

Forschungsbericht

Das CO₂-neutrale Logistikzentrum

Entwicklung von ganzheitlichen Handlungsempfehlungen für energieeffiziente Logistikzentren

Günthner, W. A. · Hausladen, G. · Freis, J. · Vohlidka, P.



Forschungsbericht

der Forschungsstellen

Technische Universität München, Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

Technische Universität München, Lehrstuhl für Bauklimatik und Haustechnik

zu dem über die



im Rahmen des Programms zur

Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF)

vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

geförderten Vorhaben **398 ZN**

***Das CO₂-neutrale Logistikzentrum – Entwicklung von ganzheitlichen
Handlungsempfehlungen für energieeffiziente Logistikzentren***

der AiF-Forschungsvereinigung

Intralogistik / Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL) e.V.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Herausgegeben von:

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wi.-Ing. W. A. Günthner

fml – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

Prof. Dipl.-Ing. Thomas Auer

Lehrstuhl für Bauklimatik und Haustechnik

Technische Universität München

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © **fml** – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik
Lehrstuhl für Bauklimatik und Haustechnik

Printed in Germany 2014

ISBN: 978-3-941702-37-0

fml – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik
Technische Universität München
Boltzmannstr. 15
85748 Garching
Telefon: + 49.89.289.15921
Telefax: + 49.89.289.15922
www.fml.mw.tum.de

Lehrstuhl für Bauklimatik und Haustechnik
Technische Universität München
Arcisstraße 21
80333 München
Telefon: + 49.89.289.22475
Telefax: + 49.89.289. 23851
<http://www.bk.ar.tum.de/>

Forschungsbericht

Das CO₂-neutrale Logistikzentrum - Entwicklung von ganzheitlichen Handlungsempfehlungen für energieeffiziente Logistikzentren

Kurzfassung:

Um dem fortschreitenden Klimawandel entgegenzuwirken, sehen aktuelle politische Reglementierungen verpflichtend einen Niedrigenergiestandard für alle Neubauten ab dem Jahr 2021 vor. Darüber hinaus erfordern stetig steigende Lebenszykluskosten von Anlagen und Immobilien auch für Logistikgebäude ein Umdenken in der Planung.

Das Forschungsvorhaben „Das CO₂-neutrale Logistikzentrum“ setzt sich deswegen das Ziel, bestehende innovative Ansätze zur Reduzierung des Energiebedarfs aus den Bereichen der Gebäudetechnik sowie der Intralogistik als Gesamtsystem zu erfassen und in Verbindung mit der Gebäudehülle aufeinander abzustimmen, um somit ein energetisches Optimum zu erreichen. Untersucht werden drei Modellen, welche die Typologien der manuellen Lagerhalle, des halbautomatischen Logistikzentrums sowie des vollautomatischen Distributionszentrums vertreten. Diese Modelle werden jeweils mit drei verschiedenen Temperaturniveaus kombiniert: min. 12 °C, min. 17 °C und max. 6 °C. Anhand jedes dieser Gebäudemodelle werden Parameterstudien an zuvor identifizierten Grundelementen durchgeführt, die durch Abänderung optimiert und auf größtmögliche CO₂-Einsparungen untersucht, bewertet und mit Investitionen sowie laufenden Energiekosten im Jahr hinterlegt werden. Anschließend werden optimierte Grundelemente im Gesamtsystem der jeweiligen Typologie der Untersuchungsmodelle bei den angestrebten Temperaturniveaus miteinander zu sinnvollen Kombinationen zusammengeführt. Der verbleibende Bedarf an Energie wird durch eine stromerzeugende Photovoltaikanlage als CO₂-Gutschrift angerechnet.

Dabei zeigt sich, dass durch eine Kombination der optimierten Grundelemente die CO₂-Emissionen in allen Untersuchungsmodellen deutlich gesenkt werden können. Jedoch werden bei den drei Typologien auch klare Unterschiede deutlich, wo diese Einsparpotenziale liegen. Da in der manuellen Lagerhalle sehr wenig stromverbrauchende Materialflusstechnik eingesetzt wird, hat das Gebäude hier den größten Einfluss auf den Gesamtenergiebedarf. Ein CO₂-neutrales Gebäude ist im Fall der manuellen Lagerhalle realisierbar. Im Falle des halbautomatischen Logistikzentrums und des vollautomatischen Distributionszentrums ändert sich die Verteilung des Energiebedarfs erheblich. Der Einfluss der Intralogistik steigt von 20 % auf 70 % bzw. 85 % des Gesamtenergiebedarfs. Folglich werden die intralogistischen Optimierungen zur größten Stellschraube möglicher Einsparpotenziale.

Alle Untersuchungsergebnisse für die Planung CO₂-neutraler bzw. energieeffizienter Logistikzentren werden in einem Software-Tool implementiert und mit Handlungsempfehlungen hinterlegt.

Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	III
Abkürzungsverzeichnis	V
Formelzeichenverzeichnis.....	VII
1 Management Report.....	1
2 Einleitung	3
2.1 Wissenschaftlich-technische Problemstellung	3
2.2 Forschungsziel	4
2.2.1 Angestrebte Forschungsergebnisse.....	5
2.2.2 Innovativer Beitrag und Nutzbarkeit der angestrebten Forschungsergebnisse.....	5
2.2.3 Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels	6
3 Stand der Technik.....	9
3.1 Energie- und klimapolitische Anforderungen an Logistikimmobilien	9
3.2 Planung und Arten von Logistikzentren	9
3.3 Energiebilanzen von Logistikzentren	10
3.3.1 Energieverbrauch der Materialflusstechnik und Ansätze zur Steigerung der Energieeffizienz.....	13
3.3.2 Energieverbrauch des Gebäudes und Nutzung regenerativer Energien.....	15
4 Bestimmung von Grundelementen und Modellierung unterschiedlicher Arten von Logistikzentren.....	17
4.1 Bestimmung von Grundelementen	17
4.1.1 Experteninterviews mit Planern	17
4.1.2 Besichtigungen von Logistikzentren.....	19
4.1.3 Online-Umfrage: Energieeffizienz-Benchmarking für Logistikzentren	20
4.1.4 Ableiten von Grundelementen zur Konzeption von Logistikzentren	23
4.2 Konzeption von Gesamtsystemen für unterschiedliche Logistikzentren	24
4.2.1 Unterschiedliche Temperaturniveaus	24
4.2.2 Erstellung der Untersuchungsmodelle	24
4.2.3 Validierung der Untersuchungsmodelle	28
4.3 Methodisches Vorgehen	29
4.3.1 Gesamtheitliche Energiebilanzierung	29
4.3.2 Ermittlung der CO ₂ -Emissionen.....	32
4.3.3 Ermittlung der Kosten und Investitionen	33

5	Untersuchung und Optimierung von Grundelementen in unterschiedlichen Logistikzentren	35
5.1	Parameterstudien an Grundelementen im Bereich Intralogistik	35
5.1.1	Fördern.....	35
5.1.2	Lagern	39
5.1.3	Kommissionieren/Sortieren.....	42
5.1.4	Handhaben.....	42
5.1.5	Materialfluss	43
5.2	Parameterstudien an Grundelementen im Bereich Gebäudehülle	46
5.2.1	Dämmung.....	46
5.2.2	Kubatur.....	49
5.2.3	Fassadenfenster.....	49
5.2.4	Dachfenster	52
5.2.5	Vorsatzschleuse	54
5.3	Parameterstudien an Grundelementen im Bereich Gebäudetechnik	55
5.3.1	Beleuchtungssteuerung	55
5.3.2	Mechanische Lüftungsanlage	56
5.3.3	Heizsystem.....	57
5.3.4	Kühlsystem.....	60
5.3.5	Photovoltaikanlage.....	61
6	Konzeption von energieeffizienten und CO₂-neutralen Logistikzentren	65
6.1	Kombination der Einzeluntersuchungen - manuelle Lagerhalle.....	65
6.2	Kombination der Einzeluntersuchungen - halbautomatisches Logistikzentrum	71
6.3	Kombination der Einzeluntersuchungen - vollautomatisches Distributionszentrum	76
7	Umsetzung Planungstool für energieeffiziente und CO₂-neutrale Logistikzentren	81
7.1	Aufbau und Funktion des Planungstools	81
7.2	Validierung Planungstool.....	83
8	Zusammenfassung der Forschungsergebnisse und Ausblick	85
8.1	Zusammenfassung	85
8.2	Nutzen und industrielle Anwendungsmöglichkeiten	86
8.3	Ausblick	87
	Literaturverzeichnis.....	89
	Abbildungsverzeichnis	97
	Tabellenverzeichnis.....	105
Anhang A	Energieflussbilder aller bilanzierten Energieträger der Modelle.....	A-1

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
A	Fläche
AKL	Automatisches Kleinteilelager
A/V-Verhältnis	Oberfläche zu Volumen-Verhältnis
BHKW	Blockheizkraftwerk
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DS	Doppelspiele
EU	Europäische Union
EK	Europäische Kommission
THG	Treibhausgas
EED	Energieeffizienz Richtlinie (Energy Efficiency Directive)
EVPG	Energieverbrauchsrelevante-Produkte-Gesetz
EnEV	Energiesparverordnung
EEWärmeG	Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz
FBH	Fußbodenheizung
FFZ	Flurförderzeug
GF	Grundfläche
GLT	Großladungsträger
GM	Grundmodell
HOAI	Honorarordnung für Architekten und Ingenieure
HRL	Hochregallager
kW	Kilowatt
kW/m ²	Kilowatt pro Quadratmeter
kWh	Kilowattstunden
kWh/a	Kilowattstunden pro Jahr
kWh/h	Kilowattstunden pro Stunde
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
KW _p	Kilowatt Peak
NGF	Netto-Grundfläche
MW	Megawatt
MzW	Mann-zu-Ware-Kommissionierung
Ne	Nutzebene
NL	Nutzlast
n.v.	Nicht vorhanden
PV	Photovoltaik
RBG	Regalbediengerät
RLT	Raumluftechnik
ROI	Return of Invest
RWA	Rauch-Wärme-Abzugsanlage
THG	Treibhausgase
WMS	Warehouse Management System
WzM	Ware-zu-Mann-Kommissionierung
W/m ² K	Watt pro Quadratmeter und Kelvin

Formelzeichenverzeichnis

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
C_{wirk}	[kJ/kgK]	Wärmespeicherfähigkeit
E_M	[lx]	Wartungswert der Beleuchtungsstärke
EM_{CO_2}	[kg CO ₂]	Emissionsmenge CO ₂
$EM_{\text{CO}_2\text{e}}$	[kg CO ₂ e]	Emissionsmenge CO ₂ e
EV	[kg], [kWh]	Energieverbrauch
g-Wert	-	Energiedurchlassgrad von transparenten Bauteilen
k_A	-	Minderungsfaktor Bereich Sehaufgabe
k_{AL}	-	Raumindex für Kunstlicht
F_{CO_2}	[kg CO ₂ / EiEV]	Umrechnungsfaktor
$F_{\text{CO}_2\text{e}}$	[kg CO ₂ e /it EV]	Umrechnungsfaktor
F_t	-	Teilbetriebsfaktor der Gebäudebetriebszeit für Beleuchtung
U-Wert	[W/m ² K]	Wärmedurchgangskoeffizient von Bauteilen
KV	[kg]	Kältemittelverlust
η_{Alt}	[%]	Anteil Altanlagen Ökostrom
η_{Bestand}	[%]	Anteil Bestandsanlagen Ökostrom
τ_{D65}	-	Lichttransmissionsgrad

1 Management Report

In order to counter the progression of climate change, legal requirements for the construction of new buildings have been continually aggravated in recent years. By 2021 all new buildings must be in compliance with a new nearly zero-energy building standard. This also applies to logistics facilities. Therefore, constructors, planners and investors are facing the legal obligation to fulfill energy efficiency measures within their logistics facilities in the near future. Besides these legal obligations, the rise of stakeholder concerns about environmentally and ecologically sustainable behavior has resulted in increased demand for green logistics concepts. Furthermore the increase of energy costs in Germany is influencing life cycle costs of logistics facilities negatively so the businesses and the industry is forced to consider energy efficiency aspects of their actions.

The result of the research project “Carbon Neutral Logistics Facilities” is a recommendation of specific measures for planning and constructing energy efficient and carbon neutral logistics facilities. This recommendation is based on existing and innovative methods for the reduction of energy consumption and aims at finding the respective energetic optimum by varying and optimizing the main three elements of any logistics facility, Building Technology, Building Envelope and Intralogistics.

Besides the basic evaluation of measures with regards to energy efficiency, this research report is based on the findings gathered through analysis of eight exemplary logistics facilities and a detailed online survey targeting industry professionals. During the collaboration with the eight exemplary logistics facilities, the relevant specifics regarding energy flow and operational requirements could be obtained. To ensure the feasibility of the recommendations, which were derived within the research project, logistics experts from these exemplary facilities were

interviewed and consulted in parallel. To ensure the significance for every stakeholder even more, fundamental key data was gathered during the four-month period of the online survey. This led to collection and validation of general and specific benchmarks on energy efficiency as well as to the identification of logistical, technical, or constructional comparable parts of the different facilities. Based on the data gathered during the online survey three basic models of logistics facilities were developed. These models adequately represent the majority of logistics facilities, so that the energy consumption of these models can be determined holistically.

The three basic models of logistics facilities represent the typology of a manual warehouse, a semi-automated logistics facility and a fully automated distribution center. Every model is combined with three different levels of indoor temperature – 12 °C (53.6 °F), 17 °C (62.6 °F) and 6 °C (42.8 °F). Whereas an indoor temperature of 12 °C or 17 °C is dependent on the respective requirement of the operator the temperature level of 6 °C represents a cold storage operation. With reference to these basic models of logistics facilities including the respective temperature levels, parameter studies on the previously identified basic facility elements were conducted. For this purpose the basic facility elements Building Technology, Building Envelope and Intralogistics were divided into sub-clusters. For instance, the sub-clusters “Heating System” and “Lighting” were derived from the element “Building Technology”, whereas the sub-clusters “Insulation” and “Windows” are instantiations of the element “Building Envelope”. The sub-clusters “Materials Handling” and “Storage” are explanatory subtypes of the element “Intralogistics”.

Afterwards key-units of the facility were allocated to the defined sub-categories e.g. the key-units “Ground Conveyor” and “Automated Small

Components Warehouse” were assigned to the sub-cluster “Materials Handling” or respectively “Storage” of the basic element “Intralogistics”. To achieve the maximum of energy efficiency all key-units were analyzed and evaluated. Respective investment as well as current annual energy costs were taken into consideration. By reasonably combining optimized key-units, the optimization of the three different types of logistics facilities including the different temperature levels was achieved. In order to cover the residual demand for energy after the optimization of the basic logistics facility elements the building is equipped with a power producing photovoltaic facility. In the case of insufficient space, a calculation of the additionally required space has been carried out.

The evaluation shows that by means of the respective optimization of the key-units carbon emissions can be considerably reduced in all three basic models of logistics facilities. However, the areas of potential savings clearly vary between the three models.

In case of the "Manual Warehouse" not much of the energy intensive “Materials Handling” is used, so that the building itself has the highest influence on the total energy consumption. Therefore, the basic facility elements “Building Technology” and “Building Envelope” are the basic leverages for the energetic optimization in this case. An energetic optimized façade in combination with a heating system, which uses renewable energy are the most important measures here. In case of the refrigerated storage, also the choice of the right cooling system is essential. If fully optimized, energy consumption within the manual warehouse may be reduced throughout all temperature levels so much that a photovoltaic facility can completely cover the residual demand for energy. Therefore a completely carbon neutral manual warehouse is realizable.

In case of a “Semi-automated Logistics Facility” the allocation of energy consumption is changing considerably. Whereas the building in case of the "Manual Warehouse" at 17 °C causes up to

80 % of carbon emissions the impact drops to a third in a “Semi-automated Logistics Facility”. Consequently, the element “Intra-logistics” becomes the most important leverage with a reduction potential of up to 30% at 6 °C. However, by simultaneous optimization of the facility elements “Building Technology” and “Building Envelope” energy demand can be reduced even further. In combination with a photovoltaic facility, a fully optimized “Semi-automated Logistics Facility” at 17 °C could save up to 92% of current carbon emissions. However, in order to achieve the full carbon neutrality more space for additional photovoltaic panels is needed.

In case of a “Fully-automated Distribution Center” the share of total energy consumption of the element “Intra-logistics” is increasing to nearly 85 %. In comparison to the electricity driven “Intralogistics” structure the elements “Building Technology” and “Building Envelope” have hardly any impact on carbon emissions. Because in its majority electricity is still produced from non-renewable resources, it has a respectively poor carbon-factor. Depending on the desired temperature level a fully optimized “Fully-automated Distribution Center” may save between 70 % - 75 % of current carbon emissions.

The conducted analysis was implemented as an Excel-based tool and enhanced by respective references and recommendations. This tool is available to anyone interested. Because of its intuitive structure and visualization the tool enables the user an easy access and understanding of the topic. Besides the findings concerning carbon emissions, the tool also includes key-data on final energy consumption, investment as well as annual energy costs. This tool is intended to be used during the planning phase of logistics facilities in order to provide fast support to planners in assessing and selecting of energy efficient measures.

2 Einleitung

Gebäude und damit auch Logistikgebäude müssen zukünftig einen CO₂-armen Betrieb gewährleisten sowie eine hohe Gesamtenergieeffizienz aufweisen. Dabei muss der verbleibende geringe Energiebedarf zu einem wesentlichen Teil durch Energie aus erneuerbaren Quellen gedeckt werden [EU-2013]. Neben den politischen Reglementierungen und einem wachsenden gesamtgesellschaftlichen Bewusstsein für Ökologie rücken die steigenden Energiepreise [BDEW-2013] mit Ihrem Einfluss auf die Lebenszykluskosten von logistischen und gebäudetechnischen Anlagen in den Vordergrund. Logistikverantwortliche stehen zunehmend in der Pflicht, Energieeffizienzmaßnahmen abzuleiten, Konzepte zur Nutzung regenerativer Energien zu erarbeiten und diese Konzepte in ihren Logistikzentren umzusetzen. Dabei leisten schon heute innovative Einzellösungen sowohl in den Bereichen Gebäude-, Lager- und Fördertechnik als auch bei der Energieversorgung einen Beitrag zur effizienten und regenerativen Energienutzung. Ein umfassender Ansatz zur Optimierung der Gesamtenergieeffizienz von Logistikzentren unter Berücksichtigung der Zusammenhänge und Wechselwirkungen zwischen intralogistischen Anlagen, Haustechnik, Gebäudehülle sowie der Energiebereitstellung existiert bislang nicht.

2.1 Wissenschaftlich-technische Problemstellung

In der Europäischen Union und in Deutschland sind Gebäude für 36 % der Treibhausgas-Emissionen und für 40 % des Energieverbrauchs verantwortlich [EK-2012]. In Deutschland entfallen 35 % des Gebäude-Energieverbrauchs auf den Betrieb von Nichtwohngebäude [BDI-2013], dabei für Beleuchtung, Raumwärme, Warmwasser und Klimakälte. Auf mechanische Energie inkl. Verkehr entfallen 38 % des Gesamtenergieverbrauchs in Deutschland [BMW-2013]. Demnach spielen die Gebäude als auch die darin

befindlichen Anlagen als Verbraucher mechanischer Energie eine Schlüsselrolle beim Erreichen der energie- und klimapolitischen Ziele, den so genannten „20-20-20-Zielen“ der Europäischen Union (EU). Hierin verpflichten sich die Mitgliedsstaaten im Verhältnis zu Referenzwerten aus dem Jahr 1990 bis 2020 20 % Treibhausgase (THG) einzusparen, den Energieverbrauch um 20 % zu senken und davon 20 % mit erneuerbaren Energien herzustellen. Hauptschwerpunkt für das Erreichen dieser Ziele ist die Steigerung der Energieeffizienz, die zur Senkung des Energieverbrauchs als auch der THG-Emissionen führt, denn 83 % dieser waren in Deutschland im Jahr 2011 energiebedingt und es handelt sich zu 98 % um CO₂-Emissionen. [UBA-2013] [EK-2013]

Zu den politischen Reglementierungen kommen steigende Energiekosten, die den Druck auf die Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen in Unternehmen erhöhen, hinzu. Insbesondere der Strompreis ist in den vergangenen Jahren in Deutschland bedingt durch einen immer höheren Anteil staatlicher Abgaben und Umlagen deutlich gestiegen [BMW-2013]. In einer von Siemens im Jahr 2013 durchgeführten Kundenbefragung zur Energiewende machen die Energiekosten bei den befragten 252 Unternehmen auf der Stromverbraucherseite rund 17 % der gesamten Umsatzkosten aus [Sie-2013].

Aber auch die Themen Umweltmanagement und Nachhaltigkeit nehmen in der Logistikbranche rasant an Bedeutung zu. In der von PwC im Jahr 2013 durchgeführten Studie zur Nachhaltigkeit in der Transport- und Logistikbranche sehen die 102 befragten Führungskräfte Kundenanforderungen sogar als stärksten Treiber für Nachhaltigkeitsmaßnahmen im Unternehmen. Kleine und mittlere Unternehmen geben hingegen den Gesetzesgeber als auch den Kostendruck zu gleichen Teilen als Haupttreiber an [PwC-2013]. Der Druck auf die Branche wird seitens der Kunden

auch künftig zunehmen, denn Unternehmen achten aus Gründen der Reputation zunehmend auf effiziente und klimafreundliche Lieferketten, in denen Logistikimmobilien am CO₂-Ausstoß maßgeblich beteiligt sind [WEF-2009].

Schließlich lassen sich auch Überlegungen zum eigenen Unternehmensimage als weiteren Treiber für ein Umdenken in Sachen Nachhaltigkeit, Umweltmanagement und damit verbundene Energieeinsparungen zur Senkung von CO₂-Emissionen anführen. Vor dem Hintergrund einer gesteigerten öffentlichen Wahrnehmung des Zusammenhangs zwischen Energieverbrauch und dessen Umweltauswirkungen können mit entsprechenden energiesparenden und CO₂-neutralen Produkten und Dienstleistungen, aber auch mit energieeffizienten Logistikanlagen und Immobilien positive Marketingeffekte erzeugt werden. Unter dem Schlagwort Grüne Logistik geben 57 % der von dem Logistikdienstleister DHL befragten Unternehmen an, dass sie in den kommenden Jahren einen grünen Logistikanbieter einem kostengünstigen Anbieter vorziehen würden [DVZ-2012].

Auf der Suche nach den richtigen Stellhebeln, welche für die hohen Kosten als auch CO₂-Emissionen in einem Logistikzentrum verantwortlich sind, können nicht nur einzelne Bereiche oder Anlagen separat vom Gesamtsystem betrachtet werden. Denn sowohl die Förder- und Materialflusstechnik als auch die Haustechnik, wie Heizung oder Beleuchtung, sowie die gesamte Gebäudehülle mit ihren Verladetoren und Fenstern haben Einfluss auf den Gesamtenergieverbrauch und stehen zueinander in Wechselwirkungen. Bei einer Optimierung der Energiebilanz eines Logistikzentrums sind folglich die Bereiche der Intralogistik als auch der Gebäudetechnik samt Hülle zu beachten.

Innovative Lösungen der letzten Jahre in den erwähnten Bereichen leisten hierzu schon ihren Beitrag. Oft werden dabei nur punktuelle Ansätze wie Energierückspeisung bei Regalbediengeräten verfolgt, ohne die Zusammenhänge zu anderen Anlagen und Bereichen wie Heiz- oder Kühlanlagen zu berücksichtigen. Gerade im Sinne

einer höchstmöglichen Energieeffizienz ist es aber unabdingbar, einen ganzheitlichen Ansatz vor allem bei der Planung eines Logistikzentrums zu verfolgen, welcher nicht nur die Intralogistik, sondern auch die Konstruktionsweise des Gebäudes inklusive Haustechnik umfasst. Hierbei können Synergieeffekte genutzt und die Wechselwirkungen der Komponenten Gebäudehülle, Haustechnik, Materialflusstechnik und Energiebereitstellung berücksichtigt werden. Nur durch die Betrachtung aller am energetischen Gesamtverbrauch beteiligten Komponenten kann eine Optimierung bezüglich höchster Energieeffizienz mit dem Ziel einer CO₂-neutralen Energiebereitstellung erfolgen.

Dies erfordert eine starke Zusammenarbeit zwischen Planern und Herstellern von Komponenten und Systemen der Intralogistik auf der einen Seite sowie den Architekten und Gebäudetechnikplanern auf der anderen Seite. Im Zuge üblicher Ausschreibungen werden diese Gewerke jedoch meist unabhängig ausgeschrieben und vergeben. Deswegen erschließen sich vor allem die Wechselwirkungen der erwähnten Komponenten dem jeweiligen Planer nicht sofort, sondern erfordern eine gezielte Untersuchung.

Bisher bestehen keine Erkenntnisse über die energetischen Wechselwirkungen in einem Logistikzentrum zwischen der eingesetzten Materialflusstechnik zur Realisierung der logistischen Anforderungen, der Gebäudetechnik und der Gebäudehülle. Es fehlt an ganzheitlichen Handlungsempfehlungen für die Fachplaner, um energieeffiziente und CO₂-neutrale Logistikzentren zu konzipieren. Dieser Fragestellung nimmt sich das vorliegende Forschungsvorhaben deswegen an.

2.2 Forschungsziel

Das Forschungsziel liegt deswegen in der Entwicklung von ganzheitlichen Handlungsempfehlungen für die Planung von energieeffizienten und CO₂-neutralen Logistikzentren durch Analyse von Wechselwirkungen zwischen logistischen- und gebäudetechnischen Anlagen, Ge-

bäudehülle und regenerativer Energiebereitstellung (vgl. Abbildung 2.1).

In einer Disziplin übergreifenden Forschungsoperation soll eine ganzheitliche Betrachtung der Energiebedarfe und -kreisläufe in Logistikzentren unterschiedlicher Ausprägung erfolgen.

Um unterschiedliche Rahmenbedingungen zu berücksichtigen, die je nach Branche oder Artikelspektrum zum Tragen kommen, sollen einzelne wiederkehrende Grundelemente identifiziert und klassifiziert werden. Eine Optimierung der Grundelemente mit der Zielsetzung eines minimalen Energieverbrauchs und maximaler Energieumwandlung erfolgt unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen einzelner Grundelemente, um ganzheitlich die Energiebilanz des Gesamtsystems Logistikzentrum positiv zu gestalten.

Durch die Bereitstellung von Handlungsempfehlungen soll ein wichtiger Beitrag geleistet werden, das Optimum zwischen der eingesetzten Materialflusstechnik zur Realisierung der logistischen Aufgaben, energieeffizienter Bauweise und Haustechnik sowie regenerativer Energiebereitstellung zu finden, um ein CO₂-neutrales und energieeffizientes Logistikzentrum zu entwickeln.



Abbildung 2.1: Entwicklung von Handlungsempfehlungen für CO₂-neutrale Logistikzentren durch ganzheitliche Betrachtung der Intralogistik in Verbindung mit der Haustechnik, der Gebäudehülle und regenerativer Energiebereitstellung

2.2.1 Angestrebte Forschungsergebnisse

Die Identifizierung logistischer, gebäudetechnischer, baulicher in sich gleichartiger und wiederkehrender Grundelemente von Logistikzentren unterschiedlicher Arten ermöglicht eine Quantifizierung der Energieströme und Arten zwischen den einzelnen Grundelementen. Dies gestattet einen Überblick über die Energieverteilung und die größten Verbraucher im Gesamtsystem Logistikzentrum. Durch Variation einzelner Grundelemente lassen sich Wechselwirkungen analysieren und Optimierungspotenziale für typische Varianten von Logistikzentren aufdecken. Für die Planer unterschiedlicher Fachdisziplinen eines Logistikzentrums entsteht ein umfassender Fundus an Empfehlungen für eine energieoptimierte Systemgestaltung für CO₂-neutrale Logistikzentren.

2.2.2 Innovativer Beitrag und Nutzbarkeit der angestrebten Forschungsergebnisse

Mit der Erarbeitung eines Funktionsmusters für ein Planungstool und der Hinterlegung von Handlungsempfehlungen in diesem Tool steht den Planern ein Werkzeug für die ganzheitliche Konzeption von CO₂-neutralen und damit nachhaltigen Logistikzentren zur Verfügung. Erstmals werden die Anforderungen von Gebäudehülle, Gebäudetechnik und intralogistischen Anlagen wie Förder- und Lagertechnik in einem Werkzeug berücksichtigt. Eine ganzheitliche Übersicht der Energieflüsse in Logistikzentren und der Energieverbraucher samt deren Einfluss auf die Gesamtenergiebilanz zeigen die Stellschrauben zur Optimierung auf und unterstützt den Planer in der Entscheidungsfindung und Bewertung von Planungsvarianten.

Damit kann auch die geforderte Transparenz hinsichtlich der zukünftigen Energiekosten durch den Betrieb eines Logistikzentrums vom Planer abgeschätzt werden. Eine umfassende Betrachtung der Energiekosten als zusätzliches Entscheidungskriterium neben den Investitionen und Leistungsdaten einzelner Komponenten und Anlagen kann mithilfe des Funktionsmusters

bereits in der Grobplanungsphase etabliert werden. Somit können gezielt energiewirtschaftliche Aspekte in die Planung einbezogen werden.

2.2.3 Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels

Der stufenweise Entwicklungsprozess der Handlungsempfehlungen für energieeffiziente, CO₂-neutrale Logistikzentren gliedert sich in sieben aufeinander abgestimmte Arbeitspakete (AP). In Folgendem werden für jedes Arbeitspaket der methodische Ansatz und die Arbeitsschritte beschrieben. Ebenso erfolgt ein Verweis auf die entsprechenden Kapitel des Berichts, welche die Ergebnisse der Arbeitspakete beinhalten.

AP 1: Festlegung der technischen Grundlagen

Zunächst erfolgt eine Recherche zu aktuellen und anstehenden Normen und Vorschriften hinsichtlich Energieeffizienz und CO₂-Emissionen (Kapitel 0) sowie zu bestehenden und verpflichtenden Verfahren für die Energieberechnung und CO₂-Bestimmung in den Bereichen Intralogistik (Kapitel 3.3.1) sowie Gebäude und Gebäudetechnik (Kapitel 3.3.2). Weiterhin wird der Stand der Technik bezüglich energieeffizienter Lösungen in beiden Bereichen um neue Lösungen ergänzt.

AP 2: Untersuchungen bei ausgewählten Logistikzentren

Die recherchierten technischen Grundlagen werden um Erfahrungswerte aus der Praxis erweitert, indem acht Logistikzentren besichtigt (Kapitel 4.1.2) und Anwender sowie Planer von unterschiedlichen Komponenten und Anlagen mit Hilfe von Interviews und Fragebögen befragt werden (Kapitel 4.1.1).

AP 3: Festlegung von Grundelementen energieeffizienter und CO₂-neutraler Logistikzentren

In AP 3 werden einzelne funktionelle Grundelemente, aus denen sich Varianten von Logistikzentren konzipieren lassen, identifiziert und in übergeordnete Klassen eingeteilt (Kapitel 4.1.4).

Für die Grundelemente werden geeignete Kenngrößen definiert, an denen sich Planer orientieren können oder aufgrund gesetzlicher Verordnungen orientieren müssen (Kapitel 3.1). Die einzelnen Grundelemente unterstützen darüber hinaus eine aufwandsarme Abschätzung der Energiebilanz des Logistikzentrums.

AP 4: Erstellung eines Funktionsmusters zur Simulation von Wechselwirkungen und Ableitung der Gesamtenergiebilanz

Nach der Identifizierung der Grundelemente werden die Schnittstellen, das Verhalten und die Wechselwirkungen der Grundelemente zueinander herausgearbeitet (Kapitel 6). Die einzelnen Grundelemente dienen den Planern auch als Informationsquelle, damit sich diese mit der eingesetzten Technik vertraut machen können, sodass hier die Ergebnisse aus AP 1 und AP 2 einfließen werden (Kapitel 0).

AP 5: Schnittstellendefinition und Dokumentation des Funktionsmusters

In AP 5 wird eine Schnittstellenanalyse entwickelt und im Funktionsmuster eines Planungstools implementiert, sodass der Planer bei der Kombination der einzelnen Grundelemente ziel führend unterstützt wird. Hierbei wird insbesondere der Einfluss der Grundelemente auf die Energiebilanz einbezogen (Kapitel 6). Als eine Form der Unterstützung werden aus den Analysen Handlungsempfehlungen abgeleitet, welche dem Anwender durch das Planungstool bereitgestellt werden.

AP 6: Validierung der Ergebnisse

Der Einsatz der Handlungsempfehlungen sowie die Verwendung des Funktionsmusters bei der Planung werden in AP 6 anhand von ausgewählten Referenzszenarien verdeutlicht. Die Validierung wird innerhalb eines kurzen Zeitraums in drei Unternehmen durchgeführt (Kapitel 0).

AP 7: Dokumentation

Die Projektergebnisse werden während der gesamten Projektlaufzeit dokumentiert und in Fachzeitschriften, im Internet sowie auf Fachtagungen in Form von Vorträgen oder Postern

publiziert. Zur weiteren Nutzung der während des Projektes erarbeiteten Forschungsergebnisse werden diese in Form des vorliegenden ausführlichen Forschungsberichts dokumentiert. Wesentliche Inhalte sind die im Projekt festgelegten Grundelemente und Handlungsempfehlungen, die eine aufwandsarme Konzeption und Gegenüberstellung unterschiedlicher Planungsvarianten ermöglichen und dadurch das herkömmliche Planungsverfahren für Logistikzentren um den Faktor „Energetische Eignung“ erweitern.

3 Stand der Technik

Im Folgenden werden energie- und klimapolitische Anforderungen an Logistikgebäude beschrieben. Anschließend wird das Planungsvorgehen zur Konzeption von Logistikzentren beschrieben und Ansätze zur Energiebedarfsermittlung und -bilanzierung im Bereich Materialflusstechnik und Gebäudetechnik erläutert.

3.1 Energie- und klimapolitische Anforderungen an Logistikimmobilien

Die Europäische Kommission (EK) hat schon mehrmals deutlich gemacht, dass ohne zusätzliche Maßnahmen die Energieeinsparziele bis 2020 verfehlt werden [EK-2012a]. Somit hat das Europäische Parlament und der Rat die Richtlinie 2012/27/EU zur Energieeffizienz (zur Änderung der Richtlinien 2009/125/EG und 2010/30/EU und zur Aufhebung der Richtlinien 2004/8/EG und 2006/32/EG) (nachfolgend EED) initiiert. Diese ist am 5. Dezember 2012 in Kraft getreten und muss bis zum 5. Juni 2014 in nationales Recht von den Mitgliedsstaaten umgesetzt werden. Vorgesehen sind Maßnahmen zur effizienten Energienutzung entlang der gesamten Wertschöpfungskette, von der Umwandlung der Ressource über die Verteilung bis hin zur Energienutzung. Festgelegte Verpflichtungen der Ökodesignrichtlinie 2009/125/EG zur umweltgerechten Gestaltung von energiebetriebenen und energieverbrauchsrelevanten Produkten, umgesetzt in deutsches Recht durch das Energieverbrauchsrelevante-Produkte-Gesetz (EVPG), und der Richtlinie 2010/30/EU zur Energieverbrauchskennzeichnung stehen dabei in Verbindung mit der EED [EU-2012].

Auch die Verpflichtungen der im Mai 2010 verabschiedeten Richtlinie 2010/31/EU über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden stehen in Verbindung mit der EED [EK-2013]. Die Richtlinie 2010/31/EU sieht vor, dass ab 2021 alle Neubauten Niedrigstenergiegebäude sein müssen. Demnach muss ein Gebäude eine sehr hohe

Gesamtenergieeffizienz aufweisen und seinen geringen Energiebedarf zu einem wesentlichen Teil durch Energie aus erneuerbaren Quellen decken [EU-2013]. In Deutschland sehen die Beschlüsse zur Energiewende vom Juni 2011 zusätzlich einen klimaneutralen Gebäudebestand bis 2050 vor. Der Effizienzstandard von Gebäuden soll in der Energiesparverordnung (EnEV) bei wirtschaftlicher Vertretbarkeit ambitioniert erhöht werden [Hem-2013]. Neben aktuell geltenden Bestimmungen der EnEV müssen diese Voraussetzungen von allen Logistikzentren ab 2021 erfüllt werden. Dies betrifft somit auch aktuell in Planung befindliche Logistikzentren.

3.2 Planung und Arten von Logistikzentren

Die Planung technischer Logistiksysteme betrifft nach der Struktur der ganzheitlichen Planung für Fabrikstrukturen [Gün-2013a, VDI-3637] die Planungsebenen Materialfluss, Informationsfluss sowie Gebäude- und Energieversorgung.

Für die Planung vom Material- und Informationsfluss bestehen in der Literatur unterschiedliche Vorgehensmodelle, die sich in der Anzahl der Planungsschritte und dem Detaillierungsgrad unterscheiden [Gud-2010]. Grundsätzlich kann dabei das Vorgehen in die vier Phasen Vorarbeiten, Grobplanung, Feinplanung und Realisierung unterteilt werden [All-1999] (vgl. Abbildung 3.1 links). Ziel der Vorarbeiten ist die Ermittlung der Planungsdaten. Die Grobplanung unterteilt sich in die von der Technik unabhängige Strukturplanung zur Planung von Abläufen und Funktionseinheiten und die Systemplanung zur Auswahl und Dimensionierung geeigneter Materialflusstechniken. In der Phase der Feinplanung erfolgt eine Detaillierung der Struktur- und Systemplanung sowie die Erstellung der Ausschreibungsunterlagen. [Gün-2013a]

Das Vorgehen bei der Planung der Gebäude- und Energieversorgung richtet sich nach § 34 Leistungsbild Gebäude und Innenräume der

Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (HOAI) [BJV-2013]. Hiernach ist das Vorgehen in Leistungsphasen unterteilt (vgl. Abbildung 3.1 rechts).



Abbildung 3.1: Vorgehensmodell der Logistiksystemplanung (links) und die neun Planungsschritte nach der HOAI (rechts) [Gün-2013a] [BJV-2013]

Zur Planung und Ermittlung des betrieblichen Energiebedarfs ist nach Kettner in [Ket-1984], unabhängig von der Energieform, folgendes Vorgehen anwendbar:

1. Ermittlung der *Grunddaten*: a) Erfassung der Energieverbraucher nach der Energieart, b) örtliche Anordnung der Verbraucher im Layout nach Gewerken
2. Ermittlung der *Leistungsfaktoren*, *Gleichzeitigkeitsfaktoren*, *Durchschnitts-* und *Spitzenwerte* für einzelne Gewerke
3. Festlegung der *Anforderungen des Verbrauchers* an die Energieart (Leistung, technische Gestaltung, örtliche Lage, wirtschaftliche Funktion)
4. *Konzeption für die Energieverteilung*

Dabei muss eine Analyse der technischen Ausstattung des Planungsobjektes alle denkbaren Energiearten (elektrische Energie, Gas, Druckluft, sonstige Brenn- und Hilfsstoffe, Wasser) berücksichtigen.

Bei Betrachtung von Logistikzentren als Planungsobjekte variiert die technische Ausstattung stark von der zu erfüllenden Aufgabe. Für eine Kategorisierung von Logistikzentren können unterschiedliche Ansätze gewählt werden (vgl. Abbildung 3.2). Wichtig für die Bestimmung der Höhe des Energiebedarfs ist die Art der Güter und den damit einhergehenden Anforderungen

an die Logistikimmobilie, wie temperaturgeführt oder tiefgekühlt. Weiterhin ist die Art der Nutzung und der damit verbundene Grad der Automatisierung der Materialflusstechnik ein wichtiger Einflussfaktor auf den Energiebedarf.

Verbunden mit der Art der Nutzung des Logistikzentrums ist auch die Inanspruchnahme der darin enthaltenen technischen Anlagen für die Bestimmung des Energiebedarfs des Gesamtsystems ausschlaggebend. Denn die Anlagen der Intralogistik als auch die Gebäudetechnik benötigen Energie, um Arbeit im Logistikzentrum zu verrichten und dadurch eine bestimmte Leistung im Gesamtsystem zu erbringen. Desto höher die zu erbringende Leistung durch das System, desto mehr Energie wird für die Erstellung der Leistung benötigt.

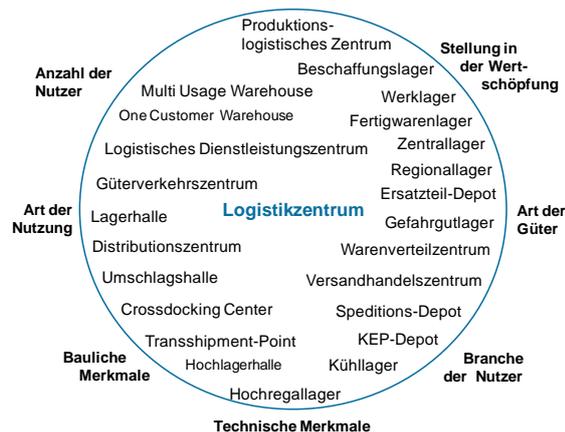


Abbildung 3.2: Kategorisierungsansätze von Logistikimmobilien [Neh-2012]

Bezogen auf den Leistungserstellungsprozess im Materialfluss ist das Ergebnis eine Logistikleistung. Vorgänge wie Lagern, Transportieren oder Kommissionieren beinhalten Veränderungen nicht stofflicher Merkmale von Gütern und besitzen dadurch einen Dienstleistungscharakter und unterscheiden sich somit vom Produktionsprozess. [Web-2012]

3.3 Energiebilanzen von Logistikzentren

Um die Energieeffizienz von Anlagen und Gebäuden zu steigern, bestehen unterschiedliche Ansätze. Erster Ansatzpunkt liegt in der Senkung

des Energieverbrauchs. Hier besteht die Möglichkeit durch Gestaltung des Gebäudes und dem Einsatz effizienter Technik strategisch den Verbrauch zu senken. Im operativen und organisatorischen Bereich lässt sich Energie durch einen optimalen Betrieb von Anlagen senken. [Kri-2010] Um die richtigen Stellhebel zur Optimierung der Energieeffizienz in der Gestaltung als auch im Betrieb von Logistikzentren zu identifizieren und energetische Zusammenhänge zu analysieren, ist eine Erfassung oder Berechnung des Energiebedarfs aller Anlagen und der Energieflüsse im gesamten System notwendig. Am häufigsten ermittelte und im Rahmen der Energieeffizienz verwendete Kennziffern sind nach Schieferdecker in [Schi-2006] der Wirkungsgrad / Nutzungsgrad und der spezifische Energieverbrauch.

Der Wirkungsgrad stellt das Verhältnis von erzieltm Nutzen zum dafür aufgebrachtem Aufwand dar. Bei Energieanwendungsanlagen ist der erzielte Nutzen die für die Prozessdurchführung erbrachte thermische oder mechanische Leistung, Lichtleistung oder erforderliche Energieabgabe eines umgewandelten Energieträgers pro Zeiteinheit, welche auf die in der gleichen Zeit eingesetzte Energie bezogen wird:

$$\eta_{en} = \frac{\text{zeitbezogener energetischer Nutzen}}{\text{zeitbezogener energetischer Aufwand}} \quad (3-1)$$

$$= \frac{\dot{Q}_N}{\dot{Q}_E} = \frac{\text{Joule/h}}{\text{Joule/h}}$$

\dot{Q}_N für den geforderten technologischen Prozessablauf erforderliche Leistung (Nutzenergie pro Zeiteinheit)

\dot{Q}_E für den gleichen Prozess zur Erzeugung der Nutzenergie-Leistung erforderliche Einsatzenergie pro Zeiteinheit

Die eingebrachte Einsatzenergie wird nur zu einem Teil in Nutzenergie gewandelt. Den zweiten Teil stellt die Verlustenergie \dot{Q}_V dar. Daraus folgt der Wirkungsgrad der Anlage:

$$\eta_{en} = \frac{\dot{Q}_E - \dot{Q}_V}{\dot{Q}_E} = 1 - \frac{\dot{Q}_V}{\dot{Q}_E} \quad (3-2)$$

\dot{Q}_V bei der Umwandlung von Einsatzenergie in Nutzenergie (beide zur selben Zeit) entstehende und quantifizierbare Verluste

Der spezifische Energieverbrauch einer Anlage z. B. für den Transport oder die Einlagerung einer Palette (erbrachte logistische Leistung pro Einheit) ist als die Bezugnahme des Verbrauches an Einsatzenergie pro Zeiteinheit auf die in derselben Zeit transportierte oder eingelagerte Palette zu definiert.

$$w = \frac{\dot{Q}_E}{\dot{m}_D} = \frac{\dot{Q}_E}{\dot{M}_p} \quad (3-3)$$

\dot{m}_D Logistische Leistung pro Zeiteinheit, hier insbesondere kurze Zeitabstände, z. .B. Stunden, weil Leistungen ins Verhältnis gesetzt werden

\dot{M}_p erbrachte Logistische Leistung in größeren Zeiträumen, z. B. Monat, Jahr

Bei zunehmend größeren Zeiträumen (deduktive Ermittlung) wird die Aussage über den spezifischen Energieverbrauch immer komplexer, weil hier vermehrt weitere Einflüsse wirksam werden, wie schwankender Durchsatz oder zunehmender Verschleiß, die schwer nachzuvollziehen sind. Die deduktive Ermittlung des spezifischen Energieverbrauchs erfolgt mit einer zählenden bzw. schreibenden Einrichtung zur regelmäßigen Aufnahme des Verbrauchs der Einsatzenergie und der Erfassung der erbrachten Logistischen Leistung (z. B. Ein-/Auslagerungen eines Regalbediengerätes pro Zeiteinheit). Der spezifische Energieverbrauch ist immer leistungsabhängig, d. h. er steht in Abhängigkeit zu der erbrachten Logistischen Leistung bzw. dem logistischen Durchsatz der jeweils betrachteten Anlage. Bei energieintensiven Anlagen macht eine induktive Ermittlung des spezifischen Energieverbrauchs mehr Sinn. Hier zeigen bereits geringe Abweichungen oder Optimierungsmaßnahmen des Energieverbrauchs deutliche Wirkungen auf die Energieeffizienz.

Um die Energieeffizienz ganzer Logistikzentren ganzheitlich zu optimieren, müssen alle Energieflüsse im gesamten System bekannt sein. Erst dann lassen sich gegenseitige Wechselwirkungen und Abhängigkeiten einzelner Anlagen abbilden. Es muss bekannt und darstellbar sein, wo und welche Energieträger eingespeist werden und in welchen Prozessen / Anlagen sie direkt oder nach Umwandlung zur Anwendung kommen.

Schieferdecker in [Schi-2006] folgend, sollten somit zuerst Bilanzen einzelner Anlagen des Gesamtsystem erstellt werden und im Anschluss die Energieflüsse nach Energieträger für das gesamte System. Auf Anlagenebene sind in Betrieben Produktionsanlagen, Umwandlungsanlagen und Nebenanlagen zu unterscheiden.

Bei der Betrachtung eines Logistikzentrums stellen die Produktionsanlagen die logistischen Anlagen, wie Flurförderzeuge, Verpackungsmaschinen oder Logistikanlagen, wie Materialfluss- und Lagertechnik zur Verrichtung einer bestimmten Funktion, dar. Umwandlungsanlagen, die nicht direkt mit der zu erbringenden Logistikleistung im Logistikzentrum stehen, sind demnach z. B. die Beleuchtung oder das Lüftungssystem.

Logistikanlagen haben, wie die Produktionsanlagen, die energetische Zielstellung, Nutzenergie zur Durchführung der zu erbringenden Arbeitsleistung im Prozessablauf so bereitzustellen, dass die Umwandlung der Einsatzenergie verlustarm erfolgt und wenig arbeitsfähige Energie Q_A nach dem Prozess verbleibt. Die eingesetzte Energie Q_{EL} für Logistikanlagen wird in Nutzenergie Q_{NL} gewandelt, wobei dabei die Verluste Q_{VL} entstehen. Damit lautet die Energiebilanz für Logistikanlagen:

$$Q_E = Q_{NL} + Q_{VL} (+Q_A) \quad (3-4)$$

Diese Energiebilanz ist kompatibel mit den dargestellten Nutzungsgraden nach (3-2) und den spezifischen Energieverbräuchen nach (3-3). Bei konstant bleibendem Nutzenergiebedarf ist abzuleiten, dass

- eine Senkung der Verluste \dot{Q}_{VL} zu einem geringeren Bedarf der Einsatzenergie führt und
- eine Reduzierung der Einsatzenergie (außer zur Erhöhung des Nutzungsgrades) immer zur Senkung des spezifischen Energieverbrauchs führt. [Schi-2006]

Umwandlungsanlagen hingegen wandeln die vom Energieversorger erworbenen Energieträger, wie Elektroenergie mit hoher Spannung oder Gas mit hohem Druck, in eine für den Betrieb eines Logistikzentrums geforderte Form oder in einen neuen Energieträger, wie Wärme zur Raumkonditionierung, um. Dazu gehören Transformatoren, die Druckluftzeugung aus Strom oder das Pumpen von Wasser. Diese Umwandlungsanlagen stehen nur im indirekten Bezug zu der Erbringung der notwendigen logistischen Leistung in einem Logistikzentrum, sodass die Berechnung des spezifischen Energieverbrauchs wenig Erkenntnisse bringen würde. Hier unterscheidet sich die Energiebilanz von den Logistikanlagen:

$$Q_B = Q_{U1} + \dots + Q_{Un} + Q_{VU} \quad (3-5)$$

Q_B eingekaufte Bezugsenergie, die in der Umwandlungsanlage U umgewandelt werden soll

Q_{VU} in U entstehende Verluste

$Q_{U1...Un}$ aus U entstandene Energieträger, z. B. Druckluft, Elektroenergie

Für die Bilanzierung aller Anlagen und derer Energieflüsse im gesamten System sind feste Bilanzierungsgrenzen zu setzen.

Alle über die Bilanzgrenze, über einen einheitlichen Betrachtungszeitraum, eintretenden Energien \dot{Q}_{zu} stellen den Input in das betrachtete System dar, alle austretenden Energie \dot{Q}_{ab} sind die abgeführten Energien, also der Output des Gesamtsystems:

$$\sum \dot{Q}_{zu} = \Delta \dot{Q}_{sp} + \sum \dot{Q}_{ab} \quad (3-6)$$

\dot{Q}_{sp} ist die Veränderung von in der Anlage gespeicherten Energie (thermisch, mechanisch oder chemisch)

Angewendet auf die Erstellung der Gesamtenergiebilanz von Logistikzentren muss der Energieverbrauch (Nutzenergie und die Verluste) und folglich die Einsatzenergie für die darin befindlichen Logistikanlagen und Umwandlungsanlagen der Gebäudetechnik zuerst ermittelt werden.

3.3.1 Energieverbrauch der Materialflusstechnik und Ansätze zur Steigerung der Energieeffizienz

Der Energiebedarf von intralogistischen Anlagen kann prinzipiell gemessen, berechnet (analytisch oder simulativ) oder geschätzt werden [Gün-2013]. Beim Schätzen erfolgt eine ungefähre Bestimmung des Energiebedarfs auf Grundlage von Annahmen. Dafür können Daten von statistischen Ämtern durch Exploration hochgerechnet oder auf Basis von Vergangenheitswerten in Form von Kennzahlen ermittelt werden [Ket-1984]. Mittels analytischer Formeln kann der Energiebedarf der Materialflusstechnik auch berechnet werden. Ein möglicher Ansatz hierfür ist die mechanische Energiebetrachtung unter Berücksichtigung von Wirkungsgraden oder die Bestimmung des Energiebedarfs über Betriebszustände. Simulative Vorgehen ermöglichen eine Berücksichtigung von dynamischen Aspekten wie die Abhängigkeit des Wirkungsgrades von elektrischen Antrieben vom Motorendrehmoment sowie der Motorendrehzahl. Weiterhin bietet eine Simulation die Möglichkeit, verschiedene Bewegungsabläufe abzubilden. Mit einem geringen Aufwand und einer hohen Genauigkeit kann der Energiebedarf mit einer geringen Fehleranfälligkeit gemessen werden. [Gün-2013] Das Messen besitzt die größte Genauigkeit bei der Bestimmung des Energieverbrauchs, eignet sich aber nur bedingt zur Anwendung in der Grobplanung.

Zur Steigerung der Energieeffizienz und Reduktion von CO₂-Emissionen lassen sich generell folgende Ansätze bei intralogistischen Anlagen

und Fahrzeugen (z. B. Stetigförderer, Regalbediengeräte oder Flurförderzeuge) identifizieren:

- Einsatz energieeffizienter Antriebssysteme und Komponenten
- Energierückspeisung
- Intelligente Steuerungskonzepte

Antriebssysteme / Komponenten

Bei Antriebssystemen wird vermehrt darauf geachtet, dass die eingesetzten Komponenten wie Frequenzumrichter, Elektromotor oder Getriebe einen möglichst hohen Wirkungsgrad aufweisen, um die elektrische Energie möglichst effizient umzuwandeln. Eine Auslegung von Antriebsmotoren erfolgt zudem unter stärkerer Berücksichtigung der Faktoren Geschwindigkeit, Nutzlast sowie Funktion, um Überdimensionierungen zu vermeiden. Bei Anwendungen mit häufigen Beschleunigungen kommen darüber hinaus immer öfter drehzahlgeregelte Antriebe zum Einsatz. Abbildung 3.3 verdeutlicht den Einfluss optimaler Komponenten auf den Gesamtwirkungsgrad einer Anlage.

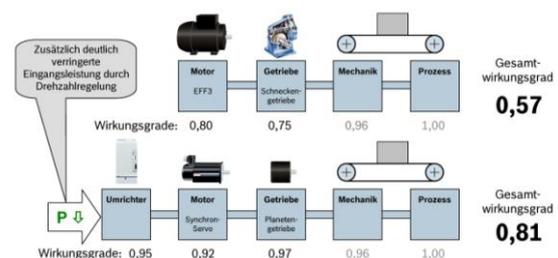


Abbildung 3.3: Optimale Kombination von Umrichter, Motor, Getriebe und Mechanik [Win-2010]

Im Bereich der Flurförderzeuge ist heutzutage neben den etablierten Antriebsarten (seriell elektrisch, hydrodynamisch oder hydrostatisch) zusätzlich eine Vielzahl von Prototypen neuartiger Antriebe in der Entwicklung und der Erprobung. Einen ersten Schritt zum CO₂-neutralen Antrieb stellen Antriebskonzepte auf Wasserstoffbasis wie der Brennstoffzellenantrieb dar, welche bereits erfolgreich im Betrieb erprobt werden. Zu nennen sind hierbei Gegengewichts- und Schubmaststapler der Firma STILL GmbH im Probetrieb bei der Firma BASF Coatings AG

[Bae-2010] [LOG-2010], zwei Gegengewichtsgabelstapler der Firma Linde Material Handling GmbH bei Linde Gas [Lin-2010], das Forschungsprojekt „E-LOG-Biofleet“ mit zehn Niederhubwagen und Europas erster Wasserstoff-Hallenbetankungsanlage [Fro-2013], das Forschungsprojekt „H2IntraDrive“ für den Einsatz von wasserstoffbetriebenen Flurförderzeugen unter Produktionsbedingungen [Mic-2014] sowie das „HyLOG“ Projekt von der Firma Fronius International GmbH mit fünf Schleppern [Fro-2010]. Letztgenanntes sieht auch die Erzeugung des Wasserstoffs im Gesamtkonzept (Abbildung 3.4).



Abbildung 3.4: HyLOG Projekt der Firma Fronius International GmbH [Fro-2010]

Energierückspeisung

Die während eines Bremsvorgangs generatorisch erzeugte Energie wird bislang durch Bremswiderstände (je nach Baugröße, für jede angetriebene Achse mindestens einer) in Wärme umgewandelt. Diese Verlustwärme wirkt sich negativ auf den Gesamtwirkungsgrad der Anlage aus. Durch den Einsatz drehzahl geregelter Antriebe und durch die Verwendung von Rückspeisemodulen kann die freiwerdende Energie in das Energienetz zurückgespeist werden und steht somit anderen Anwendungen zur Verfügung [IDE-2009] (vgl. Abbildung 3.5).

Bremswiderstände werden damit nahezu überflüssig, wodurch eine Gewichtsreduktion der Installation um bis zu 40 % erreicht werden kann. Durch den Einsatz einer sogenannten Zwischenkreiskopplung ist es darüber hinaus möglich, mehrere Umrichter derart zu koppeln, dass die generatorische Energie eines Antriebes als

motorische Energie einem Anderen direkt zur Verfügung steht [Kre-2010] (Abbildung 3.6).

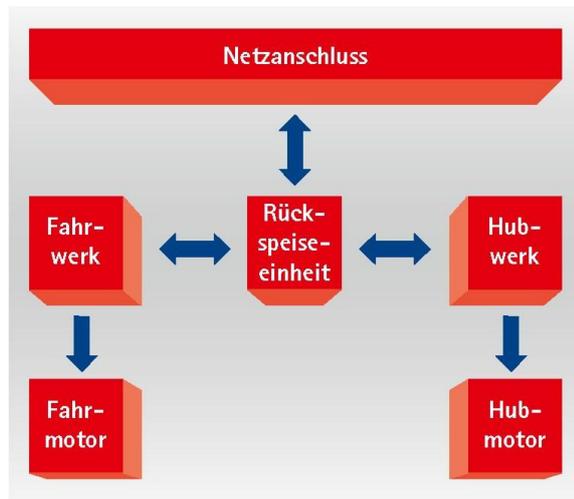


Abbildung 3.5: Energierückspeisung bei einem Regalbediengerät [Via-2010]

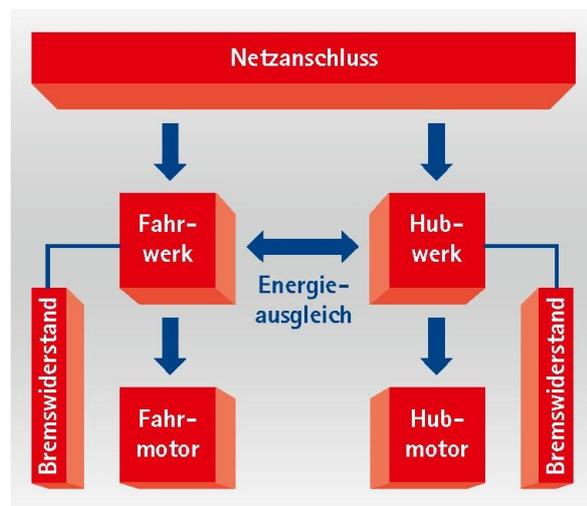


Abbildung 3.6: Energieaustausch bei einem Regalbediengerät [Via-2010]

Sinnvoll sind hierbei eine Aufteilung der einzelnen Antriebssequenzen und eine intelligente Antriebssteuerung. Diese Verfahren eignen sich besonders bei intermittierenden Verfahren manövern mit einer schnellen Abfolge von Anfahr- und Bremsvorgängen, wie sie z. B. bei Regalbediengeräten vorkommen.

Intelligente Steuerungskonzepte

Schließlich können intelligente Steuerungskonzepte in Schwachlastphasen die Dynamik redu-

zieren oder zeitweise nicht benötigte Anlagenteile stilllegen [Heb-2010]. Einen derartigen Ansatz bietet die Firma viastore systems GmbH mit dem Konzept viastoreblue. Dabei werden unter anderem Schaltschränke mit intelligenten Stromzählern ausgestattet, um Energieverbrauch und Leistungsaufnahme im Lager messen zu können. Ein intelligentes Warehouse Management System (WMS) überwacht die gesamte Anlage und kann beispielsweise die Automatikkomponenten eines Lagers individuell und anforderungsabhängig ansteuern [Via-2010a, LOG-2010b]. Weitere Konzepte bestehen in einer energieeffizienten Bahnplanung von Regalbediengeräten (RBG). Der Ansatz besteht darin, durch Eingriff in die Bahnkurve den gegenseitigen Energieaustausch zwischen Fahr- und Hubantrieb mit Zwischenkreis so zu gestalten, dass der Energieverbrauch für ein Arbeitsspiel möglichst gering wird [Ert-2013b]. Auch bestimmte Lagerbetriebsstrategien können zu Reduzierungen des Energiebedarfs von RBG führen. Untersuchungen dazu zeigen, dass in einer Anpassung der Fahrgeschwindigkeit der RBG an den erforderlichen Durchsatz je Stunde eine Energieeinsparung bis zu 37 % möglich ist [Sie-2013].

Auch Hersteller von Flurförderzeugen sehen bei Fahrzeugen mit herkömmlichem Antrieb energieeffiziente Fahrprogramme wie z. B. das Blue-Q Konzept der Still GmbH vor [Bae-2009]. Hersteller von elektrischen Antriebssystemen bieten vermehrt sogenannte Energy Monitoring Systeme an, um die während des Betriebes verbrauchte Energie zu erfassen, z. B. [Kra-2010].

3.3.2 Energieverbrauch des Gebäudes und Nutzung regenerativer Energien

Die aktuell gültige Fassung der [EnEV-2009] ermöglicht eine gesamtheitliche Betrachtung des Gebäudes unter Einbeziehung der Anlagen- und Bautechnik. Die Verordnung unterscheidet dabei zwischen Wohn- und Nichtwohngebäuden, bei Nichtwohngebäuden wird nochmals zwischen normal beheizten ($> 19\text{ °C}$) und niedrigbeheizten Gebäuden (12 °C bis 19 °C) unterschieden. Dabei werden auch interne Quellen wie Beleuch-

tung oder Personen einbezogen. Prozesse, wie in diesem Fall die Intralogistik, werden allerdings nicht mit betrachtet. Abbildung 3.7 zeigt die Einflussgrößen bei der Bilanzierung des Primärenergiebedarfs.

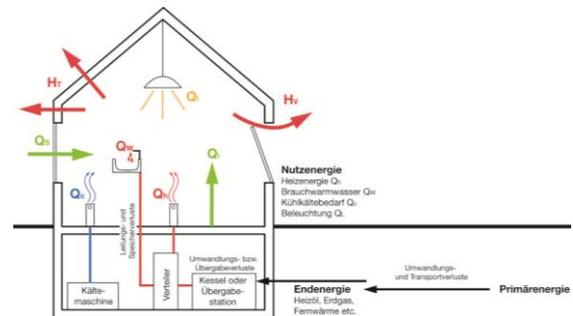


Abbildung 3.7: Einflussgrößen bei der Bilanzierung des Primärenergiebedarfs [Hau-2009a]

Die Anforderungen an das Gebäude werden dabei über das sogenannte Referenzgebäudeverfahren definiert. Dabei wird das Gebäude, wie es in der Realität errichtet werden soll (Geometrie, Ausrichtung etc.), mit einer vorgegebenen Referenzausführung ausgestattet, d. h. Bauteile, Anlagentechnik und sonstige Randbedingungen wie Wärmebrücken oder Nutzungsparameter werden definiert. Der resultierende Jahres-Primärenergiebedarf stellt dabei den maximal zulässigen Höchstwert dar. Anschließend wird das Gebäude in der tatsächlichen Ausführung gerechnet. Dabei können beispielsweise Bauteile mit schlechteren Werten als die des Referenzgebäudes durch effiziente Anlagentechnik ausgeglichen werden.

Die Berechnung erfolgt nach den Vorgaben der [DIN 18599] in elf Teilschritten, welche die Berechnung von Nutz-, End- und Primärenergiebedarf für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwasser und Beleuchtung definiert. Die aktuelle Fassung wurde im Dezember 2011 veröffentlicht. Gebäude, die für eine geringe Beheizung ausgelegt werden ($< 12\text{ °C}$), fallen nicht unter die Nachweispflicht der EnEV.

Das am 01.01.2009 in Kraft getretene Erneuerbare Energien Wärmegesetz (EEWärmeG) verfolgt das Ziel, den Anteil der erneuerbaren Energien am Endenergieverbrauch für Wärme bis zum

Jahr 2020 auf 14 % zu erhöhen. Um dieses Ziel zu erreichen, hat der Gesetzgeber bei Bereitstellung von Raum-, Kühl-, Prozesswärme und Warmwasser eine anteilige Nutzungspflicht erneuerbarer Energieträger bei zu errichtenden Wohn- und Nichtwohngebäuden vorgesehen [EEWG-2011].

Abbildung 3.8 zeigt die Energieträger und die zugehörigen Mindestanteile zur Deckung des Wärmeenergiebedarfs. Daneben gibt es weitere Möglichkeiten, die ersatzweise umgesetzt werden können: Die Nutzung von Abwärme, die Nutzung von Wärme aus KWK-Anlagen mit min. 50 % Deckungsanteil des Wärmeenergiebedarfs, der Anschluss an ein Nah- oder Fernwärmenetz auf Basis erneuerbarer Energien oder ein um min. 15 % verbesserter Wärmeschutz der EnEV-Anforderung. Eine Befreiung vom EEWärmeG kann nur erfolgen, wenn keine erneuerbaren Energien genutzt noch Ersatzmaßnahmen ergriffen werden können [EEWG-2011].

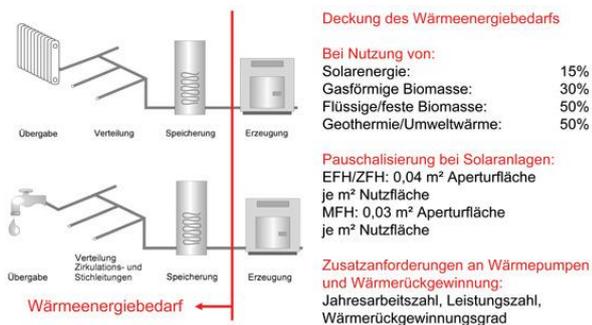


Abbildung 3.8: Anteile erneuerbarer Energien gemäß EE-WärmeG [Hau-2009b]

4 Bestimmung von Grundelementen und Modellierung unterschiedlicher Arten von Logistikzentren

In diesem Kapitel wird zuerst das Vorgehen zur Bestimmung wiederkehrender Grundelemente von Logistikzentren vorgestellt. Aufbauend auf den identifizierten Grundelementen werden Untersuchungsmodelle zur Analyse der Wechselwirkungen definiert. Abschließend erfolgt die Beschreibung des Vorgehens bei der Durchführung der Parameterstudien und der Analyse von energierelevanten Stellschrauben im Gesamtsystem Logistikzentrum.

4.1 Bestimmung von Grundelementen

Ziel bei der Bestimmung der Grundelemente ist die Identifizierung von wiederkehrenden Grundelementen in Logistikzentren und die Hinterlegung dieser mit energierelevanten Kennwerten. Durch eine Kombination der Grundelemente sollen sich abhängig von den logistischen Anforderungen verschiedene Varianten von Logistikzentren konzipieren lassen. Planern wird damit ein schneller Überblick über den Energiebedarf im Gesamtsystem verschafft und die energetischen Wechselwirkungen zu anderen Grundelementen werden aufgezeigt.

Um einerseits die Anforderungen an die bereitzustellenden Informationen der Grundelemente aus Planersicht aufzunehmen und andererseits die Anforderungen an das zu entwickelnde Planungstool festzulegen, werden zuerst Experteninterviews durchgeführt. Zur Bestimmung der Grundelemente werden Logistikzentren besichtigt und um die Angaben der im Anschluss durchzuführenden Online-Befragung von Betreibern und Mietern von Logistikzentren erweitert. Weiterhin dient die Online-Umfrage zum Energieeffizienz-Benchmarking von Logistikzentren sowohl der Feststellung des aktuellen Stands bei der Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen als auch dem Aufzeigen von Hemmnissen bei deren Einführung.

4.1.1 Experteninterviews mit Planern

Im Rahmen der Interviews werden Experten als Sachverständige, die ein im Hinblick auf das Forschungsthema spezifisches Wissen mitbringen, am Anfang der Projektlaufzeit befragt. Adressaten sind zwei Planer und ein Komponentenhersteller aus dem Bereich Logistik und ein Planer aus dem Gebäudebereich.

Ziel der Experteninterviews ist, den aktuellen Wissensstand in der Praxis hinsichtlich energieeffizienter Planung von Logistikzentren aufzunehmen und die Anforderungen und Bedürfnisse an die zu generierenden Handlungsempfehlungen zu definieren. Die Interviews werden mit einem offenen Interviewleitfaden mit erzählgenerierenden Fragen durchgeführt, um sowohl inhaltlichen Fokus zu bewahren als auch eine selbstständige Schilderung mit eigener Relevanzsetzung der Experten zu gewährleisten [Küh-2009].

Zur Einschätzung der Entwicklung und Nachfrage nach energieeffizienten Logistikzentren und im speziellen energieeffizienter Gebäudetechnik und Materialflusstechnik geben die meisten Experten an, dass die Nachfrage gering ist bzw. eher vermehrt aus dem Bereich Fabrikplanung als aus der Logistikbranche kommt. Die meisten Kunden entscheiden sich weiterhin für kostengünstige Lösungen und somit geringe Investitionen sowie schnelle Amortisationszeiten. Insbesondere auf der Investorensseite hat noch kein Umdenken stattgefunden, hier stellt Energieeffizienz noch kein Verkaufsargument dar. Die Experten geben zusätzlich an, dass zunehmend Lebenszykluskostenbetrachtungen im Vordergrund stehen müssen, denn ökologische Investitionen sind i. d. R. immer höher.

Die Klassifizierung von Logistikimmobilien betreffend sind sich alle Experten einig, dass entscheiden ist, was gelagert, umgeschlagen oder kommissioniert werden soll. Das Gut stellt somit die Anforderungen an die Lagerbedingungen wie Temperatur oder Luftfeuchtigkeit und an die Lagerart. Als weitere wichtige Kriterien für die Auslegung von Logistikzentren der Durchsatz und die Durchlaufzeiten genannt. Diese legen wiederum den Grad der Automatisierung und die Größe des Gebäudes fest.

Das Vorgehen bei der Planung unterscheidet sich bei den Experten nach der Art des zu planenden Objektes. Hier ist relevant, ob es sich um eine Umplanung/Optimierung, Erweiterung, Neuplanung mit Restriktionen durch das Grundstück oder Planung auf der grünen Wiese handelt. Geplant wird von innen nach außen, ausgehend von den durchzuführenden Prozessen, sodass zu der Intralogistik die Gebäudetechnik und die Gebäudehülle dazukommen. Generell wird aber je nach geforderter Solltemperatur und Anforderungen des Lagerguts ein Heiz- und/oder Kühlsystem installiert. In der Regel werden in Logistikzentren Rauch- und Wärmeabzugsanlagen (RWA) eingeplant, weil die Temperatur im Logistikzentrum 35 °C nicht übersteigen darf.

Zu energieeffizienten Planungsmaßnahmen und möglichen Wechselwirkungen zwischen Gebäude und Intralogistik nennt einer der Experten die potenzielle Abwärme des Lagerguts. Bei der Planung und Auslegung des Heiz- oder Kühlsystems wird die gespeicherte Energie in der Ware mit einkalkuliert, in dem z. B. eine Simulation der Wärmeströme im Logistikzentrum in Verbindung mit den Warenströmen unter Einbezug der Temperatur der eintreffenden Ware erfolgt. Die Abwärme der Intralogistik wird nicht betrachtet, da es sich um Prozesswärme handelt (vgl. Kapitel 3.3.2).

Die größten Stellschrauben zur Erhöhung der Energieeffizienz von Logistikzentren sehen alle Experten im Neubau und somit in einer frühen Planungsphase an. Hierfür sollten auch die Handlungsempfehlungen bereitgestellt werden, welche eine einfache Bewertung und Auswahl

von Planungsalternativen unterstützen. Die Experten sind sich auch einig, dass in dieser frühen Phase auch eine Abstimmung zwischen den unterschiedlichen Gewerken stattfinden muss, sodass die Materialflussplanung und Gebäudeplanung aufeinander abgestimmt werden können. Wie in Abbildung 4.1 dargestellt, soll das zu entwickelnde Planungstool entsprechend dem Planungsvorgehen in der Grobplanung Anwendung finden, da hier das größte Potential liegt, das Logistikzentrum ganzheitlich energieeffizient zu gestalten. In den späteren Planungsphasen sind die Auswahlmöglichkeiten zur Gestaltung des Systems nach Meinung der Experten sehr beschränkt.

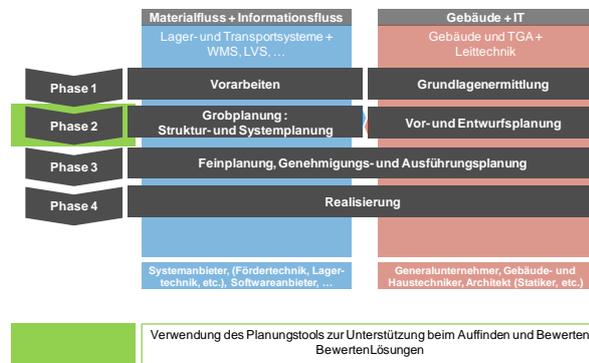


Abbildung 4.1: Integrales Planungsvorgehen für energieeffiziente Logistikzentren mit Anwendung des Planungstools in der Grobplanungsphase

Es besteht allgemein eine Übereinstimmung darüber, dass der Beitrag des Forschungsvorhabens hauptsächlich nur darin bestehen kann, Handlungsempfehlungen und Wechselwirkungen von einzelnen Alternativen aufzuzeigen. Nach Meinung der Experten wird es schwierig, allgemeingültige Aussagen für die Planungsphase zu treffen, weil jedes Gebäude durch die spezifischen Anforderungen der Intralogistik speziell ausgelegt und individuell ausgestattet wird. Als Anforderung an das Planungstool werden eine einfache, übersichtliche und schnell erfassbare Informationsdarstellung sowie eine intuitive Bedienung genannt. Weiterhin soll sowohl die Einarbeitungszeit zur Nutzung des Planungstools als auch der Installationsaufwand gering sein.

4.1.2 Besichtigungen von Logistikzentren

Die Besichtigungen dienen der Bestimmung von wiederkehrenden Grundelementen von Logistikzentren. Zu Anfang der Projektlaufzeit werden gemeinsam durch beide Forschungsstellen acht Logistikzentren unterschiedlicher Ausprägung besichtigt und auf gleichartige Elemente aus dem Bereich Intralogistik, Gebäudetechnik und Gebäudehülle analysiert. Dazu wird ein Fragebogen erstellt, um alle Grundelemente des besichtigten Logistikzentrums aufzunehmen. Abgefragt werden allgemeine Daten wie Standort und Baujahr, Daten zur Gebäudetechnik wie verwendete Energieträger mit dem jährlichen Verbrauch, Heiz- und Kälteübergabesysteme, Temperaturniveaus, Nutzungsflächen und Beleuchtung pro Lagerzone sowie logistische Kennwerte zum Durchsatz wie Anzahl der Anlieferungen am Tag und Warenausgangspositionen, installierte intralogistische Anlagen und deren Leistungskennwerte und Lagerkapazitäten.

Eine Übersicht der besichtigten Logistikzentren gibt Abbildung 4.2. Hier wird die extrem große Bandbreite deutlich, wie Logistikzentren baulich ausgeführt werden können.

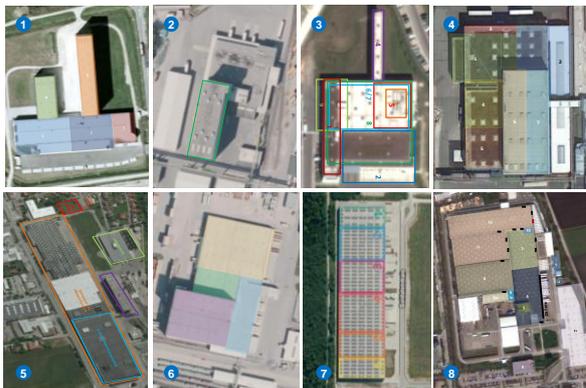


Abbildung 4.2: Übersicht zur baulichen Ausführung der besichtigten Logistikzentren (Bildquelle: google maps)

Dennoch lassen sich bauliche Gemeinsamkeiten identifizieren: Da bei Neubauten durch die EnEV gewisse Standards beim Wärmedurchlass der Bauteile vorgeschrieben sind, besitzen die neueren Gebäude alle eine Dämmung, vereinzelt gibt es Fassadenfenster, die jedoch über Augenhöhe verbaut sind und keinen Sichtbezug nach außen

gewähren. Der Dachfensteranteil bezogen auf die Grundfläche erscheint in der Regel die Minimalanforderung nicht zu überschreiten.

Als Übergabesystem ist meistens eine Umluftheizung verbaut, die öl- bzw. gasbetrieben ist, teilweise ist die Heizung mit einem Raumlufttechnik-System (RLT) kombiniert, das die Außenluft steuert. In einem Fall kommt eine strombetriebene Luftwärmepumpe zum Einsatz. Zwei große Betriebe, die mehrere Gebäude auf ihrem Gelände betreiben, nutzen als Energiequelle ein dampfbetriebenes Wärmenetz. Selten wird eine Strahlungsheizung verwendet, dies erfolgte in einem Fall zur Beheizung einzelner zonierter Arbeitsbereiche. In drei Betrieben werden Teilbereiche des Gebäudes gekühlt, dies erfolgt in zwei besichtigten Logistikzentren mit strombetriebenen Fan-Coils. Einmal wird der auf dem Gelände zur Verfügung stehende Dampf zur Kühlung verwendet.

Gemeinsamkeiten im Bereich Intralogistik der besichtigten Logistikzentren bestehen im Folgenden: Ein automatisches Hochregallager besitzen fünf der besichtigten Logistikzentren, weitere vier ein automatisches Kleinteilelager. In beiden Fällen wird das Lager immer mit Regalbediengeräten bewirtschaftet, nur in einem Fall sind die Regalbediengeräte im automatischen Hochregallager mit Rückspeiseeinheiten ausgestattet. In fünf Fällen ist ein manuell betriebenes Lager vorhanden. Bei allen sind elektrisch betriebene Flurförderzeuge unterschiedlicher Arten im Einsatz. In einen Fall ist die FFZ-Flotte mit Energierückspeisemodulen ausgestattet. Geladen werden die durchweg eingesetzten Blei-Akkumulatoren der FFZ zur Hälfte mit Trafotechnik und zur anderen Hälfte mit Hochfrequenz-Technik. Ist ein HRL vorhanden, ist auch immer entsprechende GLT-Fördertechnik installiert. Das Gleiche trifft beim AKL zu. Ist dieses vorhanden, sind auch Band- und Rollenförderer zum Transport von KLT installiert. Weiterhin jeweils einmal vertreten sind Kartonfaltmaschinen, automatische Etikettieranlagen, Folienstretcher, Handhabungshilfen, Ringsorter, Portalroboter und dreimal Umreifungsmaschinen.

Neben Wareneingang, Lagerung und Warenausgang wird in allen Fällen kommissioniert und/oder sortiert. Weitere Tätigkeiten sind Verpacken oder Umpacken. Je komplexer und dynamischer die zu erbringende Logistikleistung im Logistikzentrum ist, desto höher gestaltet sich der Automatisierungsgrad der Intralogistik.

4.1.3 Online-Umfrage: Energieeffizienz-Benchmarking für Logistikzentren

Neben den qualitativen Experteninterviews und Besichtigungen wird eine Unternehmensbefragung durchgeführt, um den aktuellen Stand hinsichtlich der Umsetzung von energieeffizienten Maßnahmen in Logistikzentren aufzunehmen. Auch dient die Befragung der Generierung einer größeren Datenbasis für die Festlegung wiederkehrender Grundelemente unterschiedlicher Arten von Logistikzentren.

Aus zeitökonomischen Gründen wird die Befragung als Online-Umfrage mit einem auf dem Server abgelegten Fragebogen durchgeführt. Verwendet wird die Software von Quest Back Unipark (vgl. Abbildung 4.3). Vorteil hierbei ist, dass die Respondenten bei der Beantwortung der Fragen räumlich und zeitlich flexibel wird und keinen weiteren Aufwand mit dem Rücksenden des Fragebogens haben.

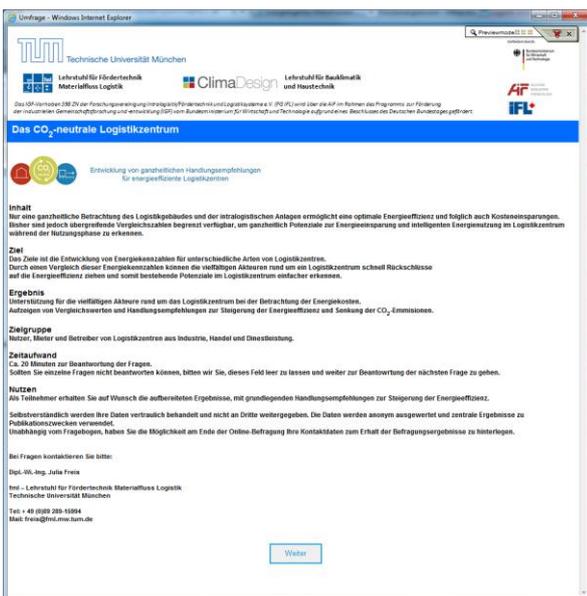


Abbildung 4.3: Startseite der Online-Umfrage

Die gegebenen Antworten werden anonym in einer Datenbank gespeichert und erleichtern die spätere Auswertung der Daten. Befragt werden Nutzer, Mieter oder Betreiber von Logistikzentren aus Industrie, Handel und Dienstleistung im Zeitraum Dezember 2012 bis April 2013. In diesem Zeitraum wird die Online-Umfrage 562 Mal aufgerufen. An der Umfrage nehmen insgesamt 26 Personen teil.

Von den teilgenommenen Personen üben 65 % eine leitende Funktion aus, davon gehören 42 % zur Geschäftsführung. Kleine und mittelständische Unternehmen (KMU) sind in der Umfrage mit 34 % vertreten. Aufgeteilt nach Branche, gehören 42 % der Befragten zur Industrie, 31 % sind Dienstleister und 27 % stammen aus dem Handel. Von den Teilnehmern sind 62 % Eigentümer der von ihnen betrachteten Logistikimmobilie.

Auf die Frage, ob das Lagergut im Logistikzentrum besonderen Anforderungen unterliegt, antworten 42 % mit Nein. 31 % der Umfrageteilnehmer geben an, dass sie Gefahrstoffe lagern und bei 15 % stellt das Lagergut unter anderem besondere Anforderungen an die Umgebungstemperatur (vgl. Abbildung 4.4).

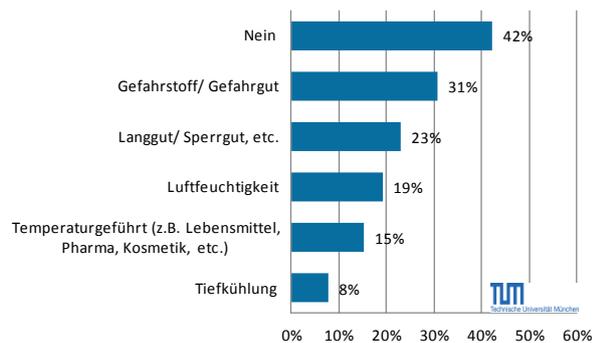


Abbildung 4.4: Anforderungen des Lagerguts an das Logistikzentrum (Frage: Unterliegt Ihr Lagergut besonderen Anforderungen? (Mehrfachantworten möglich))

Wie die entsprechenden Güter im Logistikzentrum gehandhabt werden, ist in Abbildung 4.5 dargestellt. Temperaturgeführte und tiefgekühlte Güter werden zu 100 % bei den Befragten im Logistikzentrum manuell gehandhabt. Nur Güter ohne besondere Anforderungen werden zu 25 %

vollautomatisch und zu 35 % halbautomatische gelagert und gehandhabt.

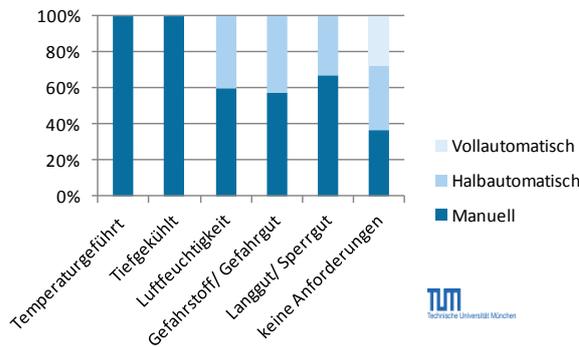


Abbildung 4.5: Art der Handhabung der Güter nach ihren Anforderungen an das Logistikzentrum (Frage: Wie hoch ist der Grad der Automatisierung in Ihrem Logistikzentrum? / Unterliegt Ihr Lagergut besonderen Anforderungen? (Mehrfachantworten möglich))

Insgesamt sind 11 % der von den Teilnehmern betrachteten Logistikimmobilien voll automatisiert. 35 % der Teilnehmer geben an, dass ihr Logistikzentrum halb automatisiert ist und 50 % der Teilnehmer betreiben ein manuelles Logistikzentrum. Gearbeitet wird bei 35 % der Befragten in drei Schichten (24/7), bei 27 % in zwei Schichten und bei 34 % in einer Schicht mit acht Stunden.

Zum Thema Energieeffizienz geben 19 % der Teilnehmer an, keine Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz in ihrem Logistikzentrum umgesetzt zu haben. Als Grund hierfür wird mit 50 % fehlendes Know-how bzw. der aufwendige Wissensaufbau angegeben (vgl. Abbildung 4.6).

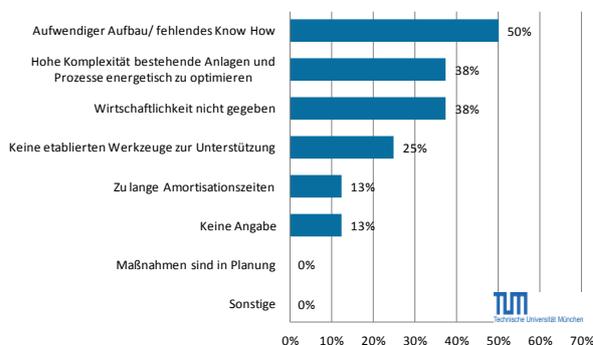


Abbildung 4.6: Gründe und Hemmnisse für nicht eingeführte Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz (Frage: Welche Herausforderungen oder Hindernisse sehen Sie bei

der Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen, sodass keine durchgeführt wurden? (Mehrfachnennung möglich))

Mit 38 % wird die hohe Komplexität genannt, bestehende Anlagen und Prozesse energetisch zu optimieren. 38 % geben eine nicht vorhandene Wirtschaftlichkeit als Hemmnis für die Umsetzung von Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz an.

Bei 66 % der Befragten sind Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz im Logistikzentrum umgesetzt. Die Auslöser und die damit verbundenen Zielstellungen sind in Abbildung 4.7 zu sehen. Bei 88 % der Befragten sind Kostensenkungen und Effizienzsteigerungen die Auslöser für die Umsetzung von Maßnahmen. Die steigenden Energiepreise geben 82 % der Teilnehmer als Grund an. Eine Ausrichtung an die Firmenziele (59 %) und eine Verbesserung des eigenen Images (35 %) sind weitere Gründe, warum die Befragten Energieeffizienzmaßnahmen umsetzen.

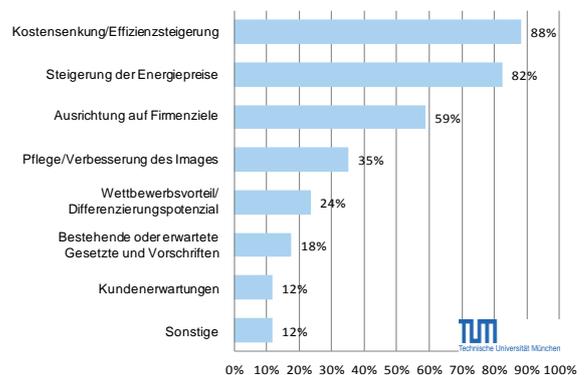


Abbildung 4.7: Auslöser und Ziele für eingeführte Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz (Frage: Was waren die Auslöser bzw. welche Ziele wurden mit den Maßnahmen verfolgt? (Mehrfachnennung möglich))

Zur Identifikation von wiederkehrenden Grundelementen von Logistikzentren werden die Umfrage-Teilnehmer nach der eingesetzten Materialflusstechnik sowie Gebäude- und Energieversorgungstechnik befragt. In Abbildung 4.8 sind die Angaben der Befragten zur eingesetzten Technik im Logistikzentrum zu den Systemelementen Fördermittel, Lagertechnik, Kommissionier- und Sortiertechnik, Verpackungstechnik und Handhabungstechnik zu sehen. Im Bereich

4 Bestimmung von Grundelementen und Modellierung unterschiedlicher Arten von Logistikzentren

Fördern werden zu 96 % Flurförderzeuge und zu 12 % autonome Flurförderzeuge bei den Befragten eingesetzt. Im Bereich Lagern betreiben 69 % u. a. ein manuelles Lager sowie ein Hochregallager. 23 % der Teilnehmer haben ein automatisches Kleinteilelager und die entsprechende Kleinladungsträger-Fördertechnik dazu. Die Mann-zu-Ware-Kommissionierung (MzW) wird bei 77 % durchgeführt. Im Bereich Handhaben und Verpacken sind die manuellen Arbeitsplätze mit jeweils 69 % am stärksten vertreten.

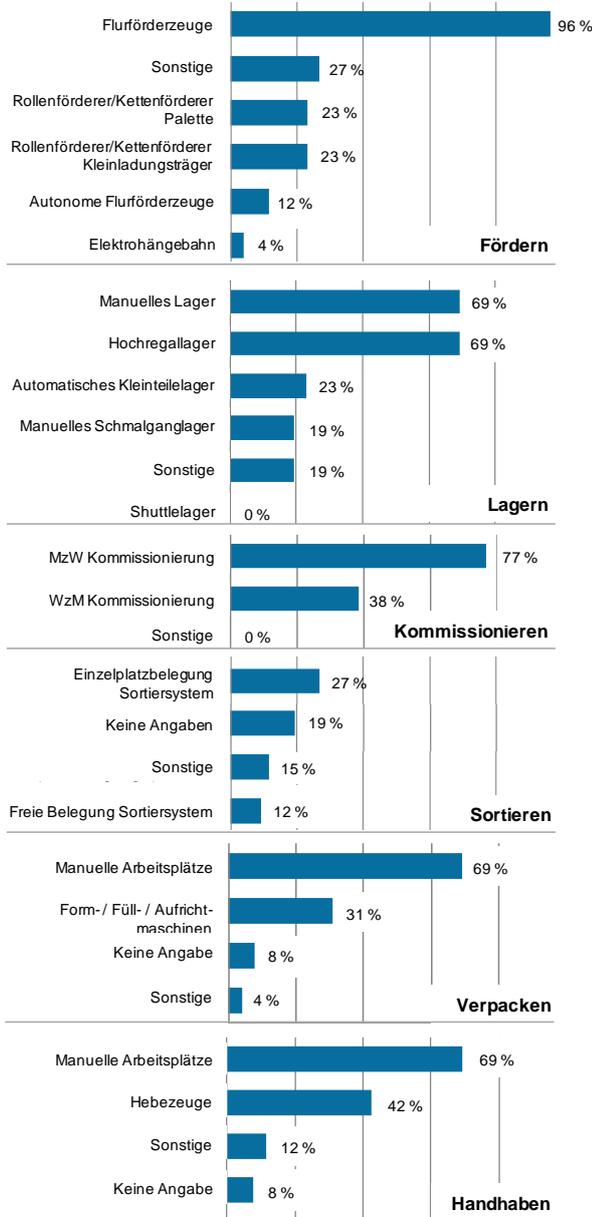


Abbildung 4.8: Eingesetzte Techniken und Systeme im Logistikzentrum bei den Umfrageteilnehmern gegliedert nach den zu erfüllenden Funktionen (Mehrfachnennungen möglich)

Betreffend die Gebäude- und Energieversorgung sind in Abbildung 4.9 die eingesetzten Energieträger oder Techniken zur Wärmeerzeugung im Logistikzentrum der Umfrage-Teilnehmer dargestellt. Mit 58 % ist Gas der Energieträger, der bei den meisten der Befragten zur Wärmeerzeugung eingesetzt wird.

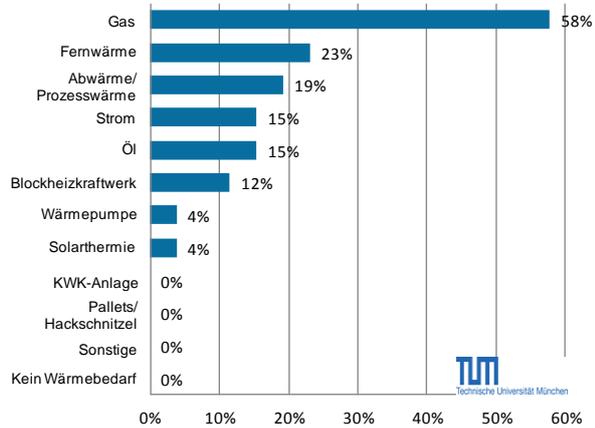


Abbildung 4.9: Bereitstellung von Wärmeenergie im Logistikzentrum (Frage: Wenn Wärmebedarf im Logistikzentrum besteht, wie wird die Wärme erzeugt? (Mehrfachnennung möglich))

Neben der Wärmeerzeugung ist auch die Verteilung relevant. Auf die Frage, welches Heizsystem für die Logistikflächen eingesetzt wird (vgl. Abbildung 4.10), antworten 58 % mit einer Luftheizung. In 19 % der Fälle geben die Befragten an, ihre Logistikflächen mit einer Flächenheizung zu konditionieren.

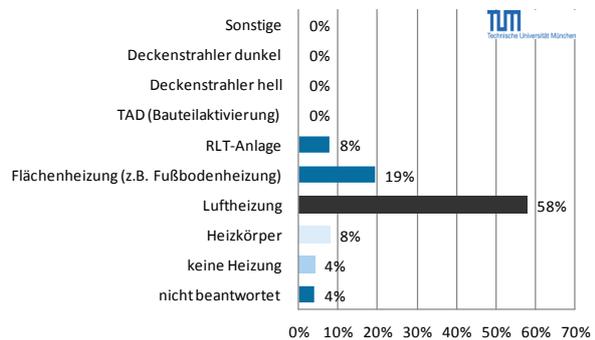


Abbildung 4.10: Eingesetztes Heizsystem im Logistikzentrum (Frage: Welches Heizsystem wird für die Logistikflächen eingesetzt? (Mehrfachnennung möglich))

69 % der Teilnehmer geben an, ihr Logistikzentrum natürlich zu lüften (Fenster / Tore). Die Nutzung von Tageslicht erfolgt bei 69 % über Dach-

oberlichter und bei weiteren 27 % über Fassadenfenster. 4 % geben an, dass die Nutzung von Tageslicht im Logistikzentrum nicht gewollt ist. Zur künstlichen Beleuchtung des Logistikgebäudes werden bei 85 % der Befragten Leuchtstoffröhren mit Vorschaltgerät verwendet. Bei 23 % sind LED im Einsatz und bei 15 % Halogen-Metaldampf-Leuchten.

4.1.4 Ableiten von Grundelementen zur Konzeption von Logistikzentren

Aus der Analyse der Besichtigungen und der Online-Umfrage lassen sich bestimmte wiederkehrende Grundelemente identifizieren. Aus diesen einzelnen Grundelementen sollen durch Kombination unterschiedliche Arten von Logistikzentren konzipierbar sein.

Wie in Kapitel 3.2 beschrieben, wird das Logistikzentrum für eine ganzheitliche Betrachtung in die Bereiche Intralogistik, Gebäudehülle und Haustechnik unterteilt. Innerhalb dieser Bereiche werden die Klassen gebildet, denen die abzuleitenden Grundelemente zugeordnet werden. Der Informationsfluss, d. h. die Steuerung des Mate-

rialflusses als auch die Gebäudeleittechnik werden im Forschungsvorhaben nicht weiter betrachtet. Abbildung 4.11 gibt einen Überblick der Klassen aus den Bereichen Intralogistik, Gebäudehülle und Gebäudetechnik mit den jeweils dazugehörigen identifizierten Grundelementen wieder. Im Bereich Intralogistik werden analog den Systemelementen der Materialflusstechnik die Klassen Fördern, Lagern, Kommissionieren/Sortieren, Handhaben und Verpacken gebildet. Zusätzlich wird für die weiteren Untersuchungen die Klasse Materialfluss mit dem Grundelement Layout gebildet, welche die Materialflusstechnik im Ganzen betrachtet und somit als ein Grundelement die Gebäudehülle in der Planung bestimmt. Der Bereich Gebäudehülle umfasst die Klassen Dämmung, Fassadenfenster, Dachfenster, Verladetore und die Kubatur des Logistikzentrums. Im Bereich Haustechnik werden die Klassen Heiz- und Kühlsystem, Lüftung und Beleuchtung gebildet. Die identifizierten Grundelemente der dargelegten Klassen werden aufgrund der aufgetretenen Häufigkeiten bei den Besichtigungen und der Online-Umfrage festgelegt und erfahren Bestätigung durch den Projektbegleitenden Ausschuss.

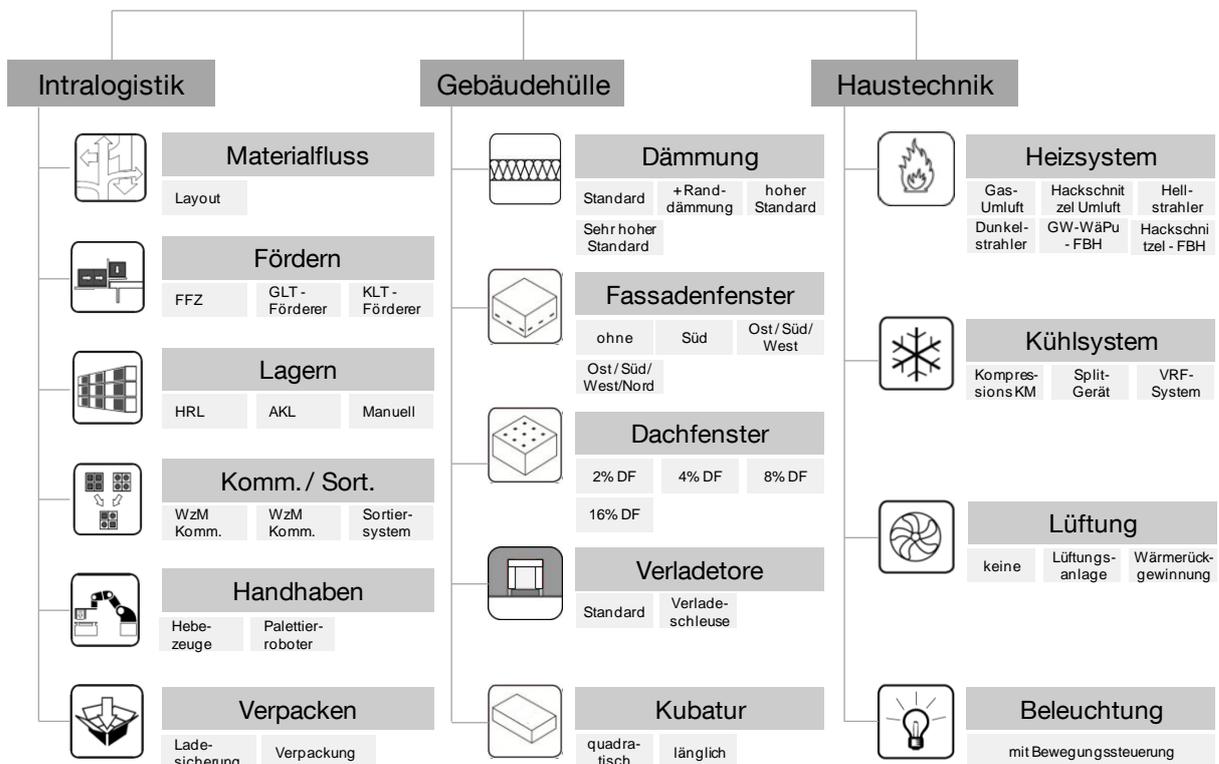


Abbildung 4.11: Übersicht der identifizierten Klassen mit den zugehörigen Grundelemente

4.2 Konzeption von Gesamtsystemen für unterschiedliche Logistikzentren

Aufbauend auf den identifizierten Grundelementen werden im Folgenden Untersuchungsmodelle konzipiert. Diese richten sich zuerst nach der Art des Gutes und dessen Anforderungen, sodass unterschiedliche Temperaturniveaus für die Parameterstudien festgelegt werden können. Um die Art der Nutzung abzubilden, werden drei Logistikzentren mit steigendem Automatisierungsgrad modelliert, um die Wechselwirkungen zum Gebäude und die Auswirkungen auf die Gesamtenergiebilanz zu analysieren. Die Typologien der Untersuchungsmodelle werden mit den unterschiedlichen Temperaturniveaus jeweils kombiniert und die Grundelemente der Bereiche Intralogistik, Gebäudetechnik und Gebäudehülle einzeln variiert (vgl. Abbildung 4.12).



Abbildung 4.12: Kombinationsmöglichkeiten der Temperaturniveaus mit den Untersuchungsmodellen und den Grundelemente der Bereiche Intralogistik, Gebäudetechnik und Gebäudehülle

4.2.1 Unterschiedliche Temperaturniveaus

Die Anforderungen an die Innenraumtemperatur hängen von den Vorgaben des jeweiligen Betriebs ab. Um ein möglichst großes Spektrum an Praxisanforderungen abzubilden, werden für die Untersuchungen drei verschiedene Temperaturniveaus festgelegt. Diese basieren auf den Erfahrungen aus den Besichtigungen unterschiedlicher Logistikzentren.

Es werden zwei beheizte Modelle erstellt. Im Ersten wird eine Innenraum-Solltemperatur von 12 °C angenommen, wie sie in der [DIN 18599-10] gefordert ist. Diese Temperatur gilt für die Haupthallen, in denen Menschen arbeiten. In

automatisierten Bereichen, wie dem automatisierten Hochregallager, in dem sich keine Personen aufhalten, werden 4 °C als Frostschutz angesetzt. Da sich in den Besichtigungen wiederholt gezeigt hat, dass vor allem große Betriebe höhere Temperaturen für die Mitarbeiter bereitstellen, wird zum anderen als zusätzliche Innenraum-Solltemperatur 17 °C untersucht. Um ein Kühlager abzubilden, bei dem die Güter gekühlt werden müssen, wird die maximale Solltemperatur auf 6 °C für alle Gebäudebereiche festgelegt.

Tabelle 4.1: Innenraum-Solltemperaturen in den verschiedenen Gebäudebereichen

	Temperaturniveau 17 °C	Temperaturniveau 12 °C	Temperaturniveau 6 °C
Haupt-halle	min. 17 °C	min. 12 °C	max. 6 °C
HRL	min. 4 °C	min. 4 °C	max. 6 °C
AKL	min. 4 °C	min. 4 °C	max. 6 °C

4.2.2 Erstellung der Untersuchungsmodelle

Für die angehenden Parameterstudien werden im Folgenden die drei definierten Typen von Logistikzentren entsprechend ihres Automatisierungsgrades der Materialflusstechnik modelliert. Bei der anschließenden Bilanzierung der Energieströme mit der Software „ZUB Helena“ nach [DIN18599] im Monatsbilanzverfahren werden der Trinkwarmwasserbedarf sowie die Büro- und Sozialbereiche nicht betrachtet. Der Fokus des Forschungsvorhabens liegt in der Betrachtung der energetischen Auswirkungen der Hallengebäude bzw. der Wechselwirkungen zwischen logistischen Anlagen, Gebäudetechnik und der Gebäudehülle. Die Auslegung der technischen Logistiksysteme erfolgt nach [Gün-2013a] [Gün-2013b].

Einige Randparameter, wie z. B. der Standort, bleiben bei den drei untersuchten Typologien unverändert (vgl. Tabelle 4.2).

Tabelle 4.2: Spezifische Randbedingungen aller Untersuchungsmodelle für die CO₂-Emissionsberechnungen

Standort	München
Betriebszeiten	
Arbeitszeit	6:00 Uhr bis 22 Uhr
Schichten	2-Schicht-Betrieb
Wochentage [d/w]	5
Jahresarbeitsstage [d/y]	252
Jährliche Nutzungsstunden zur Tagzeit [h]	2.688
Jährliche Nutzungsstunden zur Nachtzeit [h]	1.344
Täglicher Heizbetrieb (bei Temperaturniveau 12 °C und 17 °C)	5:00 Uhr - 22:00 Uhr, 5 d/w
Täglicher Kühlbetrieb (bei Temperaturniveau 6 °C)	0:00 Uhr - 0:00 Uhr, 7 d/w
Gebäudekonstruktion	
Bauweise	leicht
Wärmespeicherfähigkeit $C_{\text{wirk}}/A_{\text{NGF}}$ [Wh/m ² K]	50
Natürliche Infiltration q_{50} [m ³ /m ² h]	8,2
Wärmebrücken-Korrektur [W/m ² K]	0,05
U-Wert Bodenplatte [W/m ² K]	3,5
U-Wert Tore [W/m ² K]	2,9
Abmessung Verladetore [m]	2,75. 3,25
Abmessung Tor ebenerdig [m]	4 · 4
Intralogistik	
Ladungsträger	Euro-Palette
Ø Palettenhöhe beladen [m]	1,8
Ø Palettengewicht [kg]	500

Die spezifischen Randbedingungen der drei Untersuchungsmodelle sind in den Tabellen der folgenden Beschreibungen dargestellt. Für die anschließenden Parameterstudien werden die Randbedingungen der modellierten Grundelemente variiert. Die jeweils angenommenen Parameter für die Variation der Grundelemente sind als Randbedingungen im entsprechenden Kapitel der Parameterstudien beschrieben.

Gebäudetypologie - manuelle Lagerhalle

Die Typologie der manuellen Lagerhalle baut auf der Studie [ZUB-2010] auf, die charakteristische Parameter unterschiedlicher Wohn- und Nichtwohngebäude beschreibt und definiert. Dieses Modell wird auch in der Studie [ITG-2011] sowie im Forschungsprojekt „Torsysteme im Industriebau“ [Kli-2013] verwendet.

Das Gebäude (vgl. Abbildung 4.13) besitzt eine quadratische Grundform von 100 m auf 100 m und eine Höhe von 14 m. Auf der Südseite gibt es ein ebenerdiges Tor für den Staplerverkehr und 13 Verladetore, an denen im Innenraum die Bereitstellung für den Warenausgang und -eingang angrenzt.

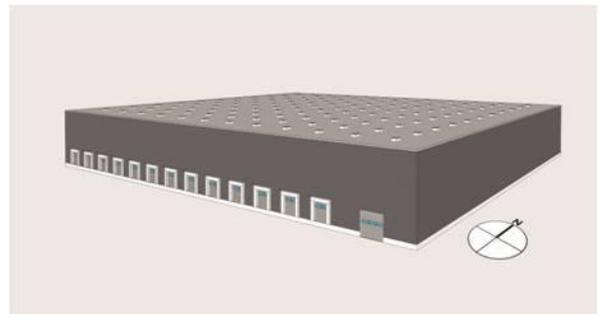


Abbildung 4.13: Außenansicht der manuellen Lagerhalle

Dahinter schließt sich der Lagerbereich mit 18 Regalgassen an, die in fünf Ebenen (vgl. Abbildung 4.15) Platz für 14.040 Paletten bietet. Um den stündlichen Lagerdurchsatz von jeweils 120 Ein- und Auslagerungen zu gewährleisten, werden sieben Schubmaststapler eingesetzt. Im Wareneingang und -ausgang fertigen jeweils drei Niederhubwagen acht Lkws in einer Stunde ab. Pro Schicht sind 14 Personen im Einsatz.



Abbildung 4.14: Innenansicht der manuellen Lagerhalle

Die spezifischen Parameter für die manuelle Lagerhalle sind in Tabelle 4.3 dargestellt.

Tabelle 4.3: Spezifische Parameter der manuellen Lagerhalle für die CO₂-Emissionsberechnungen

Haupthalle	
Abmessungen	
Länge netto [m]	100
Breite netto [m]	100
Grundfläche netto [m ²]	10.000
Lichte Höhe [m]	14
Volumen [m ³]	140.000
Tore	
Anzahl Verladetore	13
Anzahl Tore ebenerdig	1
Be- und Entladungen	16/h
Außenluftvolumenstrom [m ³ /m ² h]	1
Anzahl Personen	14
Intralogistik	
Einlagerungen	120 Pal/h
Auslagerungen	120 Pal/h
Palettenstellplätze	14.040
Regalgassen	18
Regalebenen	5
Schubmaststapler	7
Niederhubwagen	6

Gebäudetypologie - halbautomatisches Logistikzentrum

In Abbildung 4.15 ist die Außenansicht des halbautomatischen Logistikzentrums dargestellt.

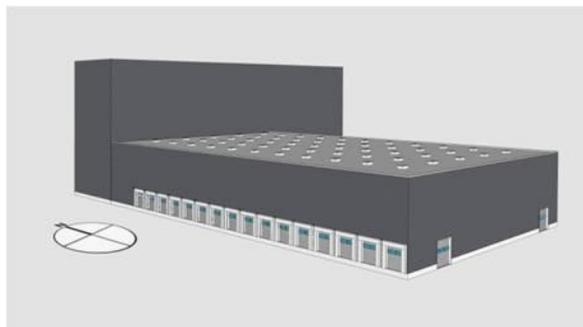


Abbildung 4.15: Außenansicht des halbautomatischen Logistikzentrums (Süd-West Ansicht)

Es ist zu erkennen, dass die Kubatur der Ost-West-orientierten Haupthalle in diesem Modell nun rechteckig mit einer Länge 78,6 m und einer Breite von 51,7 m ausgeführt ist. Die Höhe der Halle beträgt weiterhin, aufgrund der Kommissionierung in der Halle aus einem manuellen Lager mit einer Regalhöhe von 12,3 m, 14 m. Auf der Südseite befinden sich zwei ebenerdige Tore, die 16 Verladetore sich an der Westfassade angebracht. Im Norden schließt das 32,5 m hohe Hochregallager an, das die Westseite der Halle um 17,3 m verlängert und eine Länge von 84,8 m aufweist. In Abbildung 4.16 ist die Innenansicht zu sehen. Die spezifischen Parameter des halbautomatischen Logistikzentrums sind in Tabelle 4.4 dargestellt.



Abbildung 4.16: Innenansicht des halbautomatischen Logistikzentrums

Die MzW-Kommissionierung von 120 Pal/h aus dem manuellen Lager in der Halle erfolgt mit sieben Horizontalkommissionierer in 11 Arbeitsgängen. Den Nachschub und die Lagerbedien- gung der 4.356 Palettenstellplätze auf sechs Ebenen stellen sieben Schubmaststapler mit jeweils 120 Einlagerungen/h und Umlagerungen/h sicher.

Tabelle 4.4: Spezifische Parameter des halbautomatischen Logistikzentrums für die CO₂-Emissionsberechnungen

	Haupthalle	HRL
Abmessungen		
Länge netto [m]	78,6	84,8
Breite netto [m]	51,7	17,3
Grundfläche netto [m ²]	4.064	1.488
Lichte Höhe [m]	14	32,5
Volumen [m ³]	56.891	47.679
Tore		
Anzahl Verladetore	16	-
Anzahl Tore ebenerdig	2	-
Be- und Entladungen	16/h	-
Außenluftvolumen- strom [m³/m²h]	4,21	1
Anzahl Personen	22	-
Intralogistik		
Einlagerungen	120 Pal/h	
Umlagerungen	120 Pal/h	
Kommissionierung	120 Pal/h	
Doppelspiele		120 Pal/h
Palettenstellplätze	4.356	14.256
Regalgassen	11	4 RBG
Regalebenen	6	22
Schubmaststapler	7	-
Horizontal- kommissionierer	7	
Hochhubwagen	8	
Kettenförderer GLT [m]	61,2	32,4
Rollenförderer GLT [m]	71,4	31,1

Die Bereitstellung erfolgt aus dem HRL, welches über Kettenförderer mit dem manuellen Lager verbunden ist. Das automatische HRL mit vier Gassen, 22 Ebenen und 14.256 Stellplätzen mit einem Warendurchsatz von 120 Doppelspielen (DS) die Stunde wurde mithilfe eines Planungs- werkzeugs zur integrierten Lagersystemplanung ausgelegt [Gün-2011]. Im Wareneingang finden acht Anlieferungen/h statt. Die kommissionierten Paletten verlassen den Warenausgang ebenfalls auf acht Lkws/h das Logistikzentrum. Für die Be- und Entladung werden acht Hochhubwagen eingesetzt. Weiterhin befindet sich im Logistik- zentrum GLT-Fördertechnik, bestehend aus 93,6 m Kettenförderer und 102,5 m Rollenförde- rer. In der Halle arbeiten 22 Personen je Schicht.

Gebäudetypologie - vollautomatisches Distributionszentrum

Die Außenansicht des vollautomatischen Distri- butionszentrums zeigt Abbildung 4.17. Abbil- dung 4.18 veranschaulicht den Innenraum und Tabelle 5.4 zeigt die spezifischen Parameter des vollautomatischen Distributionszentrums.

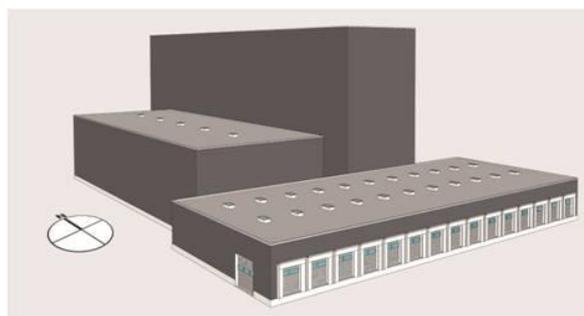


Abbildung 4.17: Außenansicht des vollautomatischen Distri- butionszentrums (Süd-West Ansicht)



Abbildung 4.18: Innenansicht des vollautomatischen Distri- butionszentrums

4 Bestimmung von Grundelementen und Modellierung unterschiedlicher Arten von Logistikzentren

Tabelle 4.5: spezifische Parameter des vollautomatischen Distributionszentrums für die CO₂-Emissionsberechnungen

	Haupthalle	HRL	AKL
Abmessungen			
Länge netto [m]	64,1	84,8	59,2
Breite netto [m]	25,4	17,3	24,6
Grundfläche netto [m ²]	1.646	1.488	1.456
Lichte Höhe [m]	7	32,5	14
Volumen [m ³]	11.397	47.679	20.388
Tore			
Verladetore	16	-	-
Anzahl Tore ebenerdig	2	-	-
Be- und Entladungen.	16	-	-
Außenluftvolumenstrom			
[m ³ /m ² h]	10,4	1	1
Anzahl Personen			
	16	-	-
Intralogistik			
Doppelspiele		120 Pal/h	400 KLT/h
Kommission.	160 Pal/h		
Stellplätze	-	14.256	83.160
Regalgassen	-	4 RGB	6 RBG
Regalebenen	-	22	33
Autonome Hochhubwagen	3		
Deichselhubwagen	6		
Hochhubwagen	8		
Vollautom. Haubenstretchanlage	1		
Depalet.-Roboter	1		
Rollen- und Gurtförderer KLT	99,6		58,8
Kettenförderer GLT	82,8	36	
Rollenförderer GLT	46,2	16,8	

Im Gegensatz zu den ersten beiden Logistikzentren beträgt hier die Höhe der Haupthalle nur

noch 7 m. Auch die Abmessungen haben sich nochmals auf eine Länge von 64,1 m und eine Breite von 25,4 m reduziert. Die 16 Verladetore befinden sich an der Südseite. An der Ost- und Westseite befindet sich jeweils ein ebenerdiges Tor. An der Nordfassade schließen sowohl das automatische HRL als auch das AKL an. Das HRL ist identisch zu dem des halbautomatischen Logistikzentrums, lediglich die jährlichen Fördererheiten im System werden erhöht.

Das AKL besitzt eine Länge von 59,2 m, eine Breite von 24,6 m und eine Höhe von 14 m. Es beinhaltet sechs Gassen für die Regalbediengeräte mit jeweils 33 Ebenen, in denen insgesamt 83.160 Kleinladungsträger Platz finden. Es werden 400 Doppelspiele in der Stunde erreicht. In der Halle befindet sich die WzMKommissionierung mit einer stündlichen Leistung von 160 Paletten. Mittels Hochhubwagen werden die kommissionierten Paletten zur vollautomatischen Haubenstretchanlage gefahren und mit Deichselhubwagen in Lkws verladen. Im Wareneingang transportieren autonome Deichselhubwagen die bereitgestellte Ware zum HRL oder zum automatischen Depalettieren. Dort werden die Paletten vereinzelt und die KLT automatisch zum Einlagern ins AKL befördert.

4.2.3 Validierung der Untersuchungsmodelle

Um zu kontrollieren, ob der von der Software ZUB Helena nach [DIN18599] im Monatsbilanzverfahren (vgl. Kapitel 3.3.2) errechnete Energiebedarf der Gebäudetechnik valide ist, werden die berechneten Ergebnisse mit Simulationsergebnissen des Forschungsprojekts „Torsysteme im Industriebau“ [Kli-2013] verglichen. In diesem Forschungsprojekt wird eine dynamische Gebäudesimulation mit der Software IDA ICE 2012 durchgeführt.

Da im genannten Projekt nur der Typus der manuellen Lagerhalle untersucht wird, bezieht sich die Validierung der erstellten Untersuchungsmodelle ebenfalls nur auf dieses Modell. Die weiteren Gebäudemodelle bauen jedoch auf der manuellen Lagerhalle auf und werden entsprechend

der logistischen Anforderungen angepasst. In [Kli-2013] werden teilweise andere Randbedingungen verwendet, die in ZUB Helena für die Untersuchungen angepasst werden. Des Weiteren wird in [Kli-2013] mit einem idealen Heizer gerechnet, der die Anlagentechnik ausschließt. Somit wird die Plausibilitätsprüfung über den Nutzenergiebedarf herangezogen. Es stehen Werte mit und ohne Abwärme der Beleuchtung zum Vergleich.

In Abbildung 4.19 sind die Werte des spezifischen Nutzenergiebedarfs der Heizung im Vergleich der verwendeten Software ZUB Helena und der Software IDA ICE gegenübergestellt. Bei der Berechnung mit der Wärmelast der Beleuchtung ergibt sich eine Differenz von 18,5 %, wird die Beleuchtung nicht mit in die Berechnung des Heiz-Nutzenergiebedarfs aufgenommen, entsteht eine Abweichung von 13 %. Diese Abweichungen ergeben sich aus den unterschiedlichen Berechnungsmethoden.

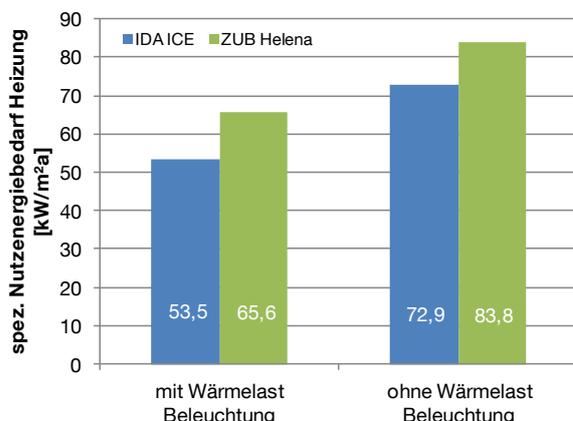


Abbildung 4.19: Vergleich des spezifischen Nutzenergiebedarfs der Heizung mit dem dynamischen Simulationsprogramm IDA ICE und dem verwendeten Monatsbilanzverfahren in ZUB Helena

Basierend auf Erfahrungswerten aus anderen Forschungsprojekten am Lehrstuhl für Bauklimatik und Haustechnik liegen diese Werte in einem vertretbaren Bereich. Hinzu kommt, dass die anschließenden Einzeluntersuchungen Tendenzen für Optimierungen und Stellhebel für CO₂-Einsparungen aufzeigen sollen. Daraus abzuleitende Maßnahmen sollen für die Grobplanung bereitgestellt werden. Hier ist sowohl nach Meinung der Experten aus den Experteninterviews

(vgl. Kapitel 4.1.1) als auch des Projektbegleitenden Ausschusses eine Abweichung von +/- 20 % akzeptabel.

4.3 Methodisches Vorgehen

Nach der Erstellung der Untersuchungsmodelle wird im Folgenden das Vorgehen zur Ermittlung des Energiebedarfs des Gebäudes und der logistischen Anlagen, abhängig von den Betriebsstunden oder der Logistikleistung, beschrieben. Des Weiteren wird erläutert, wie die CO₂-Emissionen und Kosten sowie Investitionen bestimmt werden. Die anschließenden Berechnungen und deren Ergebnisse sind in Kapitel 0 dargestellt.

4.3.1 Gesamtheitliche Energiebilanzierung

Die Erstellung der Gesamtenergiebilanzen für die Untersuchungsmodelle wird, wie in Kapitel 3.3.2 beschrieben, mittels der [DIN 18599] für Nichtwohngebäuden durchgeführt. Hierfür wird zuerst der Energiebedarf der Intralogistik für einzelne in den Untersuchungsmodellen modellierte Grundelemente auf Anlagenebene berechnet (vgl. Kapitel 3.3.1) und die jeweiligen Verluste bilanziert. Die Ermittlung des Energiebedarfs der logistischen Anlagen erfolgen unter der Annahme einer konstanten Logistikleistung und wird immer auf ein Jahr hochgerechnet.

Der Energiebedarf des Gebäudes wird durch die Software ZUB Helena 2012 Ultra v6.27 [ZUB-2012] bestimmt, die nach der [DIN 18599] bilanziert. Hierbei können verschiedenste Ergebnisse wie Nutz-, End-, Primärenergiebedarf jeweils für Heizung, Kühlung, Lüftung und Beleuchtung sowie CO₂-Emissionen, laufende Kosten, Wärmequellen und -senken, Anlagen-, Speicher- und Übergabeverluste etc. ausgegeben werden. Es werden auch Grundlagen, Parameter und Nutzungsprofile für die Berechnungen definiert. Jedoch lassen diese Parameter eine ganzheitliche Bewertung des Systems Logistikzentrum nicht zu, weil sowohl die Software als auch die DIN 18599 keine produktionsbedingte Abwärme (hier Prozessabwärme durch Betrieb der Material-

flusstechnik) mit bilanzieren. Aus diesem Grund werden bestimmte Parameter abgewandelt und auf die Untersuchungen der in Kapitel 4 ermittelten Erkenntnisse und Anforderungen eines Logistikzentrums angepasst.

Interne Wärmelasten der Intralogistik

In der DIN 18599 wird der Energieeinsatz für Produktionsprozesse in der Bilanzierung nicht mit bewertet. Folglich wird auch die aus den Prozessen entstehende Abwärme in einem Logistikzentrum nicht in die Berechnung des Heizenergiebedarfs aufgenommen. Da in dem Forschungsvorhaben eine ganzheitliche Betrachtung von Gebäude und Intralogistik erfolgt, werden der prozessbedingte Energiebedarf sowie die resultierende Abwärme der Intralogistik in die Bilanzierung mit einberechnet. Diese Wechselwirkung wird in Kapitel 5.1.5 detailliert beschrieben.

Flurförderzeuge

Für die Berechnung des Energiebedarfs sämtlicher Arten von Flurförderzeugen werden Herstellerangaben zum Energieverbrauch nach VDI-Zyklus der VDI-Richtlinie „Typenblätter für Flurförderzeuge“ [VDI-2198] sowie Herstellerangaben zu Wirkungsgraden der Batteriebeladung [o.V.a-2013] [Gau-2013] verwendet. Unter dem Gliederungspunkt 6.6 der technischen Daten geben die Hersteller den Energieverbrauch in kWh/h nach [VDI-2198] an. Dieser Wert stellt nur den Verbrauch durch das FFZ dar und betrachtet nicht den Energiebedarf ab Stromnetz inkl. Batteriebeladung. Für die Ermittlung des Energiebedarfs der FFZ ab Stromnetz werden dem stündlichen Verbrauch der FFZ die entstandenen Verluste der Batteriebeladung über den Gesamtwirkungsgrad (Gerätewirkungsgrad Ladegerät + Ladewirkungsgrad Batterie) angerechnet. Diese Verluste werden im Gebäudemodell als interne Wärmelasten bilanziert. Die Verluste der FFZ werden über Herstellerangaben zu Potentialen der Energierückgewinnung am FFZ berechnet. Hier wird der prozentuale Anteil der Energie, der

rekuperiert werden kann, als Verlustenergie angenommen und ebenfalls als interne Wärmelast im Gebäudemodell bilanziert.

GLT Förderer

Die Berechnung des Energiebedarfs der GLT-Ketten- und Rollenfördertechnik erfolgt analytisch nach Habenicht in [Hab-2013]. Dazu wird das im Forschungsprojekt „Erweiterte Logistiksystemplanung unter Einbeziehung des Energieverbrauchs“ entwickelte Softwarewerkzeug verwendet [Gün-2013] [Gün-2014]. Die Verlustenergie wird anschließend über den Wirkungsgrad des Antriebsstrangs berechnet, beim Kettenförderer kommen Reibungsverluste der Gleitschiene hinzu.

KLT Förderer

Für die KLT-Rollenfördertechnik wird der Energiebedarf mithilfe von Referenzwerten hochgerechnet. Dazu werden simulierte Energieverbrauchswerte für 24 Volt-Antriebstechnik mit dezentralen Einheiten verwendet [Bra-2013]. Die Energieverluste können hier, aufgrund nicht vorhandener Angaben der Wirkungsgrade, nicht berechnet werden.

Automatische Lager

Der Energiebedarf des automatischen HRL als auch des AKL wird analytisch nach Ertl in [Ert-2013c] und [Ert-2013a] berechnet. Dazu wird ebenfalls das im Forschungsprojekt „Erweiterte Logistiksystemplanung unter Einbeziehung des Energieverbrauchs“ entwickelte Softwarewerkzeug verwendet [Gün-2013] [Gün-2014]. Ähnlich der Verlustenergieberechnung der FFZ wird hier die rückspeisefähige Energie an den RBG im Grundmodell als Verlustenergie samt Wirkungsgradverluste der Rückspeiseeinheiten berechnet und als interne Wärmelast im Gebäudemodell bilanziert.

Ladesicherung

Als Grundelement Ladesicherung wird eine vollautomatische Haubenstretchanlage betrachtet. Die Ermittlung des Energiebedarfs erfolgt mittels Herstellerangaben. Hiernach werden zum Strecken einer Palette 0,04 kWh verbraucht [Beu-2013]. Entsprechend des Jahresdurchsatzes wird der Gesamtenergiebedarf hochgerechnet. Auch hier können keine Verluste bilanziert werden, weil Angaben über Wirkungsgrade vom Hersteller nicht angegeben werden.

Palettierroboter

Über zustandsbasierte Verbrauchsprofile wird der Energiebedarf des Palettierroboters berechnet. Mittels Herstellerangaben zu Energieverbrauchswerten der Roboter in bestimmten Zuständen [Klü-2011] und über eine Berechnung der Zeitanteile, in denen der Roboter in diesen Zuständen in einem bestimmten Betrachtungszeitraum verweilt, wird der Energiebedarf ermittelt.

Außenluftvolumenstrom durch nutzungsbedingte Toröffnungen

Abhängig von der Anzahl der Ladevorgänge und den daraus resultierenden Toröffnungen, die je nach Typologie variieren, ergeben sich unterschiedliche Lüftungswärmeverluste, die für jede Typologie und abhängig vom Temperaturniveau ermittelt werden.

Als Rechenansatz wird die Methode nach [Pfa-1982] angewandt. Hierbei werden die Öffnungsfläche, die Temperaturdifferenz von Innen- und Außenraum sowie die Windgeschwindigkeit berücksichtigt. Zur Ermittlung der Temperaturdifferenz und der Windgeschwindigkeit werden bei den Temperaturniveaus 12 °C und 17 °C die Mittelwerte der Monate Oktober bis April des Referenzjahres 2011 [DWD-2012] verwendet, im Kühlfall (max. 6 °C) die Monate Mai bis September.

Für die Berechnungen der Lüftungswärmeverluste der ebenerdigen Tore wird die gesamte Öffnungsfläche des Tores angesetzt. Dabei wird angenommen, dass jedes ebenerdige Tor am Tag 15 Minuten geöffnet ist.

Hinsichtlich der Verladetore im Grundmodell wird angenommen, dass beim Beladevorgang seitlich des angedockten LKWs ein Spalt von je 5 cm auf die Höhe der Toröffnung entsteht, durch den ein Luftaustausch resultiert. Bei der Variante mit Vorsatzschleuse ist dieser Spalt nicht mehr (vgl. Kapitel 5.2.5) vorhanden. Zusätzlich wird das Luftvolumen im Verladerraum des Lkws mit in die Berechnung einbezogen. Es wird angenommen, dass die Planenabdeckung des Lkws dessen Verladerraum nicht von der Umgebungstemperatur abschottet, hier folglich die Außenluft die Temperatur des Laderaums konditioniert. Andererseits strömt auch warme Luft aus der Halle in dessen Laderaum. Daher wird für die Bestimmung der Lufttemperatur des Lkw-Laderaums die mittlere Temperatur von Außenluft und Halle angesetzt. Da über windinduzierte Druckdifferenzen hier kein Luftaustausch stattfindet, wird dieser mit 0 m/s definiert.

Tabelle 4.6: ermittelter Außenluftvolumenstrom durch nutzungsbedingte Toröffnungen der untersuchten Typologien und Temperaturniveaus

	Außenluftvolumenstrom		
	[m ³ /m ² h]		
	17 °C	12 °C	6 °C
Manuelle Lagerhalle (ermittelt / in Berechnung verwendet)	0,7 / 1,0	0,5 / 1,0	0,6 / 1,0
Halbautomatisches Logistikzentrum	4,2	3,5	3,7
Vollautomatisches Distributionszentrum	10,0	8,6	9,0

Die Toröffnungen werden in ZUB Helena über den Mindestaußenluftvolumenstrom abgebildet, der sich auf die Größe der Hallengrundfläche bezieht [m³/m²h]. Da der errechnete Außenluftvolumenstrom in der manuellen Lagerhalle unter dem in der [DIN 18599] geforderten Mindestluftwechsel von 1 m³/m²h liegt, wird der DIN-Mindestwert für die Berechnungen herangezogen.

gen. Tabelle 4.6 zeigt die ermittelten Außenluftvolumenströme, die in die Bilanzierung einfließen.

Lüftungswärmeverluste durch Infiltration

Neben nutzungsbedingten Lüftungswärmeverlusten durch Öffnungen in der Fassade (vgl. voriges Kapitel) findet zudem ein durch Druckunterschiede resultierender unkontrollierter Luftaustausch zwischen der Innen- und Außenluft statt. Dieser ist auf etwaige Undichtigkeiten in der Gebäudehülle zurückzuführen. Die Bemessungswerte dieses Luftwechsels n_{50} werden nach [DIN 18599-2] bei einer Druckdifferenz von 50 Pa berechnet.

In der Studie [ITG-2011] wird allerdings festgestellt, dass die DIN-Werte, vor allem für große Gebäude, viel zu hoch angesetzt sind, da sie sich auf das Gebäudevolumen beziehen. Deshalb werden als Referenz die in der Studie [ITG-2011] erarbeiteten Bemessungswerte für q_{50} angewandt, da dieser Ansatz Gebäudeundichtigkeiten in Hallengebäuden besser abbildet. Die Studie klassifiziert dabei vier Kategorien, wie in Tabelle 4.7 dargestellt. Aufbauend auf der Studie [Kli-2013] wird der q_{50} -Wert von 8,2 m^3/m^2h gewählt, dieser liegt zwischen der geringen und mittleren Anforderung an die Gebäudedichtheit.

Tabelle 4.7: Kategorisierung und Bemessungswerte q_{50} für Hallengebäude [ITG-2011]

Kategorie	Dichtheitsprüfung	Einschätzung der Gebäudedichtheit	q_{50} [m^3/m^2h]
I	Eine Dichtheitsprüfung wird nach Fertigstellung durchgeführt	Gehobene Anforderungen an Luftdichtheit	1
II		Mittlere Anforderung	3 6
III	Die Dichtheitsprüfung wurde nicht durchgeführt und ihre Durchführung ist auch nicht vorgesehen	Geringe Anforderung an Luftdichtheit; Vorhandensein offensichtlicher Undichtigkeiten in wesentlichem Ausmaß	9
IV			12

Beleuchtung

Der wichtigste Parameter zur Beleuchtung, die Beleuchtungsstärke, wird nach dem Nutzungsprofil für Logistikhallen in der [DIN 18599-10] mit 150 Lux festgelegt. Jedoch erscheint der Minderungsfaktor für die relative Abwesenheit als zu hoch angesetzt, da davon ausgegangen wird, dass sich dauerhaft Menschen in der Halle bewegen. Daher wird dieser von 0,6 auf 0,1 gesenkt. Da in der [DIN 18599-10] ein Dauerbetrieb vorgesehen ist, musste dieser im Forschungsprojekt aufgrund praxisüblicher Betriebszeiten in einen 2-Schichtbetrieb abgeändert werden, d. h. der Minderungsfaktor der Gebäudebetriebszeit erhöht sich daher von 0,4 auf 1, was einen dauerhaften Betrieb während der Nutzungszeit definiert. Im HRL und AKL ist keine Beleuchtung angesetzt.

4.3.2 Ermittlung der CO₂-Emissionen

Für die Ermittlung der entstehenden CO₂-Emissionen wird der berechnete Endenergiebedarf der verwendeten Energieträger mit CO₂-Koeffizienten aus der GEMIS-Datenbank 4.1.3 [ZUB-2012] beaufschlagt. Tabelle 4.8 gibt einen Überblick der im Forschungsvorhaben verwendeten CO₂-Koeffizienten.

Tabelle 4.8: CO₂-Koeffizienten verwendeter Energieträger

Energieträger	CO ₂ -Koeffizient [g/kWh]
Erdgas	247
Hackschnitzel	35
Strom (dt. Strommix)	683
Photovoltaik	710 (Vermeidungsfaktor)

Für die Berechnung des durch das Gebäude verursachten Bedarfs können diese direkt in die Software ZUB Helena eingegeben werden. Da die intralogistischen Anlagen ausschließlich Strom benötigen, werden deren ermittelten Bedarfswerte mit dem entsprechenden Faktor für Strom multipliziert. Für die Berechnung der CO₂-Gutschrift der stromproduzierenden Photovoltaikanlage wird der CO₂-Vermeidungsfaktor aus der Studie [BMU-2013] verwendet. Tabelle 4.8

gibt einen Überblick der im Forschungsvorhaben verwendeten CO₂-Koeffizienten.

4.3.3 Ermittlung der Kosten und Investitionen

Neben den energetischen Auswirkungen von Optimierungsmaßnahmen werden auch grobe Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen der untersuchten Maßnahmen im Forschungsvorhaben durchgeführt. Dafür werden einerseits Preise der verwendeten Energieträger recherchiert, um die laufenden Energiekosten abbilden zu können, andererseits Preise für Bauteile sowie Anlagen- und Materialflusstechnik herangezogen, um auch Aussagen über anfallende Investition treffen zu können.

Kosten der Energieträger

Anhand der Kosten der verwendeten Energieträger können die laufenden Kosten im Jahr dargestellt werden. Insgesamt sind drei verschiedene Energieträger in die Untersuchungen eingebunden: Strom, Erdgas und Hackschnitzel.

Viele Industriebetriebe bezahlen im Vergleich zu Privathaushalten einen geringeren Strompreis, da dieser zwischen Stromlieferant und Betrieb je nach Abnahmemenge festgelegt wird. Im Forschungsvorhaben wird daher der Durchschnittswert des Strompreises für Industriebetriebe nach [BDEW-2010] angesetzt. Tabelle 4.9 zeigt die für die laufenden Kosten angesetzten Preise der Energieträger.

Tabelle 4.9: Kosten der verwendeten Energieträger [ct/kWh]

Energieträger	Preis [ct/kWh]
Erdgas [BMW-2013]	0,4
Hackschnitzel [CAR-2013]	0,3
Strom [BDEW-2010]	12

Kosten von energieeffizienten Maßnahmen

Um die Investitionen der untersuchten Varianten einschätzen zu können, werden die Preise mithilfe unterschiedlicher Quellen ermittelt.

Die Preise für die Bauteile sowie die technische Gebäudeausrüstung werden aus dem [BKI-2012] und [BKI-2006] entnommen. Dies sind Kataloge mit statistischen Kostenkennwerten für die einzelnen Anlagen- und Bauelemente. Da sich die Ausführung eines Bauteils im BKI zumeist nur auf eine Variante beschränkt, werden zusätzlich Preise direkt bei den Herstellern [Bru-2009a], [Bru-2009b], [Lami-2012], [Kam-2012], bzw. über das Internet [Pil-2012], [IER-2013], [VNG-2013], [RWE-2013], [Pea-2013], [PV-2013], [Kun-2013], [NKH-2013] eingeholt, sowie Kostenkennwerte aus vorangegangenen Lehrstuhlprojekten [Har-2002] verwendet. Diese werden schließlich mit den Werten des BKI kombiniert.

Anhand der Dachbedeckung soll dieses Vorgehen beispielhaft erläutert werden: Nach BKI liegt der Preis für Material- und Ausführungskosten der "Dachdeckung mit Alu-Profiltafeln auf Schalung, Mineralfaserdämmung" bei 120 €/m² brutto. Dieser Preis wird als Kostengrundlage der im Grundmodell verwendeten Dachabdeckung gewählt. Der Herstellerpreis dieser Dachabdeckung beträgt 59 €/m² netto. Der Netto-Differenzbetrag zum BKI über 42 €/m² wird als Ausführungsarbeit auf alle Materialpreise dieses Herstellers aufaddiert. Preise für die Materialflusstechnik werden direkt bei den Herstellern angefragt oder im Internet recherchiert und bei mehreren Angaben gemittelt.

Aufgrund der Berechnungsmethoden und möglichen und individuellen Ausführungen wird darauf hingewiesen, dass alle im Forschungsbericht aufgezeigten Investitionen keine belastbaren Absolutbeträge darstellen, sondern lediglich als Anhaltswerte für die in etwa zu erwartenden Kosten zu verstehen sind. Auch die statisch berechneten Amortisationszeiten dienen nur als Richtwerte und basieren auf Energiekosteneinsparungen bei einem Strompreis von 12 ct/kWh ohne Betrachtung von Preissteigerungen. Abhängig von dem zu entrichtenden Strompreis als auch weiteren Kosteneinsparungen über den Lebenszyklus (welche im Forschungsvorhaben nicht Betrachtungsgegenstand sind) ergeben sich andere Amortisationszeiten.

5 Untersuchung und Optimierung von Grundelementen in unterschiedlichen Logistikzentren

Im Folgenden werden die Einzeluntersuchungen an Grundelementen aus den Bereichen Intralogistik, Gebäudetechnik und Gebäudehülle dargestellt.

5.1 Parameterstudien an Grundelementen im Bereich Intralogistik

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit den Einzeluntersuchungen an Grundelementen aus dem Bereich Intralogistik. Mit der Zielformulierung eines minimalen Energieverbrauchs werden zunächst für die Grundelemente Energieeffizienzmaßnahmen abgeleitet, um im Anschluss deren Einfluss auf die Gesamtenergiebilanz der Untersuchungsmodelle zu untersuchen. Hierbei werden auch Wechselwirkungen zu Grundelementen anderer Bereiche berücksichtigt. Es werden Ergebnisse und daraus abgeleitete Handlungsempfehlungen zu den Klassen Fördern, Lagern, Kommissionieren/Sortieren, Handhaben und dem Materialfluss aufgezeigt. Dabei wird vereinfachend angenommen, dass die Temperaturniveaus von 17 °C, 12 °C und 6 °C keinen Einfluss auf den Energiebedarf der Intralogistik haben.

5.1.1 Fördern

In der Klasse Fördern werden die Grundelemente Flurförderzeuge und GLT-Fördertechnik untersucht und der Einfluss der variierten Grundelemente auf den Gesamtenergiebedarf des betrachteten Gebäudemodells wird aufgezeigt.

Flurförderzeuge

Untersucht wird der Niederhubwagen in der manuellen Lagerhalle, der Hochhubwagen im halbautomatischen Logistikzentrum und der Deichselhubwagen im vollautomatischen Distribu-

tionszentrum. Die zu verrichtende Aufgabe der unterschiedlichen FFZ-Arten ist in allen Modellen stets die Be- und Entladung von 16 Lkws/h im Wareneingang und Warenausgang.

Da die Energieberechnung für die FFZ auf Herstellerangaben für den Energieverbrauch nach VDI-2198 basiert (vgl. Kapitel 4.3.1), sind hier zur Energieermittlung sowohl die jährlichen Betriebsstunden als auch die Anzahl der eingesetzten FFZ relevant. Die getroffenen Randbedingungen sind in Tabelle 5.1 dargestellt und beruhen wiederum auf Herstellerangaben [Still-2013], [Still-2013a], [Jung-2013b], [Jung-2013b] [Gau-2013] [o.V.a-2013]. In den ersten Varianten zum Niederhubwagen NHW_V1 und zum Hochhubwagen HHW_V1 erfolgt eine Verbesserung der Batterieladetechnologie. Hier erhöht sich der Ladewirkungsgrad des Ladegerätes, somit verringert sich die Verlustenergie bei der Batteriebeladung.

Tabelle 5.1: Übersicht der getroffenen Randbedingungen für die Varianten und die Grundmodelle der Flurförderzeuge

	Niederhubwagen		
	NHW_GM	NHW_V1	NHW_V2
Anzahl	6	6	6
Betriebsstunden [h/a]	4.032	4.032	4.032
Batterieart und -spannung [V/Ah]	PzS 24/450	PzS 24/450	PzS 24/450
Ladetechnologie	HF	eneff. HF	eneff. HF
Wirkungsgrad Batterie+Ladegerät	68 %	84 %	84 %
Verluste/Vermeidung am Stapler	15 %/0	15 %/0	0/15 %
Energiebedarf Stapler / ab Stromnetz [kWh/h]	1,05 / 1,54	1,05 / 1,25	0,89 / 1,09
Σ Energiebedarf [kWh/a]	37.355	30.240	26.430

Hochhubwagen			
	HHW_GM	HHW_V1	HHW_V2
Anzahl	8	8	8
Betriebsstunden [h/a]	4.032	4.032	4.032
Batterieart und -spannung [V/Ah]	PzS 24/450	PzS 24/450	PzS 24/450
Ladetechnologie	HF	eneff. HF	eneff. HF
Wirkungsgrad Batterie+Ladegerät	68 %	84 %	84 %
Verluste/Vermeidung am Stapler	15 %/0	15 %/0	0/15 %
Energiebedarf Stapler/ab Stromnetz [kWh/h]	1,2 / 1,76	1,2 / 1,43	1,2 / 1,25
Σ Energiebedarf [kWh/a]	56.922	46.080	40.274

	DHW_GM	DHW_LiFe
Anzahl	6	6
Betriebsstunden [h/a]	4.032	4.032
Batterieart und -spannung [V/Ah]	PzS 24/150	LiFePO
Ladetechnologie	HF	HF
Wirkungsgrad Batterie+Ladegerät	84 %	88 %
Verluste/Vermeidung am Stapler	15 %/0	15 %/0
Energiebedarf Stapler/ab Stromnetz [kWh/h]	0,36 / 0,41	0,21 / 0,24
Σ Energiebedarf [kWh/a]	9.897	3.849

Bei den Varianten V2 wird zusätzlich davon ausgegangen, dass die Hubwagen in einem energieeffizienten Modus betrieben werden. Durch Optimierung der Fahrwege und Vermeidung von Transportwegen, Rekuperation der Bremsenergie in Zwischenspeicher, automatisches Abschalten nicht benötigter Nebenverbraucher und einer Kennlinienoptimierung des Antriebs kann nach Herstellerangaben bis zu 20 % Energie am Stapler eingespart werden [Wru-2011]. Für die Varianten V2 wird hier angenommen, dass durchschnittlich 15 % der Energie am Stapler durch genannte vermieden werden können. Ent-

sprechend werden diese 15 % im Grundmodell als auch in der Variante V1 als Verluste am Stapler bilanziert.

Das resultierende CO₂-Einsparpotenzial durch die energieeffizienten Maßnahmen des Niederhubwagens am Gesamtenergieverbrauch der manuellen Lagerhalle lässt sich Abbildung 5.1 entnehmen. Die zusätzlichen Investitionen für die entsprechenden Varianten werden in Abbildung 5.2 aufgeführt. Analog dazu zeigen Abbildung 5.3 und Abbildung 5.4 das Einsparpotenzial und die Zusatzinvestitionen für den Hochhubwagen im halbautomatischen Logistikzentrum.

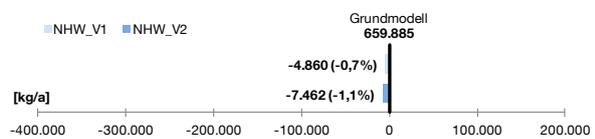


Abbildung 5.1: Vergleich der CO₂-Emissionen der manuellen Lagerhalle bei unterschiedlichen Varianten des Niederhubwagens

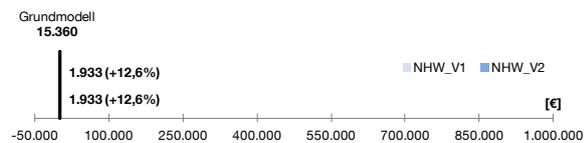


Abbildung 5.2: Zusätzliche Investitionen für die unterschiedlichen Varianten des Niederhubwagens im manuellen Lager

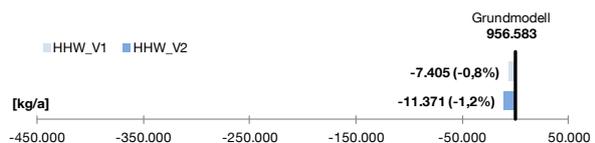


Abbildung 5.3: Vergleich der CO₂-Emissionen des halbautomatischen Logistikzentrums bei unterschiedlichen Varianten des Hochhubwagens

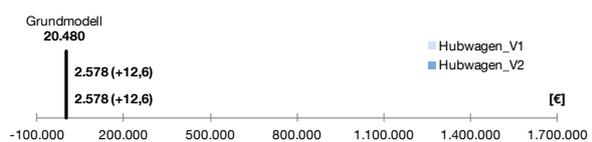


Abbildung 5.4: Zusätzliche Investitionen für die unterschiedlichen Varianten des Hochhubwagens im halbautomatischen Logistikzentrum

Bei den Investitionen werden sowohl die benötigten Batterien als auch das Batterieladegerät betrachtet. Mögliche zusätzliche Investitionen für die Ausstattung der Hubwagen mit einem energieeffizienten Betriebsmodus oder Energierückspeiseeinheiten können aufgrund nicht bereitgestellter Preise seitens Hersteller nicht untersucht werden. Auch sind Kostenreduzierungseffekte wie geringerer Verschleiß [Still-2014] und Erhöhung der Batterielebensdauer [Fro-2014] nicht in den Varianten berücksichtigt, weil diese schwer zu quantifizieren sind und dafür eine Lebenszykluskostenbetrachtung notwendig wird.

Für die Kombinationen der Grundelemente zu energieeffizienten Gesamtsystemen in Kapitel 6 werden für Variante V2 die gleichen Investitionen angenommen wie für die Variante V1. Die Variante V1 amortisiert sich für beide Hubwagen nach ein bis zwei Jahren.

Beim Deichselhubwagen wird nur die Variante DHW_LiFe erstellt. Hier wird der verwendete Bleiakкумуляtor (PzS) in der Variante des Grundmodells DHW_GM durch einen Lithium-Eisenphosphat-Akkumulator (LiFePO4) ersetzt und dieser mit energieeffizienter Hochfrequenz-Technologie geladen. Die CO₂-Emissionen und der Einfluss der Deichselhubwagen auf den Gesamtausstoß im Untersuchungsfall des vollautomatischen Distributionszentrums sind in Abbildung 5.6 dargestellt. Die Investitionen für die LiFePO4-Akkumulatoren sowie drei weitere Wechselbatterien inkl. Ladegeräte sind in Abbildung 5.6 zu sehen.

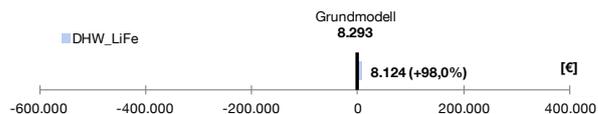


Abbildung 5.6: Zusätzliche Investitionen für die unterschiedlichen Varianten des Deichselhubwagens im vollautomatischen Distributionszentrum

Für die Variante DHW_LiFe sind die Investitionen um 98 % höher als die der Standardausführung DHW_GM, denn LiFePO4-Akkumulatoren sind ca. um das vierfache teurer. Sie weisen jedoch eine fast doppelt so hohe Lebensdauer auf.

Zusätzlich haben die LiFePO4-Akkumulatoren einen geringeren Energiebedarf und bieten weitere Vorteile, wie z. B. die Möglichkeit von Zwischenladungen und einen mit ca. 1,5 Stunden wesentlich schnelleren Ladezyklus. Außerdem sind sie frei von Emissionen, die bei einer Ladung von Bleiakкумуляtoren freigesetzt werden. Somit ist kein säurefester Boden als auch keine Lüftung an den Batterieladestationen notwendig [BGHW-2012] [Gau-2013].

Um weitere Energiekosten einzusparen, sollten FFZ-Batterien grundsätzlich zeitversetzt geladen werden, um Lastspitzen im Gesamtsystem zu vermeiden. Dies reduziert die vom Energieversorger bereitgehaltene Leistung und es können zusätzlich Energiekosten eingespart werden.

GLT-Förderer

Das Grundelement GLT-Fördertechnik wird am Untersuchungsmodell des halbautomatischen Logistikzentrums und des vollautomatischen Distributionszentrums, jeweils als System aus Rollen- und Kettenförderern betrachtet. Die Randbedingungen für das Grundmodell RF_KF_GM und die Variante RF_KF_V1 sind in Tabelle 5.2 wiedergeben.

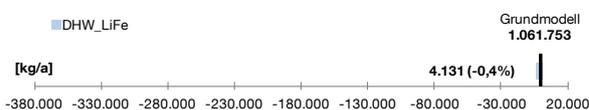


Abbildung 5.5: Vergleich der CO₂-Emissionen des vollautomatischen Distributionszentrums bei unterschiedlichen Varianten des Deichselhubwagens

5 Untersuchung und Optimierung von Grundelementen in unterschiedlichen Logistikzentren

Tabelle 5.2: Übersicht der Randbedingungen der getroffenen Varianten und der Grundmodelle von Rollen- und Kettenförderern

	RF_KF_GM		RF_KF_V1	
	Rolle	Kette	Rolle	Kette
Steuerung	Kontinuierlich		Intermittierend	
Getriebe-/ Motortyp	Stirnrad/ Asynchron 0,75 kW		Stirnrad/ Asynchron 0,75 kW	
Ansteuerung	FU	Schalt- schütz	FU	Schalt- schütz
Halbautomatisches Logistikzentrum				
Gesamtlänge [m]	105	90	105	90
Fördereinheiten [Pal / a]	423.360		423.360	
Mittleres Pal. Gewicht [kg]	500		500	
∑ Energiebedarf [kWh/a]	64.170		18.394	
Vollautomatisches Logistikzentrum				
Gesamtlänge [m]	63	118	63	118
Fördereinheiten [Pal / a]	483.840		423.360	
Mittleres Pal. Gewicht [kg]	376		376	
∑ Energiebedarf [kWh/a]	62.678		7.680	

Für die Bestimmung der Randbedingungen wurden Herstellerangaben nach technischen Datenblättern [SSI-2013] und Ergebnisse aus weiteren Forschungsprojekten [Gün-2013] verwendet. Der Durchsatz ergibt sich aus der definierten Logistikleistung der Untersuchungsmodelle (vgl. Kapitel 4.2.2).

Für das Grundmodell wird eine kontinuierliche Betriebsweise gewählt und bei der Variante RF_KF_V1 eine intermittierende, indem Leerlaufzeiten durch Blockbildung reduziert werden und Anlagenteile bei Nichtinanspruchnahme abgeschaltet werden [Gün-2013]. In Abbildung 5.7 ist der Einfluss einer Optimierung der Ketten- und Rollenförderer auf die CO₂-Emissionen des halbautomatischen Logistikzentrums und auf das vollautomatische Distributionszentrum zu sehen. Im ersten Fall beträgt das Einsparpotenzial im

Verhältnis zu den gesamten CO₂-Emissionen 2,3 % und im zweiten Fall 2,8 %.

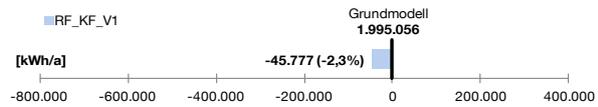


Abbildung 5.7: Vergleich der CO₂-Emissionen des halbautomatischen Logistikzentrums bei unterschiedlicher Betriebsweise der GLT-Ketten- und Rollenförderer

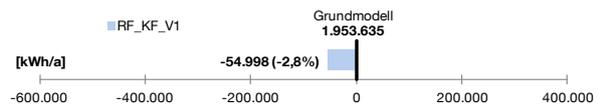


Abbildung 5.8: Vergleich der CO₂-Emissionen des vollautomatischen Distributionszentrums bei unterschiedlicher Betriebsweise der GLT-Ketten- und Rollenförderer

Jedoch lassen sich bei der Einzelfallbetrachtung durch diese Maßnahme 70 % - 85 % des Gesamtenergiebedarfs der Rollen- und Kettenförderer einsparen. Hier ist darauf zu achten, dass der Energiebedarf abhängig von der zu erbringenden Logistikleistung und den Betriebszeiten ist und somit auch das Einsparpotential. Bei hohen Durchsätzen z. B. können Rollenförderer durch ihre energieintensiven Beschleunigungsvorgänge beim Starten und Stoppen mehr Energie verbrauchen als im kontinuierlichen Betrieb. [Gün-2013]. Bei der Planung von Rollen- und Kettenförderer ist zusätzlich auf eine richtige Auswahl der Komponenten zu achten. So ist bspw. der Rollenförderer dem Tragkettenförderer aus energetischer Sicht aufgrund von geringeren Reibverlusten vorzuziehen [Muh-2011].

Um energieeffiziente Betriebsstrategien umsetzen zu können, muss Sensortechnik und eine Bereichssteuerung für die Fördertechnik vorhanden sein [Gün-2013]. Dies zieht Investitionen mit sich oder verursacht Kosten für zusätzlichen Programmieraufwand in der Steuerungsebene. Aufgrund nicht bereitgestellter Information und Kostenangaben durch die Hersteller können die Investitionen für die GLT-Förderer nicht quantifiziert werden.

5.1.2 Lagern

In der Klasse Lagern werden die Grundelemente der manuellen Lagerbewirtschaftung mittels Schubmaststapler und automatischer Lagerung von Paletten und KLT untersucht.

Schubmaststapler

Im Gebäudemodell der manuellen Lagerhalle erfolgen die Ein-/und Auslagerungen der Paletten in den 8,7 Meter hohen Gassen mithilfe eines Schubmaststaplers. Insgesamt werden im Untersuchungsmodell der manuellen Lagerhalle sieben Schubmaststapler betrieben, dessen Energiebedarf (siehe Kapitel 4.3.1) auf Basis der Herstellerangaben nach VDI-2198 berechnet wird. Die Randbedingungen sind der Tabelle 5.3 zu entnehmen. Die Werte basieren u. a. auf technischen Datenblättern von Herstellern [Jung-2013] [o.V.a-2013].

Tabelle 5.3: Übersicht der Randbedingungen des Schubmaststaplers im Grundmodell der manuellen Lagerhalle und der gebildeten Varianten

	SMS _GM	SMS _V1	SMS _V2
Schubmaststapler			
Anzahl	7	7	7
Betriebsstunden [h/a]	4.032	4.032	4.032
Batterieart und -spannung [V/Ah]	PzS 48/620	PzS 48/620	PzS 48/620
Ladetechnologie	HF	eneff. HF	eneff. HF
Wirkungsgrad Batterie+ Ladegerät	68 %	84 %	84 %
Verluste/ Rekuperation am Stapler	15 %/0	15 %/0	0/15 %
Energiebedarf Stapler/ab Strom- netz [kWh/h]	4 / 5,88	4 / 4,76	4 / 4,76
∑ Energiebedarf [kWh/a]	166.024	134.400	99.846

In Analogie zu den FFZ-Arten der Klasse Fördern wird die erste Variante SMS_V1 des Schubmaststaplers mit energieeffizienter Batterieladetechnologie ausgestattet. Bei der zweiten Varian-

te SMS_V2 wird zusätzlich davon ausgegangen, dass Energie am Schubmaststapler rekuperiert wird. Hierfür wird die Last und das Eigengewicht der Hubvorrichtung als Energiequelle genutzt. Herstellerangaben zufolge können bei Staplern durch das Nutzsenken bis zu 30 % über die Hubarbeit eingebrachte Energie in die bereits vorhandene Batterie oder andere Speicher rückgespeist werden [Käs-2009]. Für diese Untersuchung wird eine Rekuperation der Energie i. H. v. 15 % angenommen.

Der Einfluss der unterschiedlichen Varianten des Schubmaststapler auf die CO₂-Emissionen der manuellen Lagerhalle ist in Abbildung 5.9 dargestellt. Da das Gebäude in diesem Untersuchungsmodell einen sehr hohen Anteil an den CO₂-Emissionen hat, fallen die Einsparpotentiale der energieeffizienten Varianten der Schubmaststapler an den Gesamtemissionen mit 3,3 % und 5,0 % gering aus.

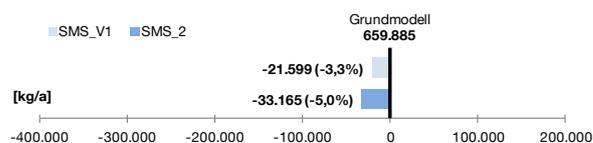


Abbildung 5.9: Vergleich der CO₂-Emissionen der manuellen Lagerhalle bei unterschiedlichen Varianten des Schubmaststaplers

Durch Lagerstrategien werden weitere CO₂-Einsparpotentiale gehoben. Mittels einer ABC-Zonierung kann der Energieaufwand für unnötige Transportwege vermieden werden. Hier bestehen auch Synergien zur Beleuchtungssteuerung in der manuellen Lagerhalle.

Die zusätzlichen Investitionen der Varianten sind in Abbildung 5.10 zu sehen. In beiden Varianten können wiederum nur die zusätzlichen Investitionen in die energieeffiziente Batterieladetechnologie quantifiziert werden. Es fehlen Informationen über die Kosten von notwendigen Rückspeisemodulen und Speicher für den Schubmaststapler.

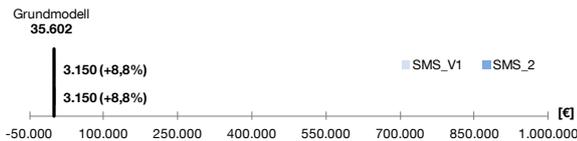


Abbildung 5.10: Zusätzliche Investitionen der unterschiedlichen Varianten des Schubmaststaplers in der manuellen Lagerhalle

Automatisches Hochregallager und Kleinteilelager

Das Grundelement automatisches Hochregallager mit vier Regalbediengeräten ist in gleicher Ausführung in den Untersuchungsmodellen des halbautomatischen Logistikzentrums und des vollautomatischen Distributionszentrums vertreten. Durch das Auflösen der manuellen MzW-Kommissionierung und Überführung in ein AKL mit angebundener WzM-Kommissionierung ist das AKL nur im vollautomatischen Untersuchungsmodell vertreten. Die Randbedingungen für die Ausführung im Grundmodell RBG_GM und für die Variante RBG_mit_Rü für das HRL als auch AKL der Untersuchungsmodelle sind in Tabelle 5.4 dargestellt. Hier werden in allen Untersuchungen bei der Variante RBG_mit_Rü die RBG mit Rückspeiseeinheiten ausgestattet. Aus den Untersuchungsmodellen ergeben sich die Durchsätze für die Energiebedarfsermittlung. Abbildung 5.11 zeigt den Einfluss der Optimierung des Grundelements automatisches HRL auf die CO₂-Emissionen des halbautomatischen Logistikzentrums und Abbildung 5.12 den Einfluss auf das vollautomatische Distributionszentrum.

Tabelle 5.4: Übersicht der Randbedingungen der Grundelemente automatisches HRL und AKL des halbautomatischen Logistikzentrums und des vollautomatischen Distributionszentrums

Halbautomatisches Logistikzentrum		
Automatisches Hochregallager mit Regalbediengeräten		
	RBG_GM	RBG_mit_Rü
Anzahl	4	
Gassenlänge / Gassenhöhe [m]	81,1 / 31,4	
Palettenstellplätze	14.256	
Anzahl Doppelspiele	120	

(DS) / Stunde		
Anzahl Doppelspiele (DS) / Jahr	423.360	
Durchschnittl. Pal Gewicht [kg]	500	
Spielzeit [s] nach FEM	109,8	
Mittlerer Energiebedarf / DS [kWh]	0,4574	0,3261
Σ Energiebedarf [kWh/a]	676.130	453.873

Vollautomatisches Distributionszentrum		
Automatisches Hochregallager mit Regalbediengeräten		
	RBG_GM	RBG_mit_Rü
Anzahl	4	
Gassenlänge / Gassenhöhe [m]	81,1 / 31,4	
Palettenstellplätze	14.256	
Anzahl Doppelspiele (DS) / Stunde	120	
Anzahl Doppelspiele (DS) / Jahr	483.840	
Durchschnittl. Pal Gewicht [kg]	375	
Spielzeit [s] nach FEM	109,8	
Mittlerer Energiebedarf / DS [kWh]	0,4574	0,3261
Σ Energiebedarf [kWh/a]	765.902	511.890

Automatisches Kleinteilelager mit Regalbediengeräten		
	AKL_RBG_GM	AKL_RBG_mit_Rü
Anzahl	6	
Gassenlänge / Gassenhöhe [m]	56,7 / 24,6	
Behälterstellplätze	83.160	
Anzahl Doppelspiele (DS) / Stunde	400	
Anzahl Doppelspiele (DS) / Jahr	1.612.800	
Durchschnittl. Behältergewicht [kg]	50	
Mittlerer Energiebedarf / DS [kWh]	0,0331	0,0246
Σ Energiebedarf [kWh/a]	344.398	220.501

Die berechneten CO₂-Einsparungen belaufen sich in einem Jahr auf 15,9 % und 16,3 %. Die CO₂-Einsparungen durch eine Optimierung des HRL sind relativ hoch, denn auch der Anteil des HRL an den CO₂-Emissionen am Grundmodell des halbautomatischen Logistikzentrums liegt mit 48 % bei fast der Hälfte.

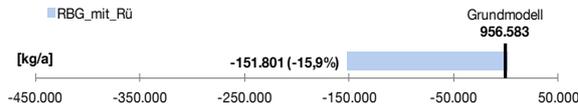


Abbildung 5.11: Vergleich der CO₂-Emissionen des halbautomatischen Logistikzentrums 17 °C mit und ohne Rückspeiseeinheit an den RBG des automatischen HRL

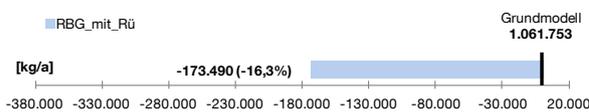


Abbildung 5.12: Vergleich der CO₂-Emissionen des vollautomatischen Distributionszentrums 17 °C mit und ohne Rückspeiseeinheit an den RBG des automatischen HRL

Anstatt generatorische Energie, die auf dem RBG nicht verbraucht wird, als Wärme über Bremswiderstände abzugeben, wird diese in das lokale Versorgungsnetz über die Rückspeiseeinheiten zurückgespeist [Bra-2012]. Die fehlende Wärme im HRL hat in den Heizfällen der Untersuchungsmodelle keine Auswirkung auf das Heizsystem. HRL und AKL bilden in den Untersuchungen eigene Temperaturzonen mit der Anforderung Frostschutz.

Im Temperaturfall des Kühllagers betrifft die Anforderung max. 6 °C auch die Zonen des HRL und AKL, sodass diese mit der Anforderung von 6 °C konditioniert werden müssen. Hier reduziert sich der gesamte Kühlenergiebedarf aufgrund fehlender interner Lasten durch die Abwärme der RBG bei der optimierten Variante. Auch sinkt der Energiebedarf der RBG. Trotzdem steigen die gesamten CO₂-Emissionen des vollautomatischen Distributionszentrums an, sodass die RBG mit Rückspeiseeinheit bei diesem Temperaturniveau nur noch 14 % der Gesamtemissionen einsparen können (vgl. Abbildung 5.13). Dies

liegt daran, dass das Kühlsystem mehr CO₂ emittiert als das Heizsystem der Grundmodelle.



Abbildung 5.13: Vergleich der CO₂-Emissionen des halbautomatischen Logistikzentrums 6 °C mit und ohne Rückspeiseeinheit an den RBG des automatischen HRL

Die zusätzlichen Investitionen, dargestellt in Abbildung 5.14, in die Rückspeiseeinheiten für die RBG des automatischen HRL betragen 2,4 % mehr als die reine Investition in Regalbediengeräte für Paletten ohne Rückspeiseeinheit.

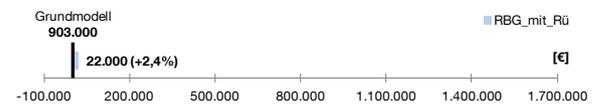


Abbildung 5.14: Zusätzliche Investitionen der unterschiedlichen Varianten, ohne und mit Energierückspeisung am RBG, des automatischen HRL beim halbautomatischen Logistikzentrum

Den Einfluss der Optimierung des Grundelements AKL auf die CO₂-Emissionen des vollautomatischen Distributionszentrums zeigt Abbildung 5.15. Die berechneten Einsparungen belaufen sich bei einem Jahr auf 8,0 %.

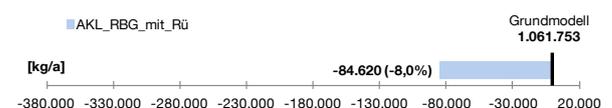


Abbildung 5.15: Vergleich der CO₂-Emissionen des vollautomatischen Distributionszentrums, 17 °C, mit und ohne Rückspeiseeinheit an den RBG des AKL

Die zusätzliche Investition in die Rückspeiseeinheiten für die RBG des AKL betragen 2,4 % mehr als die reine Investition in Regalbediengeräte ohne Rückspeiseeinheit (vgl. Abbildung 5.16).

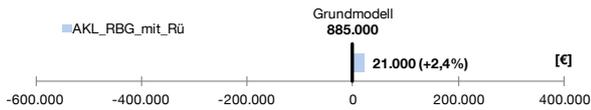


Abbildung 5.16: Zusätzliche Investitionen der unterschiedlichen Varianten, ohne und mit Energierückspeisung am RBG, des AKL beim vollautomatischen Distributionszentrum

5.1.3 Kommissionieren/Sortieren

In der Klasse Kommissionieren / Sortieren wird das Grundelemente MzW-Kommissionierung untersucht.

Sieben Horizontalkommissionierer stellen das Grundelement MzW-Kommissionierung des halbautomatischen Logistikzentrums dar. Wie bei den FFZ-Arten der Klasse Fördern erfolgt die Energieberechnung entsprechend des in 4.3.1 beschriebenen Vorgehens. Die Randbedingungen des Horizontalkommissionierers sind in Tabelle 5.5 aufgezeigt. Diese wurden ebenfalls aus technischen Datenblättern von Herstellern entnommen [Jung-2013] [o.V.a-2013].

Tabelle 5.5: Übersicht der Randbedingungen der getroffenen Varianten und des Grundmodells von Horizontalkommissionierern des halbautomatischen Logistikzentrums

	HKom_GM	HKom_V1	HKom_V2
Horizontalkommissionierer			
Anzahl	7	7	7
Betriebsstunden [h/a]	4.032	4.032	4.032
Batterieart und -spannung [V/Ah]	PzS 24/465	PzS 24/465	PzS 24/465
Ladetechnologie	HF	eneff. HF	eneff. HF
Wirkungsgrad Batterie+Ladegerät	68 %	84 %	84 %
Verluste / Rekupe-ration am Stapler	15 %/0	15 %/0	0/15 %
Energiebedarf Stapler / ab Stromnetz [kWh/h]	0,74 / 1,09	0,74 / 0,88	0,74 / 0,77
Σ Energiebedarf [kWh/a]	30.714	24.864	21.731

Wie auch bei den FFZ-Arten der Klasse Fördern wird der Horizontalkommissionierer variiert, indem dieser in der Variante HKom_V1 mit energieeffizienter Batterieladetechnologie ausgestattet wird. In der Variante HKom_V2 wird ebenfalls zusätzlich angenommen, dass die Bremsenergie rekuperiert wird und der Horizontalkommissionierer seine Aufträge mit minimalen Fahrwegen abarbeitet.

Abbildung 5.17 zeigt die CO₂-Emissionen des halbautomatischen Logistikzentrums in Bezug zu den dargestellten Varianten des Horizontalkommissionierers. Dieser hat mit seinen optimierten Varianten im Verhältnis zu den Gesamtemissionen einen sehr geringen Anteil und trägt zu einer Reduzierung der CO₂-Emissionen um 0,7 % im Gesamtsystem bei.

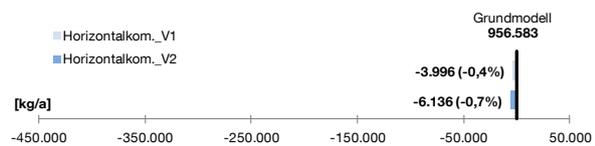


Abbildung 5.17: Vergleich der CO₂-Emissionen des halbautomatischen Logistikzentrums, 17 °C, bei unterschiedlichen Varianten des Horizontalkommissionierers

Die Investitionen für energieeffiziente Ladegeräte in Abbildung 5.18 gegenüber der Standardausführung Grundmodell sind um 12,6 % höher, amortisieren sich aber nach drei Jahren.

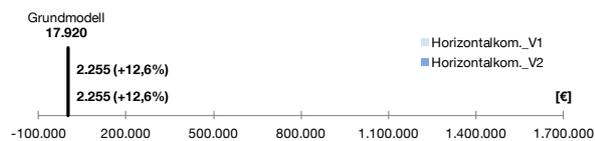


Abbildung 5.18: Zusätzliche Investitionen der unterschiedlichen Varianten des Horizontalkommissionierers beim halbautomatischen Logistikzentrum

5.1.4 Handhaben

In der Klasse Handhaben wird das Grundelement De-/Palettier-Roboter untersucht.

Im betrachteten Gebäudemodell des vollautomatischen Distributionszentrums wird das Grundelement De-/Palettier-Roboter zum Depalettieren der im Wareneingang eintreffenden Paletten

eingesetzt. Die Randbedingungen und Eingangsparameter des Roboters sind in Tabelle 5.6 dargestellt. Der Berechnungsansatz zur Ermittlung des Energiebedarfs ist in 4.3.1 beschrieben. Die Eingangswerte basieren auf Herstellerangaben [Klü-2011]. Die optimierte Variante Robi_V1 wird im Vergleich zum Grundmodell Robi_GM energieeffizient gesteuert, indem der Roboter in Ruhephasen abgeschaltet wird und somit keine Energie im Stand-by-Modus verbraucht.

Tabelle 5.6: Übersicht der Randbedingungen der getroffenen Variante und des Grundmodells Depalettier-Roboter des vollautomatischen Distributionszentrums

	Robi_GM	Robi_V1
Depalettier-Roboter		
Anzahl	1	1
Produktivzeit [h/a]		1.792
Wartezeit <20 s [h/a]		0
Wartezeit >20 s [h/a]		2.240
Stand-by [h/a]		4.728
Logistikleistung KLT / a		1.612.80
Energieverbrauch Produktivzeit [kWh]		2,5
Energieverbrauch Wartezeit <20 s [kWh]		0,65
Energieverbrauch Wartezeit >20 s [kWh]		0,22
Energieverbrauch Stand-by [kWh]	0,14	abgeschaltet
∑ Energiebedarf [kWh/a]	5.635	4.973

Durch den sehr geringen Energiebedarf im Verhältnis zum Gesamtenergiebedarf des vollautomatischen Distributionszentrums haben die Energieeinsparungen durch eine optimierte Betriebsweise des Roboters fast keine Auswirkungen auf die gesamten CO₂-Emissionen im Untersuchungsmodell (vgl. Abbildung 5.19). Dennoch besteht beim Roboter weiteres Einsparpotential in der Betriebsweise durch zeitliche Skalierung (Verlängerung der Laufzeit). Eine Rückspeisung der Bremsen-Energie ist jedoch nur bei hochbelasteten Maschinen sinnvoll [Klü-2011].

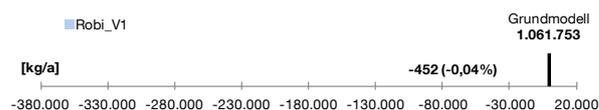


Abbildung 5.19: Vergleich der CO₂-Emissionen des vollautomatischen Distributionszentrums 17 °C bei unterschiedlichen Varianten des Depalettier-Roboters

Bei der Planung von De- / Palettierstationen ist darauf zu achten, ob die Greifer der Roboter mechanisch oder pneumatisch betrieben werden. Grundsätzlich ist es empfehlenswert, nicht nur beim Roboter auf druckluftbetriebene Anlagen und Komponenten zu verzichten. Denn Druckluft wird zentral in der Druckluftanlage erzeugt und verteilt. Dadurch entstehen Verteilungsverluste. Insbesondere Leckagen führen zu Verlusten von bis zu 80 % [BLfU-2004]. Aus diesem Grund wurde in allen Untersuchungsmodellen im Forschungsprojekt auf Druckluft verzichtet.

5.1.5 Materialfluss

Die Klasse Materialfluss bildet das Layout der Logistikzentren ab und betrachtet die gesamten logistischen Anlagen als ein Grundelement. Für die Standardausführung der Untersuchungsmodelle wird der Energiebedarf aller logistischen Anlagen im Grundmodell summiert und als das Grundelement Layout betrachtet. Variiert wird dieses, indem der Energiebedarf aller optimierten Varianten der Intralogistik verwendet wird. Dafür ausgewählt werden die optimierten Varianten aller Grundelemente der anderen Klassen mit dem höchsten CO₂-Einsparpotential und einer wirtschaftlichen Amortisationszeit.

In Tabelle 5.7 ist zuerst der Energiebedarf für die Intralogistik des Grundmodells und rechts daneben für die optimierte Intralogistik zu sehen. In der nächsten Zeile ist das Abwärmepotential der Intralogistik und der optimierten Intralogistik dargestellt. Bei der Bilanzierung des Abwärmepotentials des Grundmodells und der optimierten Variante der Intralogistik als interne Last in den jeweiligen Untersuchungsmodellen ist in der Zeile drunter der Energiebedarf nur für das Ge-

bäude zu sehen. Zu erkennen ist, dass in allen Untersuchungsmodellen der Energiebedarf für das Gebäude bei Nutzung der Abwärme der optimierten Logistik steigt. Der Gesamtenergiebedarf für Gebäude und Logistik sinkt jedoch bei Verwendung der optimierten Variante des Layouts im Vergleich zum Grundmodell. Denn die Einsparungen durch die Optimierung der Intralogistik sind im Ganzen höher als der Energie-mehrbedarf des Gebäudes durch die geringere Abwärme der Intralogistik.

Tabelle 5.7: Übersicht der Ergebnisse beim Variieren des Parameters Layout ausgehend vom Grundmodell 17 °C aller Untersuchungsmodelle

	Grundmodell	Optimierte Variante
Manuelle Lagerhalle		
Energiebedarf Intralogistik [kWh/a]	203.379	126.961
Abwärme Intralogistik [kW/a]	85.826	26.342
Energiebedarf Gebäude mit Nutzung Abwärme [kWh/a]	1.811.075	1.884.200
Energiebedarf Gebäude und Logistik mit Nutzung Abwärme [kWh/a]	2.014.455	2.011.162
Halbautomatisches Logistikzentrum		
Energiebedarf Intralogistik [kWh/a]	993.959	634.802
Abwärme Intralogistik [kW/a]	399.589	72.520
Energiebedarf Gebäude mit Nutzung Abwärme [kWh/a]	1.001.097	1.123.062
Energiebedarf Gebäude und Logistik mit Nutzung Abwärme [kWh/a]	1.995.056	1.757.864
Vollautomatisches Distributionszentrum		
Energiebedarf Intralogistik [kWh/a]	1.299.393	844.010
Abwärme Intralogistik [kW/a]	476.812	66.051
Energiebedarf Gebäude mit Nutzung Abwärme [kWh/a]	654.242	755.142
Energiebedarf Gebäude und Logistik mit Nutzung Abwärme [kWh/a]	1.953.635	1.599.152

Layout - manuelle Lagerhalle

Die Auswirkungen der Optimierung der Intralogistik auf die CO₂-Emissionen der gesamten manuellen Lagerhalle 17 °C sind in Abbildung 5.20 dargestellt.

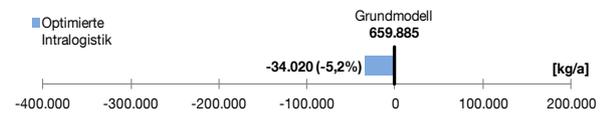


Abbildung 5.20: Vergleich der CO₂-Emissionen der manuellen Lagerhalle, 17 °C, bei Standardausführung der Intralogistik mit optimierter Intralogistik

Im Falle des manuellen Lagers als Kühllager, mit der Temperaturanforderung von 6 °C führt eine Senkung des Abwärmepotentials durch Optimierung der Intralogistik zu Einsparungen des Endenergiebedarfs des Gebäudes, da hier weniger Kühlleistung erbracht werden muss, um die Abwärme wieder auszugleichen. Die CO₂-Emissionen des Gesamtsystems sinken um ganze 11,8 % (vgl. Abbildung 5.21).

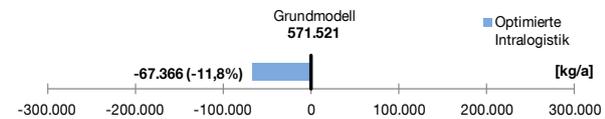


Abbildung 5.21: Vergleich der CO₂-Emissionen der manuellen Lagerhalle, 6 °C, bei Standardausführung der Intralogistik mit optimierter Intralogistik

Die zusätzlichen Investitionen zur Optimierung der gesamten Intralogistik im Vergleich zum Grundmodell sind in Abbildung 5.22 aufgezeigt.

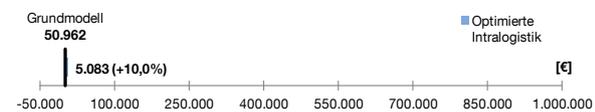


Abbildung 5.22: Zusätzliche Investitionen für die optimierte Intralogistik der manuellen Lagerhalle

Layout - halbautomatisches Logistikzentrum

Analog zu der manuellen Lagerhalle sind in Abbildung 5.23 die Auswirkungen der optimierten Intralogistik des halbautomatischen Logistikzentrums auf die gesamten CO₂-Emissionen für 17 °C und in Abbildung 5.24 für 6 °C dargestellt. Die Investitionen sind in Abbildung 5.25 zu sehen.

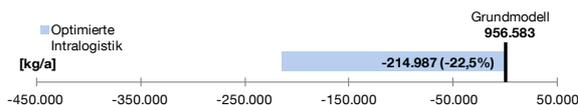


Abbildung 5.23: Vergleich der CO₂-Emissionen des halbautomatischen Logistikzentrum 17 °C bei Standardausführung der Intralogistik mit optimierter Intralogistik

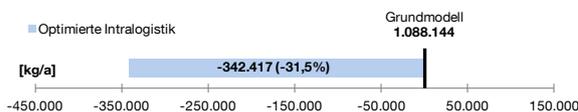


Abbildung 5.24: Vergleich der CO₂-Emissionen des halbautomatischen Logistikzentrum 6 °C bei Standardausführung der Intralogistik mit optimierter Intralogistik

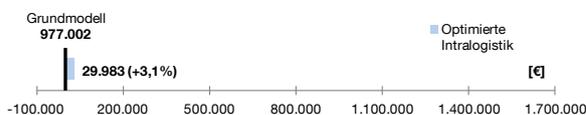


Abbildung 5.25: Zusätzliche Investitionen für die optimierte Intralogistik des halbautomatischen Logistikzentrum

Layout - vollautomatisches Distributionszentrum

Die Auswirkung auf die gesamten CO₂-Emissionen des vollautomatischen Distributionszentrums durch eine Optimierung der Intralogistik sind für das Temperaturniveau von 17 °C in Abbildung 5.26 und von 6 °C in Abbildung 5.27 dargestellt.

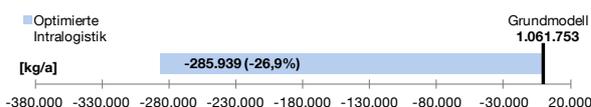


Abbildung 5.26: Vergleich der CO₂-Emissionen des vollautomatischen Distributionszentrums, 17 °C, bei Standardausführung der Intralogistik mit optimierter Intralogistik



Abbildung 5.27: Vergleich der CO₂-Emissionen des vollautomatischen Distributionszentrums, 6 °C, bei Standardausführung der Intralogistik mit optimierter Intralogistik

In Abbildung 5.28 werden die zusätzlichen Investitionen zur Optimierung der gesamten Intralogistik des vollautomatischen Distributionszentrums aufgezeigt.

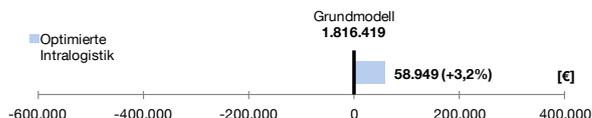


Abbildung 5.28: Zusätzliche Investitionen für die optimierte Intralogistik des vollautomatischen Distributionszentrums

Layout - Vergleich der Untersuchungsmodelle

Die Wechselwirkung der Intralogistik zu dem Gebäude und der resultierende Einfluss auf die gesamten CO₂-Emissionen durch Variation der Intralogistik als ein Parameter sind zusammenfassend in Abbildung 5.29 für den Heizfall 17 °C und in Abbildung 5.30 für den Kühlfall 6 °C der drei Untersuchungsmodelle dargestellt.

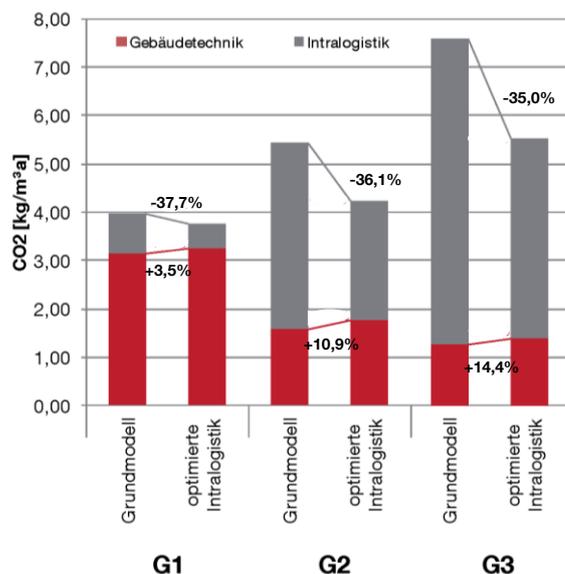


Abbildung 5.29: Vergleich der CO₂-Emissionen in kg/m³a für den Heizfall 17 °C der drei Untersuchungsmodelle mit und ohne optimierter Intralogistik

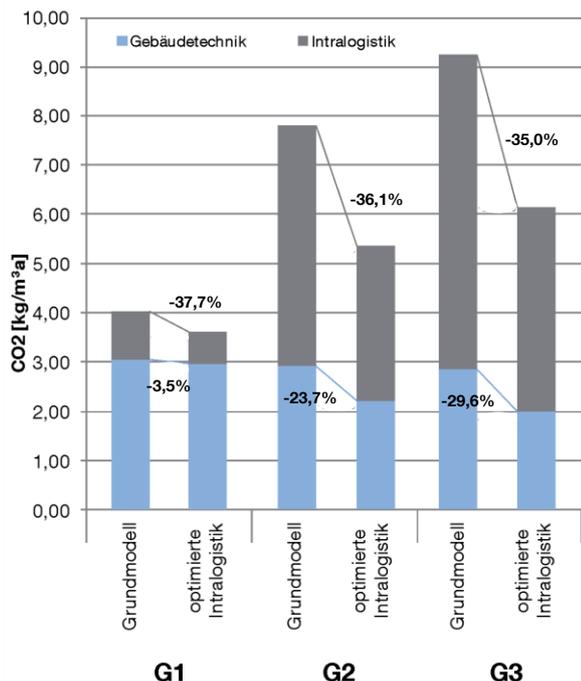


Abbildung 5.30: Vergleich der CO₂-Emissionen in kg/m³a für den Kühlfall 6 °C der drei Untersuchungsmodelle mit und ohne optimierter Intralogistik

5.2 Parameterstudien an Grundelementen im Bereich Gebäudehülle

Die [DIN 18599-1] definiert die Gebäudehülle wie folgt: "Die Hüllfläche bzw. wärmeübertragende Umfassungsfläche ist die Grenze zwischen konditionierten Räumen und der Außenluft, dem Erdreich oder nicht konditionierten Räumen. Über diese Fläche verliert oder gewinnt der gekühlte/beheizte Raum Wärme".

In der Außenwirkung bestimmt sie sowohl die Abmessungen und die Kubatur als auch das Erscheinungsbild; für den Innenraum hat die Hülle als wärmeübertragende Umfassungsfläche sowohl hohen Einfluss auf den Energiebedarf als auch auf das Behaglichkeitsempfinden des Nutzers.

Die Gebäudehülle wird bestimmt durch ihre Materialien mit ihren wärmeübertragenden Eigenschaften sowie durch Öffnungen wie Fenster, Türen und Tore.

Folgende Grundelemente der Gebäudehülle werden einer näheren Untersuchung unterzogen: Dämmeigenschaften der Hülle, Fassadenfenster, Dachfenster und Verladetore.

5.2.1 Dämmung

Der U-Wert bestimmt den Wärmedurchlass eines Bauteils: Je niedriger der U-Wert, desto weniger Wärmeenergie geht durch das Bauteil verloren. Bei den Untersuchungen erhalten die Bauteile des Grundmodells U-Werte, die den Anforderungen für niedrig beheizte Gebäude nach [EnEV-2009] Anlage 2, Tabelle 2 (12 °C bis < 19 °C) entsprechen. Anschließend werden die Dämmeigenschaften der Bauteile schrittweise verbessert. Tabelle 5.8 zeigt die Randbedingungen der einzelnen Untersuchungsvarianten.

Aufgrund der oft sehr großen Grundfläche ist es bei Logistikhallen wegen der daraus entstehenden hohen Investitionen unüblich, die gesamte Bodenplatte zu dämmen [ITG-2011]. Deshalb wird in der Untersuchungsvariante Dä_V1 lediglich eine waagrechte Randdämmung mit 5 m

Tabelle 5.8: Übersicht der verschiedenen Varianten mit unterschiedlichen Dämmstandards

	Dä_GM	Dä_V1	Dä_V2	Dä_V3
Bauteil	U-Wert [W/m²K]			
Außenwand	0,35	0,35	0,24	0,19
Dach	0,35	0,35	0,2	0,2
Bodenplatte	3,5	3,5	3,5	3,5
Randdämmung	-	0,35	0,3	0,17
Tore	2,9	2,9	1,8	1,8

Breite an der Bodenplatte angebracht, so wie dies in der Praxis meist auch realisiert wird. Bei der Untersuchungsvariante Dä_V2 erfüllen die untersuchten Bauteile den Dämmstandard des Referenzgebäudes nach EnEV für Nichtwohngebäude > 19 °C.

In Variante Dä_V3 werden die Bauteile Außenwand und Randdämmung mit sehr guten U-

Werten, welche heute aktuell erreichbar sind, ausgeführt.

Dämmung - manuelle Lagerhalle

Abbildung 5.31 zeigt die CO₂-Emissionen der manuellen Lagerhalle hinsichtlich der untersuchten Dämmstandards mit 17 °C Innenraumtemperatur.

Es wird ersichtlich, dass die Maßnahme der Randdämmung im Heizfall eine sehr geringe Senkung der Emissionen um 2 % bewirkt. Wird das Gebäude auf 6 °C gekühlt, ergibt sich eine Einsparung um weniger als 0,5 %.

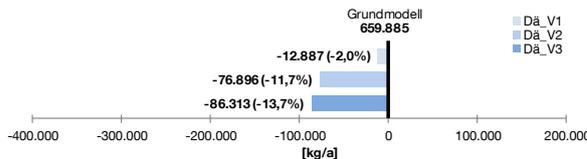


Abbildung 5.31: Vergleich der CO₂-Emissionen der manuellen Lagerhalle, 17 °C, bei unterschiedlichen Dämmstandards

Wird hingegen die Dämmung der Gebäudehülle wie in Variante Dä_V2 auf den EnEV-Standard > 19 °C verbessert, sinken die Transmissionswärmeverluste durch die Hülle erheblich und es lässt sich eine deutliche Reduktion der Emissionen von knapp 12 % bei 17 °C Innenraumtemperatur erreichen. Beim Kühlager wird in dieser Variante eine Reduzierung um 7,2 % erreicht.

Eine weitere Verbesserung der Dämmung wie bei Variante Dä_V3 bewirkt zwar eine weitere Senkung von 4 %, ist allerdings hinsichtlich der Mehrinvestitionen nur bei sehr ambitionierten Projekten wahrscheinlich.

In Abbildung 5.32 werden die zusätzlichen Investitionen aufgezeigt, die bei den verschiedenen Dämmmaßnahmen anfallen.

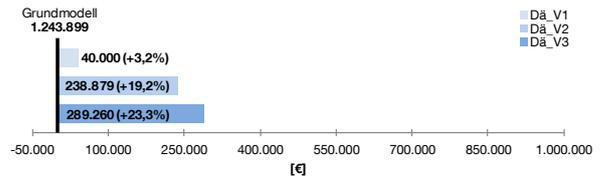


Abbildung 5.32: Zusätzliche Investitionen der unterschiedlichen Dämmstandards bei der manuellen Lagerhalle

Dämmung - halbautomatisches Logistikzentrum

Abbildung 5.33 zeigt die CO₂-Emissionen des halbautomatischen Logistikzentrums hinsichtlich der untersuchten Dämmstandards bei 17 °C.

Hier wird im Vergleich zur manuellen Lagerhalle zusätzlich der Fall untersucht, wenn nicht das komplette Gebäude mit einem höheren Dämmstandard errichtet wird, sondern nur die Haupt-

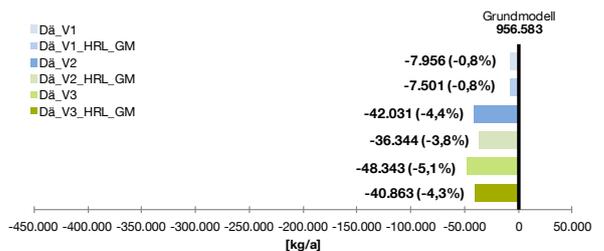


Abbildung 5.33: Vergleich der CO₂-Emissionen des halbautomatischen Logistikzentrums, 17 °C, bei unterschiedlichen Dämmstandards

halle. Da im Hochregallager lediglich eine Solltemperatur von 4 °C zur Sicherung des Frostschutzes vorgesehen ist, bleibt in diesen Untervarianten die Dämmung im HRL in der Ausführung des Grundmodells.

Es zeigt sich deutlich, dass der finanzielle Aufwand zur Ertüchtigung des Hochregallagers in besserer Dämmausführung weder im Verhältnis der zu erwartenden energetischen noch der finanziellen Einsparungen steht. Dies gilt sowohl für die Anbringung einer Randdämmung als auch für die Optimierung der kompletten Hülle. Die Emissionseinsparungen betragen in keinem Fall mehr als 1 %. Die prozentualen Einsparungen sind im Vergleich zur manuellen Lagerhalle zwar deutlich geringer, bezieht man aber die aufgrund

der kleineren Hüllfläche geringeren Investitionen mit ein, ergibt sich ein ähnlicher Return of Invest.

Bei dem Kühlager dürfen sämtliche Bereiche des Logistikzentrums die maximale Temperaturgrenze von 6 °C nicht überschreiten. Somit ist das Hochregallager immer dem Dämmstandard der Halle angepasst, folglich gibt es hier nur drei untersuchte Varianten (vgl. Abbildung 5.34). Generell lässt sich feststellen, dass die Einsparungen beim Kühlager geringer sind als im Heizfall. Dies hat mit der Durchschnittstemperatur der Außenluft von 8,6 °C im Testreferenzjahr [Meteo-norm-2013] zu tun, sodass die Temperatursenkung auf 6 °C weniger energetischen Aufwand nach sich zieht als eine Anhebung auf 17 °C.

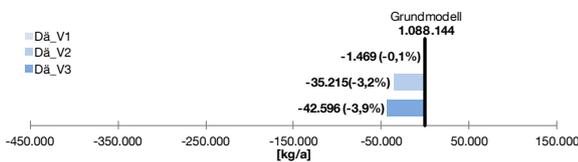


Abbildung 5.34: Vergleich der CO₂-Emissionen des halbautomatischen Logistikzentrums, 6 °C, bei unterschiedlichen Dämmstandards

Dämmung - vollautomatisches Distributionszentrum

Wie beim halbautomatischen Logistikzentrum werden die energetischen Auswirkungen untersucht, wenn einerseits die komplette Gebäudehülle verbessert wird und andererseits das Hochregallager sowie das automatische Kleinteilelager in der Ausführung des Grundmodells bleiben.

In Abbildung 5.35 sind die Einsparungen bei unterschiedlichen Dämmstandards abgebildet. Es ist erkenntlich, dass der Einfluss einer optimierten Gebäudehülle beim vollautomatisierten Lager abnimmt. Es lässt sich selbst bei der Variante Da_V3 eine maximale Einsparung von nur 2,5 % erreichen.

Dennoch kann wegen der deutlich kleineren Hüllfläche und den damit verhältnismäßig geringen Mehrkosten mindestens der Dämmstandard

Dä_V2 für den Hallenbau empfohlen werden. Betrachtet man alleine den Bedarf des Gebäudes ohne die Intralogistik, verringern sich die Emissionen bei Variante Da_V2_HRL_GM um über 10 %.

Noch mehr als beim halbautomatischen Lager macht hier eine Optimierung der Gebäudehülle lediglich bei der Haupthalle Sinn. Energetisch und finanziell kann auf eine verbesserte Hüll-dämmung beim HRL und ALK verzichtet werden. Abbildung 5.36 verdeutlicht die zusätzlich entstehenden Kosten bei der Dämmoptimierung des vollautomatischen Distributionszentrums.

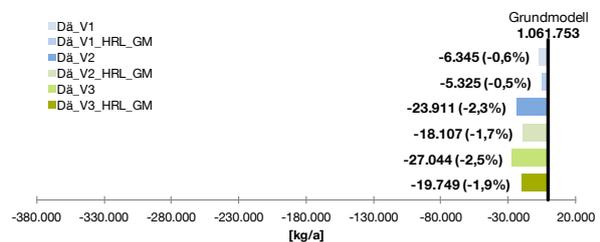


Abbildung 5.35: Vergleich der CO₂-Emissionen des vollautomatischen Distributionszentrums, 17 °C, bei unterschiedlichen Dämmstandards

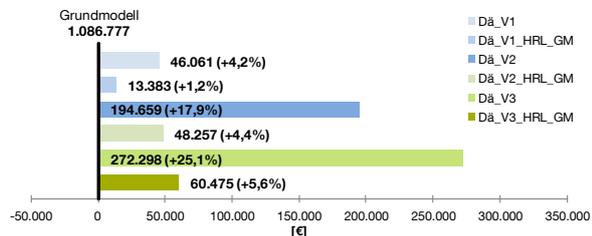


Abbildung 5.36: Zusätzliche Investitionen der unterschiedlichen Dämmstandards beim vollautomatischen Distributionszentrum

Bei der Dämmung lässt sich festhalten, dass diese einen hohen Einfluss auf den Heiz- und Kühlenergiebedarf des Gebäudes nimmt. Mit einem zunehmenden Automatisierungsgrad der Intralogistik im Logistikzentrum verliert die Dämmung an Einfluss auf den Gesamtenergiebedarf, die Auswirkungen für den Heizenergiebedarf bleiben dennoch vorhanden. Entsprechend den aufgeführten Untersuchungen ist Da_V2 zu empfehlen. HRL und AKL können im Standard (Dä_GM) ausgeführt werden, wenn lediglich der Frostschutz eingehalten werden soll.

5.2.2 Kubatur

Eine der Untersuchungen der Gebäudehülle behandelt die Kubatur der Halle. Bei gleichbleibendem Hallenvolumen von 140.000 m³ wird untersucht, welche Auswirkung ein schlechteres A/V-Verhältnis auf die CO₂-Emissionen hat. Dabei wird bei gleichbleibender Breite die Länge der Halle verdoppelt und die Höhe hingegen auf 7 Meter reduziert. Tabelle 5.9 zeigt die Randbedingungen der untersuchten Varianten.

Tabelle 5.9: Übersicht der Randbedingungen der Varianten mit unterschiedlicher Kubatur in der manuellen Lagerhalle

	GM_ quadratisch	Variante_ längs
Länge [m]	100	200
Breite [m]	100	100
Höhe [m]	14	7
Fläche netto [m²]	10.000	20.000
Volumen [m³]	140.000	140.000
Hüllfläche [m²]	25.680	44.320

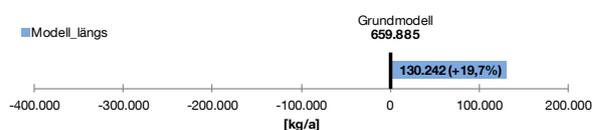


Abbildung 5.37: Vergleich der CO₂-Emissionen der manuellen Lagerhalle, 17 °C, bei länglicher Kubatur

Die Vergrößerung der Hüllfläche bewirkt einen deutlich erhöhten Transmissionswärmeverlust, den die solaren Gewinne über die opake Hüllfläche nicht ausgleichen können. Dies hat zur Folge, dass die CO₂-Emissionen um knapp 20 % steigen (vgl. Abbildung 5.37).

Im Falle des Kühllagers bewirkt das schlechtere A/V-Verhältnis sogar eine Emissionssteigerung um 46 %, was dementsprechende Auswirkungen auf die laufenden Kosten nach sich zieht.

Da die Hülle im Fall einer länglichen Ausführung ca. 80 % mehr Fläche aufweist, steigen überdies die Baukosten in gleichem Maße. Somit kann ausdrücklich empfohlen werden, schon im Vorfeld auf eine kompakte Bauweise zu achten und

die Hüllfläche weitestgehend zu minimieren. Diese Erkenntnis sollte somit schon bei der Suche nach einem geeigneten Grundstück berücksichtigt werden.

Bei den Typologien halbautomatisches Logistikzentrum und vollautomatisches Distributionszentrum wurden keine Untersuchungen zu unterschiedlichen Kubaturen vorgenommen. Hier ist der Spielraum durch die Addition von HRL und AKL geringer, die Kubatur erschließt sich mehr aus dem durch den Materialfluss und die Logistikanforderungen gesetzten Layout. Jedoch sollte auch in diesen Fällen so weit wie möglich auf eine Verringerung der Hüllfläche geachtet werden.

5.2.3 Fassadenfenster

Während im Wohnungsbau Fenster in der Fassade selbstverständlich sind, sind sie im Industriebau und vor allem bei Logistikzentren eher die Ausnahme. Dabei verbessern Fenster durch das Einbringen von Tageslicht die Behaglichkeitsbedingungen der Nutzer erheblich. Unterschiedliche Lichtintensitäten durch den Tages- und Jahresverlauf, wechselnde Farbtemperaturen sowie der Sichtbezug zur Außenwelt verbessern das Wohlbefinden des Menschen derart, was kein Kunstlicht ansatzweise ersetzen kann. Darüber hinaus wirkt sich Tageslicht positiv auf die Leistungsfähigkeit des Menschen aus [Hau-2009a].

Da in den definierten Grundmodellen keine Fenster vorhanden sind, wird untersucht, wie sich die energetischen Eigenschaften auswirken, wenn Fenster in der Fassade integriert werden. Um Blendung im Innenraum zu vermeiden und um im Sommer einer Überhitzung entgegenzuwirken, ist bei allen Fenstern ein außenliegender Sonnenschutz vorgesehen. Dieser stellt sich automatisch in Abhängigkeit der Einstrahlung ein.

Da die drei untersuchten Typologien unterschiedliche Voraussetzungen mitbringen, verändern sich hier die Randbedingungen von Modell zu Modell. Dennoch sind die Fenstergrößen so

gewählt, dass sich bei allen drei Modellen der Fensterflächenanteil bezogen auf die jeweilige Wandfläche von Variante zu Variante verdoppelt.

Zusätzlich werden die unterschiedlichen Varianten mit drei verschiedenen Dämmstandards für die Fenster kombiniert. Die zugehörigen Randbedingungen dieser Verglasungen sind in Tabelle 5.10 abgebildet und gelten für alle drei Modelle.

Tabelle 5.10 Übersicht der verschiedenen Fensterdämmstandards

	FF_Dä_V1	FF_Dä_V2	FF_Dä_V3
U-Wert	1,9	1,3	0,7
g-Wert	0,6	0,6	0,5
Ɔ-D65	0,78	0,78	0,71

Fassadenfenster - manuelle Lagerhalle

Die Randbedingungen der untersuchten Varianten in der manuellen Lagerhalle sind in Tabelle 5.11 abgebildet.

Wie erwähnt besitzt das Grundmodell keine Fenster. In Variante FF_V1 werden an der Südseite über den Verladetoren und somit über die gesamte Breite der Vorzone 15 Fenster mit den Maßen 4,5 m · 3 m integriert, was einem Fensterflächenanteil von 2 % – bezogen auf die Wandfläche – entspricht.

Variante FF_V2 hat zusätzlich jeweils an der Ost- sowie der Westfassade ebenfalls 15 Fenster mit den gleichen Maßen. In der Variante FF_V3 werden darüber hinaus noch an der Nordfassade Fenster verbaut.

Abbildung 5.38 zeigt die Ergebnisse der untersuchten Varianten bei 17 °C Innenraumtemperatur. Dabei wird ersichtlich, dass die energetischen Auswirkungen allesamt verhältnismäßig gering ausfallen. Auffällig ist, dass sich der Energiebedarf mit der Standard-Verglasung (FF_Dä_V1) am meisten senken lässt, wenn die Fenster nur auf der Südseite verbaut sind. Ab FF_V2 sinken die Einsparungen gegenüber dem Grundmodell wieder, da hier mehr Transmis-

sionswärmeverluste entstehen, als Gewinne durch die solare Einstrahlung entstehen.

Tabelle 5.11: Übersicht der verschiedenen Varianten mit unterschiedlichem Fensterflächenanteil in der manuellen Lagerhalle

	FF_GM	FF_V1	FF_V2	FF_V3
Breite/Höhe	n.v.	4,5 m · 3 m		
Anzahl Süd	0	15	15	15
Anzahl Ost / West	0	0	15/15	15/15
Anzahl Nord	0	0	0	15
Fensterfläche gesamt	0	203 m ²	608 m ²	810 m ²

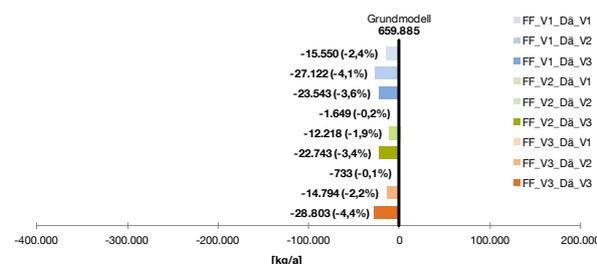


Abbildung 5.38: Vergleich der CO₂-Emissionen der manuellen Lagerhalle, 17 °C, bei unterschiedlichen Fassadenfenstern

Soll aufgrund von Behaglichkeitskriterien das Gebäude weiter aufgeglast werden wie in den Varianten FF_V2/FF_V3, so empfiehlt sich die Ausführung der Fenster mindestens im Dämmstandard FF_Dä_V2.

Im Vergleich zu anderen Maßnahmen an der Gebäudehülle fällt jedoch die Maßnahme der Fassadenfenster relativ gering aus. Anders als im Wohnungsbau ist hier die große Gebäudetiefe verantwortlich, dass nicht mehr Tageslicht in die Halle gelangt und sich der Stromverbrauch für Kunstlicht nicht signifikant senken lässt.

Werden die zusätzlichen Investitionen in Relation zu den zu erwartenden Einsparungen gesetzt, ist am ehesten die Variante FF_V1_Dä_V2 zu empfehlen. Aufgrund der geringen CO₂-Einsparungen und des hohen Invests ist die Verbauung von Fenstern an der Ost und West bzw. Nordseite

des Gebäudes finanziell gesehen nicht zu empfehlen (vgl. Abbildung 5.39).

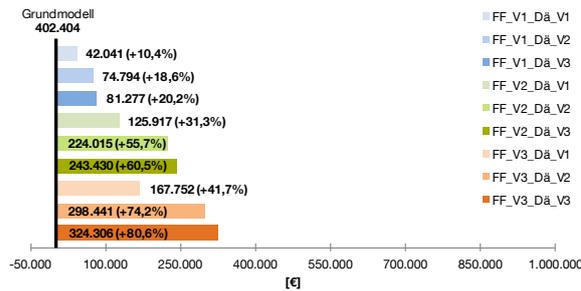


Abbildung 5.39: Zusätzliche Investitionen der unterschiedlichen Fassadenfenstervarianten bei der manuellen Lagerhalle, 17 °C

Wird die Halle auf 6 °C gekühlt, zeigt sich bei allen untersuchten Varianten ein energetischer Mehrbedarf. Die CO₂-Emissionen steigen, je mehr Fenster in der Fassade integriert sind. Somit sollte auf eine Verglasung der Hülle bei einem Kühllager verzichtet werden.

Fassadenfenster - halbautomatisches Logistikzentrum

Im halbautomatischen Logistikzentrum besitzt die Halle standardmäßig einen Ost/West – orientierten, länglichen Grundriss, das Hochregallager grenzt an der schmalen Seite im Norden an, die Anlieferung geschieht im Westen. Aus diesem Grund sind in Variante FF_V1 die Fenster wieder über den Verladetoren und somit nahe des Arbeitsbereichs integriert. Variante FF_V2 besitzt zusätzlich im Osten sowie im Süden Fassadenfenster. In Tabelle 5.12 der sind die Randbedingungen der Varianten ersichtlich.

In Abbildung 5.40 ist dargestellt, dass sich das Einsparpotenzial in sehr geringem Rahmen bewegt. In der Variante FF_V1 lassen sich kaum Einsparungen erreichen. Da die Fenster nach Westen orientiert sind, wird im Falle einer Ausführung aus Behaglichkeitsgründen der Fensterdämmstandard FF_Dä_V3 empfohlen.

Tabelle 5.12: Übersicht der verschiedenen Varianten mit unterschiedlichem Fensterflächenanteil im halbautomatischen Logistikzentrum

	FF_GM	FF_V1	FF_V2
Breite/Höhe	n.v.	4,5 m · 3 m	
Anzahl Süd	0	0	8
Anzahl Ost	0	0	12
Anzahl West	0	12	12
Anzahl Nord	0	0	0
Fensterfläche gesamt	0	162 m ²	432 m ²

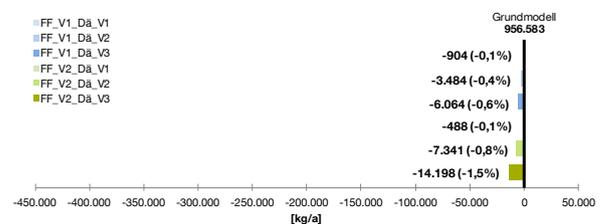


Abbildung 5.40: Vergleich der CO₂-Emissionen des halbautomatischen Logistikzentrums, 17 °C, bei unterschiedlichen Fassadenfenstern

Die meisten Einsparungen an CO₂-Emissionen lassen sich in der dreiseitig-orientierten Ausführung mit höchstem Dämmstandard mit 1,5 % erzielen. In Anbetracht der Investition ist dies aber nicht wirtschaftlich darstellbar.

Fassadenfenster - vollautomatisches Distributionszentrum

Im vollautomatischen Distributionszentrum ist das Hochregallager sowie das automatische Kleinteilelager im Norden der Haupthalle angeordnet, die Ladetore befinden sich auf der Südseite. In Variante FF_V1 befinden sich 10 Fenster über den Verladetoren, Variante FF_V2 hat zusätzlich an der Ost- sowie der Westseite vier zusätzliche Fenster. Die Randbedingungen sind in Tabelle 5.13 abgebildet.

Wie in Abbildung 5.41 ersichtlich, lassen sich in keiner der untersuchten Varianten erwähnenswerte Einsparungen an CO₂-Emissionen erzielen.

Tabelle 5.13: Übersicht der verschiedenen Varianten mit unterschiedlichem Fensterflächenanteil im vollautomatischen Distributionszentrum

	FF_GM	FF_V1	FF_V2
Breite/ Höhe	n.v.	4,5 m · 1,5 m	
Anzahl Süd	0	10	10
Anzahl Ost	0	0	4
Anzahl West	0	0	4
Anzahl Nord	0	0	0
Fensterfläche gesamt	0	68 m ²	122 m ²

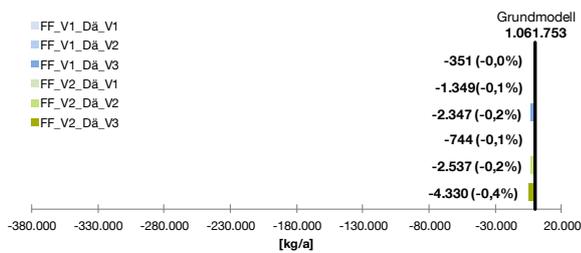


Abbildung 5.41: Vergleich der CO₂-Emissionen des vollautomatischen Distributionszentrums, 17 °C, bei unterschiedlichen Fassadenfenstern

Obwohl der Fensterflächenanteil bezogen auf die Wandfläche wie bei den anderen Typologien in gleichem Maße steigt, reichen die Fenster nicht aus, das Potenzial der solaren Einstrahlung zu nutzen sowie nennenswerte Einsparungen bei der Beleuchtung zu erzielen. Aus diesem Grund ist der Verbau von Fassadenfenstern beim vollautomatisierten Distributionszentrum aus energetischer Sicht nicht zu empfehlen.

Zusammenfassend besteht ein geringer Einfluss auf den Energiebedarf, jedoch eine große Bedeutung für das Behaglichkeitsempfinden der Nutzer. An der Südfassade haben Fenster noch am meisten Einfluss und können in der Dämmung FF_Dä_V1 ausgeführt werden. Ost/West/Nord-orientierte Fenster sind nicht zu empfehlen. Sollen trotzdem Fenster verbaut werden, dann nur in der Dämmung FF_Dä_V3.

5.2.4 Dachfenster

Neben Fenstern in der Fassade kann natürliches Tageslicht auch über die horizontale Hüllfläche in Form von Lichtkuppeln in den Raum gebracht werden. Um zusätzlich eine gute Luftqualität für den Nutzer sicherzustellen, kann als Orientierungswert ein Dachfensteranteil (bezogen auf die Grundfläche) von 2 % angenommen werden [VFLR-2013]. Deshalb ist das definierte Grundmodell in allen drei Typologien mit diesem prozentualen Dachfensteranteil ausgestattet. Bei der Untersuchung der Dachfenster bleibt die Anzahl der Dachfenster stets gleich, die Maße der Lichthauben vergrößern sich von Variante zu Variante und somit wird auch der verglaste Anteil

Tabelle 5.14: Übersicht der untersuchten Varianten mit unterschiedlichem Dachfensteranteil

	DF_GM	DF_V1	DF_V2	DF_V3
Breite/ Länge [m]	1,5 · 1	1,5 · 2	2 · 3	2 · 6
Dachfensteranteil_{GF}	2 %	4 %	8 %	16 %
Manuelle Lagerhalle				
Anzahl	132	132	132	132
Fensterfläche Lichthauben [m²]	198	396	792	1584
Halbautomatisches Logistikzentrum				
Anzahl	55	55	55	55
Fensterfläche Lichthauben [m²]	82,5	165	330	660
Vollautomatisches Distributionszentrum				
Anzahl	22	22	22	22
Fensterfläche Lichthauben [m²]	33	66	132	264

bezogen auf die Grundfläche größer, wie in Tabelle 5.14 dargestellt. Zudem werden im Fall Dachfenster die Varianten mit zwei unterschiedlichen Dämmeigenschaften der Verglasung variiert, diese sind in Tabelle 5.15 abgebildet. Dabei stellt DF_Dä_GM die Standardverglasung dar,

wie sie in der [EnEV-2009] für Nichtwohngebäude gefordert ist, DF_Dä_V3 bildet einen sehr guten Standard ab.

Bei den Typologien halbautomatisches Logistikzentrum und vollautomatisches Distributionszentrum besitzen das Hochregallager sowie das Kleinteilelager jeweils fünf Lichthauben mit den Maßen 1 m · 1,5 m. Dies entspricht den Brandschutzvorgaben nach der VDI-Richtlinie 3564 [VDI-3564]. Diese Lichthauben sind nicht in die Untersuchungen einbezogen.

Tabelle 5.15: Übersicht der verschiedenen Fensterdämmstandards für Lichthaubenverglasung

	DF_Dä_GM	DF_Dä_V3
U-Wert [W/m ² K]	2,7	1,3
g-Wert	0,64	0,4
τ-D65	0,59	0,4

Dachfenster - manuelle Lagerhalle

Abbildung 5.42 zeigt die Auswirkungen der untersuchten Maßnahmen auf die CO₂-Emissionen. Dabei wird ersichtlich, dass die Emissionen mit der Standardverglasung DF_Dä_GM bei jeder Vergrößerung der transparenten Dachfläche ansteigen. Das Ergebnis wendet sich zum Gegenteil, wenn die bessere Verglasung DF_Dä_V3 gewählt wird. Dies lässt sich durch den guten U-Wert erklären, da so weniger Wärme durch das Glas verloren geht.

Bei der Verglasung DF_Dä_V3 verringert sich der Energiebedarf, je größer die Lichthauben sind, auf bis zu 2,5 %. In Anbetracht der sehr hohen Kosten der Lichtkuppeln ist diese Maßnahme allerdings wirtschaftlich nicht zu empfehlen. Durch die Höhe der Halle von 14 Metern gelangt

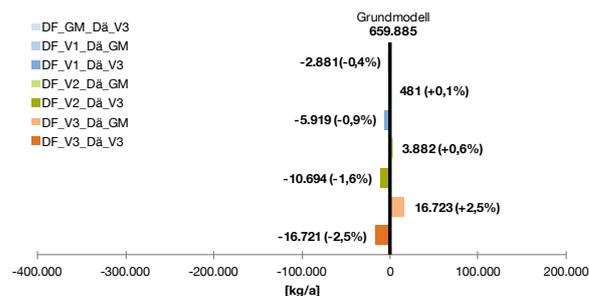


Abbildung 5.42: Vergleich der CO₂-Emissionen der manuellen Lagerhalle, 17 °C, bei unterschiedlichem Dachfensteranteil

noch immer zu wenig Tageslicht auf den Arbeitsbereich, sodass der Strombedarf für die Beleuchtung nicht sinkt.

Wird die Halle auf 6 °C gekühlt, stellt DF_GM_Dä_V3 die einzige Variante dar, bei der eine Verringerung der CO₂-Emissionen im

Vergleich zum Grundmodell (-2,5 %) erreicht werden kann, in allen anderen Ausführungen steigen diese. Das lässt sich mit dem niedrigeren g-Wert der Verglasung erklären, sodass weniger Solarstrahlung in den Halleninnenraum gerät und somit weniger erhitzt.

Aus energetischer Sicht kann die Empfehlung gegeben werden, in jeder Ausführung auf die besseren Glaseigenschaften (DF_Dä_V3) auszuweichen. Bei der gekühlten Halle ist darauf zu achten, den Dachfensteranteil möglichst gering zu halten.

Dachfenster - halbautomatisches Logistikzentrum

Die Auswirkungen der Untersuchungen mit unterschiedlichem Dachfensteranteil verhalten sich im halbautomatischen Logistikzentrum ähnlich zu denen der manuellen Lagerhalle. Je mehr Lichthauben verbaut sind, desto mehr Energiebedarf entsteht bei Ausführung in der Standardverglasung. Werden die Dachfenster in der Ausführung DF_Dä_V3 verwendet, werden bei höher verglastem Dachanteil weniger CO₂-Emissionen ausgestoßen. Durch den geringeren Anteil der Haustechnik am Gesamtbedarf fallen die prozentualen Veränderungen allerdings geringer aus.

Im Falle einer Kühlung der Halle reduziert sich wie bei den anderen Typologien der Bedarf lediglich in der Variante DF_GM_Dä_V3, wie in Abbildung 5.43 ersichtlich.

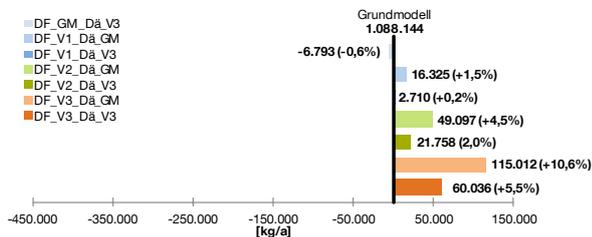


Abbildung 5.43: Vergleich der CO₂-Emissionen des halb-automatischen Logistikzentrums, 6 °C, bei unterschiedlichem Dachfensteranteil

Dachfenster - vollautomatisches Distributionszentrum

Abbildung 5.44 zeigt den CO₂-Ausstoß der untersuchten Varianten des vollautomatischen Distributionszentrums. Es ist ersichtlich, dass die verschiedenen Dachfensteranteile sowie die Dämmeigenschaften der Fenster keinen Einfluss auf den Gesamtbedarf des Distributionszentrums haben.

Durch den geringen Einfluss auf den Heizenergiebedarf macht ein höherer Dachfensteranteil keinen Sinn. Sollen dennoch mehr Dachfenster verbaut werden, ist DF_Dä_V3 zu wählen. Im Kühlfall sollte die Mindestanforderung von 2 % DFA nicht überschritten und DF_Dä_V3 gewählt werden.

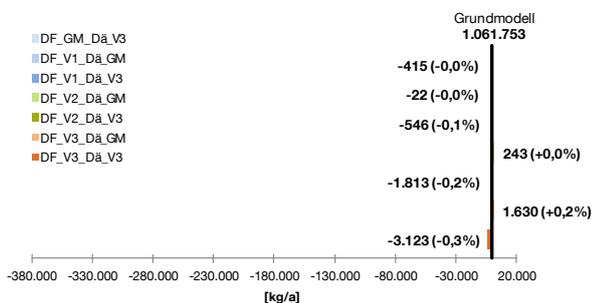


Abbildung 5.44: Vergleich der CO₂-Emissionen des voll-automatischen Distributionszentrums, 17 °C, bei unterschiedlichem Dachfensteranteil

5.2.5 Vorsatzschleuse

Das definierte Grundmodell besitzt an den Verladetoren eine Planen-Torabdichtung, wie sie in den meisten Logistikzentren vorzufinden ist. Diese passt sich den unterschiedlichen Lkw-Größen an, schützt vor Witterungseinflüssen und verhindert Zugluft, wenn das Tor beim Be- bzw. Entladen geöffnet ist. Dennoch wird durch diese Torabdichtung keine komplette Abschottung zur Außenluft erreicht, montagebedingt sind immer Durchlässigkeiten zu erwarten. Da die hydraulische Ladebrücke an die verschiedenen Höhen der Zubringer andockt, ist in diesem Bereich die Wärmedämmung unterbrochen, d. h. im Bereich der Ladebrücke, die in direktem Kontakt mit der Außenluft steht, entsteht eine Wärmebrücke.

Tabelle 5.16: Lüftungswärmeverluste durch Verladevorgänge der untersuchten Typologien bei 17 °C

	GM	Vorsatzschleuse
	Luftwechsel [m ³ /m ² h]	
manuelle Lagerhalle	1	1
halbautomatisches Logistikzentrum	4,21	3,79
vollautomatisches Distributionszentrum	10,4	9,36

Als optimierte Variante wird eine Vorsatzschleuse untersucht. Durch diese Konstruktion wird einerseits eine durchgehende Dämmung der Fassade ermöglicht, andererseits werden die Wärmeverluste durch einen reduzierten Luftaustausch minimiert.

Für die Bestimmung der Lüftungswärmeverluste beim Ladevorgang wird angenommen, dass nur noch der direkte Luftaustausch mit dem LKW bestimmend ist. Tabelle 5.16 zeigt die für die Berechnung ermittelten Luftwechselraten. Diese liegen bei der manuellen Lagerhalle unter den Anforderungen der [DIN 18599-10], sodass hier in jedem Fall der Luftwechsel von 1 m³/m²h zur Berechnung herangezogen wird.

Vorsatzschleuse - manuelle Lagerhalle

In Abbildung 5.45 sind die Auswirkungen auf die CO₂-Emissionen mit Vorsatzschleuse dargestellt. Durch die Anbringung einer Vorsatzschleuse sinken die CO₂-Emissionen um ca. 13 %. Da durch diese Maßnahme jährlich etwa 12.500 € Energiekosten eingespart werden können und die Mehrkosten bei ca. 90.000 € liegen, rechnet sich eine Vorsatzschleuse nach etwas mehr als sieben Jahren.

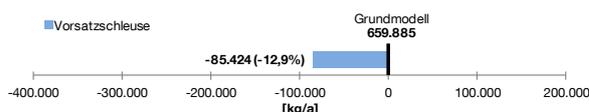


Abbildung 5.45: Vergleich der CO₂-Emissionen der manuellen Lagerhalle, 17 °C, mit und ohne Vorsatzschleuse

Vorsatzschleuse - halbautomatisches Logistikzentrum

Abbildung 5.46 zeigt die CO₂-Emissionen des halbautomatischen Logistikzentrums mit und ohne Vorsatzschleuse. Durch die Verwendung der Vorsatzschleuse wird 5,6 % weniger CO₂ verursacht. Im Vergleich zur manuellen Lagerhalle bedeutet dies, dass etwa 30.000 kg/a weniger CO₂ eingespart werden kann, was dem kleineren zu beheizendem Raumvolumen geschuldet ist. Wird der intralogistische Bedarf nicht mit berücksichtigt, verbessert sich der prozentuale Anteil der Einsparungen zur manuellen Lagerhalle um weitere 3 %. Obwohl es im halbautomatischen Logistikzentrum drei weitere Tore gibt und die jährlichen Einsparungen geringer ausfallen, rechnet sich der finanzielle Mehraufwand nach ca. 14 Jahren.

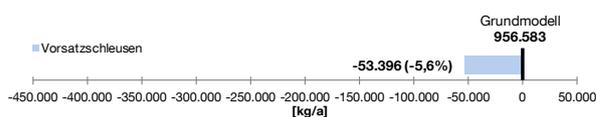


Abbildung 5.46: Vergleich der CO₂-Emissionen des halbautomatischen Logistikzentrums, 17 °C, mit und ohne Vorsatzschleuse

Vorsatzschleuse - vollautomatisches Distributionszentrum

Abbildung 5.47 zeigt, dass im vollautomatischen Distributionszentrum der CO₂-Ausstoß durch eine Vorsatzschleuse im Vergleich zum Grundmodell nur um ca. 3 % gesenkt werden kann. Obwohl dies sehr gering erscheint, ist diese Maßnahme im Vergleich zu den anderen Untersuchungen der Gebäudehülle, vor allem in Anbetracht des zusätzlichen Investits, immer noch ein akzeptabler Wert. Bei isolierter Betrachtung der CO₂-Emissionen für die Haustechnik betragen die Einsparungen für diese Ausführung ca. 17 %.

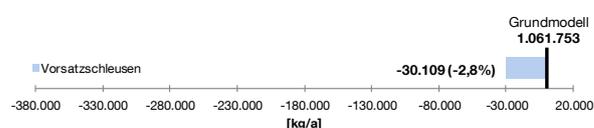


Abbildung 5.47: Vergleich der CO₂-Emissionen des vollautomatischen Distributionszentrums, 17 °C, mit und ohne Vorsatzschleuse

5.3 Parameterstudien an Grundelementen im Bereich Gebäudetechnik

Die im vorangehenden Kapitel untersuchten Elemente der Gebäudehülle haben einen direkten Einfluss auf den Energiebedarf des Logistikzentrums, der durch entsprechende Anlagentechniken gedeckt wird.

Die Untersuchungen der definierten Klassen der Gebäudetechnik wie die Beleuchtungssteuerung, die Lüftung, das Heiz- bzw. Kühlsystem sowie die Stromerzeugung durch Photovoltaik werden im Folgenden vorgestellt.

5.3.1 Beleuchtungssteuerung

Das definierte Grundmodell besitzt in allen drei untersuchten Typologien als Beleuchtungsmittel einheitliche Leuchtstofflampen mit elektronischem Vorschaltgerät. Die Beleuchtungsstärke auf Nutzebene ist mit 150 Lux definiert, dies entspricht den Nutzungsrandbedingungen der [DIN 18599-10]. Das System wird automatisch tageslichtabhängig geregelt. Weitere im For-

Tabelle 5.17: Randbedingungen der künstlichen Beleuchtung

Jährliche Tagesbetriebsstunden t_{tag} [h]	2688
Jährliche Nachtbetriebsstunden t_{nacht} [h]	1344
Höhe der Nutzebene h_{Ne} [m]	0
Wartungswert der Beleuchtungsstärke E_m [lx]	150
Minderungsfaktor Bereich Sehaufgabe k_A	1
Raumindex für Kunstlicht k_{AL}	2,4
Teilbetriebsfaktor der Gebäudebetriebszeit für Beleuchtung F_t	1

schungsprojekt definierte Randbedingungen für die künstliche Beleuchtung sind in Tabelle 5.17 dargestellt.

Im Modell der manuellen Lagerhalle wird nun untersucht, inwiefern sich der Energiebedarf für die Beleuchtung mittels eines Präsenzmelders senken lässt. Es wird davon ausgegangen, dass sich in der Vorzone, die auch die Arbeitsfläche darstellt, zu 100 % der Betriebszeit Menschen aufhalten, deshalb werden hier keine Bewegungsmelder eingesetzt. Allerdings wird jede der 18 Regalgassen in drei Abschnitte unterteilt (Abbildung 5.48). Ausgehend von einer ABC-Zonierung des Lagers wird die Annahme getroffen, dass im ersten Drittel eine Anwesenheit von 50 % herrscht, im zweiten Drittel von 35 % und im hintersten Abschnitt von 5 %.

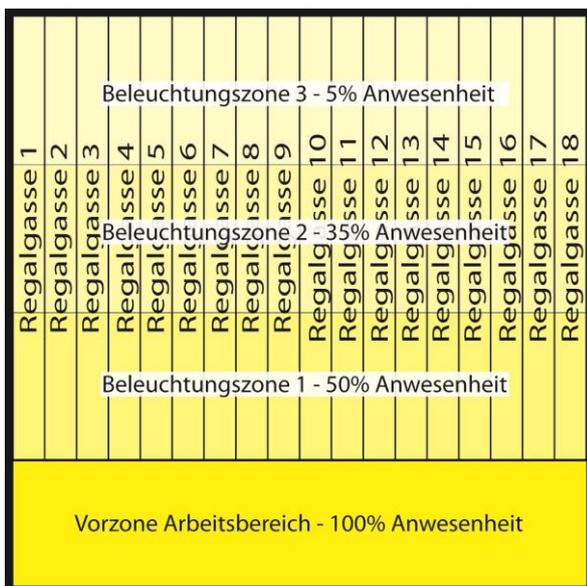


Abbildung 5.48: Grafische Darstellung der Zonierungsbereiche für die Präsenzsteuerung in der manuellen Lagerhalle

Abbildung 5.48 zeigt die Auswirkungen auf die CO₂-Emissionen mit einer Beleuchtungszonierung. Durch den Einsatz der Bewegungsmelder steigt der Heizenergiebedarf hier minimal, da die Leuchten weniger Abwärme an die Halle abgeben, in der Gesamtbilanz aber sinken die CO₂-Emissionen im Falle einer Innenraum-Solltemperatur von 17 °C um 5,4 %. Wird die Halle auf 6 °C gekühlt, wirkt sich eine Beleuchtungssteuerung durch verminderte Abwärmeverluste noch positiver aus, hier erhöhen sich die eingesparten Emissionen auf 13,1 %.

Da die zusätzlichen Investitionen für diese Maßnahme im überschaubaren Rahmen bleiben, ist eine Zonierung der Beleuchtung mit Bewegungssensoren in jedem Fall zu empfehlen.

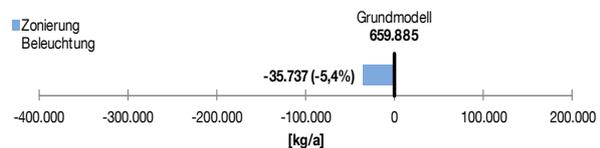


Abbildung 5.49: Vergleich der CO₂-Emissionen der manuellen Lagerhalle, 17 °C, bei einer Beleuchtungszonierung mit Bewegungssteuerung

Da bei den Typologien halbautomatisches Logistikzentrum und vollautomatisches Distributionszentrum davon ausgegangen wird, dass die Regalgassen in der Haupthalle regelmäßig genutzt werden, wird in diesen Gebäudemodellen keine Beleuchtungszonierung untersucht.

5.3.2 Mechanische Lüftungsanlage

Logistikzentren sind, solange sie aufgrund der gelagerten Güter keine besonderen Anforderungen zu erfüllen haben, in der Regel nicht mit einer mechanischen Lüftungsanlage ausgestattet. Daher wird auch das Grundmodell natürlich über vorhandene Fassadenöffnungen belüftet.

Anhand der Typologie der manuellen Lagerhalle wird untersucht, ob der Energiebedarf gesenkt werden kann, wenn eine mechanische Lüftungsanlage zum Einsatz kommt. In einem zweiten Schritt ist diese mit einer Wärmerückgewinnung ausgestattet. Als Volumenstrom wird 1 m³/m²h

angesetzt, dieser Wert ist als flächenbezogener Mindestvolumenstrom bei der natürlichen Lüftung in den Nutzungsbedingungen der [DIN 18599-10] definiert und wird dementsprechend auf die Lüftungsanlage übertragen.

Abbildung 5.50 zeigt die Ergebnisse der Untersuchung anhand der CO₂-Emissionen. Erwartungsgemäß steigen die Emissionen bei der Variante mit Lüftungsanlage durch den zusätzlichen Strombedarf um fast 10 %.

In der zweiten Variante ist die Lüftungsanlage mit einer Wärmerückgewinnung mit einer Effizienz von 70 % ausgerüstet. Der eingesparte Heizenergiebedarf kann jedoch auch hier den zusätzlichen Strombedarf nicht ausgleichen, sodass in Summe immer noch 3,2 % mehr Emissionen entstehen als bei einer natürlichen

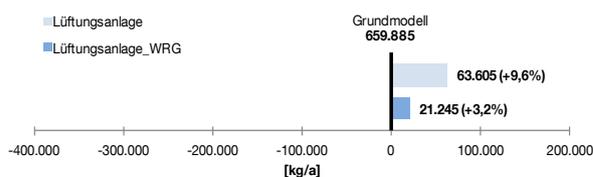


Abbildung 5.50: Vergleich der CO₂-Emissionen der manuellen Lagerhalle, 17 °C, bei unterschiedlichen Lüftungsstrategien

Lüftungsstrategie. In Anbetracht der zusätzlichen Kosten kann der Einsatz von Lüftungsanlagen auch mit Wärmerückgewinnung bei Logistikhallen nicht zur Senkung der CO₂-Emissionen beitragen und wird deshalb bei dem halbautomati-

sierten Logistikzentrum und dem vollautomatischen Distributionszentrum nicht weiter untersucht.

5.3.3 Heizsystem

Zur Deckung des Heizenergiebedarfs steht eine Vielzahl unterschiedlicher Systeme zur Verfügung. Dabei werden Wärmeübergabesysteme in zwei Gruppen unterteilt: Warmlufterzeuger und Strahlungsheizungen. Das definierte Grundmodell besitzt als Wärmeübergabesystem dezentrale, erdgasbetriebene Umlufterhitzer, wie sie häufig in Logistikzentren zum Einsatz kommen. Durch die Direktbefeuerung besitzen diese verschiedene Vorteile wie z. B. eine hohe Effizienz, da keine Verteilverluste auftreten und ein schnelles Ansprechverhalten vorliegt.

In den Untersuchungen werden weitere Systeme untersucht, wie sie typischerweise in Logistikzentren vorkommen. Dabei werden immer ein direktes und ein indirektes System, einerseits in Ausführung mit Warmluftheizung, andererseits mit Strahlungsheizung untersucht.

Tabelle 5.18 gibt einen Überblick der untersuchten Wärmeübergabesysteme. Als Warmlufterzeuger wird neben dem direkten Gas-Umlufterhitzer im Grundmodell ein indirekter Umlufterhitzer untersucht.

Tabelle 5.18: Übersicht der untersuchten Wärmeübergabesysteme

	Direkter Umlufterhitzer (Grundmodell)	Indirekter Umlufterhitzer	Dunkelstrahler	Hellstrahler	Gas-Brennwertkessel mit FBH	Grundwasser-Wärmepumpe mit FBH
Erzeugung	direkt	indirekt	direkt	direkt	indirekt	indirekt
Energieträger	Erdgas	Hackschnitzel	Erdgas	Erdgas	Erdgas	Umweltwärme mit WP
Übergabe	Luft	Luft	Strahlung	Strahlung	Strahlung	Strahlung
Pufferspeicher notwendig	nein	ja	nein	nein	ja	nein
Vorlauf-/Rücklauf-temperatur [°C]	-	90/70	-	-	35/28	35/28

Dabei ist auch der Einsatz regenerativer Energien möglich. Umluftheizer benötigen in der Regel ein hohes Temperaturniveau, womit sich die Nutzung erneuerbarer Energien auf die Verbrennung von Biomasse beschränkt. Im Untersuchungsfall wird die Wärme beispielhaft von einem hackschnitzelbetriebenen Biomassekessel erzeugt. Als Strahlungsheizung werden Hell- sowie Dunkelstrahler als direkte Systeme untersucht. Dabei ist darauf zu achten, dass keine Regale oder sonstigen Verbauungen die Wärmeübertragung behindern.

Das indirekte System stellt eine im Boden verbaute Flächenheizung dar. Bei dieser Ausführung muss in der Planung darauf geachtet werden, dass der Boden den hohen Belastungen der Logistik standhält. Flächenheizungen bieten den Vorteil, dass die Vorlauftemperaturen deutlich geringer ausgelegt werden können als bei anderen Heizsystemen. Damit eignen sie sich hervorragend für die Nutzung von Umweltwärme in Kombination mit einer Wärmepumpe. Ein geeignetes regeneratives System stellt hier beispielhaft eine Grundwasserwärmepumpe da. Nutzbares Grundwasser ist allerdings nicht überall verfügbar und genehmigungspflichtig. Deshalb muss vor der Planung eine mögliche Nutzung überprüft werden. Alternativ können auch Erdwärme-, Umgebungswärme- oder Luftwärmepumpen eingesetzt werden. Steht in der Umgebung oder durch Verarbeitungsprozesse nieder-temperaturige Abwärme zur Verfügung, stellt dies eine weitere Möglichkeit dar, effizient Wärmepumpen einzusetzen.

Zum Vergleich wird die Flächenheizung in einer weiteren Variante mit einem nicht-erneuerbaren Energieträger in Form eines Gas-Brennwertkessels versorgt.

Da im gesamten Hallenbereich Menschen arbeiten, wird bei den Untersuchungen angestrebt, in der kompletten Halle gleichmäßige Temperaturen zu erreichen und nicht zonierte zu heizen. Dennoch können Strahlungsheizungen bei Bedarf gezielt nur in bestimmten Bereichen einge-

setzt werden und somit zusätzlich Energie einsparen.

Des Weiteren haben diese Systeme den Vorteil, dass sie nicht nur die Luft erhitzen, sondern ihre Wärme an die verschiedenen Flächen im Raum abgeben. Dadurch entstehen bei geöffneten Türen keine Lüftungswärmeverluste.

Heizsystem - manuelle Lagerhalle

Abbildung 5.51 zeigt die CO₂-Emissionen bei 17 °C Innenraumtemperatur der verschiedenen untersuchten Wärmeübergabesysteme.

Es ist ersichtlich, dass in allen Varianten die CO₂-Emissionen deutlich sinken, sie reduzieren sich sogar um über 50 % mithilfe eines Hackschnitzel-Umluftheizers.

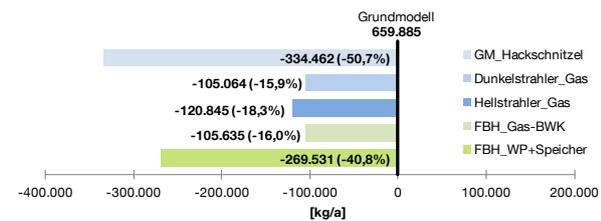


Abbildung 5.51: Vergleich der CO₂-Emissionen der manuellen Lagerhalle, 17 °C, bei unterschiedlichen Wärmeerzeugungs- und Übergabesystemen

Abbildung 5.52 zeigt die Gegenüberstellung von Nutz-, End- und Primärenergiebedarf ohne die Intralogistik. Bei der Variante mit Hackschnitzel-Umluftheizer ist ein Mehrbedarf von ca. 20 % der Endenergie erkennbar, der durch die Erzeuger- und Verteilverluste verursacht wird. Allerdings wird dieser Mehrbedarf durch die Umrechnungsfaktoren auf den Primärenergiebedarf bzw. die CO₂-Emissionen, die bei regenerativen Energien deutlich niedriger angesetzt sind, wieder ausgeglichen. Das zweite regenerative System, die Grundwasser-Wärmepumpe, reduziert trotz des benötigten Stroms für die Wärmepumpe die CO₂-Emissionen immer noch um ca. 41 %, mit

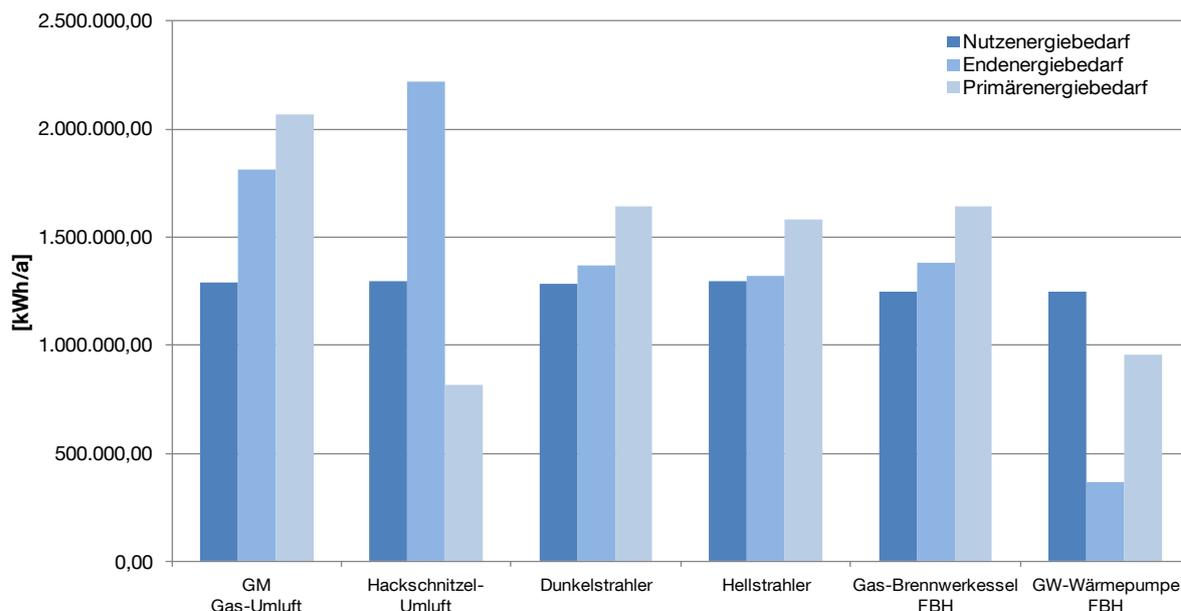


Abbildung 5.52: Vergleich von Nutz-, End- und Primärenergiebedarf der manuellen Lagerhalle ohne Intralogistik, 17 °C, bei unterschiedlichen Wärmeübergabesystemen

dem Grundmodell verglichen. Diese Variante besitzt durch die Nutzung des Grundwassers einen sehr niedrigen Endenergiebedarf, allerdings steigt durch den Stromantrieb der Wärmepumpe der Primärenergiebedarf wieder leicht an. Die Systeme Hell- und Dunkelstrahler sowie der Gas-Brennwertkessel in Verbindung mit einem flächigen Heizsystem hingegen weisen CO₂-Einsparungen zwischen ca. 16 % und 18 % im Vergleich zum Grundmodell auf. Die Ergebnisse in Abbildung 5.53 zeigen deutlich geringere Einsparpotenziale als in der manuellen Lagerhalle, einerseits aufgrund des hohen Anteils der Intralogistik am Gesamtbedarf, andererseits weil das zu beheizende Volumen geringer ist.

Heizsystem - halbautomatisches Logistikzentrum

Bei dieser Typologie ist im Grundmodell in der Halle sowie im angrenzenden Hochregallager wieder der direkt betriebene Erdgas-Umluftheizer als Referenz definiert. Das Hochregallager besitzt in allen Untersuchungen stets dieses Heizsystem, lediglich in der Untersuchungsvariante mit indirekter Umluftheizung wird die Wärme auch hier zentral über den Hackschnitzelkessel erzeugt.

Die Ergebnisse in Abbildung 5.53 zeigen deutlich geringere Einsparpotenziale als in der manuellen Lagerhalle, einerseits aufgrund des hohen Anteils der Intralogistik am Gesamtbedarf, andererseits weil das zu beheizende Volumen geringer ist.

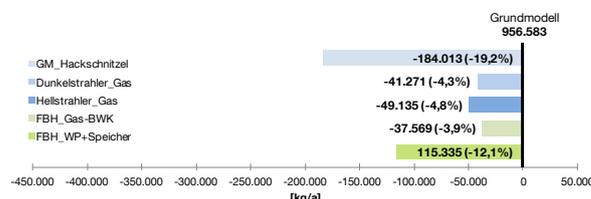


Abbildung 5.53: Vergleich der CO₂-Emissionen des halbautomatischen Logistikzentrums, 17 °C, bei unterschiedlichen Wärmeerzeugungs- und Übergabesystemen

Dennoch lassen sich in der Variante mit indirektem Umluftheizer noch knapp 20 % CO₂-Emissionen einsparen. Somit hat das gewählte Heizsystem wie bei den anderen Typologien den höchsten Einfluss auf die CO₂-Emissionen, auch weil hier das Hochregallager mitversorgt wird.

Die Variante Gas-Brennwertkessel mit Flächenheizung erreicht aufgrund der hohen Erzeugungsverluste und dem schlechten CO₂-Faktor von Erdgas die geringsten Einsparungen mit knapp 4 %, Hell- und Dunkelstrahler folgen dicht dahinter.

Wird die Halle auf 12 °C Innenraumtemperatur beheizt, verbessert sich prozentual der Vorteil der Grundwasser-Wärmepumpe. Bei Wärmepumpen erhöht sich der Wirkungsgrad, je geringer die Temperaturdifferenz zwischen Quell- und Vorlauftemperatur ist, da infolgedessen eine geringere elektrische Leistung benötigt wird.

Heizsystem - vollautomatisches Distributionszentrum

Wie bei der Typologie halbautomatisches Logistikzentrum wird auch hier das Hochregallager und zusätzlich das AKL, mit Ausnahme der Variante indirekter Umluftheizer, stets mit direkten Umluftheizern auf die dort vorgeschriebenen 4 °C erwärmt.

In Abbildung 5.54 ist erkennbar, dass sich die zu erzielenden Einsparpotenziale im Vergleich zum halbautomatischen Logistikzentrum nochmals etwas verringern.

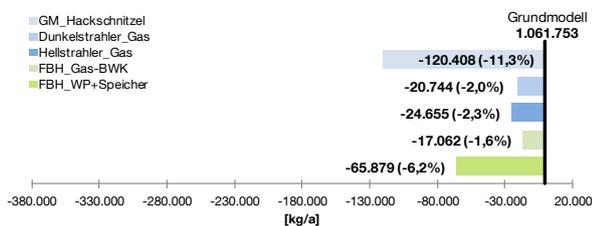


Abbildung 5.54: Vergleich der CO₂-Emissionen des vollautomatischen Distributionszentrums, 17 °C, bei unterschiedlichen Wärmeerzeugungs- und Übergabesystemen

Erwartungsgemäß schneidet auch hier wieder die Variante mit indirektem Umluftheizer in Verbindung mit einem Biomassekessel am besten ab. Die CO₂-Emissionen sinken hier um ca. 11 %.

5.3.4 Kühlsystem

Im Falle einer Kühlung auf maximal 6 °C werden für die drei Typologien unterschiedliche Kühlsysteme untersucht. Dabei werden immer alle Gebäudeteile inklusive Hochregallager und automatisches Kleinteilelager, soweit vorhanden, auf

dieses Temperaturniveau gebracht. Tabelle 5.17 zeigt den Überblick der untersuchten Kältesysteme.

Das Grundmodell besitzt umluftbetriebene Gebläsekonvektoren (Fan-Coils). Diese sind mit einem von kaltem Wasser durchflossenen Wärmetauscher ausgestattet, welches mittels einer zentralen Kompressionskältemaschine gekühlt wird. Ein Ventilator führt die Raumluft am Wärmetauscher vorbei und kühlt diese dadurch ab.

Als weitere Varianten werden zwei luftgekühlte Systeme untersucht: Split-Geräte und VRF-Systeme. Beide Systeme bestehen immer aus einem Innen- und einem Außengerät. Hierbei lässt die warme Raumluft das Kältemittel verdampfen. Über Rohrleitungen wird dieses an das Außengerät geführt, wo es schließlich die aufgenommene Wärme an die Außenluft abgibt. Das VRF-System arbeitet zusätzlich mit einem variabel geregelten Kältemittelfluss, das bedeutet, die Leistung wird dabei stets an den aktuellen Bedarf angepasst.

Tabelle 5.19: Überblick der untersuchten Kältesysteme

Fan-Coil	
Kälteerzeugung	zentral
Art des Kältemittels	Kaltwasser
Art der Rückkühlung	Trockenrückkühler
Übergabe	Deckengeräte
Split-Gerät	
Kälteerzeugung	dezentral
Art des Kältemittels	Direktverdampfung
Art der Rückkühlung	-
Übergabe	Deckengeräte
VRF-System	
Kälteerzeugung	dezentral
Art des Kältemittels	Direktverdampfung
Art der Rückkühlung	-
Übergabe	Deckengeräte

Kühlsystem - manuelle Lagerhalle

In Abbildung 5.55 ist eine Reduzierung der CO₂-Emissionen um knapp 9 % bei der Ausführung mit Split-Geräten zu erkennen, mit VRF-System steigen die Einsparungen auf fast 19 %. Dies ist im Vergleich zum Fan Coil darauf zurückzuführen

ren, dass es bei diesen Systemen keine zentrale Kälteerzeugung gibt, somit wird weniger Hilfsenergiebedarf für die Pumpenleistung benötigt und es entstehen keine Verluste bei der Verteilung.

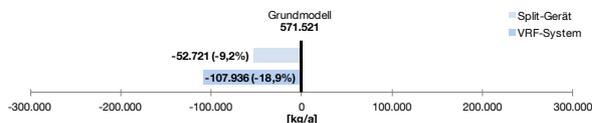


Abbildung 5.55: Vergleich der CO₂-Emissionen der manuellen Lagerhalle, 6 °C, bei unterschiedlichen Kälteerzeugungssystemen

Kühlsystem - halbautomatisches Logistikzentrum

Abbildung 5.56 zeigt die CO₂-Emissionen der untersuchten Kühlsysteme beim halbautomatischen Logistikzentrum. Auch hier erreichen die dezentralen Systeme höhere Einsparungen gegenüber dem Grundmodell mit Fan Coils, im Falle eines VRF-Systems ca. 11 %.

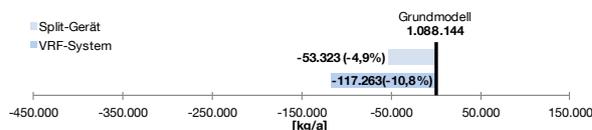


Abbildung 5.56: Vergleich der CO₂-Emissionen des halbautomatischen Logistikzentrums, 6 °C, bei unterschiedlichen Kälteerzeugungssystemen

Im Falle einer Kühlung des Gebäudes ist ab einem gewissen Automatisierungsgrad der Intralogistik besonders darauf zu achten, Systeme zu wählen, die möglichst wenig Abwärme erzeugen (vgl. Kapitel XX). Bei der Typologie halbautomatisches Logistikzentrum werden beispielsweise beim Einsatz energieeffizienter intralogistischer Systeme allein für die Gebäudekühlung 9 % weniger CO₂-Emissionen emittiert.

Kühlsystem - vollautomatisches Distributionszentrum

Obwohl der Einfluss der Gebäudetechnik aufgrund des hohen Strombedarfs der Intralogistik auch hier deutlich geringer ist, lässt sich in Abbildung 5.57 erkennen, dass die prozentualen

Einsparungen bei steigendem Automatisierungsgrad nicht in gleichem Maße abnehmen, wie dies in den beheizten Hallen der Fall ist. Dies ist darauf zurückzuführen, dass im Kühlfall sowohl das Hochregallager als auch das automatische Kleinteilelager maximal 6 °C erreichen dürfen und das zu konditionierende Volumen größer ist als im Falle der lediglich beheizten Haupthallen. Die Anlagentechnik hat somit mehr Einfluss auf die Gesamtenergiebilanz. Abbildung 5.58 zeigt die Verteilung der zu konditionierenden Volumen der drei Typologien.

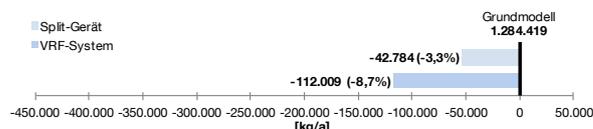


Abbildung 5.57: Vergleich der CO₂-Emissionen des vollautomatischen Distributionszentrums, 6 °C, bei unterschiedlichen Kälteerzeugungssystemen

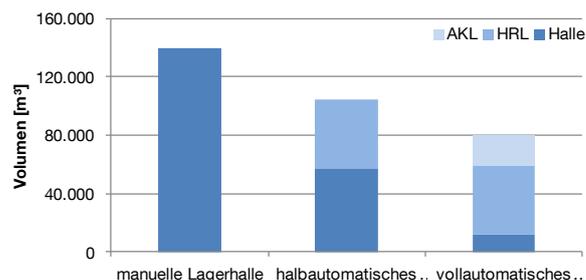


Abbildung 5.58: Vergleich des konditionierten Volumens der drei untersuchten Typologien

5.3.5 Photovoltaikanlage

Photovoltaikanlagen wandeln solare Strahlung direkt in elektrische Energie um, wobei auch anteilig diffuse Solarstrahlung genutzt werden kann. In dieser Untersuchung wird aufgezeigt, wie viel Strom durch auf dem Gebäude integrierte Photovoltaikanlagen erzeugt werden kann und somit die CO₂-Bilanzierung positiv beeinflusst.

Die Software ZUB Helena errechnet monatsweise den Stromertrag nach DIN EN 15316-4-6 [DIN-15316]. Für die Berechnungen der CO₂-Emissionen wird der erzeugte Strom komplett ins öffentliche Stromnetz eingespeist und als jährliche Bilanzwerte mit einberechnet, dabei wird der Photovoltaik CO₂-Vermeidungsfaktor

von 710g/kWh herangezogen [BMU-2013]. Ein jährlicher Überschuss bedeutet demnach nicht, dass zu keiner Zeit externer Strom zugekauft werden muss.

Hinsichtlich der Einspeisevergütung wird zwischen Anlagen unterschiedlicher Leistung differenziert, die Vergütung wird daher anteilig berechnet. Ausschlaggebend dabei ist der Zeitpunkt der Inbetriebnahme, für das Forschungsvorhaben wurde Oktober 2013 terminiert, Die Vergütung ist in Tabelle 5.20 abgebildet.

Tabelle 5.20: Einspeisevergütung von PV-Anlagen abhängig von der Leistung, Stand Oktober 2013 [PVw-2013]

bis 10 kW _p	bis 40 kW _p	bis 1.000 kW _p	bis 10 MW _p
14,27 ct	13,54 ct	12,08 ct	9,88 ct

Die angewendeten Photovoltaikmodule bestehen aus monokristallinem Silicium mit einer Peakleistung von 0,12 kW/m². Abhängig von der Typologie werden verschiedene Flächen des Daches und der Fassade mit Photovoltaik belegt.

Die Dachmodule sind dabei nach Süden ausgerichtet und mit einem Winkel von 30° aufgestellt. Bei der Planung muss daher auf eine ausreichende Traglast des Daches geachtet werden. Damit ein optimaler Ertrag erreicht werden kann, benötigen die auf dem Dach aufgeständerten Module einen gewissen Abstand zueinander (Abbildung 5.59), um Eigenverschattung zu vermeiden; außerdem sind auf den Dächern zudem Oberlichter verbaut. Im Allgemeinen kann aber davon ausgehen werden, dass etwa ein Drittel der vorhandenen Dachfläche mit PV-Modulen zu belegen ist.

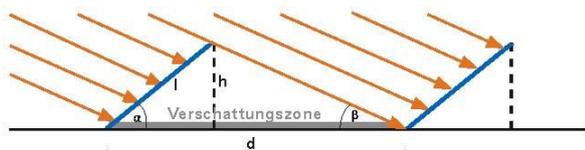


Abbildung 5.59: Verschattungszone bei Flachdächern

Werden Photovoltaikmodule wie in der Untersuchung plan an die Fassade integriert, besitzen diese einen Winkel von 90° zur Horizontalen,

eine Eigenverschattung der Module untereinander ist somit nicht möglich. Allerdings ist in der Planung auf Verschattung von Bäumen, umliegender Bebauung bzw. eigenen Gebäudevorsprüngen zu achten. Schließt an das Logistikgebäude beispielsweise ein Hochregallager an, sollte dieses immer nördlich der Haupthalle angeordnet sein, um alle Dachflächen optimal ausnutzen zu können

Weitere Stromerzeugungsarten werden in diesem Forschungsvorhaben nicht untersucht. Blockheizkraftwerke (BHKWs) beispielsweise erzeugen durch den Einsatz regenerativer Energien wie Biogas sowohl Strom (ca. 45 %) als auch nutzbare Abwärme (ca. 55 %). Damit eine hohe Effizienz bei BHKW-Anlagen erwartet werden kann, müssen diese einen hohen Auslastungsgrad aufweisen. Das heißt, die Anlagen laufen konstant und produzieren somit auch gleichbleibend viel Wärme. Da in der halb- und vollautomatisierten Typologie sehr viel Strom benötigt wird, kann die erzeugte Wärme vor allem in den Sommermonaten nicht genutzt werden. Als Gesamtsystem ist diese Variante somit nicht mehr als effizient zu bewerten. Sind allerdings in der näheren Umgebung geeignete Abnehmerstrukturen vorhanden, in denen ein ganzjähriger Bedarf an Wärme besteht, wie z. B. Wohnbebauungen, kann bei ausreichender Wärmebereitstellung der Aufbau eines Nahwärmenetzes durchaus als sinnvoll erachtet werden.

Photovoltaikanlage - manuelle Lagerhalle

Die Randbedingungen zur Photovoltaikanlage der manuellen Lagerhalle sind in Tabelle 5.21 abgebildet. Abbildung 5.60 verdeutlicht die monatlichen Schwankungen des Stromertrags. Es ist ersichtlich, dass der anstehende Strombedarf nur in den Monaten von April bis September komplett selbst erzeugt werden kann.

Tabelle 5.21: Randbedingungen zur Photovoltaikanlage bei der manuellen Lagerhalle

	PV Dach
Ausrichtung	Süd
Aufstellwinkel	30°
Fläche [m²]	3.500
Leistung [kW_p]	420
Stromertrag [kWh/a]	383.375
Einspeisevergütung [€/a]	46.911

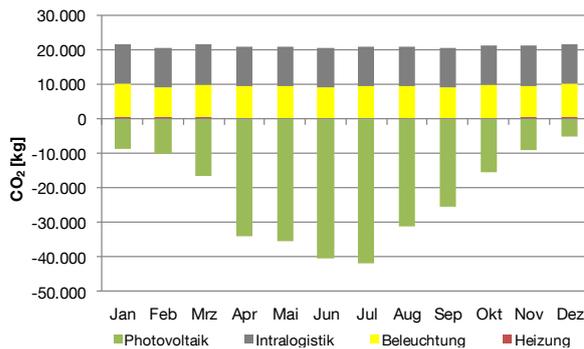


Abbildung 5.60: Monatliche CO₂-Emissionen und CO₂-Einsparungen für Strom in der manuellen Lagerhalle

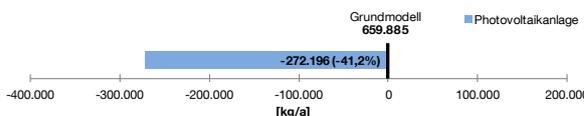


Abbildung 5.61: Vergleich der CO₂-Einsparungen des halb-automatischen Logistikzentrum mit Photovoltaikanlage

Dennoch zeigt Abbildung 5.61 auf, dass durch den Einsatz der Photovoltaikanlage eine Einsparung der CO₂-Emissionen von ca. 41 % erreicht wird.

Die große Fläche der PV-Anlage bedeutet zwar einen zusätzlichen Invest von ca. 700.000 €, allerdings ist mit einer jährlichen Einspeisevergütung von ca. 47.000 € zu rechnen, sodass sich diese Anschaffung nach ungefähr 15 Jahren amortisiert.

Photovoltaikanlage - halbautomatisches Logistikzentrum

Aufgrund des deutlich höheren Strombedarfs durch die intralogistischen Anlagen beim halb-automatischen Logistikzentrum wird schnell

ersichtlich, dass eine reine Belegung des Daches mit den Modulen bei Weitem nicht ausreichen wird, den Bedarf zu decken. Deshalb werden die großen Fassadenflächen des Hochregallagers und der Halle genutzt, um an diesen Flächen weitere PV-Module zu integrieren. Dabei werden beim Hochregallager die Module nur bis zur Oberkante der Haupthalle ausgeführt, da diese ansonsten den unteren Teil der Anlage verschatten würde. Tabelle 5.22 zeigt die Randbedingungen der verwendeten Photovoltaikanlage beim halbautomatischen Logistikzentrum.

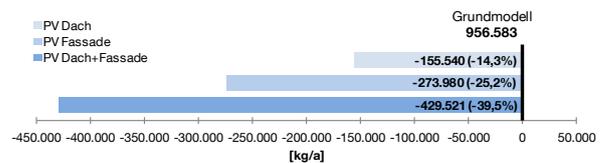


Abbildung 5.62: Vergleich der CO₂-Einsparungen des halb-automatischen Logistikzentrums mit Photovoltaikanlage

Abbildung 5.62 veranschaulicht die eingesparten CO₂-Emissionen durch die Photovoltaikanlage auf dem Dach, der Fassade und in Kombination. Obwohl mehr als doppelt so viel Fläche an PV verbaut ist und insgesamt ca. 160.000 kg mehr CO₂ einspart wird als in der manuellen Lagerhalle, werden prozentual weniger Einsparungen erreicht. Dies lässt sich auf den hohen jährlichen Bedarf der Intralogistik von fast 1 MWh pro Jahr zurückzuführen. Die veranschlagte Photovoltaikanlage produziert dabei etwa 600.000 kWh im Jahr.

Tabelle 5.22: Randbedingungen der Photovoltaikanlage beim halbautomatischen Logistikzentrum

	PV Dach	PV Fassade
Ausrichtung Süd		
Aufstellwinkel	30°	90°
Fläche [m²]	2.000	1.250
Leistung [kW _p]	240	150
Stromertrag [kWh/a]	219.071	85.388
Einspeisevergütung [€/a]	27.064	10.689
Ausrichtung Ost		
Aufstellwinkel	-	90°
Fläche [m²]	-	2.250
Leistung [kW _p]	-	271
Stromertrag [kWh/a]	-	135.555
Einspeisevergütung [€/a]	-	16.703
Ausrichtung West		
Aufstellwinkel	-	90°
Fläche [m²]	-	2.750
Leistung [kW _p]	-	330
Stromertrag [kWh/a]	-	164.945
Einspeisevergütung [€/a]	-	20.254
Stromertrag gesamt [kWh/a]	219.071	385.888

Tabelle 5.23: Randbedingungen der Photovoltaikanlage beim vollautomatischen Distributionszentrum

	PV Dach	PV Fassade
Ausrichtung Süd		
Aufstellwinkel	30°	90°
Fläche [m²]	1.100	870
Leistung [kW _p]	132	104
Stromertrag [kWh/a]	120.489	59.430
Einspeisevergütung [€/a]	15.155	7.553
Ausrichtung Ost		
Aufstellwinkel	-	90°
Fläche [m²]	-	2.938
Leistung [kW _p]	-	353
Stromertrag [kWh/a]	-	176.221
Einspeisevergütung [€/a]	-	21.616
Ausrichtung West		
Aufstellwinkel	-	90°
Fläche [m²]	-	2.545
Leistung [kW _p]	-	305
Stromertrag [kWh/a]	-	152.649
Einspeisevergütung [€/a]	-	18.768
Stromertrag gesamt [kWh/a]	120.489	388.300

Photovoltaikanlage - vollautomatisches Distributionszentrum

Auch im vollautomatischen Distributionszentrum gibt es neben der Photovoltaikanlage auf dem Dach Untersuchungen zur Integration der Module in der Fassade. Die Randbedingungen sind in Tabelle 5.23 abgebildet.

Die Auswirkungen auf die CO₂-Emissionen zeigt Abbildung 5.63. Noch stärker als beim halbautomatischen Logistikzentrum lassen sich die CO₂-Emissionen mit einer Photovoltaikanlage auf dem Dach nur noch um ca. 8 % senken, was einerseits mit dem hohen Strombedarf der Intralogistik zu tun hat, andererseits mit der geringeren Dachfläche, die zur Anbringung der Module zur Verfügung steht. Werden zusätzlich

die großen Fassadenflächen von Halle, Hochregallager und automatischem Kleinteilelager genutzt, sinkt der CO₂-Ausstoß um 34 %. Generell ist bei Fassadenmodulen eine weitere Möglichkeit die Effizienz zu steigern, diese nicht plan in der Fassade zu integrieren, sondern wie auf dem Dach im optimalen Einstrahlwinkel von 30°-35° aufzurichten. Dabei muss allerdings wieder die Eigenverschattung berücksichtigt werden, so dass die Module den benötigten Abstand zueinander besitzen.

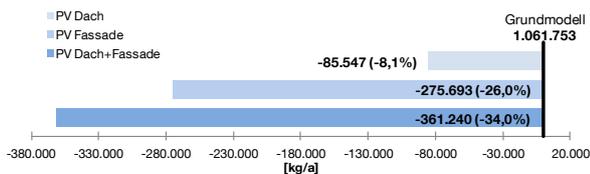


Abbildung 5.63: Vergleich der CO₂-Einsparungen des vollautomatisches Distributionszentrums mit Photovoltaikanlage

6 Konzeption von energieeffizienten und CO₂-neutralen Logistikzentren

Ausgehend von den Parameterstudien der Einzeluntersuchungen der Grundelemente werden diese im Folgenden zu ganzheitlichen Konzepten für die untersuchten Typologien von Logistikzentren kombiniert. Nicht alle Maßnahmen, die einen geringeren CO₂-Ausstoß bewirken, werden in die Kombinationen aufgenommen. Das Hauptaugenmerk liegt auf einer möglichst hohen Reduzierung der CO₂-Emissionen unter wirtschaftlichen Bedingungen. Somit werden Maßnahmen, die einen hohen Invest mit Amortisationszeiten über dem Lebenszyklus der Maßnahme nach sich ziehen, nicht in die Kombination einer optimalen Variante der Untersuchungsmodelle mit aufgenommen. Ein Beispiel sind die Fassadenfenster in der manuellen Lagerhalle, die ca. 80 % Mehrkosten verursachen, deren Einsparpotenzial am CO₂-Ausstoß aber nur bei 4,4 % liegt. Somit sind z. B. in den optimierten Varianten keine Fassadenfenster vorgesehen. Die einzelnen Verbesserungsmaßnahmen beeinflussen sich im Gesamtsystem gegenseitig, somit liegen die CO₂-Einsparungen der optimierten Varianten niedriger als die Summe der Einsparungen der Einzeluntersuchungen der Grundelemente.

Um die resultierenden Energieflüsse in kWh/a als Gesamtenergiebilanz darzustellen werden Sankeydiagramme für alle untersuchten Typologien in den drei Temperaturniveaus erstellt, jeweils für das Grundmodell- sowie für die optimierten Varianten. Dabei stellen die Logistikzentren mit den hergeleiteten Restriktionen die Bilanzgrenze dar. Der Input an Energie ist in regenerative und nicht regenerative Energien unterteilt und bildet den Gesamtenergiebedarf des Logistikzentrums auf Jahresbasis. Die Energieflüsse sind je nach Energieträger in unterschiedliche Farben gegliedert und sind innerhalb des Logistikzentrums als Throughput in Erzeugung, Speicherung, Verteilung, Übergabe und Nutzung der Energien unterteilt. Je nach Energieanwendung wird die Energieart durch die im Untersuchungsmodell enthal-

tenen Grundelemente in andere Energieformen gewandelt, verteilt, gespeichert oder übergeben. Die entstehenden Verluste entsprechend der Wirkungsgrade der Grundelemente bei der Energieanwendung werden entweder in die Raumwärme bilanziert oder können nicht genutzt werden und stellen den Output an Energie aus dem System Logistikzentrum dar.

6.1 Kombination der Einzeluntersuchungen - manuelle Lagerhalle

Die Gesamtenergiebilanz des Grundmodells 17 °C der manuellen Lagerhalle ist in Abbildung 6.1 dargestellt, während der Energiefluss der optimierten Variante für 17 °C durch Kombinationen der energieeffizient gestalteten Grundelemente Abbildung 6.2 zu entnehmen ist. Hier wird auf den nichtregenerativen Energieträger Gas verzichtet und stattdessen Grundwasser als regenerativer Energieträger zur Wärmespeicherung eingesetzt. Der PV-Strom kann nur zum Teil selber genutzt werden, sodass ein Teil eingespeist werden muss. Um den Gesamtbedarf an Strom zu decken, muss somit weiterhin ein Teil aus dem Stromnetz eines Energieversorgers bezogen werden. Jedoch ist der eingespeiste Anteil an PV-Strom höher als der eingekaufte. Grundsätzlich ist anhand der Energieflussbilder ersichtlich, dass der Strom- und Raumwärmebedarf der manuellen Lagerhalle durch die Kombination der energieeffizient gestalteten Grundelemente in der optimierten Variante erheblich gesenkt werden kann und folglich auch die CO₂-Emissionen reduziert werden.

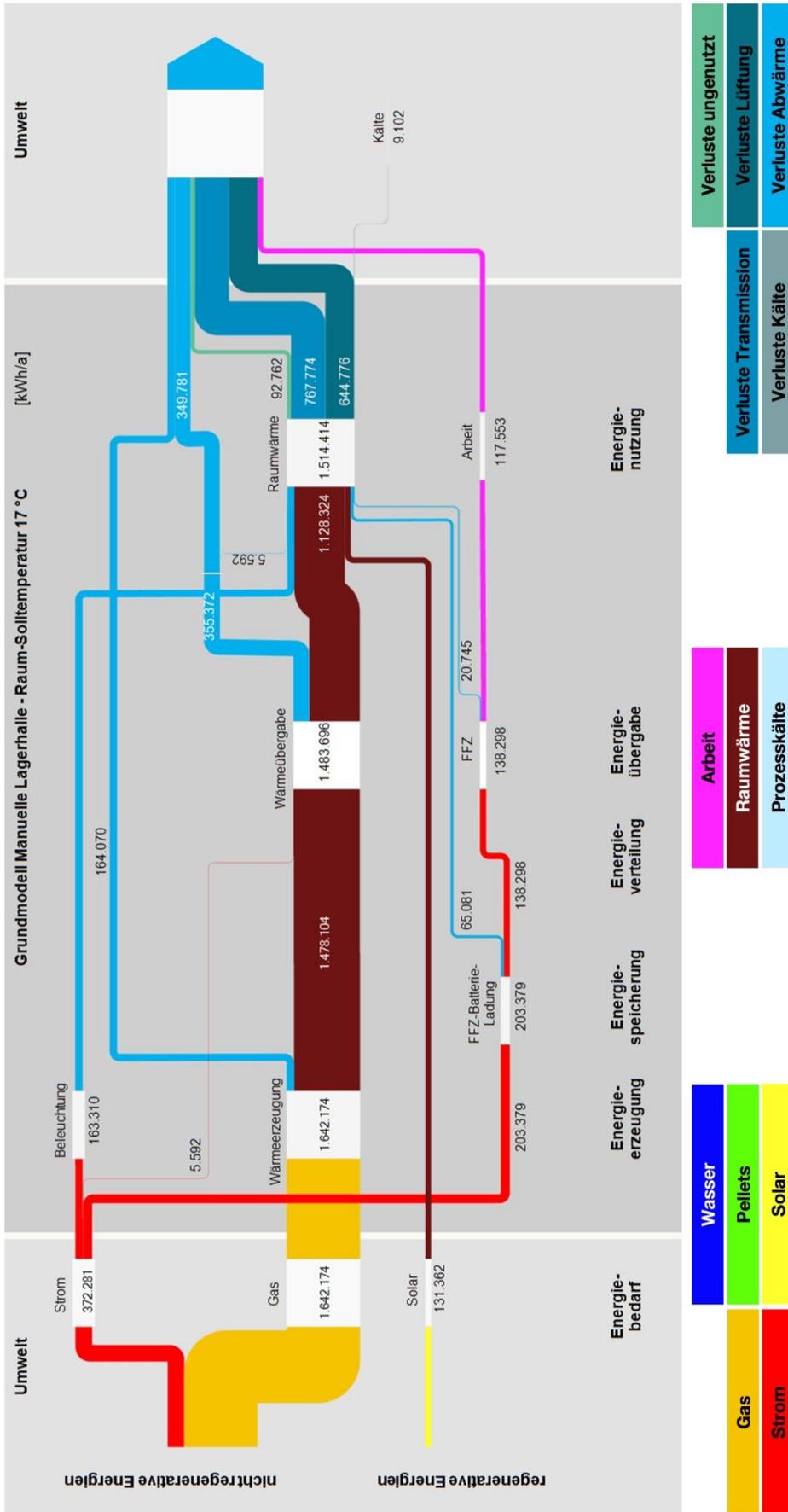


Abbildung 6.1: Energiebilanz manuelle Lagerhalle 17 °C Grundmodell: Energieflussbild aller bilanzierten Energieträger

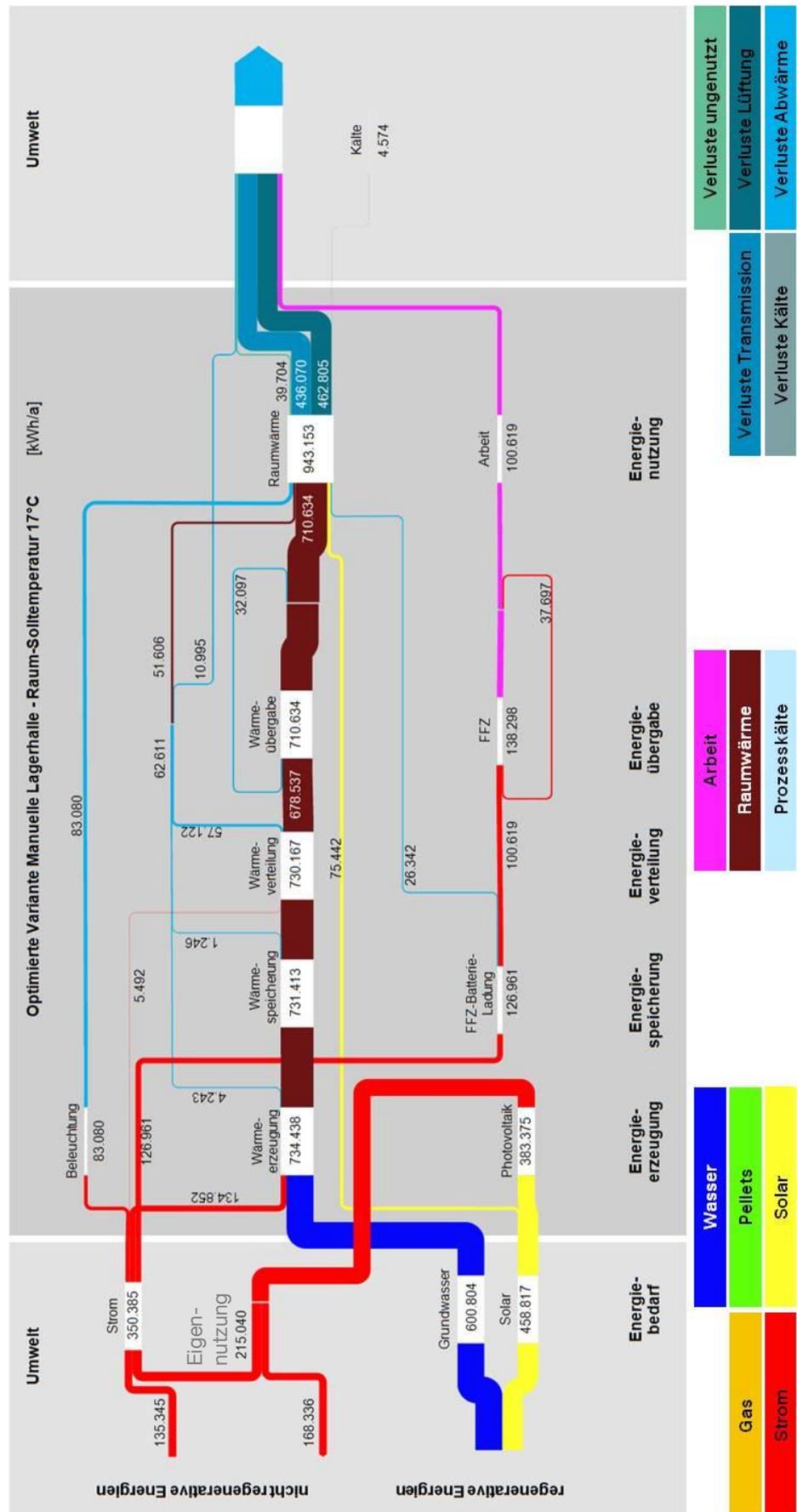


Abbildung 6.2: Energiebilanz manuelle Lagerhalle 17 °C optimierte Variante: Energieflussbild aller bilanzierten Energieträger

Die Energiebilanzen für die manuelle Lagerhalle für das Temperaturniveau 12 °C sind in Abbildung A.3 und A.4 und für 6 °C in A.5 und A.6 im Anhang hinterlegt.

In Tabelle 6.1 sind die gewählten Ausführungen der Grundelemente für die optimierten Varianten der manuellen Lagerhalle im Vergleich zu der Ausführung der Grundmodelle dargestellt.

Der quadratische Grundriss der Grundmodelle wird für alle drei Temperaturmodelle beibehalten. Für die Hülle wird für die Heizfälle 12 °C und 17 °C als auch für den Kühlfall die Dämmung V3 eingesetzt. Diese verhindert über das Jahr die meisten CO₂-Emissionen und rentiert sich in allen betrachteten Fällen innerhalb der angenommenen Gebäudelebensdauer für Lagerhallen von bis zu 40 Jahren [Han-2005] [Boe-2013].

Die Verladetore werden statt der Planen-Torabdichtung mit Vorsatzschleusen ausgestattet. Die Amortisationszeit für Verladeschleusen steigt, je geringer die Temperaturanforderungen in der Halle sind, weist aber in den untersuchten Temperaturfällen immer noch einen akzeptablen Return on Investment (ROI) für Gebäudebestandteile zwischen sieben und dreizehn Jahren auf. Weiterhin lassen sich damit die CO₂-Emissionen der Grundmodelle um ca. 7 % bis 13 % senken.

Die Dachfenster aus dem Grundmodell werden für alle Temperaturen in den optimierten Varianten mit einem Anteil von 2 % an der Grundfläche und einer Standardverglasung aufgrund zu hoher Investitionen im Verhältnis zu den CO₂-Einsparungen beibehalten. Auf Fassadenfenster wird in den optimierten Varianten aus dem gleichen Grund verzichtet. Das Dach wird mit Photovoltaik belegt, die genug Strom erzeugt, dass im Heizfall auch der Bedarf der Grundwasser-Wärmepumpe der optimierten Variante für 17 °C und 12 °C abgedeckt ist.

Die mechanische Lüftungsanlage kann die CO₂-Emissionen nicht reduzieren, so bleibt es bei den optimierten Varianten bei einer natürlichen Lüftung. Anders ist es bei der Beleuchtung, hier wird die optimierte Variante mit einer Beleuch-

Tabelle 6.1: Überblick der ausgewählten Grundelemente der optimierten Variante im Vergleich zum Grundmodell für die manuelle Lagerhalle

	Grundmodell	Optimierte Varianten
Gebäudehülle		
Kubatur	GM_quadratisch	GM_quadratisch
Dämmung	Dä_GM	Dä_V3
Verladestation	GM	mit Vorsatzschleuse
Fassadenfenster	FF_GM (n.v.)	FF_GM (n.v.)
Dachfenster (im Heizfall)	DF_GM_Dä_GM	DF_GM_Dä_GM
Dachfenster (im Kühlfall)	DF_GM_Dä_GM	DF_GM_Dä_V3
Gebäude-technik		
Beleuchtungssteuerung	GM (n.v.)	mit Beleuchtungssteuerung
Lüftungsanlage	GM (n.v.)	GM (n.v.)
Heizsystem	GM_Gas-Umluft direkt	Grundwasser-Wärmepumpe mit FBH
Kühlsystem	GM_Fan Coil	VRF-System
Photovoltaik	GM (n.v.)	mit Photovoltaik
Intralogistik		
FFZ: Schubmaststapler	Stapler_GM	Stapler_V2
FFZ: Niederhubwagen	Hubwagen_GM	Hubwagen_V2

tungssteuerung ausgestattet, weil sich diese schon nach einem halben Jahr amortisiert.

Für das Kühllager wird als Kühlsystem das VRF-System ausgewählt. Im Gegensatz zum Heizfall ist für die Dachfenster im Kühllager eine bessere Dämmausführung zu empfehlen, der Dachfensteranteil wird jedoch aus dem Grundmodell übernommen und sollte nicht erhöht werden.

Bei der Intralogistik werden für die beiden FFZ-Arten die Varianten mit energieeffizienter Batterieladetechnologie und optimaler Betriebsweise ausgewählt, weil auch hiermit CO₂-Emissionen eingespart werden können und die Investition in

6.1 Kombination der Einzeluntersuchungen - manuelle Lagerhalle

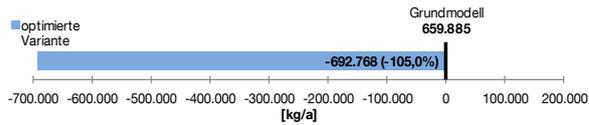


Abbildung 6.3: Vergleich der CO₂-Emissionen der manuellen Lagerhalle, 17 °C, im Grundmodell und der optimierten Variante

energieeffiziente Batterieladetechnologie sich durch die Senkung der Energiekosten für den Betrieb der FFZ nach knapp über einem Jahr rentiert.

In

Abbildung 6.3 ist zu sehen, dass durch die Kombination der Grundelemente im Heizfall 17 °C bilanziell eine Reduktion der CO₂-Emissionen um 105 % erreicht wird. Das bedeutet, dass die CO₂-Emissionen von Gebäude und Intralogistik von ca. 659.900 kg/a CO₂ im Grundmodell auf ca. 239.300 kg/a CO₂ in der optimierten Variante reduziert werden können. Zudem werden durch die Einspeisung des PV-Stroms ca. 272.200 kg/a CO₂ (vgl. Umrechnungsfaktoren für CO₂ in Kapitel 4.3.2) vermieden. Somit ergibt sich ein Plus an eingesparten CO₂-Emissionen im Vergleich zu dem, was durch den Energiebedarf entsteht.

Auch die jährlichen Energiekosten lassen sich um ca. 108.000 € senken. Werden die Mehrinvestitionen gegenübergestellt, sind diese nach weniger als 15 Jahren wieder finanziert (vgl. Abbildung 6.4).

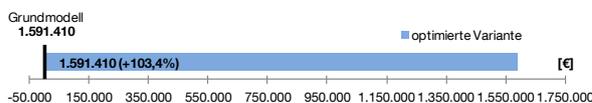


Abbildung 6.4: Vergleich der Investitionen der manuellen Lagerhalle, 17 °C, im Grundmodell und der optimierten Variante

Im Falle einer Beheizung der Halle auf 12 °C Innenraumtemperatur lassen sich vor allem durch den geringeren Heizenergiebedarf die CO₂-Emissionen für das Gesamtsystem um ca. 112 % im Vergleich zum Grundmodell senken (vgl. Abbildung 6.5). Das bedeutet, dass durch

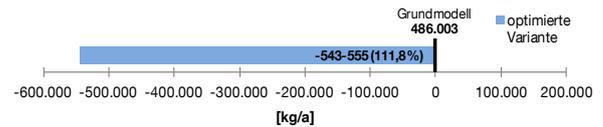


Abbildung 6.5: Vergleich der CO₂-Emissionen der manuellen Lagerhalle, 12 °C, im Grundmodell und der optimierten Variante

den erzeugten Strom der Photovoltaikanlage pro Jahr ca. 57.000 kg mehr CO₂ vermieden werden, als das gesamte Gebäude emittiert.

Da die Investitionen, dargestellt in Abbildung 6.6, nur geringfügig unter denen des Temperaturniveaus 17 °C liegen, sich die jährlich eingesparten Kosten aber um ca. 20.000 € verringern, ergibt sich ein ROI von knapp 19 Jahren.

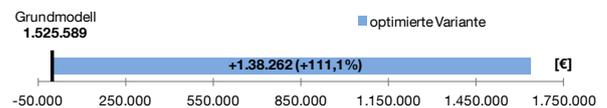


Abbildung 6.6: Vergleich der Investitionen der manuellen Lagerhalle, 12 °C, im Grundmodell und der optimierten Variante

Im Falle eines Kühllagers der manuellen Lagerhalle werden die CO₂-Emissionen um 100,5 % gesenkt, wie in Abbildung 6.7 ersichtlich ist.

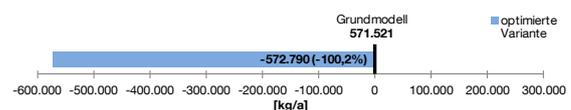


Abbildung 6.7: Vergleich der CO₂-Emissionen der manuellen Lagerhalle, 6 °C, im Grundmodell und der optimierten Variante

Die jährlich laufenden Kosten sinken um ca. 100.000 €. Der finanzielle Mehraufwand, dargestellt in Abbildung 6.8, für die optimierte Variante rentiert sich beim Kühllager nach ca. 12 Jahren.

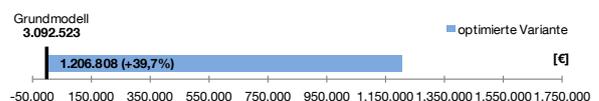


Abbildung 6.8: Vergleich der Investitionen der manuellen Lagerhalle, 6 °C, im Grundmodell und der optimierten Variante

In der Gesamtbetrachtung ist es demnach für die manuelle Lagerhalle möglich, nicht nur ein CO₂-freies Logistikzentrum zu realisieren, sondern sogar ein Plusenergiegebäude.

Abbildung 6.9 zeigt den Einfluss der einzelnen veränderten Klassen des Gebäudes und aller Grundelemente der Intralogistik auf die CO₂-Einsparungen in kg/m³ im Jahr für die drei untersuchten Temperaturniveaus. Dargestellt werden ausgehend vom Grundmodell die einzelnen Maßnahmen sowie ihre Kombination.

Weiterhin ist zu sehen, dass bei allen drei Temperaturen durch eine optimierte Dämmung der Gebäudehülle die CO₂-Emissionen im Vergleich zu dem Grundmodell sinken. Hierbei bringt die Änderung des Heiz- bzw. Kühlsystems die meisten Einsparungen. Jedoch sollte diese Maßnahme immer in Verbindung mit einer entsprechenden Dämmung der Gebäudehülle einhergehen.

Die Optimierung der Intralogistik führt ebenfalls zu ersichtlichen CO₂-Einsparungen, obwohl im Heizfall dadurch die CO₂-Emissionen für das Gebäude pro m³ im Jahr leicht steigen.

Der Ertrag der PV-Anlage spart bei der manuellen Lagerhalle ca. 2 kg CO₂ / m³a ein und kompensiert bei allen Temperaturniveaus die entstehenden CO₂-Emissionen der optimierten Varianten.

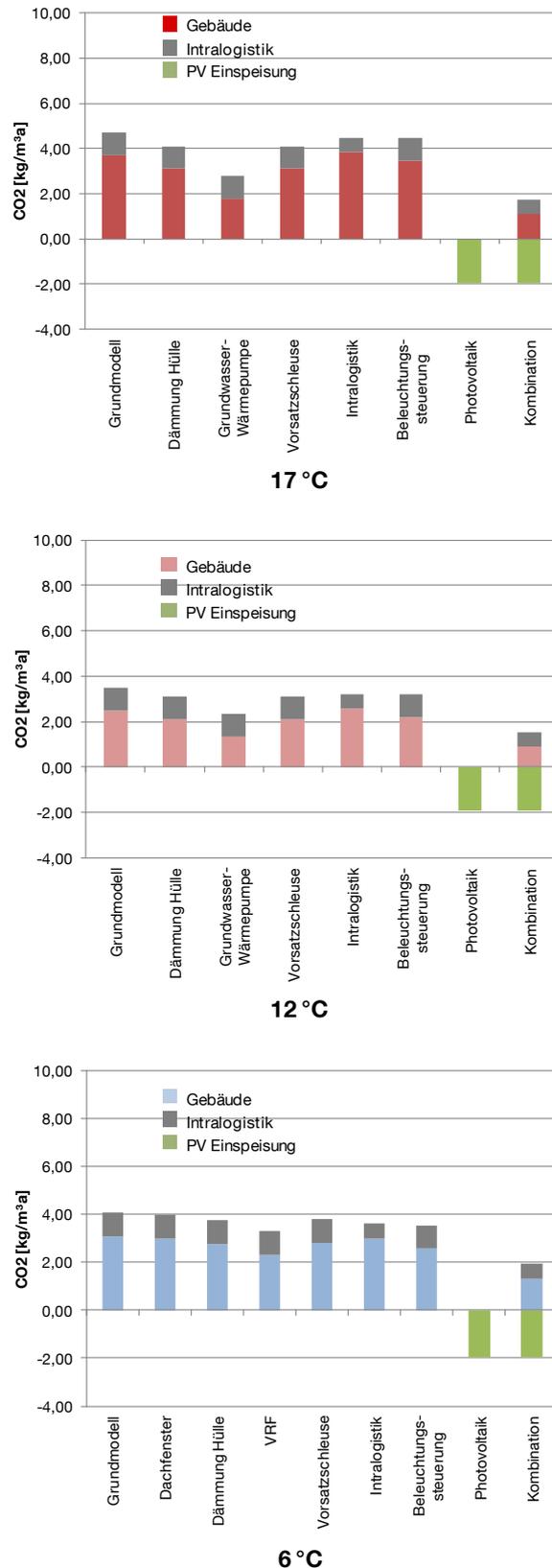


Abbildung 6.9: Vergleich der CO₂-Emissionen der einzelnen Maßnahmen und in der Kombination aller optimierten und wirtschaftlich vertretbaren Varianten von Grundelementen in der manuellen Lagerhalle bei 17 °C, 12 °C und 6 °C

6.2 Kombination der Einzeluntersuchungen - halbautomatisches Logistikzentrum

Der Energiefluss im halbautomatischen Logistikzentrum für das Grundmodell mit 12 °C Innenraumtemperatur ist in Abbildung 6.10 dargestellt. Für das Temperaturniveau von 17 °C und 6 °C befinden sich die Energiebilanzen der Grundmodelle und der optimierten Varianten im Anhang A in den Abbildungen A.7 bis A.12.

Zu sehen ist in Abbildung 6.10, dass der Strombedarf für die Intralogistik mit steigender zu erbringender Logistikleistung durch die Kommissionierung im halbautomatischen Logistikzentrum für die Halle steigt. Der größte Anteil am Strom wird für das HRL benötigt. Weiterhin benötigt das Kühlsystem ebenfalls Strom als Energieträger, um die notwendige Prozesskälte für die Halle und das HRL zu erzeugen. Im Vergleich zum Heizfall wirken sich die solaren Erträge negativ und die Kälteeinträge im Winter bei jährlicher Bilanzierung positiv auf die Kühlleistung aus.

Die Energiebilanz der optimierten Variante durch Kombination der Einzeluntersuchungen befindet sich in Abbildung 6.11. Die Grundelemente, welche für die optimierten Varianten des halbautomatischen Logistikzentrums für die unterschiedlichen Temperaturanforderungen ausgewählt werden, sind in Tabelle 6.2 dargestellt.

Generell deckt sich die Auswahl mit der manuellen Lagerhalle, jedoch gibt es hier keine Beleuchtungssteuerung und das Hochregallager wird im Gegensatz zur Haupthalle in der Dämmung des Grundmodells ausgeführt. Neben der Installation der Photovoltaikanlage auf einer kleineren Dachfläche der Halle als bei der manuellen Lagerhalle wird beim halbautomatischen Logistikzentrum eine Photovoltaikanlage zusätzlich am Dach und an der Fassade des HRL angebracht. Dennoch reicht der Ertrag der Photovoltaikanlage nicht aus, um den Strombedarf der Intralogistik zu decken. Deshalb wird hier als Heizsystem nicht die strombetriebene Grundwasser-Wärmepumpe eingesetzt,

Tabelle 6.2: Überblick der ausgewählten Grundelemente der optimierten Variante im Vergleich zum Grundmodell für das halbautomatische Logistikzentrum

	Grundmodell	Optimierte Variante
Gebäudehülle		
Dämmung Halle	Dä_GM	Dä_V3
Dämmung HRL	Dä_GM	Dä_GM
Fassadenfenster	FF_GM (n.v.)	FF_GM (n.v.)
Dachfenster (im Heizfall)	DF_GM_Dä_G M	DF_GM_Dä_G M
Dachfenster (im Kühlfall)	DF_GM_Dä_V3	DF_GM_Dä_V3
Verladeschleuse	GM	mit Vorsatzschleuse
Gebäudetechnik		
Heizsystem	GM_Gas-Umluft direkt	Hackschnitzel-Umluft indirekt
Kühlsystem	GM_Fan Coil	VRF-System
Photovoltaik	GM (n.v.)	mit PV Dach + Fassade
Intralogistik		
FFZ Hochhubwagen	HHW_GM	HHW_V2
GLT FöTech Rolle+Kette	RF_KF_GM	RF_KF_V1
MzW Komm. Horizontalkomm.	HKom_GM	HKom_V2
Manu. Lager Schubmastst.	SMS_GM	SMS_V2
automa. HRL RBG	RBG_GM	RBG_mit_Rü

sondern Umluftheizer, die von einem Hackschnitzelkessel zentral mit Wärme versorgt werden.

Bei der Intralogistik wird der Schubmaststapler für den Nachschub in der MzW-Kommissionierung wie bei der manuellen Lagerhalle durch die Variante mit energieeffizienter Batterieladetechnologie und optimierter Betriebsweise ersetzt.

Auch die weiteren FFZ-Arten des halbautomatischen Logistikzentrums werden durch die Varianten mit diesen energieeffizienten Maßnahmen ausgetauscht. Bei den GLT-Ketten- und Rollenförderern wird die Variante RF_KF_V2 mit intermittierendem Betrieb gewählt und das HRL mit Energierückspeiseeinheiten ausgestattet.

In Abbildung 6.12 sind die möglichen Einsparungen der optimierten Variante bei 17 °C Innenraumtemperatur dargestellt. Im Vergleich zur manuellen Lagerhalle werden zusätzlich rund 300.000 kg CO₂ eingespart, die prozentualen Einsparungen belaufen sich immer noch auf ca. 92 %. Dennoch ist es hier nicht mehr möglich, ein bilanziell CO₂-neutrales Logistikzentrum zu realisieren. Rein rechnerisch würde eine zusätzliche Fläche von 916 m² Photovoltaik benötigt werden, um die restlichen 76.000 kg CO₂ zu kompensieren.

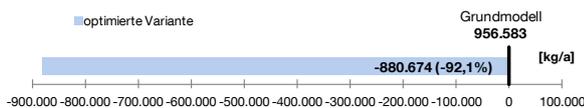


Abbildung 6.12: Vergleich der CO₂-Emissionen des halbautomatischen Logistikzentrums, 17 °C, im Grundmodell und der optimierten Variante

Dennoch sind die zusätzlichen Investitionen, dargestellt in Abbildung 6.13, auch hier nach ca. 15 Jahren durch die laufenden Einsparungen der Energiekosten ausgeglichen.

Wird die Innenraumtemperatur auf 12 °C in der Haupthalle ausgelegt und werden die optimierten Grundelemente miteinander kombiniert, ergibt sich eine Reduzierung der CO₂-Emissionen um ca. 92 %, wie in Abbildung 6.14 ersichtlich. Somit verursacht das halbautomatische Logistikzentrum im Jahr noch ca. 69.000 kg CO₂, welche nicht durch den Einsatz regenerativer Energien

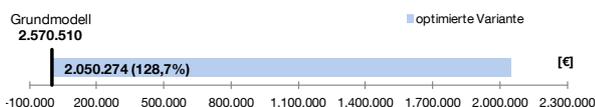


Abbildung 6.13: Vergleich der Investitionen des halbautomatischen Logistikzentrums, 17 °C, im Grundmodell und der optimierten Variante

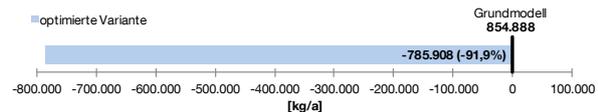


Abbildung 6.14: Vergleich der CO₂-Emissionen des halbautomatischen Logistikzentrums, 12 °C, im Grundmodell und der optimierten Variante

kompensiert werden können. Um dies ebenfalls mittels Photovoltaik zu decken, wäre eine Fläche von 832 m² notwendig.

Auch hier steigen die Investitionen wie bei der Temperaturanforderung von 17 °C um ca. 128 % für die optimierten Varianten (vgl. Abbildung 6.15), amortisieren sich jedoch durch geringere Einsparungen der laufenden Heizkosten erst nach ca. 17 Jahren.

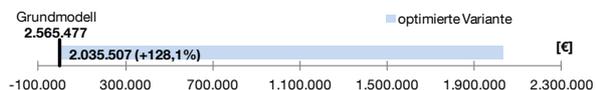


Abbildung 6.15: Vergleich der Investitionen des halbautomatischen Logistikzentrums, 12 °C, im Grundmodell und der optimierten Variante

Wird das Gebäude auf 6 °C gekühlt, sinken die CO₂-Emissionen im Vergleich zum Grundmodell um 84 % (vgl. Abbildung 6.16). Um die restlichen 16 % zu decken, würde eine PV-Fläche von 2.106 m² benötigt. Dass die möglichen Einsparungen im Kühllager niedriger ausfallen als im Heizfall hat einerseits mit dem größeren zu konditionierendem Volumen für das HRL zu tun und andererseits damit, dass die Kältemaschine strombetrieben ist und einen schlechteren CO₂-Faktor aufweist.

Durch die laufenden Einsparungen der Stromkosten zur Erzeugung der Kühlenergie als auch durch die Rückspeisung im HRL amortisiert sich die optimierte Variante bei 6 °C Temperaturanforderung schon nach 13 Jahren, obwohl die

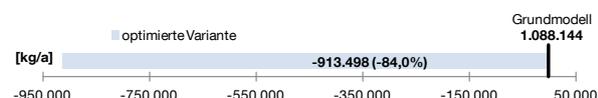


Abbildung 6.16: Vergleich der CO₂-Emissionen des halbautomatischen Logistikzentrums, 6 °C, im Grundmodell und der optimierten Variante

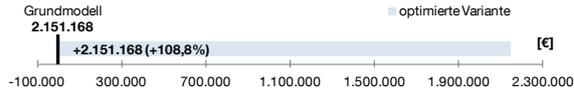


Abbildung 6.17: Vergleich der Investitionen des halbautomatischen Logistikzentrums, 6 °C, im Grundmodell und der optimierten Variante

Investitionen im Vergleich zum Grundmodell in Abbildung 6.17 um ca. 109 % steigen.

Abbildung 6.18 zeigt im Überblick die Auswirkungen der einzelnen Maßnahmen auf die CO₂-Emissionen. Es ist erkennbar, dass der Bedarf der intralogistischen Anlagen nun deutlich über dem der Haustechnik liegt. Zudem kommt hinzu, dass sich die Einsparungen der Intralogistik durch Optimierungsmaßnahmen nur auf ca. 35 % belaufen. Die durch die Haustechnik verursachten CO₂-Emissionen lassen sich in Summe um fast 75 % reduzieren.

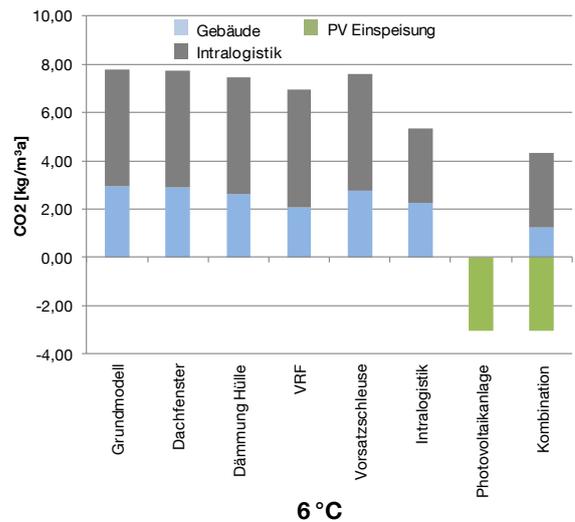
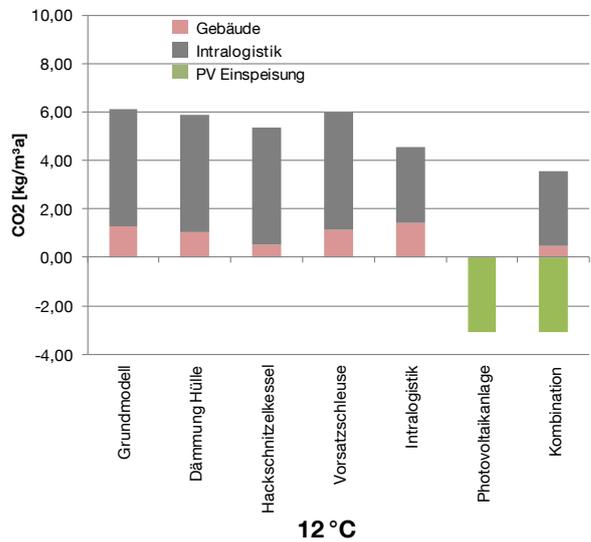
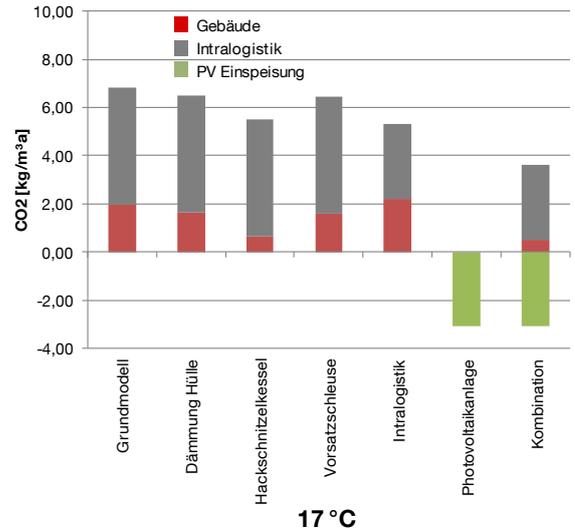


Abbildung 6.18: Vergleich der CO₂-Emissionen der einzelnen Maßnahmen und in der Kombination im halbautomatischen Logistikzentrum bei 17 °C, 12 °C und 6 °C

6.3 Kombination der Einzeluntersuchungen - vollautomatisches Distributionszentrum

Die sich ergebenden Energieströme des Grundmodells vollautomatisches Distributionszentrum für 12 °C sind in Abbildung 6.19 dargestellt. Zu erkennen ist, dass durch die weitere Automatisierung des Materialflusses der Strombedarf im Vergleich zum halbautomatischen Logistikzentrum weiter steigt. Durch die Verringerung des Raumvolumens der Halle mit der Wareneingangs- und Warenausgangsbereitstellung sinkt der Wärmebedarf im Vergleich zum manuellen Lager sehr stark. Dies trifft auch auf das Grundmodell mit der Temperaturanforderung von 17 °C zu (vgl. Abbildung A.13 im Anhang). Bei 6 °C sinkt der Kühlbedarf im Vergleich zum halbautomatischen Logistikzentrum trotz des hinzugekommene AKLs leicht, da das zu konditionierende Raumvolumen insgesamt kleiner ist (vgl. Abbildung 5.58).

Die für die optimierten Varianten ausgewählten Grundelemente sind in Tabelle 6.3 dargestellt und gleichen denen des halbautomatischen Logistikzentrums. Lediglich im Bereich Intralogistik ergeben sich Änderungen, indem für die Be- und Entladung der Lkws autonome Deichselhubwagen mit energieeffizienter Batterieladetechnologie eingesetzt und sechs weitere Deichselhubwagen mit Lithium-Eisenphosphat-Akkumulatoren. Die RBG des automatischen HRL als auch des AKL werden ebenfalls mit Rückspeiseeinheiten ausgestattet. Für die GLT-Fördertechnik als auch den Depalettierroboter wird die Variante mit energieeffizienter Betriebsweise gewählt. Der Haubenstretcher als auch die KLT Fördertechnik werden aus dem Grundmodell, aufgrund nicht variierter Parameter übernommen.

Tabelle 6.3: Überblick der ausgewählten Grundelemente der optimierten Variante im Vergleich zum Grundmodell für das vollautomatische Distributionszentrum

	Grundmodell	Optimierte Variante
Gebäudehülle		
Dämmung Halle	Dä_GM	Dä_V3
Dämmung HRL/AKL	Dä_GM	Dä_GM
Fassadenfenster	FF_GM (n.v.)	FF_GM (n.v.)
Dachfenster (im Heizfall)	DF_GM_Dä_GM	DF_GM_Dä_GM
Dachfenster (im Kühlfall)	DF_GM_Dä_V3	DF_GM_Dä_V3
Verladeschleuse	GM	mit Vorsatzschleuse
Gebäudetechnik		
Heizsystem	GM_Gas-Umluft direkt	Hackschnitzel-Umluft indirekt
Kühlsystem	GM_Fan Coil	VRF-System
Photovoltaik	GM (n.v.)	Photovoltaik Dach + Fassade
Intralogistik		
Autonomer Deichselhubw.	Auton_DHW_GM	Auton._DHW_V1
FFZ Deichselhubwagen	DHW_GM	DHW_LiFe
WzM Komm. Hochhubw.	Komm_HHW_GM	Komm_HHW_V1
AKL mit RBG	RBG_GM	RBG_mit_Rü
automa. HRL RBG	RBG_GM	RBG_mit_Rü
Verpackung Pal. Stretcher	Haubi_GM	Haubi_GM
Depalettierroboter	Robi_GM	Robi_V1
GLT FöTech Rolle + Kette	RF_KF_GM	RF_KF_V1
KLT FöTech Rolle	RF_GM	RF_GM

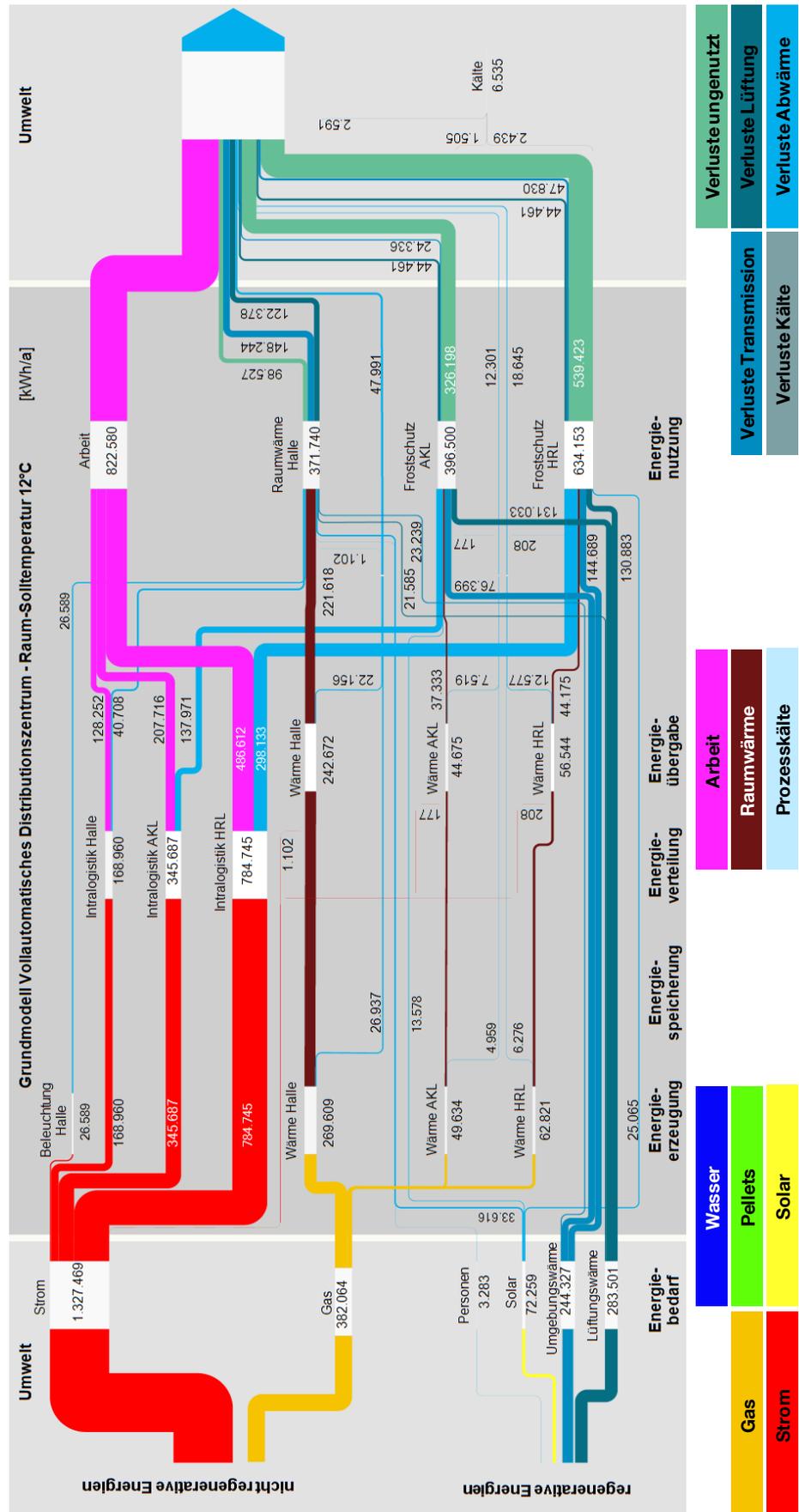


Abbildung 6.19: Energiebilanz vollautomatisches Distributionszentrum 12 °C Grundmodell: Energieflussbild aller bilanzierten Energieträger

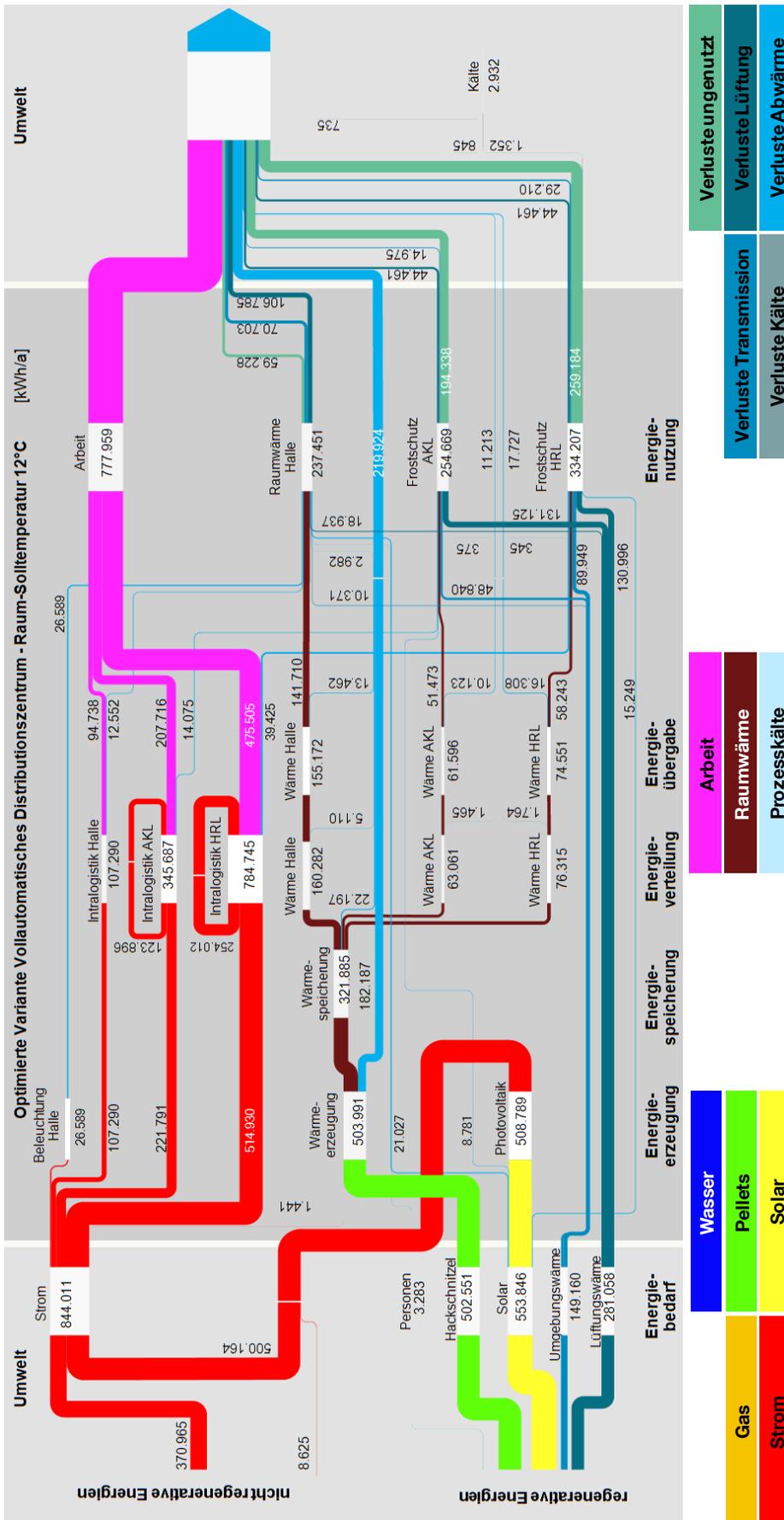


Abbildung 6.20: Energiebilanz vollautomatisches Distributionszentrum 12 °C optimierte Variante: Energieflussbild aller bilanzierten Energieträger

6.3 Kombination der Einzeluntersuchungen - vollautomatisches Distributionszentrum

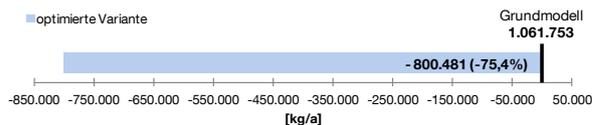


Abbildung 6.21: Vergleich der CO₂-Emissionen des vollautomatischen Distributionszentrums, 17 °C, im Grundmodell und der optimierten Variante

Abbildung 6.21 zeigt die Einsparungen der optimierten Variante bei 17 °C Innenraumtemperatur für das vollautomatische Distributionszentrum. Trotz der Maßnahmen können die CO₂-Emissionen nur noch um ca. 75 % gesenkt werden. Weil der Hauptanteil der CO₂-Emissionen durch die strombetriebene Intralogistik entsteht (vgl. Abbildung 6.27), verliert das Gebäude an Einfluss auf den Gesamtverbrauch. Verursacht die Gebäudetechnik in der manuellen Lagerhalle noch fast 80 % der gesamten CO₂-Emissionen, sinken diese im halbautomatischen Logistikzentrum drastisch auf unter 30 % und im vollautomatischen Distributionszentrum weiter auf ca. 16 %.

Um die restlichen 25 % CO₂-Emissionen zu kompensieren, wäre eine Fläche von 3.150 m² für zusätzliche Photovoltaik nötig.

Die Investitionen steigen für die optimierte Variante bei 17 °C, wie beim halbautomatischen Logistikzentrum, um ca. 130 % für die Optimierungsmaßnahmen und amortisieren sich nach ca. 15 Jahren, wie in Abbildung 6.22 dargestellt.

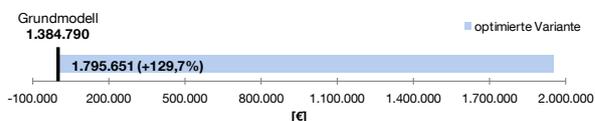


Abbildung 6.22: Vergleich der Investitionen des vollautomatischen Distributionszentrums, 17 °C, im Grundmodell und der optimierten Variante

Abbildung 6.23 verdeutlicht die eingesparten CO₂-Emissionen bei einer Kombination der optimierten Grundelemente bei 12 °C Raumtemperatur. Durch diese Maßnahmen sinken die Emissionen um ca. 749.000 kg im Jahr, die verbleibenden ~ 69.000 kg könnten durch eine

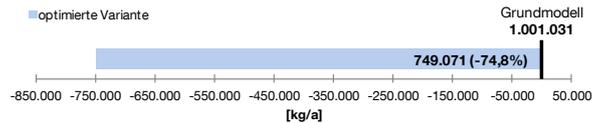


Abbildung 6.23: Vergleich der CO₂-Emissionen des vollautomatischen Distributionszentrums, 12 °C, im Grundmodell und der optimierten Variante

Fläche von 3.038 m² Photovoltaik abgedeckt werden.

Auch bei der Raumanforderung von 12 °C rentieren sich Mehrkosten (vgl. Abbildung 6.24) bei einer jährlichen Einsparung der Energiekosten von ca. 118.000 € für die optimierte Variante nach ca. 15 Jahren.

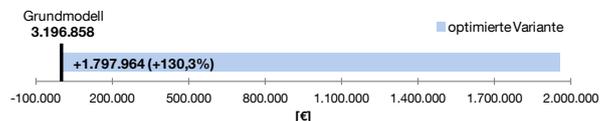


Abbildung 6.24: Vergleich der Investitionen des vollautomatischen Distributionszentrums, 12 °C, im Grundmodell und der optimierten Variante

Wie bei den anderen Typologien schneidet auch hier das Kühllager schlechter ab als die beheizten Varianten. Durch die Kombinationen lassen sich die CO₂-Emissionen noch um ca. 70 % senken (vgl. Abbildung 6.25), der ROI liegt dabei bei ca. 12 Jahren (vgl. Abbildung 6.26).

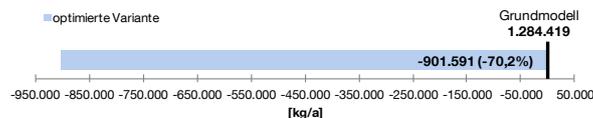


Abbildung 6.25: Vergleich der CO₂-Emissionen des vollautomatischen Distributionszentrums, 6 °C, im Grundmodell und der optimierten Variante

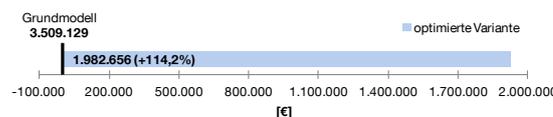


Abbildung 6.26: Vergleich der Investitionen des vollautomatischen Distributionszentrums, 6 °C, im Grundmodell und der optimierten Variante

Der Einfluss der einzelnen Maßnahmen für die unterschiedlichen Temperaturanforderungen ist in Abbildung 6.27 zusammengefasst.

Es ist ersichtlich, dass insbesondere im Heizfall der Einfluss des Gebäudes auf die CO₂-Emissionen, bei steigender Automatisierung der Intralogistik, abnimmt. Durch die Automatisierung steigt auch der Strombedarf und die dadurch verursachten CO₂-Emissionen, welche sich durch Energieeffizienzmaßnahmen senken lassen. Bei der Betrachtung werden die durch Mitarbeiter bedingte Emissionen, wie durch den Pkw auf dem Weg zur Arbeit, aufgrund der Bilanzgrenzen nicht betrachtet. Hier wird auch die Relevanz des in diesen Untersuchungen nicht betrachteten Faktors Standort ersichtlich. Davon abhängig ist die Erreichbarkeit des Logistikzentrums durch den öffentlichen Personennahverkehr für die Mitarbeiter oder die Anbindung an Straße und Schiene. Denn bei schlechter Erreichbarkeit oder ungünstiger Lage des Logistikzentrums entstehen durch längere Fahrwege für Anlieferung und Abholung zusätzliche CO₂-Emissionen.

Auch für die Nutzung von regenerativen Energien ist der Standort entscheidend. Denn nicht jeder Standort eignet sich z. B. für die Nutzung von Grundwasser. Weiterhin variieren die Sonnenstunden je geografischer Lage und beeinflussen den Ertrag einer Photovoltaikanlage.

Die Investitionen betreffend, werden keine Personalkosten in die Betrachtungen aufgenommen. Zusätzlich steigt die zu erbringende Logistikleistung der betrachteten Untersuchungsmodelle. Während in der manuellen Lagerhalle nur eine Zwischenlagerung der Paletten erfolgt, kommt im halb- und vollautomatischen Untersuchungsmodell die Kommissionierung hinzu, sodass die drei untersuchten Modelle nicht miteinander vergleichbar sind.

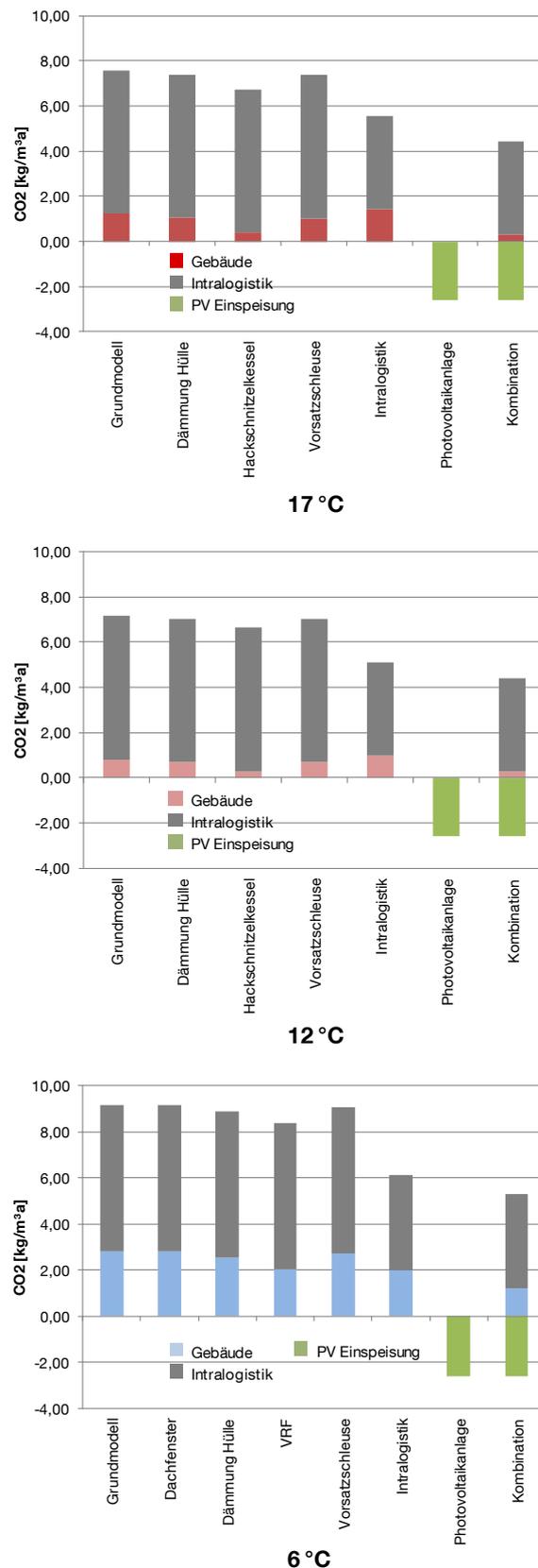


Abbildung 6.27: Vergleich der CO₂-Emissionen der einzelnen Maßnahmen und in der Kombination im vollautomatischen Distributionszentrum bei 17 °C, 12 °C und 6 °C

7 Umsetzung Planungstool für energieeffiziente und CO₂-neutrale Logistikzentren

Folgende Anforderungen an das Planungstool und an darin hinterlegte Handlungsempfehlungen werden im Rahmen der Experteninterviews festgelegt und durch den Projektbegleitenden Ausschuss bestätigt sowie erweitert:

- Informationsbereitstellung über die Möglichkeiten, einzelne Elemente von Logistikzentren energieeffizienter zu gestalten
- Übersichtliche Informationsbereitstellung
- Schnell zu erfassende Informationsdarstellung-/und -aufbereitung
- Aufzeigen von Energieeinsparpotentialen einzelner Lösungen/Maßnahmen
- Amortisationszeit der energieeffizienten Maßnahmen
- Aufzeigen von Wechselwirkungen der energieeffizienten Lösung zu anderen Elementen
- Einfache und intuitive Bedienung
- Schnelle Einarbeitung
- Kein Installationsaufwand für das Programm

Um nach Projektende von einem breiten Spektrum an Anwendern eingesetzt werden zu können, erfolgt die Umsetzung des Planungstools in MS Excel mit der Programmiersprache Visual Basic. Das Planungstool steht nach Ende des Forschungsvorhabens interessierten Unternehmen auf Anfrage bei den Forschungsstellen und der Forschungsvereinigung zur Einsichtnahme in den Forschungsstellen zur Verfügung.

7.1 Aufbau und Funktion des Planungstools

Um das Planungstool nutzen zu können, müssen alle Ordner inklusive der Unterordner auf dem Rechner gespeichert werden. Da in den meisten Fällen ein Zugriff auf den Quellcode aus Sicherheitsgründen abgewehrt wird, müssen in den Excel-Optionen bzw. der eingeblendeten Leiste

Makros für diese Datei erlaubt und aktiviert werden. Anschließend erscheint die Startseite, auf der die Forschungs- und Förderstellen mit Logos abgebildet sind (vgl. Abbildung 7.1).



Abbildung 7.1: Startbildschirm des Planungstools

Über den Button "Start" gelangt der Nutzer zur Auswahl der drei Typologien manuelle Lagerhalle, halbautomatisches Logistikzentrum und vollautomatisches Distributionszentrum, wie in Abbildung 7.2 gezeigt.



Abbildung 7.2: : Darstellung des Excel-Tools für die Auswahl der Typologie mit den jeweiligen Energiebilanzen und Grundparametern

Mit einem Klick auf die Außen-/Innenansicht wird er zu den Parameterstudien geführt. Jeweils unter den drei Bildern sind weitere Buttons, die ein pdf-Dokument öffnen. Hier sind die relevanten Grundparameter der Untersuchungsmodelle sowie die Energiebilanzen aller Temperaturniveaus des entsprechenden Grundmodells sowie der optimierten Variante angezeigt. Wird die

gewünschte Typologie angewählt, ändert sich die Anzeige. Hier fächert sich eine Pfadstruktur auf, auf deren erster Ebene das gewünschte Temperaturniveau ausgewählt werden kann. Nun kann zwischen Intralogistik- und Gebäudeuntersuchungen ausgewählt werden, über die definierten Klassen gelangt man so zu den Grundelementen, an denen die Parameterstudien durchgeführt wurden. Um sich ein anderes Grundelement anzuschauen, kann der Nutzer entweder den "Ebene zurück"-Button wählen oder direkt auf verfügbare Buttons klicken. Durch der "Home"-Button gelangt man wieder zu der Auswahlmöglichkeit der Typologie.

Wird ein Grundelement angewählt, erscheinen vier Kästchen (vgl. Abbildung 7.3): Eines zeigt die Grunddaten mit den Parametern des untersuchten Grundmodells. Ein weiteres nennt zusammenfassend die Ergebnisse und gibt dem Nutzer Handlungsempfehlungen zu dem jeweiligen Grundelement und verweist auf eventuelle Wechselwirkungen zu anderen Grundelementen hin.

Diese sind in einem dritten Kasten als Piktogramm grafisch dargestellt, durch ein anklicken gelangt der Nutzer direkt zu diesem Untersuchungsparameter. In dem rechts platzierten Kästchen sind die Untersuchungsergebnisse grafisch dargestellt. Diese beinhalten den Endenergiebedarf, die CO₂-Emissionen, die laufenden Kosten sowie die Investitionen. Darüber steht eine Anzahl an Optionen zur Verfügung. Über die Buttons "Lupe +" und "Lupe -" kann in das Blatt rein- und raus-gezoomt werden, zudem gibt es die Möglichkeit, das komplette Blatt zu drucken ("Drucker"). Des Weiteren öffnet sich bei anklicken des "Fragezeichens" wieder das pdf-Dokument mit den Randbedingungen der Typologie und den dazugehörigen Energiebilanzen. Der Button "[...]" zeigt eine Liste der in den Handlungsempfehlungen genannte Literaturquellen.

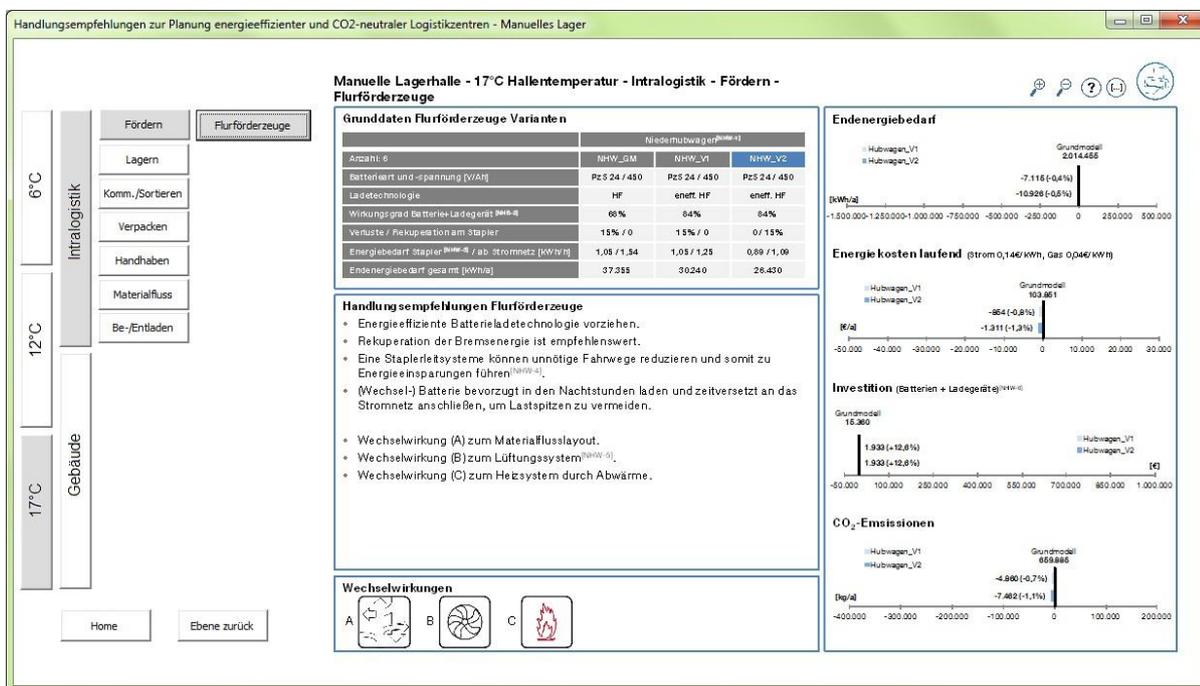


Abbildung 7.3: Darstellung des Excel-Tools nach Auswahl eines Grundelements anhand des Beispiels Flurförderzeuge

7.2 Validierung Planungstool

Das Planungstool wird bei drei Unternehmen innerhalb eines Zeitraums von einer Woche validiert. Dafür wird das Tool mit einem bestimmten Planungsszenario den Testpersonen im Unternehmen zur selbstständigen Anwendung bereitgestellt. Im Nachgang werden sowohl Fragen zur Bewertung des Planungstools gestellt als auch nach Anregungen für Besserungen gefragt.

Als positiv wird die übersichtliche Darstellung und der einheitliche Aufbau der Handlungsempfehlungen angegeben. Die Handlungsempfehlungen zu den einzelnen Grundelementen werden als hilfreich bei der Ideenfindung bewertet. Verbesserungspotential wird in der Benutzerführung gesehen, sodass beim Starten des Planungstools weitere Information zum Aufbau und zur Nutzung Planungstools implementiert werden. Die Testpersonen bestätigen, dass die zu Anfang des Forschungsvorhabens ermittelten Anforderungen an das Planungstool erfüllt sind.

8 Zusammenfassung der Forschungsergebnisse und Ausblick

Abschließend werden im Folgenden das Vorgehen und die erzielten Ergebnisse des Forschungsvorhabens zusammengefasst. Es wird weiterhin sowohl der Nutzung der Ergebnisse dargestellt als auch ein Ausblick für weiteren Forschungsbedarf gegeben.

8.1 Zusammenfassung

Um dem fortschreitenden Klimawandel entgegenzuwirken, wurden als eine der Stellschrauben die gesetzlichen Anforderungen an Neubauten in den letzten Jahren immer weiter verschärft. Derzeit ist ein Niedrigenergiestandard für alle Neubauten ab dem Jahr 2021 vorgesehen, was somit auch Logistikgebäude betrifft, die ebenfalls eine hohe Gesamtenergieeffizienz aufweisen müssen. Sowohl Bauherren, Planer als auch Investoren stehen zunehmend in der Pflicht, Energieeffizienzmaßnahmen in Logistikzentren umzusetzen. Neben dem Hintergrund der politischen Reglementierungen steigen durch das wachsende gesamtgesellschaftliche ökologische Bewusstsein in gleichem Maße die Kundenanforderungen an eine grüne Logistik. Darüber hinaus zwingen die stetig steigenden Energiepreise in Deutschland und der damit verbundene größer werdende Einfluss auf die Lebenszykluskosten von Anlagen und Immobilien die Logistikverantwortlichen zum Handeln.

Um ganzheitliche Energieeffizienzmaßnahmen abzuleiten, wurden drei Untersuchungsmodelle entwickelt, welche die Typologien der manuellen Lagerhalle, des halbautomatischen Logistikzentrums sowie des vollautomatischen Distributionszentrums vertreten. Diese Modelle wurden jeweils mit drei unterschiedlichen Temperaturniveaus kombiniert, wobei sich 12 °C und 17 °C Innenraumtemperatur aus den Aufenthaltsanforderungen der Nutzer erschließen und das Temperaturniveau 6 °C dem Lagergut gerecht wird und ein Kühlager repräsentiert. Anhand jedes

dieser Gebäudemodelle wurden Parameterstudien an zuvor identifizierten Grundelementen durchgeführt, die sich in die drei Bereiche Intra-logistik, Gebäudehülle und Gebäudetechnik unterschiedlicher Klassen gliedern. Alle Grundelemente wurden durch Variation auf größtmögliche CO₂-Einsparungen untersucht, bewertet und mit Investitionen sowie laufenden Energiekosten im Jahr hinterlegt. Anschließend wurden diese im Gesamtsystem der jeweiligen Typologie der Untersuchungsmodelle sowie in Anbetracht des angestrebten Temperaturniveaus miteinander zu sinnvollen Kombinationen zusammengeführt. Um den verbleibenden Bedarf an Energie nach der Optimierung der Grundelemente im Hinblick auf die Energieeffizienz zu decken, wurde das Gebäude mit einer stromerzeugenden Photovoltaikanlage ausgestattet bzw. falls dies nicht ausreicht die zusätzlich benötigte Fläche für Photovoltaik ermittelt.

Dabei zeigt sich, dass eine Kombination der einzelnen Grundelemente die CO₂-Emissionen in allen Untersuchungsmodellen deutlich senken kann. Jedoch werden bei den drei Typologien auch klare Unterschiede deutlich, wo jeweils diese Einsparpotenziale liegen.

In der manuellen Lagerhalle wird sehr wenig stromverbrauchende Materialflusstechnik eingesetzt, dadurch hat das Gebäude hier den größten Einfluss auf den Gesamtenergiebedarf. Demzufolge gibt es in den Klassen Gebäudehülle und Gebäudetechnik die meisten Möglichkeiten der Einflussnahme auf die Energieeffizienz. Eine gute Ausführung der Fassade in Kombination mit einem Wärmeerzeugungssystem, das regenerative Energien nutzt, ist dabei die wichtigste Maßnahme. Auch die Wahl der Kälteerzeugung im Falle eines Kühllagers ist entscheidend. In der optimierten Variante lässt sich bei den drei verschiedenen Temperaturniveaus der Energiebedarf für den Betrieb so weit senken, dass die auf dem Dach installierte Photovoltaikanlage den

verbleibenden Bedarf an Strom auszugleichen vermag. Ein CO₂-neutrales Gebäude ist im Fall der manuellen Lagerhalle realisierbar.

Im Falle des halbautomatischen Logistikzentrums ändert sich die Verteilung des Energiebedarfs deutlich. Verursacht das Gebäude in der manuellen Lagerhalle am Beispiel von 17 °C Innenraumtemperatur noch fast 80 % der gesamten CO₂-Emissionen, sinkt der Einfluss hier auf ein Drittel des Gesamtbedarfs. Folglich werden die intralogistischen Optimierungen zur größten Stellschraube mit einer Reduzierung der CO₂-Emissionen um über 30 % beim Kühllager. Dennoch können durch Maßnahmen an Gebäudehülle und Gebäudetechnik noch weitere Potenziale genutzt werden um den Bedarf im Gesamtsystem Logistikzentrum zu reduzieren. In Verbindung mit einer Photovoltaikanlage am Gebäude lassen sich somit in Summe ca. 92 % der CO₂-Emissionen (Temperaturniveau 17 °C) vermeiden, für die Realisierung eines CO₂-neutralen Logistikzentrums müssten jedoch weitere Flächen zur Stromerzeugung durch Photovoltaik genutzt werden.

Bei der Typologie des vollautomatischen Distributionszentrums steigt der Anteil der Intralogistik am Gesamtbedarf auf fast 85 % an. Gebäudehülle und -technik haben kaum mehr Einfluss auf die CO₂-Emissionen im Gegensatz zu den strombetriebenen intralogistischen Anlagen. Da Strom noch zum Großteil aus nicht-erneuerbaren Energien gewonnen wird, hat er einen entsprechend schlechten CO₂-Faktor. Aus diesem Grund liegen die CO₂-Einsparungen durch Kombination zu einem optimierten Gesamtmodell, abhängig vom gewünschten Temperaturniveau, nur noch zwischen ca. 70 %–75 %.

Alle durchgeführten Untersuchungen werden in einem Excel-basierten Tool implementiert und mit Hinweisen und Handlungsempfehlungen hinterlegt. Das Softwaretool steht allen Interessenten kostenlos zur Verfügung und bietet dem Nutzer durch eine intuitiv aufbauende Struktur und Visualisierung die Möglichkeit, schnell und einfach die erarbeiteten Ergebnisse zu erfassen. Dabei sind neben den CO₂-Emissionen auch

Informationen über den Endenergiebedarf, Investitionen sowie die zu erwartenden laufenden Kosten aufgeführt. Dem Planer steht damit ein Instrument zur Verfügung, das ihn in der Planungsphase bei der Auswahl und Bewertung von energieeffizienten Maßnahmen unterstützt.

8.2 Nutzen und industrielle Anwendungsmöglichkeiten

Die im Forschungsvorhaben erarbeiteten Ergebnisse zur Gestaltung von CO₂-neutralen und energieeffizienten Logistikzentren können in den Wertschöpfungsketten von Industrie- und Handelszweigen Verwendung finden, sofern diese über Konsolidierungs- und Verteilknoten verfügen. Auch Logistikdienstleistern, welche eigene Logistikgebäude besitzen und entwickeln, kommen die Ergebnisse zugute. Die ganzheitlichen Handlungsempfehlungen unterstützen bei der Bewertung und Auswahl von Maßnahmen, um sowohl die Gesamtenergieeffizienz von Logistikzentren zu steigern und dadurch Energiekosten einzusparen als auch CO₂-Emissionen zu vermeiden. Planungs- und Architekturbüros können ihre Beratungsangebote auf Grundlage der Ergebnisse erweitern (z. B. Erstellung von regenerativen Energieversorgungskonzepten für neue Logistikzentren angepasst auf die logistischen Anforderungen) und die Empfehlungen zur Gestaltung von CO₂-neutralen Logistikzentren direkt umsetzen.

Somit können insbesondere KMU aus Dienstleistung, Industrie und Handel von den frei zugänglichen Ergebnissen des Forschungsvorhabens profitieren und ihre Wettbewerbsposition stärken und ausbauen. Betreiber bzw. Mieter von Logistikimmobilien können mithilfe der Erkenntnisse aus dem Forschungsvorhaben ihre Energiekosten detailliert hinterfragen und durch geeignete Maßnahmen/technische Komponenten senken. Im Falle angemieteter Immobilien können die Unternehmen den Faktor „Energetische Eignung“ verstärkt in die Bewertung von Mietobjekten einfließen lassen.

Auch Hersteller von Komponenten (Baustoffe, Haustechnik, Fördertechnik) können durch innovative Lösungen im Bereich der Energieeffizienz ihre Wettbewerbsposition stärken. Durch die ganzheitliche Betrachtung der Thematik Energieeffizienz im Lager- und Kommissionierbereich können sich hier neue Märkte öffnen sowie Vorbehalte seitens der Betreiber und Kunden verringert werden. Die Vorteile sparsamer Komponenten und Anlagen mit einem möglicherweise höheren Anschaffungspreis rücken durch eine ganzheitliche Betrachtung der energetischen Wechselwirkungen der verschiedenen Bestandteile eines Logistikzentrums in den Fokus.

Das entwickelte Planungstool mit hinterlegten Handlungsempfehlungen steht den Unternehmen nach Projektende auf Anfrage bei den Forschungsstellen zur Verfügung und ermöglicht eine zielgerichtete und effiziente Anwendung der im Forschungsvorhaben erzielten Ergebnisse.

8.3 Ausblick

Durch das Forschungsprojekt „Das CO₂-neutrale Logistikzentrum“ konnten ganzheitliche Handlungsempfehlungen für die Planung von energieeffizienten und CO₂-neutralen Logistikzentren erarbeitet werden. Die Handlungsempfehlungen berücksichtigen dabei vor allem die energetischen Wechselwirkungen zwischen der Materialflusstechnik, der Gebäudetechnik und der Gebäudehülle für unterschiedliche Arten von Logistikzentren.

Die ermittelten Grundelemente und deren analysierte energetische Auswirkungen ermöglichen eine einfache Abschätzung des Energiebedarfs und unterstützen bei der Auswahl und Kombination von energieeffizienten Lösungen. Im Bereich der Intralogistik fehlen jedoch konkrete Methoden und Berechnungsansätze für einen schnellen und genauen energetischen Vergleich unterschiedlicher Lösungen hinsichtlich bestimmter logistischer Aufgaben. Einen ersten Schritt hierzu stellen die kürzlich veröffentlichten Ansätze für Energieeffizienzklassen bei AKL-Regalbediengeräten dar [Ert-2013] [Ert-2014].

Auch fehlen noch Standards und Methoden zur Berechnung von CO₂-Emissionen, die von Logistikzentren als Verteil- und Konsolidierungspunkte innerhalb gesamter Lieferketten verursacht werden. Aufbauend auf den erarbeiteten Gebäude-modellen besteht hier weiterer Forschungsbedarf für die Entwicklung eines passender Bewertungsverfahrens, um diese CO₂-Emissionen für Logistikdienstleistungen auf Produkt- oder Auftragsebene gegenüber den Kunden ausweisen zu können.

Weiterhin wurden im Forschungsprojekt Tiefkühl-lager im Bereich der Minusgrade nicht betrachtet.

Auch die Erweiterung der Bilanzgrenzen um den Standort in Verbindung mit anderen Gebäuden, sowohl die Wärmeenergie als auch eine intelligente Stromversorgung, stellt unter dem Schlagwort „Smart Grids“ weiteren Forschungsbedarf dar. Hier könnten weitere Synergieeffekte bezüglich Nutzung, Speicherung und Bereitstellung regenerativer Energien untersucht werden.

Literaturverzeichnis

- [All-1999] Allgayer, F.: Computergestützte Planung von Materialflusssystemen auf Basis statischer Materialflüsse. Dissertation. München: Technische Universität München. 1999.
- [Bae-2009] Baerwolff, C.: Blue-Q = IQ – Der intelligente Autopilot für Wirtschaftlichkeit und Umweltverantwortung – Gestern, Heute, Morgen; VDI Berichte 2070, Baden-Baden, 2009
- [Bae-2010] Baerwolff, C.: Mit der Brennstoffzelle unterwegs. In: Materialfluss 2010, S. 28-29
- [BLfU-2004] Bayrisches Landesamt für Umweltschutz (LfU): Effiziente Druckluftsysteme - Energie sparen - Klima schützen - Kosten senken!, 2004. url: http://www.lfu.bayern.de/energie/co2_minderung/doc/druckluftsysteme.pdf (Download am 26.02.2014)
- [BDEW-2010] Bitterer, R.: BDEW-Strompreisanalyse Frühjahr 2010, Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft, Berlin, April 2010, <http://www.rwe.com/web/cms/mediablob/de/403780/data/403722/4/rwe/presse-news/so-entsteht-der-strompreis/BDEW-Strompreisanalyse-Fruhjahr-2010.pdf>, Stand: 17.01.2012
- [BDEW-2013] BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.: BDEW-Strompreisanalyse Mai 2013, 2013. url: [http://www.bdew.de/internet.nsf/id/123176ABDD9ECE5DC1257AA20040E368/\\$file/13%2005%2027%20BDEW_Strompreisanalyse_Mai%202013.pdf](http://www.bdew.de/internet.nsf/id/123176ABDD9ECE5DC1257AA20040E368/$file/13%2005%2027%20BDEW_Strompreisanalyse_Mai%202013.pdf) (Download am 26.09.2013)
- [BGHW-2012] Berufsgenossenschaft Handel und Warendistribution (BGHW): Einsatz von Flurförderzeugen - Batterieladeanlagen für Flurförderzeuge 2010. url: http://medien-e.bghw.de/bge/pdf/sp_02.pdf (Download am 16.12.2012)
- [Beu-2013] Beumer Group GmbH: BEUMER stretch hood® M, 2013. url: <http://www.beumergroup.de/de/produkte/verpackungstechnik/stretchhauben/beumer-stretch-hoodr-m/> (Aufruf am 27.11.2013)
- [Boe-2013] Boelsen, M.: Werte, Preise, Lebenszyklus, Drittverwendungsfähigkeit, Mietvertragsbesonderheiten - BVL Regionalgruppe Weser/Ems 96. Treffen: Logistikimmobilien, 26.09.2013. url: http://robertcspies.de/uploads/tx_spiespage/Praesentation_BVL_Vortrag_Version_14.09.2013_pdf_01.pdf (Aufruf am 21.02.2014)
- [BKI-2012] Baukosteninformationszentrum (Hrsg.): BKI Baukosten Bauelemente 2012: Statistische Kostenwerte Teil 2, Stuttgart, 2012
- [BKI-2006] Baukosteninformationszentrum (Hrsg.): BKI OBJEKTDATEN: Kosten abgerechneter Bauwerke - Technische Anlagen mit statistischen Kostenwerten G1 TECHNISCHE GEBÄUDEAUSRÜSTUNG, Stuttgart, 2006
- [BMU-2013] Böhme, D., Nick-Leptin, J.: Erneuerbare Energien in Zahlen, Nationale und internationale Entwicklung, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BmU), Berlin, Juli 2013
- [Bra-2013] Braun, M.; Linsel, P.; Furmans, K.: 24-Volt Antriebe in der Stetigfördertechnik. In: Logistik für Unternehmen, 10 (2013) S. 46-49.

- [Bra-2012] Braun, M.; Linsel, P.; Schönung, F.; Furmans, K.: Energiebetrachtung beim Lager- und Kommissioniervorgang. In: Zadek, H. (Hrsg.): 8. Fachkolloquium der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik e. V. (WGTL) 26./27. Sept. 2012, Magdeburg. 2012,
- [Bru-2009b] BRUCHAPaneel BRANDSCHUTZ Fassade – FP F., http://www.brucha.at/dokumente/de_FPF.pdf, Stand: 17.01.2012
- [BMW-2013] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi): Energiedaten: Gesamtausgabe, 2013. url: <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/E/energiestatistiken-grafiken,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf> (Download am 04.02.2014)
- [BJV-2013] Bundesministeriums der Justiz und für Verbraucherschutz: Honorarordnung für Architekten und Ingenieure vom 10. Juli 2013 (BGBl. I S. 2276). In: (2013)
- [BDI-2013] Bundesverband der Deutschen Industrie e.V. (BDI): Faktencheck: Gebäudeenergieeffizienz, 2013. url: http://www.gebaeudeinitiative.de/files/BDI_Faktencheck_Gebaeudeenergieeffizienz.pdf (Download am 26.11.2013)
- [Bru-2009a] BRUCHAPaneel BRANDSCHUTZ Dach – FP F., http://www.brucha.at/dokumente/de_DP_F_NEU.pdf, Stand: 17.01.2012
- [CAR-2013] <http://www.carmen-ev.de/infothek/preisindizes/hackschnitzel>, Stand: 01.10.2013
- [DIN-15316] DIN EN 15316-4-6:2007 Heizungsanlagen in Gebäuden – Verfahren zur Berechnung der Energieanforderungen und Nutzungsgrade der Anlagen – Teil 4-6: Wärmeerzeugungssysteme, photovoltaische Systeme; Deutsche Fassung EN 15316-4-6:2007 , Stand: Juli 2009
- [DIN 18599] DIN 18599: Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung, Stand: Dezember 2011
- [DIN 18599-1] DIN 18599 Teil 1: Allgemeine Bilanzierungsverfahren, Begriffe, Zonierung und Bewertung der Energieträger, Stand: Dezember 2011
- [DIN 18599-2] DIN 18599 Teil 2: Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen von Gebäudezonen, Stand: Dezember 2011
- [DIN 18599-10] DIN 18599 Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten, Stand: Dezember 2011
- [DVZ-2012] Deutsche Verkehrs Zeitschrift (DVZ): DVZ Nachhaltigkeitsreport Transport und Logistik. DVV Media Group, Belm: 2012.
- [DWD-2012] Deutscher Wetterdienst, Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung: Projektbericht – Aktualisierte und erweiterte Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere, extreme und zukünftige Wetterverhältnisse, Offenbach, Juli 2011
- [EEWG-2011] Bundesregierung: Gesetz zur Förderung Erneuerbarer Energien im Wärmebereich (Erneuerbare-Energien-Wärme-Gesetz - EEWärmeG), 22. Dezember 2012
- [Ert-2013c] Ertl, R.; Günthner, W. A.: Schnell zu aussagekräftigen Werten gelangen - Teil 1, Analytische Berechnung des mittleren Energiebedarfs von Regalbediengeräten mit Energierückspeisung. In: F+H - Fördern und Heben, (2013) Nr. 6, S. 12-15.

- [Ert-2013a] Ertl, R.; Günthner, W. A.: Schnell zu aussagekräftigen Werten gelangen - Teil 2, Analytische Berechnung des mittleren Energiebedarfs von Regalbediengeräten mit Energierückspeisung. In: F+H - Fördern und Heben, (2013) Nr. 8, S. 12-15.
- [Ert-2013b] Ertl, R.; Günthner, W. A.: Energieeffiziente Bahnplanung von Regalbediengeräten - Zwischenkreis ermöglicht einen niedrigen Gesamtverbrauch. In: Hebezeuge Fördermittel, (2013) Nr. 1-2, S. 26-29.
- [Ert-2013] Ertl, R.; Günthner, W. A.: Energieeffizienzklassen für AKL-Regalbediengeräte - Teil 1, F+H - Fördern und Heben, (2013), 12, S. 8-10, ISSN 0341-2636
- [Ert-2014] Ertl, R.; Günthner, W. A.: Energieeffizienzklassen für AKL-Regalbediengeräte - Teil 2, F+H - Fördern und Heben, 2014 (2014), 1-2, S. 10-13, ISSN 0341-2636
- [EU-2012] Europäische Union Richtlinie 2012/27/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Oktober 2012 zur Energieeffizienz, Brüssel 2012
- [EK-2012] Europäische Kommission (EK): Pressemitteilung: Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden - Kommission verklagt Italien vor dem Gerichtshof, 2012. url: http://europa.eu/rapid/press-release_IP-12-411_de.htm (Aufruf am 19.12.2013)
- [EK-2012a] Europäische Kommission (EK): Non-paper der Europäischen Kommission zur Energieeffizienzrichtlinie, Informelle Ratstagung 19. - 20. April 2012, 2012. url: http://ec.europa.eu/energy/efficiency/eed/doc/20120424_energy_council_non_paper_efficiency_de.pdf (Download am 04.02.2014)
- [EK-2013] Europäische Kommission (EK) Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament und den Rat, Brüssel, 06.11.2013 2013
- [EnEV-2009] Bundesregierung: Energieeinsparverordnung (EnEV), 29. April 2009
- [EU-2013] Europäische Union Richtlinie 2010/31/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. Mai 2010 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (Neufassung), Brüssel 2010
- [Fro-2010] Fronius International GmbH: Die Fronius Energiezelle im mobilen Einsatz –Das HyLOG Projekt. http://www.fronius.com/cps/rde/xbcr/SID-D39318F1-802E8CC0/fronius_international/HyLOG_40_0006_2925_DE_86397_snapshot.pdf, Aufruf am 22.11.2010
- [Fro-2013] Fronius International GmbH: Startschuss für Feldversuch der E-LOG-Biofleet, 2013. url: http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/fronius_international/hs.xsl/17_20056_DEU_HTML.htm?inc=96847.htm#.UxVh7RC2wzs (Aufruf am 21.02.2014)
- [Fro-2014] Fronius International GmbH: Active Inverter Technology mit neuartigem Ri-Ladeprozess, 2014. url: http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-C0507689-EA3295EB/fronius_international/hs.xsl/17_27189_DEU_HTML.htm#.Uw1bURC2wzs (Aufruf am 26.02.2014)
- [Gau-2013] Gaus, H.: Effizientes Lithium-Ionen-Energiesystem liflex –Schnell geladen, wartungsfrei. In: Hebezeuge Fördermittel, Jg. 53 (2013) Nr. 4, S. 184 - 186.
- [Gud-2010] Gudehus, T.: Logistik - Grundlagen - Strategien - Anwendungen. Springer, Berlin u. a.: 2010.

- [Gün-2013b] Günthner, W. A.: Planung technischer Logistiksysteme. Seminarunterlagen: Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik. Technische Universität München. 2013.
- [Gün-2013a] Günthner, W. A.: Planung technischer Logistiksysteme. Vorlesungsskriptum: Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik. Technische Universität München. 2013.
- [Gün-2011] Günthner, W. A.; Atz, T.; Ulbrich, A.: Integrierte Lagersystemplanung. In: Günthner, W. A. (Hrsg.): Forschungsberichte Lehrstuhl fml. Garching: 2011.
- [Gün-2013] Günthner, W. A.; Habenicht, S.: Erweiterte Logistiksystemplanung unter Einbeziehung des Energieverbrauchs. In: Günthner, W. A. (Hrsg.): Forschungsberichte Lehrstuhl fml. Garching: 2013.
- [Gün-2014] Günthner, W. A.; Habenicht, S.; Luber, M.: Stromfressern auf der Spur. In: Logistik Heute, Jg. 36 (2014) Nr. 1-2, S. 66-67.
- [Hab-2013] Habenicht, S.; Ertl, R.; Günthner, W. A.: Analytische Energiebedarfsermittlung von Intralogistiksystemen in der Planungsphase. In: ten Hompel, M. (Hrsg.): Tagungsband WGTL-Kolloquium, Dortmund. 2013, S. 77-90
- [Han-2005] Handelsblatt GmbH: Industrie- und Logistikunternehmen wechseln Strategie - Firmenhallen: Miete schlägt Eigentum, 12.02.2005. url: <http://www.handelsblatt.com/finanzen/immobilien/nachrichten/industrie-und-logistikunternehmen-wechseln-strategie-firmenhallen-miete-schlaegt-eigentum/2473778.html> (Download am 21.02.2014)
- [Hau-2009a] Hausladen, G., Tichelmann, K.: Ausbau Atlas, München, 2009
- [Hau-2009b] Hauser, G.: Energiesparverordnung (EnEV) 2009/2012- Auswirkungen auf die Bauausführung. GRE Mitgliederversammlung 2009. München: PEH 12 März 2009
- [Har-2002] Hartmann, H., Kaltschmitt, M.: Biomasse als erneuerbare Energieträger. Eine technische, ökologische und ökonomische Analyse im Kontext der übrigen erneuerbaren Energien. Schriftenreihe "Nachwachsende Rohstoffe" Band 3, 2. Auflage (vollständige Neubearbeitung). 692 S., Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster 2002.
- [Heb-2010] Messevorschau LogiMAT 2010 - Daifuku - Effiziente Anlagennutzung. In: Hebezeuge Fördermittel, Nr. 1-2, 2010, S. 45
- [IDE-2009] Energieeffiziente Lösungen für die Intralogistik von Dematic. In: Ident, Nr. 5, 2009, S. 8
- [IER-2013] http://www.energiekonsens.de/cms/upload/Downloads/Vortraege/Downloads_und_Publikationen/Vortrag_Lambauer.pdf, Stand: 01.10.2013
- [ITG-2011] Oschatz, et.al.: Abschlussbericht, Gesamtanalyse – Energieeffizienz von Hallengebäuden, Institut für Technische Gebäudeausrüstung Dresden, Dresden, Juni 2011
- [Hem-2013] Hempel, A.: Die Energiewende im Gebäudebereich - Perspektiven bis 2020, 2013. url: http://www.klimastiftung-thueringen.de/fileadmin/media/Tagung/FT_2013-07-04/Hempel_EnEV.pdf (Download am 05.02.2014)
- [Jung-2013b] Jungheinrich AG: EJE 112i Elektro-Deichsel-Gabelhubwagen (1200 kg), 2013. url: <http://www.jungheinrich.de/flurfoerderzeuge/elektro-niederhubwagen/eje-112i/> (Aufruf am 07.11.2013)

- [Jung-2013] Jungheinrich AG: ETV 318 Elektro-Schubmaststapler (1.800 kg), 2013. url: <http://www.jungheinrich.de/flurfoerderzeuge/schubmaststapler/etvetm-318320325/> (Download am 03.06.2013)
- [Kam-2012] Kampmann konkret Glasgow, http://www.kampmann.de/download.php?file=pdf_files/preislisten_de/kampmann_preiskatalog_2013_printversion.pdf, Stand: 01.10.2013
- [Käs-2009] Käsler, R.; Stingl, K.; Riedmaier, S.: Last als Energiequelle - Bei Gabelstaplern durch Nutzsenkung bis zu 30% der Energie zurückgewinnen. In: O+P Ölhydraulik und Pneumatik, (2009) 1-2, S. 2-4.
- [Ket-1984] Kettner, H.; Schmidt, J.; Greim, H.-R.: Leitfaden der systemischen Fabrikplanung. Carl Hanser, München: 1984.
- [Kli-2013] Klimke, K., Schneegans, J., Rössel, T.: Unterschiedliche Torsysteme in Industriegebäuden unter Berücksichtigung energetischer, bauklimatischer und wirtschaftlicher Aspekte, Lehrstuhl für Bauklimatik und Haustechnik, TU München, München, 2013
- [Klü-2011] Klüger, P.: Energieeffiziente Produktion mit KUKA Robotern am Beispiel des Karosseriebaus, 2011. url: http://www.industrieanzeiger.de/c/document_library/get_file?p_l_id=37998686&folderId=37351564&name=DLFE-25440509.pdf (Download am 28.09.2013)
- [Kra-2010] Kramm, M.: Energieeffizienz - Strategien der Zukunft. In: Jahrbuch Logistik 2010, S. 164-166
- [Kre-2010] Krebs, M.: An allen Rädchen drehen - Ein Überblick über die Möglichkeiten zur Energieeinsparung in der Intralogistik. In: Logistra, Nr. 1-2, 2010, S. 18-19
- [Kri-2010] Krimmling, J.: Energieeffiziente Gebäude - Grundwissen und Arbeitsinstrumente für den Energieberater. Fraunhofer IRB Stuttgart: 2010.
- [Kun-2013] http://www.downloads.fgk.de/103_6_Kunicic.pdf, Stand: 01.10.2013
- [Küh-2009] Kühl, S.; Strodtholz, P.; Taffertshofer, A.: Handbuch Methoden der Organisationsforschung - Quantitative und Qualitative Methoden. VS Verlag, Wiesbaden: 2009.
- [Lami-2012] LAMILUX CI-System F100, <http://www.lamilux.de/> Stand: 17.01.2012
- [Lin-2010] Linde Material Handling: Erste Stapler mit Brennstoffzelle. In: Hebezeuge und Fördermittel, 50 (2010) 3, S. 126
- [LOG-2010] Alternative Antriebstechnik im Praxistest. In: Logistik für Unternehmen 1 / 2 2010, S. 16-17
- [LOG-2010b] Energieeffizienz-Potenziale in der Intralogistik heben. In: Logistik für Unternehmen, Nr. 1-2, 2010, S. 33
- [Mic-2014] Micheli, R.: Forschungsprojekt H2IntraDrive: Einsatz von wasserstoffbetriebenen Flurförderzeugen in der Intralogistik unter Produktionsbedingungen, 2014. url: http://www.fml.mw.tum.de/fml/index.php?Set_ID=1009 (Aufruf am 27.02.2014)

- [Muh-2011] Muhlfinger, R.: Energieverbrauch und -rückgewinnung in der Intraogistik. In: Zadek, H.;Schulz, R. (Hrsg.): Sustainable Logistics: Nachhaltigkeit von Logistikzentren durch Emissionsbewertung, Ressourcenschonung und Energieeffizienz. DVW Media Group, 2011. S. 104 - 110.
- [Neh-2012] Nehm, A.; Veres-Homm, U.: Logistikimmobilien. In: Klaus, P.;Krieger, W.;Krunke, M. (Hrsg.): Gabler Lexikon Logistik: MAnagement logistischer Netzwerke und Flüsse. Springer Gabler, Wiesbaden: 2012. S. 380-387.
- [NKH-2013] <http://www.hamburg.de/contentblob/262946/data/vortrag-probst.pdf>, Stand: 01.10.2013
- [o.V.a-2013] o. V.: Ladesystem spart Strom und CO2 ein. In: Materialfluss, Nr. 4 (2013)
- [Pea-2013] <http://www.pearl.de/a-NC5413-5452.shtml?query=Bewegungsmelder>, Stand: 01.10.2013
- [Pfaff-1982] Pfaff et al 1982, de Gids, W., Phaff, H., et.al.: Ventilatie von Gebouwen. Onderzoek naar de Gevolgen van Het Openen van een Raam op Het Binnenklimaat von een Kamer, Instituut voor Milieuhygiene en Gezondheidstechniek, Rapport C 448, Delft, Niederlande, 1982
- [Pil-2012] Pilkington Optitherm S3, <http://www.pilkington.com/Europe/Germany/German/default.htm>, Stand: 17.01.2012
- [PV-2013] <http://www.photovoltaik.org/wirtschaftlichkeit/photovoltaik-preise>, Stand: 01.10.2013
- [PV-2013] <http://www.photovoltaik.org/wirtschaftlichkeit/photovoltaik-preise>, Stand: 01.10.2013
- [PVw-2013] http://www.photovoltaik-web.de/images/stories/PV_Suche/photovoltaik-web-verguetungsrechner.jpg, Stand: 01.10.2013
- [PwC-2013] PricewaterhouseCoopers AG (PwC): Nachhaltigkeit - Mit Strategie zu mehr Effizienz: Studie zur Nachhaltigkeit in der Transport- und Logistikbranche. Düsseldorf. 2013.
- [RWE-2013] <http://www.energiewelt.de/web/cms/de/1217972/> energieberatung/heizung/waermepumpe/grundwasserwaermepumpe/, Stand: 01.10.2013
- [Schi-2006] Schieferdecker, B.: Technische Tools im Industriellen Energiemanagement. In: Schieferdecker, B. (Hrsg.): Energiemanagement-Tools: Anwendung im Industrieunternehmen. Springer, Berlin Heidelberg: 2006.
- [Sie-2013] Siegel, A.; Schulz, R.; Turek, K.; Schmidt, T.; Zadek, H.: Modellierung des Energiebedarfs von Regalbediengeräten und verschiedener Lagerbetriebsstrategien zur Reduzierung des Energiebedarfs. In: ten Hompel, M. (Hrsg.): Tagungsband WGTL-Kolloquium, Dortmund. 2013, S. 91-109
- [Sie-2013] Siemens Deutschland: Kundenbefragung Energiewende - Wie kann die Energieende erfolgreich gestaltet werden?, 2013. url: <http://www.siemens.de/energiewende-deutschland/pdf/energiewende-kundenbefragung.pdf> (Download am 28.01.2014)

- [SSI-2013] SSI Schäfer: Fördertechnik-Komponenten, 2013. url: http://www.ssi-schaefer.de/fileadmin/ssi/documents/main_brochures/de/br_komponentenkat_de.pdf (Aufruf am 04.09.2013)
- [Still-2013a] Still GmbH: EXD Technische Daten. Hochhubwagen für Doppelstock-Einsatz., 2013. url: <http://www.still.de/hochhubwagen-exd.0.0.html> (Download am 03.06.2013)
- [Still-2013] Still GmbH: EXU-S Technische Daten. EXU-S 24 - Niederhubwagen mit Fahrerstandplattform, 2013. url: <http://www.still.de/niederhubwagen-exu-s.0.0.html> (Download am 03.06.2013)
- [Still-2014] Still GmbH: Was ist der Nutzen von Blue-Q?, 2014. url: <http://www.still.de/blue-q-nachruestung-bremen.0.0.html> (Aufruf am 26.02.2014)
- [UBA-2013] Umweltbundesamt (UBA): Energiebedingte Emissionen und ihre Auswirkungen, 2013. url: <http://www.umweltbundesamt.de/daten/energiebereitstellung-verbrauch/energiebedingte-emissionen-ihre-auswirkungen> (Aufruf am 04.02.2014)
- [Via-2010] viastore systems GmbH: Viastore blue: 30 % und mehr Energie im Lager sparen. http://www.viastore.ru/fileadmin/Mediendatenbank/ServiceCorner/Produktinformationen/Energieeffizienz_Hochregallager_Intralogistik.pdf, Aufruf am 22.11.2010
- [Via-2010a] viastore systems GmbH: viastoreblue hat die gesamte Anlage im Blick - Energieeffizienz in der Intralogistik. In: viastore systems Intralogistik News, Nr. 3, 2009
- [VDI-3564] VDI Richtlinie 3564: Empfehlungen für Brandschutz in Hochregalanlagen, Berlin:Beuth:Januar 2011
- [VDI-3637] VDI Richtlinie 3637: Datenermittlung für VDI Gesellschaft für Produktion und Logistik Berlin: Beuth. 1996.
- [VDI-2198] VDI Richtlinie 2198: Typenblätter für Flurförderzeuge. VDI Gesellschaft für Produktion und Logistik Berlin: Beuth. 2012.
- [FVLR-2013] Fachverband Tageslicht und Rauchschutz e.V.: Lichtkuppeln und Lichtbänder, Heft 10, http://www.fvlr.de/downloads/FVLR-Hefte/FVLR_Heft_10.pdf, Stand: 01.10.2013
- [VNG-2013] <http://www.fachtagung-mitgas.de/uploads/media/Strahlungsheizungvng2008.pdf>, Stand: 01.10.2013
- [Web-2012] Weber, J.: Logistikleistungen. In: Klaus, P.;Krieger, W.;Krupp, M. (Hrsg.): Gabler Lexikon Logistik: Management logistischer Netzwerke und Flüsse. Gabler, Wiesbaden: 2012.
- [WEF-2009] Worl Economic Forum: Supply Chain Decarbonization - The role of logistics and transport in reducing supply chain carbon emissions, 2009. url: http://www3.weforum.org/docs/WEF_LT_SupplyChainDecarbonization_Report_2009.pdf (Download am 08.04.2013)
- [Win-2010] Winkler, S.: Energieeffizienz von Verpackungsanlagen - Einflussmöglichkeiten durch intelligente Automatisierungstechnik. Rexroth Discover Day, München, 2010

- [Wru-2011] Wrusch, J.: Energierückgewinnung - Intralogistik ohne Energieverbrauch?, 2011.
url:
http://live.easyfairs.com/fileadmin/groups/9/VERPACKUNG_LuS_Nord/2011_Dokumente_und_Downloads/STILL%20Vortrag%20Easyfairs%202011.pdf (Download am 28.01.2013)
- [ZUB-2010] Klauß, S. Entwicklung einer Datenbank mit Modellgebäuden für energiebezogene Untersuchungen, insbesondere der Wirtschaftlichkeit, Zentrum für Umweltbewusstes Bauen e.V., Kassel, 2010
- [ZUB-2012] Zentrum für Umweltbewusstes Bauen e.V.: ZUB Helena 2012 Ultra v6.2

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Entwicklung von Handlungsempfehlungen für CO ₂ -neutrale Logistikzentren durch ganzheitliche Betrachtung der Intralogistik in Verbindung mit der Haustechnik, der Gebäudehülle und regenerativer Energiebereitstellung.....	5
Abbildung 3.1: Vorgehensmodell der Logistiksystemplanung (links) und die neun Planungsschritte nach der HOAI (rechts) [Gün-2013a] [BJV-2013].....	10
Abbildung 3.2: Kategorisierungsansätze von Logistikimmobilien [Neh-2012]	10
Abbildung 3.3: Optimale Kombination von Umrichter, Motor, Getriebe und Mechanik [Win-2010]	13
Abbildung 3.4: HyLOG Projekt der Firma Fronius International GmbH [Fro-2010].....	14
Abbildung 3.5: Energierückspeisung bei einem Regalbediengerät [Via-2010].....	14
Abbildung 3.6: Energieaustausch bei einem Regalbediengerät [Via-2010].....	14
Abbildung 3.7: Einflussgrößen bei der Bilanzierung des Primärenergiebedarfs [Hau-2009a].....	15
Abbildung 3.8: Anteile erneuerbarer Energien gemäß EEWärmeG [Hau-2009b]	16
Abbildung 4.1: Integrales Planungsvorgehen für energieeffiziente Logistikzentren mit Anwendung des Planungstools in der Grobplanungsphase	18
Abbildung 4.2: Übersicht zur baulichen Ausführung der besichtigten Logistikzentren (Bildquelle: google maps).....	19
Abbildung 4.3: Startseite der Online-Umfrage.....	20
Abbildung 4.4: Anforderungen des Lagerguts an das Logistikzentrum (Frage: Unterliegt Ihr Lagergut besonderen Anforderungen? (Mehrfachantworten möglich)).....	20
Abbildung 4.5: Art der Handhabung der Güter nach ihren Anforderungen an das Logistikzentrum (Frage: Wie hoch ist der Grad der Automatisierung in Ihrem Logistikzentrum? / Unterliegt Ihr Lagergut besonderen Anforderungen? (Mehrfachantworten möglich)	21
Abbildung 4.6: Gründe und Hemmnisse für nicht eingeführte Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz (Frage: Welche Herausforderungen oder Hindernisse sehen Sie bei der Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen, sodass keine durchgeführt wurden? (Mehrfachnennung möglich))	21
Abbildung 4.7 Auslöser und Ziele für eingeführte Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz (Frage: Was waren die Auslöser bzw. welche Ziele wurden mit den Maßnahmen verfolgt? (Mehrfachnennung möglich)).....	21
Abbildung 4.8: Eingesetzte Techniken und Systeme im Logistikzentrum bei den Umfrageteilnehmern gegliedert nach den zu erfüllenden Funktionen (Mehrfachnennungen möglich).....	22
Abbildung 4.9: Bereitstellung von Wärmeenergie im Logistikzentrum (Frage: Wenn Wärmebedarf im Logistikzentrum besteht, wie wird die Wärme erzeugt? (Mehrfachnennung möglich))	22
Abbildung 4.10: Eingesetztes Heizsystem im Logistikzentrum (Frage: Welches Heizsystem wird für die Logistikflächen eingesetzt? (Mehrfachnennung möglich)).....	22
Abbildung 4.11: Übersicht der identifizierten Klassen mit den zugehörigen Grundelemente	23
Abbildung 4.12: Kombinationsmöglichkeiten der Temperaturniveaus mit den Untersuchungsmodellen und der Grundelemente der Bereiche Intralogistik, Gebäudetechnik und Gebäudehülle.....	24

Abbildung 4.13: Außenansicht der manuellen Lagerhalle	25
Abbildung 4.14: Innenansicht der manuellen Lagerhalle	25
Abbildung 4.15: Außenansicht des halbautomatischen Logistikzentrums (Süd-West Ansicht)	26
Abbildung 4.16: Innenansicht des halbautomatischen Logistikzentrums	26
Abbildung 4.17: Außenansicht des vollautomatischen Distributionszentrums (Süd-West Ansicht).....	27
Abbildung 4.18: Innenansicht des vollautomatischen Distributionszentrums	27
Abbildung 4.19: Vergleich des spezifischen Nutzenergiebedarfs der Heizung mit dem dynamischen Simulationsprogramm IDA ICE und dem verwendeten Monatsbilanzverfahren in ZUB Helena	29
Abbildung 5.1: Vergleich der CO ₂ -Emissionen der manuellen Lagerhalle bei unterschiedlichen Varianten des Niederhubwagens.....	36
Abbildung 5.2: Zusätzliche Investitionen für die unterschiedlichen Varianten des Niederhubwagens im manuellen Lager	36
Abbildung 5.3: Vergleich der CO ₂ -Emissionen des halbautomatischen Logistikzentrums bei unterschiedlichen Varianten des Hochhubwagens	36
Abbildung 5.4: Zusätzliche Investitionen für die unterschiedlichen Varianten des Hochhubwagens im halbautomatischen Logistikzentrum.....	36
Abbildung 5.5: Vergleich der CO ₂ -Emissionen des vollautomatischen Distributionszentrums bei unterschiedlichen Varianten des Deichselhubwagens	37
Abbildung 5.6: Zusätzliche Investitionen für die unterschiedlichen Varianten des Deichselhubwagens im vollautomatischen Distributionszentrum.....	37
Abbildung 5.7: Vergleich der CO ₂ -Emissionen des halbautomatischen Logistikzentrums bei unterschiedlicher Betriebsweise der GLT-Ketten- und Rollenförderer	38
Abbildung 5.8: Vergleich der CO ₂ -Emissionen des vollautomatischen Distributionszentrums bei unterschiedlicher Betriebsweise der GLT-Ketten- und Rollenförderer	38
Abbildung 5.9: Vergleich der CO ₂ -Emissionen der manuellen Lagerhalle bei unterschiedlichen Varianten des Schubmaststaplers.....	39
Abbildung 5.10: Zusätzliche Investitionen der unterschiedlichen Varianten des Schubmaststaplers in der manuellen Lagerhalle	40
Abbildung 5.11: Vergleich der CO ₂ -Emissionen des halbautomatischen Logistikzentrums 17 °C mit und ohne Rückspeiseeinheit an den RBG des automatischen HRL.....	41
Abbildung 5.12: Vergleich der CO ₂ -Emissionen des vollautomatischen Distributionszentrums 17 °C mit und ohne Rückspeiseeinheit an den RBG des automatischen HRL.....	41
Abbildung 5.13: Vergleich der CO ₂ -Emissionen des halbautomatischen Logistikzentrums 6 °C mit und ohne Rückspeiseeinheit an den RBG des automatischen HRL.....	41
Abbildung 5.14: Zusätzliche Investitionen der unterschiedlichen Varianten, ohne und mit Energierückspeisung am RBG, des automatischen HRL beim halbautomatischen Logistikzentrum.....	41
Abbildung 5.15: Vergleich der CO ₂ -Emissionen des vollautomatischen Distributionszentrums, 17 °C, mit und ohne Rückspeiseeinheit an den RBG des AKL.....	41
Abbildung 5.16: Zusätzliche Investitionen der unterschiedlichen Varianten, ohne und mit Energierückspeisung am RBG, des AKL beim vollautomatischen Distributionszentrum.....	42
Abbildung 5.17: Vergleich der CO ₂ -Emissionen des halbautomatischen Logistikzentrums, 17 °C, bei unterschiedlichen Varianten des Horizontalkommissionierers	42

Abbildung 5.18: Zusätzliche Investitionen der unterschiedlichen Varianten des Horizontalkommissionierers beim halbautomatischen Logistikzentrum	42
Abbildung 5.19: Vergleich der CO ₂ -Emissionen des vollautomatischen Distributionszentrums 17 °C bei unterschiedlichen Varianten des Depalettier-Roboters	43
Abbildung 5.20: Vergleich der CO ₂ -Emissionen der manuellen Lagerhalle, 17 °C, bei Standardausführung der Intralogistik mit optimierter Intralogistik.....	44
Abbildung 5.21: Vergleich der CO ₂ -Emissionen der manuellen Lagerhalle, 6 °C, bei Standardausführung der Intralogistik mit optimierter Intralogistik.....	44
Abbildung 5.22: Zusätzliche Investitionen für die optimierte Intralogistik der manuellen Lagerhalle ...	44
Abbildung 5.23: Vergleich der CO ₂ -Emissionen des halbautomatischen Logistikzentrum 17 °C bei Standardausführung der Intralogistik mit optimierter Intralogistik.....	45
Abbildung 5.24: Vergleich der CO ₂ -Emissionen des halbautomatischen Logistikzentrum 6 °C bei Standardausführung der Intralogistik mit optimierter Intralogistik.....	45
Abbildung 5.25: Zusätzliche Investitionen für die optimierte Intralogistik des halbautomatischen Logistikzentrum	45
Abbildung 5.26: Vergleich der CO ₂ -Emissionen des vollautomatischen Distributionszentrums, 17 °C, bei Standardausführung der Intralogistik mit optimierter Intralogistik.....	45
Abbildung 5.27: Vergleich der CO ₂ -Emissionen des vollautomatischen Distributionszentrums, 6 °C, bei Standardausführung der Intralogistik mit optimierter Intralogistik.....	45
Abbildung 5.28: Zusätzliche Investitionen für die optimierte Intralogistik des vollautomatischen Distributionszentrums.....	45
Abbildung 5.29: Vergleich der CO ₂ -Emissionen in kg/m ³ a für den Heizfall 17 °C der drei Untersuchungsmodelle mit und ohne optimierter Intralogistik	45
Abbildung 5.30: Vergleich der CO ₂ -Emissionen in kg/m ³ a für den Kühlfall 6 °C der drei Untersuchungsmodelle mit und ohne optimierter Intralogistik	46
Abbildung 5.31: Vergleich der CO ₂ -Emissionen der manuellen Lagerhalle, 17 °C, bei unterschiedlichen Dämmstandards	47
Abbildung 5.32: Zusätzliche Investitionen der unterschiedlichen Dämmstandards bei der manuellen Lagerhalle.....	47
Abbildung 5.33: Vergleich der CO ₂ -Emissionen des halbautomatischen Logistikzentrums, 17 °C, bei unterschiedlichen Dämmstandards.....	47
Abbildung 5.34: Vergleich der CO ₂ -Emissionen des halbautomatischen Logistikzentrums, 6 °C, bei unterschiedlichen Dämmstandards.....	48
Abbildung 5.35: Vergleich der CO ₂ -Emissionen des vollautomatischen Distributionszentrums, 17 °C, bei unterschiedlichen Dämmstandards	48
Abbildung 5.36: Zusätzliche Investitionen der unterschiedlichen Dämmstandards beim vollautomatischen Distributionszentrum	48
Abbildung 5.37: Vergleich der CO ₂ -Emissionen der manuellen Lagerhalle, 17 °C, bei länglicher Kubatur	49
Abbildung 5.38: Vergleich der CO ₂ -Emissionen der manuellen Lagerhalle, 17 °C, bei unterschiedlichen Fassadenfenstern	50
Abbildung 5.39: Zusätzliche Investitionen der unterschiedlichen Fassadenfenstervarianten bei der manuellen Lagerhalle, 17 °C	51
Abbildung 5.40: Vergleich der CO ₂ -Emissionen des halbautomatischen Logistikzentrums, 17 °C, bei unterschiedlichen Fassadenfenstern.....	51

Abbildung 5.41: Vergleich der CO ₂ -Emissionen des vollautomatischen Distributionszentrums, 17 °C, bei unterschiedlichen Fassadenfenstern	52
Abbildung 5.42: Vergleich der CO ₂ -Emissionen der manuellen Lagerhalle, 17 °C, bei unterschiedlichem Dachfensteranteil	53
Abbildung 5.43: Vergleich der CO ₂ -Emissionen des halbautomatischen Logistikzentrums, 6 °C, bei unterschiedlichem Dachfensteranteil	54
Abbildung 5.44: Vergleich der CO ₂ -Emissionen des vollautomatischen Distributionszentrums, 17 °C, bei unterschiedlichem Dachfensteranteil	54
Abbildung 5.45: Vergleich der CO ₂ -Emissionen der manuellen Lagerhalle, 17 °C, mit und ohne Vorsatzschleuse	55
Abbildung 5.46: Vergleich der CO ₂ -Emissionen des halbautomatischen Logistikzentrums, 17 °C, mit und ohne Vorsatzschleuse	55
Abbildung 5.47: Vergleich der CO ₂ -Emissionen des vollautomatischen Distributionszentrums, 17 °C, mit und ohne Vorsatzschleuse	55
Abbildung 5.48: Grafische Darstellung der Zonierungsbereiche für die Präsenzsteuerung in der manuellen Lagerhalle	56
Abbildung 5.49: Vergleich der CO ₂ -Emissionen der manuellen Lagerhalle, 17 °C, bei einer Beleuchtungszonierung mit Bewegungssteuerung	56
Abbildung 5.50: Vergleich der CO ₂ -Emissionen der manuellen Lagerhalle, 17 °C, bei unterschiedlichen Lüftungsstrategien	57
Abbildung 5.51: Vergleich der CO ₂ -Emissionen der manuellen Lagerhalle, 17 °C, bei unterschiedlichen Wärmeerzeugungs- und Übergabesystemen	58
Abbildung 5.52: Vergleich von Nutz-, End- und Primärenergiebedarf der manuellen Lagerhalle ohne Intralogistik, 17 °C, bei unterschiedlichen Wärmeübergabesystemen	59
Abbildung 5.53: Vergleich der CO ₂ -Emissionen des halbautomatischen Logistikzentrums, 17 °C, bei unterschiedlichen Wärmeerzeugungs- und Übergabesystemen	59
Abbildung 5.54: Vergleich der CO ₂ -Emissionen des vollautomatischen Distributionszentrums, 17 °C, bei unterschiedlichen Wärmeerzeugungs- und Übergabesystemen	60
Abbildung 5.55: Vergleich der CO ₂ -Emissionen der manuellen Lagerhalle, 6 °C, bei unterschiedlichen Kälteerzeugungssystemen	61
Abbildung 5.56: Vergleich der CO ₂ -Emissionen des halbautomatischen Logistikzentrums, 6 °C, bei unterschiedlichen Kälteerzeugungssystemen	61
Abbildung 5.57: Vergleich der CO ₂ -Emissionen des vollautomatischen Distributionszentrums, 6 °C, bei unterschiedlichen Kälteerzeugungssystemen	61
Abbildung 5.58: Vergleich des konditionierten Volumens der drei untersuchten Typologien	61
Abbildung 5.59: Verschattungszone bei Flachdächern	62
Abbildung 5.60: Monatliche CO ₂ -Emissionen und CO ₂ -Einsparungen für Strom in der manuellen Lagerhalle	63
Abbildung 5.61: Vergleich der CO ₂ -Einsparungen des halbautomatischen Logistikzentrum mit Photovoltaikanlage	63
Abbildung 5.62: Vergleich der CO ₂ -Einsparungen des halbautomatischen Logistikzentrums mit Photovoltaikanlage	63
Abbildung 5.63: Vergleich der CO ₂ -Einsparungen des vollautomatischen Distributionszentrums mit Photovoltaikanlage	64
Abbildung 6.1: Energiebilanz manuelle Lagerhalle 17 °C Grundmodell: Energieflussbild aller bilanzierten Energieträger	66

Abbildung 6.2: Energiebilanz manuelle Lagerhalle 17 °C optimierte Variante: Energieflussbild aller bilanzierten Energieträger.....	67
Abbildung 6.3: Vergleich der CO ₂ -Emissionen der manuellen Lagerhalle, 17 °C, im Grundmodell und der optimierten Variante.....	69
Abbildung 6.4: Vergleich der Investitionen der manuellen Lagerhalle, 17 °C, im Grundmodell und der optimierten Variante	69
Abbildung 6.5: Vergleich der CO ₂ -Emissionen der manuellen Lagerhalle, 12 °C, im Grundmodell und der optimierten Variante.....	69
Abbildung 6.6: : Vergleich der Investitionen der manuellen Lagerhalle, 12 °C, im Grundmodell und der optimierten Variante.....	69
Abbildung 6.7: Vergleich der CO ₂ -Emissionen der manuellen Lagerhalle, 6 °C, im Grundmodell und der optimierten Variante.....	69
Abbildung 6.8: Vergleich der Investitionen der manuellen Lagerhalle, 6 °C, im Grundmodell und der optimierten Variante	69
Abbildung 6.9: Vergleich der CO ₂ -Emissionen der einzelnen Maßnahmen und in der Kombination aller optimierten und wirtschaftlich vertretbaren Varianten von Grundelementen in der manuellen Lagerhalle bei 17 °C, 12 °C und 6 °C	70
Abbildung 6.10: Energiebilanz halbautomatisches Logistikzentrum 6 °C Grundmodell: Energieflussbild aller bilanzierten Energieträger	72
Abbildung 6.11: Energiebilanz halbautomatisches Logistikzentrum 6 °C optimierte Variante: Energieflussbild aller bilanzierten Energieträger	73
Abbildung 6.12: Vergleich der CO ₂ -Emissionen des halbautomatischen Logistikzentrums, 17 °C, im Grundmodell und der optimierten Variante	74
Abbildung 6.13: Vergleich der Investitionen des halbautomatischen Logistikzentrums, 17 °C, im Grundmodell und der optimierten Variante.....	74
Abbildung 6.14: Vergleich der CO ₂ -Emissionen des halbautomatischen Logistikzentrums, 12 °C, im Grundmodell und der optimierten Variante	74
Abbildung 6.15: Vergleich der Investitionen des halbautomatischen Logistikzentrums, 12 °C, im Grundmodell und der optimierten Variante.....	74
Abbildung 6.16: : Vergleich der CO ₂ -Emissionen des halbautomatischen Logistikzentrums, 6 °C, im Grundmodell und der optimierten Variante	74
Abbildung 6.17: Vergleich der Investitionen des halbautomatischen Logistikzentrums, 6 °C, im Grundmodell und der optimierten Variante.....	75
Abbildung 6.18: Vergleich der CO ₂ -Emissionen der einzelnen Maßnahmen und in der Kombination im halbautomatischen Logistikzentrum bei 17 °C, 12 °C und 6 °C.....	75
Abbildung 6.19: Energiebilanz vollautomatisches Distributionszentrum 12 °C Grundmodell: Energieflussbild aller bilanzierten Energieträger	77
Abbildung 6.20: Energiebilanz vollautomatisches Distributionszentrum 12 °C optimierte Variante: Energieflussbild aller bilanzierten Energieträger	78
Abbildung 6.21: Vergleich der CO ₂ -Emissionen des vollautomatischen Distributionszentrums, 17 °C, im Grundmodell und der optimierten Variante	79
Abbildung 6.22: Vergleich der Investitionen des vollautomatischen Distributionszentrums, 17 °C, im Grundmodell und der optimierten Variante	79
Abbildung 6.23: Vergleich der CO ₂ -Emissionen des vollautomatischen Distributionszentrums, 12 °C, im Grundmodell und der optimierten Variante.....	79

Abbildung 6.24: Vergleich der Investitionen des vollautomatischen Distributionszentrums, 12 °C,, im Grundmodell und der optimierten Variante	79
Abbildung 6.25: Vergleich der CO ₂ -Emissionen des vollautomatischen Distributionszentrums, 6 °C, im Grundmodell und der optimierten Variante	79
Abbildung 6.26: Vergleich der Investitionen des vollautomatischen Distributionszentrums, 6 °C, im Grundmodell und der optimierten Variante	79
Abbildung 6.27: Vergleich der CO ₂ -Emissionen der einzelnen Maßnahmen und in der Kombination im vollautomatischen Distributionszentrum bei 17 °C, 12 °C und 6 °C	80
Abbildung 7.1: Startbildschirm des Planungstools	81
Abbildung 7.2: : Darstellung des Excel-Tools für die Auswahl der Typologie mit den jeweiligen Energiebilanzen und Grundparametern.....	81
Abbildung 7.3: Darstellung des Excel-Tools nach Auswahl eines Grundelements anhand des Beispiels Flurförderzeuge	82
Abbildung A.1: G1 manuelle Lagerhalle 17 °C Grundmodell: Energieflussbild aller bilanzierten Energieträger	A-2
Abbildung A.2: G1 manuelle Lagerhalle 17 °C optimierte Variante: Energieflussbild aller bilanzierten Energieträger	A-3
Abbildung A.3: G1 manuelle Lagerhalle 12 °C Grundmodell: Energieflussbild aller bilanzierten Energieträger	A-4
Abbildung A.4: G1 manuelle Lagerhalle 12 °C optimierte Variante: Energieflussbild aller bilanzierten Energieträger	A-5
Abbildung A.5: G1 manuelle Lagerhalle 6 °C Grundmodell: Energieflussbild aller bilanzierten Energieträger	A-6
Abbildung A.6: G1 manuelle Lagerhalle 6 °C optimierte Variante: Energieflussbild aller bilanzierten Energieträger	A-7
Abbildung A.7: G2 halbautomatisches Logistikzentrum 17 °C Grundmodell: Energieflussbild aller bilanzierten Energieträger	A-8
Abbildung A.8: G2 halbautomatisches Logistikzentrum 17 °C optimierte Variante: Energieflussbild aller bilanzierten Energieträger.....	A-9
Abbildung A.9: G2 halbautomatisches Logistikzentrum 12 °C Grundmodell: Energieflussbild aller bilanzierten Energieträger	A-10
Abbildung A.10: G2 halbautomatisches Logistikzentrum 12 °C optimierte Variante: Energieflussbild aller bilanzierten Energieträger.....	A-11
Abbildung A.11: G2 halbautomatisches Logistikzentrum 6 °C Grundmodell: Energieflussbild aller bilanzierten Energieträger	A-12
Abbildung A.12: G2 halbautomatisches Logistikzentrum 6 °C optimierte Variante: Energieflussbild aller bilanzierten Energieträger.....	A-13
Abbildung A.13: G3 vollautomatisches Distributionszentrum 17 °C Grundmodell: Energieflussbild aller bilanzierten Energieträger	A-14
Abbildung A.14: G3 vollautomatisches Distributionszentrum 17 °C optimierte Variante: Energieflussbild aller bilanzierten Energieträger.....	A-15
Abbildung A.15: G3 vollautomatisches Distributionszentrum 12 °C Grundmodell: Energieflussbild aller bilanzierten Energieträger	A-16

Abbildung A.16: G3 vollautomatisches Distributionszentrum 12 °C optimierte Variante:
Energieflussbild aller bilanzierten Energieträger A-17

Abbildung A.17: G3 vollautomatisches Distributionszentrum 6 °C Grundmodell: Energieflussbild
aller bilanzierten Energieträger A-18

Abbildung A.18: G3 vollautomatisches Distributionszentrum 6 °C optimierte Variante:
Energieflussbild aller bilanzierten Energieträger A-19

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4.1: Innenraum-Solltemperaturen in den verschiedenen Gebäudebereichen	24
Tabelle 4.2: Spezifische Randbedingungen aller Untersuchungsmodelle für die CO ₂ - Emissionsberechnungen	25
Tabelle 4.3: Spezifische Parameter der manuellen Lagerhalle für die CO ₂ - Emissionsberechnungen	26
Tabelle 4.4: Spezifische Parameter des halbautomatischen Logistikzentrums für die CO ₂ - Emissionsberechnungen	27
Tabelle 4.5: spezifische Parameter des vollautomatischen Distributionszentrums für die CO ₂ - Emissionsberechnungen	28
Tabelle 4.6: ermittelter Außenluftvolumenstrom durch nutzungsbedingte Toröffnungen der untersuchten Typologien und Temperaturniveaus.....	31
Tabelle 4.7: Kategorisierung und Bemessungswerte q ₅₀ für Hallengebäude [ITG-2011]	32
Tabelle 4.8: CO ₂ -Koeffizienten verwendeter Energieträger	32
Tabelle 4.9: Kosten der verwendeten Energieträger [ct/kWh]	33
Tabelle 5.1: Übersicht der getroffenen Randbedingungen für die Varianten und die Grundmodelle der Flurförderzeuge	35
Tabelle 5.2: Übersicht der Randbedingungen der getroffenen Varianten und der Grundmodelle von Rollen- und Kettenförderern.....	38
Tabelle 5.3: Übersicht der Randbedingungen des Schubmaststaplers im Grundmodell der manuellen Lagerhalle und der gebildeten Varianten	39
Tabelle 5.4: Übersicht der Randbedingungen der Grundelemente automatisches HRL und AKL des halbautomatischen Logistikzentrums und des vollautomatischen Distributionszentrums.....	40
Tabelle 5.5: Übersicht der Randbedingungen der getroffenen Varianten und des Grundmodells von Horizontalkommissionierern des halbautomatischen Logistikzentrums.....	42
Tabelle 5.6: Übersicht der Randbedingungen der getroffenen Variante und des Grundmodells Depalettier-Roboter des vollautomatischen Distributionszentrums	43
Tabelle 5.7: Übersicht der Ergebnisse beim Variieren des Parameters Layout ausgehend vom Grundmodell 17 °C aller Untersuchungsmodelle.....	44
Tabelle 5.8: Übersicht der verschiedenen Varianten mit unterschiedlichen Dämmstandards.....	46
Tabelle 5.9: Übersicht der Randbedingungen der Varianten mit unterschiedlicher Kubatur in der manuellen Lagerhalle.....	49
Tabelle 5.10 Übersicht der verschiedenen Fensterdämmstandards	50
Tabelle 5.11: Übersicht der verschiedenen Varianten mit unterschiedlichem Fensterflächenanteil in der manuellen Lagerhalle	50
Tabelle 5.12: Übersicht der verschiedenen Varianten mit unterschiedlichem Fensterflächenanteil im halbautomatischen Logistikzentrum	51
Tabelle 5.13: Übersicht der verschiedenen Varianten mit unterschiedlichem Fensterflächenanteil im vollautomatischen Distributionszentrum	52
Tabelle 5.14: Übersicht der untersuchten Varianten mit unterschiedlichem Dachfensteranteil.....	52
Tabelle 5.15: Übersicht der verschiedenen Fensterdämmstandards für Lichthaubenverglasung	53

Tabelle 5.16: Lüftungswärmeverluste durch Verladevorgänge der untersuchten Typologien bei 17 °C	54
Tabelle 5.17: Randbedingungen der künstlichen Beleuchtung	56
Tabelle 5.18: Übersicht der untersuchten Wärmeübergabesysteme.....	57
Tabelle 5.19: Überblick der untersuchten Kältesysteme	60
Tabelle 5.20: Einspeisevergütung von PV-Anlagen abhängig von der Leistung, Stand Oktober 2013 [PVw-2013]	62
Tabelle 5.21: Randbedingungen zur Photovoltaikanlage bei der manuellen Lagerhalle	63
Tabelle 5.22: Randbedingungen der Photovoltaikanlage beim halbautomatischen Logistikzentrum	64
Tabelle 5.23: Randbedingungen der Photovoltaikanlage beim vollautomatischen Distributionszentrum.....	64
Tabelle 6.1: Überblick der ausgewählten Grundelemente der optimierten Variante im Vergleich zum Grundmodell für die manuelle Lagerhalle	68
Tabelle 6.2: Überblick der ausgewählten Grundelemente der optimierten Variante im Vergleich zum Grundmodell für das halbautomatische Logistikzentrum.....	71
Tabelle 6.3: Überblick der ausgewählten Grundelemente der optimierten Variante im Vergleich zum Grundmodell für das vollautomatische Distributionszentrum	76

Anhang A Energieflussbilder aller bilanzierten Energieträger der Modelle

Im Folgenden sind die Energieflussbilder aller bilanzierten Energieträger der Untersuchungs- und Temperaturmodelle aufgeführt.

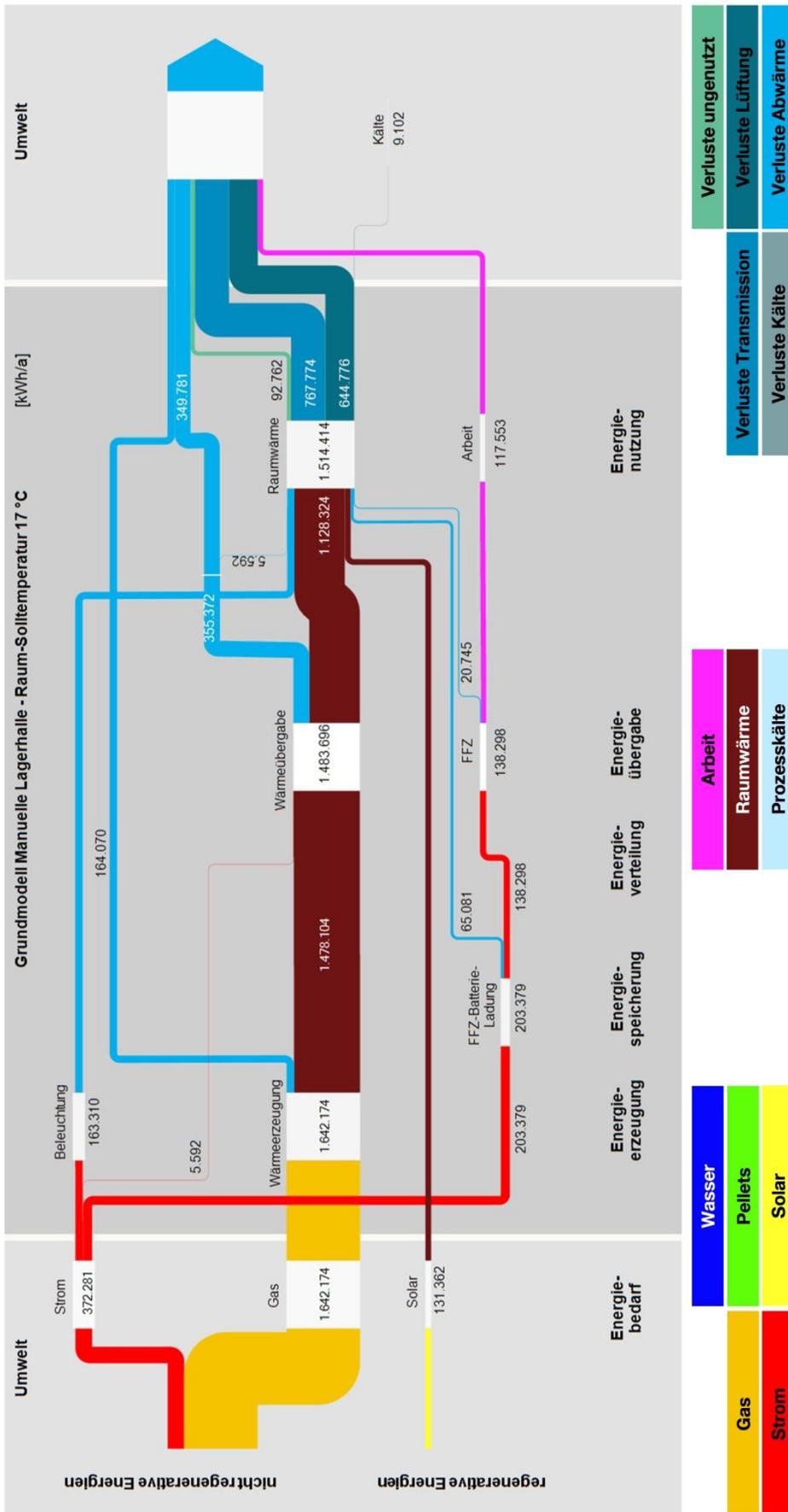


Abbildung A.1: G1 manuelle Lagerhalle 17 °C Grundmodell: Energieflussbild aller bilanzierten Energieträger

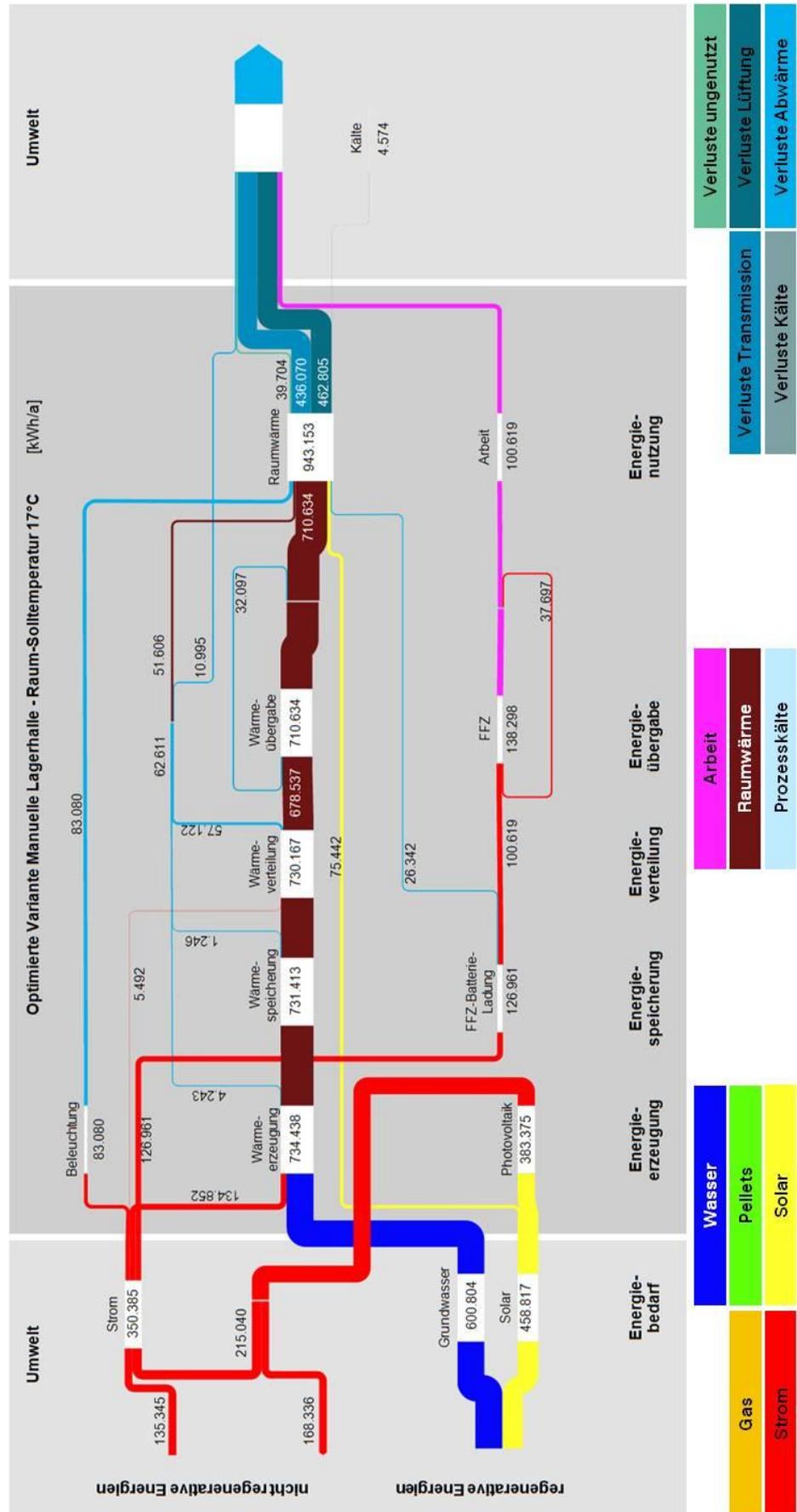


Abbildung A.2: G1 manuelle Lagerhalle 17 °C optimierte Variante: Energieflussbild aller bilanzierten Energieträger

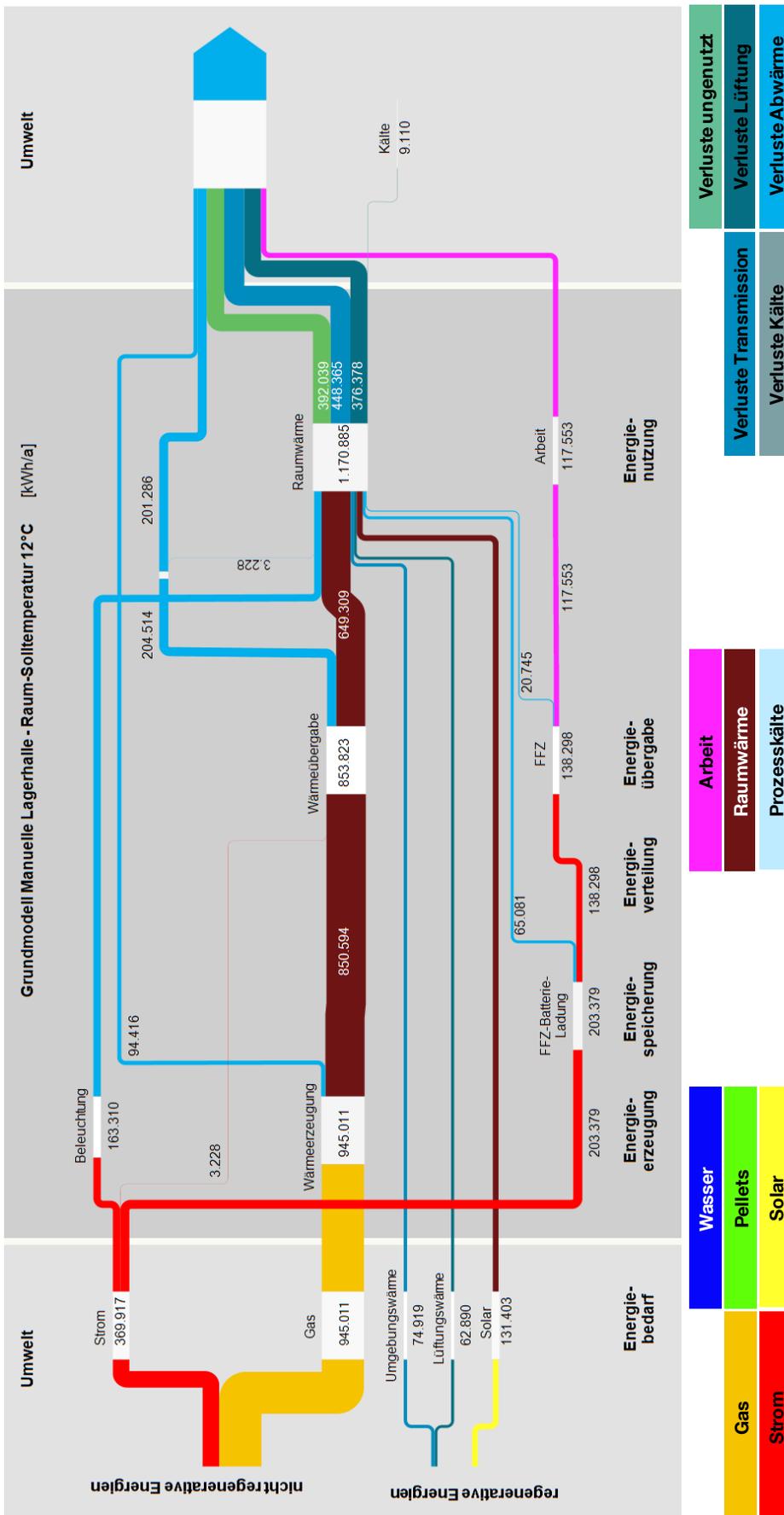


Abbildung A.3: G1 manuelle Lagerhalle 12 °C Grundmodell: Energieflussbild aller bilanzierten Energieträger

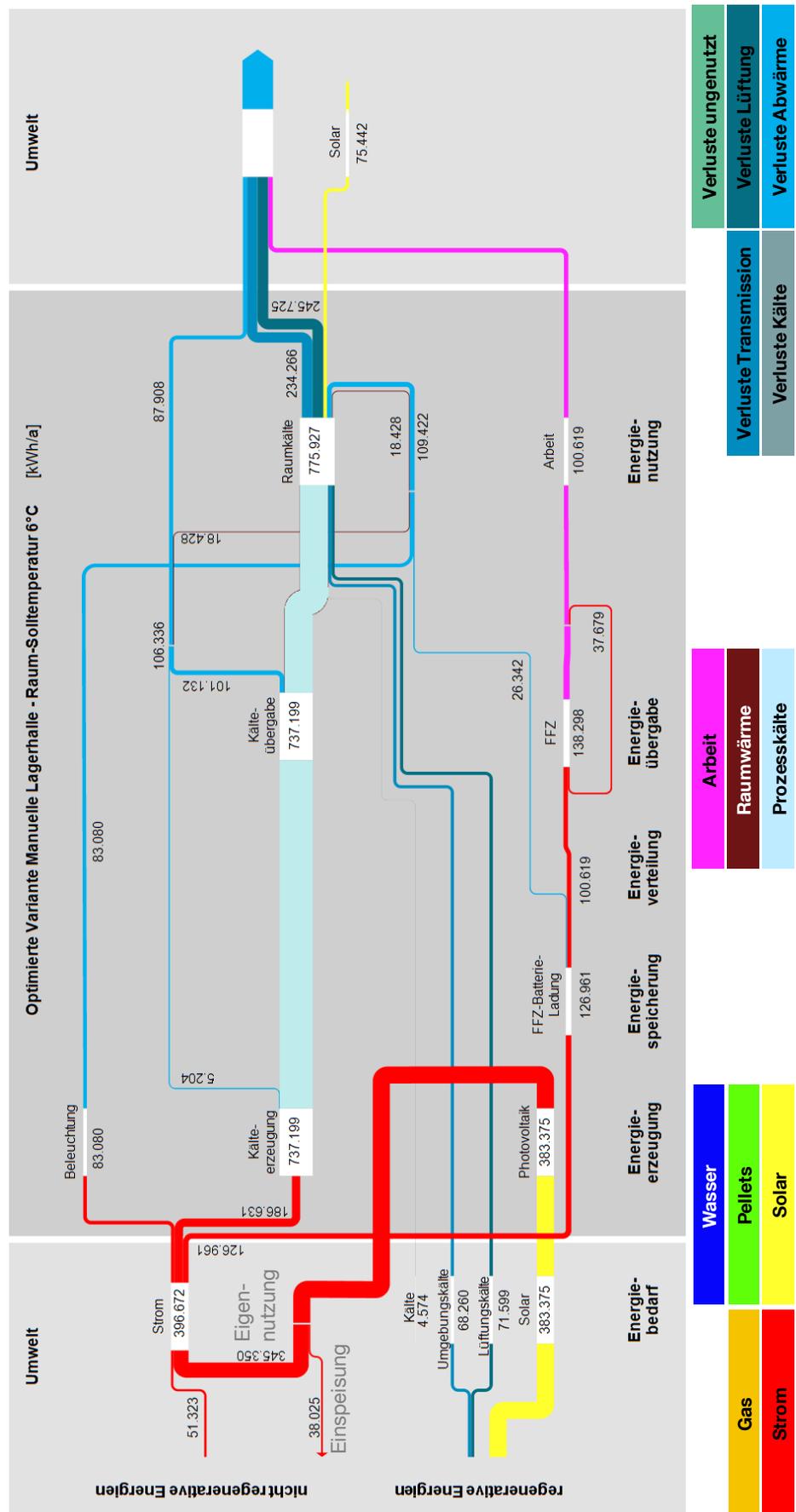


Abbildung A.6: G1 manuelle Lagerhalle 6 °C optimierte Variante: Energieflussbild aller bilanzierten Energieträger

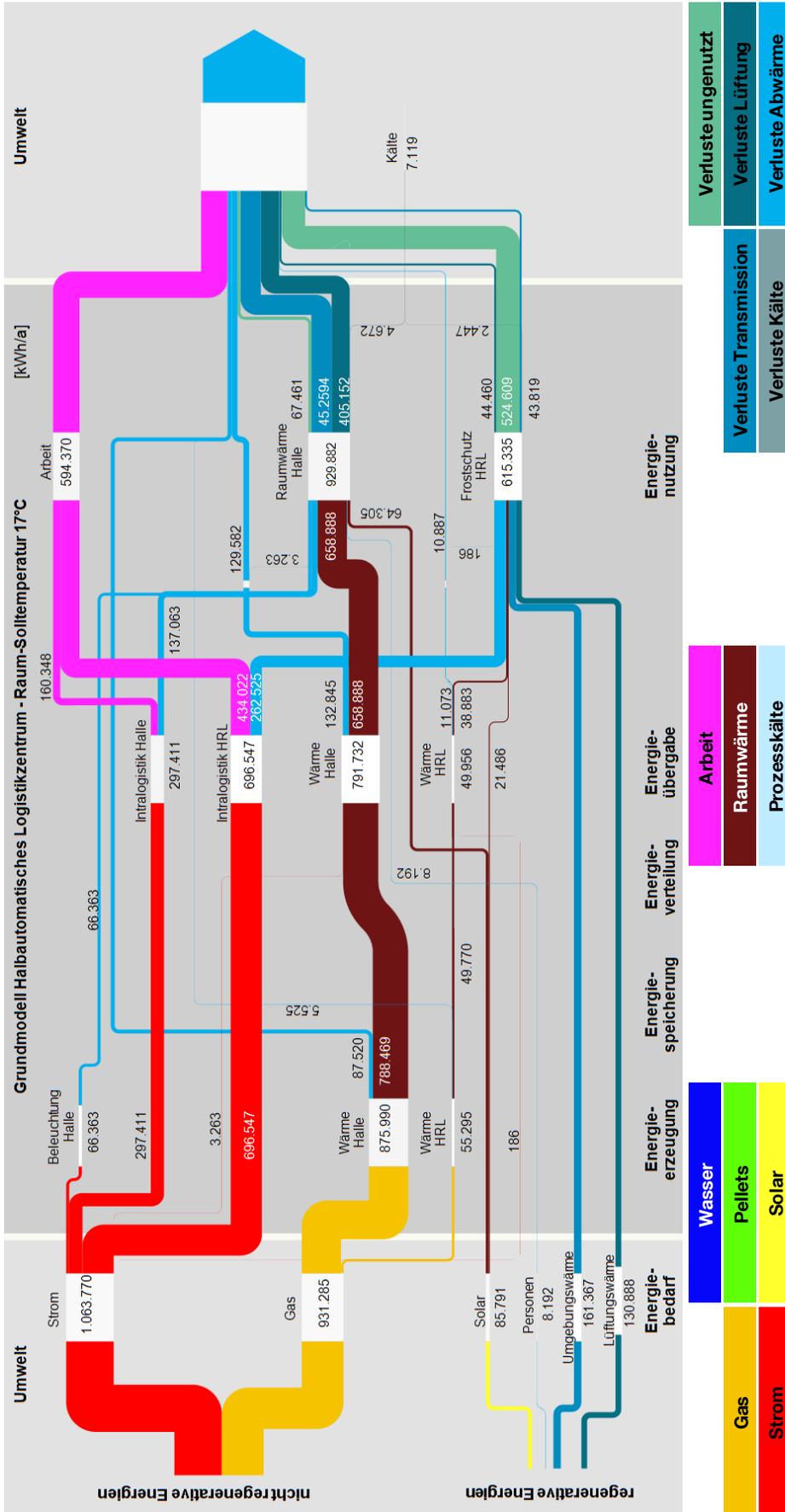


Abbildung A.7: G2 halbautomatisches Logistikzentrum 17 °C Grundmodell: Energieflussbild aller bilanzierten Energieträger

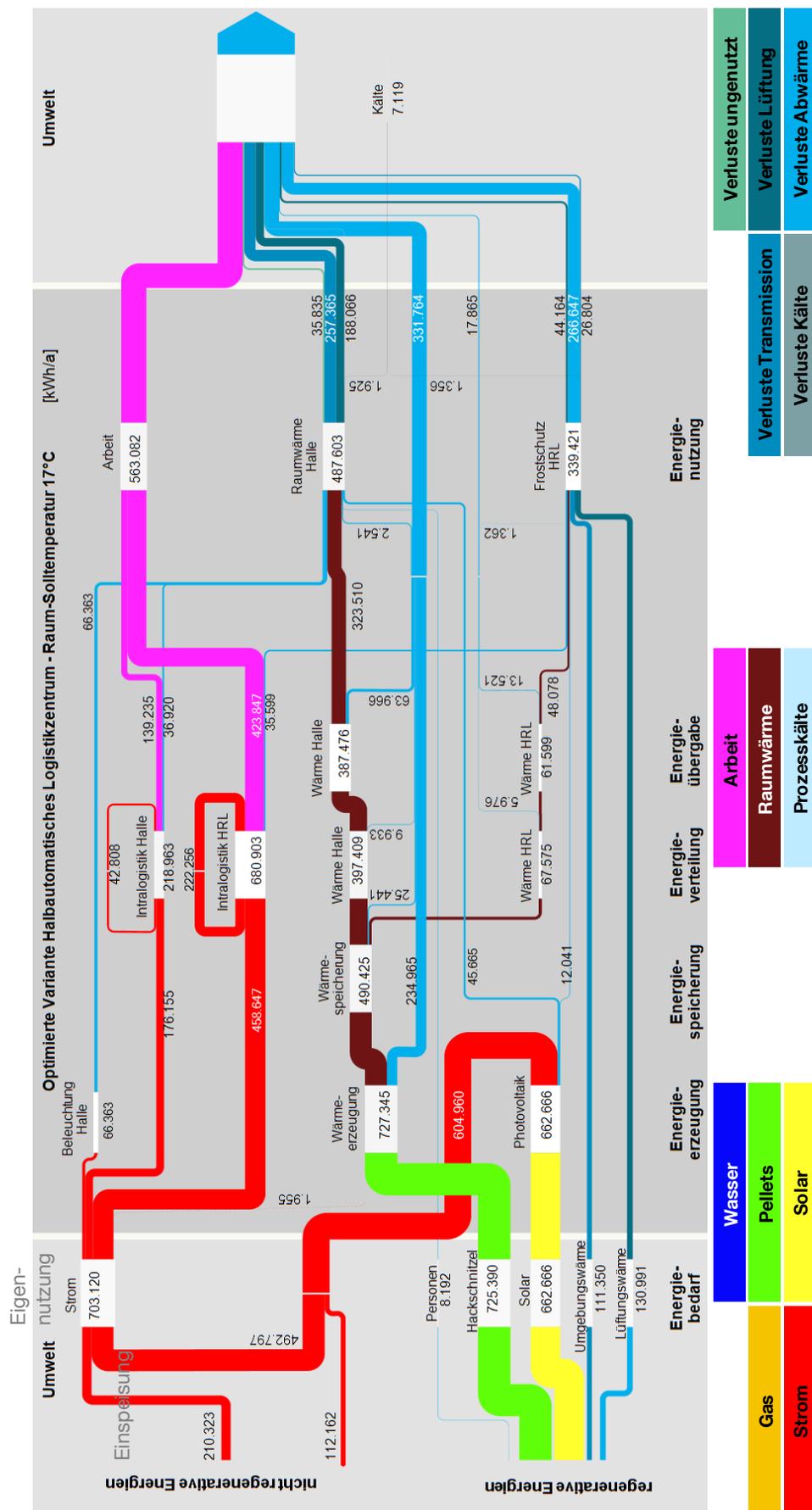


Abbildung A.8: G2 halbautomatisches Logistikzentrum 17 °C optimierte Variante: Energieflussbild aller bilanzierten Energieträger

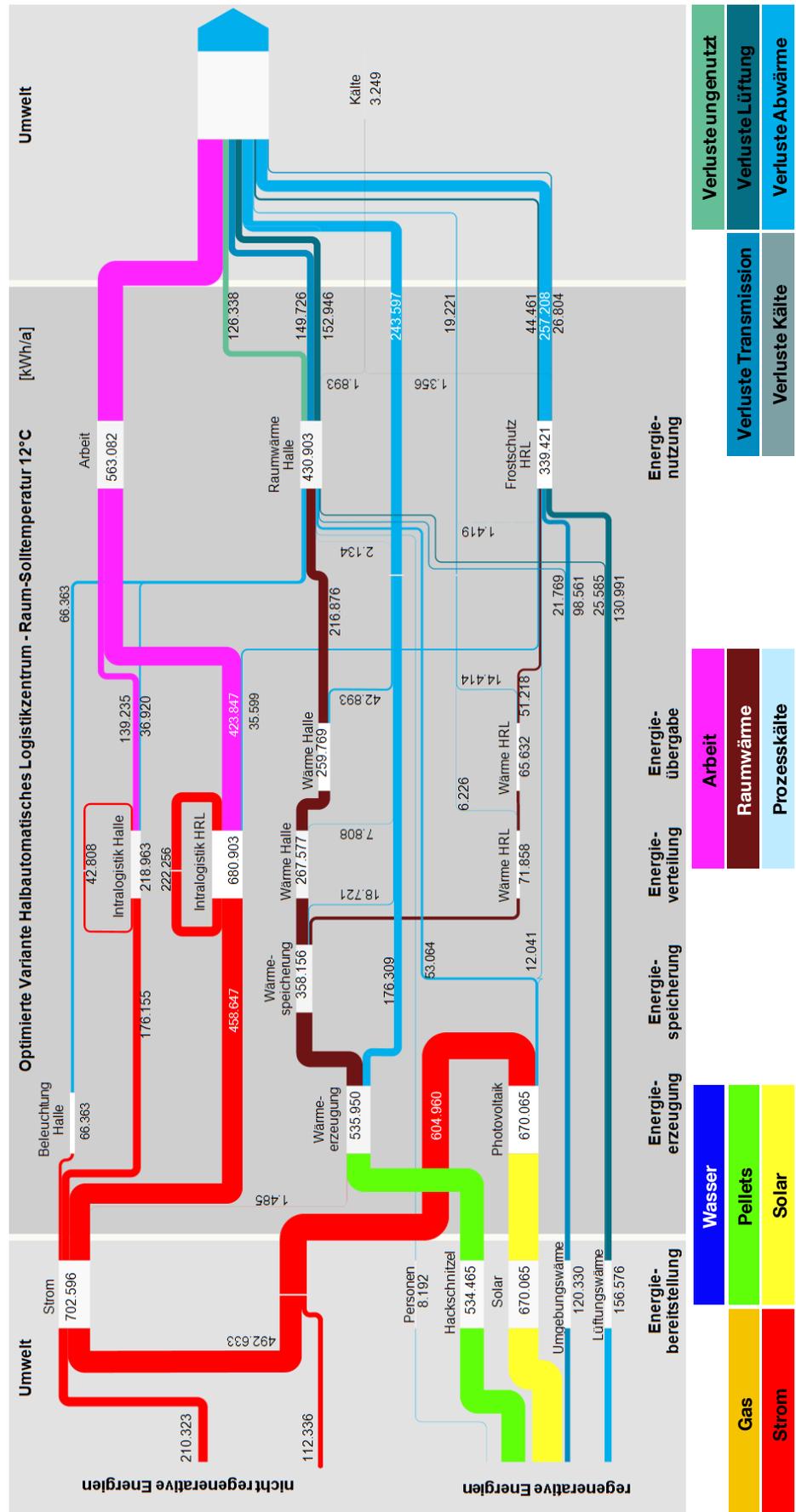


Abbildung A.10: G2 halbautomatisches Logistikzentrum 12 °C optimierte Variante: Energieflussbild aller bilanzierten Energieträger

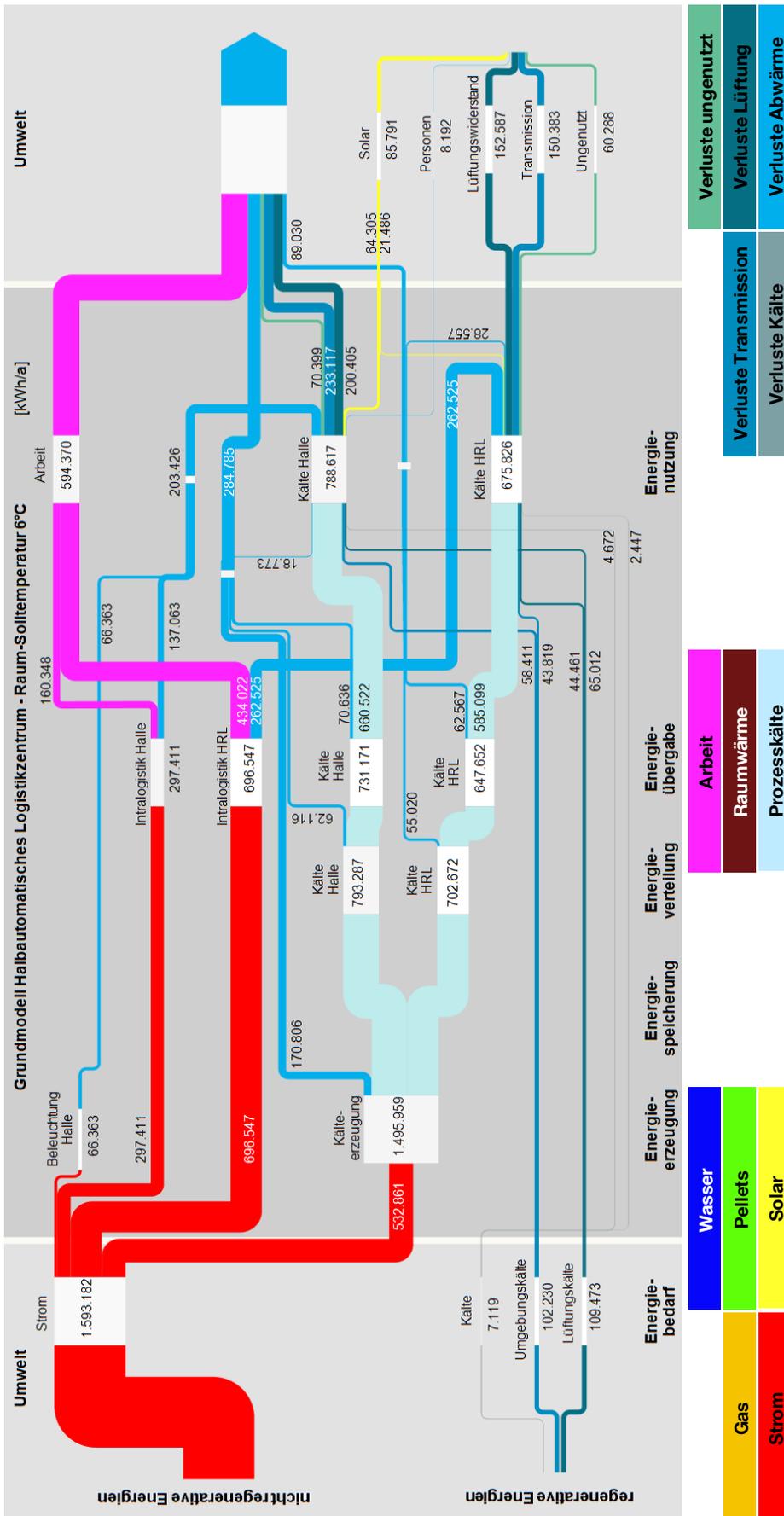


Abbildung A.11: G2 halbautomatisches Logistikzentrum 6 °C Grundmodell: Energieflussbild aller bilanzierten Energieträger

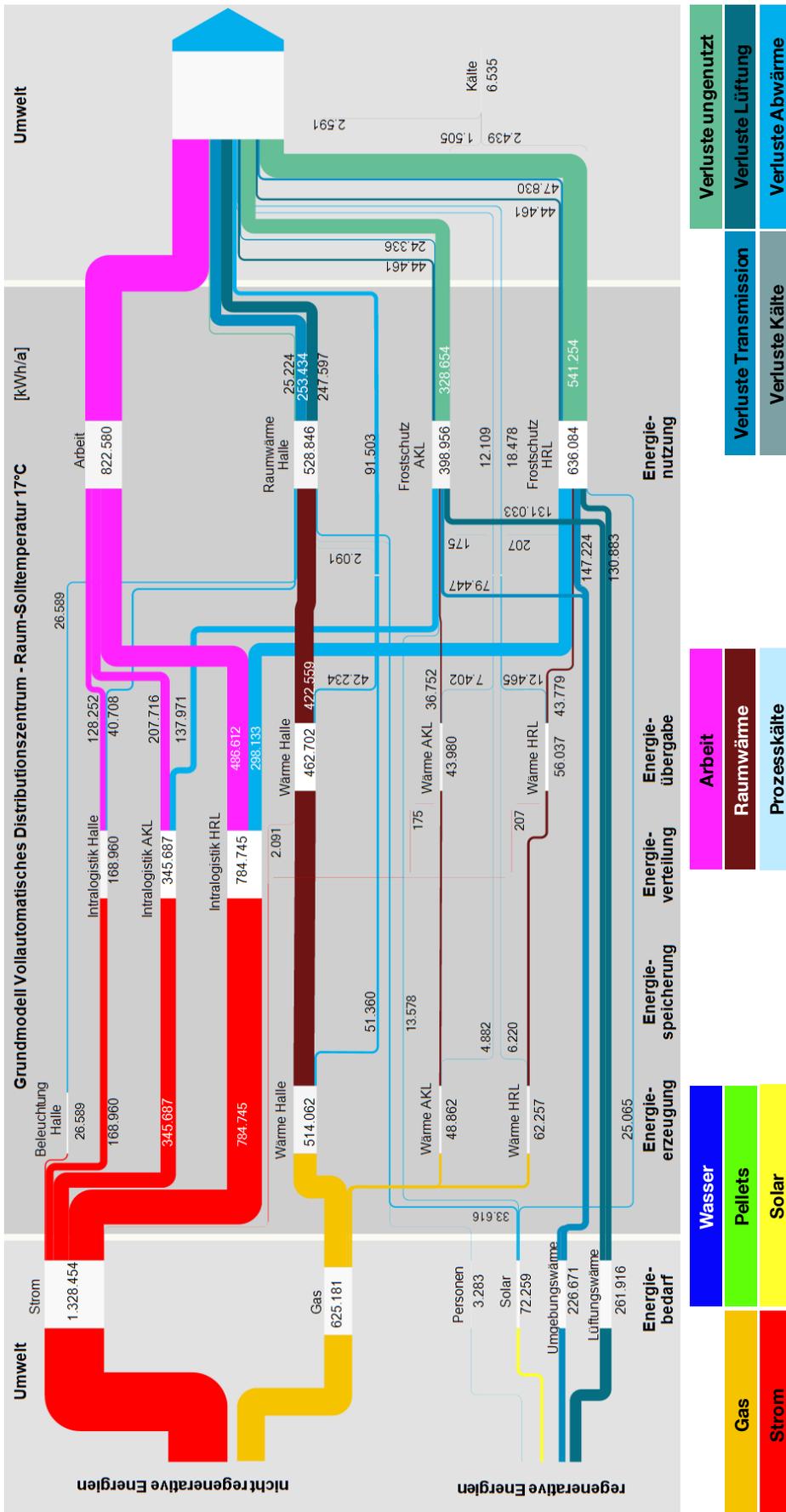


Abbildung A.13: G3 vollautomatisches Distributionszentrum 17 °C Grundmodell: Energieflussbild aller bilanzierten Energieträger

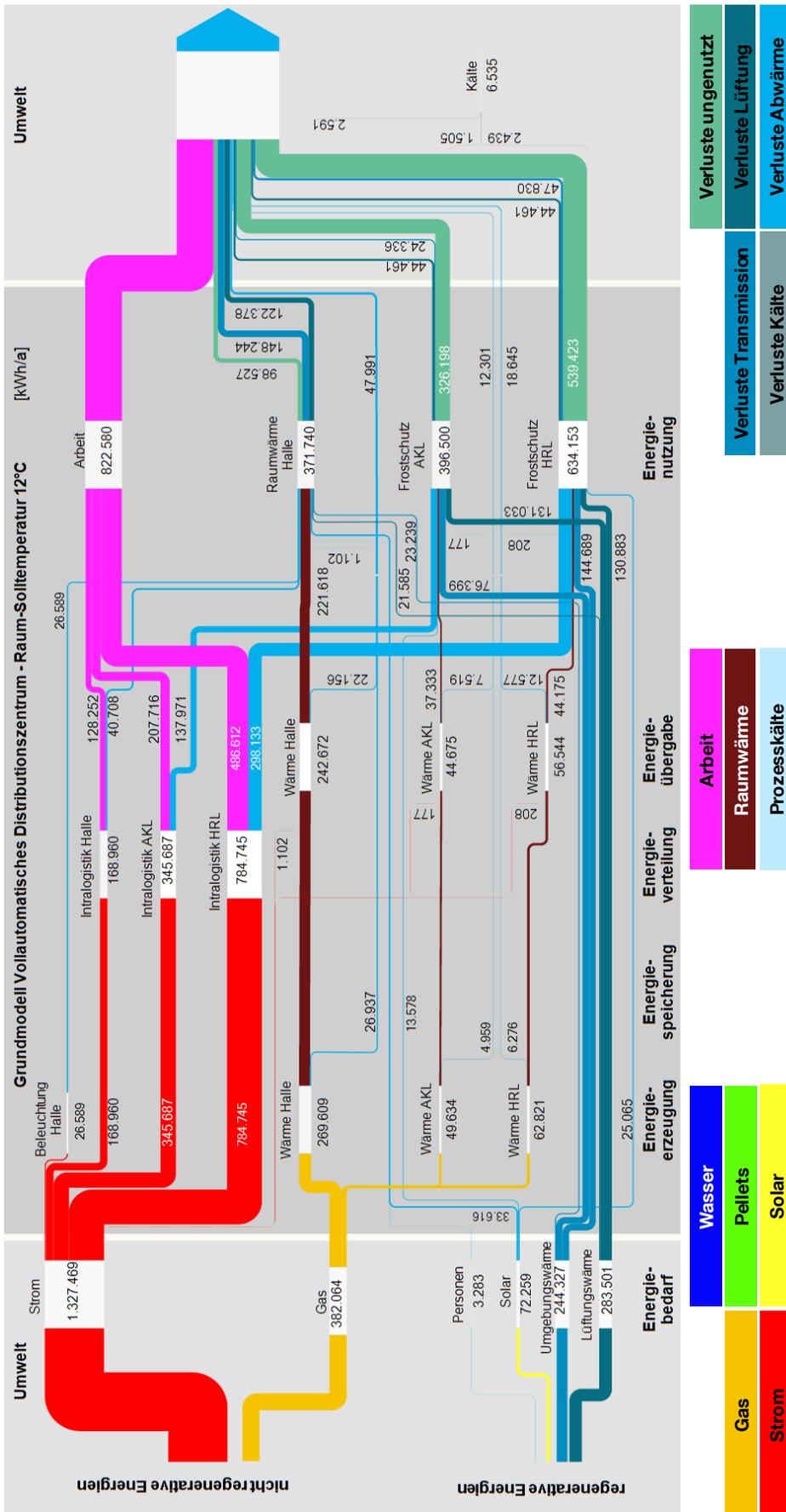


Abbildung A.15: G3 vollautomatisches Distributionszentrum 12 °C Grundmodell: Energieflussbild aller bilanzierten Energieträger

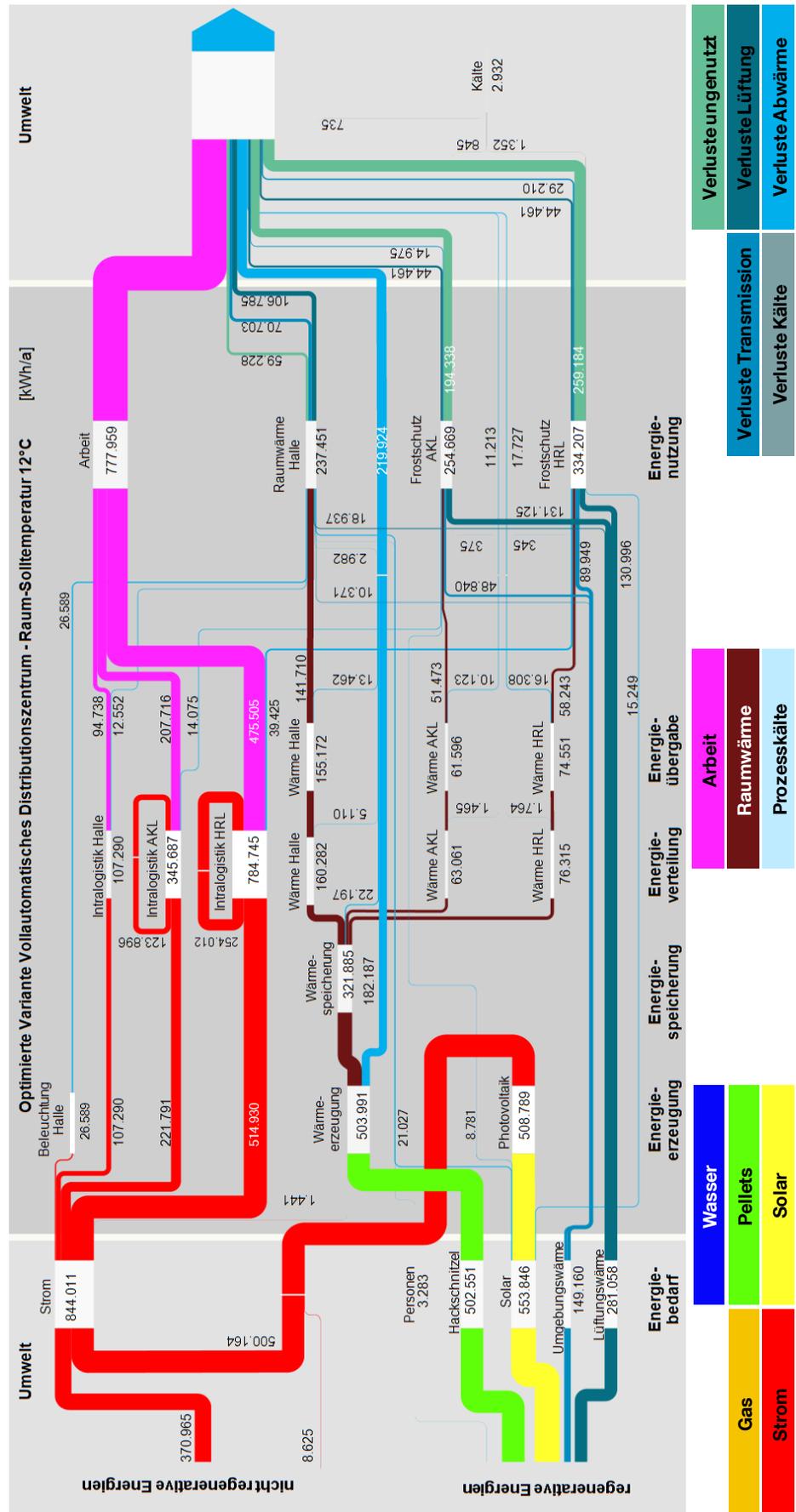


Abbildung A.16: G3 vollautomatisches Distributionszentrum 12 °C optimierte Variante: Energieflussbild aller bilanzierten Energieträger

