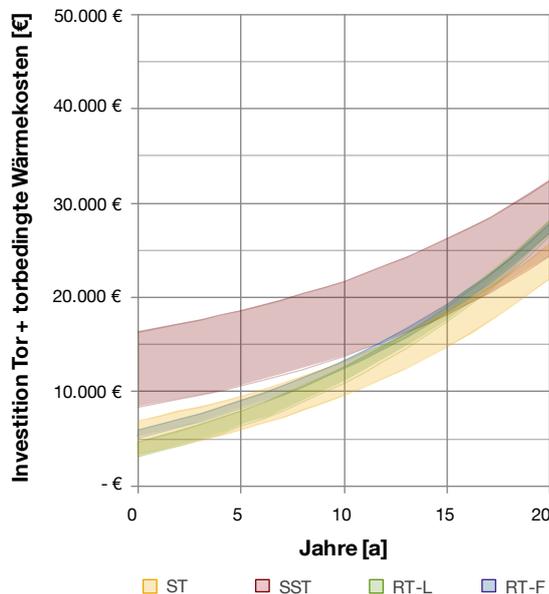


Abbildung 44: torspezifische Investition und kumulierte Wärmekosten über 20 Jahre im Szenario *Mischnutzung*

Das Szenario *Mischnutzung* spiegelt mit zwei längeren Öffnungen morgens und abends und einer gemäßigten Toröffnungsfrequenz von 6 Öffnungen pro Stunde während der Nutzungszeit eine LKW Be-/ Entladung mit gelegentlichem Staplerverkehr wieder.

Abbildung 43 zeigt den Mehrbedarf an Wärme bzw. den gesamten Wärmeverlust der untersuchten Torarten. Das iT weist gegenüber dem Gebäudemodell ohne Tor einen Mehrbedarf an Wärme von 17 % bzw. rund 6.400 kWh/a auf. Aus energetischer Sicht ist das SST durch hohe Dämm- und Dichtheitswerte sowie hoher Öffnungs- und Schließgeschwindigkeit empfehlenswert. Der Mehrbedarf an Wärme gegenüber dem iT beträgt 22 % bzw. rund 1.400 kWh/a. Der zusätzliche Wärmeverlust gegenüber dem iT ist größtenteils auf die Transmission bei geschlossenem Tor zurückzuführen. Ebenfalls zeigt sich, dass das ST durch die guten Dämm- und Dichtheitseigenschaften in diesem Szenario nur geringfügig schlechter als das SST abschneidet. Der zusätzliche Lüftungswärmeverlust des ST während den Öffnungs- und Schließvorgängen ist im Vergleich zum Lüftungswärmeverlust während der Offenstehzeit als verhältnismäßig gering zu betrachten. Sowohl das RT-L, als auch das RT-F schneiden in diesem Szenario aufgrund der geringeren Dämmung und Dichtheit energetisch deutlich schlechter ab.

Bei Betrachtung der kumulierten Kosten in Abbildung 44 zeigt sich, dass mit zunehmender Zeit das ST aufgrund der geringeren Investition gegenüber dem SST, sowie durch die geringeren Wärmekosten gegenüber den Rolltoren RT-L und RT-F unter den gesetzten Randbedingungen empfehlenswert ist.

7.5 Szenarien des Gebäudemodells Werkstatt



Für das Gebäudemodell *Werkstatt* werden wie im vorangegangenen Kapitel drei sich voneinander abgrenzende Szenarien in Bezug auf die Toröffnungscharakteristik untersucht.

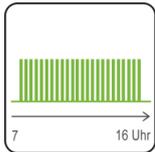
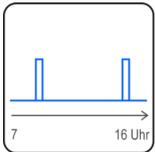
Das Szenario *KFZ-Werkstatt* stellt eine für KFZ-Werkstätten typische Öffnungscharakteristik mit vier Öffnungen pro Stunde dar. Als Beispiel wird hier eine Hauptuntersuchung eines KFZ mit rund 15 min angesetzt. Für das Ein- und Ausfahren der PKW wird eine Offenstehdauer von 30 s angenommen.

Im Szenario *regelmäßiger Staplerverkehr* wird ein häufiges Öffnen und Schließen der Tore simuliert und stimmt mit der Öffnungscharakteristik des gleichbenannten Szenarios im Gebäudemodell *Fertigung* überein. Die Toröffnungsfrequenz beträgt in der Nutzungszeit 30 Öffnungen pro Stunde, die Offenstehdauer wird mit 15 s pro Öffnung angesetzt.

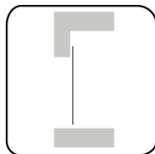
Das Szenario *LKW Be-/ Entladung* spiegelt mit zwei längeren Öffnungsvorgängen morgens und abends ein längeres Offenstehen des Tores wieder.

In Tabelle 13 ist eine zusammenfassende Übersicht der drei Szenarien abgebildet.

Tabelle 13: Übersicht der simulierten Szenarien für das Gebäudemodell *Werkstatt*

	<i>KFZ-Werkstatt</i>	<i>regelmäßiger Staplerverkehr</i>	<i>LKW Be-/ Entladung</i> morgens / abends
			
Öffnungscharakteristik	regelmäßige Toröffnungen	häufige Toröffnungen durch Staplerverkehr	zweimalige Toröffnung morgens/ abends
Öffnungszeiten	von 7:00 bis 16:00, 4 Öffnungen pro Stunde	von 7:00 bis 16:00, regelmäßig 30 Öffnungen pro Stunde	8:00 - 8:15, 15:00 - 15:15
Offenstehdauer pro Öffnung	30 s	15 s	15 min
Öffnungen/ Tag	36	270	2

7.5.1 Vergleich der Szenarien bei Verwendung des „idealen Tores“, Gebäudemodell *Werkstatt*



In Abbildung 45 ist der jährliche Wärmeverlust des Tores (beim iT lediglich öf-fnungsbedingter Lüftungswärmeverlust) sowie der darauf zurückzuführende Mehrbedarf an Wärme für die Szenarien *KFZ-Werkstatt*, *regelmäßiger Staplerverkehr* und *LKW Be-/ Entladung* dargestellt.

Wie beim Szenariovergleich des Gebäudemodells *Fertigung* in Kapitel 7.4.1 zeigen die Szenarien aufgrund der unterschiedlichen Toröffnungscharakteristik auch einen unterschiedlich hohen Einfluss auf den Wärmebedarf des Gebäudemodells *Werkstatt*. Ebenfalls wurde bereits in Kapitel 6.2.1 der höhere torspezifische Einfluss im Gebäudemodell *Werkstatt* aufgrund des verhältnismäßig geringen Raumvolumens beschrieben. So bewirkt ein häufiges Toröffnen, wie beispielsweise im Szenario *regelmäßiger Staplerverkehr*, einen Mehrbedarf an Wärme von 160 % bzw. rund 8.700 kWh/a gegenüber dem Gebäudemodell ohne Tor (siehe Kapitel 5.5). Der Wärmebedarf des verhältnismäßig kleinen Gebäudemodells *Werkstatt* wird also in diesem Szenario mehr als verdoppelt. Der resultierende Wärmebedarf des Gebäudes beträgt nun rund 88 kWh/m²a (Gebäudemodell ohne Tor: ca. 35 kWh/m²a).

Vergleicht man die summierte Öffnungsdauer pro Tag, so zeigt sich, dass das Szenario *regelmäßiger Staplerverkehr* mit 67,5 min/d eine deutlich höhere Öffnungsdauer als die beiden anderen Szenarien (*KFZ-Werkstatt*: 18 min/d, *LKW Be-/ Entladung*: 30 min/d) aufweist. Dies erklärt den höheren Mehrbedarf an Wärme gegenüber den beiden anderen Szenarien bei Verwendung des iT. Obwohl die summierte Öffnungsdauer im Szenario *KFZ-Werkstatt* um fast die Hälfte geringer ist als im Szenario *LKW Be-/ Entladung*, fällt ein höherer Mehrbedarf an Wärme an. Grund hierfür ist der, bedingt durch das kleine Raumvolumen, sehr rasche Temperaturabfall zu Beginn eines Öffnungsvorganges, wie in Kapitel 6.4.2 bereits exemplarisch für eine Öffnungsdauer von bis zu 20 min erläutert wurde.

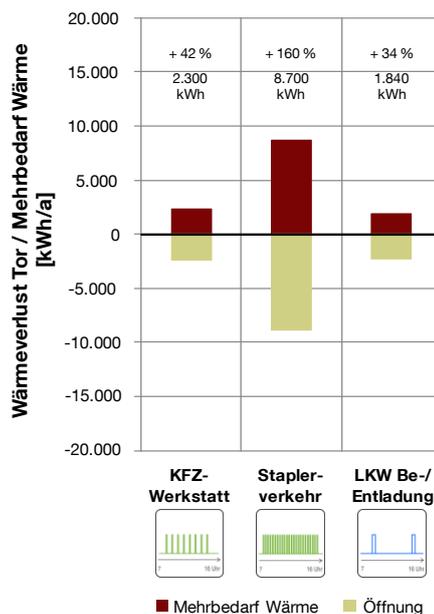


Abbildung 45: Vergleich der Szenarien *KFZ-Werkstatt*, *regelmäßiger Staplerverkehr* und *LKW Be-/ Entladung* in Bezug auf den Mehrbedarf an Wärme sowie den Wärmeverlust beim „idealen Tor“, Gebäudemodell *Werkstatt*

Bei zwei längeren Öffnungsvorgängen (Szenario *LKW Be-/ Entladung*) sinkt die Raumtemperatur zum Teil erheblich tiefer als bei häufigeren, aber kürzeren Öffnungsvorgängen (Szenario *KFZ-Werkstatt*). Der Wärmeverlust ist jedoch zu Beginn der Offenstehzeit am höchsten und verhält sich regressiv zur Öffnungsdauer, siehe auch Kapitel 6.2. Desweiteren zeigt eine Analyse des täglichen Außentemperaturverlaufs, dass im Szenario *LKW Be-/ Entladung* beim zweiten Öffnungsvorgang von 15 bis 15:15 Uhr die Außentemperatur häufig um 5 – 10 K höher ist als in den Morgenstunden. Der Wärmeverlust bzw. der resultierende Mehrbedarf an Wärme ist zu diesen Zeiten deutlich geringer.

In Abbildung 46 ist die Temperaturverteilung in der „Torzone“ (siehe Kapitel 5.3) bei Verwendung des iT prozentual über ein Jahr dargestellt.

Der erste Balken stellt die Temperaturverteilung in der „Torzone“ des Gebäudemodells *Werkstatt* mit geschlossenem Tor dar, wobei 1 % rund 24 h Nutzungszeit entspricht. Der behagliche Temperaturbereich auf einer Höhe von 1,4 m wird hierbei zwischen 15 °C und 26 °C angesetzt. Hier zeigt sich, dass die Raumtemperatur bei geschlossenem Tor zur fast der gesamten jährlichen Nutzungszeit im behaglichen Temperaturbereich liegt. Temperaturen oberhalb von 26 °C herrschen nur zu ca. 4 % der Nutzungszeit.

Bedingt durch das viermalige Öffnen des Tores pro Stunde für jeweils 30 s im Szenario *KFZ-Werkstatt* treten zu ca. 10 % bzw. rund 240 h/a in der „Torzone“ Temperaturen unterhalb der Raum-Solltemperatur auf, wobei die Temperatur meist nur geringfügig um ca. 1-2 K absinkt.

Beim Szenario *regelmäßiger Staplerverkehr* erhöht sich der Anteil an kälteren Temperaturen unterhalb der 15 °C-Grenze auf ca. 25 % bzw. rund 600 h/a. Die Temperatur sinkt jedoch in den meisten Öffnungsvorgängen nur um ca. 1 K beim iT¹⁴.

Beim Szenario *LKW Be-/ Entladung* ist der Anteil an Temperaturen unterhalb des behaglichen Temperaturbereichs (< 15 °C) in diesem Szenario am geringsten. Der Anteil an Temperaturen unterhalb von 12 °C ist jedoch gegenüber den beiden anderen Szenarien aufgrund der zwei langen Öffnungen des Tores deutlich höher.

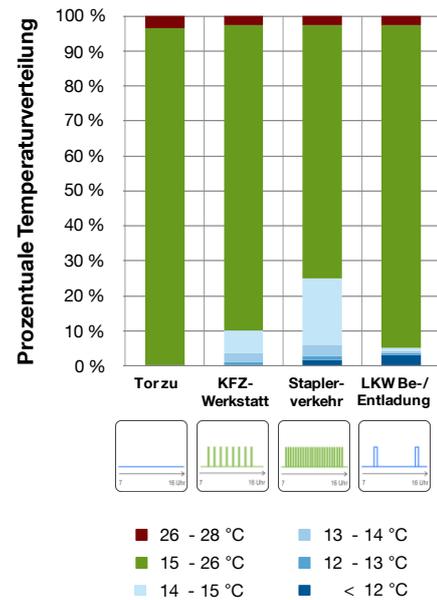


Abbildung 46: Temperaturverteilung der Szenarien des Gebäudemodells *Werkstatt* in der „Torzone“ bei Verwendung des „idealen Tores“ auf einer Raumhöhe von 1,4 m während der Nutzungszeit. Der Simulationszeitschritt beträgt 30 s, der Betrachtungszeitraum ist ein Jahr

Im Folgenden werden die realen Tortypen in den drei Szenarien untersucht.

¹⁴ an dieser Stelle sei angemerkt, dass der jeweilige Tortyp in diesem Szenario aufgrund von unterschiedlicher Öffnungs- und Schließgeschwindigkeit einen nicht zu vernachlässigenden Einflussfaktor auf den Temperaturabfall innerhalb der „Torzone“ darstellt. Eine separate Untersuchung der Temperaturverteilung mit den realen Tortypen zeigt, dass der Anteil an Temperaturen unterhalb von 12 °C bei den beiden langsam laufenden Toren ST und RT-L deutlich mit ca. 6 % zunimmt.

7.5.2 Szenario *KFZ-Werkstatt*, Gebäudemodell *Werkstatt*

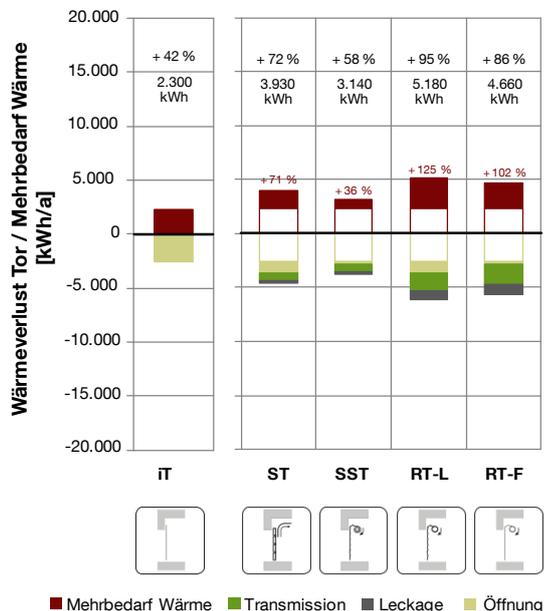


Abbildung 47: Mehrbedarf an Wärme bzw. gesamter Wärmeverlust des jeweiligen Tores im Szenario *KFZ-Werkstatt*

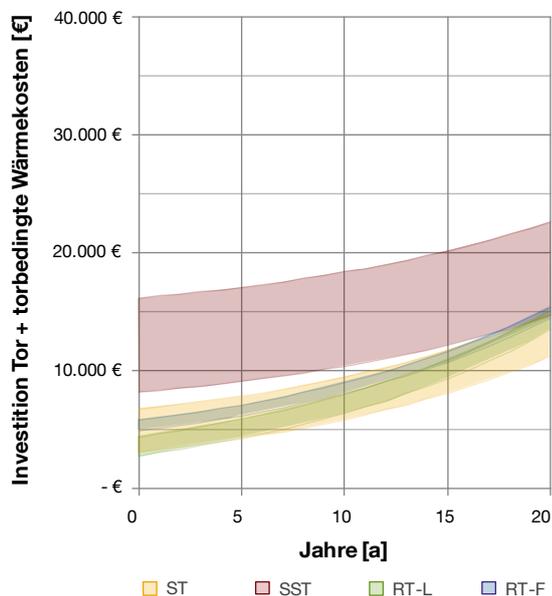


Abbildung 48: torspezifische Investition und kumulierte Wärmekosten über 20 Jahre im Szenario *KFZ-Werkstatt*

Das Szenario *KFZ-Werkstatt* stellt eine für KFZ-Werkstätten typische Öffnungscharakteristik mit vier Öffnungen pro Stunde dar.

In Abbildung 47 ist der energetische Einfluss der verschiedenen Torarten dargestellt. Das SST schneidet aus energetischer Sicht am besten ab. Der zusätzliche Wärmeverlust durch Transmission, Leckage sowie dem Lüftungswärmeverlust infolge der Öffnungs- und Schließvorgänge ist bei einem resultierenden Wärme-Mehrbedarf mit rund 840 kWh/a (36 %) gegenüber dem iT als vergleichsweise gering zu betrachten. Das ST hat aufgrund der langsameren Öffnungs- und Schließgeschwindigkeit einen höheren Lüftungswärmeverlust als das SST. Die Auswirkung auf den Wärme-Mehrbedarf ist mit ca. 800 kWh/a gegenüber dem SST jedoch als moderat zu bewerten. Beide Rolltore haben den höchsten Wärmeverlust zu verzeichnen, wobei das RT-F trotz schlechterer Dämmeigenschaften gegenüber dem RT-L energetisch vorteilhafter ist. Der zusätzlich entstehende Lüftungswärmeverlust während der Öffnungs- und Schließvorgänge des langsameren RT-L ist in diesem Fall höher als der Transmissionswärmeverlust beim nicht gedämmten RT-F.

Abbildung 48 zeigt die kumulierten Kosten der Tore, bestehend aus der Investition sowie den torspezifischen Wärmekosten. Es wird ersichtlich, dass das ST mit zunehmender Zeit, aufgrund hohem Dämm- und Dichtheitswert bei moderater Investition, zu empfehlen ist. Zudem bietet sich das RT-L aufgrund der geringen Investition als Alternative an. Das SST ist trotz des guten Results in der energetischen Betrachtung aufgrund der hohen Investition nur eingeschränkt zu empfehlen. Die eingesparten Wärmekosten rechnen sich gegenüber der hohen Investition nicht. Ebenso ist das RT-L dem RT-F infolge der geringeren Investition und trotz etwas höherem Mehrbedarf an Wärme vorzuziehen.

7.5.3 Szenario *regelmäßiger Staplerverkehr*, Gebäudemodell *Werkstatt*

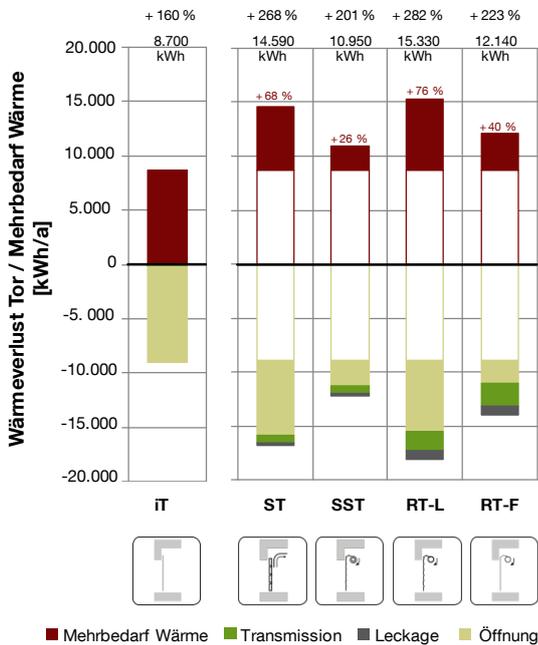


Abbildung 49: Mehrbedarf an Wärme bzw. gesamter Wärmeverlust des jeweiligen Tores im Szenario *regelmäßiger Staplerverkehr*

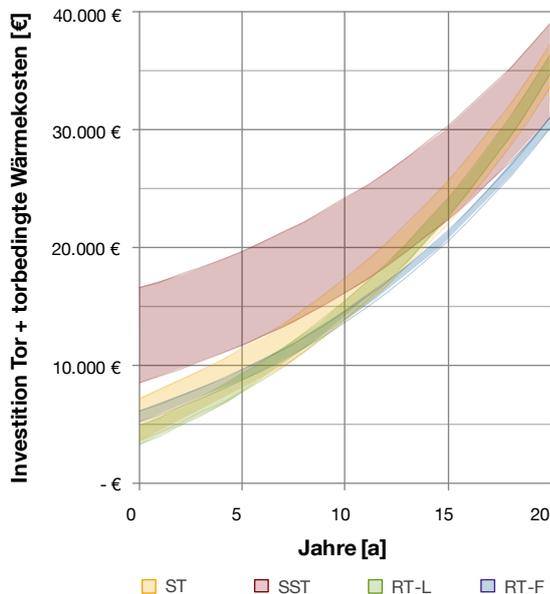


Abbildung 50: torspezifische Investition und kumulierte Wärmekosten über 20 Jahre im Szenario *regelmäßiger Staplerverkehr*

Das Szenario *regelmäßiger Staplerverkehr* beschreibt ein häufiges Öffnen und Schließen des Tores bei kurzen Offenhaltezeiten.

In Abbildung 49 ist der Mehrbedarf an Wärme bzw. der gesamte Wärmeverlust des jeweiligen Tores für das Szenario *regelmäßiger Staplerverkehr* dargestellt.

Beim iT entspricht der Mehrbedarf an Wärme gegenüber dem Gebäudemodell ohne Tor bereits 160 % bzw. rund 8.700 kWh/a. Sowohl das SST, als auch das RT-F, schneiden bei diesem Szenario mit häufigen und kurzen Öffnungsvorgängen deutlich energieeinsparender gegenüber den langsam laufenden Toren ST und RT-L ab. Der Mehrbedarf an Wärme erhöht sich gegenüber dem iT um 26 % bzw. rund 2.300 kWh/a, beim RT-F um 40 % bzw. rund 3.400 kWh/a. Entsprechend der Resultate des Szenarios im Gebäudemodell *Fertigung* in Kapitel 7.4.3 führt der zusätzliche Lüftungswärmeverlust bei den beiden langsam laufenden Toren ST und RT-L zu einer wesentlichen Erhöhung des Wärmebedarfs. Gegenüber dem iT erhöht sich der Mehrbedarf an Wärme beim gut gedämmten ST um 68 % bzw. rund 5.900 kWh/a, beim RT-L um 78 % bzw. rund 6.600 kWh/a.

Unabhängig des Tortyps zeigt sich, dass der Einfluss der Offenstehzeit pro Toröffnung (15 s) höher ist als der torspezifische Wärmeverlust durch Transmission, Leckage und den Lüftungswärmeverlust während der Öffnungs- und Schließvorgänge. Es erscheint deshalb aus energetischer Sicht ratsam, die Möglichkeit einer Verringerung des Wärmebedarfs über eine Reduktion der Öffnungsdauer zu untersuchen, z.B. durch Zusammenschluss mehrerer kurzer Öffnungen auf wenige, dafür jedoch längere Öffnungen des Tores. Jedoch muss dabei beachtet werden, dass der interne Betriebsablauf durch eine solche Maßnahme zum Teil erheblich beeinträchtigt werden kann.

Bei Betrachtung der kumulierten Kosten in Abbildung 50 zeigt sich, dass mit zunehmender Zeit das RT-F aufgrund des hier ausgeglichenen Verhältnisses zwischen Investition und resultierenden Wärmekosten eine geeignete Wahl darstellt.

Das SST ist infolge der hohen anfänglichen Investition und dem verhältnismäßig nur geringen eingesparten Mehrbedarf an Wärme von ca. 1.200 kWh/a gegenüber dem RT-F in diesem Gebäudemodell nur bedingt zu empfehlen.

Eine weitere Maßnahme zur Verringerung des Wärmebedarfs stellt die objektgrößenangepasste Toröffnung dar. Diese wird in Kapitel 8.5 untersucht.

7.5.4 Szenario LKW Be-/ Entladung, Gebäudemodell Werkstatt

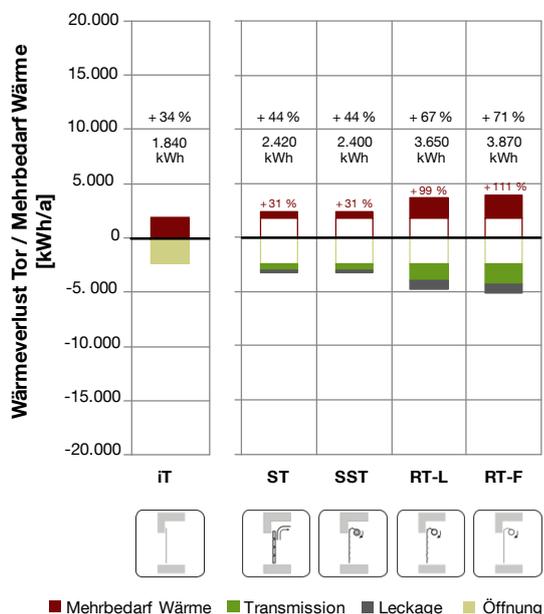


Abbildung 51: Mehrbedarf an Wärme bzw. gesamter Wärmeverlust des jeweiligen Tores im Szenario LKW Be-/ Entladung

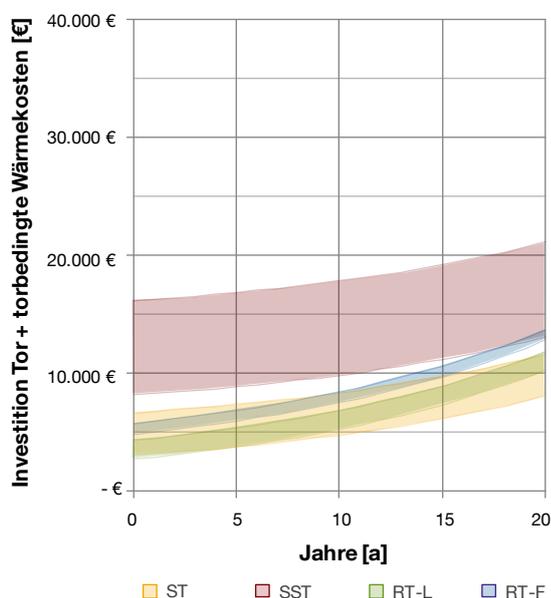


Abbildung 52: torspezifische Investition und kumulierte Wärmekosten über 20 Jahre im Szenario LKW Be-/ Entladung

Das Szenario *LKW Be-/ Entladung* stellt eine sehr geringe Toröffnungsfrequenz mit nur zwei Öffnungen morgens/ abends am Tag dar. Die Offenstehdauer beträgt pro Öffnung 15 min.

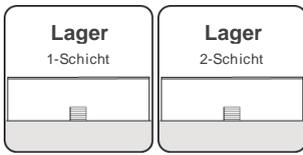
In Abbildung 51 ist der energetische Einfluss der verschiedenen Torarten für das Szenario *LKW Be-/ Entladung* des Gebäudemodells *Werkstatt* dargestellt.

Die Torarten ST und SST zeigen in diesem Szenario aufgrund der besseren Dämmeigenschaften und der höheren Dichtigkeit eine höhere Energieeffizienz als die beiden Rolltore. Der Mehrbedarf an Wärme erhöht sich bei den Toren ST und SST gegenüber dem iT um 31 % bzw. rund 560 kWh/a. Ähnlich wie im gleichbenannten Szenario des Gebäudemodells *Fertigung* in Kapitel 7.4.2 zeigt sich, dass das SST gegenüber dem ST keinen nennenswerten energetischen Vorteil bringt. Energetisch ist somit das ST zu empfehlen. Beide Rolltore weisen aufgrund schlechterer Dämmwerte und geringerer Dichtigkeit den größten Mehrbedarf an Wärme auf.

Abbildung 52 zeigt die kumulierten Kosten des Tores, bestehend aus der Investition sowie den torspezifischen Wärmekosten. Das ST und das RT-L weisen mit zunehmender Zeit die geringsten kumulierten Kosten auf – das ST bedingt durch die geringen anfallenden jährlichen Wärmekosten – das RT-L durch die geringe Investition. Die beiden schnell laufenden Tore schneiden in diesem Szenario unter den gesetzten Randbedingungen schlechter ab – das SST aufgrund der hohen anfänglichen Investition – das RT-F aufgrund der erhöhten Wärmekosten infolge der geringen Dämmung bzw. Dichtigkeit.

Eine Erhöhung der Energieeffizienz der schnell laufenden Tore SST und RT-F durch mehrfaches Öffnen und Schließen während der LKW Be-/ Entladung wird in Kapitel 8.3 erläutert.

7.6 Szenarien des Gebäudemodells Lager



Für das Gebäudemodell *Lager* werden jeweils zwei Szenarien bei unterschiedlichen Betriebszeiten des Gebäudes unter-

sucht, da Lagergebäude häufig nicht in einem 1-Schichtbetrieb, sondern einem 2-Schichtbetrieb genutzt werden. Nach ersten Erkenntnissen aus dem laufenden Forschungsvorhaben „Das CO₂-neutrale Logistikzentrum - Entwicklung von ganzheitlichen Handlungsempfehlungen für energieeffiziente Logistikzentren“ am Lehrstuhl für Bauklimatik und Haustechnik in Kooperation mit dem Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik der TU München können zwei grundsätzlich voneinander abweichende Toröffnungsszenarien klassifiziert werden: *LKW Be-/ und Entladungen* mit Stoßzeiten üblicherweise am Morgen (LKW Entladungen) und am Abend (LKW Beladungen) sowie *regelmäßiger Staplerverkehr* während der Nutzungszeit, z.B. bei Lagerung von Gütern außerhalb des Gebäudes oder Staplerverkehr zwischen mehreren Gebäudetrakten.

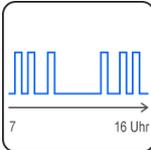
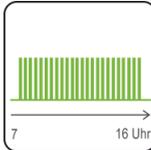
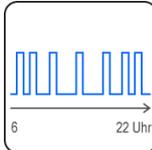
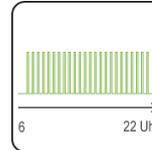
Moderne Lagergebäude sind üblicherweise durch eine hohe Anzahl an Verladetoren in der Fassade gekenn-

zeichnet, z.B. über Verladeschleusen. Für den Zu- und Abtransport betrieblicher Güter können die LKW unmittelbar an die Verladeschleuse andocken, wodurch die Lüftungswärmeverluste gegenüber einem offenstehenden Tor verringert werden [Häußler 2012]. Für den Fall einer seitlichen LKW Be-/ und Entladung kommen jedoch wie in den anderen Gebäudemodellen Industrietore zum Einsatz. Die Be-/ und Entladung erfolgt dann z.B. mittels Staplern oder Hubwagen. Für das folgende untersuchte Szenario *LKW Be-/ Entladung* wird der Fall einer seitlichen Be-/ und Entladung angenommen. Die Öffnungscharakteristik dieses Szenarios wurde anhand einer durchgeführten Umfrage zur Anzahl von Wareneingängen und Warenausgängen verschiedener Lagergebäude im oben genannten Forschungsvorhaben abgeleitet.

Als zweites Szenario wird, wie in den Gebäudemodellen *Fertigung* und *Werkstatt*, ein *regelmäßiger Staplerverkehr* simuliert. Die Toröffnungsfrequenz beträgt in der Nutzungszeit regelmäßig 30 Öffnungen pro Stunde, die Offenstehdauer wird hierbei mit 15 s pro Öffnung angesetzt.

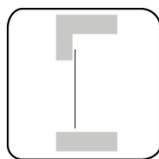
In Tabelle 14 sind die Szenarien für das Gebäudemodell *Lager* zusammengefasst.

Tabelle 14: Übersicht der simulierten Szenarien für das Gebäudemodell *Lager*

	 Lager 1-Schicht	 Lager 2-Schicht		
	LKW-Be-/ Entladung Stoßzeit morgens / abends	regelmäßiger Staplerverkehr	LKW-Be-/ Entladung Stoßzeit morgens / abends	regelmäßiger Staplerverkehr
				
Öffnungscharakteristik	mehrfach tägliche Toröffnung mit Stoßzeit morgens / abends	häufige Toröffnungen durch Staplerverkehr	mehrfach tägliche Toröffnung mit Stoßzeit morgens / abends	häufige Toröffnungen durch Staplerverkehr
Öffnungszeiten	7:00-7:15, 7:30-7:45, 9:00-9:15, 14:00-14:15, 15:00-15:15, 15:30-15:45	regelmäßig von 7:00 bis 16:00, 30 Öffnungen pro Stunde	6:00-6:15, 6:30-6:45, 7:00-7:15, 8:00-8:15, 10:00-10:15, 12:00-12:15, 16:00-16:15, 18:00-18:15, 19:00-19:15, 20:00- 20:15, 21:00-21:15, 21:30-21:45	regelmäßig von 6:00 bis 22:00, 30 Öffnungen pro Stunde
Offenstehdauer pro Öffnung	15 min	15 s	15 min	15 s
Öffnungen/ Tag	6	270	12	480

7.6.1 Vergleich der Szenarien bei Verwendung des „idealen Tores“, Gebäudemodell *Lager*

1-Schichtbetrieb



Zunächst werden die Szenarien des 1-Schichtbetriebs miteinander verglichen. In Abbildung 53 sind der jährliche Wärmeverlust des Tores, sowie der darauf zurückzuführende Mehrbedarf an Wärme, für die Szenarien *LKW Be-/ Entladung* und *regelmäßiger Staplerverkehr* bei Verwendung des „idealen Tores“ (iT) dargestellt.

Wie bereits im Kapitel 6 für die verschiedenen torspezifischen Untersuchungen am Gebäudemodell *Lager* beschrieben, ist der prozentuale Einfluss eines Tores auf den Wärmebedarf des Gebäudes aufgrund der verhältnismäßig geringen Torfläche zur Fassadenfläche deutlich geringer als in den Gebäudemodellen *Fertigung* und *Werkstatt*. Der absolute Wärmeverlust bzw. der resultierende Mehrbedarf an Wärme ist jedoch keineswegs als geringfügig anzusehen. Im Szenario *LKW Be-/ Entladung* führt der jährliche Wärmeverlust des „idealen Tores“ (iT) zu einem Mehrbedarf an Wärme von 2,6 % bzw. rund 13.000 kWh/a. Dieser ist damit höher als der Mehrbedarf an Wärme im Szenario *regelmäßiger Staplerverkehr* mit 1,8 % bzw. rund 8.700 kWh/a. Eine Betrachtung der

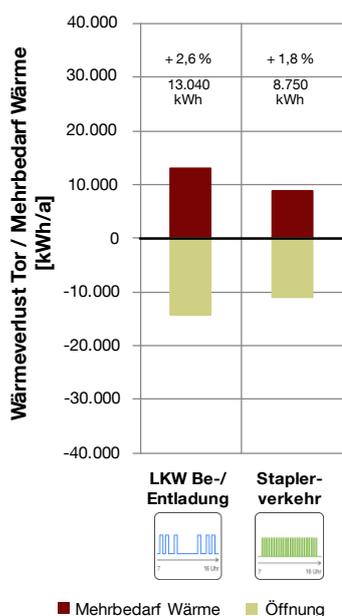


Abbildung 53: Vergleich der Szenarien *LKW Be-/ Entladung* und *regelmäßiger Staplerverkehr* im 1-Schichtbetrieb in Bezug auf den Mehrbedarf an Wärme sowie den Wärmeverlust beim „idealen Tor“, Gebäudemodell *Lager*

summierten Öffnungsdauer pro Tag zeigt, dass diese im Szenario *LKW Be-/ Entladung* mit 90 min/d deutlich höher als im Szenario *regelmäßiger Staplerverkehr* mit 67,5 min/d ist und erklärt den höheren Wärmebedarf. Eine weiterer Grund ist der hohe, proportional zur Öffnungsdauer verlaufende Lüftungswärmeverlust aufgrund des großen Raumvolumens bei langen Offenstehzeiten im Szenario *LKW Be-/ Entladung*, siehe auch Kapitel 6.2.1.

In Abbildung 54 ist die Temperaturverteilung eines Jahres in der „Torzone“ bei Verwendung des iT während der Nutzungszeit prozentual dargestellt.

Der erste Balken stellt die Temperaturverteilung in der „Torzone“ des Gebäudemodells *Lager* mit geschlossenem Tor dar, wobei 1 % rund 24 h Nutzungszeit entspricht. Der behagliche Temperaturbereich wird zwischen 17 °C und 26 °C auf einer Höhe von 1,4 m angesetzt. Wie bereits im Kapitel 5.5 des Gebäudemodells *Lager* gezeigt, liegt kein Kühlbedarf vor, da nur eine geringe interne Wärmelast aus der dauerhaft eingeschalteten Beleuchtung resultiert und somit das Gebäude nur geringfügig aufwärmt. Nahezu während der gesamten jährlichen Nutzungszeit wird der behagliche Temperaturbereich eingehalten.

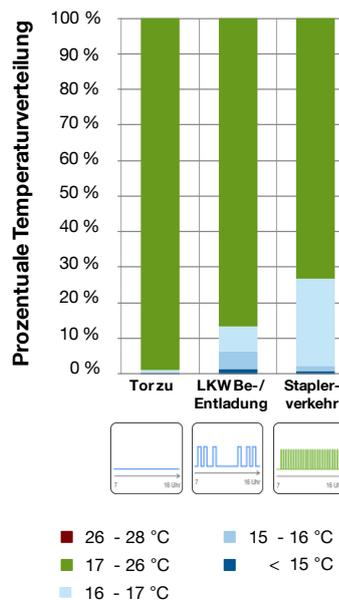


Abbildung 54: Temperaturverteilung der Szenarien im 1-Schichtbetrieb des Gebäudemodells *Lager* in der „Torzone“ bei Verwendung des „idealen Tores“ auf einer Raumhöhe von 1,4 m während der Nutzungszeit. Der Simulationszeitschritt beträgt 30 s, der Betrachtungszeitraum ist ein Jahr

Im Szenario *LKW Be-/ Entladung* wird die Raum-Solltemperatur zu ca. 12 % bzw. rund 290 h der Nutzungszeit unterschritten, wobei die Temperatur zur meisten Zeit der Unterschreitung um ca. 1-2 K unter der Raum-Solltemperatur liegt.

Beim Szenario *regelmäßiger Staplerverkehr* erhöht sich der Anteil an Temperaturen unterhalb der geforderten 17 °C auf ca. 28 % bzw. rund 670 h/a. Die Temperatur sinkt in den meisten Öffnungsvorgängen um ca. 1 K.

Anmerkung: in der betrachteten „Torzone“ (8 · 8 m²) wird nach Kapitel 5.4 nur eine mittlere Temperatur der Zone berechnet, weshalb bei einer feineren Auflösung der Zone unmittelbar am Tor zum Teil deutlich kältere Temperaturen auftreten können.

2-Schichtbetrieb

In Abbildung 55 ist der jährliche Wärmeverlust des Tores sowie der darauf zurückzuführende Mehrbedarf an Wärme für die Szenarien *LKW Be-/ Entladung* und *regelmäßiger Staplerverkehr* für den Fall eines 2-Schichtbetriebs dargestellt. Zur Berechnung des Mehrbedarfs wird der Wärmebedarf des Gebäudemodells *Lager* ohne Tor bei 2-Schichtbetrieb zugrundegelegt, siehe Kapitel 5.5.

Für das Szenario *LKW Be-/ Entladung* wird eine Verdoppelung der LKW Be-/ und Entladungsvorgänge gegenüber dem 1-Schichtbetrieb angenommen, die summierte Öffnungsdauer beträgt nun 180 min/d. Der Mehrbedarf an Wärme beträgt für dieses Szenario bei Zugrundelegung des iT 5,4 % bzw. rund 28.800 kWh/a. Der Mehrbedarf an Wärme erhöht sich demnach gegenüber dem Szenario bei 1-Schichtbetrieb um ca. 120 % bzw. rund 15.800 kWh/a. Dies zeigt, dass der Mehrbedarf an Wärme überproportional zur Anzahl der Toröffnungen steigt. Grund hierfür ist die zeitliche Verlagerung von Öffnungsvorgängen in die frühen Morgen- bzw. späten Abendstunden bei kälteren Außentemperaturen, siehe Tabelle 14.

Im Szenario *regelmäßiger Staplerverkehr* erhöht sich der Mehrbedarf an Wärme gegenüber dem gleichbenannten Szenario im 1-Schichtbetrieb um ca. 94 % auf rund 17.000 kWh/a und ist damit weitgehend proportional zur Anzahl der Toröffnungen.

Im Folgenden werden die realen Tortypen in den Szenarien untersucht.

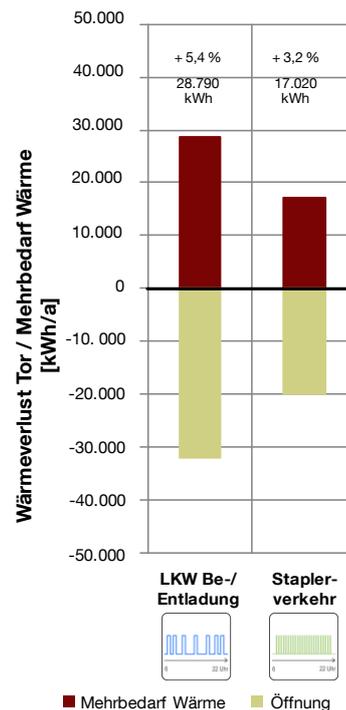


Abbildung 55: Vergleich der Szenarien *LKW Be-/ Entladung* und *regelmäßiger Staplerverkehr* im 2-Schichtbetrieb in Bezug auf den Mehrbedarf an Wärme sowie den Wärmeverlust beim „idealen Tor“, Gebäudemodell *Lager*

7.6.2 Szenario LKW Be-/ Entladung, Gebäudemodell Lager

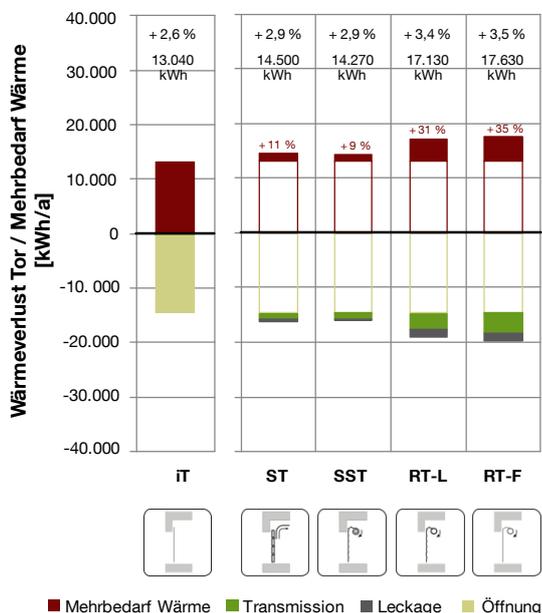


Abbildung 56: Mehrbedarf an Wärme bzw. gesamter Wärmeverlust des jeweiligen Tores im Szenario LKW Be-/ Entladung, 1-Schichtbetrieb

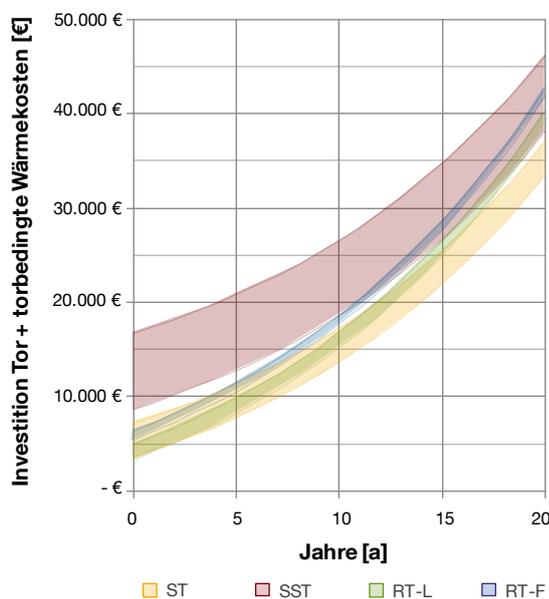


Abbildung 57: torspezifische Investition und kumulierte Wärmekosten über 20 Jahre im Szenario LKW Be-/ Entladung, 1-Schichtbetrieb

Vorbemerkung: da die Auswertung dieses Szenarios bei zugrundegelegtem 1-Schicht- bzw. 2-Schichtbetrieb tendenziell gleiche Aussagen liefert, werden die Ergebnisse aus der Simulation des 2-Schichtbetriebs im Text in Klammern angegeben.

Das Szenario LKW Be-/ Entladung stellt eine mehrfache tägliche Toröffnung mit Stoßzeit morgens / abends dar, die Offenstehdauer beträgt pro Öffnung 15 min.

In Abbildung 56 ist der energetische Einfluss der verschiedenen Tortypen für das Szenario LKW Be-/ Entladung des Gebäudemodells Lager bei einem 1-Schichtbetrieb dargestellt. Der Mehrbedarf an Wärme erhöht sich beim ST gegenüber dem iT um 11 % bzw. rund 1.500 kWh/a (9 %, ~2.500 kWh/a), beim SST um 9 % bzw. rund 1.200 kWh/a (7 %, ~2.000 kWh/a). Beide Rolltore weisen höhere Wärmeverluste auf. Gegenüber dem iT beträgt der Mehrbedarf an Wärme beim RT-L 31 % bzw. rund 4.100 kWh/a (22 %, ~6.300 kWh/a) und beim RT-F 35 % bzw. rund 4.600 kWh/a (23 %, ~6.700 kWh/a). Trotz der höheren Anzahl von sechs (zwölf) Toröffnungen gegenüber dem prinzipiell ähnlichen Szenario der beiden anderen Gebäudemodelle Fertigung und Werkstatt mit nur zwei Toröffnungen (siehe Kapitel 7.4.2 und 7.5.4) ergeben sich ähnliche Resultate: die Tortypen ST und SST zeigen aufgrund der besseren Dämmeigenschaften und der höheren Dichtheit aus energetischer Sicht einen geringeren Mehrbedarf an Wärme als die beiden Rolltore. Der Einfluss der unterschiedlichen Tortypen auf den Mehrbedarf an Wärme ist beim 2-Schichtbetrieb aufgrund der höheren öffnungsbedingten Lüftungswärmeverluste geringer als bei einem 1-Schichtbetrieb.

Abbildung 57 zeigt die kumulierten Kosten des Tores, bestehend aus der Investition sowie den torspezifischen Wärmekosten. Das ST weist mit zunehmender Zeit die geringsten kumulierten Kosten auf. Das RT-L hat im Vergleich zu den anderen Tortypen die geringste Investition, die höheren jährlichen Wärmekosten führen jedoch ab ca. 10 Jahren zu höheren Kosten als beim ST. Die beiden schnell laufenden Tore schneiden in diesem Szenario schlechter ab – das SST aufgrund der hohen anfänglichen Investition – das RT-F aufgrund der erhöhten Wärmekosten infolge der verminderten Dämmung bzw. Dichtheit.

Eine Erhöhung der Energieeffizienz der schnell laufenden Tore SST und RT-F durch mehrfaches Öffnen und Schließen während einer LKW Be-/ Entladung wird in Kapitel 8.3 erläutert. Als erweitertes Szenario zur Reduzierung der Offenstehzeiten und den damit verbundenen Lüftungswärmeverlusten wird eine LKW-Durchfahrt (Be-/ und Entladung innerhalb Gebäudes) in Kapitel 8.4 untersucht.

7.6.3 Szenario *regelmäßiger Staplerverkehr*, Gebäudemodell Lager

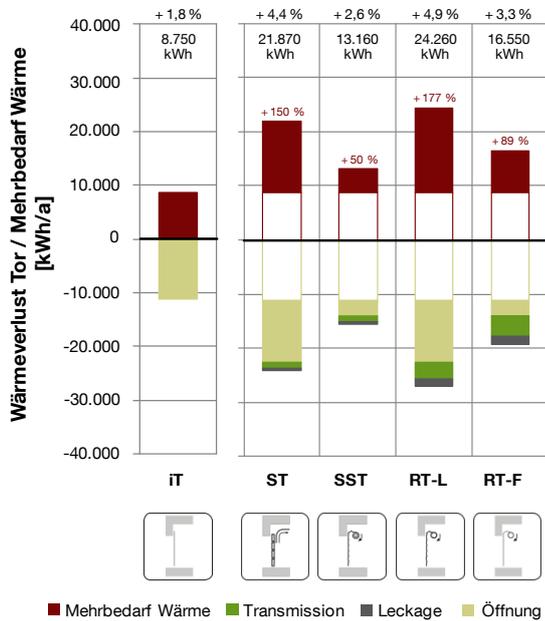


Abbildung 58: Mehrbedarf an Wärme bzw. gesamter Wärmeverlust des jeweiligen Tores im Szenario *regelmäßiger Staplerverkehr*, 1-Schichtbetrieb

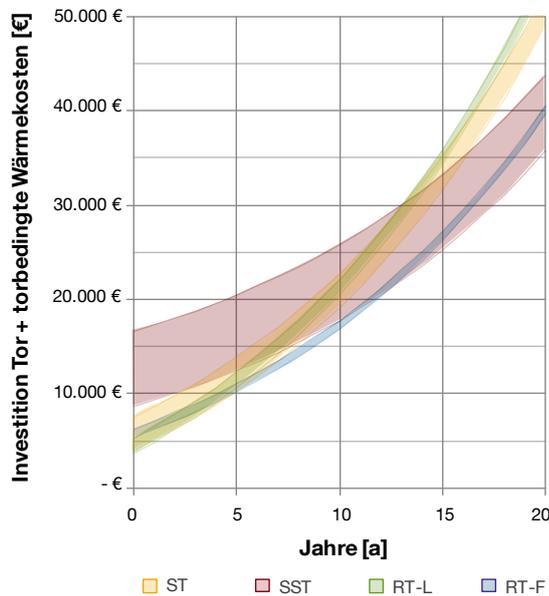


Abbildung 59: torspezifische Investition und kumulierte Wärmekosten über 20 Jahre im Szenario *regelmäßiger Staplerverkehr*, 1-Schichtbetrieb

Vorbemerkung: da die Auswertung dieses Szenarios bei zugrundegelegtem 1-Schicht- bzw. 2-Schichtbetrieb tendenziell gleiche Aussagen liefert, werden die Ergebnisse aus der Simulation des 2-Schichtbetriebs im Text in Klammern angegeben.

Das Szenario *regelmäßiger Staplerverkehr* beschreibt ein häufiges Öffnen und Schließen bei kurzen Offenhaltezeiten.

In Abbildung 58 ist der Mehrbedarf an Wärme und der Wärmeverlust des jeweiligen Tores für das Szenario *regelmäßiger Staplerverkehr* dargestellt.

Beim iT entspricht der Mehrbedarf an Wärme gegenüber dem Gebäudemodell ohne Tor 1,8 % bzw. rund 8.800 kWh/a. Wie zu erwarten sind das SST und RT-F als schnell laufende Tore für dieses Szenario am effizientesten. Der torspezifische Einfluss des jeweiligen Tortyps ist dabei jedoch wesentlich größer als im vorangegangenen Szenario: beim Tortyp SST erhöht sich der Mehrbedarf an Wärme gegenüber dem iT um 50 % bzw. rund 4.400 kWh/a (42 %, ~7.000 kWh/a), vorrangig durch den zusätzlichen Lüftungswärmeverlust während der Öffnungs- und Schließvorgänge. Das RT-F hat aufgrund höherer Wärmeverluste durch Transmission und Leckage einen Mehrbedarf an Wärme gegenüber dem iT von 89 % bzw. rund 7.800 kWh/a (69 %, ~11.700 kWh/a). Der zusätzliche Lüftungswärmeverlust während der Öffnungs- und Schließvorgänge ist bei den langsam laufenden Toren ST und RT-L in der gleichen Größenordnung wie der Lüftungswärmeverlust während der Offenstehzeit.

Bei Betrachtung der kumulierten Kosten in Abbildung 59 zeigt sich, dass mit zunehmender Zeit das SST als auch das RT-F aufgrund der hohen Öffnungs- und Schließgeschwindigkeit die geeignetste Wahl darstellen.

Anmerkung: der Lüftungswärmeverlust während der Offenstehzeit pro Toröffnung (15 s) stellt bei beiden schnell laufenden Toren den größten Anteil am Wärmeverlust dar. Eine Verringerung dieser Lüftungswärmeverluste durch eine objektgrößenangepasste Toröffnung wird in Kapitel 8.5 untersucht.

7.7 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden mehrere, an der Praxis orientierte Szenarien für die Gebäudemodelle *Fertigung*, *Werkstatt* und *Lager* mit unterschiedlichen Tortypen untersucht. Folgende Ergebnisse können zusammengefasst werden:

gebäudeunabhängige Ergebnisse

- bei nahezu allen Szenarien ist unabhängig des Tortyps der Lüftungswärmeverlust durch das offenstehende Tor höher als der Wärmeverlust durch das geschlossene Tor infolge Transmission und Leckage, und zeigt damit das größte Einsparpotential hinsichtlich des Wärmeverlusts.
- in Abhängigkeit des jeweiligen Szenarios und des Gebäudemodells können im Bereich des Tores („Torzone“) Temperaturen unter der Raum-Solltemperatur in bis zu 30 % der Nutzungszeit auftreten.
- bei geringen Öffnungszyklen sind aus energetischer Sicht eine hohe Dämmung und Dichtheit des geschlossenen Tores erforderlich. Diese können insbesondere bei einem hohen Anteil von Toren in der Fassadenfläche zur Energieeinsparung des Gebäudes beitragen.
- bei häufigen Öffnungszyklen ist vorrangig die Öffnungs- und Schließgeschwindigkeit des Tores relevant, Dämmung und Dichtheit des Tores haben aus energetischer Sicht untergeordneten Einfluss. Die hier untersuchten langsam laufenden Tore (ST, RT-L) sind sowohl aus energetischer als auch aus kostenspezifischer Sicht ungeeignet, zum Teil benötigt der Öffnungs- und Schließvorgang mehr Zeit als das tatsächliche Offenstehen des Tores und verursacht dadurch einen hohen zusätzlichen Lüftungswärmeverlust.
- das SST weist aufgrund der hohen Dämm- und Dichtheitseigenschaften sowie der hohen Öffnungs- und Schließgeschwindigkeit grundsätzlich den geringsten Mehrbedarf an Wärme in den Szenarien auf. In einer Kostenbetrachtung ist das SST aufgrund der hohen Investition jedoch nicht in allen Szenarien zu empfehlen.

Gebäudemodell *Fertigung*

- bei geringen bis mäßigen Öffnungszyklen (Szenarien *LKW Be-/ Entladung*, *Mischnutzung*) ist das ST mit den gewählten Eigenschaften (gute Dämmung und Dichtheit) energetisch und aus Sicht der kumulierten Kosten zu empfehlen.

- bei hohen Öffnungszyklen (Szenario *regelmäßiger Staplerverkehr*) sind sowohl das SST als auch das RT-F energetisch und bei Betrachtung der kumulierten Kosten empfehlenswert; gegenüber den langsam laufenden Toren ST und RT-L können bis zu 11.000 kWh/a bzw. ca. 30 % des jährlichen Wärmebedarfs eingespart werden.

Gebäudemodell *Werkstatt*

- aufgrund des vergleichsweise geringen Raumvolumens des Gebäudemodells können insbesondere bei langen Offenstehzeiten (z.B. Szenario *LKW Be-/ Entladung*) sehr kalte Temperaturen auftreten.
- der torspezifische Mehrbedarf an Wärme ist gegenüber dem Gebäudemodell *Fertigung* aufgrund des regressiven Zusammenhangs zwischen Wärmeverlust und Öffnungsdauer sowie der niedrigeren Raum-Solltemperatur geringer. Gebäudespezifisch ist der Einfluss der unterschiedlichen Tortypen auf den Wärmebedarf in den Szenarien jedoch wesentlich höher.
- bei geringen bis mäßigen Öffnungszyklen (Szenarien *KFZ-Werkstatt*, *LKW Be-/ Entladung*) sind bei der Betrachtung der kumulierten Kosten das ST, aufgrund der geringen torspezifischen Wärmekosten und das RT-L infolge der geringen Investition, zu befürworten. Aus energetischer Sicht sind das ST und das SST empfehlenswert.
- bei hohen Öffnungszyklen (Szenario *regelmäßiger Staplerverkehr*) sind aus energetischer Sicht das SST und das RT-F zu empfehlen. Aus Sicht der Kostenentwicklung ist das RT-F aufgrund der geringen Investition trotz höherem Wärmeverlust gegenüber dem SST empfehlenswert.

Gebäudemodell *Lager*

- der torspezifische Mehrbedarf an Wärme und die damit verbundenen Wärmekosten sind in diesem Gebäudemodell am höchsten, da bis auf die Abwärme des Kunstlichts keine Wärmelasten vorhanden sind, welche einen Teil des Wärmeverlusts (z.B. bei offenstehendem Tor) ausgleichen.
- bei geringen Öffnungszyklen (Szenario *seitliche LKW Be-/ Entladung*) ist das ST mit hoher Dämmung und Dichtheit aus energetischer Sicht und bei Betrachtung der kumulierten Kosten empfehlenswert.
- bei hohen Öffnungszyklen (Szenario *regelmäßiger Staplerverkehr*) sind die schnell laufenden Tore SST und RT-F energetisch wie auch kostenspezifisch zu befürworten.

8. Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz und des thermischen Komforts

8.1 Maßnahmenübersicht und Vorgehensweise

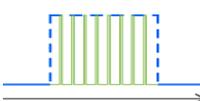
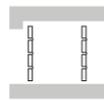
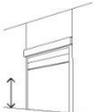
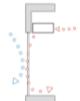
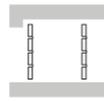
In diesem Kapitel werden unterschiedliche Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz bzw. des thermischen Komforts behandelt. Die energetische Bewertung der Maßnahmen wird anhand der entwickelten Szenarien (vgl. Kapitel 7) durchgeführt.

Für den Fall längerer Offenstehzeiten (z.B. Szenario *LKW Be-/ Entladung*) wird untersucht, wie ein häufiges Öffnen und Schließen durch den Einsatz von schnell laufenden Toren zur Reduzierung der Offenstehzeit und der damit einhergehenden Verringerung des Lüftungswärmeverlusts beitragen kann. Desweiteren wird die Anwendung

einer Schleuse analysiert, um den Luftaustausch bzw. den Kaltlufteintrag zu verringern. Eine weitere Möglichkeit zur Reduzierung der Offenstehzeit eines Tores stellt eine LKW Be-/ Entladung innerhalb des Gebäudes dar. Bei häufigen kurzzeitigen Öffnungsvorgängen (z.B. Szenario *regelmäßiger Staplerverkehr*) wird eine objektgrößenangepasste Toröffnung zur Reduzierung des Lüftungswärmeverlusts untersucht. Auch Luftschleier-, bzw. Luftwandanlagen können zu einer Reduzierung des Lüftungswärmeverlusts beitragen. Beispielhaft wird anhand einer Kalkulation der Einsatz einer Luftwandanlage untersucht.

Eine schematische Übersicht der unterschiedlichen Maßnahmen ist in Tabelle 15 dargestellt.

Tabelle 15: schematische Übersicht der unterschiedlichen Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz bzw. des thermischen Komforts für verschiedene Szenarien

Szenario	Maßnahmen		
<p>LKW Be-/ Entladung</p> 	<p>häufiges Öffnen / Schließen (Kapitel 8.3)</p> 	<p>LKW-Durchfahrt (Kapitel 8.4)</p> 	<p>Schleuse (Kapitel 8.6)</p> 
<p>regelmäßiger Staplerverkehr</p> 	<p>objektgrößenangepasstes Öffnen (Kapitel 8.5)</p> 	<p>Luftschleier/ Luftwand (Kapitel 8.7)</p> 	<p>Schleuse (Kapitel 8.6)</p> 

8.2 Erläuterung der Energieeinspar-Grafik

In Abbildung 60 wird die „Energieeinspar-Grafik“ erläutert, welche für jede Maßnahme das Energieeinsparpotential des jeweiligen Tores aufzeigt. Da die Energieeinsparpotentiale der verschiedenen Maßnahmen anhand der Szenarien aus Kapitel 7 untersucht werden, wird die ursprüngliche Szenario-Energiegrafik (siehe Kapitel 7.2) als ausgegraute Fläche dargestellt. Der durch die Energieeinspar-Maßnahme verringerte Wärmeverlust durch Transmission, Leckage und Öffnung ist durch einen Balken in negativer, der resultierende Mehrbedarf an Wärme in positiver Richtung für jeden Tortyp aufgetragen. Oberhalb des Balkendiagramms steht die prozentuale und absolute Reduzierung des Mehrbedarfs an Wärme gegenüber dem ursprünglichen Szenario.

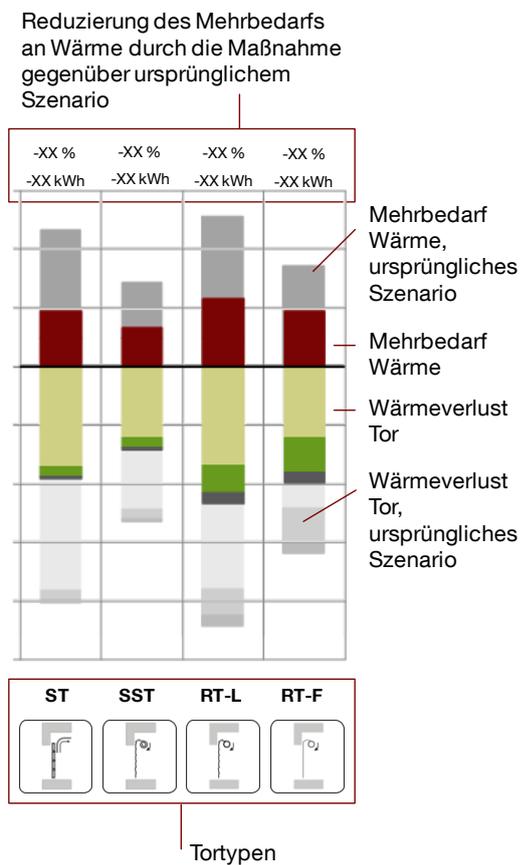
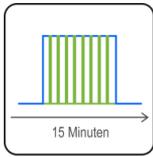


Abbildung 60: Erläuterung der Energieeinspar-Grafik

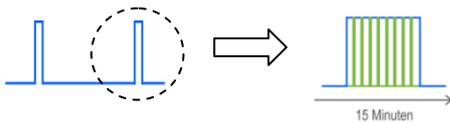
8.3 Verringerung längerer Offenstehzeiten durch schnell laufende Tore



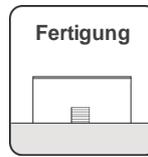
In dem folgenden Kapitel wird der Einfluss einer verringerten Offenstehzeit durch den Einsatz von schnell laufenden Toren im Szenario *LKW Be-/ Entladung* für die Gebäudemodelle *Fertigung* und *Werkstatt* sowie für das Szenario *LKW Be-/ Entladung* mit Stoßzeit morgens / abends für das Gebäudemodell *Lager* untersucht. Basis sind die Szenarien aus den Kapiteln 7.4.2 (Gebäudemodell *Fertigung*), 7.5.4 (Gebäudemodell *Werkstatt*) und 7.6.2 (Gebäudemodell *Lager*).

Die bisher angesetzte Offenstehzeit je Toröffnung beträgt bis jeweils 15 min.

Für die Untersuchung wird angenommen, dass der Be- und Entladungsvorgang kontinuierlich, z.B. mittels Staplern oder Hubwagen erfolgt und 2 Toröffnungen pro Minute für den reibungslosen Ablauf der Be- und Entladung erforderlich sind. Die Offenhaltezeit beträgt je Toröffnung 15 s. In Summe ergeben sich somit 30 Öffnungen in der bisher durchgängigen Offenhaltezeit von 15 min. Da eine solch hohe Öffnungsfrequenz nur sinnvoll mit schnell laufenden Toren durchgeführt werden kann, werden lediglich die beiden Tore SST und RT-F für diese Untersuchung herangezogen.



8.3.1 Gebäudemodell *Fertigung*



In Abbildung 61 ist die Reduzierung des Mehrbedarfs an Wärme durch ein häufiges Öffnen und Schließen des Tores für das Szenario *LKW Be-/ Entladung* des Gebäudemodells *Fertigung* dargestellt.

Wie in Abbildung 61 ersichtlich, lässt sich der öffnungsbedingte Lüftungswärmeverlust bzw. der resultierende Mehrbedarf an Wärme durch ein häufiges Öffnen und Schließen des Tores und damit durch die Verkürzung der permanenten Offenstehzeit deutlich reduzieren. Der Mehrbedarf an Wärme kann um 28 % (SST) bzw. 19 % (RT-F) und jeweils rund 1.600 kWh/a im Vergleich zu einem permanenten Offenstehen des Tores verringert werden.

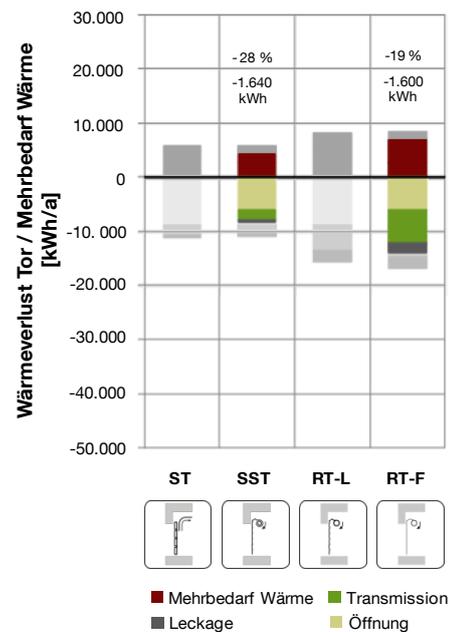


Abbildung 61: Reduzierung des Mehrbedarfs an Wärme durch häufiges Öffnen und Schließen des Tores für das Szenario *LKW Be-/ Entladung* im Gebäudemodell *Fertigung*

8.3.2 Gebäudemodell Werkstatt



Abbildung 62 zeigt die Reduzierung des Mehrbedarfs an Wärme durch die Maßnahme im Gebäudemodell *Werkstatt*.

Im Vergleich zum vorangegangenen Gebäudemodell *Fertigung* ist die Verringerung des Wärmeverlusts bzw. des resultierenden Mehrbedarfs an Wärme deutlich geringer. Die Einsparung beträgt beim SST 10 % bzw. rund 230 kWh/a, beim RT-F 8 % bzw. rund 220 kWh/a. Wie im Kapitel 6.2 bereits erläutert, verläuft der Wärmeverlust regressiv zur Öffnungsdauer, d.h. zu Beginn der Toröffnung ist der Wärmeverlust höher als zum Zeitpunkt der Torschließung. Bei einem permanenten Offenstehen des Tores von 15 min (ursprüngliches Szenario) fällt die Raumtemperatur deutlich stärker als durch die Maßnahme der angenommenen mehrfachen kurzzeitigen Toröffnungen. Hier verkürzt sich zwar – in Summe – die Offenstehzeit, jedoch sind der Luftaustausch und der damit verbundene Lüftungswärmeverlust während den Zeitpunkten des Offenstehens aufgrund der höheren Raumtemperaturen größer als beim permanenten Offenstehen des Tores im ursprünglichen Szenario. Aus raumklimatischer Sicht kann jedoch durch ein häufiges Öffnen und Schließen der schon an mehreren Stellen diskutierte starke Raumtemperaturabfall verringert werden, weshalb die Maßnahme zu einer Behaglichkeitssteigerung beiträgt.

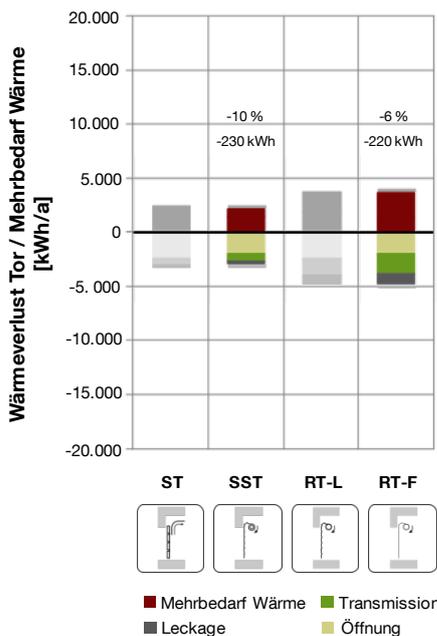
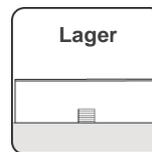


Abbildung 62: Reduzierung des Mehrbedarfs an Wärme durch häufiges Öffnen und Schließen des Tores für das Szenario *LKW Be-/ Entladung* im Gebäudemodell *Werkstatt*

8.3.3 Gebäudemodell Lager



Vorbemerkung: da die Auswertung dieser Maßnahme bei zugrundegelegtem 1-Schicht- bzw. 2-Schichtbetrieb tendenziell gleiche Aussagen liefert, werden die Ergebnisse aus der Simulation des 2-Schichtbetriebs lediglich im Text in Klammern angegeben.

In Abbildung 63 ist die Reduzierung des Mehrbedarfs an Wärme durch ein häufiges Öffnen und Schließen des Tores für das Szenario *LKW Be-/ Entladung* des Gebäudemodells *Lager* bei einem 1-Schichtbetrieb dargestellt. Verglichen mit den Ergebnissen aus den beiden vorangegangenen Gebäudemodellen ergeben sich durch das häufige Öffnen und Schließen der schnell laufenden Tore SST und RT-F die höchsten Einsparungen in Bezug auf den Mehrbedarf an Wärme, da sich der Einsparungseffekt aufgrund der höheren Anzahl an Toröffnungen (6 Öffnungsvorgänge beim 1-Schichtbetrieb, 12 Öffnungsvorgänge beim 2-Schichtbetrieb) als in den beiden anderen Gebäudemodellen (2 Öffnungsvorgänge) ebenfalls erhöht. Der Mehrbedarf an Wärme kann beim SST um 30 % bzw. rund 4.300 kWh/a (30 %, ~9.100 kWh/a) sowie beim RT-F um 27 % bzw. rund 4.700 kWh/a (25 %, ~8.900 kWh/a) gesenkt werden.

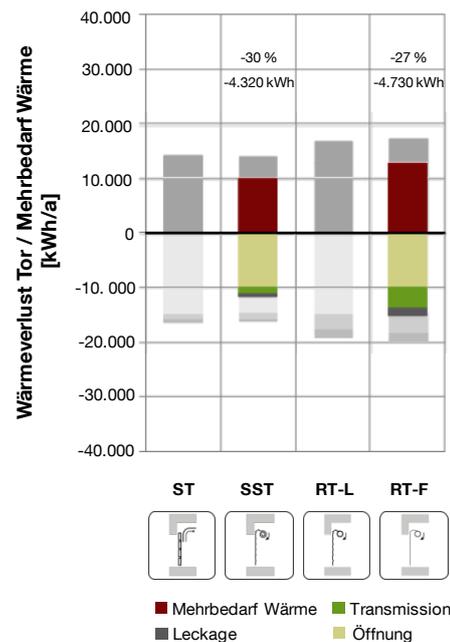
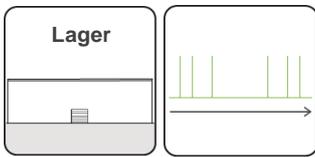


Abbildung 63: Reduzierung des Mehrbedarfs an Wärme durch häufiges Öffnen und Schließen des Tores für das Szenario *LKW Be-/ Entladung* im Gebäudemodell *Lager* bei einem 1-Schichtbetrieb

8.4 Verringerung längerer Offenstehzeiten durch LKW Be-/ Entladung im Gebäude



Vorbemerkung: da die Auswertung dieser Maßnahme bei zugrundegelegtem 1-Schicht- bzw. 2-Schichtbetrieb tendenziell gleiche Aussagen liefert, werden die Ergebnisse aus der Simulation des 2-Schichtbetriebs lediglich im Text in Klammern angegeben.

Nach Erkenntnissen aus dem laufenden Forschungsvorhaben „Das CO₂-neutrale Logistikzentrum - Entwicklung von ganzheitlichen Handlungsempfehlungen für energieeffiziente Logistikzentren“ kann eine LKW Be-/ Entladung auch innerhalb des Gebäudes erfolgen. Dies führt zu einer deutlichen Reduzierung der Toröffnungsdauer, da das Tor lediglich bei der Ein- und Ausfahrt des LKW geöffnet wird. Hierzu muss angemerkt werden, dass diese Maßnahme zur Effizienzsteigerung nicht torbedingt, sondern baulich bedingt ist.

Für die Untersuchung wird das Szenario *LKW Be-/ Entladung* mit Stoßzeiten morgens / abends aus Kapitel 7.6.2 angesetzt. Die Offenstehzeit je Toröffnung beträgt in diesem Szenario jeweils 15 min. Im Folgenden wird für die Offenstehzeit je Toröffnung bei Ein- bzw. Ausfahrt des LKW jeweils 30 s angenommen.

In Abbildung 64 ist die Reduzierung des Mehrbedarfs an Wärme bzw. der Wärmeverlust des Tores durch ein häufiges Öffnen und Schließen des Tores für das Szenario *LKW Be-/ Entladung* des Gebäudemodells *Lager* bei einem 1-Schichtbetrieb dargestellt.

Durch die Reduktion der Offenhaltezeit von bisher 15 min auf zwei kurze Öffnungen zur LKW-Ein- bzw. Ausfahrt lässt sich der Mehrbedarf an Wärme signifikant verringern. Je nach Tortyp beträgt die Einsparung zwischen 72 % und 89 % (75 % bis 87 %) bzw. bei allen Tortypen rund 12.500 kWh/a (~26.000 kWh/a). Damit stellt diese Maßnahme ein höheres Energieeinsparpotential als der Einsatz von schnell laufenden Toren aus dem vorangegangenen Kapitel dar.

Jedoch muss an dieser Stelle angemerkt werden, dass bei einer LKW Be-/ und Entladung im Gebäude ein hoher zusätzlicher Platzbedarf besteht. Desweiteren kann sich die Raumluftqualität durch die Einbringung von Schad-

stoffen, wie Abgase der LKW, erheblich verschlechtern. Auch stellt der einfahrende LKW zu Zeiten geringer Außentemperaturen eine zusätzliche Kältequelle im Gebäude dar, welche innerhalb des Simulationsmodells nicht berücksichtigt wird. Die oben genannten Einsparungen können demzufolge in Abhängigkeit der Temperatur des LKW und des geförderten Ladeguts geringer ausfallen.

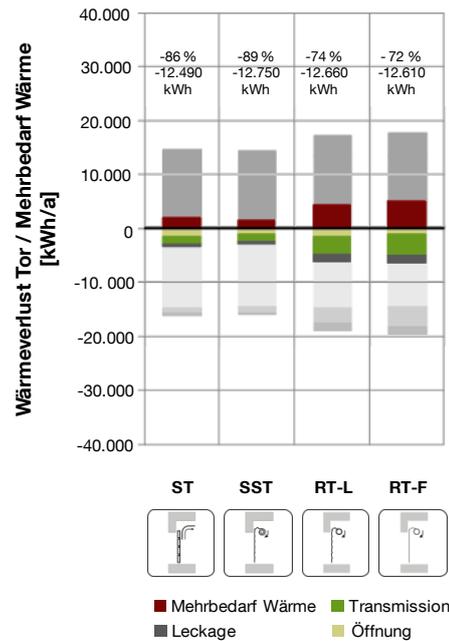


Abbildung 64: Reduzierung des Mehrbedarfs an Wärme durch LKW Be-/ Entladung im Gebäude für das Szenario *LKW Be-/ Entladung* im Gebäudemodell *Lager* bei einem 1-Schichtbetrieb

8.5 Verringerung der Lüftungswärmeverluste durch objektgrößenangepasste Toröffnung



In diesem Kapitel wird die Verringerung des Lüftungswärmeverlusts durch eine objektgrößenangepasste Toröffnung untersucht. Mittels sensorischer Systeme wie Laser-Scanner kann das Objekt (z.B. Person, KFZ, Stapler) in dessen Höhe erfasst und das Tor entsprechend auf die erforderliche Höhe geöffnet werden, siehe Kapitel 3.3.

Als geeignetes Beispielszenario wird das Szenario *regelmäßiger Staplerverkehr* aus den Gebäudemodellen *Fertigung* (Kapitel 7.4.3), *Werkstatt* (Kapitel 7.5.3) und *Lager* (Kapitel 7.6.3) herangezogen. Das Szenario beschreibt ein häufiges Öffnen und Schließen des Tores bei kurzen Offenhaltezeiten. Die Öffnungscharakteristik des Szenarios ist der Übersicht halber nochmals in Tabelle 16 dargestellt.

Bei einem marktüblichen Stapler beträgt die Fahrzeughöhe ca. 2,2 m. Unter Berücksichtigung eines zusätzlichen Sicherheitspuffers wird für die Simulation eine Öffnungshöhe von 2,5 m angenommen. Neben der verminderten Öffnungshöhe von 1,5 m verringert sich ebenfalls die Öffnungs- und Schließdauer des jeweiligen Tores, da das Tor nicht auf die vollständige Öffnungshöhe bewegt werden muss.

Tabelle 16: Randbedingungen des Szenarios *regelmäßiger Staplerverkehr* bei reduzierter Öffnungshöhe

Öffnungscharakteristik	häufige Toröffnungen durch Staplerverkehr
Öffnungszeiten	regelmäßig von 7:00 bis 16:00, 30 Öffnungen pro Stunde
Offenstehdauer/ Öffnung	15 s
Öffnungen/ Tag	270
Öffnungshöhe	2,5 m (Torhöhe: 4 m)

8.5.1 Gebäudemodell *Fertigung*



In Abbildung 65 sind die Reduzierung des Mehrbedarfs an Wärme und der Wärmeverlust des Tores durch eine objektgrößenangepasste Toröffnung für das Szenario *regelmäßiger Staplerverkehr* des Gebäudemodells *Fertigung* dargestellt.

Durch die reduzierte Öffnungshöhe auf 2,5 m kann der Luftwechsel und der damit verbundene Lüftungswärmeverlust signifikant verringert werden. Bei den langsam laufenden Toren Sektionaltor (ST) und Lamellen-Rolltor (RT-L) ist die Einsparung höher (ST: 59 % bzw. rund 13.700 kWh/a, RT-L: 54 % bzw. rund 13.800 kWh/a), da die Öffnungs- und Schließdauer durch die geringere Öffnungshöhe ebenfalls reduziert wird.

Bei den schnell laufenden Toren Schnelllaufspiralator (SST) und Folien-Rolltor (RT-F) reduziert sich der Mehrbedarf an Wärme um 52 % bzw. rund 7.300 kWh/a (SST) und um 44 % bzw. rund 7.400 kWh/a (RT-F).

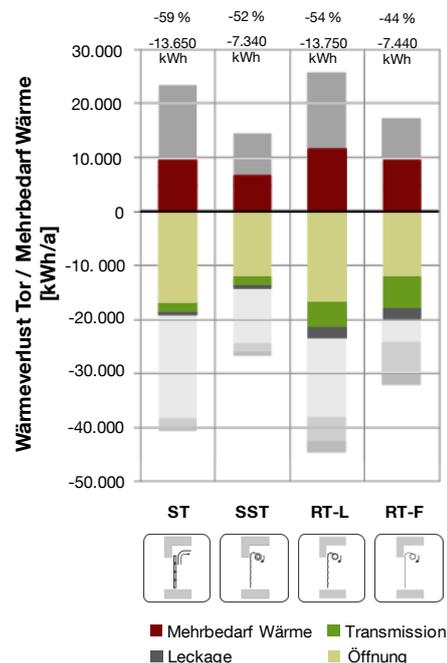


Abbildung 65: Reduzierung des Mehrbedarfs an Wärme durch eine objektgrößenangepasste Toröffnung für das Szenario *regelmäßiger Staplerverkehr* im Gebäudemodell *Fertigung*

8.5.2 Gebäudemodell Werkstatt



In Abbildung 66 ist die Reduzierung für das Szenario *regelmäßiger Staplerverkehr* im Gebäudemodell *Werkstatt* dargestellt.

Es zeigt sich, dass der Einsatz einer objektgrößenangepassten Toröffnung den Lüftungswärmeverlust in diesem Gebäudemodell ebenfalls deutlich reduzieren kann. Die Einsparungen an Wärme fallen aufgrund des bereits mehrfach erläuterten regressiven Zusammenhangs zwischen Wärmeverlust und Öffnungsdauer sowie der niedrigeren Raum-Solltemperatur geringer aus als im vorangegangenen Gebäudemodell *Fertigung*. Dennoch kann der Mehrbedarf an Wärme je nach Tortyp zwischen 39 % bzw. 4.800 kWh/a (RT-F) und 45 % bzw. 6.600 kWh/a (ST) gesenkt werden.

Aus raumklimatischer Sicht kann durch die reduzierte Öffnungsfläche der für das Gebäudemodell charakteristische hohe Temperaturabfall verringert werden und bewirkt damit eine Behaglichkeitssteigerung.

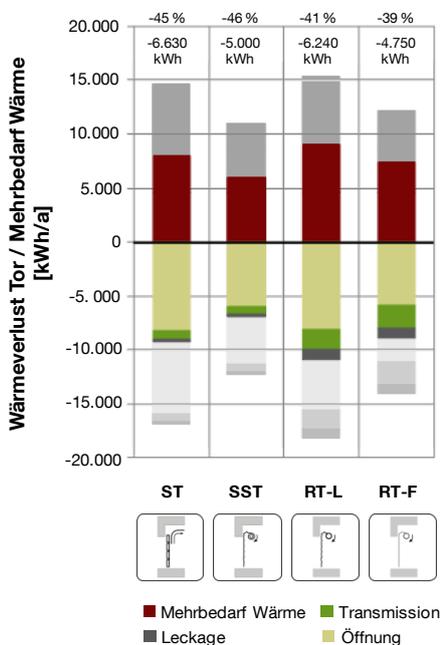
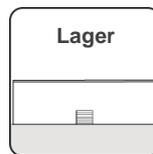


Abbildung 66: Reduzierung des Mehrbedarfs an Wärme durch eine objektgrößenangepasste Toröffnung für das Szenario *regelmäßiger Staplerverkehr* im Gebäudemodell *Werkstatt*

8.5.3 Gebäudemodell Lager



Vorbemerkung: da die Auswertung dieser Maßnahme bei zugrundegelegtem 1-Schicht- bzw. 2-Schichtbetrieb prozentual gleiche Ergebnisse liefert, werden an dieser Stelle die Ergebnisse der Simulation des 1-Schichtbetriebs aufgezeigt.

Abbildung 67 zeigt die Reduzierung des Mehrbedarfs an Wärme durch die Maßnahme im Gebäudemodell *Lager* bei einem 1-Schichtbetrieb.

Vergleicht man den durch die objektgrößenangepasste Toröffnung reduzierten Mehrbedarf an Wärme des jeweiligen Tortyps mit den entsprechenden Werten aus dem Gebäudemodell *Fertigung*, zeigt sich prozentual wie absolut ein ähnlich hohes Einsparpotential. Generell gilt auch hier, dass bei den beiden langsam laufenden Toren ST und RT-L aufgrund der verkürzten Öffnungs- und Schließdauer durch die geringere Öffnungshöhe der Mehrbedarf an Wärme deutlich mehr reduziert werden kann.

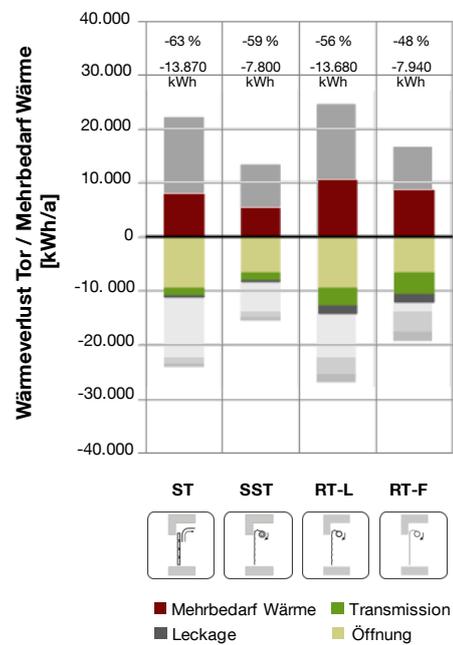
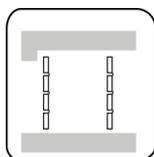


Abbildung 67: Reduzierung des Mehrbedarfs an Wärme durch eine objektgrößenangepasste Toröffnung für das Szenario *regelmäßiger Staplerverkehr* im Gebäudemodell *Lager* bei 1-Schichtbetrieb

8.6 Verringerung der Lüftungswärmeverluste durch Schleusen



In dem folgenden Kapitel wird eine Verringerung der Lüftungswärmeverluste durch den Einsatz einer Schleuse in den Szenarien *LKW Be-/ Entladung* und *regelmäßiger Staplerverkehr* für die Gebäudemodelle *Fertigung* und *Lager* behandelt. Für das Gebäudemodell *Werkstatt* wird die Maßnahme aufgrund der zu geringen Gebäudeabmessungen nicht untersucht. Für die Betrachtung wird ein zweites Tor in das jeweilige Gebäudemodell eingefügt, welches eine Schleusenfunktion ermöglicht. Die ursprünglich definierte „Torzone“ (siehe Kapitel 5.2 und 5.4) wird um drei Innenwände aus 10 cm dickem Mauerwerk (U-Wert $2,9 \text{ W/m}^2\text{K}$) ergänzt, um einen $8 \cdot 8 \text{ m}^2$ großen Zwischenraum zu erzeugen. Diese „Schleusenzone“ wird nicht konditioniert. Es findet jedoch ein Luftaustausch nach außen bei geöffnetem außenliegendem Tor bzw. nach innen bei geöffnetem innenliegendem Tor statt.

Hinter der Schleusenzone wird eine weitere „Torzone“ eingefügt, um die Temperaturen hinter der Schleuse erfassen zu können, siehe Abbildung 68. Als außenliegendes Tor werden in den Simulationen jeweils die in Kapitel 7.1 definierten realen Tore untersucht. Für das innenliegende Tor wird ein Folien-Rolltor (RT-F) mit der typischen hohen Öffnungs- und Schließgeschwindigkeit angesetzt.

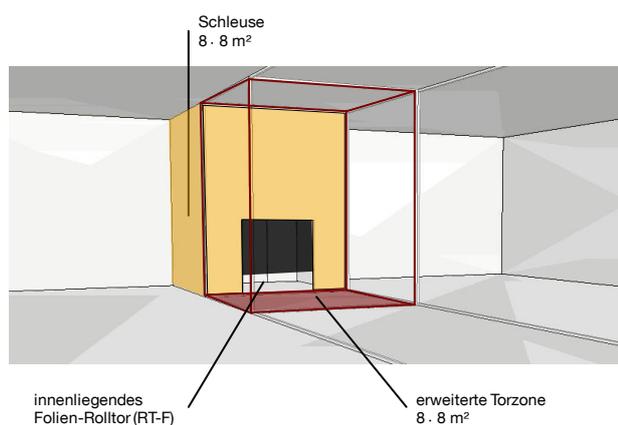


Abbildung 68: Innenansicht des Gebäudemodells *Fertigung* in [IDA ICE 2012] mit Darstellung der Schleuse und der erweiterten „Torzone“

Für das Szenario *LKW Be-/ Entladung* wird die Schleuse als Entlade- bzw. Beladezone genutzt. Die Randbedingungen des Szenarios sind in den Kapiteln 7.4 (Gebäu-

demodell *Fertigung*) und 7.6 (Gebäudemodell *Lager*) beschrieben.

Im Folgenden wird für den morgendlichen LKW-Entladungsvorgang zunächst eine Öffnung des außenliegenden Tores für 15 min angesetzt. Nach Schließung des Außentores wird das Innentor für 15 min geöffnet. Die Schleuse stellt somit eine Pufferzone dar. Bei der abendlichen LKW-Beladung erfolgt zunächst eine 15-minütige Öffnung des Innentores. Anschließend wird das Außentor geöffnet, siehe Abbildung 69.

Während der restlichen Nutzungszeit sind beide Tore geschlossen.

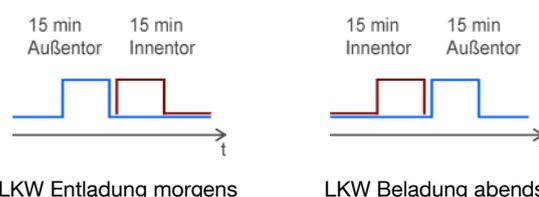


Abbildung 69: Schleusenfunktion bei einer morgendlichen LKW Entladung (links) und einer abendlichen LKW Beladung (rechts)

Beim Szenario *regelmäßiger Staplerverkehr* wird die Schleuse als „Durchfahrtszone“ für den Staplerverkehr genutzt. Auch hier gilt, dass das innenliegende und das außenliegende Tor nicht gleichzeitig geöffnet werden. Ein Luftaustausch findet entweder nach außen durch das außenliegende Tor oder nach innen durch das innenliegende Tor statt.

Die Randbedingungen zu diesem Szenario sind ebenfalls in den Kapiteln 7.4 und 7.6 erläutert.

Für die hier untersuchte Schleusenfunktion wird angenommen, dass der durchgängige Staplerverkehr abwechselnd von innen nach außen bzw. von außen nach innen erfolgt. Die Offenstehdauer beträgt für das Außen- und Innentor jeweils 15 s, wobei die Tore je nach Verkehrsfluss des Staplers hintereinander geöffnet werden, siehe Abbildung 70.

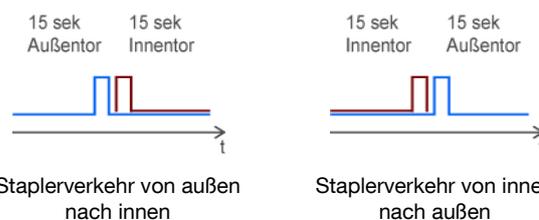


Abbildung 70: Schleusenfunktion bei einem regelmäßigen, abwechselnden Staplerverkehr von außen nach innen bzw. innen nach außen

8.6.1 Gebäudemodell *Fertigung*



In Abbildung 71 ist die Reduzierung des Mehrbedarfs an Wärme durch die zusätzliche Schleusenzone für das Szenario *LKW Be-/ Entladung* des Gebäudemodells *Fertigung* dargestellt.

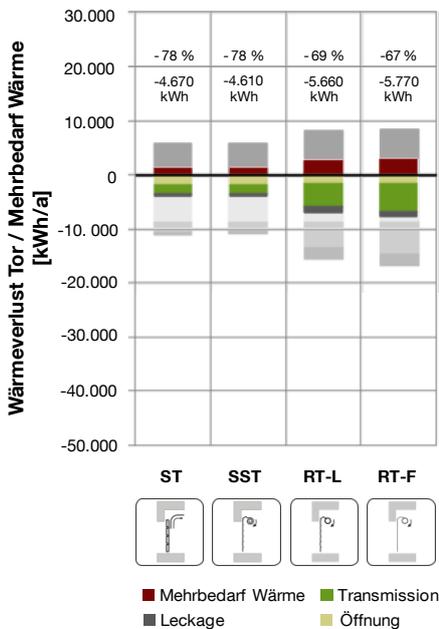


Abbildung 71: Reduzierung des Mehrbedarfs an Wärme durch den Einsatz einer Schleuse für das Szenario *LKW Be-/ Entladung* im Gebäudemodell *Fertigung*

Es zeigt sich, dass der Mehrbedarf an Wärme durch den Einsatz der Schleuse als Pufferzone signifikant reduziert

wird. Grund hierfür ist die thermische Trennung von der Außenluft und der beheizten Hallenluft, wodurch der Lüftungswärmeverlust verringert wird. Das austauschbare Luftvolumen beschränkt sich somit auf das Raumvolumen der Schleusenzone. Die Einsparung an Wärme liegt – in Abhängigkeit des Tortyps – zwischen 67 % bzw. rund 5.800 kWh/a (RT-F) und 78 % bzw. rund 4.600 kWh/a (ST bzw. SST), in Bezug zum ursprünglichen Szenario ohne Schleuse. Hier zeigt sich zudem, dass bei den Toren ST und SST die Einsparung aufgrund der höheren Dämm- und Dichtheitseigenschaften prozentual höher ist.

Neben den energetischen Auswirkungen kann durch den Einsatz der Schleuse die Behaglichkeit im Gebäude erhöht werden. In Abbildung 72 ist exemplarisch für den Zeitraum eines simulierten LKW-Entladevorgangs und der damit verbundenen 15-minütigen Toröffnung die Raumtemperatur in der „Torzone“ im ursprünglichen Szenario ohne Schleuse dargestellt. Ersichtlich wird, dass die Raum-Solltemperatur von 20 °C um ca. 2 K während der Offenstehzeit unterschritten wird. Durch den Einsatz einer Schleuse kann der Raumtemperaturabfall in der „erweiterten Torzone“ deutlich reduziert werden, siehe Abbildung 73. Durch das begrenzte Raumvolumen der Schleusenzone fällt die nicht konditionierte Raumluft von anfänglich rund 10 °C bei Öffnung des Außentores zunächst um ca. 8 K. Nach Schließung und Öffnung des Innentores findet ein Luftaustausch mit der warmen Hallenluft statt, sodass die Raumtemperatur auf ca. 16 °C ansteigt.

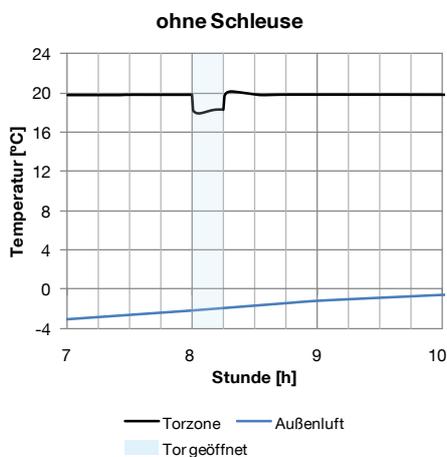


Abbildung 72: Außenlufttemperatur (blaue Linie) sowie Lufttemperatur auf 1,4 m Höhe (schwarze Linie) in der Torzone im Gebäudemodell *Fertigung* ohne Schleuse für den Simulationszeitraum 23.01. 7:00 – 10:00 Uhr, Szenario *LKW Be-/ Entladung*

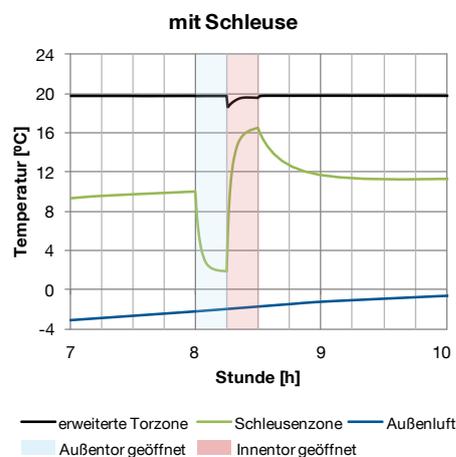


Abbildung 73: Außenlufttemperatur (blaue Linie), Lufttemperatur auf 1,4 m Höhe (schwarze Linie) in der erweiterten Torzone sowie Lufttemperatur auf 1,4 m Höhe (grün) in der Schleusenzone im Gebäudemodell *Fertigung* mit Schleuse für den Simulationszeitraum 23.01. 7:00 – 10:00 Uhr, Szenario *LKW Be-/ Entladung*

In Abbildung 74 ist die Reduzierung des Mehrbedarfs an Wärme durch den Einsatz einer Schleuse für das Szenario *regelmäßiger Staplerverkehr* des Gebäudemodells *Fertigung* dargestellt.

Auch durch die Funktion der Schleuse als „Durchfahrtszone“ kann der Mehrbedarf an Wärme deutlich reduziert werden. So beträgt die Einsparung an Wärme in Bezug auf das ursprüngliche Szenario ohne Schleuse – in Abhängigkeit des Torstyps – ca. 60 % bei den schnell laufenden Toren SST und RT-F, bei den langsam laufenden Toren ST und RT-L sogar rund 70 %. Es zeigt sich, dass diese Reduzierung insbesondere durch die Verringerung des Lüftungswärmeverlusts erreicht wird. Dabei gilt: je langsamer die Öffnungs- und Schließgeschwindigkeit, desto höher ist die mögliche prozentuale Einsparung an Wärme aufgrund des begrenzt austauschbaren Raumluftvolumens der Schleusenzone.

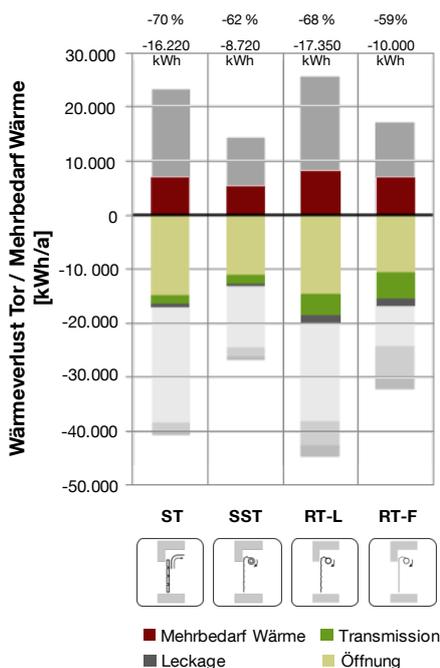


Abbildung 74: Reduzierung des Mehrbedarfs an Wärme durch den Einsatz einer Schleuse für das Szenario *regelmäßiger Staplerverkehr* im Gebäudemodell *Fertigung*

Bei einem Vergleich dieses Szenarios mit dem zuvor beschriebenen Szenario *LKW Be-/ Entladung* fällt die prozentuale Einsparung an Wärme tendenziell geringer aus. Hier zeigt sich, wie schon an mehreren Stellen in der Studie beschrieben (siehe z.B. Kapitel 4.2), der Effekt eines begrenzten Raumvolumens auf den Lüftungswärmeverlust. Die Raumlufttemperatur fällt bei Öffnung des Außentores zunächst stark ab und nähert sich mit einem regressiven Verlauf der Außentemperatur an, siehe Abbildung 73. Da die Offenstehzeit bei einer Toröffnung im Szenario *LKW Be-/ Entladung* deutlich länger als im Szenario *regelmäßiger Staplerverkehr* ist, fällt die Raumlufttemperatur wesentlich tiefer. Während der Offenstehzeit des Außentores besteht durch das geschlossene Innentor der Schleuse jedoch kein direkter Kontakt mit dem beheizten Hallenvolumen. Mit sinkender Raumlufttemperatur verringert sich analog der Lüftungswärmeverlust. Dieser Effekt wird durch das fehlende Heizsystem in der Schleusenzone zusätzlich verstärkt und erklärt den prozentual höheren Einsparungseffekt im Szenario *LKW Be-/ Entladung*.

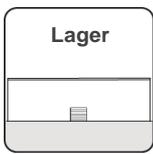
An dieser Stelle sei angemerkt, dass die Schleusenzone je nach Nutzungsart und der damit verbundenen Offenstehdauer der Tore hohen Temperaturschwankungen unterworfen ist, insbesondere zur kalten Jahreszeit. Durch den Einsatz einer Schleuse kann allerdings im übrigen Hallenbereich der thermische Komfort durch den reduzierten Raumtemperaturabfall sowie die minimierte Zuglufterscheinung bei offenstehendem Außentor deutlich gesteigert werden.

Jedoch kann der Betriebsablauf stark beeinträchtigt werden. So bewirkt beispielsweise die Schleusenfunktion beim Szenario *regelmäßiger Staplerverkehr* eine zusätzliche Wartezeit des Staplers in der Schleusenzone zur Vermeidung des gleichzeitigen Offenstehens beider Tore.

Für einen effektiven Nutzen muss deshalb der aus energetischer und raumklimatischer Sicht zweckmäßige Einsatz einer Schleuse mit den logistischen Abläufen abgestimmt sein. Dies erfordert eine geeignete Torsteuerung, welche durch sensorische Systeme (z.B. Laser-Scanner) optimiert werden kann.

Im folgenden Kapitel wird der Einsatz einer Schleuse für die Szenarien *LKW Be-/ Entladung* und *regelmäßiger Staplerverkehr* für das Gebäudemodell *Lager* beschrieben.

8.6.2 Gebäudemodell Lager



Vorbemerkung: da die Auswertung dieser Maßnahme bei zugrundegelegtem 1-Schicht- bzw. 2-Schichtbetrieb gleichartige Tendenzen und Schlussfolgerungen aufweist, werden an dieser Stelle die Ergebnisse der Simulation des 1-Schichtbetriebs aufgezeigt.

In Abbildung 75 sind die Simulationsergebnisse des Gebäudemodells Lager beim Einsatz einer Schleuse für das Szenario LKW Be-/ Entladung ausgewiesen. Analog zur Untersuchung im Gebäudemodell Fertigung weist die Nutzung einer Schleuse als Pufferzone ein sehr hohes Energieeinsparpotential auf. Die Reduzierung des Mehrbedarfs an Wärme ist auf die Verringerung des Lüftungswärmeverlusts zurückzuführen. Insbesondere bei den Toren ST und SST mit hohem Dämm- und Dichtheitseigenschaften kann der torbedingte Mehrbedarf an Wärme gegenüber dem ursprünglichen Szenario ohne Schleuse um fast 90 % bzw. über 12.000 kWh/a reduziert werden. Bei den beiden Rolltoren sind Einsparungen in Höhe von bis zu 80 % bzw. bis 13.900 kWh/a möglich.

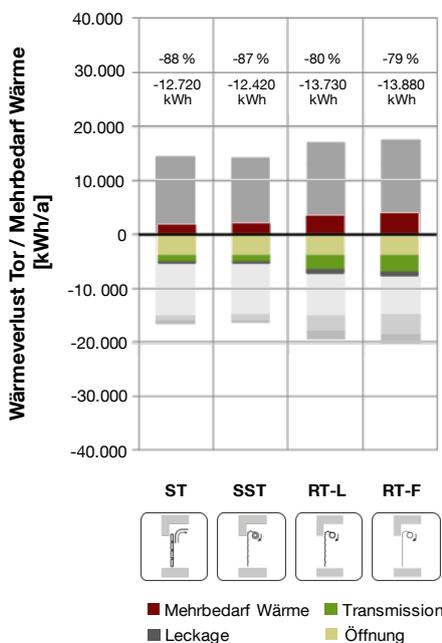


Abbildung 75: Reduzierung des Mehrbedarfs an Wärme durch den Einsatz einer Schleuse für das Szenario LKW Be-/ Entladung im Gebäudemodell Lager bei einem 1-Schichtbetrieb

Da im Gebäudemodell Lager außer der Abwärme der Beleuchtung keine zusätzlichen internen Lasten vorhanden sind, die zu einer Minderung des Wärmebedarfs des Gebäudes führen, weist der Einsatz einer Schleuse im Vergleich zum Gebäudemodell Fertigung höhere Einsparpotentiale auf.

In Abbildung 76 ist die Reduzierung des Mehrbedarfs an Wärme durch die zusätzliche Schleusenzone für das Szenario regelmäßiger Staplerverkehr des Gebäudemodells Lager dargestellt.

Ähnlich den Resultaten des gleichbenannten Szenarios im Gebäudemodell Fertigung sind die prozentualen Einsparungen im Vergleich zum Szenario LKW Be-/ Entladung aus den bereits genannten Gründen etwas geringer, jedoch stellt der Einsatz einer Schleuse für alle Tor-typen auch für diesen Anwendungsfall eine energetisch sinnhafte Maßnahme dar. Der Mehrbedarf an Wärme kann um bis zu 77 % reduziert werden.

An dieser Stelle sei angemerkt, dass durch diese bauliche Maßnahme höhere Investitionen (zusätzliches Tor, Innenwände etc.) entstehen sowie eine dafür vorgesehene Fläche vorgehalten werden muss. Eine Wirtschaftlichkeit aus energetischer Sicht muss somit individuell geprüft werden.

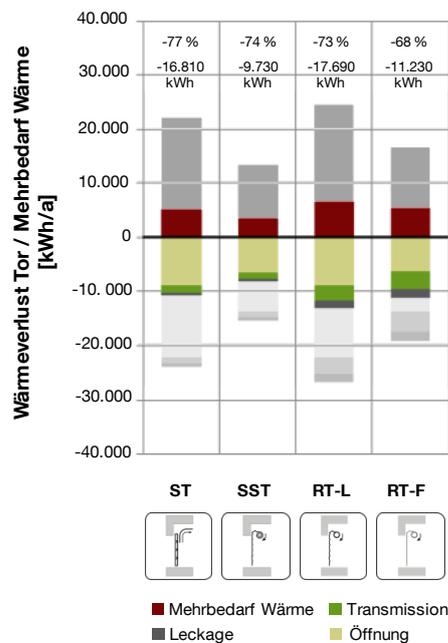
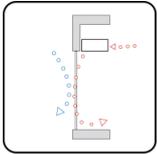


Abbildung 76: Reduzierung des Mehrbedarfs an Wärme durch den Einsatz einer Schleuse für das Szenario regelmäßiger Staplerverkehr im Gebäudemodell Lager bei einem 1-Schichtbetrieb

8.7 Erhöhung des thermischen Komforts durch Luftschleier-/ Luftwandanlagen



Wie in den vorangegangenen Kapiteln gezeigt, findet durch Toröffnungen ein Luftaustausch zwischen Innen und Außen statt, was zu Wärmeverlusten und zusätzlichem Heizbedarf führt.

„Durch geöffnete Eingänge tritt zudem auch eine beträchtliche Störung der thermischen Behaglichkeit auf. Zur Vermeidung solcher Beeinträchtigungen werden Luftschleieranlagen installiert, die eine Luftwalze zur Trennung des Außen- und Innenklimas erzeugt. Durch diese Luftwalze wird verhindert, dass warme Innenluft nach außen verloren geht (Energieverlust) und kalte Außenluft nach innen einströmt (Behaglichkeit). Werden Luftschleieranlagen lediglich mit Raumlufttemperatur betrieben, trennt ihr Luftstrahl die kalte Außen- von der warmen Innenluft, bzw. die warme Außen- von der kalten Innenluft (z.B. in Kühlhäusern). Die Wärme- bzw. Kälteabgabe an die Außenluft wird so gesenkt. Beheizte Luftschleieranlagen hingegen erwärmen den Luftvolumenstrom im Winter, wodurch zusätzlich zur Energieeinsparung auch die thermische Behaglichkeit aufrechterhalten wird“ [Ketteniß 2007, 1].

Zur Untersuchung von Luftschleieranlagen gibt es keine Normen oder Richtlinien. Daher wird hier lediglich auf Herstellerangaben verwiesen, die die Auslegung von Luftschleieranlagen meist nach Erfahrungswerten vornehmen [Ketteniß 2007].

Aufgabe einer Luftwand oder Luftschleieranlage ist es, den Luftaustausch durch ein geöffnetes Tor zu reduzieren, oder gar eine „vollständige thermische Abschirmung“ des Innenraumes von der Außenluft zu erreichen. Nach [Cousin et al. 2008] ist die vollständige thermische Abschirmung erreicht, „wenn die Temperatur der Luft, welche durch die Luftschleieranlage in den abzuschirmenden Innenraum gelangt, gleich der mittleren Lufttemperatur dieses Innenraumes ist. Das heißt, die Luftschleieranlage verhält sich gegenüber dem Innenraum thermisch neutral. Die zum Betrieb der Luftschleieranlage erforderliche Heizleistung und die elektrische Ventilationsleistung dienen ausschließlich der Verdrängung oder Aufwärmung von Außenluft. Die dafür benötigte thermische und elektrische Leistung, ist dann ein Maß für den standardisierten Leistungsbedarf des Luftschleiers.“

Torluftschleier können erheblich zur Einhaltung der Behaglichkeit beitragen. Vor allem Zugerscheinungen bei Arbeitsplätzen in Tornähe können damit vermindert werden. Dieser Nutzen lässt sich jedoch nicht in einem monetären Wert ausdrücken, sondern nur indirekt über gesteigerte Behaglichkeit und eine gesenkte Krankheitsquote der Mitarbeiter.

Eine Einsparung von Heizenergie, durch Reduzierung der Lüftungsverluste, ließe sich hingegen theoretisch direkt mit eingesparten Kosten darstellen. Wie jedoch bereits oben erwähnt wurde, gibt es keine Normbedingungen, mit denen eine Luftschleier- bzw. Luftwandanlage bilanziert werden kann.

Die Fachhochschule Köln [Cousin et al. 2008] verfolgt einen Ansatz, in dem die Heiz- und Ventilatorleistung von Luftschleieranlagen mit einer Bezugsleistung, also dem Wärmeverlust des geöffneten Tores, als „Energiewirkungsgrad“ in Relation gesetzt wird. Dieser Ansatz ist jedoch nicht allgemeingültig, sondern von vielen Randbedingungen wie beispielsweise Torgröße, Winddruck, oder Temperaturdifferenz abhängig.

Wie in Kapitel 8.7.1 gezeigt, existieren modell- und herstellerabhängig verschiedene Ansätze und Varianten, um ein Eindringen von Kaltluft zu verringern. Untersuchungen wie [Ketteniß 2007] und [Cousin et al. 2008], haben gezeigt, dass die „vollständige thermische Abschirmung“ jedoch nicht immer erreicht wird. Der Einfluss von Wind und stoßweisen Böen auf die Abschirmleistung einer Luftwand beziehungsweise eines Luftschleiers wurden nicht nachgewiesen. Teilweise wird auch ein erhitzter Luftvolumenstrom des Luftschleiers zur zusätzlichen Beheizung des Raumes verwendet. Je nach Temperatur und Volumenstrom der Luftwalze, die sich vor allem zwischen Luftwand und Luftschleier stark unterscheidet, haben die Anlagen einen deutlich unterschiedlichen Leistungsbedarf.

8.7.1 Übersicht gängiger Luftschleier-/ Luftwandanlagen

Die Installation von Luftwalzen zur Trennung von Innen- und Außenluft unterscheidet sich bauartabhängig in eine vertikale und horizontale Strahlrichtung. In dieser Studie werden Anlagen mit einem Luftauslass über dem Tor (vertikal) als Luftschleier bezeichnet, Anlagen bei denen die Luftwalze von der Seite (horizontal) eingebracht wird als Luftwand. Eine Übersicht der Eignung für die verschiedenen Tortypen ist in Abbildung 77 dargestellt.

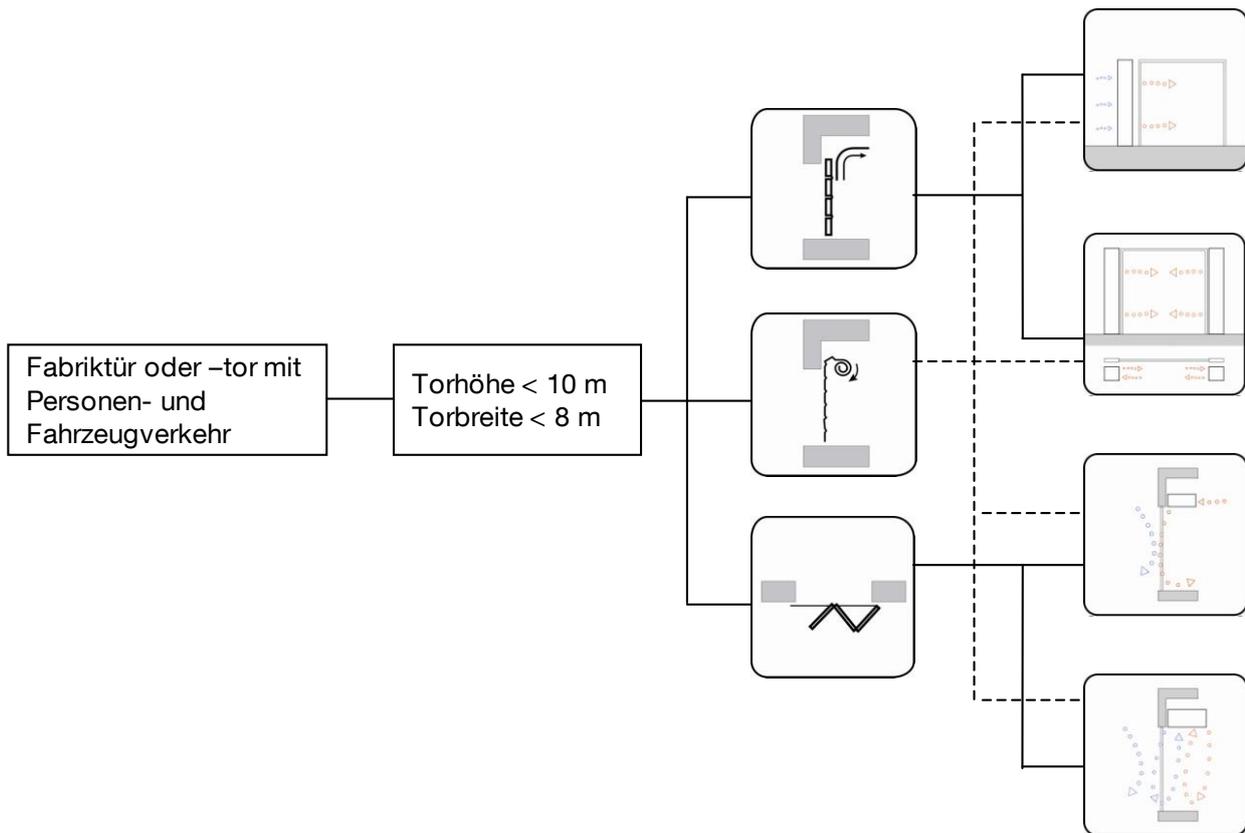


Abbildung 77: Übersicht von Luftschleiern und Luftwandanlagen für verschiedene Tortypen nach [Frico 2013]

Bei Sektionaltoren bieten sich bauartbedingt Luftwandanlagen an. Bei Schnellaufspiraltoren, Rolltoren und vertikal öffnenden Toren werden üblicherweise Luftschleieranlagen eingesetzt, da kein zusätzlicher Bauraum über dem Tor für das geöffnete Tor vorgesehen werden muss.

Torluftschleieranlagen können weiterhin in der Form ihres Luftauslasses unterschieden werden. Abbildung 78 zeigt einen Lamellenauslass und ein Düsensystem. Laut [Ketteniß 2007] kommen bei Luftschleiern meist Systeme mit Lamellenauslass zum Einsatz. Diese sind jedoch in ihrer maximalen Einbauhöhe begrenzt. Aufgrund der höheren Luftaustrittsgeschwindigkeit können Düsensysteme eine größere Torfläche abdecken. Hersteller von Düsensystemen werben damit, dass ihre Geräte bei einem vergleichbaren Abtrennungseffekt einen deutlich geringeren Energieverbrauch haben, da der Luftmassenstrom geringer ist. Bei Luftwänden werden ausschließlich horizontale Düsensysteme verbaut.

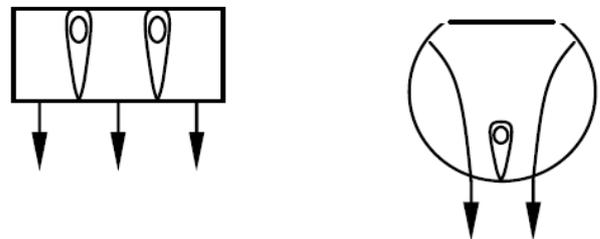


Abbildung 78: Vergleich der gängigen Luftauslasssysteme: Lamellen (links) und Düse (rechts) [Ketteniß 2007]

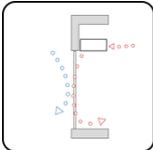
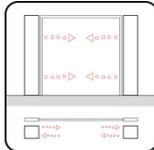
Bei vertikalen Luftschleiern sind verschiedene Ausführungen der Luftansaugung möglich. Im Zusammenspiel mit dem Luftauslass können sich Luftwalzen mit Drehrichtung in den Raum (Standard-Einbau), oder eine Abschirmwalze, bei der die Luftwand entgegen der einströmenden Wand wirkt, ausbilden. Bei der Ausführung als doppelte Abschirmwalze erzeugen zwei Gebläseeinheiten zwei gegeneinander rotierende Luftwalzen, die unterschiedlich temperiert sind. Die äußere, unbeheizte Luftwalze sichert eine stabile Abschirmung im Türbereich, Energieverluste können hierdurch verringert werden. Die innere, beheizte Abschirmwalze konditioniert zusätzlich die Luft, sodass die Außenluft im Eingangsbereich nicht als Zugluft empfunden wird [Recknagel 2007, 1461]. Des Weiteren sind Unterboden-Systeme möglich, bei denen die warme Luft aus Lufteinlässen im

Boden strömt. Diese Bauvariante wird bei Personenverkehr vermieden.

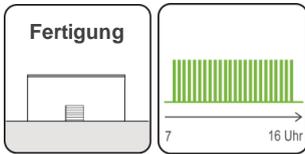
Bei der horizontalen Strahlrichtung kann ein einseitiges System installiert werden, das lediglich von einer Seite die Luft einbläst. Um eine höhere Abschirmleistung zu gewährleisten, wird bei einem tangentialen System die Luftwand von beiden Seiten erzeugt. Hier sind die gegenüberliegenden Düsen zueinander in einem Winkel angestellt, so dass beide Luftströme nicht frontal aufeinander blasen, sondern tangential aneinander vorbei. Die Unterscheidung in vertikale und horizontale Strahlrichtung ist in Tabelle 17 zusammengefasst.

In Kapitel 8.7.2 wird eine Luftwandanlage mit horizontalem Düsenauslass in einer vereinfachten Beispielrechnung auf deren Energieersparnis überprüft.

Tabelle 17: Vergleich von vertikalem Luftschleier und horizontaler Luftwand nach [Recknagel 2007, 1461]

	Vertikale Strahlrichtung (Luftschleier)	Horizontale Strahlrichtung (Luftwand)
		
Varianten	<ul style="list-style-type: none"> — Standard-Einbau — Abschirmwalzen-Einbau — Doppelte Abschirmwalze — Unterboden-Systeme 	<ul style="list-style-type: none"> — Einseitiges System — Tangentiales System
Randbedingungen	<ul style="list-style-type: none"> — thermische Druckdifferenz wird zum Teil aufgehoben — Abschirmleistung erhöht sich bei doppelter Abschirmwalze 	<ul style="list-style-type: none"> — thermische Druckdifferenz bleibt voll wirksam — Abschirmleistung erhöht sich bei tangentialem System
Kriterien für die Produktauswahl	Tortyp, Torgröße, thermischer Auftrieb, Winddruck und mechanischer Druck	

8.7.2 Beispielrechnung Energieersparnis Luftwandanlage



Im Folgenden wird ein Anwendungsfall untersucht, in dem der Einsatz der Luftwandanlage die hohen Lüftungswärme-

verluste für das Szenario *regelmäßiger Staplerverkehr* im Gebäudemodell *Fertigung* reduzieren soll, siehe Kapitel 7.4.3. Um ein möglichst großes Einsparpotential zu bieten, wird als Tortyp ein langsam schließendes Sektionaltor (ST) unterstellt. Bei diesem Szenario beträgt die Offenstehzeit des Tores etwa 3,5 h am Tag. Der jährliche Lüftungswärmeverlust beläuft sich auf 38.080 kWh/a, siehe Abbildung 41.

Für diesen Energieeffizienz-Vergleich werden Transmissions- und Leckageverluste des Tores nicht betrachtet, da die Luftwandanlage nicht im 24 h Dauerbetrieb läuft, sondern lediglich beim Impuls zum Öffnen des Tores in Betrieb genommen wird um die Lüftungswärmeverluste zu vermeiden. Für eine vereinfachte Betrachtung wird die Betriebszeit der Luftwandanlage mit der Offenstehzeit des Tores gleichgesetzt und beträgt demnach ebenfalls 3,5 h am Tag. Allerdings wird die Luftwand nur in der Heizperiode von November bis April, also an 129 Tagen betrieben. Damit resultiert eine Betriebszeit der Luftwand von etwa 450 h im Jahr. Der Lüftungswärmeverlust für den Zeitraum November bis April beläuft sich nach Auswertung der Simulationsdaten des Szenarios in Kapitel 7.4.3 für den gewählten Tortyp auf rund 25.300 kWh/a.

Bei einer Windbelastung von bis zu 1,5 m/s wird für eine Abschirmung der 16 m² großen Öffnung mittels Luftwand mit horizontalem Düsenauslass laut Herstellerangaben ein Volumenstrom von 13.000 m³/h benötigt. Die resultierende Ventilatorleistung wird mit 7,5 kW_{elektrisch} angegeben. Unter Zugrundelegung der jährlichen Betriebszeit resultiert die elektrische Energie zur Beschleunigung des Luftwand-Volumenstroms von 3.375 kWh_{elektrisch}.

In Industriehallen werden häufig Luftwandanlagen ohne Luftheizung eingesetzt [Recknagel 2007], weshalb für eine einfache Wirtschaftlichkeitsbetrachtung die oben gewählte Luftwandanlage ohne Luftheizung zugrunde gelegt wird. Bei einem Wärmepreis von 4 ct/kWh (siehe Kapitel 7.3) würde eine Vermeidung des Lüftungswärmeverlusts in Höhe von 25.330 kWh Heizkosten von etwa

1000 € im Jahr einsparen. Mit der Prämisse einer „vollständigen thermischen Abschirmung“ wäre eine Luftwandanlage in der Lage, diese Heizkosten zu vermeiden. Mit der Vereinfachung, dass diese vollständige Abschirmung auch ohne Erwärmung der Luftwand möglich ist, stehen den Wärmeverlusten lediglich Energiekosten für die Beschleunigung des Luftstroms durch einen Ventilator gegenüber. Bei einem Strompreis von 13 ct/kWh_{elektrisch} nach [BDEW 2012, 13] resultieren die oben berechneten 3.375 kWh_{elektrisch} zu Betriebskosten von 442 € im Jahr. Unter diesen Annahmen könnten demnach 570 € an Energiekosten gespart werden.

Die Berechnung ist in Tabelle 18 zusammengefasst. Das gewählte Luftwand-System, bestehend aus Ventilator, Heizregister, Luftkanal, Düsen etc. inklusive Montage, wird vom Hersteller mit einem Kaufpreis von etwa 13.700 € veranschlagt. Da das gewählte System als weitestgehend wartungsfrei bewertet wird, beträgt die Amortisationszeit in diesem Szenario unter den getroffenen Annahmen und Vereinfachungen knapp 24 Jahre.

Tabelle 18: Wirtschaftlichkeitsberechnung einer Luftwandanlage

Szenario <i>regelmäßiger Staplerverkehr</i> (Kapitel 7.4.3)		
Lüftungswärmeverlust November-April	25.330	kWh _{thermisch}
Energiekosten	1.013	€/a
Luftwandanlage		
Betriebsdauer	450	h
Ventilatorleistung	7,50	kW
elektrischer Energieverbrauch	3.375	kWh _{elektrisch}
Energiekosten	439	€/a
jährliche Ersparnis	574	€/a

8.8 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden unterschiedliche Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz bzw. des thermischen Komforts anhand verschiedener Szenarien aus Kapitel 7 behandelt. Folgende Ergebnisse können hierbei zusammengefasst werden:

- der durch längere, durchgehende Offenstehzeiten des Tores entstehende Wärme-Mehrbedarf (z.B. bei einer zweimaligen LKW Be-/ Entladung am Tag von jeweils 15 min/Öffnung) kann durch ein häufiges Öffnen und Schließen um bis zu 30 % reduziert werden. Eine solche Maßnahme kann aufgrund der hohen Zyklenzahl nur mit schnell laufenden Toren sinnvoll umgesetzt werden.
- unter der Annahme, dass eine LKW Be-/ und Entladung im Gebäude (hier: Gebäudemodell *Lager*) durchgeführt werden kann, lässt sich der Lüftungswärmeverlust bzw. der resultierende Mehrbedarf an Wärme in hohem Maße reduzieren. Die Einsparung liegt bei einem täglich mehrfachen Be-/ und Entladungsvorgang – je nach Tortyp – zwischen 72 % und 89 %, wobei der einfahrende LKW zu Zeiten geringer Außentemperaturen eine zusätzliche Kältequelle darstellen kann.
- mittels moderner sensorischer Systeme (z.B. Laser-Scanner) ist eine objektgrößenangepasste Toröffnung umsetzbar. Für das untersuchte Szenario *regelmäßiger Staplerverkehr* kann die Öffnungshöhe auf 2,5 m reduziert werden. Durch die verringerte Öffnungsfläche und dem deutlich reduzierten Luftaustausch sind signifikante Energieeinsparungen des torspezifisch resultierenden Wärmebedarfs von bis zu 63 % möglich.
- durch den Einsatz einer Schleuse lassen sich der Lüftungswärmeverlust und der resultierende Wärmebedarf deutlich reduzieren. Je nach Tortyp und Gebäudemodell sind Einsparungen an Wärme um bis zu 90 % möglich. Zudem kann die thermische Behaglichkeit im Gebäude erhöht werden. Für einen zweckmäßigen Einsatz muss eine Schleusenfunktion jedoch mit den logistischen Abläufen abgestimmt sein. Desweiteren entstehen für diese Maßnahme zusätzliche Baukosten.
- eine einheitliche Aussage über die Energieeinsparpotentiale von Luftschleibern kann nicht getroffen werden, da die Effizienz in hohem Maße von der Qualität der Luftabschirmung zwischen Innen und Außen abhängig ist. Eine mögliche Effizienzsteigerung ist für einzelne Anwendungsfälle separat zu ermitteln.
- Luftschleier- bzw. Luftwandanlagen ermöglichen eine deutliche Steigerung der Behaglichkeit; eine monetäre Bewertung ist jedoch nicht möglich.
- eine Luftschleier- bzw. Luftwandanlage bietet die Möglichkeit der Nachrüstung für ein bereits installiertes Torsystem bei einer Nutzungsänderung z.B. häufigem Öffnen oder lange Offenstehzeiten. Der Austausch eines langsamen Torsystems durch ein schnell laufendes Torsystem wäre mit einer höheren Investition von 8.000 - 16.000 € verbunden.

9. Fazit

Das Thema der Energieeffizienz gewinnt in den Sektoren Industrie und Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) zunehmend an Bedeutung. Neben der kontinuierlichen Weiterentwicklung und Optimierung von industriellen Prozessen werden zukünftig industriell und gewerblich genutzte Gebäude hinsichtlich ihres Energieverbrauchs einen bedeutenden Beitrag für die geplante Energiewende in Deutschland beitragen müssen. Der Fokus der Forschung hinsichtlich energieeffizienten und nachhaltigen Gebäuden lag jedoch bisher in den Bereichen des Wohnungs- und Verwaltungsbaus. Hier konnte der Energiebedarf so weit reduziert werden, dass ein „Null-Energie-Gebäudestandard“ möglich ist. Die Sektoren Industrie und GHD blieben jedoch bisher weitgehend unberücksichtigt.

Dabei beläuft sich in einer ersten Hochrechnung der Gesamtheizenergieverbrauch von Hallengebäuden auf rund 61 Mrd. kWh/a – dies entspricht ca. 30 % des Jahresendenergieverbrauchs an Raumwärme für Nichtwohngebäude. Das Einsparpotential bei energetischer Ertüchtigung wird dabei auf rund 35 Mrd. kWh/a beziffert [Oschatz et al. 2011, 42, 51]. Für den Neubau von Hallengebäuden sind durch die Novellierungen der Energieeinsparverordnung [EnEV 2009] insbesondere Forderungen an eine dichte Gebäudehülle und eine hohe Wärmedämmung zur Verringerung der Wärmeverluste zu nennen.

Gemeinsamer Bestandteil von Hallengebäuden sind Industrietore. Diese verhindern Luftströmungen durch Öffnungen in der Gebäudehülle, die für die Zulieferung und den Abtransport von Gütern erforderlich sind. Betrachtet man die auf dem Markt gängigen Torsysteme, gibt es hier große Unterschiede hinsichtlich Aufbau, Materialien und Dämmung, Öffnungs- und Schließgeschwindigkeiten und Steuerungstechniken. Gegenstand dieser Forschungsarbeit ist die Untersuchung von Torsystemen und den damit verbundenen energetischen, raumklimatischen und wirtschaftlichen Auswirkungen auf das Gebäude. Hierzu wurden mehrere unterschiedliche Gebäudetypen entwickelt, welche repräsentativ für eine große Anzahl der Hallengebäude in Deutschland stehen, siehe Kapitel 5.

Für die Volumenstromberechnung bei einem einseitig geöffneten Tor wurde ein Lüftungsmodell in die Simulati-

onssoftware implementiert, welches sowohl den thermisch bedingten als auch den windinduzierten Luftwechsel berücksichtigt. Um die Simulationsrechnungen aufgrund ihrer Komplexität überprüfen zu können, wurden in einer dem Lehrstuhl für Bauklimatik und Haustechnik angegliederten Halle Temperaturmessungen vorgenommen und mit einem dynamischen Gebäudesimulationsmodell abgeglichen, siehe Kapitel 4. Hierbei zeigte sich, dass die Simulation im Vergleich zur Messung gute Resultate liefert. Sowohl der Verlauf des Temperaturabfalls bei Öffnung des Tores als auch der sich einstellende Temperaturanstieg nach der Schließung des Tores durch warme Raumumschließungsflächen werden in der Simulation korrekt abgebildet.

In Kapitel 6 wurden anhand einer Parameterstudie die torspezifischen Einflussgrößen wie der U-Wert, die Luftdurchlässigkeit oder verschiedene Öffnungsdauern untersucht, um deren Einfluss auf die Energiebilanz des Gebäudes bestimmen zu können. Es stellte sich heraus, dass der öffnungsbedingte Lüftungswärmeverlust bereits bei einer 3-minütigen Öffnungsdauer pro Stunde während der Nutzungszeit den Wärmeverlust durch Transmission und Leckagen des Tores übersteigt. Bei gleichzeitigem Öffnen von gegenüberliegenden Toren kann sich der torbedingte Mehrbedarf an Wärme nochmals um mehr als 10 % im Vergleich zu einem hintereinander erfolgten Öffnen zweier Tore erhöhen.

Desweiteren wurde zur angenäherten Berechnung von Strömungsvorgängen ein Strömungsnetzwerk in die instationäre Gebäudesimulation eingekoppelt, wodurch erste Aussagen über eine Temperaturverteilung in den definierten Zonen getroffen werden können. Es zeigte sich, dass die Raumtemperatur bei geöffnetem Tor innerhalb der ersten Minuten, in Abhängigkeit des Außenklimas und des Gebäudetyps, schnell sinkt. Dies bedeutet, dass vor allem bei kurzen Toröffnungen Optimierungspotential bezüglich Behaglichkeit (Temperaturabfall, Zugerscheinungen) und Energieeinsparung durch eine geeignete Sensorik besteht, um Toröffnungen so kurz wie möglich zu halten.

Auch wurde nachgewiesen, dass der elektrische Energiebedarf für den Torbetrieb, bestehend aus Antrieb, Steuerung und Sensorik, gegenüber den Wärmeverlusten des Tores als geringfügig zu bewerten ist.

In Kapitel 7 wurden mehrere, an der Praxis orientierte Szenarien (z.B. *LKW Be-/ Entladung* oder *regelmäßiger Staplerverkehr*) als Basis für eine Toröffnungscharakteristik entwickelt und anschließend verschiedene Tortypen (Sektionaltor, Folien-Rolltor, Lamellen-Rolltor, Schnelllaufspiraltor) mit einem „idealen Tor“ verglichen. Hieraus konnten für unterschiedliche Anwendungsfälle Empfehlungen für geeignete Tortypen hinsichtlich Energieeffizienz und Wirtschaftlichkeit erarbeitet werden.

Grundsätzlich zeigte sich, dass bei geringen Öffnungszyklen aus energetischer Sicht eine hohe Dämmung und Dichtheit des geschlossenen Tores erforderlich sind. Diese können insbesondere bei einer hohen Torfläche zur Fassadenfläche zur Energieeinsparung des Gebäudes beitragen. Bei häufigen Öffnungszyklen ist vorrangig die Öffnungs- und Schließgeschwindigkeit des Tores relevant. Dämmung und Dichtheit des Tores haben einen untergeordneten Einfluss.

Als weitere Erkenntnis kann festgehalten werden, dass bei nahezu allen Szenarien und unabhängig des Tortyps der Lüftungswärmeverlust durch das offenstehende Tor höher ist als der Wärmeverlust durch das geschlossene Tor infolge Transmission und Leckage. In Abhängigkeit des jeweiligen Szenarios und des Gebäudemodells können zudem im Bereich des Tores unerwünschte Temperaturunterschreitungen von bis zu 30 % bzw. rund 720 h/a in der Nutzungszeit auftreten.

Zuletzt wurden in Kapitel 8 unterschiedliche Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz bzw. des thermischen Komforts untersucht. Hierbei konnte gezeigt werden, dass durch den Einsatz von schnell laufenden Toren und der Vermeidung von längeren, durchgehenden Offenstehzeiten der torbedingte Mehrbedarf an Wärme um bis zu 30 % reduziert werden kann. Auch kann durch eine objektgrößenangepasste Toröffnung mittels moderner sensorischer Systeme der Luftaustausch zwischen Innen und Außen deutlich verringert und der torbedingte Mehrbedarf an Wärme um bis zu 63 % reduziert werden. Durch den Einsatz einer Schleuse sind Einsparungen an Wärme in Abhängigkeit des Nutzungsszenarios von bis zu 90 % bei einhergehender Steigerung der Behaglichkeit möglich. Für einen zweckmäßigen Einsatz muss eine Schleusenfunktion jedoch mit den logistischen Abläufen abgestimmt sein. Desweiteren können hohe zusätzliche Baukosten anfallen.

Zur Steigerung der thermischen Behaglichkeit durch Vermeidung von Zugluft und zur Minimierung des Luftwechsels zwischen Innen und Außen können Luftschlei-

er- oder Luftwandanlagen eingesetzt werden. Eine abschließende Aussage über das Energieeinsparpotential solcher Systeme konnte im Rahmen dieser Studie nicht getroffen werden, da die Effizienz in hohem Maße von der Qualität der Luftabschirmung zwischen Innen und Außen abhängig ist.

Nach den gewonnenen Erkenntnissen stellt die Vermeidung bzw. Minimierung von öffnungsbedingten Lüftungswärmeverlusten das größte Potential zur Energieeinsparung von Toren in Gebäuden dar. Mittels moderner sensorischer Systeme können diese Einsparpotentiale mit einem geringfügigen Aufwand erschlossen werden.

Dabei ist festzuhalten, dass der Anteil des torspezifischen Wärmeverlustes am gesamten Wärmeverlust des Gebäudes durch die Ausführung von hochwärmegeämmten und dichten Gebäudehüllen in Zukunft tendenziell zunehmen wird.

Im Sinne des nachhaltigen und energieeffizienten Bauens ist es deshalb unerlässlich, Tore bereits frühzeitig in der Planung zu berücksichtigen. Ebenfalls muss je nach Anwendungsfall eine sinnhafte Kombination von Tortyp, Antrieb, Steuerung und Sensorik erfolgen.

Die Studie liefert hierbei eine erste Orientierungshilfe bei der Wahl eines geeigneten Torsystems für verschiedene Anwendungsfälle.

10. Quellenverzeichnis

- [ASR A1.7] Technische Regeln für Arbeitsstätten, Türen und Tore, August 2004
- [B+L 2010] B+L Marktdaten GmbH: Marktstudie Automatisierung von Industrietoren, Bonn, Juni 2010
- [BDEW 2012] Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.: BDEW-Strompreisanalyse Oktober 2012, Berlin, Oktober 2012,
<http://www.rwe.com/web/cms/mediablob/de/403780/data/403722/5/rwe/presse-news/specials/energiehandel/so-ensteht-der-strompreis/121026-BDEW-Strompreisanalyse-Oktober-2012-Update-26.10.2012.pdf>,
 abgerufen am 11. Februar 2013
- [BEA 2012-1] Bureau d'Electronique Appliquée (BEA): Die Induktionsschleife, <http://www.bea-industrial.be/de/technologies/induction-loop/>, abgerufen am 19. September 2012
- [BEA 2012-2] Bureau d'Electronique Appliquée (BEA): Die Radar Technologie, <http://www.bea-industrial.be/de/technologies/radar/>, abgerufen am 18. September 2012
- [BEA 2012-3] Bureau d'Electronique Appliquée (BEA): Die Laser Technologie, <http://www.bea-industrial.be/de/technologies/laser/>, abgerufen am 19. September 2012
- [Cousin et al. 2008] Cousin, R., Henne, A., Ketteniß, M.: Effizienzkriterien für Luftschleieranlagen – vergleichende Untersuchungen in einem Prüfraum und CFD-Simulationen, Fachhochschule Köln, 2008
- [DIN EN 12426] DIN EN 12426: Tore, Luftdurchlässigkeit, Juli 2000
- [DIN EN 12428] DIN EN 12428: Tore, Wärmedurchgangskoeffizient, Januar 2012
- [DIN EN 12433-1] DIN EN 12433-1: Tore, Bauarten von Toren, Oktober 1999
- [DIN EN 15242] DIN EN 15242: Lüftung von Gebäuden – Berechnungsverfahren zur Ermittlung der Luftvolumenströme in Gebäuden einschließlich Infiltration, September 2007
- [DIN V 18599-10] DIN V 18599-10: Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten, Dezember 2011
- [DWD 2011] Deutscher Wetterdienst, Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung: Projektbericht – Aktualisierte und erweiterte Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere, extreme und zukünftige Wetterverhältnisse, Offenbach, Juli 2011
- [EnEV 2009] Bundesregierung: Energieeinsparverordnung (EnEV), April 2009
- [Flieger et al. 2013] Flieger, B., Schmidt, M., Müller, D.: Vereinfachte Berechnungsmodelle für Raumluftströmungen, HLH Bd. 64 (2013) Nr. 1, Aachen, Januar 2013
- [Freire et al. 2009] Freire, R., Abadie, M., Mendes, N.: INTEGRATION OF NATURAL VENTILATION MODELS IN THE HYGROTHERMAL AND ENERGY SIMULATION PROGRAM POWERDOMUS, Eleventh International IBPSA Conference, Glasgow, 2009
- [Frico 2013] Frico GmbH: Industrialline – Luftschleier für die Industrie, http://www.gelu-frico.com/de/air-curtains/industrialline/pdf/SL_Industry_Gelu_DE.pdf, abgerufen am 04. März 2013
- [Frontier 2010] Frontier Economics Ltd: Energiekosten in Deutschland - Entwicklungen, Ursachen und internationaler Vergleich (Projekt 43/09), Endbericht für das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, London, 2010
- [FVL R 10] Fachverband Tageslicht und Rauchschutz e.V. Heft 10: Lichtkuppeln und Lichtbänder
- [Hausladen et. al 2011] Hausladen, G., Wagner, T., Schmid, T., Bonnet, C., Hamacher, T., Tzscheuschler, P., Burhenne, R.: Leitfaden Energienutzungsplan, (Hrsg.) Bayerisches Staatsministerium

- für Umwelt und Gesundheit (StMUG), Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie (StMWIVT), Oberste Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern (OBB), München, 2001
- [Häußler 2012] Häußler, O.: Ratgeber: Energieeffiziente Verladestellen – Planung und Modernisierung nach Energieaspekten, Director’s Brief, Deutsche Messe Interactive, Hannover, 2012
- [Hensen 1991] Hensen, J.: ON THE THERMAL INTERACTION OF BUILDING STRUCTURE AND HEATING AND VENTILATING SYSTEM. PH.D. thesis, Technische Universiteit Eindhoven, ISBN 90-386-0081-X, Eindhoven, 1991
- [HLH 2013] HLH Bd. 64 (2013) Nr. 3: EnEV 2013: Industriehalle ist nicht gleich Industriehalle, Düsseldorf, 2013
- [IDA ICE 2012] EQUA Solutions AG: IDA Indoor Climate and Energy 4 Expert Edition Version 4.22, 2012
- [Ketteniß 2007] Ketteniß, M.: Vergleichende energetische und wirtschaftliche Untersuchung von Luftschleieranlagen mit Druckkammerdüsen und Lamellenauslass, Diplomarbeit, Fachhochschule Köln, 2007
- [Larsen 2006] Larsen, T.S.: Natural Ventilation Driven by Wind and Temperature Difference. Ph.D. thesis, Aalborg University Denmark, Department of Civil Engineering, Group of Architectural Engineering. ISSN 1901-7294, Aalborg, 2006
- [Liddament 1986] Liddament, M.: Air Infiltration Calculation Techniques – An Applications Guide, Annex V, Air Infiltration and Ventilation Centre, GB-Coventry, 1986
- [Litzmann 2012] Telefonat vom 19. Oktober 2012 mit Herrn Litzmann, Novoferm tormatic GmbH
- [Maas 1995] Maas, A.: Experimentelle Quantifizierung des Luftwechsels bei Fensterlüftung, Dissertation, Universität Gesamthochschule Kassel, Kassel, 1995
- [Oschatz et. al 2011] Oschatz, et.al.: Abschlussbericht, Gesamtanalyse – Energieeffizienz von Hallengebäuden, Institut für Technische Gebäudeausrüstung Dresden, Dresden, Juni 2011
- [Phaff et al. 1982] de Gids, W., Phaff, H., et.al.: Ventilatie van Gebouwen. Onderzoek naar de Gevolgen van Het Openen van een Raam op Het Binnenklimaat van een Kamer, Instituut voor Milieuhygiene en Gezondheidstechniek, Rapport C 448, Delft, Niederlande, 1982
- [Recknagel 2007] Recknagel, H., Sprenger, E., Schramek, E.: Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik 07/08, Oldenbourg Industieverlag München, München, 2007
- [Rössel et al. 2012] Rössel, Klimke, et.al.: Green Factory – energieeffiziente Produktionsstätte, Lehrstuhl für Bauklimatik und Haustechnik, TU München, München, 2012
- [Stricker 2012-1] Stricker Torsysteme: Lichtgitterschranken, <http://www.stricker.ms/de/torsysteme/schnellauftore/sicherheit/lichtgitterschranken>, abgerufen am 19. September 2012
- [Stricker 2012-2] Stricker Torsysteme: Induktionsschleifen, http://www.stricker.ms/de/torsysteme/schnellauftore/oeffnungs_impulsgeber/induktionsschleifen, abgerufen am 19. September 2012
- [Stricker 2012-3] Stricker Torsysteme: Laser, http://www.stricker.ms/de/torsysteme/schnellauftore/oeffnungs_impulsgeber/laser, abgerufen am 19. September 2012
- [Teckentrup 2012] Teckentrup: Industrietore und Hallentore von Teckentrup, <http://www.teckentrup.biz/produkte/industrietore.html>, 15. August 2012
- [VDI 2409] VDI 2409: Tore in Industriebauten, 2003
- [Wietschel et al. 2010] Wietschel, M. et al.: Energietechnologien 2050 - Schwerpunkte für Forschung und Entwicklung, Fraunhofer Verlag, Stuttgart, 2010
- [WRPLOT 2011] WRPLOT View, Wind Rose Plots for Meteorological Data V.7.0.0, Lakes Environmental Software, 2011

11. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Vorgehensweise in der Parameterstudie: Untersuchung verschiedener torspezifischer Parameter, z.B. U-Wert, Öffnungsdauer und Leckagen (Luftdurchlässigkeit) des Tores.....	7
Abbildung 2:	Szenarioentwicklung für die definierten Gebäudemodelle <i>Fertigung, Werkstatt, Lager</i>	7
Abbildung 3:	Sektionaltor.....	11
Abbildung 4:	Folien-Rolltor	11
Abbildung 5:	Lamellen-Rolltor.....	11
Abbildung 6:	Schnelllaufspiraltor	11
Abbildung 7:	Modelltypen zur Abbildung von Raumluftrömungen nach [Flieger et al. 2013].....	14
Abbildung 8:	Luftvolumenströme in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz für unterschiedliche durchschnittliche Windgeschwindigkeiten bei einer quadratischen Öffnungsfläche von 16 m ²	15
Abbildung 9:	Zusammenhang zwischen Druckdifferenz Innen - Außen und dem resultierenden Volumenstrom in m ³ _{Luft} /(m ² _{Torfläche} ·h) für unterschiedliche Luftdurchlässigkeitsklassen (LDK) nach [DIN EN 12426]	16
Abbildung 10:	Blick in die für die Temperaturmessungen genutzte Halle des Lehrstuhls für Bauklimatik und Haustechnik	17
Abbildung 11:	Versuchsaufbau und Messanordnung der Thermoelemente	17
Abbildung 12:	Temperaturprofil bei Öffnung des Tores der Werkzeughalle. Die hier dargestellten Temperaturen beziehen sich auf die Messpunkte im vorderen (rote Linien) und hinteren (gelbe Linien) Bereich der Halle auf einer Höhe von 1,4 m. Desweiteren wird eine gemittelte Raumtemperatur aus den 6 positionierten Thermoelementen in Form einer grünen Linie sowie die gemessene Außentemperatur als blaue Linie abgebildet	18
Abbildung 13:	Vergleich des Raumtemperaturverlaufs von Messung (grüne Linie) und Simulation (gelbe Linie) bei Toröffnung und Torschließung	19
Abbildung 14:	Gebäudemodelle <i>Fertigung, Werkstatt und Lager</i> in [IDA ICE 2012]	20
Abbildung 15:	Schnitt durch das Gebäudemodell <i>Fertigung</i> in [IDA ICE 2012] mit Darstellung der Zonierung.....	21
Abbildung 16:	Schnitt durch das Gebäudemodell <i>Werkstatt</i> in [IDA ICE 2012] mit Darstellung der Zonierung.....	22
Abbildung 17:	Schnitt durch das Gebäudemodell <i>Lager</i> in [IDA ICE 2012] mit Darstellung der Zonierung.....	23
Abbildung 18:	spezifischer und absoluter Nutzenergiebedarf für Wärme und Kälte des Gebäudemodells <i>Fertigung, Werkstatt und Lager</i> bei 1-Schichtbetrieb	24
Abbildung 19:	Wärmeverlust durch Transmission, Leckage und Öffnung des Tores sowie resultierender Mehrbedarf an Wärme gegenüber dem simulierten Gebäude ohne Tor in Abhängigkeit einer pauschalen Öffnungsdauer für die Gebäudemodelle <i>Fertigung, Werkstatt und Lager</i> über ein Jahr	26
Abbildung 20:	Lüftungswärmeverlust in Abhängigkeit der Öffnungsdauer für die Gebäudemodelle <i>Fertigung, Werkstatt und Lager</i>	26
Abbildung 21:	Mehrbedarf an Wärme sowie Wärmeverlust durch Transmission, Leckage und Öffnung des Tores gegenüber dem Gebäudemodell ohne Tor über ein Jahr bei einer pauschalen Öffnungsdauer von 6 min/h während der Nutzungszeit, Gebäudemodell <i>Fertigung</i>	27
Abbildung 22:	prozentuale Verteilung der Wärmeverluste durch Transmission, Leckage und Öffnung des Tores in Abhängigkeit der pauschalen Toröffnungsdauer im Gebäudemodell <i>Fertigung</i> über ein Jahr.....	27
Abbildung 23:	Transmissionswärmeverlust.....	28
Abbildung 24:	Wärmeverlust durch Leckagen	28
Abbildung 25:	Variation des U-Werts des Tores von 1 W/m ² K bis 5 W/m ² K für die Gebäudemodelle <i>Fertigung, Werkstatt und Lager</i>	29

Abbildung 26:	Variation der Luftdurchlässigkeitsklasse (LDK) des Tores von Klasse 5 bis 0 für die Gebäudemodelle <i>Fertigung</i> , <i>Werkstatt</i> und <i>Lager</i> 30	30
Abbildung 27:	simulierter Raumtemperaturabfall bei geöffnetem Tor beim Gebäudemodell <i>Fertigung</i> am 16. Januar zwischen 8:00 – 8:20 Uhr 31	31
Abbildung 28:	simulierter Raumtemperaturabfall bei geöffnetem Tor beim Gebäudemodell <i>Werkstatt</i> am 16. Januar zwischen 8:00 – 8:20 Uhr 32	32
Abbildung 29:	simulierter Raumtemperaturabfall bei geöffnetem Tor beim Gebäudemodell <i>Lager</i> am 16. Januar zwischen 8:00 – 8:20 Uhr 33	33
Abbildung 30:	Schnitt durch das Gebäudemodell <i>Fertigung</i> mit 2 Toren auf gegenüberliegenden Seiten und Darstellung der Zonierung in [IDA ICE 2012] 34	34
Abbildung 31:	Mehrbedarf an Wärme gegenüber dem simulierten Gebäude ohne Tor, sowie der Wärmeverlust durch Transmission, Leckage und Öffnung der Tore in Abhängigkeit einer pauschalen Öffnungsdauer über ein Jahr. Diagramm Links: die Tore werden nacheinander geöffnet. Diagramm Mitte: die Tore werden gleichzeitig geöffnet bei Nord-Süd-Orientierung. Diagramm Rechts: die Tore werden gleichzeitig geöffnet bei Ost-West-Orientierung 34	34
Abbildung 32:	Windrose mit Darstellung der jährlichen Windrichtungs- und Windgeschwindigkeitsverteilung des verwendeten Testreferenzjahres 13 [DWD 2011], [WRPLOT 2011] 35	35
Abbildung 33:	Vergleich des Energieverbrauchs von Heizung, Antrieb sowie Steuerung und Sensorik. Anwendungsfall 1 Sektionaltor bei <i>LKW Be- und Entladung</i> , gewichtet nach Primärenergie 37	37
Abbildung 34:	Vergleich des Energieverbrauchs von Heizung, Antrieb sowie Steuerung und Sensorik. Anwendungsfall 2 Schnelllauf-Spiraltor bei <i>regelmäßigem Staplerverkehr</i> , gewichtet nach Primärenergie 38	38
Abbildung 35:	Erläuterung der Szenario-Energiegrafik 42	42
Abbildung 36:	Erläuterung der Szenario-Kostengrafik 43	43
Abbildung 37:	Vergleich der Szenarien <i>LKW Be-/ Entladung</i> , <i>regelmäßiger Staplerverkehr</i> und <i>Mischnutzung</i> in Bezug auf den Mehrbedarf an Wärme sowie den Wärmeverlust beim „idealen Tor“, Gebäudemodell <i>Fertigung</i> 45	45
Abbildung 38:	Temperaturverteilung der Szenarien des Gebäudemodells <i>Fertigung</i> in der „Torzone“ bei Verwendung des „idealen Tores“ auf einer Raumhöhe von 1,4 m während der Nutzungszeit. Der Simulationszeitschritt beträgt 30 s, der Betrachtungszeitraum ist ein Jahr 46	46
Abbildung 39:	Mehrbedarf an Wärme bzw. gesamter Wärmeverlust des jeweiligen Tores im Szenario <i>LKW Be-/ Entladung</i> 47	47
Abbildung 40:	torspezifische Investition und kumulierte Wärmekosten über 20 Jahre im Szenario <i>LKW Be-/ Entladung</i> 47	47
Abbildung 41:	Mehrbedarf an Wärme bzw. gesamter Wärmeverlust des jeweiligen Tores im Szenario <i>regelmäßiger Staplerverkehr</i> 48	48
Abbildung 42:	torspezifische Investition und kumulierte Wärmekosten über 20 Jahre im Szenario <i>regelmäßiger Staplerverkehr</i> 48	48
Abbildung 43:	Mehrbedarf an Wärme bzw. gesamter Wärmeverlust des jeweiligen Tores im Szenario <i>Mischnutzung</i> 49	49
Abbildung 44:	torspezifische Investition und kumulierte Wärmekosten über 20 Jahre im Szenario <i>Mischnutzung</i> 49	49
Abbildung 45:	Vergleich der Szenarien <i>KFZ-Werkstatt</i> , <i>regelmäßiger Staplerverkehr</i> und <i>LKW Be-/ Entladung</i> in Bezug auf den Mehrbedarf an Wärme sowie den Wärmeverlust beim „idealen Tor“, Gebäudemodell <i>Werkstatt</i> 51	51
Abbildung 46:	Temperaturverteilung der Szenarien des Gebäudemodells <i>Werkstatt</i> in der „Torzone“ bei Verwendung des „idealen Tores“ auf einer Raumhöhe von 1,4 m während der Nutzungszeit. Der Simulationszeitschritt beträgt 30 s, der Betrachtungszeitraum ist ein Jahr 52	52

Abbildung 47:	Mehrbedarf an Wärme bzw. gesamter Wärmeverlust des jeweiligen Tores im Szenario <i>KFZ-Werkstatt</i>	53
Abbildung 48:	torspezifische Investition und kumulierte Wärmekosten über 20 Jahre im Szenario <i>KFZ-Werkstatt</i>	53
Abbildung 49:	Mehrbedarf an Wärme bzw. gesamter Wärmeverlust des jeweiligen Tores im Szenario <i>regelmäßiger Staplerverkehr</i>	54
Abbildung 50:	torspezifische Investition und kumulierte Wärmekosten über 20 Jahre im Szenario <i>regelmäßiger Staplerverkehr</i>	54
Abbildung 51:	Mehrbedarf an Wärme bzw. gesamter Wärmeverlust des jeweiligen Tores im Szenario <i>LKW Be-/Entladung</i>	55
Abbildung 52:	torspezifische Investition und kumulierte Wärmekosten über 20 Jahre im Szenario <i>LKW Be-/Entladung</i>	55
Abbildung 53:	Vergleich der Szenarien <i>LKW Be-/Entladung</i> und <i>regelmäßiger Staplerverkehr</i> im 1-Schichtbetrieb in Bezug auf den Mehrbedarf an Wärme sowie den Wärmeverlust beim „idealen Tor“, Gebäudemodell <i>Lager</i>	57
Abbildung 54:	Temperaturverteilung der Szenarien im 1-Schichtbetrieb des Gebäudemodells <i>Lager</i> in der „Torzone“ bei Verwendung des „idealen Tores“ auf einer Raumhöhe von 1,4 m während der Nutzungszeit. Der Simulationszeitschritt beträgt 30 s, der Betrachtungszeitraum ist ein Jahr.....	57
Abbildung 55:	Vergleich der Szenarien <i>LKW Be-/Entladung</i> und <i>regelmäßiger Staplerverkehr</i> im 2-Schichtbetrieb in Bezug auf den Mehrbedarf an Wärme sowie den Wärmeverlust beim „idealen Tor“, Gebäudemodell <i>Lager</i>	58
Abbildung 56:	Mehrbedarf an Wärme bzw. gesamter Wärmeverlust des jeweiligen Tores im Szenario <i>LKW Be-/Entladung, 1-Schichtbetrieb</i>	59
Abbildung 57:	torspezifische Investition und kumulierte Wärmekosten über 20 Jahre im Szenario <i>LKW Be-/Entladung, 1-Schichtbetrieb</i>	59
Abbildung 58:	Mehrbedarf an Wärme bzw. gesamter Wärmeverlust des jeweiligen Tores im Szenario <i>regelmäßiger Staplerverkehr, 1-Schichtbetrieb</i>	60
Abbildung 59:	torspezifische Investition und kumulierte Wärmekosten über 20 Jahre im Szenario <i>regelmäßiger Staplerverkehr, 1-Schichtbetrieb</i>	60
Abbildung 60:	Erläuterung der Energieeinspar-Grafik.....	63
Abbildung 61:	Reduzierung des Mehrbedarfs an Wärme durch häufiges Öffnen und Schließen des Tores für das Szenario <i>LKW Be-/Entladung</i> im Gebäudemodell <i>Fertigung</i>	64
Abbildung 62:	Reduzierung des Mehrbedarfs an Wärme durch häufiges Öffnen und Schließen des Tores für das Szenario <i>LKW Be-/Entladung</i> im Gebäudemodell <i>Werkstatt</i>	65
Abbildung 63:	Reduzierung des Mehrbedarfs an Wärme durch häufiges Öffnen und Schließen des Tores für das Szenario <i>LKW Be-/Entladung</i> im Gebäudemodell <i>Lager</i> bei einem 1-Schichtbetrieb	65
Abbildung 64:	Reduzierung des Mehrbedarfs an Wärme durch LKW Be-/Entladung im Gebäude für das Szenario <i>LKW Be-/Entladung</i> im Gebäudemodell <i>Lager</i> bei einem 1-Schichtbetrieb	66
Abbildung 65:	Reduzierung des Mehrbedarfs an Wärme durch eine objektgrößenangepasste Toröffnung für das Szenario <i>regelmäßiger Staplerverkehr</i> im Gebäudemodell <i>Fertigung</i>	67
Abbildung 66:	Reduzierung des Mehrbedarfs an Wärme durch eine objektgrößenangepasste Toröffnung für das Szenario <i>regelmäßiger Staplerverkehr</i> im Gebäudemodell <i>Werkstatt</i>	68
Abbildung 67:	Reduzierung des Mehrbedarfs an Wärme durch eine objektgrößenangepasste Toröffnung für das Szenario <i>regelmäßiger Staplerverkehr</i> im Gebäudemodell <i>Lager</i> bei 1-Schichtbetrieb	68
Abbildung 68:	Innenansicht des Gebäudemodells <i>Fertigung</i> in [IDA ICE 2012] mit Darstellung der Schleuse und der erweiterten „Torzone“	69
Abbildung 69:	Schleusenfunktion bei einer morgendlichen LKW Entladung (links) und einer abendlichen LKW Beladung (rechts)	69

Abbildung 70:	Schleusenfunktion bei einem regelmäßigen, abwechselnden Staplerverkehr von außen nach innen bzw. innen nach außen	69
Abbildung 71:	Reduzierung des Mehrbedarfs an Wärme durch den Einsatz einer Schleuse für das Szenario <i>LKW Be-/ Entladung</i> im Gebäudemodell <i>Fertigung</i>	70
Abbildung 72:	Außenlufttemperatur (blaue Linie) sowie Lufttemperatur auf 1,4 m Höhe (schwarze Linie) in der Torzone im Gebäudemodell <i>Fertigung</i> ohne Schleuse für den Simulationszeitraum 23.01. 7:00 – 10:00 Uhr, Szenario <i>LKW Be-/ Entladung</i>	70
Abbildung 73:	Außenlufttemperatur (blaue Linie), Lufttemperatur auf 1,4 m Höhe (schwarze Linie) in der erweiterten Torzone sowie Lufttemperatur auf 1,4 m Höhe in der Schleusenzone (grün) im Gebäudemodell <i>Fertigung</i> mit Schleuse für den Simulationszeitraum 23.01. 7:00 – 10:00 Uhr, Szenario <i>LKW Be-/ Entladung</i>	70
Abbildung 74:	Reduzierung des Mehrbedarfs an Wärme durch den Einsatz einer Schleuse für das Szenario <i>regelmäßiger Staplerverkehr</i> im Gebäudemodell <i>Fertigung</i>	71
Abbildung 75:	Reduzierung des Mehrbedarfs an Wärme durch den Einsatz einer Schleuse für das Szenario <i>LKW Be-/ Entladung</i> im Gebäudemodell <i>Lager</i> bei einem 1-Schichtbetrieb	72
Abbildung 76:	Reduzierung des Mehrbedarfs an Wärme durch den Einsatz einer Schleuse für das Szenario <i>regelmäßiger Staplerverkehr</i> im Gebäudemodell <i>Lager</i> bei einem 1-Schichtbetrieb	72
Abbildung 77:	Übersicht von Luftschleiern und Luftwandanlagen für verschiedene Tortypen nach [Frico 2013]	74
Abbildung 78:	Vergleich der gängigen Luftauslasssysteme: Lamellen (links) und Düse (rechts) [Ketteniß 2007]	74

12. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Luftdurchlässigkeitsklassen von Toren nach [DIN EN 12426].....	8
Tabelle 2:	spezifische Eigenschaften der untersuchten Tortypen Sektionaltor, Rolltor und Schnelllaufspiraltor nach Auswertung der Fragebögen und partiell unterstützender Eigenrecherche	10
Tabelle 3:	Eigenschaften möglicher Torsteuerungen nach Auswertung der Fragebögen	12
Tabelle 4:	Randbedingungen der Temperaturmessung	17
Tabelle 5:	Randbedingungen des Gebäudemodells zur Validierung der vorgenommenen Temperaturmessung	18
Tabelle 6:	Randbedingungen des Gebäudemodells <i>Fertigung</i>	21
Tabelle 7:	Randbedingungen des Gebäudemodells <i>Werkstatt</i>	22
Tabelle 8:	Randbedingungen des Gebäudemodells <i>Lager</i>	23
Tabelle 9:	Vergleich des Energieverbrauchs von Antrieb, Steuerung, Sensorik und Mehrbedarf an Wärme für die Szenarien <i>LKW Be-/ Entladung</i> und <i>regelmäßiger Staplerverkehr</i> im Gebäudemodell <i>Fertigung</i>	36
Tabelle 10:	schematische Übersicht der entwickelten Szenarien für die Gebäudemodelle <i>Fertigung</i> , <i>Werkstatt</i> und <i>Lager</i>	40
Tabelle 11:	spezifische Eigenschaften der simulierten Tore „ideales Tor“ (iT), Sektionaltor (ST), Schnelllaufspiraltor (SST), Lamellen-Rolltor (RT-L) und Folien-Rolltor (RT-F).....	41
Tabelle 12:	Übersicht der simulierten Szenarien für das Gebäudemodell <i>Fertigung</i>	44
Tabelle 13:	Übersicht der simulierten Szenarien für das Gebäudemodell <i>Werkstatt</i>	50
Tabelle 14:	Übersicht der simulierten Szenarien für das Gebäudemodell <i>Lager</i>	56
Tabelle 15:	schematische Übersicht der unterschiedlichen Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz bzw. des thermischen Komforts für verschiedene Szenarien	62
Tabelle 16:	Randbedingungen des Szenarios <i>regelmäßiger Staplerverkehr</i> bei reduzierter Öffnungshöhe	67
Tabelle 17:	Vergleich von vertikalem Luftschleier und horizontaler Luftwand nach [Recknagel 2007, 1461].....	75
Tabelle 18:	Wirtschaftlichkeitsberechnung einer Luftwandanlage	76

13. Anhang

13.1 Fragebogen „Torsysteme im Industriebau“

Fragebogen - Torsysteme im Industriebau

Stand: 12.05.2012

Der Lehrstuhl für Bauklimatik und Haustechnik an der Technischen Universität München (TUM) erarbeitet in Zusammenarbeit mit dem Bundesverband Antriebs- und Steuerungstechnik. Tore (BAS.T) die Studie "Torsysteme im Industriebau". In diesem Projekt wird der Einfluss von Industrietoren auf den Energiebedarf von Industriehallen untersucht.

Die vorliegende Übersicht dient u.a. einer Gegenüberstellung unterschiedlicher Torsysteme mit deren spezifischen Eigenschaften (z.B. Torgrößen und Dämmwerte, Luftdichtheit, typische Einsatzbereiche) sowie deren Vor- und Nachteilen.

Wir bitten Sie, in dieser Excel-Tabelle aus Ihrer Sicht repräsentative und sich in ihren Eigenschaften unterscheidende Produkte für Tortyp, Antriebstechnik sowie sensorische Ansteuerungen in den dafür vorgesehenen Arbeitsmappen "Torsysteme", "sensorische Systeme" sowie "Öffnungszeiten" einzutragen.

Für jede Produktkategorie ist jeweils ein Beispiel in der Tabelle aufgelistet.

Die von Ihnen gemachten Angaben werden vertraulich behandelt und dienen als Grundlage für Simulations- und Wirtschaftlichkeitsrechnungen, die durch die TUM durchgeführt werden.

Erfassungsblatt - Torsysteme				
		Beispiel	Torsystem 1	Torsystem 2
Tor				
Hersteller	Muster GmbH			
Bezeichnung, Typ	Tor 1b			
Klasse	Sektionaltor			
Material/Aufbau	doppelwandiges Stahltor mit PU-Hartschaum			
Standardgröße [m ²]	<input checked="" type="checkbox"/> 25	<input type="checkbox"/> 25	<input type="checkbox"/> 25	
ggf. abweichende Größe				
Maximalgröße (Breite*Höhe) [m*m]	8*7			
Verglasung möglich	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
verglaste Fläche [m ²]	0,0			
Lüftungsöffnung möglich	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Schlupftür möglich	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
U-Wert (gesamt bei o.g. Größe) [W/m ² K]	1,0			
Torblatt / Lamelle [W/m ² K]	0,5			
Rahmen [W/m ² K]	1,5			
Verglasung [W/m ² K]	-			
Tordicke [mm]	42			
Windlastklasse	3			
Luftdichtigkeitsklasse	2			
Typische Einsatzgebiete	Industrietor, wenige Toröffnungen			
Listenpreis [€] ¹	2500			
Vorteile	robust, langlebig, guter Dämmstandard			
Nachteile	vergleichsweise schwer			
Kommentar/Bemerkung				
Quelle				
Antrieb				
Hersteller	Muster GmbH			
Bezeichnung, Typ	Antrieb 4x			
Antriebsart	<input type="checkbox"/> Welle <input checked="" type="checkbox"/> Kette <input type="checkbox"/> Pneumatik <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Welle <input type="checkbox"/> Kette <input type="checkbox"/> Pneumatik <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Welle <input type="checkbox"/> Kette <input type="checkbox"/> Pneumatik <input type="checkbox"/>	
Einsatzgrenze (z.B. max Torgewicht)	max Torhöhe 7m			
Geschwindigkeit (öffnen) [m/s]	0,18 m/s (max.)			
Geschwindigkeit (schließen) [m/s]	0,18 m/s (max.)			
Leistung Betrieb (bei o.g. Größe) [W]	250			
Leistung Standby [W]	1			
Wartungsintervall	<input type="checkbox"/> Zeitdauer [Monat] <input checked="" type="checkbox"/> Öffnungszyklen [-]	<input type="checkbox"/> Zeitdauer [Monat] <input type="checkbox"/> Betriebszyklen [-]	<input type="checkbox"/> Zeitdauer [Monat] <input type="checkbox"/> Betriebszyklen [-]	
Antrieb	7500 Zyklen			
Listenpreis [€] ¹	2000			
Vorteile	geräuscharm			

13.2 Druckbeiwerte der Gebäudemodelle *Fertigung, Werkstatt, Lager*

13.2.1 Gebäudemodell *Fertigung, Lager*

Windeinfallswinkel / Orientierung Fassade	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
Nord	0,5	0,25	-0,5	-0,8	-0,7	-0,8	-0,5	0,25
Ost	0,5	0,25	-0,5	-0,8	-0,7	-0,8	-0,5	0,25
Süd	0,5	0,25	-0,5	-0,8	-0,7	-0,8	-0,5	0,25
West	0,5	0,25	-0,5	-0,8	-0,7	-0,8	-0,5	0,25
Dach	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1

13.2.2 Gebäudemodell *Werkstatt*

Windeinfallswinkel / Orientierung Fassade	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
Nord	0,5	0,25	-0,5	-0,8	-0,7	-0,8	-0,5	0,25
Ost	0,7	0,35	-0,5	-0,4	-0,2	-0,4	-0,5	0,35
Süd	0,5	0,25	-0,5	-0,8	-0,7	-0,8	-0,5	0,25
West	0,7	0,35	-0,5	-0,4	-0,2	-0,4	-0,5	0,35
Dach	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1

Die verwendeten Druckbeiwerte entstammen der Datenbank aus [IDA ICE 2012] bzw. [Liddament 1986].