

Systemische Betrachtung der Zusammenhänge und Auswirkungen von Planungsalternativen auf die Gesamtenergiebilanz von Logistikzentren

A systemic approach to analysing interactions and impacts of alternative design options on the total energy balance of distribution warehouses

Julia Freis
Willibald A. Günthner

Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik
Technische Universität München

Logistikzentren müssen zukünftig eine hohe Gesamtenergieeffizienz aufweisen und zu einem hohen Anteil mit Energie aus erneuerbaren Quellen versorgt werden. Um die Stellschrauben zur Senkung des Energiebedarfs als auch der CO₂-Emissionen in Logistikzentren zu identifizieren, werden Auswirkungen von energieeffizienten Planungsalternativen aus den Bereichen Intralogistik, Gebäudetechnik und -hülle auf die Gesamtenergiebilanz untersucht.

[Schlüsselwörter: Logistikzentrum, Energieeffizienz, Energiebilanz, CO₂-Emissionen, Grüne Logistik]

Distribution warehouses need to provide a high overall energy efficiency in future. Besides, a significant part of their energy demand has to be gained from renewable sources. To identify the parameters for reducing the energy demand, several design options were assessed on their impacts on the total energy balance. The options consider field of design intra logistics, the buildings technology and envelope.

[Keywords: distribution warehouse, energy efficiency, energy balance, greenhouse gas emissions, green logistics]

1 EINLEITUNG

Gebäude sind in der Europäischen Union für 36 % der Treibhausgasemissionen und 40 % des gesamten Energieverbrauchs verantwortlich. Damit nehmen sie eine Schlüsselrolle beim Erreichen der energie- und klimapolitischen Ziele ein. Um diese Ziele nicht zu verfehlen, müssen auch Logistikgebäude zukünftig einen CO₂-armen Betrieb gewährleisten und eine hohe Gesamtenergieeffizienz aufweisen. Neben den politischen Reglementierungen und einem wachsenden gesamtgesellschaftlichen Bewusstsein für Ökologie rücken steigende Energiepreise mit ihrem Einfluss auf die Lebenszykluskosten von Anlagen und

Immobilien in den Vordergrund. Die Reduzierung der Energiekosten ist bei 86 % der vom Lehrstuhl fml im Jahr 2015 befragten Logistikverantwortlichen ein ausschlaggebender Faktor, Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz von Logistikanlagen und -gebäuden umzusetzen [Gün-2015, S. 36].

1.1 PROBLEMBESCHREIBUNG

Innovative Lösungen in den Bereichen der Intralogistik, Gebäudetechnik und -hülle leisten schon heute ihren Beitrag zur Reduzierung des Energieverbrauchs von Logistikzentren. Dabei werden diese Bereiche oftmals allerdings nur getrennt voneinander betrachtet. In der Intralogistik werden punktuelle Ansätze, wie z. B. Energierückspeisung bei Regalbediengeräten, verfolgt, ohne die Zusammenhänge zu anderen Bereichen oder Anlagen wie Heiz- oder Kühlsystemen zu berücksichtigen. In der Bauwirtschaft erfolgt die Optimierung des Energiebedarfs der gebäudetechnischen Prozesse immer ohne Einbezug der im Gebäude installierten prozessseitigen Anlagen. Innerhalb der Bereiche Logistik und Bau bestehen zuverlässige Methoden zur Bewertung des Energiebedarfs einzelner Anlagen, Betriebsmittel oder Baumaterialien. Ein ganzheitlicher Ansatz zur Bewertung der Gesamtenergieeffizienz von Logistikzentren unter Berücksichtigung der intralogistischen Anlagen und Prozesse in Zusammenhang mit der Konstruktionsweise des Gebäudes inklusive Gebäudetechnik ist aber nicht bekannt.

1.2 ZIELSETZUNG UND VORGEHENSWEISE

Das Ziel des Beitrags ist die Identifikation energetischer Wechselwirkungen zwischen den Bereichen Gebäudehülle, Gebäudetechnik und Intralogistik und die Bestimmung der Auswirkungen von Planungsalternativen in diesen Bereichen auf die Gesamtenergiebilanz von Logistikzentren. Um Wechselwirkungen der Bereiche Intralogistik, Gebäudetechnik und -hülle zu berücksichtigen und Auswirkungen einzelner Maßnahmen auf die Gesamt-

tenergiebilanz zu bewerten, wird im Beitrag ein systemischer Ansatz zur ganzheitlichen Betrachtung der Energiebilanz von Logistikzentren vorgestellt. Als methodische Arbeitshilfe werden Ansätze der Systemwissenschaften zum Umgang mit komplexen Systemen und weitere Methoden der Systemanalyse sowie des Modellaufbaus kombiniert.

Zunächst wird die Analyse externer und interner Einflussfaktoren auf den Energiebedarf von Logistikzentren beschrieben. Dabei werden ein Wirkungsgefüge erstellt und die Grenzen des betrachteten Systems festgelegt. Darauf aufbauend werden Anforderungen für die Modellierung von Logistikzentren und zur Ermittlung deren Energiebilanz abgeleitet. Um Untersuchungen der energetischen Zusammenhänge der Bereiche Intralogistik, Gebäudetechnik und -hülle durchführen zu können, werden, entsprechend des Automatisierungsgrades der Materialflusstechnik, zwei Referenzgebäude modelliert. Innerhalb dieser Modelle können jeweils unterschiedliche Temperaturniveaus zur Abbildung von Heiz- und Kühlfällen betrachtet werden. Nach der Validierung der erstellten Modelle erfolgt die Ermittlung des Jahresenergiebedarfs. Hierzu werden bestehende Ansätze in der Literatur zur Berechnung und Bewertung des Energiebedarfs für die Bereiche Logistik und Gebäude analysiert. Um diese für eine ganzheitliche Bilanzierung des Energiebedarfs von Logistikzentren anwenden zu können, werden die Ansätze im nächsten Schritt erweitert. Damit wird der Jahresenergiebedarf der modellierten Referenzgebäude beispielhaft bilanziert. Schließlich werden Untersuchungen verschiedener Planungsalternativen aus den Bereichen Intralogistik, Gebäudetechnik und -hülle hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf den Gesamtenergiebedarf vorgestellt. Die damit gewonnenen Erkenntnisse können Planer von Logistikzentren unterschiedlicher Fachdisziplinen bei einer energetischen Bewertung und Entscheidungsfindung im Planungsprozess unterstützen.

2 GRUNDLAGEN UND STAND DER TECHNIK

Die Planung von Logistikzentren beinhaltet nach der Struktur der ganzheitlichen Planung für Fabrikstrukturen [VDI 3637] die Planungsebenen Materialfluss, Informationsfluss sowie die Gebäude- und Energieversorgung. In der Regel werden diese Gewerke unabhängig voneinander geplant, indem ausgehend von der Materialflussplanung und der technischen Ausstattung von innen nach außen zur Gebäudeversorgung und der Gebäudehülle geplant wird. Die Ermittlung des betrieblichen Energiebedarfs nach dem Vorgehen von Kettner et al. in [Ket-1984, S. 79] schließt an die Layouterstellung an, indem zuerst die Energieverbraucher nach der Energieart und der örtlichen Anordnung im Gewerk erfasst werden. Im Anschluss werden die Leistungsfaktoren, Gleichzeitigkeitsfaktoren, Durchschnitts- und Spitzenwerte für die einzelnen Gewerke ermittelt und entsprechend der Anforderungen der

Verbraucher an die Energieart und -verteilung konzeptioniert. Dieses Vorgehen orientiert sich an der geforderten Anschlussleistung der Energieverbraucher. Aussagen über den Energiebedarf der Anlagen lassen sich mit diesem Vorgehen nicht treffen, da die tatsächlich aufgenommene Leistung, die durch den Arbeitsprozess und die Gleichzeitigkeit begrenzt ist, in der Regel wesentlich geringer ist und von der Anschlussleistung unterschieden werden muss [VDI 3802, S. 28].

2.1 AUFBAU VON LOGISTIKZENTRUM

Der Aufbau von Logistikzentren mit den darin enthaltenen technischen Anlagen als Energieverbraucher bestimmt maßgeblich den Energiebedarf des Gesamtsystems. Dabei variiert jedoch die technische Ausstattung von Logistikzentren stark und ist eng mit der zu erfüllenden Aufgabe verknüpft. Wichtig bei der Bestimmung der Höhe des Energiebedarfs sind dabei die Art der Güter und die damit einhergehenden Anforderungen, wie temperaturgeführt oder tiefgekühlt. Weiterhin sind die Art der Nutzung und der damit verbundene Automatisierungsgrad der Materialflusstechnik ein wichtiger Einflussfaktor auf den Energiebedarf. Auch die Inanspruchnahme der darin enthaltenen technischen Anlagen ist für die Bestimmung des Energiebedarfs des Gesamtsystems ausschlaggebend. Denn sowohl 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. Bezogen auf den Leistungserstellungsprozess im Logistikzentrum 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]. Letztendlich beeinflusst die Intralogistik mit ihrer Struktur und der Lagerkapazität das Layout und die Kubatur des Gebäudes und somit die Hüllfläche, über die Wärme mit der Umwelt ausgetauscht wird. Bisher erfolgt die Planung von Logistikzentren entsprechend den analysierten Anforderungen der Logistikaufgabe. Bei der Investitionsentscheidung liegt der Fokus bisher immer noch meist auf den Anschaffungskosten der Lagereinrichtung. Bisher hat die Energieeffizienz als Bewertungskriterium wenig Einzug in die Baupraxis erfahren, wenn man von einigen Leuchtturmprojekten, bei denen eine nachhaltige Bauweise im Vordergrund steht, absieht.

2.2 ENERGIEBILANZEN VON LOGISTIKZENTREN

Grundsätzlich bestehen unterschiedliche Ansätze um den Energiebedarf zu ermitteln. Mit Schätzungen lassen sich grobe Prognosen treffen, wohingegen analytische Berechnungen eine mittlere Abbildungsgüte aufweisen und sich für die Grobplanung eignen. Dynamische Simulationen und Messungen am realen System liefern zwar die genauesten Ergebnisse, sind aber auch entsprechend zeit-

aufwendig. Zusätzlich sind Messungen kostenaufwendig und können nur an bereits realisierten Anlagen durchgeführt werden. [Gün-2013, S. 15ff]

Im Rahmen der Grobplanung von Logistikzentren zur Untersuchung von Planungsalternativen eignen sich Berechnungsmethoden somit am besten. Dabei ist für eine Prognostizierung des Gesamtenergiebedarfs die Erstellung einer Energiebilanz notwendig. Nach Schieferdecker in [Sch-2006, S. 62ff.] sind bei der Bilanzierung aller Anlagen und Energieflüsse in einem System zunächst die Bilanzierungsgrenzen festzulegen. Alle über diese Bilanzierungsgrenze eintretenden Energien \dot{Q}_{zu} stellen den Input in das System über einen einheitlichen Betrachtungszeitraum dar. Alle austretenden Energien \dot{Q}_{ab} sind abgeführte Energien, also der Output des Gesamtsystems:

$$\sum \dot{Q}_{zu} = \Delta \dot{Q}_{sp} + \sum \dot{Q}_{ab} \quad (1)$$

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

Schieferdecker [Sch-2006, S. 65ff.] folgend, sollten zuerst Bilanzen einzelner Anlagen des Gesamtsystems erstellt werden und im Anschluss die Energieflüsse nach Energieträgern für das gesamte System. Logistikanlagen haben 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_{ALog} nach dem Prozess verbleibt. Die eingesetzte Energie Q_{ELog} für Logistikanlagen wird in Nutzenergie Q_{NLog} gewandelt, wobei die Verluste Q_{VLog} entstehen. Damit lautet die Berechnungsvorschrift des Energiebedarfs der Intralogistik:

$$Q_{ELog} = Q_{NLog} + Q_{VLog} (+Q_{ALog}) \quad (2)$$

Die aufgenommene Energie von Logistikanlagen ist prozessabhängig, wobei der Energiebedarf durch die geforderte zu erbringende logistische Leistung im Gesamtsystem determiniert wird. Die einzusetzende Energie für die Gebäudetechnik ist prozessübergreifend und die Höhe des Energiebedarfs wird nicht direkt von der logistischen Systemlast bestimmt. Die Energiebilanzierung der Gebäudetechnik erfolgt somit folgendermaßen:

$$Q_{EGTA} = Q_{NGTA} + Q_{VGTA} (+Q_{AGTA}) \quad (3)$$

Innerhalb der zu bilanzierenden Bereiche Logistik und Bau bestehen mittlerweile zuverlässige Methoden oder Simulationsergebnisse zur Bewertung des Energiebedarfs einzelner Anlagen und Betriebsmittel. Ein ganzheitlicher Ansatz zur Bewertung der Gesamtenergieeffizienz von Logistikzentren unter Berücksichtigung der intralogistischen Anlagen und Prozesse in Zusammenhang mit der Konstruktionsweise des Gebäudes samt Hülle und Gebäudetechnik ist bisher nicht bekannt.

2.2.1 ANSÄTZE ZUR ENERGIEBERECHNUNG DER INTRALOGISTIK

Die einzig bekannte Untersuchung von Intralogistikanlagen in Verbindung mit der Gebäudetechnik wurde von Meneghetti et al. in [Men-2014] durchgeführt. Hierfür wurde ein Optimierungsmodell für die Planung und Auslegung nachhaltiger Kühllager in der Lebensmittel-Supply-Chain erstellt. Dafür wurden Energieanforderungen und Einflussparameter des Tiefkühlsystems und der Regalbediengeräte mit Constraintprogrammierung modelliert und verlinkt. Ziel war eine optimale Auslegung u. a. von Regalabmessungen und der Gebäudedimension hinsichtlich Kosten, Energie und CO₂-Ausstoß. Hier wurde jedoch nur ein Hochregallager im Kühlfall für ein Temperaturniveau von über -20 C betrachtet ohne Verbindung zu anderen Subsystemen von Logistikzentren zu berücksichtigen. Analytischen Berechnungsansätze zur Bestimmung des Eigenbedarfs von Anlagen der Intralogistik, die nicht auf messtechnischen Untersuchungen und numerischer Integration beruhen, sind nur für un stetige Lager- und Fördermittel von Habenicht et al. in [Hab-2013], Tappia et al. in [Tap-2015] und Lerher et al. in [Ler-2014] bekannt.

Weitere Ansätze, die energetische Zusammenhänge der Intralogistik und des Gebäudes untersuchen, sind nicht bekannt. Die bisher veröffentlichten Ansätze basieren jeweils nur auf Untersuchung von Anlagen oder einzelnen Geräten der Intralogistik mittels Simulationsstudien oder Messungen an realen Systemen. Es werden jeweils nur die Einflüsse und Auswirkungen von technischen Parametern oder Betriebsstrategien zur Bewertung der Energieeffizienz untersucht.

2.2.2 ANSÄTZE ZUR ENERGIEBERECHNUNG DES GEBÄUDES

Für den Gebäudebereich bestehen mit der Normenreihe [DIN V 18599] umfangreiche und anerkannte Berechnungsvorschriften des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung zur energetischen Bewertung von Wohn- und Nichtwohngebäuden. Teil 10 dieser Norm gibt Nutzungszeiten und Randbedingungen für Logistikhallen zur Berechnung nach dem Referenzgebäudeverfahren vor. Hiernach erfolgt jedoch keine Betrachtung von im Gebäude ablaufenden logistischen Prozessen als Wärmequelle.

In der Forschung zur energetischen Bewertung und Ökobilanzierung von Gebäuden lag bisher der Fokus auf Wohn- und Bürogebäuden, was auch Rai et al. in [Rai-2011] bestätigen. Diese betrachten die Lebenszyklusemissionen von Logistikzentren für unterschiedliche Dämmungsarten der Hülle – eine Betrachtung der Intralogistik erfolgt auch hier nicht. Cook et al. untersuchen in [Coo-2011] neben der Dämmung der Wand und des Dachs auch Fenster, Verglasung und Beleuchtung von Logistikzentren um Auswirkungen von Alternativen auf die Energiebilanz

aufzuzeigen. Auch hier erfolgt keine ganzheitliche Betrachtung mit der im Gebäude installierten Intralogistik.

2.3 FAZIT

Bisher ist kein ganzheitlicher Ansatz zur Betrachtung des Gesamtenergiebedarfs von Logistikzentren bekannt, welcher die Intralogistik samt der Gebäudetechnik inklusive des Einflusses der Gebäudehülle untersucht. Insbesondere für die Planung von Neubauprojekten oder für das Retrofitting sind Erkenntnisse und das Verständnis über die Zusammenhänge und Höhe der Auswirkungen von Planungsalternativen auf den Energiebedarf des zukünftigen Systems notwendig. Mit der Betrachtung von Energieeinsparungen auf allen Ebenen der Energiebilanz von Logistikzentren kann der Gesamtenergiebedarf erheblich gesenkt werden. Damit tragen auch Logistikzentren innerhalb der Lieferkette zur Erreichung der energie- und klimapolitischen Ziele der EU bei. Vor dem Hintergrund steigender Transportvolumen und damit verbundener CO₂-Emissionen der Logistik ist dies dringend notwendig.

3 METHODE ZUR MODELLENTWICKLUNG

Das Gesamtsystem Logistikzentrum wird mit einem systemischen Ansatz beschrieben und untersucht. Dabei erfolgt die Systemanalyse und Modellbildung nach den allgemeinen Vorgehen von Schmidt in [Sch-1985] und Bossel in [Bos-1992]. Mit diesen Vorgehen ist es möglich, unterschiedliche Systeme zu analysieren und entsprechende Modelle zur Untersuchung des Systemverhaltens zu erstellen. Entsprechend dem Lebenszyklus der Modellentwicklung nach Schmidt in [Sch-1985, S. 62ff] erfolgt zunächst die Problemdefinition, um den Modellzweck zu präzisieren und bei existierenden Systemen die Ausgangsdaten festzulegen. Die nächsten Phasen sind die Systemanalyse und der Modellaufbau (vgl. Abbildung 1). Diese sind der wesentliche Kern der Modelluntersuchung.

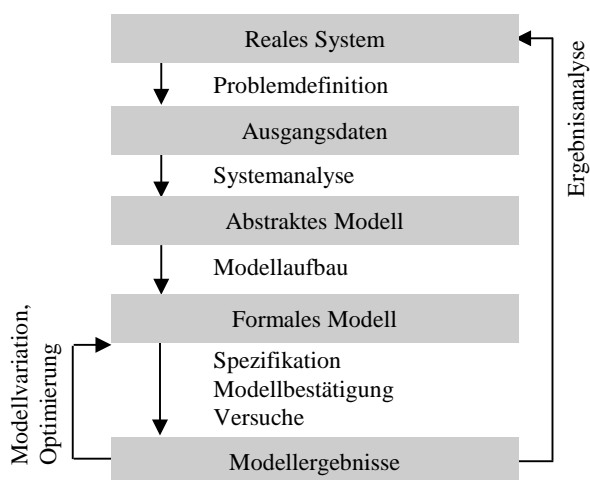


Abbildung 1. Übersicht zum Vorgehen der systemischen Betrachtung und Modellentwicklung, eigene Darstellung in Anlehnung an [Sch-1985, S. 62ff]

Innerhalb der Systemanalyse in Schmidt [Sch-1985, S. 17ff] werden die gegebenen, ungeordneten Ausgangsdaten untersucht und als Ergebnis ein abstraktes Modell entsprechend dem Modellzweck erstellt. Dafür erfolgt zunächst die Abgrenzung des Systems gegen die Umwelt. Im Anschluss erfolgt die Bestimmung der systemrelevanten Elemente sowie die Festlegung deren Attribute. Mit Hilfe von Abstraktion und Idealisierung werden die systemrelevanten Elemente identifiziert und entsprechend der zu untersuchenden Funktion beschrieben. Dabei werden Elemente und Attribute, die für die untersuchende Funktion unwesentlich erscheinen, weggelassen sowie die realen Gegebenheiten auf idealisierte Elemente abstrahiert. Bei der Definition der Modellstruktur wird festgelegt, in welcher Verbindung die modellierten Systemelemente zueinander stehen und wie sie sich gegenseitig beeinflussen. Auch werden Input- und Outputgrößen des Systems festgelegt und die Wirkung aus der Umwelt aufgenommen. Das resultierende abstrakte Modell enthält zwar keine neuen Erkenntnisse, stellt aber die eigentliche wissenschaftliche Arbeit dar. Erst die Untersuchung des Systemverhaltens entsprechend der Problemstellung und dem Modellzweck lässt neue Erkenntnisse zu, die auf das Verhalten des realen Systems übertragen werden können. Jedoch erlaubt die aufgestellte Modellstruktur mit ihren aufgenommenen Wirkungen eine erste qualitative Analyse des Systemverhaltens [Bos-1992, S. 41].

Der anschließende Modellaufbau geht Schmidt in [Sch-1985, S. 17ff] folgend vom abstrakten Modell aus und liefert ein formales Modell als Ergebnis, welches das Verhalten des realen Systems beschreibt. Dazu wird das abstrakte Modell entweder mittels mathematischer Formalisierung in ein analytisches Modell überführt oder als ein Simulationsmodell bzw. reales physikalisches Modell programmiert bzw. aufgebaut. Ob das formale Modell den Entwurfsvorschriften des abstrakten Modells genügt, muss in einer Ratifikation geprüft werden. Ist das Modell gültig, können nach der Festlegung der Anfangswerte und Parameter die Versuche zur Untersuchung des Systemverhaltens durchgeführt werden. Ob die generierten Modellergebnisse das tatsächliche Verhalten des realen Systems richtig wiedergeben, muss in einer Bestätigung des Modells geprüft werden. Dazu können die Untersuchungsergebnisse am formalen Modell mit empirischen Messergebnissen am realen System geprüft werden. Diese Validierung ist jedoch nur anwendbar, wenn das reale System bereits existiert und Messungen möglich sind. In einfachen Fällen ist es für eine Verifikation möglich, das Verhalten des formalen Modells mit den Ergebnissen eines weiteren analytischen, realen oder simulierten Modells zu vergleichen, bzw. die Übereinstimmung zwischen Modell und System an untersuchten Einzelfällen aufzuzeigen. Nach der Bestätigung des formalen Modells können weitere Versuche für unterschiedliche Szenarien durchgeführt werden. Abschließend erfolgt die Ergebnisanalyse, um Rückschlüsse auf das reale System ziehen zu können. [Sch-1985, S. 66f]

4 MODELLENTWICKLUNG VON LOGISTIKZENTREN ZUR ENERGIEBILANZIERUNG

Entsprechend der Problemdefinition in der Einleitung liegt der Modellzweck in der Identifikation von Stellhebeln zur Reduzierung des Energiebedarfs von Logistikzentren. Mit dem zu entwickelnden Modell müssen energetische Zusammenhänge innerhalb und zwischen den Bereichen Gebäudetechnik, -hülle und Intralogistik untersucht werden können. Weiterhin soll das Systemverhalten mit dem Modell analysiert werden können, um Auswirkungen von einzelnen Planungsalternativen aus den genannten Bereichen auf die Gesamtenergiebilanz von unterschiedlichen Arten von Logistikzentren bestimmen zu können. Das Ziel der Untersuchungen am Modell liegt somit im Erkenntnisgewinn über das Systemverhalten hinsichtlich des Gesamtenergiebedarfs bei Systemvariationen zur Entscheidungsunterstützung bei der Planung von energieeffizienten und CO₂-neutralen Logistikzentren.

4.1 SYSTEMANALYSE

Um den Energiebedarf für unterschiedliche Arten von Logistikzentren zu untersuchen, werden diese nach den Anforderungen des Gutes und der Art der Nutzung unterteilt. Denn neben der Größe des Logistikzentrums wird den Anforderungen des Gutes hinsichtlich Raumkonditionierung sowie dem Automatisierungsgrad der Intralogistik zur Lagernutzung und Leistungserbringung das größte Potential zur Optimierung unterstellt. Diese weisen nämlich einen signifikanten Einfluss auf den Gesamtenergiebedarf auf. Entsprechend der beschriebenen Einteilung wird das Logistikzentrum in der folgenden Modellent-

wicklung als ein technisches Sachsystem nach Ropohl in [Rop-1999, S. 117ff.] betrachtet. Demnach gibt der Modellzweck den Ausschlag dafür, auf welcher Hierarchieebene das Sachsystem betrachtet wird und somit wo die Systemgrenzen gezogen werden. Im betrachteten Sachsystem Logistikzentrum stellen die Bereiche Intralogistik, Gebäudetechnik und die -hülle die Sach-Subsysteme dar. Die Modellierung erfolgt auf Anlagen- und Geräteebene entsprechend Abbildung 2. Das Sach-Supersystem bildet die Umwelt bzw. die Umgebung des Logistikzentrums am Standort. Untersuchungsgegenstand ist die Energie, die den Zustand des Systems als eine physikalische Größe beschreibt und im mechanischen Sinne die Fähigkeit ist, Arbeit zu verrichten.

Es wird Energie als Inputgröße in Form von Elektrizität, Erdgas oder Holzpellets festgelegt sowie Materie in Form von Gütern, Ladungsträger, Verpackungsmaterial und die dazugehörigen Informationen. Von den technischen Systemelementen wird die Energie in die Outputgrößen mechanische Arbeit, Licht oder Wärme mit bestimmten Verlusten (nicht mehr arbeitsfähiger Energieanteil) umgewandelt. Diese Energienutzung dient der logistischen Leistungserbringung, indem Produkte durch Prozesse mit Hilfe von Informationen in Art, Menge oder Güte in einer bestimmten Zeitperiode verändert werden. Bei den technischen Systemelementen wird zwischen prozessabhängigen und prozessübergreifenden Elementen unterschieden. Elemente des Bereichs Intralogistik sind prozessabhängig, da der Energiebedarf mit der zu erbringenden Logistikleistung zusammenhängt.

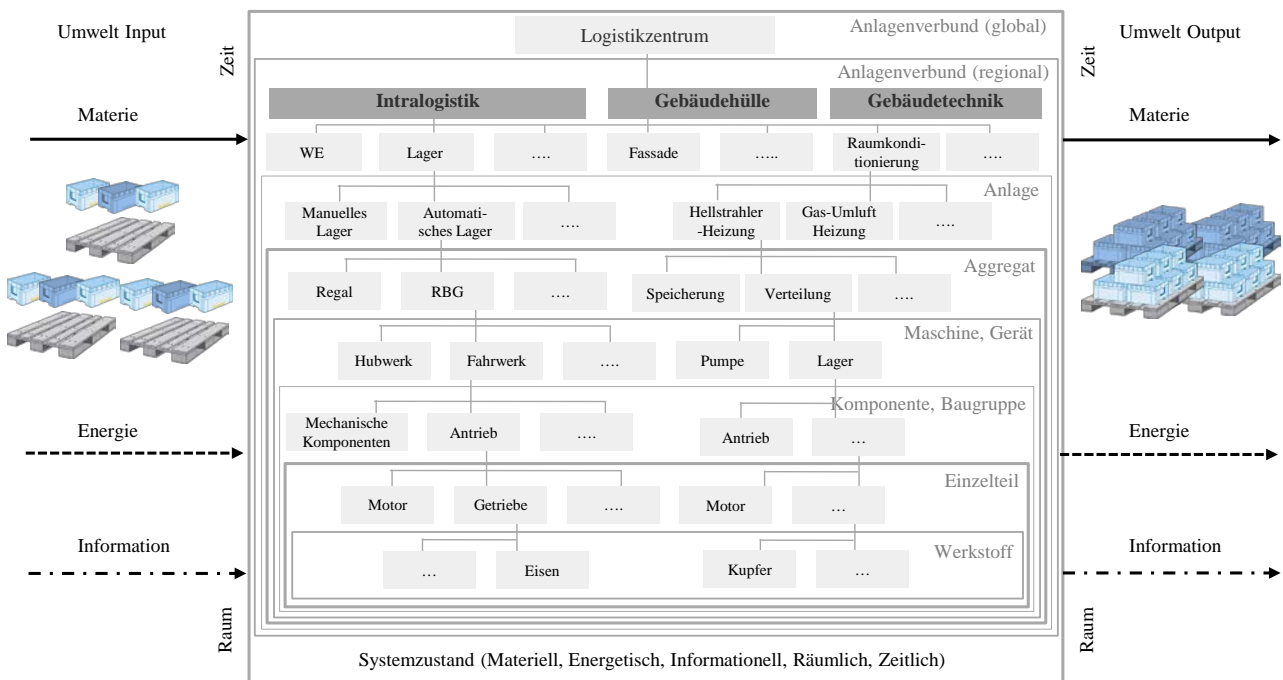


Abbildung 2. Blockschema des technischen Sachsystems Logistikzentrum mit Hierarchieebenen, eigene Darstellung in Anlehnung an [Rop-1999, S. 120/122.]

Prozessübergreifende Elemente gehören zu den Bereichen Gebäudetechnik und -hülle. Hier steht der Energiebedarf nicht direkt in Verbindung mit der Logistikleistung bzw. der im System durchzusetzenden Menge an Gütern. Bei der Betrachtung des Energiebedarfs der Systemelemente wird ein verstärktes Augenmerk auf die Wertigkeit der Energien gelegt. So ist Strom beispielsweise eine sehr hochwertige Energieform. Sie kann einfach und sehr verlustarm transportiert und in begrenztem Umfang auch gespeichert werden. Sie besitzt zudem die höchste Einsatzmöglichkeit. Wärme hingegen verliert mit abnehmender Temperatur an Wertigkeit. Dies ist dem Umstand geschuldet, dass sich der Energieinhalt aus Exergie und Anergie zusammensetzt. Der arbeitsfähige Anteil (Exergie) der Gesamtenergie eines Systems sinkt dabei mit abnehmendem Temperaturunterschied.

4.1.1 SYSTEMGRENZEN

Die Systemgrenze bildet die Außenhülle des Logistikgebäudes auf dem Grundstück eines Standortes. Über die Hülle erfolgt die Interaktion des Logistikzentrums mit seiner Umwelt. Neben den angebundenen Versorgungsleitungen für Strom oder Gas wird Energie durch Strahlung und Transmission über die Hülle ausgetauscht. Materie wird über Verladestationen oder weitere physische Anbindungen zu anderen Systemen ausgetauscht. Die gespeicherte thermische, mechanische oder chemische Energie in den Gütern beim Eintreten in das System (Wareneingang) oder beim Austreten (Warenausgang) wird nicht bilanziert. Die idealisierte Betrachtung, dass keine Wärme mit den Gütern in das System eingebracht wird, dient dazu, die Komplexität des Modells beherrsch-

bar zu halten. Denn jedes Gut besitzt aufgrund seiner unterschiedlichen Materialzusammensetzung und Masse differenzierte Speicherfähigkeiten, sodass ohne konkreten Anwendungsfall zu viele Variablen betrachtet werden müssten. Untersucht werden sämtliche Energieflüsse im System. Die Bilanzierung erfolgt dabei für ein Jahr auf Monatsbilanzbasis entsprechend der erbrachten Logistikleistung für definierte Nutzungsbedingungen sowie den vorherrschenden Witterungsbedingungen. Nicht betrachtet werden sämtliche Umformanlagen wie Transformatoren oder die Druckluftherzeugungsanlagen. Auch wird der Energiebedarf für zentrale Steuereinheiten und Rechenräume nicht bilanziert. Da Büro- und Sozialräume in der Regel fünf bis maximal zehn Prozent der Gesamtfläche eines Logistikzentrums beanspruchen und andere Anforderungen als die Logistikflächen stellen, werden diese bei der Energiebilanzierung ebenfalls nicht berücksichtigt. Nicht betrachtet wird zudem der Informationsfluss.

4.1.2 SYSTEMELEMENTE UND ATTRIBUTE

Im Folgenden werden nach der Eingrenzung des Betrachtungsgegenstandes die systemrelevanten Elemente identifiziert und deren für die Energiebilanzierung notwendigen Attribute bestimmt. Entsprechend dem Modellzweck sollen durch Kombination einzelner Elemente unterschiedliche Arten von Logistikzentren modelliert und untersucht werden können. Diese Grundelemente werden mit dem Top-Down Verfahren innerhalb der Bereiche Intralogistik, Gebäudetechnik und -hülle deduktiv hergeleitet. In Abbildung 3 sind die analysierten Grundelemente der betrachteten Bereiche dargestellt.

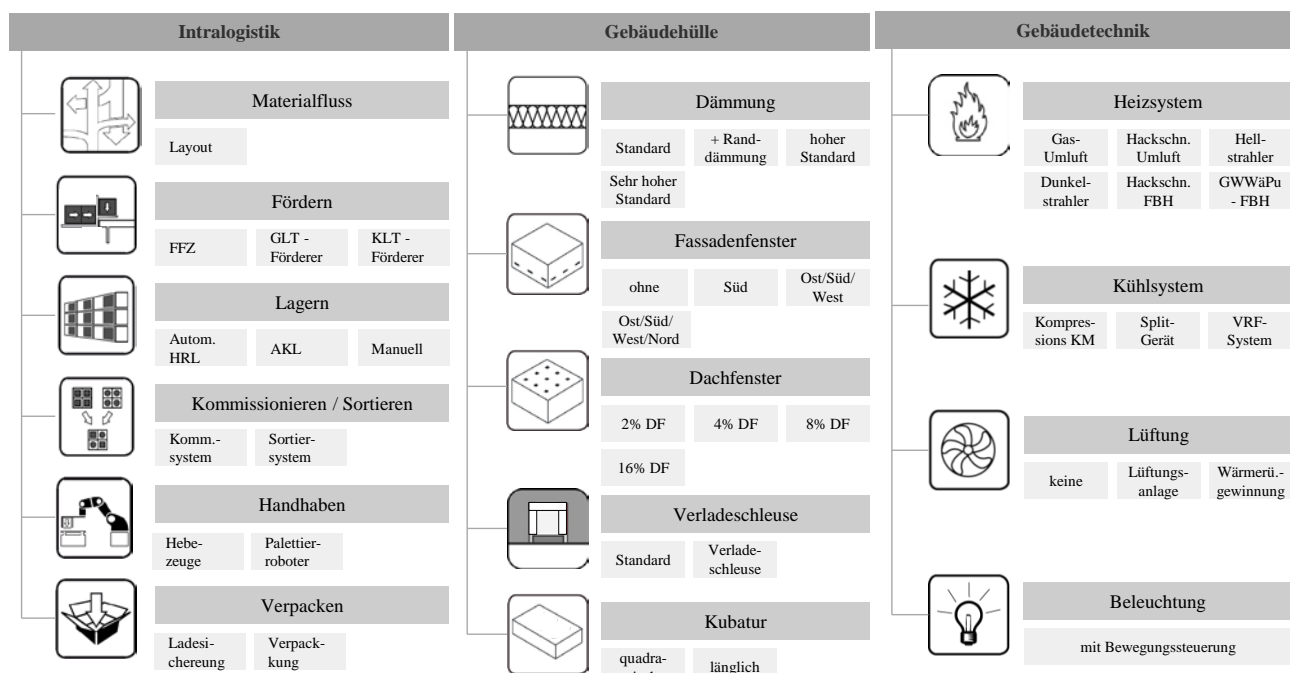
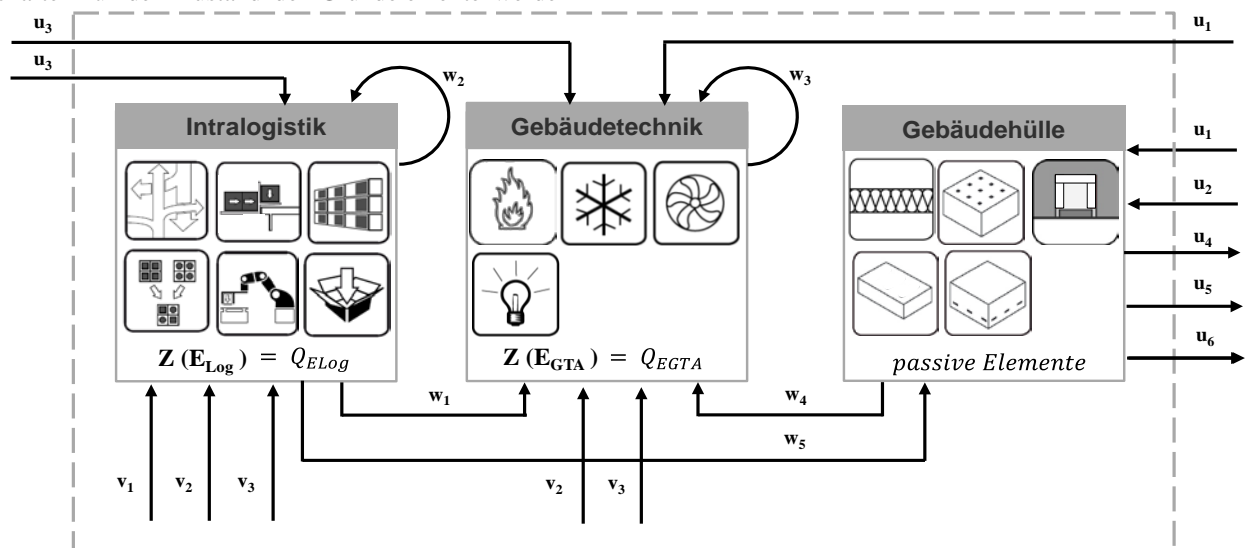


Abbildung 3. Identifizierte und klassifizierte systemrelevante Grundelemente von Logistikzentren

Um diese relevanten Grundelemente und deren typische Ausprägung in der Baupraxis zu erfassen und damit Referenzmodellgebäude, die eine möglichst breite Abdeckung unterschiedlicher Arten von Logistikzentren wiedergeben, erstellen zu können, wurden bestehende Logistikzentren besichtigt sowie eine Online-Umfrage durchgeführt. Das Vorgehen und die Ergebnisse dieser Primärdatenerhebung sind in [Gün-2014] beschreiben.

Im Bereich Intralogistik werden analog den Logistikaufgaben die Klassen Fördern, Lagern, Kommissionieren / Sortieren, Handhaben, Verpacken sowie Be- / und Entladen gebildet. Zusätzlich wird für die weiteren Untersuchungen die Klasse Materialfluss mit dem Grundelement Layout gebildet, welche die Materialflusstechnik und die notwendige Fläche im Ganzen betrachtet. Dieses Grundelement bestimmt maßgeblich die Ausprägung der Gebäudehülle. Der Bereich Gebäudehülle umfasst die Klassen Dämmung, Fassadenfenster, Dachfenster, Verladetore und die Kubatur des Logistikzentrums. Im Bereich Gebäudetechnik werden die Klassen Heiz- und Kühlsystem, Lüftung und Beleuchtung gebildet. Diese identifizierten Grundelemente der dargelegten Klassen werden aufgrund der bei den Besichtigungen und der Online-Umfrage ermittelten Häufigkeiten festgelegt.

Attribute zur Beschreibung der relevanten Eigenschaften für den Zustand der Grundelemente werden in



$Z(E_{Log})$ = Energetischer Zustand der Grundelemente Intralogistik (Energiebedarf)

$Z(E_{GTA})$ = Energetischer Zustand der Grundelemente Gebäudetechnik

w_i = Wirkungen zwischen den Grundelemente aufgrund von Parametern

v_i = Verhaltenswirkungen der Grundelemente aufgrund von Parametern

u_i = Beeinflussende Wirkungen durch die Randbedingungen der Umwelt

w_1 = Abwärme (technologische Last) / $w_{2/3}$ = Energierückgewinnung, technologische Last

w_4 = Eigenschaften Baustoffe / w_5 = Materialflusslayout / v_1 = Förderaufgabe (Nutzlast, Beschleunigung, Weg)

v_2 = Betriebszustand (Volllast, Leerlauf, Dauerbetrieb, Aussetzbetrieb) / v_3 = Wirkungsgrade Maschinen/Komponenten

u_1 = Strahlungslast (Licht, solare Einträge) Einträge / u_2 = Transmissionslast (Einträge)

u_3 = Randbedingungen (Temperatur, Nutzungs-, Betriebsstunden, Durchsatz)

u_4 = Strahlungslast (Verluste) / u_5 = Transmissionslast (Verluste) / u_6 = Luftwechsel (Lüftungsverluste)

Abbildung 4. Wirkungsgraf zur Verhaltensstruktur von Logistikzentren von energetischen Zusammenhängen zwischen Intralogistik, Gebäudetechnik und -hülle sowie der Umwelt

spezifische Parameter, wie Durchsatz oder Abmessung des Gebäudes sowie technische Parameter, wie Wirkungsgrad oder Förderlänge, unterteilt. Zusätzlich werden Randparameter, die für alle Grundelemente gültig sind, festgelegt (z. B. Betriebszeiten und Gebäudekonstruktion). Die festgelegten Attribute sind in [Gün-2014] ausführlich beschrieben.

4.1.3 SYSTEMSTRUKTUR

Die Systemstruktur ist in Abbildung 4 mit den Wirkungen zwischen den Bereichen und Grundelementen (w), den Verhaltenswirkungen (v) und den Einflusswirkungen aus der Umwelt (u) dargestellt. Demnach wird der Zustand (Z) der Grundelemente, also der Energiebedarf im System, durch diese Wirkungen beeinflusst. Dabei nimmt die Gebäudehülle eine passive Rolle ein, denn diese beeinflusst indirekt den Energiebedarf des Systems ohne selbst Energie zur Leistungserfüllung aktiv zu benötigen.

Das erstellte abstrakte Modell mit seinen Grundelementen bildet das Verhalten des realen Systems Logistikzentrum für den geforderten Modellzweck qualitativ ab. Um die Höhe der Einflüsse quantifizieren zu können, müssen die Wirkungen im nächsten Schritt in einem analytischen Modell beschrieben werden.

4.2 AUFBAU DES ANALYTISCHEN MODELLS

Für die Ermittlung der Gesamtenergiebilanz von Logistikzentren wird das in Form eines Wirkungsgraphen erstellte abstrakte Modell aus Abbildung 4 in ein formales analytisches Modell zur Energiebedarfsermittlung überführt. Entsprechend der Formeln 2 und 3 ergibt sich die Energiebilanz aus der Summe des prozessunabhängigen Energiebedarfs für die Raumkonditionierung durch die Gebäudetechnik und des prozessbedingten Energiebedarfs der Intralogistik zur Erfüllung der logistischen Aufgabe. Demnach leitet sich die Gesamtenergiebilanz Q_{ELZ} für ein Logistikgebäude wie folgt ab:

$$Q_{ELZ} = Q_{ELog} + Q_{EGTA} \quad (4)$$

Dabei bestimmen die logistischen Anforderungen das Materialflusslayout und die technische Ausprägung der Intralogistik. Der Energiebedarf der Intralogistik ist insbesondere abhängig vom Durchsatz, also der Menge an Gütern, die im System bearbeitet werden muss. Zusätzlich bestimmt die Art des Gutes die Anforderungen an die Raumkonditionierung hinsichtlich Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Licht. Wie im Wirkungsgraphen dargestellt, hat die Gebäudetechnik somit keinen direkten Einfluss auf die Ausprägung und den Energiebedarf der Intralogistik. Jedoch hat die Intralogistik durch den Betrieb der Anlagen und den prozessbeteiligten Mitarbeitern als interne Wärmequelle (technologische und physiologische Last) Einfluss auf die Raumkonditionierung und somit auf den Energiebedarf der Gebäudetechnik. Weiterhin bestimmt die Art und Ausprägung der Gebäudehülle maßgeblich den Energiebedarf der Gebäudetechnik. Jedoch bedarf die Hülle selber keiner Energie im Betrieb und stellt somit nur ein passives Grundelement dar, das Einfluss auf die Gebäudetechnik nimmt.

Somit muss für die Energiebilanzierung zunächst der Energiebedarf der Intralogistik sowie der Anteil der Energieverluste bzw. nicht mehr arbeitsfähiger Energie, der als Abwärme an die Umgebung abgegeben wird, ermittelt werden. Mit zusätzlicher Betrachtung dieser prozessbedingten internen Lasten wird dann die Energiebilanz für das Gebäude erstellt und der Bedarf je Energieträger für ein Jahr in kWh summiert.

4.2.1 TEILMODELL INTRALOGISTIK

Der Gesamtenergiebedarf der Intralogistik Q_{ELog} ergibt sich aus der Summe des Energiebedarfs $E_{Log,k}$ je Grundelement k des Bereichs Intralogistik der Klassen bei n Grundelementen im System:

$$Q_{ELog} = \sum_{k=1}^n E_{Log,k} \quad (5)$$

Für das Grundelement Flurförderzeuge FFZ der Klasse Fördern als auch der Klasse Lagern für das Grundelement manuelles Lager zur Lagerbewirtschaftung und

PzW-Kommissionierung als Kommissionierhilfe der Klasse Kommissionierung / Sortierung bestimmt sich der Energiebedarf $E_{Log,FFZ,i}$ für einen FFZ Typ i der unterschiedlichen Flurförderzeugarten durch:

$$E_{Log,FFZ,i} = \sum_{i=1}^m (P_{FFZ,i} + P_{FFZ,i} * (1 - \eta_{BA_Ladung,i})) * n_{FFZ,i} * t_{FFZ,a,i} \quad (6)$$

mit $P_{FFZ,i}$ für die mittlere Leistungsaufnahme pro Stunde zur Durchführung des Referenzspiels nach [VDI 2198], $n_{FFZ,i}$ für die Anzahl der FFZ des Typs i im System, $t_{FFZ,a,i}$ für die Betriebsstunden im Jahr und $\eta_{BA_Ladung,i}$ für den Wirkungsgrad der Batterieladung in Abhängigkeit des Ladegerätes für FFZ Typ i bei m FFZ Typen.

Der Energiebedarf $E_{Log,Förd,k}$ für eine Art k des Grundelements GLT- oder KLT-Förderer der Klasse Fördern als auch für eine Art k des Grundelements Sortiersystem der Klasse Kommissionieren / Sortieren ergibt sich nach Habenicht et al. in [Hab-2013] aus dem Energiebedarf von m verschiedenen Zyklusausprägungen $E_{Log,Förd,k,i}$ und deren Häufigkeiten $n_{Log,Förd,k,a,i}$ im Jahr:

$$E_{Log,Förd,k} = \sum_{i=1}^m E_{Log,Förd,k,i} * n_{Log,Förd,k,a,i} \quad (7)$$

Dafür wird der Energiebedarf $E_{Log,Förd,k,i}$ für einen Zyklus i ermittelt durch:

$$E_{Log,Förd,k,i} = \sum_{j=1}^a t_{Log,Förd,k,j} * P_{Log,Förd,k,j} \quad (8)$$

mit $t_{Log,Förd,k,j}$ für die Dauer eines Zyklusabschnitts, a für die Anzahl der Zyklusabschnitte und $P_{Log,Förd,k,j}$ für die mittlere Leistung innerhalb des Zyklusabschnittes j . Ein Zyklus ist hier dadurch definiert, dass er eine feste Anzahl an Fördereinheiten besitzt, die transportiert werden (Blockgröße oder Pulklänge). Die konkrete Modellierung der elektrischen Leistung der Zyklusanzahl sowie Zyklusausprägung beschreiben Habenicht et al. in [Hab-2013].

Die Ermittlung des Energiebedarfs $E_{Log,Hebe,k}$ der Grundelemente k der Klasse Handhaben erfolgt mittels Hochrechnung und Summierung der zustandsbasierten elektrischen Leistungsaufnahme $P_{Log,Hebe,k,i}$ im Zustand i für eine Zustandsdauer $t_{Log,Hebe,k,i}$, wobei n Zustände, in denen sich das Grundelement k im Laufe eines Jahres befinden kann, berücksichtigt werden.:

$$E_{Log,Hebe,k,i} = \sum_{i=1}^n P_{Log,Hebe,k,i} * t_{Log,Hebe,k,a,i} \quad (9)$$

Die Zustände für diese Berechnung werden in die Anteile Produktiv-, Warte- und Stand-by-Zeit für die Handhabung je Einheit unterteilt. Falls energierelevant, kann die Produktivzeit entsprechend der Bewegungsabläufe zu-

sätzlich in die Zustände Beschleunigen, konstant Bewegen, Bremsen, Heben und Senken unterteilt werden.

Der Energiebedarf je RBG für die Grundelemente automatisches HRL und AKL wird mit der Anzahl der im Lager vorhandenen RBG multipliziert. Dafür wird der Energiebedarf je RBG pro Jahr $\bar{E}_{Log,RBG,k,i}$ nach Habenicht et al. in [Hab-2013] wie folgt ermittelt:

$$E_{Log,RBG,k,i} = \frac{\bar{E}_{ES,E}}{\bar{t}_{ES}} * T_{ES,E} + \frac{\bar{E}_{ES,A}}{\bar{t}_{ES}} * T_{ES,A} + \frac{\bar{E}_{DS}}{\bar{t}_{DS}} * (T_{DS} + P_{GL} * T_{BR}) \quad (10)$$

\bar{t}_{ES} steht für die mittlere Spielzeit eines Einzelspiels, $T_{ES,E}$ Zeit für den Einzelspielbetrieb (Einlagern) im Jahr, $\bar{E}_{ES,E}$ für die mittlere Energie pro Einzelspiel (Einlagern), $T_{ES,A}$ Zeit für den Einzelspielbetrieb (Auslagern) im Jahr, $\bar{E}_{ES,A}$ für die mittlere Energie pro Einzelspiel (Auslagern), \bar{t}_{DS} für die mittlere Spielzeit eines Doppelspiels, T_{DS} Zeit für den Doppelspielbetrieb im Jahr, \bar{E}_{DS} für die mittlere Energie pro Doppelspiel, P_{GL} für die Grundlastleistung und T_{BR} für die entsprechende Brachzeit pro Jahr.

Für die Bestimmung des Energiebedarfs $E_{Log,VPM,k}$ der Grundelemente k der Klasse Ladungssicherung / Verpackung wird die benötigte Energie pro verpackter Einheit $P_{Log,VPM,k}$ zunächst mit der Anzahl der verpackten Einheiten $n_{Log,VPM,k,a}$ multipliziert:

$$E_{Log,VPM,k} = \sum_{i=1}^n P_{Log,VPM,k} * n_{Log,VPM,k,a} + P_{GL,VPM,k} * T_{BR,VPM,k} \quad (11)$$

Dazu addiert wird der Grundlastverbrauch $P_{GL,VPM,k}$, multipliziert mit dem entsprechenden Zeitanteil im Jahr, der nicht produktiven Zeit des Grundelementes.

Um für das Gebäudemodell die Verlustanteile des Gesamtenergiebedarfs der Intralogistik zu berechnen, wird über den Gesamtwirkungsgrad $\eta_{ges,Log,k}$ des Grundelements k die Verlustenergie vom Energiebedarf $E_{Log,k}$ der n Grundelemente im System berechnet und summiert:

$$Q_{VLog} = \sum_{i=1}^n E_{Log,k} * (1 - \eta_{ges,Log,k}) \quad (12)$$

Die summierten Energieverluste der Intralogistik werden als interne Lasten im Gebäudemodell bilanziert.

4.2.2 TEILMODELL GEBÄUDE

Der Gesamtenergiebedarf der Gebäudetechnik Q_{EGTA} ergibt sich je Zone auf Monatsbasis für ein Jahr mit:

$$Q_{EGTA} = \sum_{j=1}^{12} Q_{GTA,k,mth,j} \quad (13)$$

Dabei erfolgt die Berechnung nach der [DIN V 18599] Teil 1-10. In dieser Vornorm sind sämtliche analytische Berechnungsmodelle für einzelne Themenschwerpunkte dargelegt. Die nach dieser Vornormenreihe durchgeführte Energiebilanz folgt einem integralen Ansatz, sodass eine gemeinschaftliche Bewertung der Gebäudehülle, der Nutzung und der Gebäudeanlagentechnik unter Berücksichtigung der gegenseitigen Wechselwirkungen erfolgen kann. Jedoch ist mit der Norm keine ganzheitliche Betrachtung von Logistik- bzw. Lagerhallen möglich, da entsprechend Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten, Tabelle A.43 Nutzung von Lagerhallen / Logistikhallen, keine internen Wärmequellen angegeben sind. Somit werden in den folgenden Untersuchungen bei der Berechnung des Energiebedarfs des Gebäudes nach [DIN V 18599] die mit dem Intralogistikmodell ermittelten internen Wärmelasten (nur Verlustenergie der Intralogistik in Form von Wärme) mit bilanziert.

4.2.3 GÜLTIGKEIT DER MODELLFORMULIERUNG

Die Modellformulierung entspricht den Vorschriften des abstrakten Modells und dient dem Modellzweck. So können damit verschiedene Planungsalternativen aus den Bereichen Intralogistik, Gebäudetechnik und -hülle hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf den Gesamtenergiebedarf untersucht werden. Voraussetzung dafür ist, dass die Eingangsgrößen und Anfangswerte bekannt sind. Die Abbildungsgüte steht in Zusammenhang mit der Kenntnis der internen Vorgänge und dem Zeitaufwand, sodass für analytische Berechnungen mit einer theoretischen Modellierung nur eine mittlere Modellgüte erreicht werden kann. Um zu überprüfen, ob der von der als Arbeitshilfe verwendeten Software ZUB Helena 2012 Ultra v6.27 [ZUB-2012] nach [DIN V 18599] errechnete Energiebedarf des Gebäudes hinsichtlich Verhalten und Struktur gültig 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 in diesem Projekt nur der Typus der manuellen Lagerhalle untersucht wird, bezieht sich die Validierung der erstellten Untersuchungsmodelle ebenfalls nur auf dieses Modell. Das Grundmodell des halbautomatischen Logistikzentrums baut jedoch auf der manuellen Lagerhalle auf und wird 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 Prüfung der Konsistenz und Plausibilität über den Nutzenergiebedarf herangezogen. Es stehen Werte mit und ohne Abwärme der Beleuchtung zum Vergleich. Die Berechnung des spezifischen Nutzenergiebedarfs der Heizung mit der Software ZUB Helena und der Software IDA ICE zeigt für die Ermittlung mit der Wärmelast Beleuchtung eine Differenz

von 18,5 %, auf. Wird die Beleuchtung nicht mit in die Berechnung des Heiz-Nutzenergiebedarfs aufgenommen, ergibt sich eine Abweichung von 13 %. Diese Abweichungen sind auf die unterschiedlichen Berechnungsmethoden zurückzuführen. Entsprechend des Modellzwecks und der durch die analytische Berechnung bedingten Modellgüte wird die Abweichung als akzeptabel bewertet. Denn die anschließenden Einzeluntersuchungen sollen Tendenzen für Optimierungen und Stellhebel für CO₂-Einsparungen aufzeigen. Daraus abzuleitende Maßnahmen sollen für die Grobplanung von Logistikzentren bereitgestellt werden. Hier ist nach Meinung von Experten, die in Experteninterviews bei der Primärdatenerhebung mit den Besichtigungen und der Online-Umfrage in [Gün-2014] erhoben wurden, eine Abweichung von +/- 20% akzeptabel. Für die Ermittlung des Energiebedarfs für die Intralogistik stehen aufgrund der Spezifikation der Untersuchungsmodelle keine Vergleichswerte für den konkreten Anwendungsfall zur Verfügung. Eine Überprüfung am realen System ist nicht möglich, da dieses nicht existiert. Jedoch wurden die verwendeten Berechnungsansätze für einzelne Anlagen (RBG, Ketten- und Rollenförderer über Messungen) an realen Systemen in [Gün-2013], [Ert-2013a] und [Ert-2013b] bereits validiert.

5 ENERGIEBILANZIERUNG VON LOGISTIKZENTREN

Aufbauend auf den identifizierten Grundelementen werden zwei Untersuchungsmodelle konzipiert. Diese richten sich zuerst nach der Art des Gutes und dessen Anforderungen, sodass für beide Modelle zunächst eine Innenraum-Solltemperatur von 12 °C angenommen wird, wie sie in der [DIN V 18599-10] festgelegt ist (Untersuchungsfall: Lagergut hat keine Anforderung an Temperierung, Anforderung ergibt sich durch die Personenbelegung in der Halle). Um die Art der Nutzung abzubilden, werden zwei Logistikzentren mit steigendem Automati-

sierungsgrad der Intralogistik modelliert. Dazu wird zunächst das Grundmodell manuelle Lagerhalle, erstellt. Darauf aufbauend wird die Wertschöpfungstiefe mit der zusätzlichen Funktion Kommissionierung und der Durchsatz bei gleichbleibender Lagerkapazität erhöht sowie die Prozesse teilautomatisiert. Dieses Grundmodell wird als halbautomatisches Logistikzentrum benannt. Bei der Modellierung erfolgte die Auslegung der technischen Logistiksysteme und die Layoutgestaltung nach [Gün-2013a] [Gün-2013b].

5.1 SPEZIFIKATION DER ANFANGSWERTE FÜR DIE UNTERSUCHUNGSMODELLE

Die festgelegten Randparameter wie z. B. der Standort gelten für beide Modelle und sind in Tabelle 1 im Anhang aufgelistet. Die spezifischen Parameter für die beiden Grundmodelle sind in Tabelle 2 und Tabelle 3 im Anhang dargestellt. Die Typologie der manuellen Lagerhalle baut auf der Studie [ZUB-2012] 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. Demnach besitzt das Gebäude (vgl. Abbildung 5 (2)) eine quadratische Grundform von 100 m auf 100 m und eine Hallenhöhe von 14 m. Der Lagerbereich besteht aus 18 Regalgassen, die in fünf Ebenen (vgl. Abbildung 5 (1)) Platz für 14.040 Paletten bieten. In Abbildung 5 (3) ist die Außenansicht des halbautomatischen Logistikzentrums dargestellt. Die Innenansicht mit dem modellierten Layout und der Materialflusstechnik ist in Abbildung 5 (4) zusehen. Sämtliche Anfangswerte und Parameter wurden mit der Identifikation der systemrelevanten Grundelemente bei der Primärdatenerhebung im Rahmen der Besichtigungen, der Online-Umfrage und bei Experteninterviews mit Logistik-, Gebäudetechnikplanern und Architekten in [Gün-2014] festgelegt.

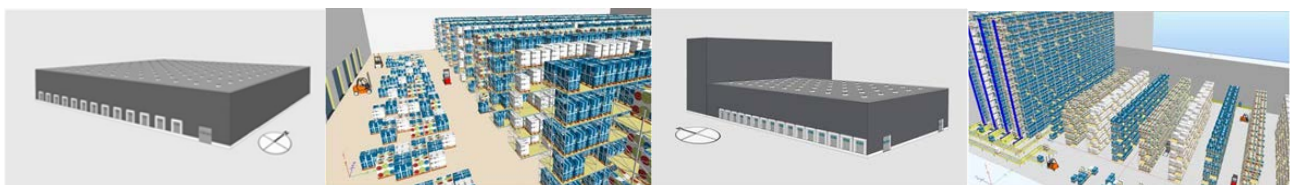


Abbildung 5. Außenansicht und Innenansicht der Untersuchungsmodelle: links (1) Grundmodellaußenansicht manuelle Lagerhalle und (2) Grundmodellinnenansicht manuelle Lagerhalle, rechts (3) Grundmodellaußenansicht halbautomatisches Logistikzentrum und (4) Grundmodellinnenansicht halbautomatisches Logistikzentrum

5.2 ENERGIEBERECHNUNG FÜR UNTERSUCHUNGSMODELLE

Die Erstellung der Gesamtenergiebilanzen für die Untersuchungsmodelle wird, wie bereits dargelegt, mittels der [DIN V 18599] für Nichtwohngebäuden mit Hilfe der Software ZUB Helena 2012 Ultra v6.27 [ZUB-2012] durchgeführt. Hierfür erfolgt zuerst die Berechnung der Intralogistik auf Anlagenebene für die modellierten Grundelemente entsprechend des aufgestellten formalen Mo-

dells in Kapitel 4. Die Energiebedarfsermittlung basiert auf der Annahme einer konstanten Logistikleistung, also gleichbleibenden stündlichen Durchsätzen für die unterschiedlichen Grundmodelle entsprechend der Parametrisierung nach Tabelle 2 und Tabelle 3 im Anhang. Die Durchsätze werden auf ein Jahr hochgerechnet und darauf aufbauend der notwendige Energiebedarf ermittelt. Die technischen Parameter, die für die Berechnung des Energiebedarfs der einzelnen Grundelemente des Bereichs Intralogistik, Gebäudetechnik und -hülle angenommen wer-

den, sind in [Gün-2014S. 35ff.] beschrieben. Die ermittelte Gesamtenergiebilanz mit den Energieflüssen je Energieträger in kWh/a für das Grundmodell der manuellen Lagerhalle ist in Form eines Sankey-Diagramms in Abbildung 6 dargestellt. Zu erkennen ist, dass den größten

Teil des Energiebedarfs die Wärmeversorgung mit Gas ausmacht. Der notwendige Strombedarf teilt sich ca. zur Hälfte auf in die Beleuchtung der Halle und die Beladung der FFZ- Batterien.

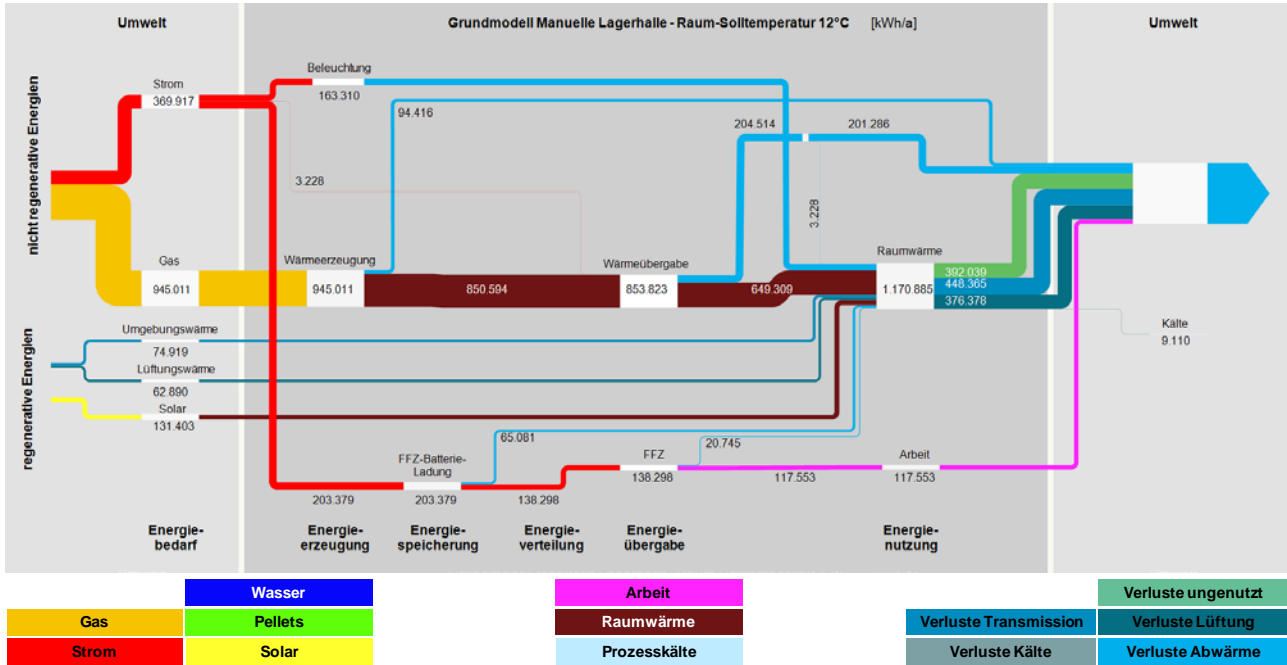


Abbildung 6. Energiebilanz manuelle Lagerhalle 12 °C Grundmodell: Sankey-Diagramm aller bilanzierten Energieträger

Im Vergleich zur manuellen Lagerhalle, gestaltet sich die Verteilung des Energiebedarfs für das halbautomatische Logistikzentrum (vgl. Abbildung 7) aufgrund des höheren Automatisierungsgrades der Intralogistik anders. Hier benötigt insbesondere die Intralogistik den größten

Anteil an Strom. Der Energiebedarf an Gas für die Raumkonditionierung des halbautomatischen Logistikzentrums ist wesentlich geringer, da durch das separate Hochregallager ein kleineres Raumvolumen zu konditionieren ist (HRL min. 4 °C als Frostschutz Sprinkleranlage).

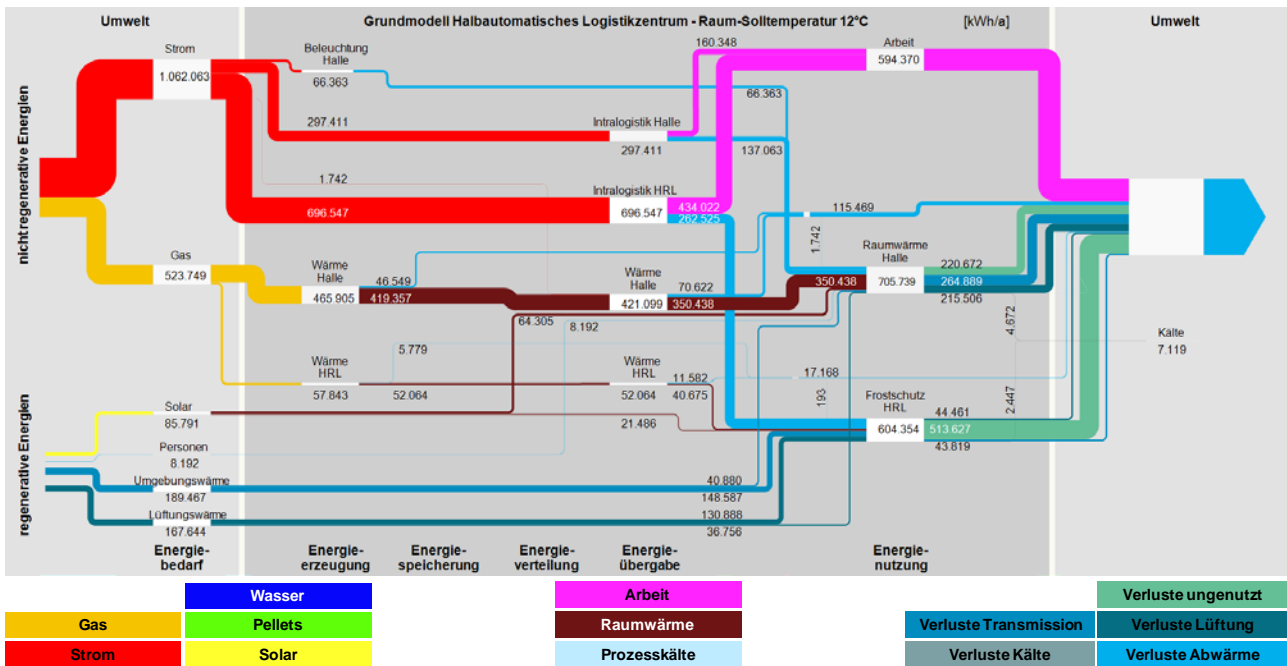


Abbildung 7. Energiebilanz halbautomatische Logistikzentrum 12 °C Grundmodell: Sankey-Diagramm aller bilanzierten Energieträger

5.3 AUSWIRKUNGEN PLANUNGALTERNATIVEN VON AUF DIE GESAMTENERGIEBILANZ

Um die Auswirkungen auf die Gesamtenergiebilanz zu bestimmen, wurden zu den einzelnen Grundelementen Parameterstudien durchgeführt. Dazu wurde jeweils ein Grundelement je Untersuchungsmodell durch eine energieeffiziente Planungsalternative ersetzt und unter sonst gleichen Bedingungen der Gesamtenergiebedarf neu ermittelt. Dadurch konnten die verschiedenen energetisch relevanten Stellschrauben von Logistikzentren identifiziert werden. Ausgehend von diesen Parameterstudien der Einzeluntersuchungen werden im Folgenden optimierte Konzepte mit den Planungsalternativen für die untersuchten Grundmodelle erstellt. Dabei wird nicht jede Planungsalternative, die einen geringeren Energiebedarf mit sich bringt, in die Kombination mit aufgenommen. Denn das Hauptkriterium für die Kombination der Planungsalternativen zu optimierten Grundmodellen liegt auf einem möglichst geringen Energiebedarf unter wirtschaftlichen Bedingungen. Somit werden Planungsalternativen, die eine hohe Investition mit Amortisationszeiten über dem Lebenszyklus der Alternative mit sich bringen, nicht berücksichtigt. Ein Beispiel hierfür sind die Fassadenfenster in der manuellen Lagerhalle, die ca. 80 % Mehrkosten verursachen, deren Einsparpotential aber bei gerade 3 % des Gesamtenergiebedarf liegt. Somit sind in den optimierten Varianten keine Fassadenfenster vorgesehen. Die einzelnen Planungsalternativen beeinflussen sich in Kombination im Gesamtsystem gegenseitig, wodurch die Reduzierung des Energiebedarfs der optimierten Grundmodelle niedriger als die Summe der Einsparungen der Einzeluntersuchungen der Grundelemente ausfällt.

Die resultierenden Energieflüsse durch Kombination von sinnvollen Planungsalternativen für die manuelle Lagerhalle sind in Abbildung 8 dargestellt. Hier wird auf den nicht regenerativen Energieträger Gas verzichtet und stattdessen Grundwasser als regenerativer Energieträger zur Wärmespeicherung eingesetzt. Der PV-Strom kann nur zum Teil genutzt werden, sodass ein Teil eingespeist werden muss. Um den Gesamtbedarf an Strom zu decken, muss weiterhin ein Teil aus dem Stromnetz eines Energieversorgers bezogen werden. Jedoch ist der eingespeiste Anteil an PV-Strom höher als der eingekaufte. Die Verladetore werden statt der Planen-Torabdichtung mit Vorsatzschleusen ausgestattet. Die Dachfenster aus dem Grundmodell werden in der optimierten Variante mit einem Anteil von 2 % an der Grundfläche und einer Standardverglasung aufgrund zu hoher Investitionen im Verhältnis zu den Energiebedarfsreduzierungen beibehalten. Auf Fassadenfenster wird in der optimierten Variante aus dem gleichen Grund verzichtet. Die mechanische Lüftungsanlage kann den Energiebedarf nicht reduzieren, weshalb es in den optimierten Varianten bei einer natürlichen Lüftung bleibt. Anders ist es bei der Beleuchtung, da hier die optimierte Variante mit einer Beleuchtungssteuerung ausgestattet wird und diese sich schon nach einem halben Jahr amortisiert. Bei der Intralogistik werden für die beiden FFZ-Arten die Varianten mit energieeffizienter Batterieladetechnologie und optimaler Betriebsweise ausgewählt. Grundsätzlich ist anhand der Energieflussbilder für die manuelle Lagerhalle ersichtlich, dass der Strom- und Raumwärmebedarf der manuellen Lagerhalle durch die Kombination der energieeffizienten Planungsalternativen in der optimierten Variante erheblich gesenkt werden kann und folglich auch die CO₂-Emissionen reduziert werden können.

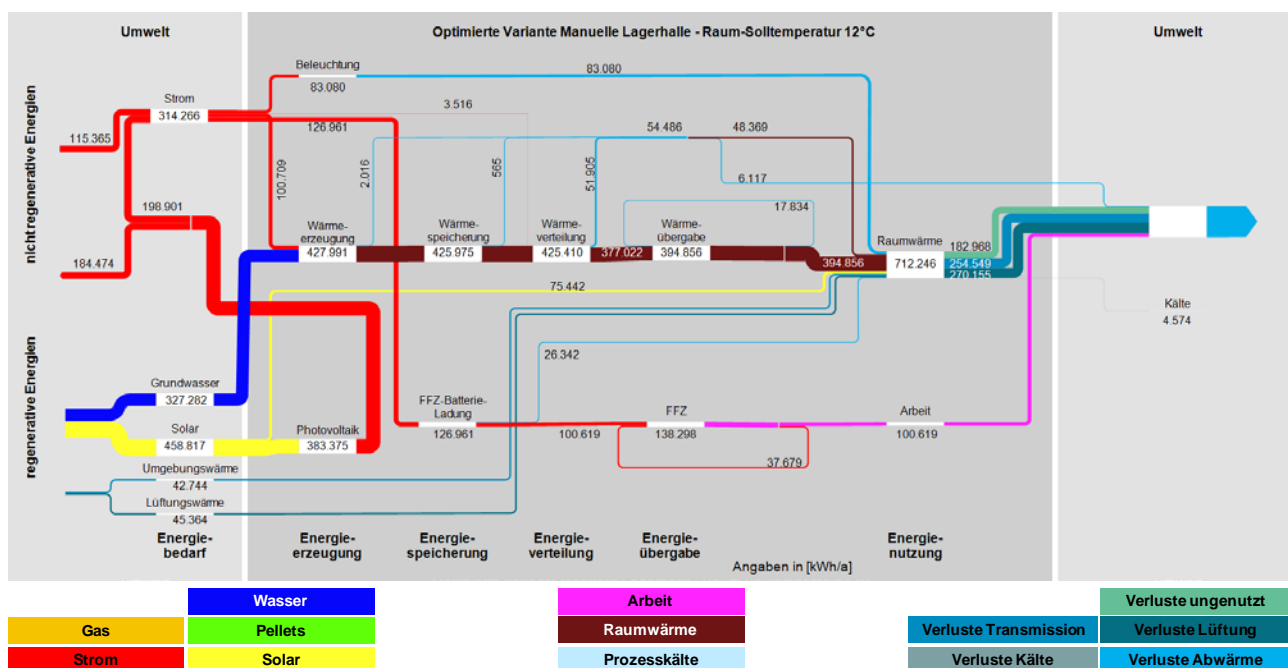


Abbildung 8. Energiebilanz manuelle Lagerhalle 12 °C optimierte Variante: Sankey-Diagramm aller bilanzierten Energieträger

Der Energiefluss im halbautomatischen Logistikzentrum durch Kombination von sinnvollen Planungsalternativen ist in Abbildung 9 zu sehen. Generell deckt sich die Auswahl der Planungsalternativen zu den Grundelementen 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, im Vergleich zur manuellen Lagerhalle, kleineren Dachfläche der Halle 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, sondern Umluftheizer, die von einem Hackschnitzelkessel zentral mit Wärme versorgt werden. Bei der Intralogistik wird der Schubmaststapler für den Nachschub in der PzW-Kommissionierung ebenfalls 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 aus-

getauscht. Bei den GLT-Ketten- und Rollenförderern wird die Variante im Grundmodell mit intermittierendem Betrieb gewählt und das HRL mit Energierückspeiseeinheiten ausgestattet. Je nach Art des Logistikgebäudes unterscheiden sich Höhe und Anteil der Bereiche und Anlagen am Gesamtenergiebedarf und somit auch die Stellschrauben zur Senkung der CO₂-Emissionen. Bei manuell betriebenen Logistikhallen liegen die größten Stellhebel im Bereich der Dämmeigenschaften der Gebäudehülle und der Wärmeerzeugung (hier durch Nutzung einer Grundwasser-Wärmepumpe). Durch weitere Maßnahmen sowie der Installation einer PV-Anlage zur Stromerzeugung ist bilanziell ein CO₂-neutrales Logistikzentrum realisierbar.

Im Falle der automatisierten Logistikzentren ändert sich die Verteilung des Energiebedarfs erheblich. Der Einfluss des Gebäudes auf den Energiebedarf sinkt. Aufgrund zunehmender Automatisierung im Lager wächst der Strombedarf der Materialflusstechnik. Dabei sinkt gleichzeitig der Wärmebedarf des Gebäudes, weil ein geringeres Raumvolumen für Mitarbeiter konditioniert werden muss und mehr Abwärme durch die Prozesse entsteht. Folglich werden die intralogistischen Optimierungen bei automatisierten Logistikzentren zur größten Stellschraube möglicher Energiebedarfsreduzierungen.

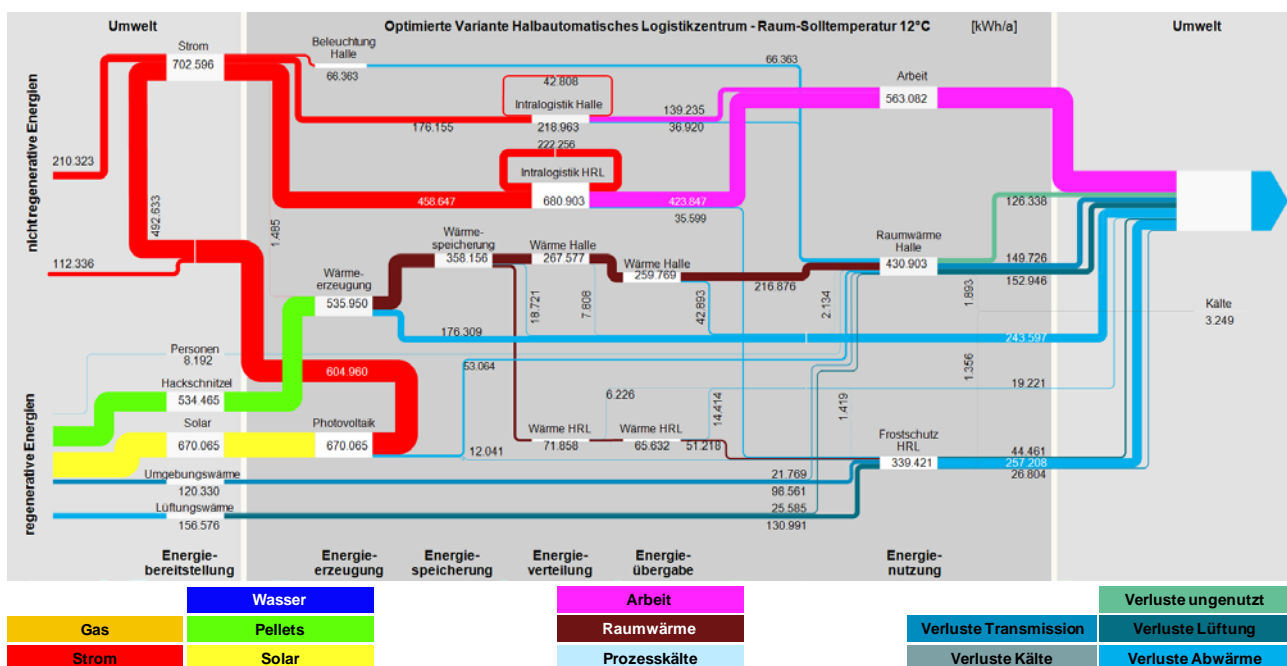


Abbildung 9. Energiebilanz halbautomatisches Logistikzentrum 12 °C optimierte Variante: Sankey-Diagramm aller bilanzierten Energieträger

6 DISKUSSION DER ERGEBNISSE

Mit einer systemischen Betrachtung wurden die Zusammenhänge und Auswirkungen von Planungsalternativen auf die Gesamtenergiebilanz von Logistikzentren untersucht. Dazu wurde zunächst ein abstraktes Modell des Sachsystems Logistikzentrum erstellt, indem systemrele-

vante Grundelemente identifiziert und die Wirkstruktur zwischen den Grundelementen der Bereiche Intralogistik, Gebäudetechnik und -hülle qualitativ beschreiben wurden. Die aufgenommenen Wirkungen sind auf einer hohen Abstraktionsebene idealisiert abgebildet, sodass auch im formalen Modell der Intralogistik der Einfluss von einzelnen Parametern auf Geräte- oder Komponentenebene nur

über den Wirkungsgrad betrachtet wird. Um die Auswirkungen von Planungsalternativen in diesem Kontext umfassender beschreiben zu können, sollten hier die Einflüsse detaillierter betrachtet werden.

Weiterhin sind für die Ermittlung der Energiebilanz viele Eingangswerte notwendig. Insbesondere für das Teilmodell der Intralogistik sind nicht immer alle Eingangsparameter bekannt. Vor allem in der Planungsphase liegen keine zustandsbasierten Energieverbräuche für die Materialflusstechnik vor. Dies wird durch die unterschiedlichen Ausprägungen jedes technischen Logistiksystems zusätzlich erschwert, weil die Anforderungen der Logistik und somit die zu erbringenden Logistikleistung immer unterschiedlich sind. Auch hier bedarf es weiterer Untersuchungen, um valide Referenzwerte für den Energiebedarf der Materialflusstechnik für variierende Logistikanforderungen zu ermitteln.

Somit können die dargestellten Ergebnisse der Untersuchungen zu den Auswirkungen von einzelnen Planungsalternativen nicht ohne weiteres für reale Systeme verallgemeinert werden. Denn die für eine fest definierte Logistikaufgabe durchgeführten Einzeluntersuchungen können keine Allgemeingültigkeit aufweisen. Jedoch zeigen die Ergebnisse Tendenzen auf, für welche Art von Logistikzentrum sich welche Planungsalternativen eignen. Liegen die Eingangsdaten für die Berechnung mit dem formalen Modell vor, ist es möglich, erste Aussagen zum Energiebedarf der Intralogistik zu treffen. Entsprechend der Problemstellung und dem Modellzweck können die Ergebnisse mit den aufgezeigten energetischen Stell-schrauben und Wechselwirkungen Planern von Logistikzentren unterschiedlicher Fachdisziplinen bei der Auswahl und Kombination von energieeffizienten Planungsalternativen unterstützen.

Für die Forschung bietet die durchgeführte Systemanalyse und Modellierung die Grundlage zur Erweiterung um das dynamische Verhalten des Systems und die Untersuchung der Auswirkungen auf den Energiebedarf des Gesamtsystems. Dies gilt zum einen für den Materialfluss und den Durchsatz, der für die Energieermittlung in diesem Beitrag als konstant angenommen wurde. Zum anderen können aufbauend auf den Grundmodellen auch die Wärmeströme mit dem Einfluss der Bewegungen der Materialflusstechnik dynamisch simuliert werden.

Auch die Erweiterung der Bilanzgrenzen um den Standort in Verbindung mit anderen Gebäuden für eine übergreifende Betrachtung der Wärmeenergie als auch einer intelligenten Stromversorgung, stellt unter dem Schlagwort „Smart Grids“ weiteren Forschungsbedarf dar. Hier gilt es weitere Synergieeffekte bezüglich Nutzung, Speicherung und Bereitstellung regenerativer Energien in Verbindung mit Logistikzentren zu untersuchen.

ANHANG

Tabelle 1. Randparameter aller Untersuchungsmodelle für die Ermittlung des Gesamtenergiebedarfs

Standort	München
Betriebszeiten	
Arbeitszeit	6:00 bis 22 Uhr
Schichtbetrieb	2-Schichten
Wochentage [d/w]	5
Jahresarbeitsstage [d/y]	252
Jährliche Nutzungsstunden zur Tagzeit [h]	2.688
Jährliche Nutzungsstunden Nachtzeit [h]	1.344
Täglicher Heizungsbetrieb (12 °C)	5:00-22:00 Uhr, 5 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

Tabelle 2. Spezifische Parameter der manuellen Lagerhalle für die Energiebilanzierung

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

Tabelle 3. Spezifische Parameter des halbautomatischen Logistikzentrums für die Energiebilanzierung

	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	-
Außenluftvolumenstrom [m ³ /m ² h]	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	-
Horizontalkommissionierer	7	
Hochhubwagen	8	
Kettenförderer GLT [m]	61,2	32,4
Rollenförderer GLT [m]	71,4	31,1

LITERATUR

- [Bos-1992] Bossel, H.: Modellbildung und Simulation. Vieweg, Braunschweig Wiesbaden: 1992.
- [Coo-2011] Cook, P.; Sproul, A.: Towards low-energy retail warehouse building. In: Architectural Science Review, Jg. 54 (2011) Nr. 3, S. 206-214.
- [DIN V 18599-10] DIN V 18599-10:2011-12: Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung, Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten. DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Berlin: Beuth.
- [DIN V 18599] DIN V 18599:2011-12: Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung, Teil 1 bis 11. DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Berlin: Beuth.
- [Ert-2013a] 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, Jg. (2013) Nr. 6, S. 12-15.
- [Ert-2013b] 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, Jg. (2013) Nr. 8, S. 12-15.
- [Gün-2013a] Günthner, W. A.: Planung technischer Logistiksysteme. Vorlesungsskriptum: Vorlesungsskriptum: Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik. Technische Universität München. 2013.
- [Gün-2013b] Günthner, W. A.: Planung technischer Logistiksysteme. Vorlesungsskriptum: Seminarunterlagen: Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik. Technische Universität München. 2013.
- [Gün-2015] Günthner, W. A.; Freis, J.: Energieeffiziente und CO₂-neutrale Logistikanlagen und -gebäude: Umsetzungsstand und Handlungsbedarf. Studie des Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München. Garching, 2015.
- [Gün-2013] Günthner, W. A.; Habenicht, S.: Erweiterte Logistiksystemplanung unter Einbeziehung

des Energieverbrauchs. Forschungsberichte Lehrstuhl fml, Garching. Garching, 2013.

- [Gün-2014] Günthner, W. A.; Hausladen, G.; Freis, J.; Vohlidka, P.: Das CO₂-neutrale Logistikzentrum - Entwicklung von ganzheitlichen Handlungsempfehlungen für energieeffiziente Logistikzentren. Forschungsbericht Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik und Lehrstuhl für Bauklimatik und Haustechnik, Technische Universität München. Garching, 2014.
- [Hab-2013] Habenicht, S.; Ertl, R.; Günthner, W. A.: Analytische Energiebedarfsermittlung von Intralogistiksystemen in der Planungsphase. In: ten Hompel, M. (Hrsg.): Tagungsband 9. Fachkolloquium der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik e. V. (WGTL), 17. und 18. September 2013 TU Dortmund, Lehrstuhl FLW und Fraunhofer-IML, Dortmund. S. 77-90
- [ITG-2011] Institut für Technische Gebäudeausrüstung Dresden; Universität Kassel Fachgebiet Bauphysik: Abschlussbericht: Gesamtanalyse – Energieeffizienz von Hallengebäuden. Institut für Technische Gebäudeausrüstung Dresden, Universität Kassel Fachgebiet Bauphysik., Dresden, 2011.
- [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, Technische Universität München. München, 2013.
- [Ler-2014] Lerher, T.; Edl, M.; Rosi, B.: Energy efficiency model for the mini-load automated storage and retrieval systems. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Jg. 70 (2014) Nr. 1-4, S. 97-115.
- [Men-2014] Meneghetti, A.; Monti, L.: Greening the food supply chain: an optimisation model for sustainable design of refrigerated automated warehouses. In: International Journal of Production Research, Jg. (2014) Nr. S. 1-21.
- [Rai-2011] Rai, D.; Sodagar, B.; Fieldson, R.; Hu, X.: Assessment of CO₂ emissions reduction in a distribution warehouse. In: Energy, Jg. 36 (2011) Nr. 4, S. 2271-2277.
- [Rop-1999] Ropohl, G.: Allgemeine Theorien: Eine Systemtheorie der Technik. Carl Hanser, München Wien: 1999.
- [Sch-2006] Schieferdecker, B.: Technische Tools im Industriellen Energiemanagement. In: Schieferdecker, B. (Hrsg.): Energiemanagement-Tools: Anwendung im Industrieunternehmen. Springer, Berlin Heidelberg: 2006. S. 7-98.
- [Sch-1985] Schmidt, B.: Systemanalyse und Modellaufbau: Grundlagen der Simulationstechnik. In: Möller, D.; Schmidt, B. (Hrsg.): Fachberichte Simulation Band 1 Springer, Berlin Heidelberg: 1985.
- [Tap-2015] Tappia, E.; Marchet, G.; Melacini, M.; Perotti, S.: Incorporating the environmental dimension in the assessment of automated warehouses. In: Production Planning & Control, Jg. 26 (2015) Nr. 10, S. 824-838.
- [VDI 3802] VDI Richtlinie 2198-2014 Blatt 1: Raumluftechnische Anlagen für Fertigungsstätten. VDI-Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik (GBG) Berlin: Beuth.
- [VDI 3637] VDI Richtlinie 3637-1996: Datenermittlung für langfristige Fabrikplanungen. VDI Gesellschaft für Produktion und Logistik Berlin: Beuth.
- [VDI 2198] VDI Richtlinie 2198-2012: Typenblätter für Flurförderzeuge. VDI Gesellschaft für Produktion und Logistik Berlin: Beuth.
- [Web-2012] Weber, J.: Logistikleistungen. In: Klaus, P.; Krieger, W.; Krupp, M. (Hrsg.): Gabler Lexikon Logistik: Management logistischer Netzwerke und Flüsse. Gabler, Wiesbaden: 2012.
- [ZUB-2012] Zentrum für Umweltbewusstes Bauen e. V.: Software ZUB Helena 2012 Ultra v6.2.

Dipl.-Wi.-Ing. Julia Freis,

Research Assistant at the Chair of Materials Handling, Material Flow, Logistics, Technische Universität München.

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wi.-Ing. Willibald A. Günthner,

Chairholder of the Chair of Materials Handling, Material Flow, Logistics, Technische Universität München.

Address: Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, Boltzmannstraße 15, 85748 Garching, Germany,
Phone: +49 89 289-15921, Fax: +49 289 15922,
E-Mail: kontakt@fml.mw.tum.de