

Schlussbericht

zu dem IGF-Vorhaben

Ableitung von Empfehlungen zur energie- und materialflusseffizienten Strukturierung und synergetischen Gestaltung von Fabriken (EnMaFap)

der Forschungsstellen

IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gemeinnützige GmbH

IFBP - Institut für Bauphysik der Leibniz Universität Hannover

MSA - münster school of architecture der Fachhochschule Münster

Das IGF-Vorhaben 17077 N der Forschungsvereinigung Bundesvereinigung Logistik e. V. (BVL) wurde über die



im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Hannover, 27.02.2014

Ort, Datum

Philip Rochow

Name und Unterschrift des Projektleiters
an der Forschungsstelle (IPH)

Hannover, 27.02.2014

Ort, Datum

Heide Ackerbauer

Name und Unterschrift des Projektbearbeiters
an der Forschungsstelle (IFBP)

Hannover, 27.02.2014

Ort, Datum

Thomas Lilge

Name und Unterschrift des Projektbearbeiters
an der Forschungsstelle (MSA)

Inhaltsverzeichnis

1 Zusammenfassung	3
2 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung	4
3 Gegenüberstellung angestrebter Teilziele und erzielter Ergebnisse	5
4 Darstellung der erzielten Ergebnisse	11
4.1 BS 1: Identifikation potenzieller Kriterien zur Bewertung von Layoutvarianten aus Sicht der Logistik, Bauphysik und Architektur	11
4.1.1 Kriterien zur Bewertung aus Sicht der Logistik	11
4.1.2 Kriterien zur Bewertung aus Sicht der Bauphysik.....	14
4.1.3 Kriterien zur Bewertung aus Sicht der Architektur	19
4.2 BS 2: Entwicklung eines Fabrikmodells und geeigneter Bewertungskennzahlen .	20
4.2.1 Identifikation und Zusammenführung von elementaren Fabrikbereichen	20
4.2.2 Entwicklung eines Planungsrasters.....	31
4.2.3 Bewertungskennzahlen aus den jeweiligen Fachsichten.....	32
4.2.4 Aggregation der Einzelkennzahlen zu einer Gesamtbewertungskennzahl	42
4.3 BS 3: Untersuchung mittels Fabrikmodell und Ableitung von Handlungsempfehlungen	43
4.3.1 Untersuchungen mittels Fabrikmodell	43
4.3.2 Ableitung von Handlungsempfehlungen zur energie- und materialflusseffizienten Fabrikplanung	70
4.4 BS 4: Implementierung des Fabrikmodells in einem Software-Demonstrator	72
4.4.1 Entwicklung eines Software-Demonstrators zur Bewertung von energie- und materialflusseffizienten Fabriken.....	72
4.4.2 Entwicklung eines Ablaufs zur systematischen Bewertung verschiedener Layoutvarianten und Auswahl einer Vorzugsvariante.....	79
5 Innovativer Beitrag und wirtschaftlicher Nutzen	81
5.1 Voraussichtliche Nutzung der angestrebten Forschungsergebnisse.....	81
5.2 Möglicher Beitrag zur Steigerung der Leistungs- und Wettbewerbsfähigkeit kleiner und mittlerer Unternehmen	81
6 Verwendung der Zuwendung	82

7 Umsetzung der Forschungsergebnisse / Transfer der Ergebnisse in die Wirtschaft.....	82
8 Durchführende Forschungsstellen.....	86
8.1 Leiter der Forschungsstellen.....	87
8.2 Projektleiter und -bearbeiter.....	88
9 Förderhinweis.....	90
10 Literaturverzeichnis	91
11 Abbildungsverzeichnis	94
12 Tabellenverzeichnis	97
13 Anhang	98
13.1 Anhang A1: Entwickelte ID-Cards zur Charakterisierung verschiedener Fabrikbereiche	98

1 Zusammenfassung

Aufgrund steigender Energiekosten und angestrebter Klimaschutzziele rückt das Ziel einer hohen Energieeffizienz auch im Bereich der Industrie zunehmend in den Fokus betrieblicher Optimierungsmaßnahmen. Die Klimaschutzziele der Bundesregierung sehen daher unter anderem eine Verbesserung der Energieproduktivität (=wirtschaftliche Leistung / eingesetzte Primärenergie) bis 2020 gegenüber 1990 um 100 % vor [BUN02]. Um dieses Ziel zu erreichen, „ist eine Erhöhung der Energieeffizienz über die gesamte Energiekette notwendig“, so das Bundesministerium.

Neben der Optimierung der Einzelprozesse und energetisch optimierter Layoutplanung im Hinblick auf logistisch sinnvolle und ökonomisch effektive Anordnung kann sich die Anordnung unterschiedlich temperierter Teilbereiche einer Fabrik energetisch positiv auswirken und Raum für Energieeinsparpotential bieten. Eine Betrachtung der Energieeffizienz vor dem Hintergrund der rein räumlichen Anordnung von klimatisch unterschiedlichen Bereichen wird bei der Planung von Fabriken heute jedoch bislang nicht vorgenommen. Logistische und architektonische sowie klimatische Einflussgrößen werden in unterschiedlichen Planungsschritten berücksichtigt und stehen nicht selten im Widerspruch zueinander, was unter Umständen bei der Planung einer Fabrik viele Iterationsschritte notwendig machen kann oder sogar dazu führt, dass im Fabrikbetrieb Einbußen in einigen Bereichen hingenommen werden. Häufig wird versucht, diese Einbußen dann durch aufwändige und teure technische Lösungen auszugleichen bzw. zu minimieren.

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurden Kriterien identifiziert, die eine Bewertung von Fabriken vor dem Hintergrund von Energie- und Materialflusseffizienz erlaubt. Darauf aufbauen wurde ein Fabrikmodell entwickelt, anhand dessen eine Bewertung von Layoutvarianten sowohl aus logistischer Sicht als auch aus bauphysikalischer sowie architektonischer Sicht möglich ist. Dieses Fabrikmodell umfasst die Definition von typischen Fabrikbereichen, einem Planungsraster, Bewertungskennzahlen aus den drei Fachsichten sowie eine Aggregation der Bewertungskennzahlen zu einer Gesamtbewertungskennzahl. Aus den anschließenden Untersuchungen am Fabrikmodell konnten Handlungsempfehlungen zur energie- und materialflusseffizienten Fabrikplanung abgeleitet werden.

Zur Sicherstellung der aufwandsarmen und einfachen Anwendung der Methode - vor allem in kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) - wurde die Bewertungsmethode in einem Software-Demonstrator implementiert. Auf diese Weise können KMU zielgerichtet Fehlplanungen bei der Fabrikplanung vermeiden. Die Praxistauglichkeit des entwickelten Ansatzes ist durch eine simulative Validierung und die enge Abstimmung mit den Partnern aus den Industrieunternehmen sichergestellt.

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

2 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

Ein wesentlicher Kostenfaktor für produzierende Unternehmen ist Energie. Die Entwicklung der Energiekosten zeigt, dass dieser Faktor in seiner Bedeutung in der Vergangenheit stark zugenommen hat und weiter zunehmen wird. So sind die Strom- und Erdgaspreise zwischen 2000 und 2006 um ca. 70 % gestiegen [BMW08]. Da Experten weiter steigende Energiepreise aufgrund zunehmender Ressourcenknappheit prognostizieren [ZEW10] und die meisten energieverbrauchenden Prozesse (z. B. Kühlung) nicht oder nur sehr geringfügig durch andere Produktivkräfte wie menschliche Arbeit ersetzt werden können, stehen Unternehmen zukünftig vor der Herausforderung steigender Energiekosten. Neben wirtschaftlichen Randbedingungen zwingen strenger werdende gesetzliche Auflagen Unternehmen zur Erhöhung der Energieeffizienz von Gebäuden. Zusätzlich ist die globale Schonung von Ressourcen und die Reduzierung von Treibhausgasen wie CO₂ ein unabwendbares Gebot zur Milderung der globalen Erwärmung.

Aus den genannten Gründen muss die Vermeidung von Energieverschwendung ein erstrangiges Managementziel bei der Optimierung bestehender und der Einrichtung neuer Produktionsstätten werden. Maßnahmen, die zu einer Erhöhung der Energieeffizienz einer Fabrik führen, stehen jedoch häufig im Widerspruch zu den etablierten Zielgrößen wie Materialflusseffizienz. Aktuell fehlen in der Fabrikplanung die notwendigen Instrumente, um einem derartigen Zielkonflikt befriedigend begegnen zu können. Die Auswirkungen energieeffizienter Fabrikstrukturen auf die übrigen Ziele der Fabrikplanung sind bis heute nicht hinreichend erforscht. Zur Hebung von Energieeinsparpotenzialen sind integrierte Fabrikplanungstechniken dringend erforderlich. Derartige integrierte Herangehensweisen besitzen das Potenzial, bereits in einer frühen Planungsphase einer Fabrik neben materialflusstechnischen und architektonischen Aspekten auch die energieeffiziente Gestaltung zu berücksichtigen und somit über die gesamte Phase der Fabriknutzung geringere Kosten zu verursachen. Hierbei liegt das Ziel darin, unter gestalterischen Gesichtspunkten von Anfang an die genannten Fachbereiche Logistik, Architektur und Bauphysik gleichermaßen zu berücksichtigen. So kann beispielsweise durch die Berücksichtigung der thermischen Wechselbeziehungen verschiedener Fabrikbereiche eine Energieeinsparung allein durch die Optimierung der Anordnung erreicht werden, die andernfalls nur durch äußerst energieeffiziente Anlagentechnik erreichen werden kann. Jedoch sind die jeweiligen Zielgrößen der drei Fachsichten teilweise widersprüchlich. So kann eine energetisch optimierte Anordnung von Bereichen im vollkommenen Gegensatz zur Materialflusseffizienz stehen o.ä.

Für die folgenden Ausführungen zu den Fachsichten sind die jeweiligen Forschungsinstitute verantwortlich. Diese inhaltlichen Ausführungen der Forschungsstellen sind jeweils in entsprechende Abschnitte unterteilt bzw. mit Sätzen eingeleitet, die Rückschlüsse auf die bearbeitende Forschungsstelle zulassen.

3 Gegenüberstellung angestrebter Teilziele und erzielter Ergebnisse

Ziel des Forschungsvorhabens war die Ableitung von Empfehlungen zur energie- und materialflusseffizienten Strukturierung und synergetischen Gestaltung von Fabriken.

Zur Erreichung des Ziels wurden vier Teilziele (TZ) festgelegt. Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden 4 Bearbeitungsschritte durchgeführt, um die Teilziele zu erreichen.

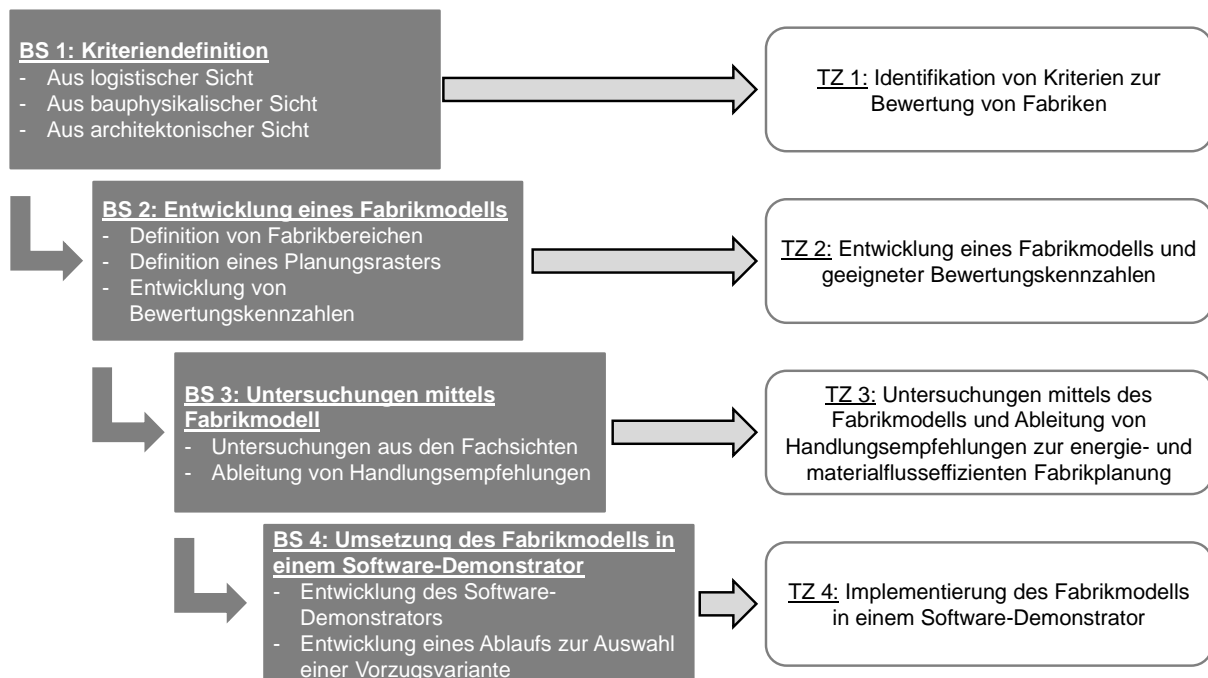


Abbildung 1: Darstellung des Projektablaufs in Bearbeitungsschritten und Gegenüberstellung der Teilziele

Im Folgenden werden die Ergebnisse der vier Bearbeitungsschritte den vier festgelegten Teilzielen (kursiv gedruckte Abschnitte) gegenübergestellt.

Teilziel 1: Identifikation von Kriterien zur Bewertung von Fabriken

Angestrebtes Teilziel:

Teilziel 1 (TZ 1) besteht in der Identifikation geeigneter Kriterien zur Bewertung von Fabriken aus Sicht der Logistik, der Bauphysik sowie der Architektur. Diese sollen die Anforderungen aus den drei Fachsichten (z. B. Anmutung aus Sicht der Architektur, Energieeffizienz aus Sicht der Bauphysik und Materialflusseffizienz aus Sicht der Logistik) zur ganzheitlichen Bewertung in geeigneter Weise abbilden.

Korrespondierende Ergebnisse des Vorhabens:

Zur Erreichung von TZ 1 wurde eine umfassende Literaturrecherche durchgeführt. Darüber hinaus wurden Fragebögen und Checklisten erstellt und unter den Teilnehmern des Projekt-begleitenden Ausschusses (PbA) verteilt. Jedoch führte eine sehr geringe Rückläuferquote dazu, dass auf die Literaturrecherche zur Identifikation geeigneter Kriterien zurückgegriffen wurde.

Als Ergebnis lässt sich festhalten, dass aus logistischer Sicht die drei Bereiche Wandlungsfähigkeit, Materialflusseffizienz sowie Kommunikationsflusseffizienz von zentraler Bedeutung sind. Dabei kann der Bereich Wandlungsfähigkeit in die Kriterien Modularität, Mobilität, Skalierbarkeit, Kompatibilität sowie Universalität gegliedert werden.

Die Materialflusseffizienz kann durch die Kürze der Transportwege, die Gradlinigkeit des Materialflusses sowie dessen Überschneidungsfreiheit beschrieben werden. Die Kommunikationsflusseffizienz kann in ähnlicher Weise bewertet werden. Die Kürze der Kommunikationswege stellt dabei das wichtigste Kriterium dar. Darüber hinaus trägt die Offenheit der Bereiche zu einer effizienten Kommunikation bei.

Aus bauphysikalischer Sicht kommt der optimalen Nutzung interner Wärmequellen eine bedeutende Rolle zu. Aufgrund von energieintensiven Fertigungsprozessen in Fabriken können je nach Fertigungsart Prozessenergien entstehen, die in benachbarten Bereichen als interne Wärmequellen zur Senkung des Heizenergiebedarfs beitragen, ohne jedoch zu einer Überhitzung oder Steigerung eines Kühlenergiebedarfs zu führen. Eine unter vorgenannten Kriterien gestaltete energieflossoptimierte Anordnung von Fabrikbereichen hat direkten Einfluss auf den Nutzenergiebedarf, sodass unterschiedliche Fabriklayouts über den Heiz- sowie den Kühlenergiebedarf bewertet werden können.

Aus architektonischer Sicht werden die Kriterien Tageslichtversorgung und Sichtbeziehung zur äußeren Umwelt, Förderung der Kommunikation in Büro- und Sozialbereichen durch eine rechteckige Bereichsform sowie der mögliche Abstand zwischen Stützpfeilern bewertet.

Teilziel 2: Entwicklung eines Fabrikmodells und geeigneter Bewertungskennzahlen

Angestrebtes Teilziel:

Das zweite Teilziel ist die Entwicklung eines Fabrikmodells, welches eine Fabrik derart abbildet, dass eine Bewertung aus den drei Fachsichten ermöglicht wird. Dazu sollen verschiedene Fabrikbereiche aus den Fachsichten identifiziert und anschließend systematisch zusammengeführt werden, sodass diese alle Anforderungen aus

Sicht der Logistik, der Bauphysik sowie der Architektur abbilden. Darüber hinaus ist eine Möglichkeit zur Bewertung von Layoutvarianten im Fabrikmodell zu entwickeln.

Korrespondierende Ergebnisse des Vorhabens:

Aus den drei Fachsichten wurden in einem ersten Schritt neun elementare Fabrikbereiche identifiziert, die im Rahmen von Neu- oder Restrukturierungsplanungen von Fabriken zumindest teilweise zu berücksichtigen sind. Dazu gehören drei Arten von Fertigungsbereichen (niedriger, mittlerer und hoher Wärmeenergieeintrag), Wareneingangslager, Warenausgangslager, Lager in der Produktion, Montage, Technik sowie Büro- und Sozialräume. Zur Charakterisierung dieser Fabrikbereiche wurden sogenannte ID-Cards entwickelt, die unter anderem die Nutzungszeiten, Wärmeenergieeinträge, Raum-Solltemperaturen, logistische Belange und bauliche Beschaffenheiten beschreiben.

Um verschiedene Fabriklayoutvarianten hinsichtlich der definierten Kriterien aus den drei Fachsichten bewerten zu können, wurde vorab ein vereinfachtes Planungsraster mit Rasterelementen (6 m x 6 m x 8 m (x|y|z)) aus den Anforderungen der Architektur definiert. In diesem Planungsraster können die Rasterelemente variabel angeordnet werden. Somit kann ein Fabrikbereich aus einzelnen Rasterelementen gebildet und ein gesamtes Fabriklayout wiederum mittels unterschiedlich angeordneter Fabrikbereiche zusammengesetzt werden.

Aus den in TZ 1 identifizierten Kriterien wurden im Anschluss Bewertungskennzahlen entwickelt, die einen Vergleich verschiedener Fabriklayouts aus den drei Fachsichten Logistik, Bauphysik und Architektur zulassen.

Aus logistischer Sicht wurden die Möglichkeiten der Material- und Kommunikationsflüsse in Fabriklayouts bewertet. Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde versucht, eine allgemeingültige Aussage über die Material- und Kommunikationsflussbeziehungen verschiedener Bereiche zu treffen. Jedoch zeigte sich, dass eine solche Aussage nicht möglich ist. Daher wurden dynamisch anpassbare Kommunikations- und Materialflussmatrizen als geeignete Grundlage zur Bewertung identifiziert.

Aus bauphysikalischer Sicht wurden mit der Simulationssoftware TRNSYS [TRN17] Untersuchungen verschiedener Modulanordnungen durchgeführt, um daraus Aussagen über den Einfluss der Anordnung der Fabrikbereiche auf den Nutzenergiebedarf treffen zu können. Der positive oder negative Einfluss von Wärmeströmen auf den Kühl- und Heizenergiebedarf durch die Anordnung von Fabrikbereichen bildet hierbei die Bewertungsgröße. Über die Lagebeziehung eines Fabrikbereichs in seiner Umgebung, ausgedrückt in Kontaktflächen zu anderen Bereichen, konnten anhand der ermittelten Energiebedarfe für die einzelnen Fabrikbereiche Aussagen über energetische Wechselwirkungen getroffen werden. Somit wurde die Verortung eines Fabrikbereichs innerhalb des Fabriklayouts bewertbar.

Aus architektonischer Sicht wird die Form von Büro- und Sozialbereichen, die Versorgung dieser Bereiche mit Tageslicht durch die Position im Layout und der maximalen Tiefe der Bereiche sowie ein möglicher Abstand von tragenden Gebäudestützen bewertet.

Teilziel 3: Untersuchung mittels des Fabrikmodells und Ableitung von Handlungsempfehlungen zur energie- und materialflusseffizienten Fabrikplanung

Angestrebtes Teilziel:

Teilziel 3 besteht in der Untersuchung verschiedener Bereichsanordnungen mittels des entwickelten Fabrikmodells. Diese Untersuchungen sollen dazu dienen, im Anschluss Handlungsempfehlungen zur energie- und materialflusseffizienten Fabrikplanung (z.B. Anordnung von Bereichen mit Wärmeenergieüberschuss neben Bereichen mit Wärmeenergiebedarf) ableiten zu können.

Korrespondierende Ergebnisse des Vorhabens:

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden systematisch verschiedene Bereichsanordnungen in Fabriken im Fabrikmodell erstellt, die zur weiteren Untersuchung dienten. Dabei wurden in einem Raster von 5 x 5 Rasterelementen (insgesamt 30 m x 30 m) den architektonischen Vorgaben folgend als kleinste sinnvolle Einheit für ein Fabrikgebäude verschiedene Anordnungsmöglichkeiten für Büro- und Sozialräume sowie Montage- und Fertigungsbereiche vorgegeben. Die Kombination dieser Anordnungsmöglichkeiten stellt die Grundlage für die erstellten Fabriklayouts dar (vgl. Abschnitt 4.3.1).

Die Untersuchungen der Layouts geschahen aus logistischer Sicht mit Hilfe fest definierter Material- und Kommunikationsflussbeziehungen. Da jedoch die Material- und Kommunikationsflussbeziehungen von Unternehmen zu Unternehmen unterschiedlich sind, kann eine allgemeingültige Aussage über die Anordnung zweier Bereiche auf Basis fester Beziehungen nicht getroffen werden. Aus den Untersuchungen konnten aus logistischer Sicht jedoch Handlungsempfehlungen dahingehend abgeleitet werden, dass Bereiche, die starke Materialflussbeziehungen besitzen, immer direkt aneinander liegen sollten. Ebenso verhält es sich mit den Kommunikationsflussbeziehungen, wobei jedoch der Kommunikationsfluss selten eine solche hohe Bedeutung hat, wie der Materialfluss.

Aus bauphysikalischer Sicht konnten auf der Grundlage der Untersuchungen an den entwickelten Fabriklayoutvarianten entsprechende Handlungsempfehlungen zur energetisch optimierten Anordnung der Fabrikbereiche abgeleitet werden. Grundsätzliche positive und negative Energieflussbeziehungen konnten identifiziert und in eine

Energieflussmatrix, die die energetische Lagebeziehung der einzelnen Fabrikbereiche zueinander bewertet, überführt werden.

Aus architektonischer Sicht konnten Empfehlungen bzgl. der Lage und Form der Büro- und Sozialbereiche sowie dem möglichen Abstand der Stützpfeiler gemacht werden.

Abschließend kann festgehalten werden, dass im Rahmen des Forschungsprojekts insgesamt 15 Handlungsempfehlungen abgeleitet werden konnten. Diese sind ausführlich in Abschnitt 4.3.2 dargestellt.

Teilziel 4: Implementierung des Fabrikmodells in einem Software-Demonstrator

Angestrebtes Teilziel:

Das vierte Teilziel umfasst die Implementierung des Fabrikmodells in einem Software-Demonstrator. Dies soll ermöglichen, dass das entwickelte Modell aufwandsarm in der Praxis anzuwenden ist.

Korrespondierende Ergebnisse des Vorhabens:

Zur aufwandsarmen Anwendung des entwickelten Fabrikmodells wurde ein Software-Demonstrator programmiert. Um eine möglichst kostengünstige Anwendung vor allem in KMU sicher zu stellen, wurde dieser auf Basis von MS Excel mit Visual Basic für Applications erstellt. Der Software-Demonstrator umfasst vier Schritte, durch die der Nutzer systematisch geleitet wird und anhand derer der Nutzer Layouts aus logistischer, bauphysikalischer sowie architektonischer Sicht bewerten kann.

Nach Rücksprache mit den Projektpartnern und Teilnehmern des PbA konnte der entwickelte Software-Demonstrator verbessert werden und steht nun als Planungshilfe zur Verfügung.

Reale Optimierungen konnten nicht durchgeführt werden, da bei keinem der Projektpartner aktuell akuter Handlungsbedarf bestand und diese Optimierungen auch meist mit hohen Aufwendungen in Verbindung standen.

Im Anschluss wurde ein Ablaufplan für die systematische Bewertung von Fabriklayouts und der Auswahl einer Vorzugsvariante entwickelt. Dieser Ablaufplan umfasst elf Schritte:

- Sammeln und Verarbeiten von Daten,
- Definition von Gewichtungen für die Bewertungskennzahlen,
- Erstellung einer ersten Layoutvariante,
- Bewertung aus Sicht der drei Fachbereiche,
- Errechnung der Gesamtbewertungskennzahl,
- Erstellung einer Layoutvariante,

- Bewertung aus Sicht der drei Fachbereiche,
- Errechnung der Gesamtbewertungskennzahl,
- Vergleich der Alternativen und Auswahl der Vorzugsvariante,
- Durchführung einer Sensitivitätsanalyse und
- Ggf. weiterer Durchlauf mit weiteren Layoutvarianten.

4 Darstellung der erzielten Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die erzielten Ergebnisse dargestellt. Die Darstellung erfolgt in vier logisch aufeinander aufbauenden Bearbeitungsschritten. Für jeden Bearbeitungsschritt (BS) werden die erzielten Ergebnisse ausführlich beschrieben.

4.1 BS 1: Identifikation potenzieller Kriterien zur Bewertung von Layoutvarianten aus Sicht der Logistik, Bauphysik und Architektur

4.1.1 Kriterien zur Bewertung aus Sicht der Logistik

Die Anforderungen an zukunftsfähige Fabriken stellen Fabrikplaner vor große Herausforderungen. Diese resultieren aus den sich stetig ändernden Rahmenbedingungen, die die Märkte bilden. Warnecke [WAR93] und Westkämper [WES99 a, b, c; WES00] prägten den Begriff des turbulenten Handlungsumfelds, welches die Rahmenbedingungen erfasst.

Um in diesem Umfeld überleben und erfolgreich sein zu können, müssen Unternehmen alle Anstrengungen darauf fokussieren, aus bestehenden Produktionssystemen einen optimalen Output zu generieren bzw. bei neuen Produktionssystemen ein für den geplanten Output optimalen Input bereitzustellen. Um der im turbulenten Handlungsumfeld vorherrschenden stetigen Veränderung entgegen zu stehen, müssen Produktionssysteme wandlungsfähig gestaltet sein. Aus logistischer Sicht ist zwischen fünf Wandlungsbefähigern zu unterscheiden:

- **Universalität** beschreibt die Eigenschaft von Betriebsmitteln, Organisations- sowie Raum- und Gebäudetechnikelementen unabhängig einsetzbar zu sein. Dies kann durch eine allgemein gehaltene Gestaltung oder Dimensionierung des Planungsobjekts erreicht werden [WIE05].
- **Mobilität** steht für räumliche Flexibilität der Planungsobjekte. Diese wird durch die Beweglichkeit der Objekte ermöglicht [WIE05]. Beispiele hierfür sind Rollen- oder Schienensysteme für Maschinen, aber auch bewegliche Trennwände innerhalb eines Gebäudes.
- **Skalierbarkeit** ist gleichzusetzen mit der Fähigkeit des Fabrikelements, -moduls oder einer ganzen Fabrik, sich erweitern bzw. reduzieren zu lassen [WIE05]. Ein Beispiel dafür ist eine Anordnung nach dem Spine-Konzept, welches es dem Betreiber ermöglicht, Erweiterungen durchzuführen. Dabei kann zwischen Mikro- (Verlängerung der einzelnen Fertigungsflächen) und Makroerweiterung (Verlängerung des Spines) unterschieden werden.

- **Kompatibilität** schafft eine Vernetzungsfähigkeit verschiedener Module oder Elemente durch die Schaffung geeigneter Schnittstellen (bspw. Strom) [WIE05].
- **Modularität** zeigt sich sowohl bei Betriebsmitteln, Gebäudeelementen und der Gebäuderasterung, ist aber auch auf organisatorischer Ebene von besonderer Bedeutung [WIE05]. Dabei beinhaltet der Begriff der Modularität stets eine Autonomie des Planungsobjekts, aber auch eine Standardisierung, die eine Verbindung verschiedener Objekte ermöglicht. Es wird vorausgesetzt, dass der Aufbau eines modularen Fabrikelements aus standardisierten, funktionsfähigen und aus vorprüfenden Einheiten besteht [WIE05]. Die Modularität zählt als besonderer Schlüsselfaktor bei der Umsetzung von wandlungsfähigen Fabriken [WIE05], da sie in der ganzen Fabrik anwendbar ist und die Austausch-, Erweiterbarkeit und Reduktion von Fabrikmodulen bzw. Fabrikelementen vereinfacht.

Neben der Anforderung der Wandlungsfähigkeit als Grundlage für die Zukunftsfähigkeit einer Fabrik muss zur Optimierung des Outputs der Materialfluss bestmöglich ausgestaltet werden. Der Materialfluss wird nach VDI 3300 [VDI'73] als „räumliche, zeitliche und organisatorische Verkettung aller Vorgänge beim Gewinnen, Be- und Verarbeiten sowie der Verteilung von stofflichen Gütern innerhalb festgelegter Bereiche“ definiert. Materialflussprozesse lassen sich in Beschaffungs-, Distributions- und Produktionsprozesse gliedern [GRU09]. Oft erfolgt auch eine Unterteilung in einen (Betriebs-) internen und externen Materialfluss [GRU09; MAR04]. Der externe Materialfluss befasst sich mit dem Transport von Gütern und Waren zur und von der Fabrik, der interne Materialfluss mit Materialbewegungen innerhalb des Fabrikgeländes. Der Materialfluss ist im Falle einer Optimierung ganzheitlich und über die örtlichen Restriktionen zu betrachten. Im Rahmen der Fabrikplanung wird hauptsächlich der interne Materialfluss adressiert. Der Materialfluss ist aufgrund der hohen Kostenrelevanz ein ausschlaggebendes Kriterium für die Planung einer Fabrik [GRU09].

Materialflussbeziehungen weisen nach *GRUNDIG* [GRU09] sowohl qualitative als auch quantitative Merkmale auf. Die qualitativen Merkmale werden bestimmt durch den technologischen Aufbau der Produktionsstruktur und können sowohl durch das Vorhandensein des Materialflusses sowie seine Flussrichtung beschrieben werden. Eine quantitative Beschreibung ist über die Materialflussintensität zwischen den Bereichen möglich, d. h. Mengen- und zeitlichen Erfassung des Materialflusses.

Dementsprechend ergeben sich drei Kriterien, anhand derer die Güte des Materialflusses innerhalb einer Fabrik beschrieben werden kann:

- **Transportwege** sollten immer möglichst kurz gehalten werden. Die Materialflussarbeit W_M nach HELBING [HEL10] aus dem Produkt von bewegter Materialmenge und der Transportweglänge errechnet werden:

$$W_M = M \times s$$

mit: W_M : Materialflussarbeit,
M: Menge,
s: Transportweglänge.

Da die Menge des bewegten Materials nicht durch die Planung der Anordnung von Systemen beeinflusst werden kann, kann die Materialflussarbeit, die keine wertschöpfende Tätigkeit darstellt, minimiert werden kann, wenn die Wege zwischen Quelle und Senke minimiert werden.

- **Überschneidungsfreiheit** des Materialflusses stellt eine weitere Anforderung dar. Für klar strukturierte Abläufe innerhalb einer Fabrik sind sich nicht kreuzende Materialflüsse von essentiellm Vorteil, da jede Einheit, mit der Material bewegt wird, einen definierten Weg nimmt und nicht mit anderen Einheiten vertauscht werden kann.
- Die **Gradlinigkeit** des Materialflusses verhilft ebenfalls zu klaren Abläufen innerhalb einer Fabrik. Kann zu jeder Einheit, mit der Material bewegt wird, deutlich identifiziert werden, welchen Weg sie bisher nahm und welche Stationen noch zu durchlaufen sind, trägt dieses zur Klarheit der Abläufe in der Fabrik bei.

Über den physischen Materialfluss hinaus wird in der Fabrikplanung die Möglichkeit effektiver Kommunikation beeinflusst. Der Kommunikationsfluss ist ein Teil des Informationsflusses. Er ist definiert als „die zeitlich Abfolge aufeinanderfolgender Informationen“ [JÜN96]. Informationsflüsse sind meist untereinander stark vernetzt, können aber auch in Abhängigkeit von ihrer Funktion an Material- und Energieflüsse gekoppelt oder in diesen integriert sein [SCH04].

Zur Übertragung von Information wird stets ein Medium benötigt. Heutzutage wird ein Großteil der Information elektronisch durch den Einsatz von Computern [SCH04] übertragen. Dieser Teil der Informationsübertragung, der zum Beispiel Kabelkanäle oder Schächte benötigt, kann flexibel in die Planung eingebunden werden und benötigt daher keine besondere Betrachtung bei der Planung eines Fabriklayouts. Räumlichkeiten bspw. für Serverschränke oder Haustechnik sind allerdings in der Planung zu berücksichtigen.

Eine andere Möglichkeit der Informationsübertragung findet durch den Materialfluss statt [KET10]. Beispiele hierfür sind Barcode- oder RFID-Systeme, die mit dem Material fließen. Da der Materialfluss als eigenständiges Kriterium betrachtet wird, wird der Informationsfluss in diesem Zusammenhang nicht gesondert behandelt. So verbleibt für die Betrachtung des Informationsflusses als Kriterium die Umsetzung des Kommunikationsflusses. Der Kommunikationsfluss ist eine Teilmenge des Informationsflusses und umfasst alle ausgetauschten Informationen zwischen Personen in einem Bereich und zwischen verschiedenen Bereichen [KET10]. Für eine optimale Auslegung des Kommunikationsflusses ist es wichtig, dass durch die Anordnung der Bereiche zueinander eine hohe Kommunikationsvernetzung entsteht [HEN96]. Dies kann zum Beispiel durch Sichtintegration zweier Bereich geschehen [GRU09]. Somit ergeben sich folgende zwei Kriterien, die den Kommunikationsfluss beschreiben:

- **Kurze Wege** bei direkter Kommunikation beeinflussen die Güte des Kommunikationsflusses. Analog zu den kurzen Transportwegen, bietet räumliche Nähe beim Kommunikationsfluss den Vorteil der Minimierung von unnötigen Wegen.
- Die **Offenheit der Bereiche** verbessert die oben genannte Sichtintegration. Werden Bereiche nicht durch Wände oder ähnliches von anderen Bereichen abgetrennt, können Informationen besser ausgetauscht werden.

4.1.2 Kriterien zur Bewertung aus Sicht der Bauphysik

Die energetische Beurteilung eines Gebäudes wird überwiegend zur qualitativen Auslegung der Anlagentechnik und der Bewertung der Gebäudehülle zur Erfüllung des öffentlich rechtlichen Nachweises gemäß aktuell gültiger Energieeinsparverordnung EnEV'09 durchgeführt. Hierzu werden insbesondere im Falle einer Fabrik, also eines Nichtwohngebäudes die Berechnungsmethoden gemäß der Normenreihe DIN V 18599 [DIN07] angewendet. Die Systemgrenze dieser Berechnungen bildet die wärmeübertragende Umfassungsfläche beheizter Bereiche. Zur Beurteilung wird der zur Aufrechterhaltung definierter Randbedingungen benötigte Energiebedarf für Beheizung, Kühlung, Belüftung, Beleuchtung und Trinkwarmwasser herangezogen.

Bei Nichtwohngebäuden wird das Gebäude hierzu in sogenannte Nutzungszonen eingeteilt. Nutzungszonen umfassen Bereiche mit gleichen klimatischen Anforderungen. Dabei werden hinsichtlich des zu bilanzierenden Heiz- und Kühlenergiebedarfs auftretende Wärmequellen und –senken innerhalb der Nutzungszonen berücksichtigt. Wärmequellen sind Wärmeeinträge durch innere Wärmelasten oder solare Einstrahlung, Wärmesenken sind Verluste aus Transmission oder Lüftungswärmeverlusten der Begrenzungsflächen der Gebäudehülle. Zur Bilanzierung der benötigten Heizenergie eines Gebäudes werden die Wärmequellen und –senken eines Gebäu-

des jeweils summiert. Die Bilanzgleichung für die Ermittlung des Heizwärmebedarfs lautet

$$Q_H = Q_{sink} - \eta \cdot Q_{source}$$

- mit: Q_H Heizwärmebedarf in einer Gebäudezone
 Q_{sink} Wärmesenken in einer Gebäudezone
 Q_{source} Wärmequellen in einer Gebäudezone
 η Ausnutzungsgrad der Wärmegewinne in einer Gebäudezone

Dabei ist nur ein Teil der Wärmequellen für Heizzwecke nutzbar. Der Anteil der Wärmegewinne, die für Heizzwecke nicht nutzbar sind, ist für die Ermittlung des Heizwärmebedarfs nicht weiter von Interesse. Er erhöht die Raumtemperatur und, sollte der Raum gekühlt werden, muss dieser Anteil über die Kühlung abgeführt werden, um die Raum-Solltemperaturen einzuhalten. Für die Bilanzierung des Kühlenergiebedarfs wird folgende Beziehung angewendet:

$$Q_C = (1 - \eta) \cdot Q_{source}$$

- mit: Q_C Kühlenergiebedarf in einer Gebäudezone

Über den Ausnutzungsgrad η , der vom Gewinn-Verlustverhältnis abhängig ist, wird der Kühlenergiebedarf auch durch die Wärmeverluste beeinflusst [vgl. DAV06]. η berücksichtigt das zeitlich unterschiedliche Auftreten von Quellen und Senken in einer Nutzungszone und wird daher als Funktion des Verhältnisses von Quellen zu Senken und der Auskühlzeitkonstante τ beschrieben. Die nachfolgende Abbildung 2 stellt das Bilanzierungsschema für Heiz- und Kühlenergiebedarf eines Gebäudes zusammenfassend dar.

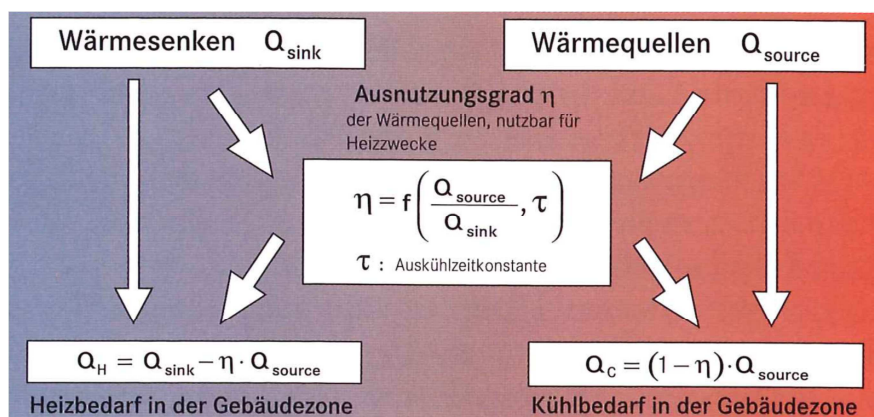


Abbildung 2: Schema für die Bilanzierung des Heiz- und Kühlenergiebedarfs [DAV06]

Bei dem im Allgemeinen angewendeten Bilanzierungsverfahren gilt für aneinander grenzende konditionierte (d.h. beheizte oder gekühlte) Nutzungszone: Wärmeströme von oder in angrenzende beheizte oder gekühlte Zonen sind nur dann zu berücksichtigen, wenn die Differenz zwischen den Raum-Solltemperaturen beider Zonen mehr als 4 K beträgt. (vgl. DIN V 18599-2:2007-02, Abs. 6.1.4 [DIN07]).

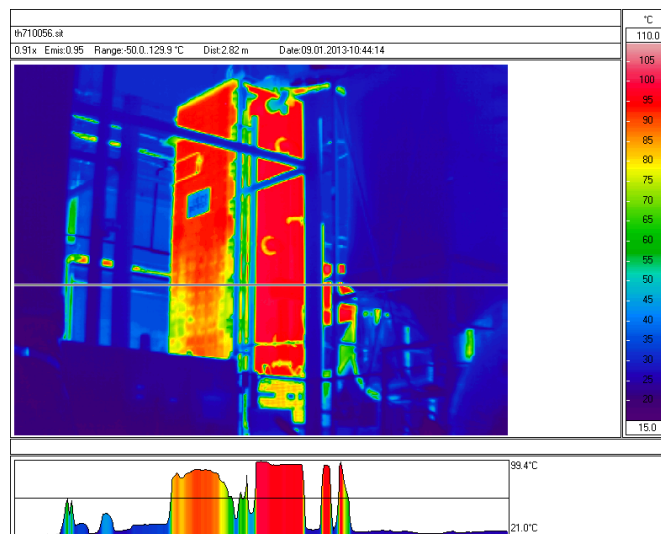
Außerdem werden Wärmeströme für angrenzende nicht konditionierte (d.h. unbeheizte oder ungekühlte) Zonen berechnet. (vgl. DIN V 18599-2:2007-02, Abs. 6.1.3). Die Wechselwirkungen von Wärmeströmen innerhalb eines Gebäudes und deren Beeinflussung von Temperaturen in Bereichen mit Räumen mit unterschiedlichen vorherrschenden Temperaturen werden also nur unter der Voraussetzung von mindestens 4K Unterschied in der Auslegung der Raum-Solltemperatur oder angrenzenden unbeheizten Gebäudebereichen rechnerisch berücksichtigt. Sollten also bei zwei aneinander grenzenden Zonen gleiche Raum-Solltemperaturen, aber unterschiedliche hohe innere Wärmelasten herrschen, werden die Wärmeströme und gegenseitige Temperaturbeeinflussung nicht berücksichtigt.

Insbesondere bei Fabriken gibt es jedoch Bereiche, die zwar planmäßig ähnliche Raum-Solltemperaturen (Unterschied $< 4K$), aber grundsätzlich unterschiedliche Wärmeenergieeinträge besitzen. Für eine energetisch sinnvolle Fabriklayoutplanung ist abseits der Dimensionierung einer energieeffizienten Anlagentechnik in einem vorgeschalteten Schritt die energiefusstechisch optimierte Anordnung der einzelnen Fabrikbereiche sinnvoll. Eine optimierte Anordnung meint hier die Nutzung interner Wärmequellen durch die Nähe von unterschiedlichen Bereichen zueinander, ohne dadurch Überhitzungen in sensiblen Fabrikbereichen zu provozieren. Abseits der üblichen Berechnungsverfahren ist es daher von großem Interesse, diese Energieflüsse und den gegebenenfalls positiven Einfluss auf den Energiebedarf über die Zonengrenzen hinweg auch rechnerisch zu berücksichtigen und mögliche Einsparpotentiale aufzuzeigen.

Die Aufgabe der Untersuchungen im Rahmen des Forschungsprojekts aus Sicht der Bauphysik ist es daher, die Wechselwirkungen des Energieflusses unterschiedlich temperierter Fabrikbereiche untereinander zu analysieren und diese Erkenntnisse in die Groblayoutplanung einfließen zu lassen. Besondere Berücksichtigung sollten an dieser Stelle die sehr unterschiedlichen Wärmeeinträge in Fertigungsbereichen von Fabriken je nach Art der Fertigung finden, da sich dadurch voraussichtlich die Beurteilung über die Lage einzelner Bereiche zueinander ändern kann. Zum Beispiel kann ein Bürobereich hinsichtlich der Einsparung von Heizenergie einen ideale Lage neben den Fertigungsbereichen haben, sofern die Wärmeeinträge hier jedoch steigen, kann dies zu Überhitzungen und damit zu nicht nutzbaren Wärmegewinnen führen, die durch Kühlmaßnahmen kompensiert werden müssen. Daher ist bei den Untersuchungen eine differenzierte Betrachtung unterschiedlicher Fabriktypen notwendig (vgl. Abs. 4.2.1.2).

Insbesondere bei Fabriken mit hohem Energieeintrag durch die Fertigung stellt die Untersuchung der Temperaturentwicklung für die Planung und Auslegung der Anlagentechnik eine entscheidende Rolle. Hierbei ist die Kenntnis von in Fabriken überwiegend vorhandenen Wärmequellen wertvoll.

Zum einen wird durch wärmeenergieintensive Fertigungsprozesse selbst (z.B. beim Glühen von Metall) durch die Zugabe von Wärme das Produkt gefertigt. Hierdurch wird je nach Beschaffenheit der Anlagentechnik (z.B. Dämmung eines Ofens, Oberflächenbeschaffenheit, Geometrie) bereits Wärmeenergie in die Umgebung abgegeben. Zum anderen sind die gefertigten Produkte selbst auf dem Weg der Weiterverarbeitung durch die Fabrik Energieträger, durch die Wärme in die einzelnen Bereiche einer Fabrik eingetragen wird. Je nach Produktbeschaffenheit (z.B. Größe des Produkts, Abkühlvorgänge und Abkühlgeschwindigkeit) und Fertigungsprozesse (in offenen oder geschlossenen Bereichen) variiert die eingetragene Wärme entsprechend. Die nachfolgende Abbildung 3 dokumentiert beispielhaft einen Fertigungsprozess in einer Fabrik zur Herstellung von expandiertem Polystyrolhartschaum. Den Klarbildern des Fertigungsprozesses sind die entsprechenden Thermografieaufnahmen gegenübergestellt. Deutlich zu erkennen sind hierbei die Wärmeeinträge durch die eingesetzte Technik (Oberflächentemperaturen bis zu 100 °C) sowie anschließend durch das Produkt selbst auf dem Weg zur Weiterverarbeitung (unmittelbar nach der Fertigung ca. 75 °C und ca. 10 Minuten nach Austritt aus der Maschine Oberflächentemperaturen von ca. 40-50 °C).



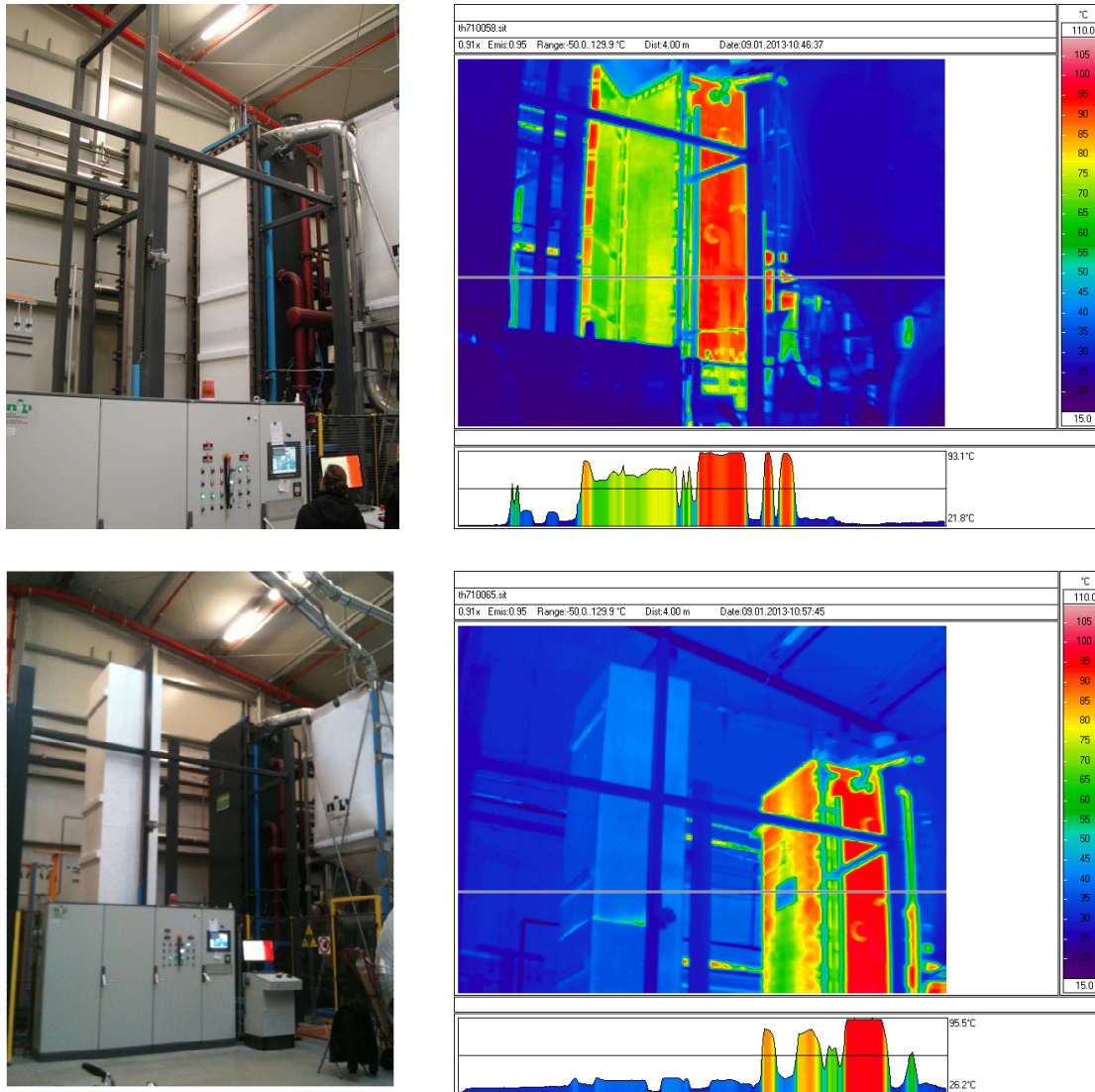


Abbildung 3: Bildliche Dokumentation eines Fertigungsprozesses von Polystyrol-Dämmung mit zugehörigen Thermografieaufnahmen

Eine weitere Form von Wärmeenergie innerhalb von Fabriken stellt die während vieler Fertigungsprozesse anfallende Abwärme dar. Sie wird überwiegend als Abfallprodukt direkt an die Umwelt und damit ungenutzt aus den Fabriken herausgeleitet. Das Ziel hierbei ist es, Überhitzungen in Bereichen mit Anforderungen an die klimatischen Verhältnisse aufgrund des Aufenthalts von Menschen oder Überhitzung von Maschinen zur Gewährleistung des korrekten Prozessablaufs, zu vermeiden. In Abbildung 4 sind exemplarisch Beispiele für die Abführung von überschüssiger Wärmeenergie dargestellt, die bei den Untersuchungen bei den Fabriken der Projektpartner aufgefallen sind. Sollte die Abfuhr von ungewünschter Wärmeenergie nicht möglich sein, ist darüber hinaus häufig die Unterstützung durch Klimaanlage (vgl. Abbildung 4, rechts) notwendig. Das zieht für viele Unternehmen zusätzliche Investitionen in die Anlagentechnik sowie Betriebskosten dafür nach sich.



Abbildung 4: Abführung überschüssiger Wärmeenergie aus Fertigungsprozessen

Ziel der optimierten Fabriklayoutplanung aus Sicht der Bauphysik ist aufgrund der ausgeführten Problematik die optimale Nutzung von internen Wärmequellen durch sinnvolle Anordnung der unterschiedlichen Fabrikbereiche und so den Energiebedarf des Gesamtgebäudes zu verringern. Hierzu ist die Betrachtung der thermischen Energieflüsse innerhalb des Gebäudes von besonderer Bedeutung.

Als Beurteilungsgröße für die Untersuchungen wird die Summe aus der benötigten Heiz- und Kühlenergie, also die Nutzenergie herangezogen. Hier gehen nur diejenigen Energiemengen ein, die zur Aufrechterhaltung des für den jeweiligen Bereich definierten Temperaturniveaus notwendig sind. Beurteilungsgrößen wie Endenergie oder gar Primärenergie würden keine eindeutigen Rückschlüsse auf die Variation der geometrischen Anordnung zulassen, da hier anlagentechnische Belange und die Wahl der Energieträger das Ergebnis beeinflussen.

Für die Analyse der Energieflüsse innerhalb einer Fabrik ist sowohl die Betrachtung der Nutzenergie des Gesamtgebäudes als auch die Nutzenergieentwicklung jedes einzelnen Fabrikbereichs abhängig von seiner Position im Gebäude unumgänglich.

4.1.3 Kriterien zur Bewertung aus Sicht der Architektur

Aus architektonischer Sicht stellt die Güte der Versorgung von Bereichen mit Tageslicht ein zentrales Kriterium dar. Ziel der Fabrikplanung ist aus architektonischer Sicht, die Anforderungen von Bereichen an die Beleuchtung durch die Gestaltung des Gebäudes und Lage der Bereiche zu optimieren. Darüber hinaus ist die Sichtbeziehung zur äußeren Umwelt in einigen Bereichen einer Fabrik ein weiteres wichtiges Kriterium, anhand dessen eine Fabrik aus architektonischer Sicht bewertet werden kann. Die Kreativität und Zufriedenheit der Mitarbeiter kann dadurch unterstützt bzw. sogar gesteigert werden.

Neben der Sichtbeziehung nach außen kann auch die Form der Fabrikbereiche, in denen kreativ gearbeitet wird, die Kommunikation unterstützen bzw. behindern. Daher stellt die Form ein weiteres Kriterium dar. Rechteckige Bereiche fördern die Kommunikation, verwinkelte Bereiche hemmen diese eher.

Auch eine mögliche gleichmäßige Verteilung von notwendigen Stützpfeilern für die Dachkonstruktion stellt ein Kriterium aus architektonischer Sicht dar. Dabei gilt es grundsätzlich das gesamte Gebäude zu betrachten und innerhalb dieses Gesamtsystems eine gleichmäßige und symmetrische Verteilung herzustellen. So kann auch ein modularer Aufbau sichergestellt werden.

4.2 BS 2: Entwicklung eines Fabrikmodells und geeigneter Bewertungskennzahlen

BS 2 hatte die Entwicklung eines Fabrikmodells zum Ziel. Dieses Fabrikmodell besteht aus verschiedenen Bereichen, einem einheitlichen Planungsraster sowie einer Bewertungssystematik.

4.2.1 Identifikation und Zusammenführung von elementaren Fabrikbereichen

In einem ersten Schritt zur Entwicklung eines Fabrikmodells wurden elementare Bereiche aus den Fachsichten Logistik, Bauphysik und Architektur sowohl in einer umfassenden Literaturrecherche als auch aus den Untersuchungen bei den Praxispartnern identifiziert und anschließend zusammengeführt, sodass definierte Fabrikbereiche entstehen. Dazu wurde ein graphisches Flächenaufnahmeformular erstellt (vgl. Abbildung 5). Das Formular enthält im oberen Teil eine Zeichenfläche, in der die Fabrikhalle nachgezeichnet werden kann. Darunter befindet sich eine Legende für verschiedene antizipierte Bereiche.

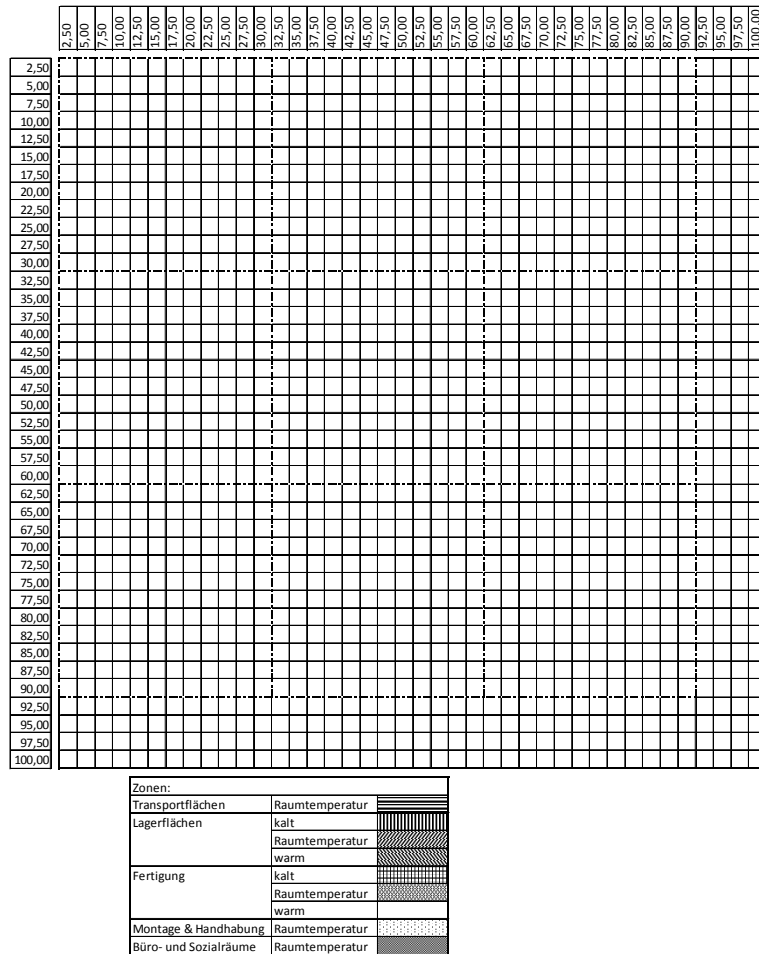


Abbildung 5: Graphisches Flächenaufnahmeformular

Viele Praxispartner stellten darüber hinaus Grundrisse ihrer Produktionshallen zur Verfügung, sodass die Aufnahmen in diesem Formular detailliert werden konnten.

Diese wurden dann genutzt, um die Bereiche nachzubilden (vgl. Abbildung 6).

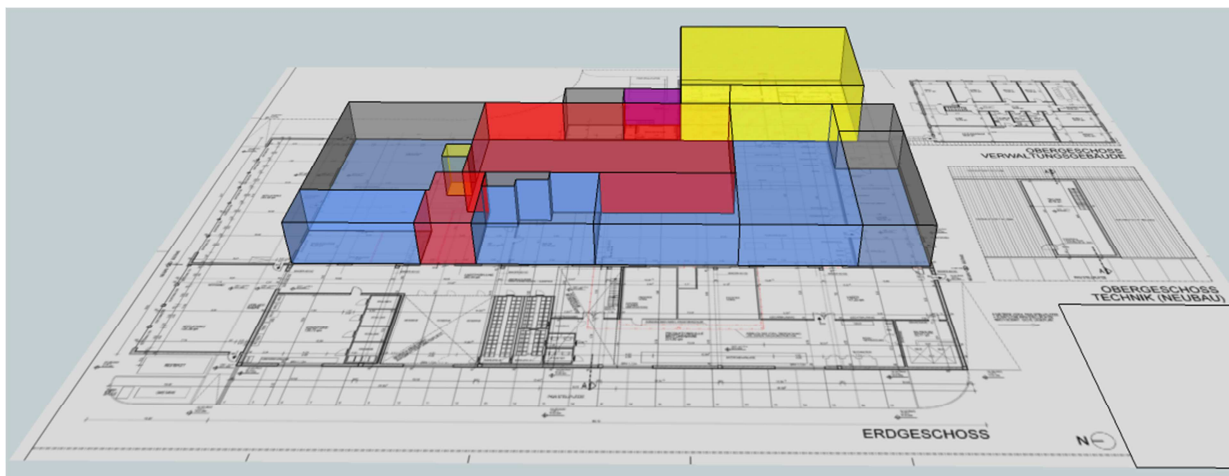


Abbildung 6: Beispiel einer mit Bereichen nachgebildeten Fabrik

Darüber hinaus zeigte sich bei den Untersuchungen bei den Praxispartnern, dass die für das graphische Flächenaufnahmeformular antizipierten Bereiche selten den Anforderungen der Praxis entsprachen. Um jedoch das Fabrikmodell beschreiben zu

können, wurden daher aus den Untersuchungen elementare Fabrikbereiche abgeleitet. Dabei stellt ein elementarer Fabrikbereich die „kleinste Einheit“, die aus den drei Fachsichten zu identifizieren sind, dar.

4.2.1.1 Elementare Fabrikbereiche aus logistischer Sicht

Im Rahmen der Untersuchungen konnten aus logistischer Sicht folgende fünf Bereiche identifiziert werden.

Fertigung:

Ein hoher Wertschöpfungsanteil entfällt auf die Fertigungsbereiche. Diese Flächen zeichnen sich häufig durch einen geringen personellen Bedarf und einen hohen Automatisierungsgrad aus. Typische Prozesse sind die Fertigungsprozesse aus der DIN 8580, wie z. B. das Ur- und Umformen, Trennen oder Fügen von Werkstoffen, sowie das Beschichten und Stoffeigenschaft ändern von Werkstücken. Ein Fertigungsbereich sollte über einen gradlinigen Materialfluss verfügen und durch seinen Aufbau geringe Durchlaufzeiten und eine hohe Kapazitätsauslastung ermöglichen. Teilweise sind die Arbeitssysteme in Fertigungsbereichen automatisiert verkettet. In der innerbetrieblichen Prozesskette sind Fertigungsprozesse idealtypischer Weise im Anschluss an die Entwicklung, Konstruktion und Arbeitsvorbereitung einzureihen. Die Fertigungsform wird nicht durch den Bereich vorgegeben. Diesen kann der Planer aus den wesentlichen Fertigungsformen (Tabelle 1) frei wählen.

Tabelle 1: Übersicht über die wesentlichen Fertigungsformen [DOL81]

Fertigungsform	Beschreibung
Punkt-/ stationäre Fertigung	Arbeitsvorgänge erfolgen an einer Stelle
Werkstattfertigung	Verrichtungsorientierte Aufstellung der Produktionsmittel
Gruppen-/Insel-Zellenfertigung	Örtliche Zusammenfassung der funktionell zusammenwirkenden Maschinen und Handarbeitsplätze
Linienfertigung	Zweckaufstellung der Betriebsmittel und Arbeitsplätze

Montage:

Die Montage folgt aus Prozess- und organisatorischer Sicht meistens der Fertigung. Ein hoher Anteil an Wertschöpfung entsteht in der Montage durch personelle Kapazitäten. Wertschöpfung durch automatisierte Betriebsmittel, wie Industrieroboter, hat einen niedrigen bis mittleren Anteil. Dies ist von dem Automatisierungsgrad der Montage abhängig. Gängige Montagefunktionen sind das Fügen, Handhaben, Kontrollieren und Justieren von Werkstücken, sowie diverse Sonderfunktionen [DIN03]. Bei Montagebereichen sind eine flussgerechte Materialbewegung mit einer geringen Montagedurchlaufzeit und eine hohe Transparenz der Montageaufgaben zu beach-

ten. Eine hohe Auslastung der Montagesysteme ist aus Gründen der Wirtschaftlichkeit eine weitere Anforderung.

Lager:

Lagerbereiche können in Wareneingangslager, Lager innerhalb der Produktion und Warenausgangslager unterteilt werden. Der Zweck eines Lagers ist die Sicherstellung der Versorgung der Fertigung und der Montage mit Material sowie Hilfs- und Betriebsstoffen. Wareneingangslager dienen der Entkopplung der Produktion von Zulieferern und externen Quellen. Lager innerhalb der Produktion entkoppeln zwei Stationen oder Bereiche voneinander. In Warenausgangslagern werden Waren bereitgestellt, die fertiggestellt wurden und an Kunden oder anderen externe Senken weitergegeben werden können. Warenein- und -ausgangslager sind innerhalb der Prozesskette am Anfang und am Ende zu sehen. Sie benötigen innerhalb einer Fabrik eine Lage direkt an einer Außenwand, um die nötigen An- und Ablieferungen zu ermöglichen, ohne weitere Prozesse zu stören. Lager innerhalb der Produktion können beliebig im Prozess angeordnet sein. Lagerbereiche zeichnen sich durch eine geringe Belegung mit Personal aus, häufig sind Lagerbereiche auch hoch automatisiert, z. B. in einem automatischen Hochregallager.

Büro- und Sozialräume:

Büros und Sozialräume verfügen über ein hohes Aufkommen an Personal und EDV-Hilfsmitteln. Sie können der Informations- und Wissensgenerierung, -verarbeitung und -weitergabe dienen, verwaltende Aufgaben haben oder als Umkleiden für Personal genutzt werden. Räume wie Kantinen oder Ruheräume fallen ebenfalls in diesen Bereichstyp. Es werden keine besonderen organisatorischen Anforderungen an diese Räume gestellt, ebenso wenig an ihre Position innerhalb der Prozesskette.

Technikräume:

Technikräume sind meist geschlossene Bereiche, die nur temporär von Personal betreten werden. Sie dienen der Aufbereitung von Medien und der Versorgung der Informationssysteme (z. B. Server), können aber auch für die Haustechnik verwendet werden. Technikräume haben eine unterstützende Funktion und sichern die Versorgung mit Information und Energie. Um z. B. Verluste bei der Druckluftbereitstellung zu minimieren, sollten Technikräume in der Nähe der Abnahmestellen verortet sein. Da jedoch kein direkter Prozesszusammenhang besteht, verfügen Technikräume über keine idealtypische Position innerhalb der Prozesskette.

4.2.1.2 Elementare Fabrikbereiche aus bauphysikalischer Sicht

Um Energieflüsse und die Nutzung von Wärmequellen in benachbarten und unterschiedlichen Fabrikbereichen beurteilen und untersuchen zu können, ist die Identifikation der einzelnen Bereiche mit unterschiedlichen Randbedingungen erforderlich.

Hinsichtlich der Einteilung in unterschiedliche Fabrikbereiche werden zwei grundsätzliche Merkmale unterschieden. Zum einen werden die Bereiche nach den Anforderungen an die klimatischen Verhältnisse, in erster Linie der Raum-Solltemperaturen, und zum anderen in anfallende Energieeinträge aufgrund von inneren Wärmequellen, eingeteilt.

Um die Bereiche in den Fabriken der KMU zu identifizieren, wurden zahlreiche messtechnische Untersuchungen durchgeführt. Diese werden im folgenden Abschnitt beschrieben.

Vorbemerkungen

Aus datenschutzrechtlichen Gründen werden diverse Daten, Klarbilder von Thermografieaufnahmen, Messwerte sowie Geometrien der untersuchten Fabriken, die Grundlage für die Modellentwicklung waren und maßgeblich zur Projektbearbeitung beigetragen haben, nicht in diesem Bericht erwähnt. Sofern möglich, sind diese jedoch dargestellt und entsprechende Anhaltspunkte, die auf die jeweils beteiligte Fabrik Rückschlüsse zulassen könnten, herausgenommen.

Messtechnische Untersuchungen

Hinsichtlich der Datenaufnahme zu vorherrschenden klimatischen Verhältnissen in den einzelnen Fabrikbereichen wurden neben einer Literaturrecherche zu rechnerisch annehmbaren Wärmeeinträgen mittels sogenannter Thermohygrografen Klimadaten über einen längeren Zeitraum (ca. 6 Wochen) erhoben. Hierzu wurden die Messgeräte vorwiegend in Fertigungsbereichen angebracht. Messgrößen waren hier Luft- sowie Oberflächentemperatur. Die so ermittelten Temperaturverläufe konnten anschließend verwendet werden, um die in der Literatur angegebenen Werte für Wärmeeinträge anhand der sich einstellenden Temperaturen im Simulationsmodell zu verifizieren. Der nachfolgenden Abbildung 7 und Abbildung 8 sind zwei auf diese Weise installierte Messgeräte an einem Ofen sowie einer Innenwand in einem Fertigungsbereich zu entnehmen.



Abbildung 7: Thermohygrograf zu Langzeitmessung von Oberflächen- sowie Lufttemperatur an einem Ofen in einem Fertigungsbereich



Abbildung 8: Thermohygrograf an einer Innenwand in einem Fertigungsbereich

Nachfolgend sind beispielhaft einige Messverläufe dargestellt.

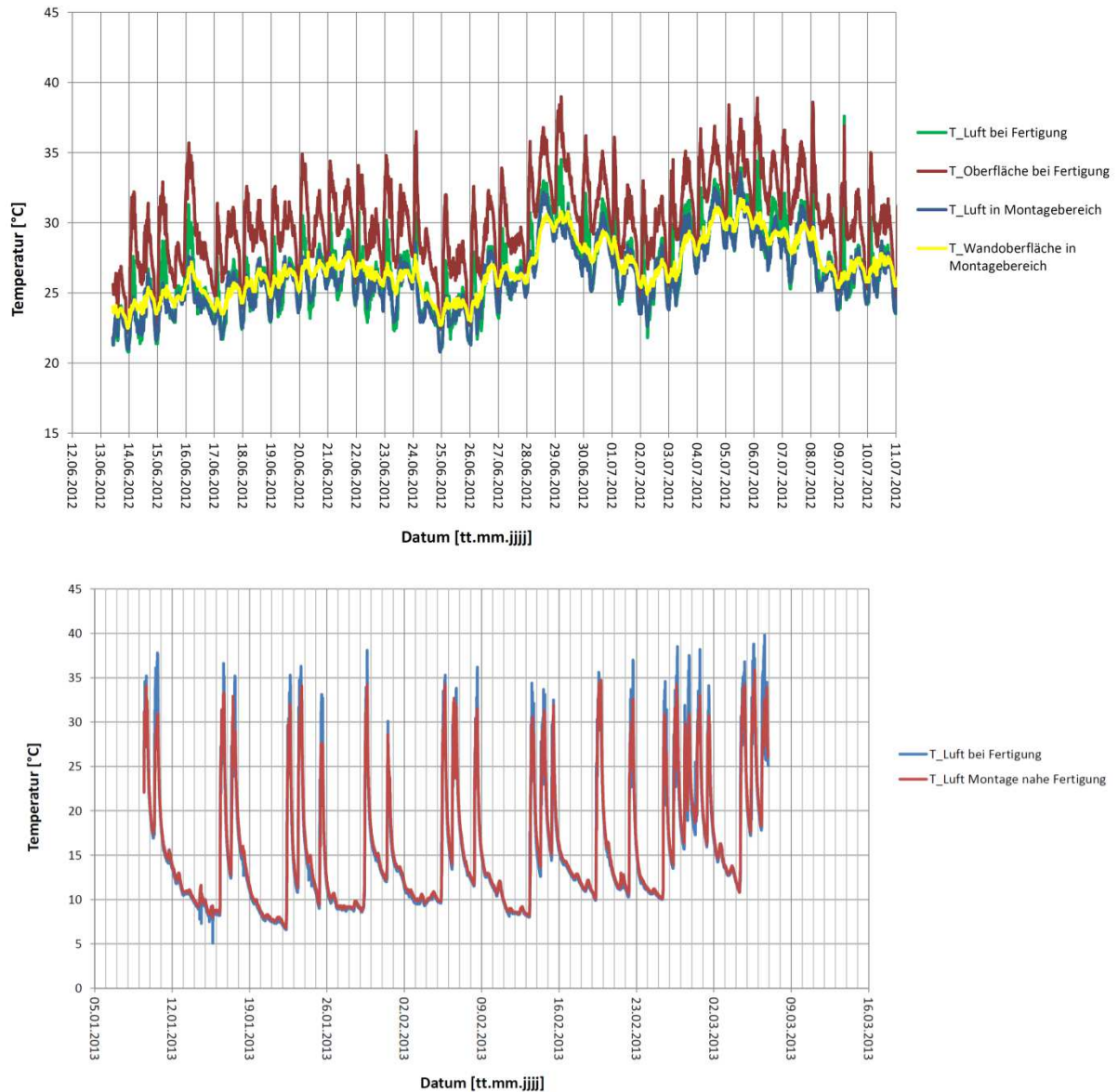


Abbildung 9: Auswahl von Langzeitmessungen zu Temperaturen in Fertigungs- und Montagebereichen in unterschiedlichen Fabriken

Den dargestellten Temperaturverläufen ist zu entnehmen, dass die Wärmeenergieeinträge stark variieren und enormen Schwankungen unterworfen sein können. Gerade in Unternehmen, in denen die Fertigung von der Nachfrage der Kunden abhängt ist nicht zwingend mit gleichbleibenden Wärmeenergieeinträgen in einem Fabrikbereich zu rechnen. Gleichwohl wird das Potenzial der durch den Fertigungsprozess eingebrachten Energiemenge in Form von Wärmeenergieeinträgen deutlich.

Im Dialog mit den Projektpartnern wurde häufig angegeben, dass diese Wärmeenergieeinträge nicht bei der rechnerischen Dimensionierung und Auslegung von Heizungsanlagen, gerade in Fertigungs- und Montagebereichen berücksichtigt werden, was häufig zur Folge hat, dass unwirtschaftlich überdimensionierte Heizungsanlagen nicht benötigt werden. Eine genauere Untersuchung der zu erwartenden Temperatu-

ren in den Fabrikbereichen hätte in den meisten Fällen in dieser Hinsicht bereits einen wirtschaftlichen Vorteil.

Als weiteres technisches Hilfsmittel wurden Thermografieaufnahmen angefertigt, um warme Bereiche innerhalb der begangenen Fabriken zu identifizieren (siehe nachfolgende Abbildung 10).

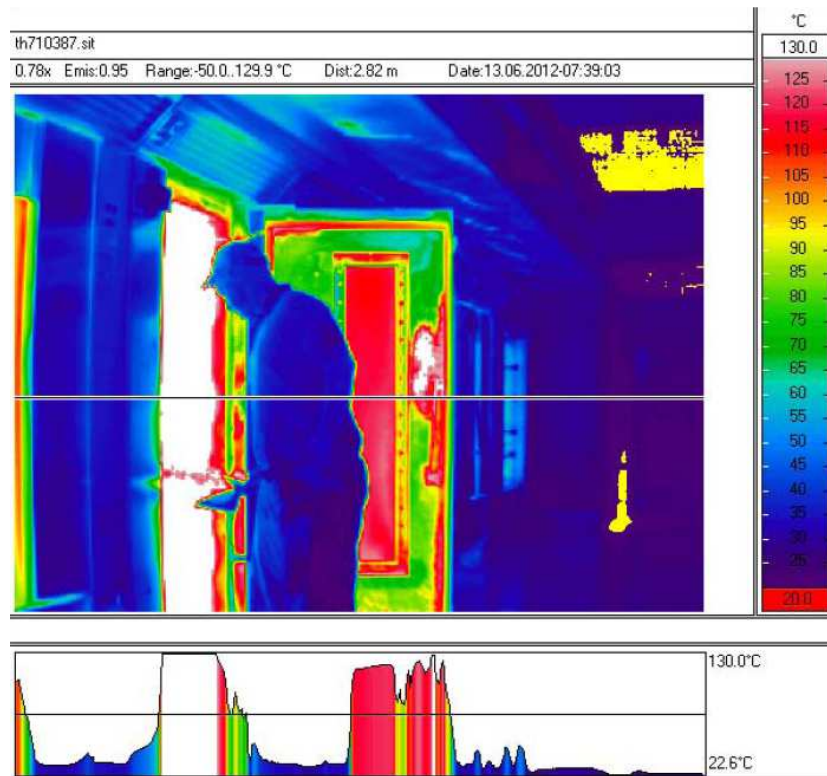


Abbildung 10: Thermografieaufnahme eines geöffneten Großofens

Den Untersuchungen in den Unternehmen folgend, konnten elementare Fabrikbereiche aus energetischer Sicht identifiziert werden. Generell sind hier folgende Bereiche zu unterscheiden:

- Bereiche mit unterschiedlichen Anforderungen an die thermische Raumkonditionierung
- Bereiche mit unterschiedlichen Wärmeenergieeinträgen

Angewendet auf die identifizierten Bereiche in den untersuchten Fabriken ergeben sich aus bauphysikalischer Sicht in Abbildung 11 dargestellte Fabrikbereiche.

Zone	Wärmeenergieeintrag durch Prozess	Anforderung an thermische Konditionierung	Beispielnutzung
Fabriktyp A (hohe Wärmeeinträge)			
1	⚙️⚙️⚙️⚙️⚙️	👤👤	Fertigung
2	⚙️⚙️	👤👤	Montage
3	⚙️⚙️	👤👤👤	Büro, Sozialraum
4	⚙️⚙️	👤👤👤	Technik
5	⚙️	👤	Lager
Fabriktyp B (mittlere Wärmeeinträge)			
1	⚙️⚙️⚙️⚙️	👤👤	Fertigung
2	⚙️⚙️	👤👤	Montage
3	⚙️⚙️	👤👤👤	Büro, Sozialraum
4	⚙️⚙️	👤👤👤	Technik
5	⚙️	👤	Lager
Fabriktyp C (mittlere Wärmeeinträge)			
1	⚙️⚙️⚙️	👤👤	Fertigung
2	⚙️⚙️	👤👤	Montage
3	⚙️⚙️	👤👤👤	Büro, Sozialraum
4	⚙️⚙️	👤👤👤	Technik
5	⚙️	👤	Lager

Wärmeenergieeintrag durch Prozessenergie	sehr hoch	⚙️⚙️⚙️⚙️⚙️
	hoch	⚙️⚙️⚙️⚙️
	mittel	⚙️⚙️⚙️
	gering	⚙️⚙️
	kaum Wärmeeinträge	⚙️
Anforderung an thermische Konditionierung	hoch	👤👤👤
	normal	👤👤
	niedrig	👤

Abbildung 11: Elementare Fabrikbereiche mit unterschiedlichen energetischen Charakteristika

Auf der Grundlage der durchgeführten Untersuchungen ergeben sich aus bauphysikalischer Sicht die inhaltlich zu unterscheidenden Bereiche:

- Fertigung,
- Montage,
- Büro, Sozialraum,
- Technik,
- Lager.

Aus den identifizierten Fabrikbereichen in den Unternehmen ergibt sich, dass grundsätzlich die Bereiche Montage, Büro, Technik und Lager bei dem Vergleich unterschiedlicher Fabriken nicht wesentlich voneinander abweichen. Die Anforderungen an die Raumkonditionierung und die Wärmeenergieeinträge sind überwiegend unabhängig von der Art der Produktion. Bei den untersuchten Fertigungsbereichen wurden dagegen deutliche Unterschiede hinsichtlich der eingebrachten Wärmeeinträge festgestellt. Daher wird die Einteilung in unterschiedliche Fabriktypen vorgenommen. So ergibt sich für die unterschiedlichen Fabriktypen A, B, C ein jeweils variierender Wärmeenergieeintrag in dem Fertigungsbereich. Der Literatur folgend kann in den Fertigungsbereichen mit folgenden flächenbezogenen Wärmeenergieeinträgen gerechnet werden:

- 100 W/m² (entspricht in Anlehnung an VDI 3802 [VDI98] etwa einer mechanischen Fertigung),

- 300 W/m² (entspricht in Anlehnung an VDI 3802 [VDI98] etwa einer Fertigung mit Metallwarmumformung),
- 500 W/m² (entspricht in Anlehnung an VDI 3802 [VDI98] etwa einer Metallgießerei).

In Anlehnung an die in der DIN V 18599-Teil 10 [DIN07] definierten Nutzungsprofile entsprechender Bereiche in Nichtwohngebäuden und die in der VDI 3802 [VDI98] angegebenen Wärmeenergieeinträge in unterschiedlichen Fertigungsbereichen können die Wärmeenergieeinträge und die erforderlichen Raumtemperaturen der definierten Bereiche etwa wie folgt angegeben werden.

Randbedingungen für Fabrikbereiche ¹		Fertigung	Montage	Lager	Büro- & Sozialräume	Technik		
Bauphysik	Raumkonditionierung							
		Einheit	Wert	Wert	Wert	Wert	Wert	
	Raum-Solltemperatur Heizung	°C		17,00	17,00	12,00	21,00	17,00
	Raum-Solltemperatur Kühlung	°C		26,00	26,00	26,00	24,00	26,00
	Minimaltemperatur Auslegung Heizung	°C		15,00	15,00	12,00	20,00	15,00
	Maximaltemperatur Auslegung Kühlung	°C		30,00	30,00	28,00	26,00	28,00
	Temperaturabsenkung reduzierter Betrieb	K		4,00	4,00	0,00	4,00	4,00
	Wärmeinträge							
		Einheit	Wert	Wert	Wert	Wert	Wert	
	Maximale Belegungsdichte	m ² je Person		ca. 20	ca. 20	-	ca. 14	-
	Wärmeenergieeintrag durch Personen (190W/Person) ²	W/m ²		ca. 12	ca. 12	-	ca. 10	-
	Wärmeenergieeintrag durch Anlagen, Transporthilfsmittel etc.	W/m ²		100 bzw. 300 bzw. 500 ² + 35	35	-	ca. 10	ca. 10
	Wärmeenergiezufuhr je Tag	Wh/(m ² d)		-	-	-	-	-

¹: Nutzungsrandbedingungen in Anlehnung an DIN V 18599-10
²: Angaben gemäß VDI 3802

Abbildung 12: Nutzungsrandbedingungen der identifizierten Fabrikbereiche hinsichtlich Raumkonditionierung und Wärmeenergieeinträgen

Aus bauphysikalischer Sicht konnten somit grundsätzlich fünf Fabrikbereiche identifiziert werden, wobei die Fertigung aufgrund der unterschiedlichen Wärmeenergieeinträge weiter differenziert werden muss.

4.2.1.3 Elementare Fabrikbereiche aus architektonischer Sicht

Aus architektonischer Sicht kann eine Fabrik in Bereiche differenziert werden, die unterschiedliche technische und ästhetische Anforderungen an die Ausgestaltung des Innenausbau haben. Dabei umfasst der Innenausbau die Decken, Wände und Fußböden. In verschiedenen Fabrikbereichen sind unterschiedliche Anforderungen an Boden- und häufig auch Wandbeläge, seltener an Deckenbeläge, gestellt. Bspw. haben Fabrikbereiche, in denen Spritzwasser auftritt, die Anforderung der Dichtigkeit der Boden- und Wandbeläge. Ggf. müssen Boden- und Wandbeläge eine Dichtigkeit gegenüber chemischen Stoffen aufweisen. Darüber hinaus müssen die Beläge häufig einfach zu reinigen sein. Dementsprechend haben diese Fabrikbereiche höhere Anforderungen bzgl. der technischen Ausgestaltung des Innenausbau. Darüber hinaus sind diese Bereiche häufig dadurch geprägt, dass sie höhere Anforderungen an eine gleichmäßige und konstante Ausleuchtung haben. Diese Ausleuchtung muss

allerdings nicht mit einem Großteil an natürlicher Beleuchtung geschaffen, sondern kann mit künstlichen Leuchtmitteln erzeugt werden.

Andere Fabrikbereiche haben höhere Ansprüche an die Ästhetik. Dies tritt vornehmlich in Bereichen auf, in denen Mitarbeiter kreativ arbeiten müssen oder sich zu Erholungszwecken aufhalten. Diese Bereiche sind häufig mit Teppich- oder Holz- bzw. Laminatböden ausgelegt.

Darüber hinaus haben die letztgenannten Bereiche erhöhte Anforderungen an die Beleuchtung mit natürlichem Licht und die Sichtbeziehung der Mitarbeiter zur Umwelt.

Dementsprechend sind aus architektonischer Sicht folgende Fabrikbereiche zu differenzieren:

- Bereiche wie bspw. Produktions- oder Lagerbereich mit hohen Anforderungen an die technische Ausgestaltung der Boden-, Wand- und Deckenbeläge sowie erhöhten Anforderungen an eine gleichmäßige und konstante Beleuchtung,
- Bereiche wie bspw. Büros oder Aufenthaltsbereiche mit hohen Anforderungen an die ästhetische Ausgestaltung der Boden-, Wand- und Deckenbeläge und erhöhten Anforderungen an die Beleuchtung mit natürlichem Licht und einer Sichtbeziehung zur Umwelt.

4.2.1.4 Abgeleitete Fabrikbereiche für die weiteren Untersuchungen

Aus den in den vorherigen drei Abschnitten vorgestellten Bereichen wurden im Anschluss sieben Fabrikbereiche definiert, die sich aus der Schnittmenge aller Bereiche der unterschiedlichen Fachsichten ergeben. Dementsprechend sind neun Bereiche in einer Fabrik zu unterscheiden:

- Fertigung mit einem flächenbezogenen Wärmeenergieeintrag von 100 W/m²,
- Fertigung mit einem flächenbezogenen Wärmeenergieeintrag von 300 W/m²,
- Fertigung mit einem flächenbezogenen Wärmeenergieeintrag von 500 W/m²,
- Montage,
- Lager in der Produktion,
- Wareneingangslager (direkte Lage an einer Außenwand),
- Warenausgangslager (direkte Lage an einer Außenwand),
- Technik,
- Büro- und Sozialräume.

Um eine systematische Aufbereitung und Erfassung der Daten und Charakteristika der Bereiche zu gewährleisten, wurden sog. ID-Cards für alle Bereiche entwickelt. Diese umfassen Informationen zu *Allgemeinen Nutzungsrandbedingungen*, *Prozes-*

sen & Logistik, Architektur sowie Bauphysik. Die Allgemeinen Nutzungsrandbedingungen beinhalten Nutzungszeiten ($\hat{=}$ Arbeitszeiten) der Bereiche sowie Betriebszeiten von Raumluftechnik (RLT), Kühlung und Heizung. Der Abschnitt Prozesse & Logistik befasst sich mit Abläufen und organisatorischen Anforderungen und Charakteristika der Bereiche. Die Architektur umfasst die Gebäudestruktur sowie Definitionen der Geometrie (z. B. Raumhöhen) eines Bereichs. Der Abschnitt Bauphysik beinhaltet Angaben zur thermischen Raumkonditionierung, dem Mindestaußenluftvolumenstrom, Wärmeeinträgen durch Personen und Anlagen, Anforderungen an die Beleuchtungsstärke sowie die Qualität der Bauteile des Gebäudes (in Anlehnung an die Anforderungen für Nichtwohngebäude nach EnEV'09).

Abbildung 13 zeigt einen Ausschnitt aus der ID-Card für den Bereich „Fertigung mit einem Wärmeeintrag von 100 W/m²“. Die in allen ID-Cards enthaltenen Daten zur Charakterisierung der Bereiche wurden in Anlehnung an die Norm DIN V 18599-10 [DIN07] und den Richtlinien Technische Regeln für Arbeitsstätten [ASR10] sowie der VDI 3802 [VDI98] abgeleitet. Alle ID-Cards sind in Anhang A1 abgebildet.

ID-Card				
Fertigung (100 W/m ²)				
Allgemeine Nutzungsrandbedingungen ¹	Nutzungszeiten			
		Einheit	Wert	Erläuterungen
	Jährliche durchschnittliche Nutzungszeit (von xx:xx Uhr bis xx:xx Uhr)	Uhrzeit	07:00 Uhr bis 16:00 Uhr	
	Anzahl jährliche Nutzungstage	d/a	250	
	Jährliche Nutzungsstunden zur Tagzeit (Intervall: 06:00 Uhr bis 22:00 Uhr)	h/a	2192	
	Jährliche Nutzungsstunden zur Nachtzeit (Intervall: 22:00 Uhr bis 06:00 Uhr)	h/a	58	
	Tägliche Betriebszeit der Raumluftechnik (RLT) und Kühlung (von xx:xx Uhr bis xx:xx Uhr)	Uhrzeit	05:00 Uhr bis 16:00 Uhr	
	Tägliche Betriebszeit der Heizung (von xx:xx Uhr bis xx:xx Uhr)	Uhrzeit	05:00 Uhr bis 16:00 Uhr	
	Jährliche durchschnittliche Betriebstage jeweils für	-	-	-
	RLT	d/a	250	
Heizung	d/a			
Kühlung	d/a			

Abbildung 13: Ausschnitt aus der ID-Card zum Bereich "Fertigung mit einem Wärmeeintrag von 100 W/m²"

4.2.2 Entwicklung eines Planungsrasters

Um in einem nachfolgenden Schritt simulative Untersuchungen zum Verhalten der Energieflüsse im Gebäude und des Raumklimas sowie Untersuchungen in Bezug auf logistische Fragestellungen durchführen zu können, wurde ein Planungsraster im „Baukastensystem“ entwickelt. In diesem Planungsraster können verschiedene Fabrikbereiche beliebig angeordnet werden. Diesem Planungsraster wurde ein Rastermaß in der Ebene (x|y) von sechs Metern zugeordnet. Zur Definition eines Volumens wurde dem Raster in der dritten Ebene (z) eine Höhe von acht Metern zugewiesen.

Diese Maße ergeben sich aus typischen Bauhöhen für Fabrikgebäude, die durch Lagertechnik wie z. B. maximale Hubhöhen von Gabelstaplern zzgl. Sicherheitsabstand zur Gebäudedecke sowie Dachkonstruktion determiniert wird. Somit ergibt sich ein Planungsraster von 6 m x 6 m x 8 m (x|y|z). Abbildung 14 zeigt die räumliche Ausgestaltung eines Rasterelements.

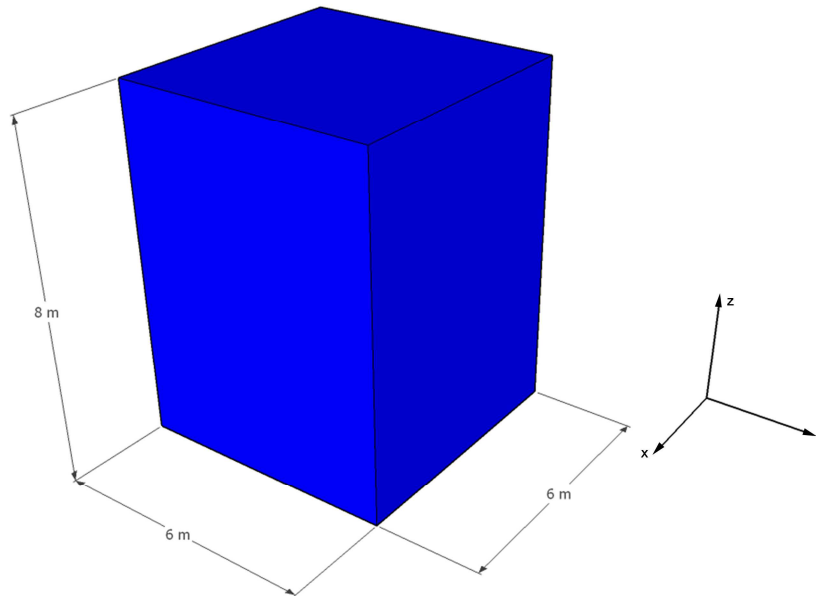


Abbildung 14: Ausgestaltung eines Rasterelements

Durch die Aneinanderreihung mehrerer Rasterelemente gleicher oder unterschiedlicher Bereichstypen kann somit eine Fabrik mit entsprechenden unterschiedlich ausgeprägten Fabrikbereichen entstehen.

4.2.3 Bewertungskennzahlen aus den jeweiligen Fachsichten

Um eine Alternative eines Fabriklayouts gegen eine andere vergleichen zu können, wurden Bewertungskennzahlen aus den jeweiligen Fachsichten und anschließend eine Aggregation zu einer Gesamtkennzahl entwickelt.

4.2.3.1 Bewertungskennzahl aus logistischer Sicht

Aus logistischer Sicht wird Lage zweier Bereiche zueinander bewertet. Als Bewertungsgrößen werden dabei die Transportweglänge (in der Folgenden Bewertungsgröße für den Materialfluss (MF)) sowie die Kommunikationsweglänge (im Folgenden Bewertungsgröße für den Kommunikationsfluss (KF)) herangezogen. Die Gradlinigkeit sowie die Überschneidungsfreiheit des Materialflusses können auf der angestrebten Bewertungsebene nicht berücksichtigt werden. Die Offenheit der Bereiche werden bereits durch den Aufbau des Planungsrasters determiniert. Darüber hinaus fördert das einheitliche Raster Aspekte der Wandlungsfähigkeit.

Aus Gesprächen mit den Teilnehmern des PbA ergab sich, dass Material- und Kommunikationsfluss keinesfalls dieselbe Wichtigkeit für die Güte der logistischen Pro-

zesse haben. Um diesem zu begegnen, werden zur Bewertung in einem ersten Schritt Gewichte für den Materialfluss und die Kommunikation festgelegt. Beide Gewichte zusammen müssen immer eins ergeben. Demnach sind die Gewichte wie folgt definiert:

$$\gamma = \gamma_{MF} + \gamma_{KF} = 1$$

mit:

γ : Summe des Gewichts des Materialflusses und des Kommunikationsflusses

γ_{MF} : Gewicht des Materialflusses mit $0 \leq \gamma_{MF} \leq 1$

γ_{KF} : Gewicht des Kommunikationsflusses mit $0 \leq \gamma_{KF} \leq 1$

Sind die Gewichte für die Materialflüsse sowie die Kommunikationsflüsse festgelegt, müssen Bewertungskennzahlen ermittelt werden. Im Folgenden wird zuerst eine Bewertungskennzahl für den Materialfluss gebildet und anschließend analog eine für den Kommunikationsfluss.

Materialfluss

Zur Bewertung des Materialflusses werden Materialflussmatrizen herangezogen. Diese beinhalten die Beziehungen zwischen (Material-) Quellen und (Material-) Senken in einem Unternehmen. Abbildung 15 zeigt ein Beispiel einer Materialflussmatrix (a) sowie verschiedene Bereiche innerhalb einer Materialflussmatrix (b).

(a) Beispiel einer Materialflussmatrix

von\nach	WE	L	F	M	WA	Σ
WE	-	160	10	30	0	200
L	0	-	100	60	0	160
F	0	0	-	100	0	100
M	0	0	10	-	90	100
WA	0	0	0	0	-	0
Σ	0	160	120	190	90	560

WE: Wareneingang
L: Lager
F: Fertigung
M: Montage
WA: Warenausgang

(b) Bereiche in einer Materialflussmatrix

von\nach	I				II
I	IV				II
WA	II				III

I: Fabrikbereiche
II: Zeilen-/Spalten-Summe
III: Summe (gesamt)
IV: Einträge der Materialflüsse

Abbildung 15: (a) Beispiel einer Materialflussmatrix, (b) Bereiche in einer Materialflussmatrix

Auf den Achsen werden die Bereiche aufgetragen (I). Die vertikale Achse umfasst die Quellen des Materialflusses. Dies sind Bereiche, von denen aus das Material fließt. Die horizontale Achse besteht aus Senken, die das Material aufnehmen.

Die äußerste rechte Spalte sowie die unterste Zeile dienen der Summenbildung (II). Die Gesamtsumme wird in Bereich III eingetragen und ist sowohl für die Berechnung über die letzte Zeile als auch über die äußerste rechte Spalte dieselbe.

Bereich IV umfasst die Einträge der Materialflussbeziehungen zwischen den Fabrikbereichen. Diese können bspw. in der Einheit ME (Mengeneinheit) angegeben sein. Dabei ist zu beachten, dass alle Einträge auf einen einheitlichen Zeitraum bezogen werden, um die korrekten Materialflussbeziehungen darzustellen. Allgemein dargestellt enthält die Materialflussmatrix in Bereich IV die Einträge e_{ij} wobei der Index i die Quellen und der Index j die Senken darstellt. Abbildung 16 zeigt die allgemeine Materialflussmatrix mit den Bereichen B_1 bis B_5 .

von\nach	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	Σ
B_1	-	e_{12}	e_{13}	e_{14}	e_{15}	$e_{i=1}$
B_2	e_{21}	-	e_{23}$	...	...	e_{i=2}$
B_3	e_{31}	e_{32}	-	...	...	...
B_4	e_{41}	...	...	-	...	...
B_5	e_{51}	...	...	...	-	...
Σ	$e_{j=1}$	$e_{j=2}$	...	...	...	e_{ges}

Abbildung 16: Allgemeine Materialflussmatrix

Um daraus einen Bewertungsansatz für den Materialfluss in Abhängigkeit der Lage zweier Bereiche zueinander ableiten zu können, werden die einzelnen Materialflüsse in Bezug zur Summe aller Materialflüsse (e_{ges}) gestellt. Somit ergibt sich eine normierte Materialflussmatrix (vgl. Abbildung 17) mit den einheitslosen Einträgen $a_{ij} =$

$$\frac{e_{ij}}{e_{ges}}$$

von\nach	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	Σ
B_1	-	a_{12}	a_{13}	a_{14}	a_{15}	$a_{i=1}$
B_2	a_{21}	-	a_{23}$	...	...	a_{i=2}$
B_3	a_{31}	a_{32}	-	...	...	...
B_4	a_{41}	...	...	-	...	...
B_5	a_{51}	...	...	...	-	...
Σ	$a_{j=1}$	$a_{j=2}$	...	...	...	1

Abbildung 17: Normierte Materialflussmatrix

Um die Komplexität zu minimieren, werden keine Flussrichtungen betrachtet, sodass in einem weiteren Schritt die Zusammenfassung der Einträge a_{ij} und a_{ji} geschehen kann. Somit ergibt sich eine untere Dreiecksmatrix mit den Einträgen $\alpha_{ij} = a_{ij} + a_{ji}$ mit $j < i$ (vgl. Abbildung 18).

	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	Σ
B ₁	-	0	0	0	0	0
B ₂	α ₂₁	-	0	...	...	α _{i=2}
B ₃	α ₃₁	α ₃₂	-	...	...	...
B ₄	α ₄₁	...	...	-	...	...
B ₅	α ₅₁	...	...	...	-	...
Σ	α _{j=1}	α _{j=2}	...	...	...	1

Abbildung 18: Untere Dreiecksmatrix mit zusammengefassten Einträgen

Aus dieser Matrix sind die Gewichtungsfaktoren für die Lage zweier Bereiche zueinander abzulesen. Je höher der Wert eines Gewichtungsfaktors α_{ij} , desto wichtiger ist die Beziehung zwischen den beiden Bereichen für den gesamten Materialfluss und damit die direkte Lage der Bereiche zueinander.

Um in einem weiteren Schritt eine aggregierende Bewertungskennzahl zu bilden, wird im Layout geprüft, ob sich zwei Bereiche direkt „berühren“. Dafür wird die Größe A_{ij} eingeführt. Für den Fall, dass sich die Bereiche i und j berühren, nimmt A_{ij} den Wert eins an. Haben beide Bereiche keine Berührfläche, so ist A_{ij} null. Somit wird berücksichtigt, dass eine Materialflussbeziehung gestört wird, wenn die Bereiche nicht direkt aneinander liegen, sondern ein anderer Bereich den Materialfluss stört. Daher gilt für A_{ij} :

$$A_{ij} \in \{0; 1\}.$$

Somit ergibt sich wiederum eine Matrix mit den Einträgen A_{ij} (vgl. Abbildung 19).

	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅
B ₁	-	0	0	0	0
B ₂	A ₂₁	-	0	...	...
B ₃	A ₃₁	A ₃₂	-	...	...
B ₄	A ₄₁	...	...	-	...
B ₅	A ₅₁	...	...	...	-

Abbildung 19: Untere Dreiecksmatrix mit den Berührflächen

Zur abschließenden Bewertung des Materialflusses innerhalb eines Groblayouts werden somit die Einträge der Matrix mit den Gewichtungsfaktoren α_{ij} mit denen der Matrix mit den Berührflächen A_{ij} multipliziert. Dabei ist zu beachten, dass es sich nicht um Matrizenmultiplikation im mathematischen Sinne handelt, sondern um die Multiplikation von Einzelwerten.

Somit ergibt sich eine Matrix mit Bewertungen einzelner mit dem Materialfluss gewichteten Bereichsberührungen. Die Summe Multiplikationen aus $\alpha_{ij} \cdot A_{ij}$ ergibt die Bewertung des Materialflusses B_{MF} . Diese Bewertungskennzahl kann demnach auch nach folgender Gleichung berechnet werden:

$$B_{MF} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=i}^m \alpha_{ij} * A_{ij}$$

- Mit: B_{MF} : Bewertungskennzahl für den Materialfluss
 α : Normierte Einträge in der Materialflussmatrix ohne Berücksichtigung der Flussrichtung
 A : Berührung zweier Bereiche
 i, j : Fabrikbereiche
 m : Summe aller Bereiche

Die Bewertungskennzahl für den Materialfluss kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen, wobei Werte, die nahe an 1 liegen bedeuten, dass ein guter Materialfluss erreicht werden kann. Werte, die nahe der 0 liegen, bedeuten, dass der Materialfluss häufig gestört wird bzw. Material häufig durch Bereiche hindurch transportiert werden muss, in denen am Material keine Wertschöpfung geschieht.

Wird diese Gesamtbewertung wiederum mit dem Gewicht des Materialflusses γ_{MF} multipliziert, so ergibt sich der erste Teil der Bewertung eines Layouts aus logistischer Sicht. Dem muss die im Folgenden erläuterte Bewertung des Kommunikationsflusses hinzugezählt werden, um die Gesamtbewertung aus logistischer Sicht zu erhalten.

Kommunikationsfluss

Die Bewertung des Kommunikationsflusses geschieht analog zur Bewertung des Materialflusses. Dazu werden Kommunikationsflussmatrizen mit den Kommunikationsintensitäten zwischen zwei Bereichen zur Hilfe genommen. Da jedoch vor allem in KMU selten Kommunikationsintensitäten als Anzahl stattfindender Kommunikationsvorgänge oder ähnlichen Zahlenwerten gemessen werden, wird hier die Kommunikationsintensität qualitativ angegeben. Tabelle 2 zeigt eine Einteilung der Kommunikationsintensitäten in fünf Klassen. Jeder Klasse ist ein kodierter Zahlenwert zugeordnet, um die Kommunikationsintensität einer quantifizierbaren Bewertungskennzahl zugänglich zu machen. Für den Fall, dass Kommunikationsintensitäten in Zahlenwerten vorliegen, kann eine Einordnung in die vorliegenden Klassen geschehen.

Tabelle 2: Kommunikationsintensitäten

Klasse	kodierter Zahlenwert
Sehr hoch	1
Hoch	2
Mittel	3
Niedrig	4
Sehr niedrig	5

Zur Vereinfachung und Zusammenfassung der Kommunikationsflüsse wird analog zum Vorgehen bei der Bewertung des Materialflusses eine untere Dreiecksmatrix

erzeugt. Dabei werden wiederum die kodierten Zahlenwerte für die verschiedenen Klassen miteinander addiert und als Summe f_{ges} in die Kommunikationsflussmatrix eingetragen. Somit gilt für den Gewichtungsfaktor β_{ij} analog zu α_{ij} :

$$\beta_{ij} = b_{ij} + b_{ji} = \frac{f_{ij}}{f_{ges}} + \frac{f_{ji}}{f_{ges}}$$

Mit:

- β_{ij} : Gewichtungsfaktor für die Kommunikationsintensität zwischen zwei Bereichen
- b_{ij} normierte Kommunikationsintensität zwischen den Bereichen i und j
- f_{ij} kodierter Zahlenwert der Kommunikationsintensität zwischen den Bereichen i und j.

Analog zur Berechnung der Bewertungskennzahl des Materialflusses müssen diese Gewichtungsfaktoren anschließend mit den Berührflächen A_{ij} multipliziert werden. Auch hier gilt, dass nur die direkte Berührung zweier Bereiche positiv bewertet wird. Berühren sich die Bereiche nicht, findet dieses auch keine Berücksichtigung in der Bewertungskennzahl.

Die Summe aller mit dem Kommunikationsfluss gewichteten Bereichsberührungen ergibt somit die Bewertung des Kommunikationsflusses (vgl. folgende Gleichung).

$$B_{KF} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=i}^m \beta_{ij} * A_{ij}$$

- Mit: B_{KF} : Bewertungskennzahl für den Kommunikationsfluss
- β : Normierte Einträge in der Kommunikationsflussmatrix ohne Berücksichtigung der Flussrichtung
- A: Berührung zweier Bereiche
- i, j: Fabrikbereich
- m: Summe aller Bereiche

Auch die Bewertung des Kommunikationsflusses kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen, wobei die Werte analog zu interpretieren sind.

Gesamtbewertung aus logistischer Sicht

Die Aggregation zu einer Bewertungskennzahl eines Layouts aus logistischer Sicht ergibt sich jeweils durch Multiplikation der beiden Bewertungskennzahlen B_{MF} und B_{KF} mit den im ersten Schritt zugewiesenen Gewichten γ_{MF} und γ_{KF} , sodass sich für die Bewertungskennzahl aus logistischer Sicht ergibt:

$$B_{Log} = \gamma_{MF} \cdot B_{MF} + \gamma_{KF} \cdot B_{KF}$$

$$B_{\text{Log}} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=i}^m (\gamma_{\text{MF}} \cdot \alpha_{ij} + \gamma_{\text{KF}} \cdot \beta_{ij}) * A_{ij}$$

- Mit:
- B_{MF} : Bewertungskennzahl für den Materialfluss
 - α : Normierte Einträge in der Materialflussmatrix ohne Berücksichtigung der Flussrichtung
 - B_{KF} : Bewertungskennzahl für den Kommunikationsfluss
 - β : Normierte Einträge in der Kommunikationsflussmatrix ohne Berücksichtigung der Flussrichtung
 - γ_{MF} : Gewicht des Materialflusses
 - γ_{KF} : Gewicht des Kommunikationsflusses
 - A: Berührung zweier Bereiche
 - i, j: Fabrikbereich
 - m: Summe aller Bereiche

Auch für die Gesamtbewertungskennzahl aus logistischer Sicht ergibt sich ein möglicher Wertebereich zwischen 0 und 1, wobei eine Bewertungskennzahl nahe der 1 eine gute Bewertung eines Layouts aus logistischer Sicht darstellt. Dahingegen weisen Layouts mit Bewertungen nahe der 0 deutliche Defizite in logistischen Fragestellungen auf.

4.2.3.2 Bewertungskennzahl aus bauphysikalischer Sicht

Um die Lagebeziehungen der aus bauphysikalischer Sicht identifizierten Fabrikbereiche untereinander hinsichtlich eines optimierten Energieflusses mit dem Ziel der Nutzung von internen Wärmequellen beurteilen zu können, wird im Folgenden die Berechnungsmethodik zur Ermittlung der Bewertungskennzahl vorgestellt.

Eine dynamische Bewertung von Groblayouts von Fabriken aus energetischer Sicht ist nach aktuellem Kenntnisstand im Allgemeinen nur in Kombination mit einer rechnergestützten Gebäudesimulation möglich. Hinsichtlich einer energieoptimierten Groblayoutplanung werden derzeit daher grundsätzliche Hinweise und gegebenenfalls Simulationen mittels geeigneter Computerprogramme durchgeführt. Das Ziel dieser Untersuchungen ist es daher, die Ergebnisse der simulativen Untersuchungen in eine näherungsweise dynamische Bewertungsmethodik zu überführen.

In Anlehnung an die logistische Herangehensweise bietet es sich an, analog zu den Materialfluss- und Kommunikationsflussmatrizen auch die energetische Lagebeziehung benachbarter Bereiche innerhalb einer Fabrik über Matrizen zu bewerten. So kann beispielsweise die Lage eines Bereichs über die Kontaktfläche zu einem anderen Fabrikbereich als positiv oder negativ bewertet werden. Dafür müssen fundierte Kenntnisse über die Wirkzusammenhänge des Kontakts zweier Bereiche vorhanden

sein. Diese Wirkzusammenhänge können über eine Bewertung des Kontakts in einer statischen Energieflussmatrix zusammengeführt werden.

Zur Bewertung eines individuell gestalteten Fabriklayouts müssen die zu bewertenden Kontaktflächen im Rastermaß gezählt und zur Ermittlung einer Bewertungskennzahl zu allen Kontaktflächen ins Verhältnis gesetzt werden. Hierzu wird die Größe k_{ij} eingeführt um die Berührflächen zweier Bereiche zu zählen. Hierfür gilt:

$$k_{ij} \in \{R_0^+\} \text{ sowie } k_{ij} = k_{ji}.$$

Die ermittelten Berührflächen können in einer Kontaktflächenmatrix mit den Einträgen k_{ij} zusammengefasst werden.

	C1	C2	C3	C4	C5
C1	k_{11}	k_{12}	k_{13}	k_{14}	k_{15}
C2	k_{21}	k_{22}	k_{23}	k_{24}	k_{25}
C3	k_{31}	k_{32}	k_{33}	k_{34}	k_{35}
C4	k_{41}	k_{42}	k_{43}	k_{44}	k_{45}
C5	k_{51}	k_{52}	k_{53}	k_{54}	k_{55}

Abbildung 20: Kontaktflächenmatrix

Um die Lage zweier Bereiche zueinander zu bewerten, wird in einer Energieflussmatrix die Größe ε_{ij} eingeführt. Wird empfohlen, einen Bereich neben einen anderen anzuordnen, nimmt der Wert ε_{ij} den Wert „1“ an, wenn nicht, dann ist $\varepsilon_{ij} = 0$. Sollte die Lage zweier Bereiche zueinander neutral bewertet werden dann wird die Lagebeziehung nicht bewertet und mit einem „/“ gekennzeichnet. Die energetische Bewertung von zwei unterschiedlichen Bereichen wird für jeden Bereich einzeln untersucht und anschließend für eine Lagebeziehung geltend ganzheitlich bewertet. Daher wird die Lagebeziehung zweier Bereiche nur einmal und richtungsunabhängig bewertet. Es ergibt sich im Allgemeinen für die Energieflussmatrix:

	B1	B2	B3	B4	B5
B1		ϵ_{12}	ϵ_{13}	ϵ_{14}	ϵ_{15}
B2			ϵ_{23}	ϵ_{24}	ϵ_{25}
B3				ϵ_{34}	ϵ_{35}
B4					ϵ_{45}
B5					

Abbildung 21: Energieflussmatrix mit Bewertungsgrößen ϵ_{ij}

Es ergibt sich für ϵ_{ij} :

$$\epsilon_{ij} \in \{0; 1; / \}$$

Zur Bewertung des Energieflusses innerhalb des Groblayouts werden die Einträge der Kontaktflächenmatrix k_{ij} mit den Bewertungen aus der Energieflussmatrix ϵ_{ij} multipliziert. Hierbei werden die Einzelwerte miteinander multipliziert. Die Summe dieser Multiplikation ergibt die bewerteten Kontaktflächen A_{EF} . Diese bewerteten Kontaktflächen können demnach auch nach folgender Gleichung berechnet werden:

$$A_{EF} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m k_{ij} \cdot \epsilon_{ij}$$

- Mit:
- A_{EF} : bewertete Kontaktflächen des Energieflusses
 - k : Kontaktflächenanzahl der Bereiche
 - ϵ : Bewertung der Lagebeziehung zweier Bereiche
 - i, j : Fabrikbereiche
 - m : Summe aller Bereiche

Für die Ermittlung der Bewertungskennzahl müssen die bewerteten Kontaktflächen A_{EF} mit der Summe aller wirksamen Kontaktflächen normiert werden. Diese wirksamen Flächen sind diejenigen Kontaktflächen in der Kontaktflächenmatrix, die an entsprechender Stelle in der Energieflussmatrix mit „0“ oder „1“ bewertet werden. Dementsprechend gilt für die Summe der wirksamen Flächen:

$$A_{wirksam} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m k_{ij}, \text{ wenn } \epsilon_{ij} \in \{0; 1\}$$

- Mit: $A_{wirksam}$: Summe aller wirksamen Kontaktflächen

Daraus lässt sich die Bewertungskennzahl aus bauphysikalischer Sicht errechnen mit:

$$B_{Bau} = \frac{A_{EF}}{A_{wirksam}}$$

Mit: B_{Bau} : Bewertungskennzahl aus bauphysikalischer Sicht.

4.2.3.3 Bewertungskennzahl aus architektonischer Sicht

Aus architektonischer Sicht wird aus den Kriterien Tageslichtversorgung/Sichtbezug zur äußeren Umwelt, Form der Büro- und Sozialbereiche sowie Stützraster eine Bewertungskennzahl gebildet.

Zur Bewertung der Tageslichtversorgung bzw. des Sichtbezugs zur äußeren Umwelt im Fabrikmodell kann die Tiefe von Büro- und Sozialbereichen herangezogen werden. Die Tiefe ist dabei definiert durch die maximale eindimensionale Ausdehnung eines Bereichs gemessen von einer Außenwand. Bewertet wird mittels Punktvergabe aus der Menge $\{-1; 0; 1\}$, wobei „-1“ für eine negative, „0“ für eine neutrale und „1“ für eine positive Bewertung vergeben wird. Für die Bewertung der Büro- und Sozialraumtiefen B_{BT} werden für die im Planungsraster festgelegten Maßeinheiten folgende Punktbewertungen definiert:

- Büro- und Sozialraumtiefe = 6 m: -1 Punkt,
- Büro- und Sozialraumtiefe = 12 m: 1 Punkt,
- Büro- und Sozialraumtiefe = 18 m: 0 Punkte,
- Büro- und Sozialraumtiefe = 24 m (Lage zwischen zwei parallelen Außenwänden): 1 Punkte,
- Büro- und Sozialraumtiefe = 24 m (Lage nicht zwischen zwei parallelen Außenwänden): -1 Punkt,
- Büro- und Sozialraumtiefe = 36 m (Lage zwischen zwei parallelen Außenwänden): 0 Punkte,
- Büro- und Sozialraumtiefe > 36 m: -1 Punkt.

Dabei findet ebenfalls Berücksichtigung, dass sehr schmale Büro- und Sozialräume (6 m) nicht positiv zu bewerten sind.

Neben der Tiefe der Räume wird ebenfalls die Form der oben genannten Bereiche bewertet. Jedoch wird hier lediglich eine Bewertung aus der Menge $\{-1; 1\}$ vorgenommen. Dabei wird grundsätzlich die Form eines Bereichs bewertet, der zusammenhängend ist. Für die Bewertung der Büro- und Sozialraumform B_{BF} wurde folgende Punktverteilung definiert:

- Büro- und Sozialräume rechteckig: 1 Punkt,
- Büro- und Sozialräume winkel- bzw. L-förmig: -1 Punkt.

Das letzte Bewertungskriterium aus architektonischer Sicht ist die gleichmäßige Anordnung von Stützpfelern. Dazu wird wiederum folgende Punktverteilung aus der Menge $\{-1; 0; 1\}$ für die Bewertungskennzahl für die Stützpfelern B_{SP} definiert:

- Möglicher Abstand zwischen Stützpfelern 30 m oder 24 m: 1 Punkt,
- Möglicher Abstand zwischen Stützpfelern 18 m: 0 Punkte,

- Möglicher Abstand zwischen Stützpfählern 12 m oder 6 m: -1 Punkt.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass es auf eine gleichmäßige Verteilung der Stützpfähler ankommt und sich für größere Hallen die größtmögliche symmetrische Teilung sowie die daraus folgende Punktzahl ergibt. Darüber hinaus gilt es ebenfalls beide Dimensionen in der Ebene zu bewerten, wobei die „schlechter bewertete Dimension“ dominant ist, also die Punktzahl vorgibt. Hat eine Halle bspw. in einer Dimension eine Ausdehnung von 36 m und in der anderen eine Ausdehnung von 24 m, ergibt sich eine symmetrische Teilung von 18 m in der ersten Dimension, was wiederum eine Bewertung mit 0 Punkten nach sich zieht. Diese Bewertung ist gegenüber der Bewertung der anderen Dimension dominant, sodass eine Punktzahl von 0 Punkten vergeben wird.

Da alle drei Kriterien als gleichwertig anzusehen sind, geht jede mit dem gleichen Anteil in die Bewertungskennzahl aus architektonischer Sicht B_{Arch} nach folgender Formel ein:

$$B_{Arch} = \frac{1}{3}B_{BT} + \frac{1}{3}B_{BF} + \frac{1}{3}B_{SP}$$

Mit: B_{Arch} : Bewertungskennzahl aus architektonischer Sicht

B_{BT} : Punktzahl für die Büro- und Sozialraumtiefe

B_{BF} : Punktzahl für die Büro- und Sozialraumform

B_{SP} : Punktzahl für die mögliche Anordnung von Stützpfählern

4.2.4 Aggregation der Einzelkennzahlen zu einer Gesamtbewertungskennzahl

Um eine Gesamtbewertung aus allen drei Fachsichten abzubilden, werden die jeweiligen Bewertungskennzahlen zu einer Spitzenkennzahl aggregiert. Aus den Abstimmungen mit den Vertretern des PbA konnte gefolgert werden, dass eine Verrechnung der drei Bewertungskennzahlen B_{Log} , B_{Bau} und B_{Arch} über feste Faktoren nicht zielführend ist. Da jedem Fabrikplanungsprojekt unterschiedliche Fragestellungen und Schwerpunkte zugrunde liegen, bietet es sich hier an, wiederum variable Gewichtungsfaktoren zu Errechnung einer Gesamtbewertungskennzahl heran zu ziehen. Daher wurden die Faktoren δ_{Log} , δ_{Bau} und δ_{Arch} eingeführt. Für diese Faktoren gilt:

$$\delta_{Log} + \delta_{Bau} + \delta_{Arch} = 1$$

$$0 \leq \delta_{Log} \leq 1$$

$$0 \leq \delta_{Bau} \leq 1$$

$$0 \leq \delta_{Arch} \leq 1$$

Mit:

δ_{Log} : Gewichtungsfaktor für die Bewertungskennzahl aus logistischer Sicht

δ_{Bau} : Gewichtungsfaktor für die Bewertungskennzahl aus bauphysikalischer Sicht

δ_{Arch} : Gewichtungsfaktor für die Bewertungskennzahl aus architektonischer Sicht

Somit ergibt sich für die Bewertung eines Fabriklayouts aus den drei Fachsichten:

$$B_{GES} = \delta_{Log} \cdot B_{Log} + \delta_{Bau} \cdot B_{Bau} + \delta_{Arch} \cdot B_{Arch}$$

4.3 BS 3: Untersuchung mittels Fabrikmodell und Ableitung von Handlungsempfehlungen

4.3.1 Untersuchungen mittels Fabrikmodell

Um Fabriklayouts rechnergestützt hinsichtlich ihrer energieflusstechnischen Wechselwirkungen sowie der Wechselwirkungen der logistischen Zielgrößen untersuchen und beurteilen zu können, wurden systematisch unterschiedliche Bereichsanordnungen entwickelt, die auf Basis der Feldstudie bei den Praxispartnern entstanden sind. Hierzu wurden den identifizierten Bereichen (Fertigung, Montage, Büro, etc.) entsprechende Flächenausprägungen zugewiesen, die sich bei den untersuchten Fabriken als generell üblich herausgestellt haben. Um vereinfachte und einheitliche Grundrisse für die Untersuchungen zu schaffen, wurden die Flächenanteile im Rastermaß auf 5 x 5 Rasterelemente verteilt. Abbildung 22 zeigt ein solches Modell in einer 3D-Ansicht. Dabei wurden in den Untersuchungen aus bauphysikalischer Sicht die Wärmeeinträge in der Fertigung variiert. Die Unterscheidung des Lagers aus logistischer Sicht in Warenein- und -ausgangslager sowie Lager in der Produktion wurde dahingehend vorgenommen, dass ein Lagerbereich, der an einer Außenwand liegt, immer als Warenein- oder ausgangslager betrachtet wurde. Die innenliegenden Lagerbereiche wurden als Lager in der Produktion definiert.

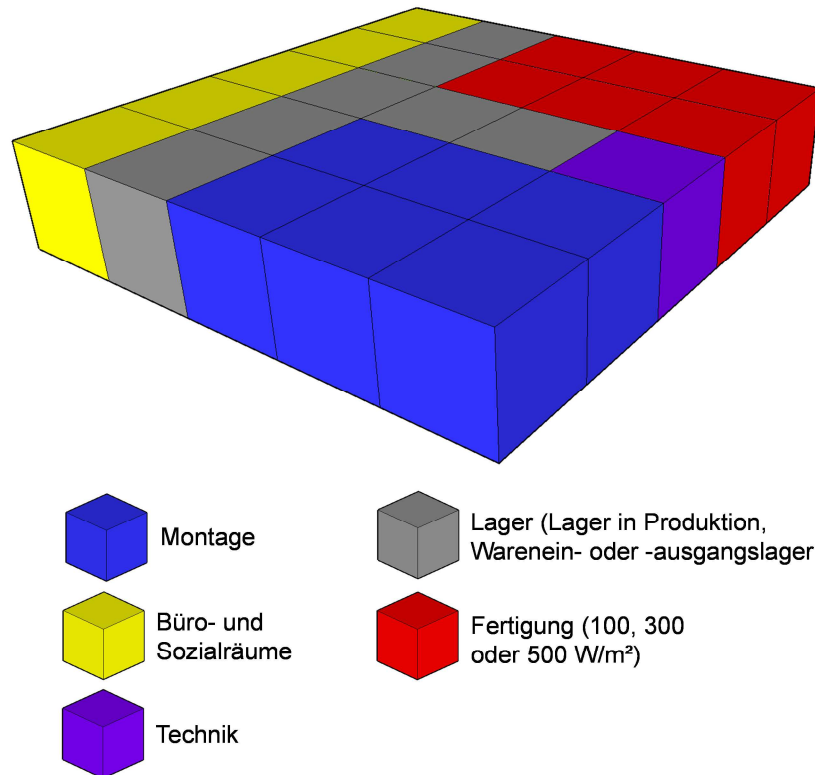


Abbildung 22: Beispielhaftes Fabriklayout zur Untersuchung

In dieser Form wurden im nächsten Schritt alternative Fabriklayout erzeugt, die die Grundlage für die energetischen sowie logistischen Untersuchungen darstellen. Das Ziel der Untersuchungen aus den Fachsichten ist, Erkenntnisse für die Handlungsempfehlungen zur energie- und materialflusseffiziente Fabrikplanung ableiten zu können, die sich anschließend auf individuell erweiterbare und skalierbare Fabriklayouts übertragen lassen. Den untersuchten Fabriklayouts liegen übliche Anordnungsmöglichkeiten aus logistischer Sicht zugrunde. Dabei wurden die Formen der Büro- und Sozialbereiche sowie der Fertigungs- und Montagebereiche variiert. Die Büro- und Sozialbereiche wurden kompakt oder langgezogen (wie bspw. in Abbildung 22 dargestellt) angeordnet. Fertigung und Montage folgen den logistischen Prinzipien der Werkstatt / Insel (wie in Abbildung 22 dargestellt) oder der Linie. Diese Anordnungsmöglichkeiten wurden mit Hilfe einer Matrix zu unterschiedlichen Fabriklayouts kombiniert. Dabei ist die Anzahl der Rasterelemente pro Bereich immer identisch. Lediglich die Anordnung weicht voneinander ab. Aus der Kombination der verschiedenen Bereiche unter Berücksichtigung der Anordnungsvarianten der Bereiche Büro- und Sozialräume, Fertigung sowie Montage ergeben sich 1.309 verschiedene Fabriklayouts. Abbildung 23 zeigt einen Ausschnitt aus der Tabelle mit den verschiedenen hergeleiteten Fabriklayouts, die für die Untersuchungen herangezogen wurden. Dabei sind in der oberen Zeile die unterschiedlichen Anordnungsmöglichkeiten von Fertigung und Montage zu erkennen und in der ersten Spalte die Anordnung der Büro- und Sozialräume. Im mittleren Bereich sind die sich daraus ergebenden Fabriklayouts zu sehen.



Abbildung 23: Ausschnitt aus der Tabelle mit verschiedenartigen Fabriklayouts

Für die Untersuchungen wurde der Umfang der Fabriklayouts durch das systematische Eliminieren ähnlicher Fabriklayouts sinnvoll begrenzt. Diese Ähnlichkeiten bestehen vor allem in Symmetrien, Spiegelungen, Drehungen und nur minimalen Unterscheidungen in zwei Rasterelementen. Abbildung 24 zeigt bspw. jeweils zwei sehr ähnliche Fabriklayouts. Die einzigen Unterschiede bestehen nur in der jeweils um eine Position im Rastermaß verschobenen Anordnung der Büro- und Sozialräume. Da solche Fabriklayouts als sehr ähnlich anzusehen sind, wurde nur jeweils eins davon zur Untersuchung herangezogen.

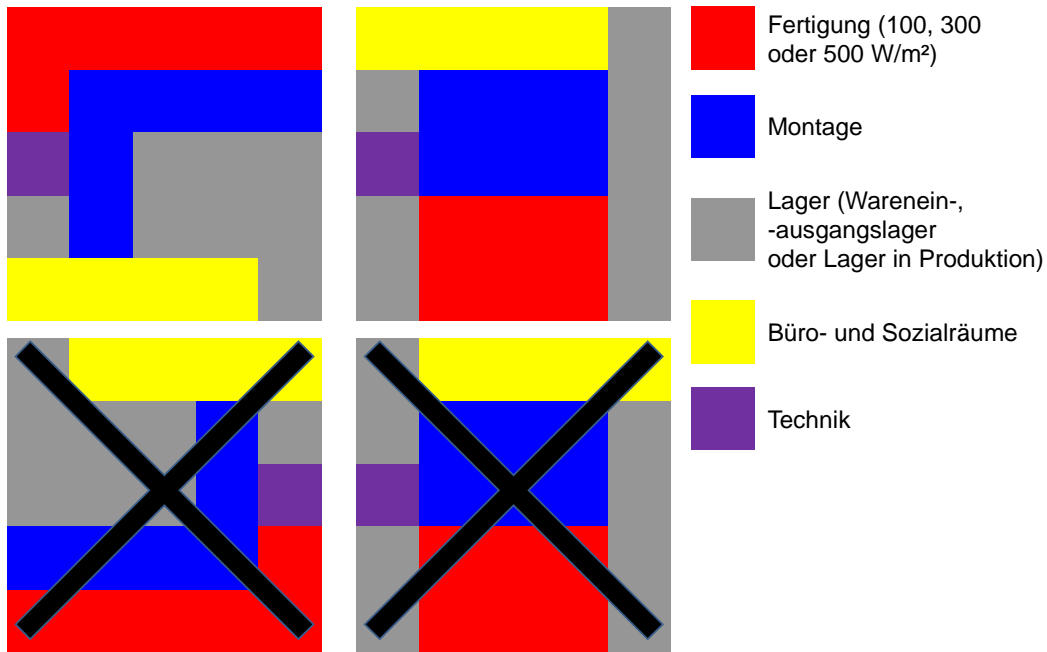


Abbildung 24: Fabriklayouts mit ähnlichen Bereichsanordnungen

4.3.1.1 Untersuchungen aus Sicht der Logistik

Die Untersuchungen der Fabriklayouts wurden vorerst mit fest definierten Material- und Kommunikationsflussbeziehungen vorgenommen.

von\nach	WE	L	F	M	WA	Σ
WE	-	30 Einheiten	60 Einheiten	10 Einheiten	0 Einheiten	100 Einheiten
L	0 Einheiten	-	0 Einheiten	50 Einheiten	15 Einheiten	65 Einheiten
F	0 Einheiten	5 Einheiten	-	50 Einheiten	0 Einheiten	55 Einheiten
M	0 Einheiten	30 Einheiten	0 Einheiten	-	85 Einheiten	115 Einheiten
WA	0 Einheiten	0 Einheiten	0 Einheiten	0 Einheiten	-	0 Einheiten
Σ	0 Einheiten	65 Einheiten	60 Einheiten	110 Einheiten	100 Einheiten	335 Einheiten

WE: Wareneingangslager

L: Lager in der Produktion

M: Montage

WA: Warenausgangslager

F: Fertigung

Abbildung 25: Angenommene Materialflussbeziehungen zwischen Fabrikbereichen

von/nach	WE	L	F	M	WA	B/S
WE	-	Niedrig	Hoch	Hoch	Sehr niedrig	Sehr hoch
L	Mittel	-	Mittel	Hoch	Sehr niedrig	Mittel
F	Hoch	Mittel	-	Sehr hoch	Sehr niedrig	Sehr hoch
M	Hoch	Hoch	Sehr hoch	-	Mittel	Sehr hoch
WA	Sehr niedrig	Sehr niedrig	Sehr niedrig	Sehr niedrig	-	Mittel
B/S	Sehr hoch	Mittel	Sehr hoch	Sehr hoch	Mittel	-

WE: Wareneingangslager

WA: Warenausgangslager

L: Lager in der Produktion

F: Fertigung

M: Montage

B/S: Büro-/Sozialräume

Abbildung 26: Angenommene Kommunikationsflussbeziehungen zwischen den Bereichen

Die zur Errechnung der Bewertungskennzahl aus logistischer Sicht notwendige Gewichtung des Materialflusses und des Kommunikationsflusses wurde wie folgt angenommen:

$$\gamma_{MF} = 0,7$$

$$\gamma_{KF} = 0,3$$

Somit wurde der Aussage der Teilnehmer des PbA Rechnung getragen, dass der Materialfluss grundsätzlich den höheren Stellenwert im Rahmen der Fabrikplanung hat.

Da die Bewertungskennzahl aus logistischer Sicht eine direkte Lage von Bereichen aneinander, gewichtet mit der Intensität der Beziehung zweier Bereiche, ausdrückt, wurden folgerichtig diejenigen Layouts am besten bewertet, in denen die Beziehungen am stärksten abgebildet sind. Da die Untersuchungen bei den Praxispartnern sowie die Aussagen der Teilnehmer des PbA zeigten, dass fest definierte Material- und Kommunikationsflüsse jedoch nicht unternehmensübergreifend anzusetzen sind, ist in der Praxis eine dynamische Bewertung mit realen Material- und Kommunikationsflüssen vorzunehmen.

4.3.1.2 Untersuchungen aus Sicht der Bauphysik

Entwicklung eines Berechnungsmodells

Um Handlungsempfehlungen als Grundlage zur energieflussoptimierten abzuleiten, sind umfassende Untersuchungen an den entwickelten Fabriklayouts zur energetischen Entwicklung abhängig von der Bereichsanordnung notwendig. Diese Untersuchungen wurden mit Hilfe der dynamischen Simulationssoftware TRNSYS 17 [TRN27] durchgeführt. TRNSYS („A Transient System Simulation Tool“) ist anfänglich für die Bilanzierung von Gebäuden mit solarer Wärmeversorgung in den siebzi-

ger Jahren an der Universität von Wisconsin in den USA entwickelt worden. Die Simulationssoftware wurde im Laufe der Jahre soweit angepasst und weiterentwickelt, dass sie in der Forschung weltweit zur Standardanwendung in der thermischen Gebäudesimulation herangezogen wird.

Mit Hilfe einer Schnittstelle zum Programm google SKETCHUP ist es möglich, Gebäudegeometrien zu generieren und anschließend für die Simulation zu verwenden. So konnten sämtliche für die Untersuchung ausgewählte Fabriklayouts mit Hilfe einer grafischen Oberfläche als Rastermodell erstellt (vgl. Abbildung 27) werden.

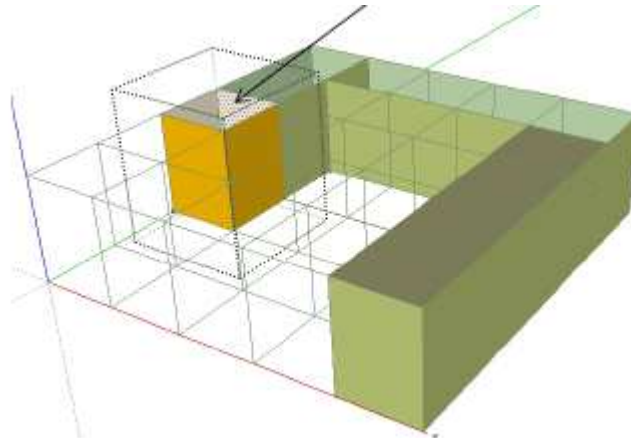


Abbildung 27: Modellerstellung mit Hilfe des Rastermodells

Mit der Simulationssoftware wurden der Gebäudegeometrie Materialparameter sowie die das Gebäude umgebenden Randbedingungen definiert.

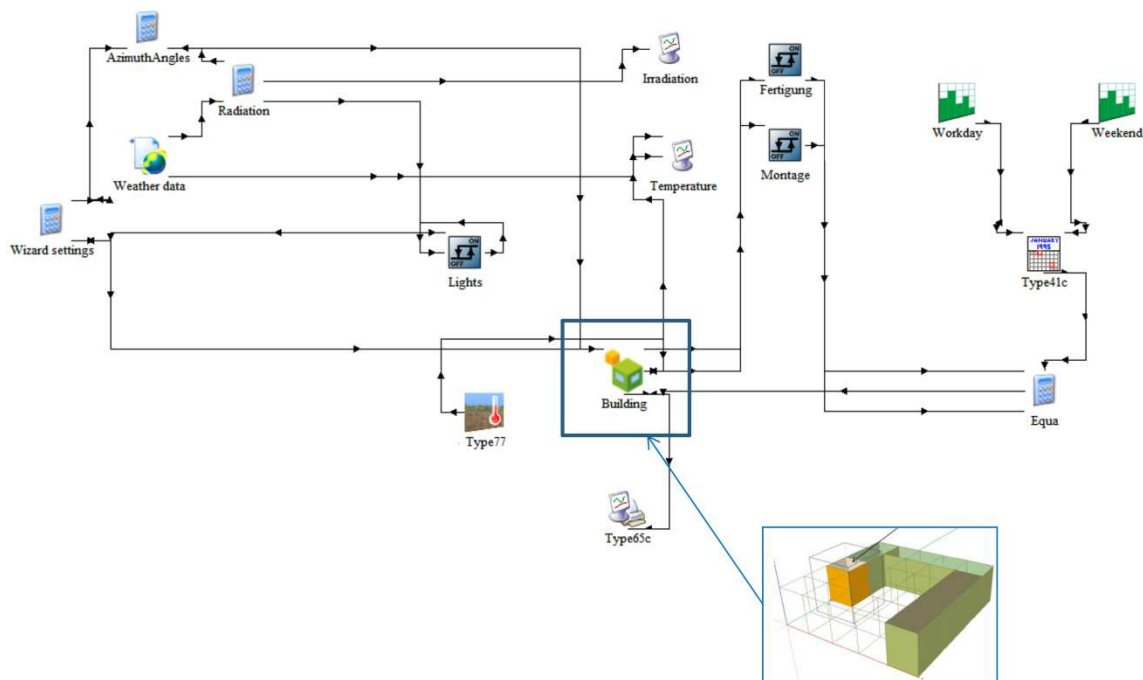


Abbildung 28: Benutzeroberfläche der Simulationssoftware

Anschließend können diverse Berechnungen mit unterschiedlichen Zielgrößen durchgeführt werden. Zielgröße bei den vorliegenden Untersuchungen sind die Energiebedarfe hinsichtlich benötigter Heiz- und Kühlenergie über jeweils ein Jahr sowie die in den Fabrikbereichen auftretenden Temperaturen.

Um ein Berechnungsmodell zu entwickeln, das hinsichtlich der vorab definierten Zielgrößen und Parameter untersucht werden kann, wurden umfassende Voruntersuchungen zu Wärmetransport, Wärmeenergieeinträgen sowie zahlreiche Plausibilitätsuntersuchungen durchgeführt. Hierbei konnten außerdem die in der Literatur angegebenen Wärmeenergieeinträge für unterschiedliche Fertigungstypen anhand der gemessenen Temperaturen bei den Projektpartnern verifiziert werden.

Berechnungsparameter

Neben den beschriebenen Randbedingungen zu Raum-Solltemperaturen und Wärmeenergieeinträgen bei den einzelnen Fabrikbereichen wurden für die Berechnung des Fabrikmodells weitere Eingangsparmeter festgelegt. In Anlehnung an die Nutzungsrandbedingungen der DIN V 18599-10 [DIN07] und Vorgaben aus der aktuell gültigen Energieeinsparverordnung [EnEV09] hinsichtlich der Qualität der thermischen Gebäudehülle wurden für jeden Fabrikbereich allgemeine Annahmen zu u.a. Nutzungszeiten und Bauteilqualitäten getroffen. Die für die Berechnung der Fabrikmodelle verwendeten Berechnungsannahmen für die Fabrikbereiche sind der nachfolgenden Tabelle zu entnehmen.

Randbedingungen für Fabrikbereiche ¹		Fertigung	Montage	Lager	Büro- & Sozialräume	Technik	
Allgemeine Nutzungsrandbedingungen ¹	Nutzungszeiten						
		Einheit	Wert	Wert	Wert	Wert	Wert
	Jährliche durchschnittliche Nutzungszeit (von xx:xx Uhr bis xx:xx Uhr)	Uhrzeit	07:00 Uhr bis 16:00 Uhr	07:00 Uhr bis 16:00 Uhr	00:00 Uhr bis 24:00 Uhr	07:00 Uhr bis 18:00 Uhr	07:00 Uhr bis 16:00 Uhr
	Anzahl jährliche Nutzungstage	d/a	250	250	365	250	250
	Jährliche Nutzungsstunden zur Tagzeit (Intervall: 06:00 Uhr bis 22:00 Uhr)	h/a	2192	2192	4407	2543	2192
	Jährliche Nutzungsstunden zur Nachtzeit (Intervall: 22:00 Uhr bis 06:00 Uhr)	h/a	58	58	4353	207	58
	Tägliche Betriebszeit der Raumlufttechnik (RLT) und Kühlung (von xx:xx Uhr bis xx:xx Uhr)	Uhrzeit	05:00 Uhr bis 16:00 Uhr	05:00 Uhr bis 16:00 Uhr	00:00 Uhr bis 24:00 Uhr	05:00 Uhr bis 18:00 Uhr	05:00 Uhr bis 16:00 Uhr
	Tägliche Betriebszeit der Heizung (von xx:xx Uhr bis xx:xx Uhr)	Uhrzeit	05:00 Uhr bis 16:00 Uhr	05:00 Uhr bis 16:00 Uhr	00:00 Uhr bis 24:00 Uhr	05:00 Uhr bis 18:00 Uhr	05:00 Uhr bis 16:00 Uhr
	Jährliche durchschnittliche Betriebstage jeweils für	-	-	-	-	-	-
	RLT	d/a	250	250	365	250	250
	Heizung	d/a	250	250	365	250	250
	Kühlung	d/a	250	250	365	250	250
Bauphysik ²	Raumkonditionierung						
		Einheit	Wert	Wert	Wert	Wert	Wert
	Raum-Solltemperatur Heizung	°C	17,00	17,00	12,00	21,00	17,00
	Raum-Solltemperatur Kühlung, Lüftung	°C	26,00	26,00	26,00	24,00	26,00
	Minimaltemperatur Auslegung Heizung	°C	15,00	15,00	12,00	20,00	15,00
	Maximaltemperatur Auslegung Kühlung	°C	30,00	30,00	28,00	26,00	28,00
	Temperaturabsenkung reduzierter Betrieb	K	4,00	4,00	0,00	4,00	4,00
	Mindestaußenluftvolumenstrom						
		Einheit	Wert	Wert	Wert	Wert	Wert
	Mindestaußenluftvolumenstrom	1/h	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60
	Wärmeeinträge						
		Einheit	Wert	Wert	Wert	Wert	Wert
	Maximale Belegungsdichte	m ² je Person	ca. 20	ca. 20	-	ca. 14	-
	Wärmeenergieeintrag durch Personen (190W/Person) ²	W/m ²	ca. 12	ca. 12	-	ca. 10	-
	Wärmeenergieeintrag durch Anlagen, Transporthilfsmittel etc.	W/m ²	100 bzw. 300 bzw. 500 ² + 35	35	-	ca. 10	ca. 10
	Wärmeenergiezufuhr je Tag	Wh/(m ² *d)	-	-	-	-	-
	Beleuchtung						
		Einheit	Wert	Wert	Wert	Wert	Wert
Wartungswert der Beleuchtungsstärke	lx	500	500	100	500	100	
Bauteile ³							
	Einheit	Wert	Wert	Wert	Wert	Wert	
Dach	U-Wert in W/(m ² K)	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	
Außenwand	U-Wert in W/(m ² K)	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	
Unterer Gebäudeabschluss	U-Wert in W/(m ² K)	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	
Innenwand opak	U-Wert in W/(m ² K)	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	
¹ : Nutzungsrandbedingungen in Anlehnung an DIN V 18599-10 ² : Angaben gemäß VDI 3802 ³ : Angaben gemäß EnEV '09							

Abbildung 29: Eingangsparameter für die Untersuchung an den Fabrikmodellen

Für die Simulationsrechnung wurde das Außenklima mit dem Datensatz des Deutschen Wetterdienstes (DWD) [DWD04], den sogenannten mittleren Testreferenzjahren (TRY) durchgeführt.

Ergebnisse der Untersuchungen am Fabrikmodell

Als Grundlage für die Bewertungen der Energieflussbeziehungen zwischen den einzelnen Bereichen dienen die Untersuchungsergebnisse zu den Energiebedarfen der einzelnen Fabriklayoutvarianten. Bei der Interpretation der Untersuchungsergebnisse sei ausdrücklich darauf hingewiesen, dass es sich bei den ausgewiesenen Energiebedarfen nicht um tatsächliche Prognosen zu absoluten Energieverbräuchen handelt. Verluste aus Anlagentechnik oder Energiebedarfe aus Beleuchtung oder Belüftung sowie eingesetzten Energieträgern wurden bei den beschriebenen Zielgrößen nicht berücksichtigt. Der Fokus der Untersuchungen lag allein darauf, das

energetische Potential aus der Variation der geometrischen Anordnung der Fabrikbereiche zu ermitteln.

Im Folgenden werden zunächst die Ergebnisse durchgeführter Voruntersuchungen zur Ermittlung genereller Energiebedarfe dargestellt. Anschließend werden die Untersuchungsergebnisse hinsichtlich der Ableitung von Handlungsempfehlungen zur Optimierung der Energieflussbeziehungen zwischen den einzelnen Fabrikbereichen ausgewertet.

Voruntersuchungen

Um den Einfluss der Berücksichtigung der Wärmeströme über die Zonengrenzen der Fabrikbereiche hinweg zu untersuchen, wurde ein exemplarisches Fabrikmodell mit unterschiedlichen Wärmeeinträgen im Bereich der Fertigung mittels einer Gebäudesimulation untersucht und der Energiebedarf entsprechend berechnet. Anschließend wurden die Ergebnisse mit der unter BS 1 beschriebenen Berechnungsmethode (keine Berücksichtigung der zonenübergreifenden Wärmeströme bei Abweichung der Raum-Solltemperaturen $<4\text{K}$) verglichen.

Die Untersuchung wurde anhand eines Fabrikmodells durchgeführt, welches auf der Grundlage der gängigen Berechnungsannahmen zur Ermittlung des Nutzenergiebedarfs eines Gebäudes entwickelt wurde (vgl. Abs. 4.2.2). Hierbei wurde wie bereits beschrieben gegenüber den Berechnungsannahmen nach [DIN07] ein zusätzlicher Wärmeenergieeintrag von 0 W/m^2 , 100 W/m^2 , 300 W/m^2 und 500 W/m^2 in der Fertigung berücksichtigt und die Auswirkung auf Nutzenergiebedarf des gesamten Gebäudes betrachtet. Dieser Berechnungsvergleich wurde mit den zwei voneinander unabhängigen Berechnungsprogrammen, IBP 18599 [IBP13] und der dynamischen Simulationssoftware TRNSYS, durchgeführt. Die nachfolgende Abbildung 30 zeigt die Gegenüberstellung der Berechnungsergebnisse.

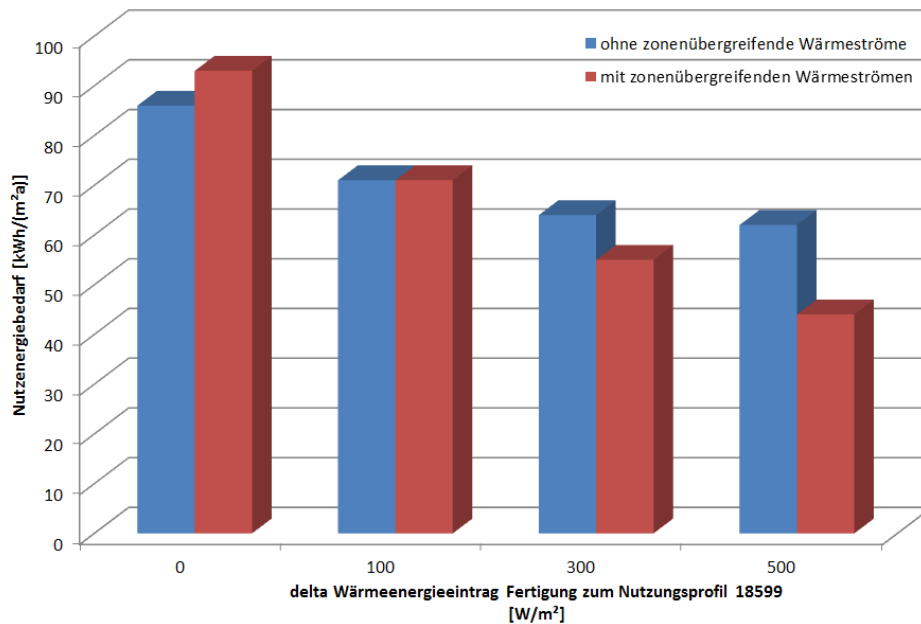


Abbildung 30: Gegenüberstellung des Nutzenergiebedarfs unter Anwendung zweier Berechnungsmethoden mit und ohne Berücksichtigung zonenübergreifender Wärmeströme bei steigendem Wärmeenergieeintrag im Bereich der Fertigung

Dargestellt wird hier der errechnete Nutzenergiebedarf des Modells unter Anwendung zweier Berechnungsmethoden bei Steigerung der Wärmeenergieeinträge.

Durch diesen Vergleich werden das grundsätzliche Potential einer genauen Betrachtung der Wärmeströme und deren direkter Einfluss auf den Nutzenergiebedarf aufgezeigt. Bei steigendem Wärmeenergieeintrag in der Fertigung sinkt der Nutzenergiebedarf. Zurückzuführen ist dies auf die Anrechnung der inneren Wärmequellen auf den Heizenergiebedarf. Wird rechnerisch die Übertragung der internen Wärmequellen auch in andere Fabrikbereiche durch die Innenbauteile hindurch ermöglicht, sinkt der Nutzenergiebedarf im Vergleich stärker, als wenn die Wärmequellen nur in dem Fabrikbereich berücksichtigt werden, in denen sie entstehen. Eine genauere Betrachtung der Lage der Fabrikbereiche zueinander ist auf der Grundlage dieser Untersuchungsergebnisse daher als sinnvoll einzustufen. Darüber hinaus konnte das entwickelte Fabrikmodell unter anderem anhand dieser Betrachtungen verifiziert werden.

Darstellung der Untersuchungsergebnisse - Globale Betrachtung der Untersuchungsergebnisse

Um die generellen Auswirkungen der unterschiedlichen für die Untersuchungen identifizierten Fabriklayouts auf die Energiebedarfe aufzuzeigen, sind im Folgenden (siehe Abbildung 31) die Untersuchungsergebnisse dargestellt. Abgebildet sind die Ergebnisse des ermittelten Heiz-, Kühl- und des gesamten Nutzenergiebedarfs bei Variation der Wärmeeinträge jeder Fabriklayoutvariante. Die Varianten sind der Rangfolge nach aufsteigendem Nutzenergiebedarf sortiert. Die Bezeichnungen sind für die Rangfolge nicht relevant.

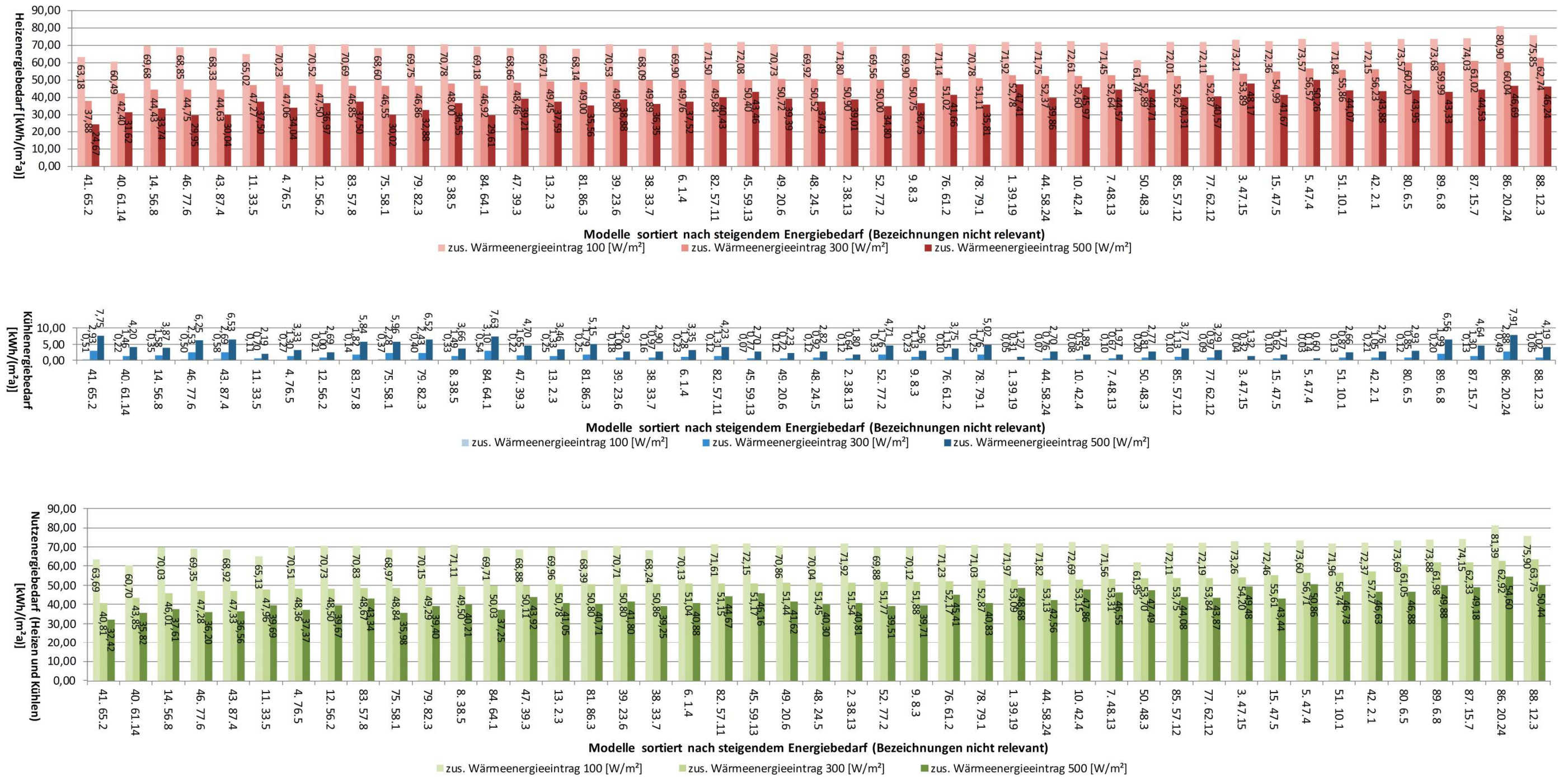


Abbildung 31: Ermittelter Heiz- Kühl- und gesamter Nutzenergiebedarf - untersuchte Fabriklayoutvarianten nach Energiebedarf aufsteigend sortiert

Den dargestellten Berechnungsergebnissen ist zu entnehmen, dass der Nutzenergiebedarf mit steigendem Wärmeenergieeintrag in der Fertigung in jedem Einzelmodell entsprechend sinkt. Weiterhin fällt auf, dass das Potential der Energieeinsparung unter Variation der Anordnung der unterschiedlichen Bereiche im Rahmen dieser Untersuchungsreihe bei ca. 20 kWh/(m²a) liegt. Darüber hinaus wird deutlich, dass die Modelle mit durch die Anordnung bedingtem niedrigem Heizenergiebedarf gleichzeitig einen verhältnismäßig hohen Kühlenergiebedarf aufweisen, also der Anteil an nicht nutzbaren Wärmequellen in diesen Fällen angestiegen ist.

Eine Einschätzung des wirtschaftlichen Nutzens für die vorliegende Untersuchungsreihe kann mit Hilfe des sogenannten Heizöläquivalents vorgenommen werden. Herangezogen wird hierfür das Heizöläquivalent ÖE, welches eine Heizstoffunabhängige Maßeinheit für den Energieverbrauch ist. Heizöl besitzt eine Heizwert $H_i = 11,8 \text{ kWh/kg}$, setzt man eine mittlere Dichte $\rho = 0,84 \text{ kg/l}$ voraus, ergibt sich:

$$\text{ÖE} = \frac{H_i}{\rho} = \frac{11,8 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}}{0,84 \frac{\text{kg}}{\text{l}}} \approx 10 \frac{\text{kWh}}{\text{l}}$$

Der aktuelle Ölpreis an der Börse liegt bei ca. 0,65 €/l. Damit ergibt sich bei einer Energieeinsparung durch die Optimierung der geometrischen Anordnung von ca. $\Delta Q = 20 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$ eine Kostenersparnis von:

$$\begin{aligned} \Delta \text{Energiekosten} &= \Delta Q \cdot A_{\text{Fabrik}} \cdot \frac{\text{Preis}}{\text{ÖE}} \\ &= 20 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\text{a}} \cdot 900 \text{ m}^2 \cdot \frac{0,65 \frac{\text{€}}{\text{l}}}{10 \frac{\text{kWh}}{\text{l}}} = 1170 \frac{\text{€}}{\text{a}} \end{aligned}$$

Die Kostenersparnis von ca. 1.200 €/a aufgrund der Variation der Anordnung der einzelnen Fabrikbereiche stellen eine grundsätzliche Abschätzung des wirtschaftlichen Nutzens unter den angenommenen Berechnungsrandbedingungen und geometrischen Abmessungen der Fabrikbereiche dar. Darüber hinaus wurden die Kosten anhand des berechneten Nutzenergiebedarfs ermittelt. Werden zusätzlich noch die Verluste aus der Anlagentechnik in der Berechnung berücksichtigt, ist eine prozentual steigende Kosteneinsparung zu erwarten. Neben dem rein wirtschaftlichen Nutzen sei darüber hinaus auch der Imagegewinn bei Berücksichtigung energetischer Faktoren bereits bei der Fabriklayoutplanung genannt.

Darstellung der Untersuchungsergebnisse -Detaillierte Betrachtung der Untersuchungsergebnisse

Die Identifikation der Einsparpotentiale bei der Betrachtung der gesamten Energiebedarfe rechtfertigt die genauere Untersuchung der Einzelmodelle um die Energief-

lusionsbeziehungen zwischen den Fabrikbereichen zu analysieren. Dazu werden die Energiebedarfe der einzelnen Fabrikbereiche unter Berücksichtigung der genauen Lage des Bereichs isoliert betrachtet. Im Hinblick auf Ableitung eines Beurteilungsschemas zu den Energieflussbeziehungen abhängig von der Lage der Bereiche zueinander, werden alle in der Energieflussmatrix vorkommenden Lagemöglichkeiten und der Einfluss auf den Energiebedarf betrachtet.

Gegenseitige Beeinflussung der Fabrikbereiche

Um die gegenseitige Beeinflussung zweier benachbarter Fabrikbereiche zu analysieren ist die Lagebeziehung der Bereiche zueinander zu charakterisieren. Hierzu werden die Berührflächen an den Grenzen der Bereiche untereinander herangezogen, mit dem Ziel, die Abhängigkeit des Energiebedarfs von verschiedenen Fabrikbereichen zu ermitteln. Der Fragestellung folgend, ob die Veränderung der Kontaktfläche benachbarter Fabrikbereiche auch den Energiebedarf der Fabrikbereiche beeinflusst, wird dieser abhängig von dem Kontaktflächenanteil untersucht. Die Kontaktflächenanteile werden hierbei wie folgt ermittelt. Der Montagebereich in nachfolgendem Beispiel (siehe Abbildung 32) hat innenliegend mögliche Kontaktflächen $B_{m\ddot{o}gl}=6$, wovon mit der Fertigung 5 Kontaktflächen verbunden sind. Der Kontaktflächenanteil zwischen beiden Bereichen liegt folglich bei $B_{vorh}/B_{m\ddot{o}gl}=5/6=0,83$.

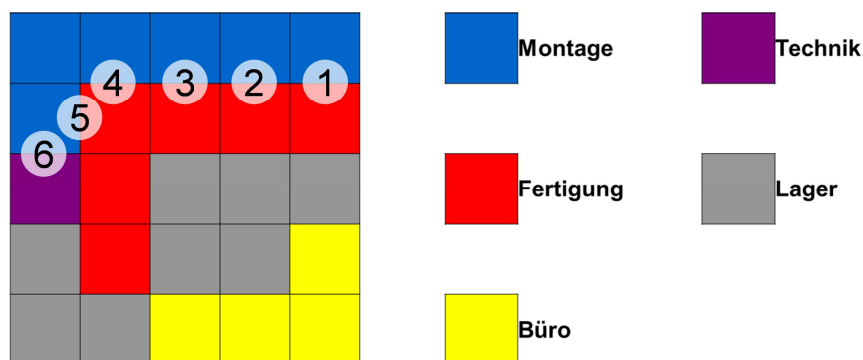


Abbildung 32: Beispielhaftes Fabrikmodell als Rastermodell für die Darstellung der Ermittlung der Kontaktflächenanteile

Sämtliche Beziehungen der Bereiche zueinander wurden mit dieser Systematik für jedes Fabrikmodell charakterisiert.

Nachfolgend werden die bei der Berechnung aller Fabrikmodelle ermittelten Jahresenergiebedarfe der einzelnen Bereiche abhängig von den Kontaktflächenanteilen zum jeweils anderen Bereich dargestellt und hinsichtlich der Ableitung von Empfehlungen zur energieoptimierten Anordnung analysiert.

Die Grundlage für die Analyse bilden die dargestellten Diagramme. Hierbei werden der Jahres-Heizenergiebedarf Q_H und der Jahres- Kühlerenergiebedarf Q_C (für Büro- und Technikbereiche) für den jeweils betrachteten Bereich getrennt voneinander betrachtet. Für Bereiche, in denen keine Kühlung vorgesehen ist, wird erforderlichen-

falls die während der Simulation über ein Jahr maximal aufgetretene Temperatur T_{\max} herangezogen. Die Berechnungsergebnisse sind teilweise starken Streuungen unterworfen. Daher werden zur Identifikation tendenzieller Abhängigkeiten des Energiebedarfs Regressionsgeraden eingeführt. Es ergeben sich abhängig von den untersuchten Fabriktypen bei unterschiedlich hohen Wärmeenergieeinträgen WE in der Fertigung (WE gering=100 W/m², WE mittel=300 W/m², WE hoch=500 W/m²) folglich immer drei Regressionsgeraden.

Fertigung-Montage

In der nachfolgenden Abbildung 33 sind die Ergebnisse aller Fabrikmodelle bei der Berechnung des Jahresheizenergiebedarfs für den Montagebereich in Abhängigkeit von dem Kontaktflächenanteil zur Fertigung dargestellt.

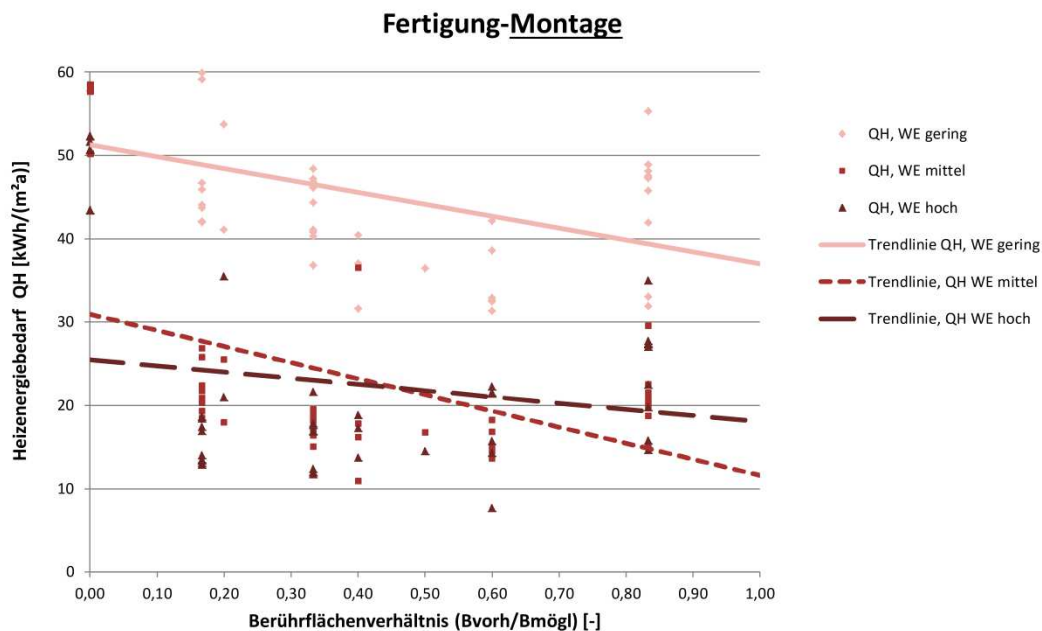


Abbildung 33: Ergebnisse der Berechnung des Heizenergiebedarfs für den Montagebereich abhängig von dem Berührflächenverhältnis

Grundsätzlich ist hier die Abnahme des Heizenergiebedarfs im Montagebereich mit steigendem Wärmeenergieeintrag in der Fertigung zu erkennen. Darüber hinaus wird deutlich, dass mit zunehmendem Kontaktflächenanteil zwischen beiden Bereichen tendenziell weitere Einsparungen möglich sind. Hierbei ist zu beachten, dass in der Simulation der Fabrikmodelle an den Grenzflächen zwischen Montage und Fertigung keine Innenwand angeordnet wurde. Das bedeutet, dass sobald Montage- und Fertigungsbereiche nebeneinander liegen, auch ein stetiger Luftaustausch stattfinden kann und entsprechend viel Wärme durch Konvektion in die Montagebereiche übertragen werden kann.

Betrachtet man die auftretenden Höchsttemperaturen pro Jahr im Fertigungsbereich (siehe nachfolgende Abbildung 34), wird auch hier der gegenseitige Einfluss der beiden Bereiche deutlich.

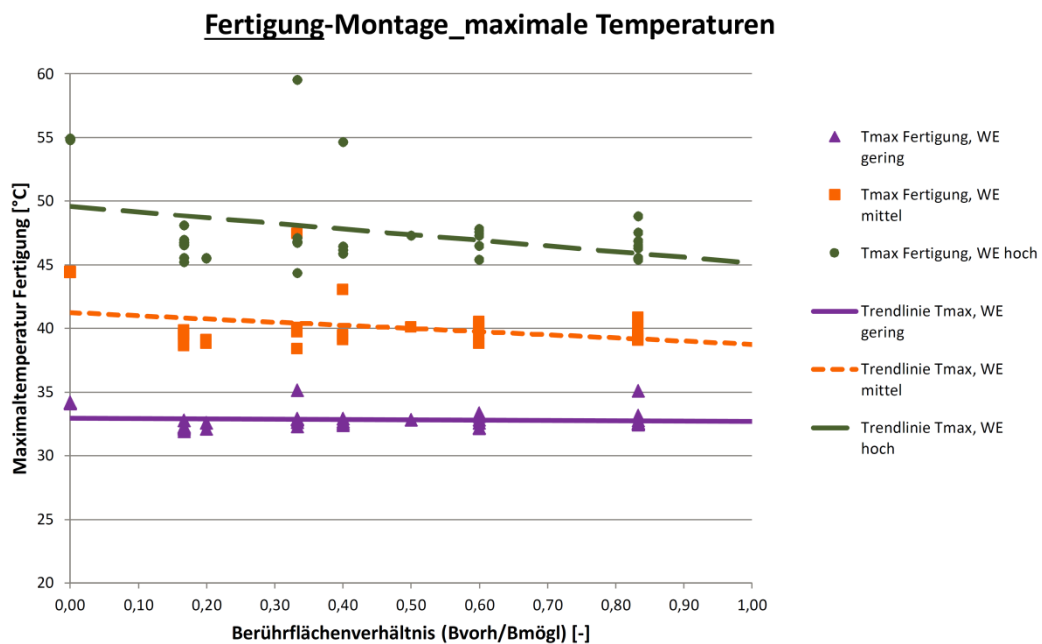


Abbildung 34: Maximale Temperaturen Tmax in der Fertigung

Die Temperaturlastspitzen im Fertigungsbereich können durch den Kontakt mit dem Montagebereich verringert werden.

Fertigung – Büro, Montage – Büro, Lager - Büro

Betrachtet man die Untersuchungsergebnisse für die ermittelten Energiebedarfe im Bürobereich abhängig von den Kontaktflächenanteilen mit Fertigungs-, Montage-, und Lagerbereich, ergeben sich nachfolgend dargestellte Zusammenhänge.

Fertigung-Büro

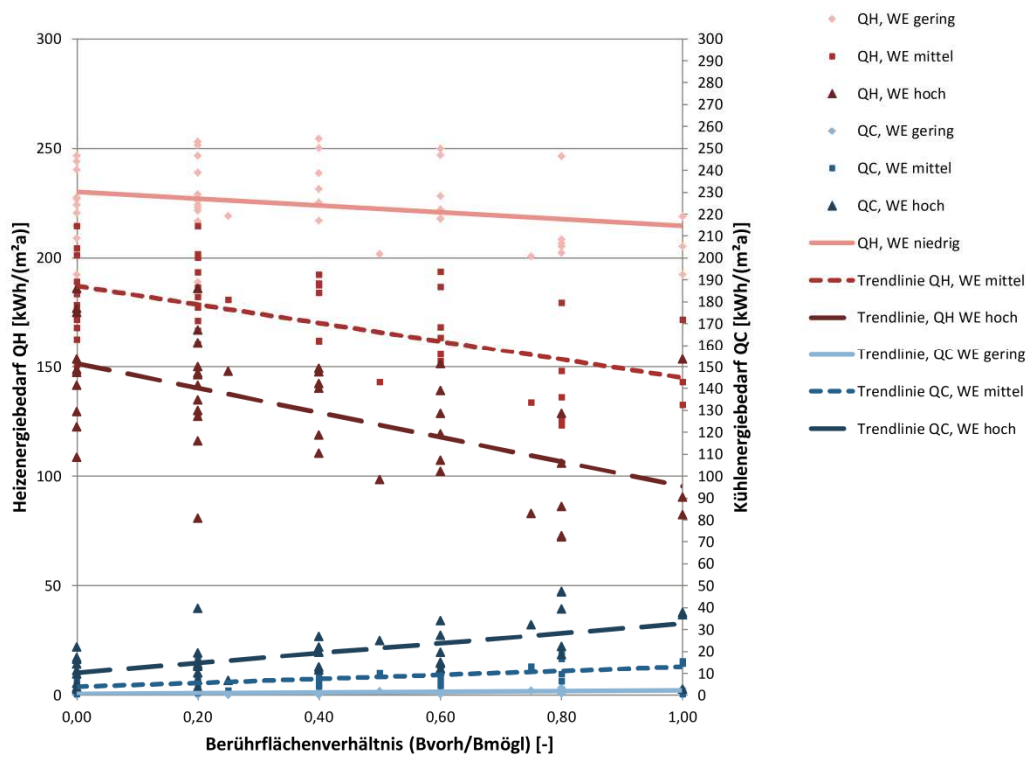


Abbildung 35: Ergebnisse der Berechnung des Heiz- und Kühlenergiebedarfs für den Bürobereich abhängig von dem Berührflächenverhältnis mit der Fertigung

Montage-Büro

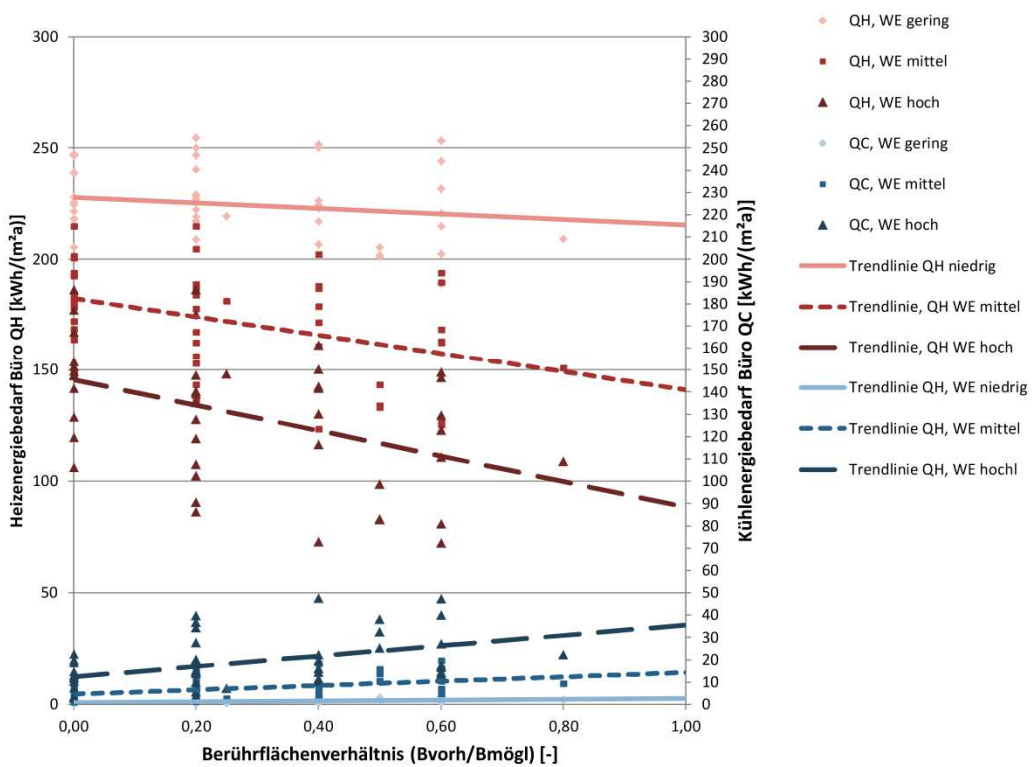


Abbildung 36: Ergebnisse der Berechnung des Heiz- und Kühlenergiebedarfs für den Bürobereich abhängig von dem Berührflächenverhältnis mit der Montage

Den Diagrammen zu den Kontaktflächen den Büros mit Fertigung und Montage ist zu entnehmen, dass die Ergebnisse zum ermittelten Energiebedarf bei den einzelnen Fabrikmodellen starken Streuungen unterworfen sind. Grundsätzlich kann jedoch festgestellt werden, dass mit steigendem Kontaktflächenanteil Heizenergie eingespart werden kann. Mit steigendem Energieeintrag in der Fertigung steigt der Anteil an im Büro genutzten Wärmegewinnen. Gleichwohl kann auch festgestellt werden, dass mit steigendem Kontakt zu Fertigung oder Montage auch der Kühlenergiebedarf steigt, sofern in der Fertigung mittlere und hohe Wärmeenergieeinträge vorhanden sind. Folglich ist im Bürobereich ein Temperaturanstieg zu erwarten.

Nachfolgend wird die Entwicklung des Heiz- und Kühlenergiebedarfs in Büro in Abhängigkeit von dem Kontakt mit Montage und Fertigung anhand eines Beispiels verdeutlicht. Vergleichend betrachtet werden zwei Modelle und deren auftretende Temperaturentwicklung sowie die auftretenden Energiebedarfe.

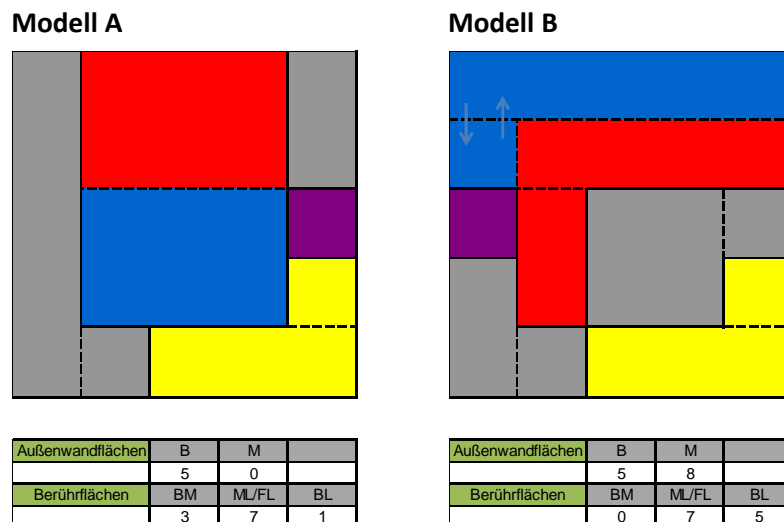


Abbildung 37: Für detaillierte Betrachtung herangezogene Untersuchungsmodelle

Bei Modell A steht das Büro in Kontakt mit dem Montagebereich, in Modell B sind keine Kontaktflächen zwischen den betrachteten Bereichen vorhanden.

Verglichen werden der Sommer- und der Winterfall über einen Betrachtungszeitraum von jeweils einer Woche.

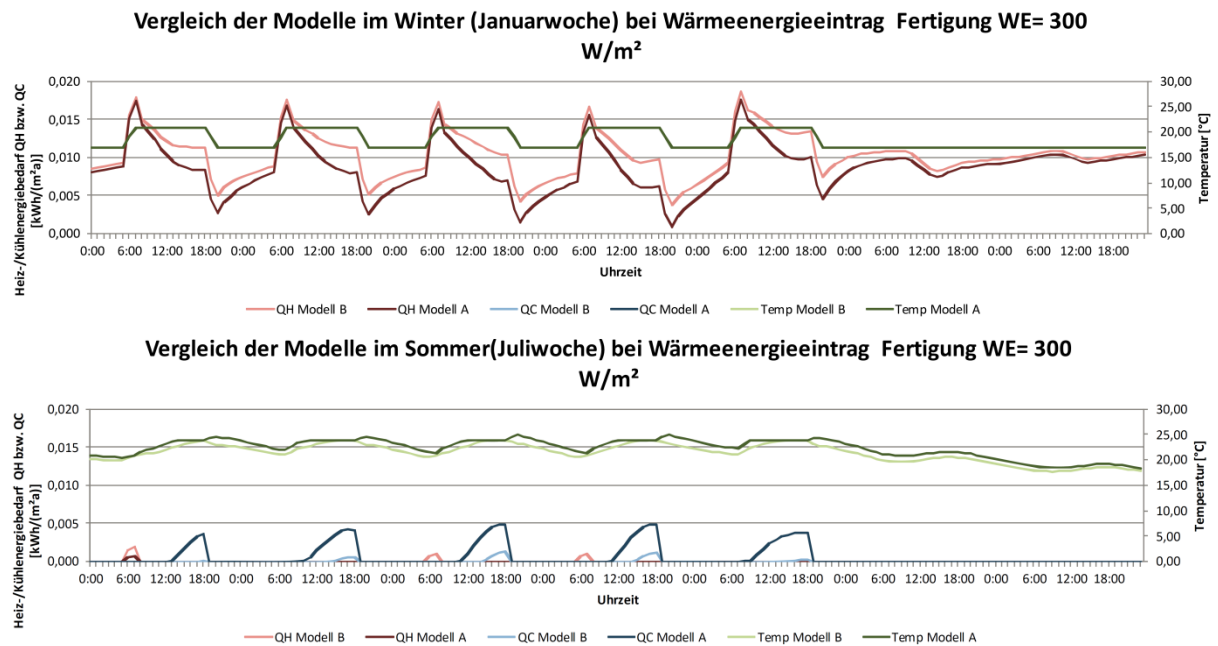


Abbildung 38: Darstellung der Energiebedarfe und Temperaturentwicklungen im Bürobereich für den Winter- sowie den Sommerfall über jeweils eine Woche

Erkennbar ist bei dem Vergleich beider Modelle, dass bei Modell A im Winter ein geringerer Heizenergiebedarf, im Sommer jedoch gegenüber Modell B ein gesteigerter Kühlenergiebedarf vorhanden ist, um die Raum-Solltemperaturen zu erreichen.

Generell ist der Einsatz von Kühlenergie gegenüber steigender Heizenergie abhängig von der Anlagentechnik als ein Vielfaches aufwändiger einzustufen. Im Hinblick auf das Ziel, Kosten in KMU zu senken, sollte angestrebt werden, Kühlenergiebedarfe unbedingt zu vermeiden, da diese grundsätzlich mit zusätzlichen Investitionen verbunden sind, die für die Größe der jeweiligen Unternehmen meist unverhältnismäßig sind.

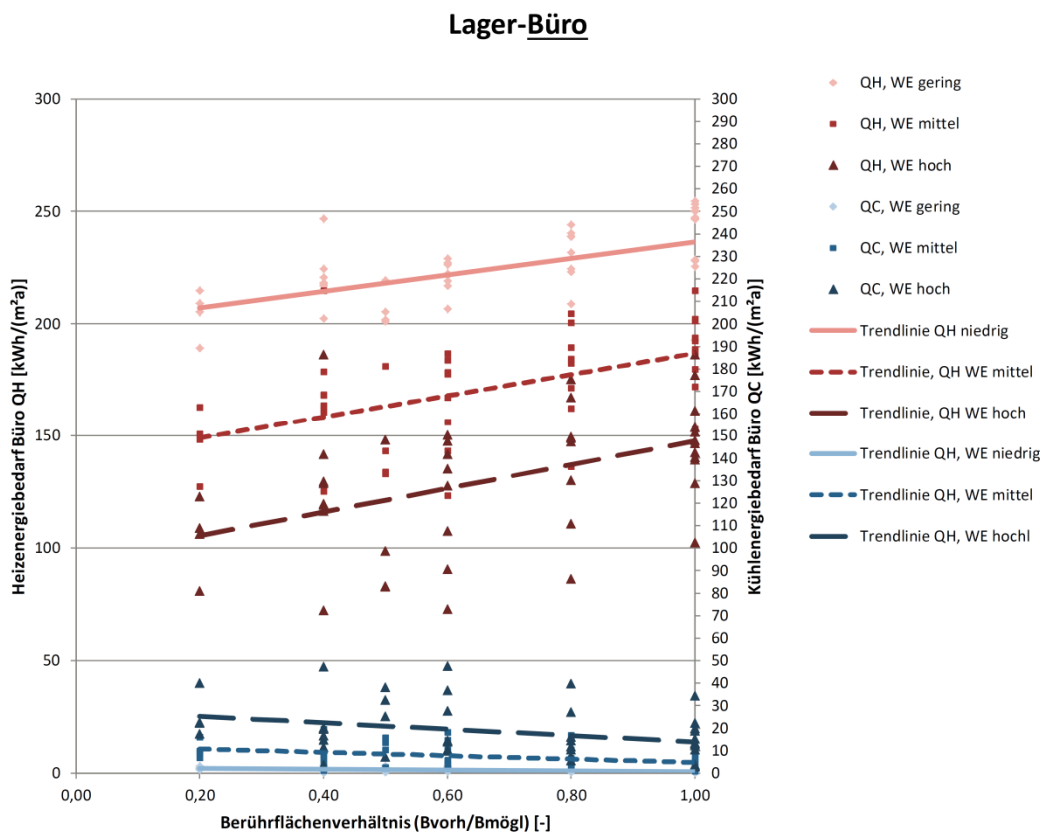
Lager – Büro

Abbildung 39: Ergebnisse der Berechnung des Heiz- und Kühlenergiebedarfs für den Bürobereich abhängig von dem Berührflächenverhältnis mit dem Lager

Mit steigendem Kontaktflächenanteil zwischen Lager und Büro ist tendenziell ein gesteigerter Heizenergiebedarf erkennbar. Die Raum-Solltemperatur im Lagerbereich liegt bei 12 C°, was im Winter dazu führt, dass sich ein Wärmestrom vom Büro in Richtung Lager einstellt. Hinsichtlich der Entwicklung des Kühlenergiebedarfs im Büro ist eine Verminderung erkennbar. Auch hier ist grundsätzlich die Verringerung des Kühlenergiebedarfs als höherwertig gegenüber dem negativen Effekt auf den Heizenergiebedarf einzustufen. Die genaue Betrachtung der Modelle zeigte, dass das Lager im Sommer eine Pufferwirkung hinsichtlich gesteigerter Temperaturen im Bürobereich hat.

Fertigung – Technik, Montage – Technik, Lager – Technik

Betrachtet man die Untersuchungsergebnisse für die ermittelten Energiebedarfe im Technikbereich abhängig von den Kontaktflächenanteilen mit Fertigungs-, Montage-, Büro- und Lagerbereich, ergeben sich nachfolgend dargestellte Zusammenhänge.

Fertigung-Technik

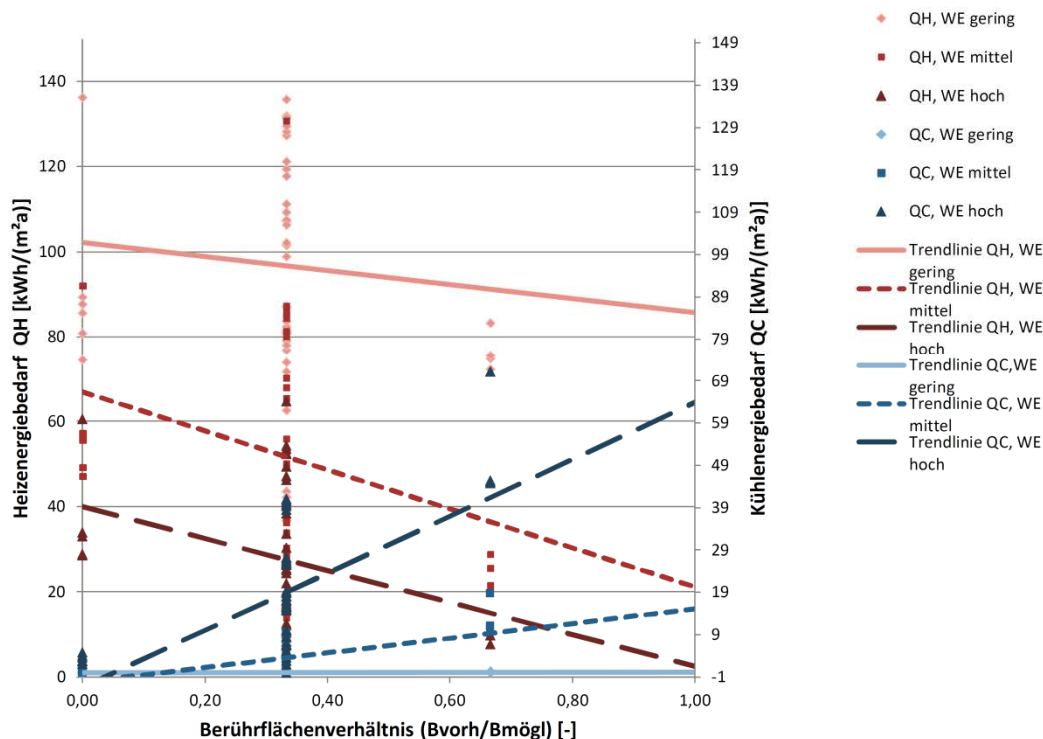


Abbildung 40: Ergebnisse der Berechnung des Heiz- und Kühlenergiebedarfs für den Technikbereich abhängig von dem Berührflächenverhältnis mit der Fertigung

Montage-Technik

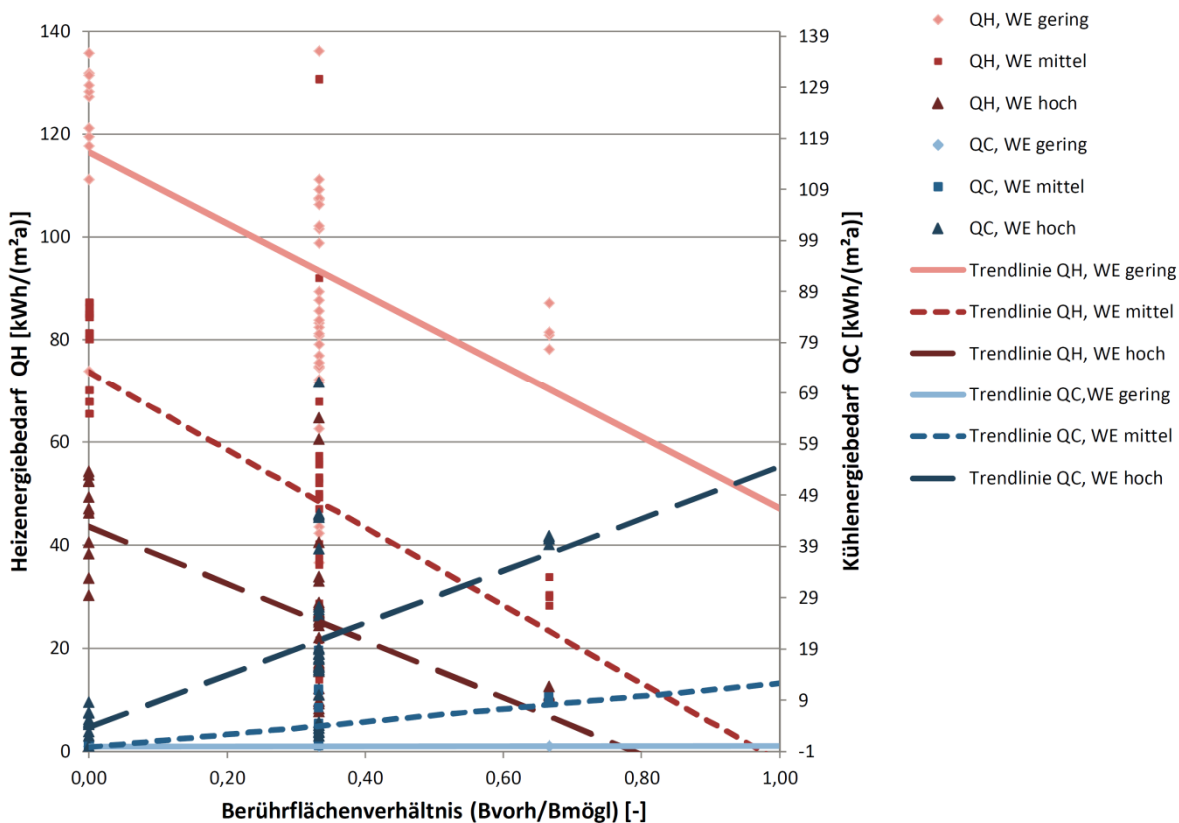


Abbildung 41: Ergebnisse der Berechnung des Heiz- und Kühlenergiebedarfs für den Technikbereich abhängig von dem Berührflächenverhältnis mit der Montage

Analog zu den Erkenntnissen zur Anordnung des Bürobereichs ist auch im Technikbereich neben einem sinkenden Heizenergiebedarf ein ungleich stärker steigender Kühlenergiebedarf bei zunehmendem Kontakt mit den Bereichen mit hohem Wärmeenergieeintrag zu erkennen.

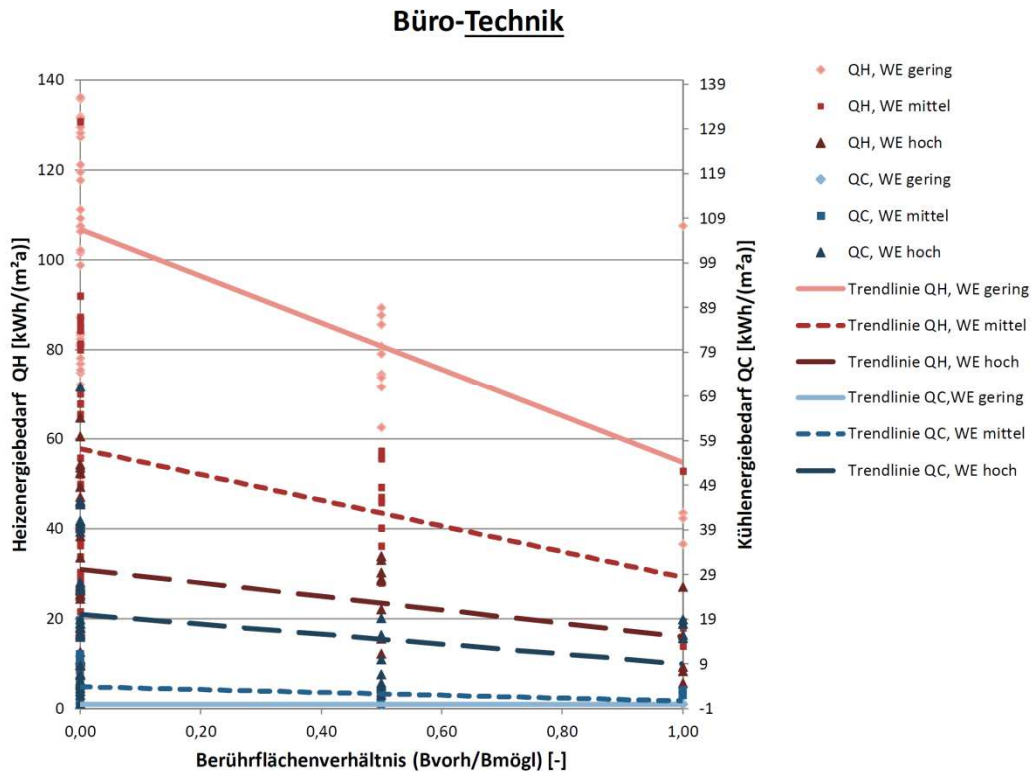


Abbildung 42: Ergebnisse der Berechnung des Heiz- und Kühlenergiebedarfs für den Technikbereich abhängig von dem Berührflächenverhältnis mit dem Büro

Die Anordnung des Büros in Kontakt mit den Technikbereichen hat hinsichtlich der gegenseitigen Beeinflussung der Energiebedarfe einen durchweg positiven Einfluss. Die Randbedingungen im Sinne der geforderten Raum-Solltemperaturen im Sommer wie im Winter sind hier ähnlich ausgeprägt.

Lager-Technik

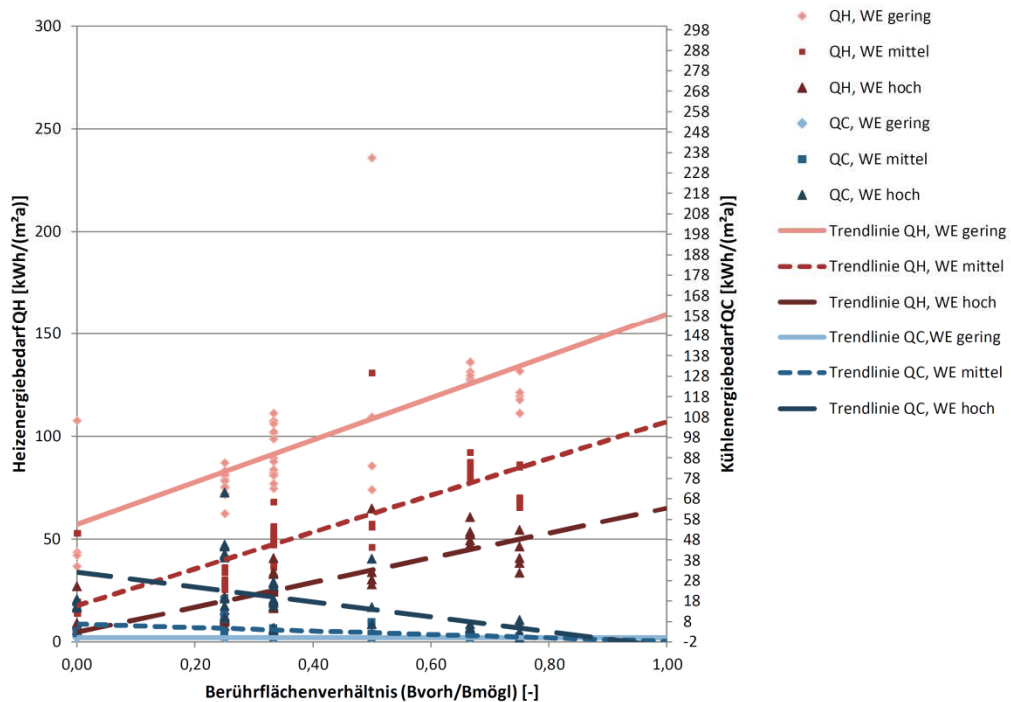


Abbildung 43: Ergebnisse der Berechnung des Heiz- und Kühlenergiebedarfs für den Technikbereich abhängig von dem Berührflächenverhältnis mit dem Lager

Die Steigerung des Kontaktflächenanteils des Technikbereichs mit der Fertigung hat zwar einen gesteigerten Heizenergiebedarf, jedoch auch eine deutlich reduzierte Wirkung auf den Kühlenergiebedarf zur Folge. Auch hier ist der Einfluss auf den Kühlenergiebedarf als sehr hoch einzustufen.

Grundsätzlich sind die Ergebnisse der Technikbereiche und der Bürobereiche im Hinblick auf die Lageempfehlungen innerhalb des Gebäudes ähnlich. Im Folgenden werden diese Bereiche daher auch in klimatisierte Bereiche zusammengefasst.

Fertigung – Lager, Montage – Lager

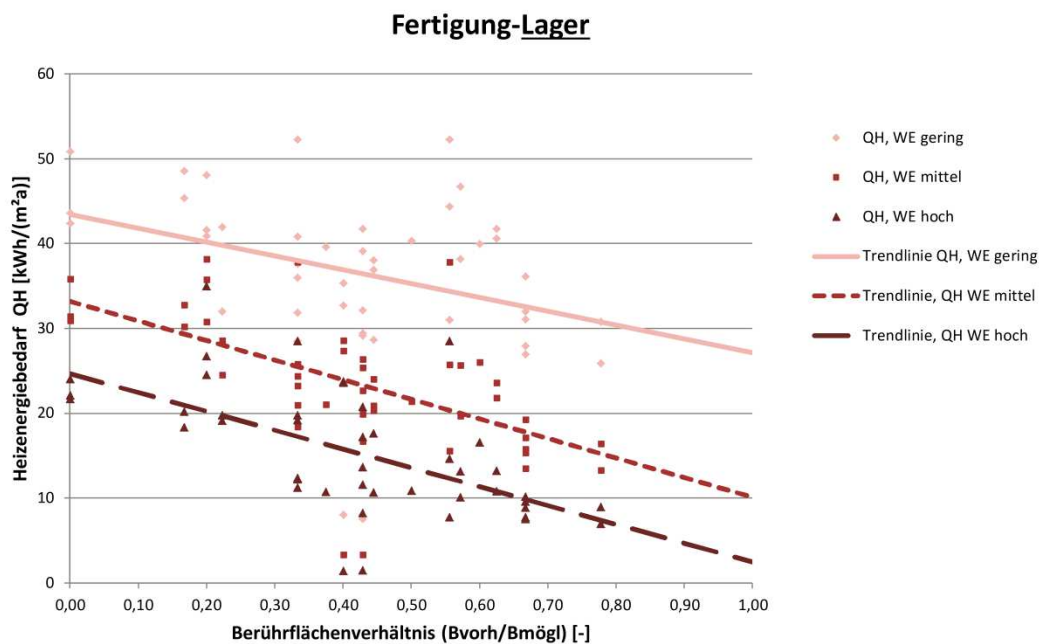


Abbildung 44: Ergebnisse der Berechnung des Heizenergiebedarfs für den Lagerbereich abhängig von dem Berührflächenverhältnis mit der Fertigung

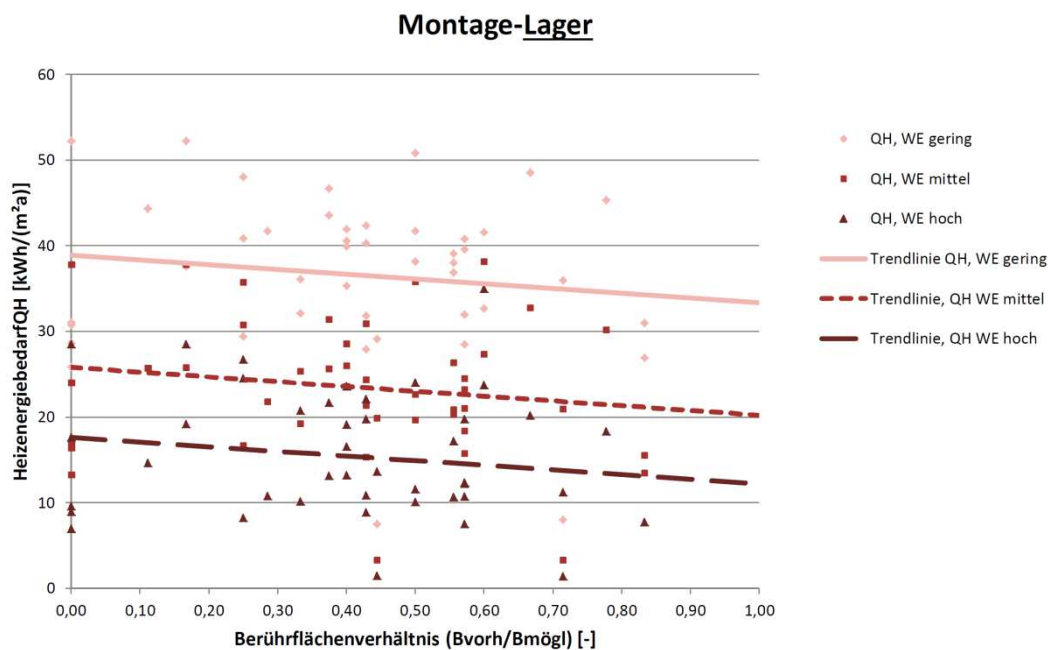


Abbildung 45: Ergebnisse der Berechnung des Heizenergiebedarfs für den Lagerbereich abhängig von dem Berührflächenverhältnis mit der Montage

Den Diagrammen (vgl. Abbildung 44 und Abbildung 45) ist zu entnehmen, dass der Heizenergiebedarf in der Lagerzone mit zunehmendem Kontakt zur Fertigung deutlich verringert werden kann. Die Abnahme des Heizenergiebedarfs bei Kontakt mit der Montage ist verhältnismäßig gering. Zurückzuführen ist hier die Abnahme auch darauf, dass die Montagebereiche in vielen der untersuchten Modelle in direktem

Kontakt mit der Fertigung stehen. Der Kontakt der Montage mit dem Lagerbereich ist daher als grundsätzlich neutral einzustufen.

Beeinflussung der Energiebedarfe durch den Außenwandanteil

Im Folgenden werden die Untersuchungsergebnisse zu den Energiebedarfen in Abhängigkeit von dem Kontaktflächenverhältnis zu Außenwand betrachtet.

Weil für die Bereiche Montage und Fertigung aufgrund des überwiegend vorhandenen Luftverbunds etwa gleiche Ergebnisse festgestellt wurden, sind diese in nachfolgender Abbildung 46 zusammengefasst.

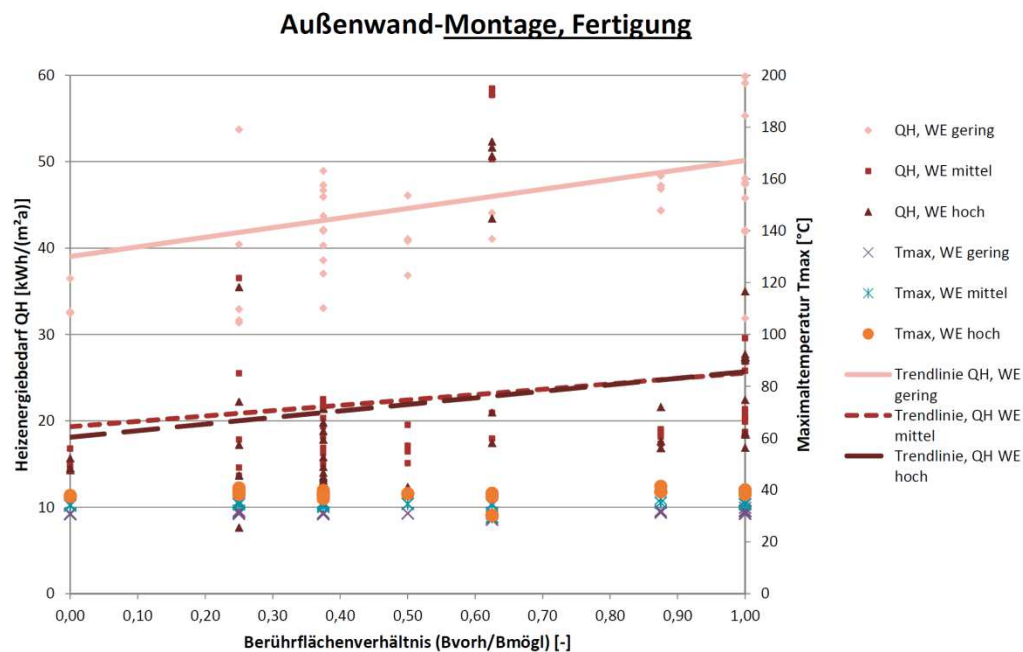


Abbildung 46: Ergebnisse der Berechnung des Heizenergiebedarfs und Darstellung der Höchsttemperaturen für Montage und Fertigung in Abhängigkeit vom Außenwandanteil

Mit zunehmendem Außenwandanteil ist hier eine leichte Zunahme des Heizenergiebedarfs erkennbar. Generell ist der Einfluss der Außenwand verglichen mit der Dachfläche, die ebenfalls den Bereich zur Außenluft abgrenzt jedoch nahezu marginal. Die Höchsttemperaturen steigen auch nicht merklich an. Die Belüftung in diesen Bereichen ist im Simulationsmodell über Lüftungsöffnungen im Dach sichergestellt worden. In diesem Modell sind die solaren Gewinne durch die Außenwand nicht berücksichtigt worden. Die leichte Zunahme des Heizenergiebedarfs könnte gegebenenfalls durch solare Gewinne wieder ausgeglichen werden. Die Energieflussbeziehung zwischen Außenwand und Montage- oder Fertigungsbereichen wird daher als neutral eingestuft.

Bei dem Kontaktflächenanteil des Bürobereichs mit der Außenwand wurde im Berechnungsmodell davon ausgegangen, dass ein Sonnenschutz vorgesehen ist, der zu 100 % solare Einstrahlung verhindern kann. die nachfolgende Abbildung 47 zeigt die Berechnungsergebnisse.

Außenwand-Büro

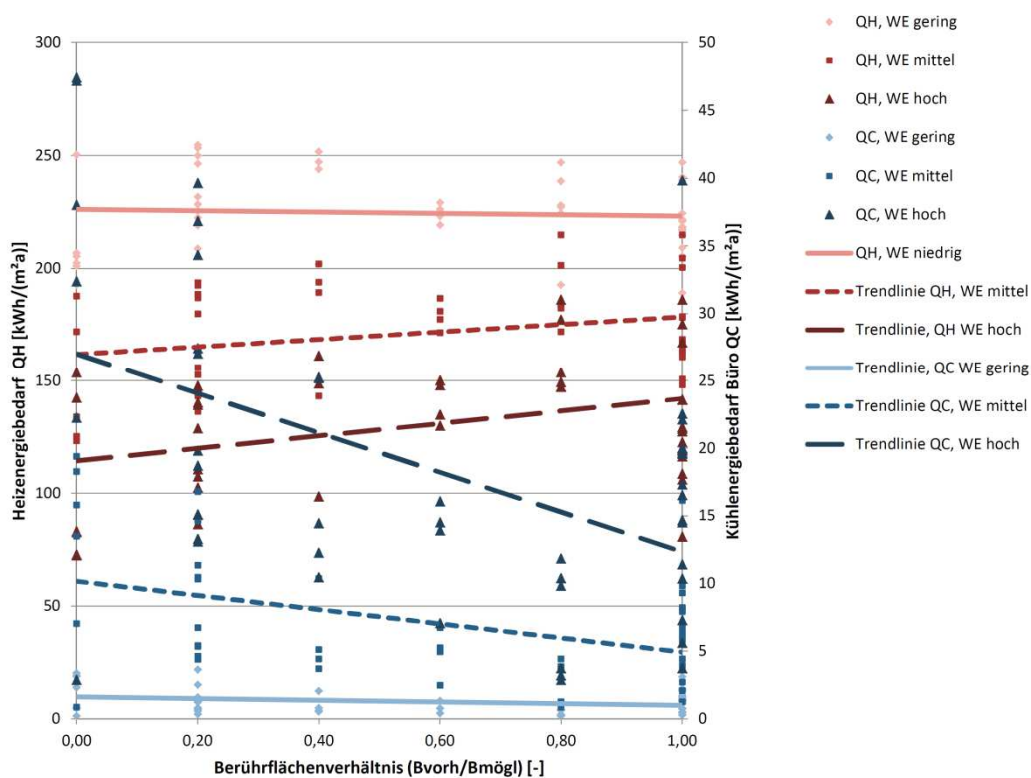


Abbildung 47: Ergebnisse der Berechnung des Heiz- und Kühlenergiebedarfs für den Bürobereich in Abhängigkeit vom Außenwandanteil

Im dargestellten Diagramm ist bei steigendem Kontaktflächenanteil des Bürobereichs mit der Außenwand zwar eine Steigerung des Heizenergiebedarfs erkennbar. Bei hohem und mittlerem Wärmeenergieeintrag in der Fertigung ist jedoch mit einem positiven Einfluss auf den Kühlenergiebedarf zu rechnen. Hierbei sei jedoch darauf hingewiesen, dass der Kühlenergiebedarf im Büro meist auf einen Kontaktflächenanteil mit der Fertigung zurückzuführen ist und ein gesteigerter Kontakt zur Außenwand mit einer Reduzierung von Kontaktflächen mit der Fertigung einhergeht. Diese Ergebnisse sind daher differenziert zu betrachten. Sollten die Bürobereiche in Kontakt mit Fertigungsbereichen stehen, die einen hohen oder mittleren Wärmeenergieeintrag besitzen, dann ist die Anordnung an der Außenwand unter Voraussetzung eines funktionierenden Sonnenschutzes sinnvoll. Bei Kontakt mit Fertigungsbereichen mit niedrigem Wärmeenergieeintrag oder anderen Fabrikbereichen führt die Anordnung an der Außenwand zu steigenden Heizenergiebedarfen und ist als grundsätzlich nicht positiv zu bewerten.

Die vorgenannten Feststellungen zu Bürobereichen gelten auch für die in der nachfolgenden Abbildung 48 dargestellten Untersuchungsergebnisse.

Außenwand-Technik

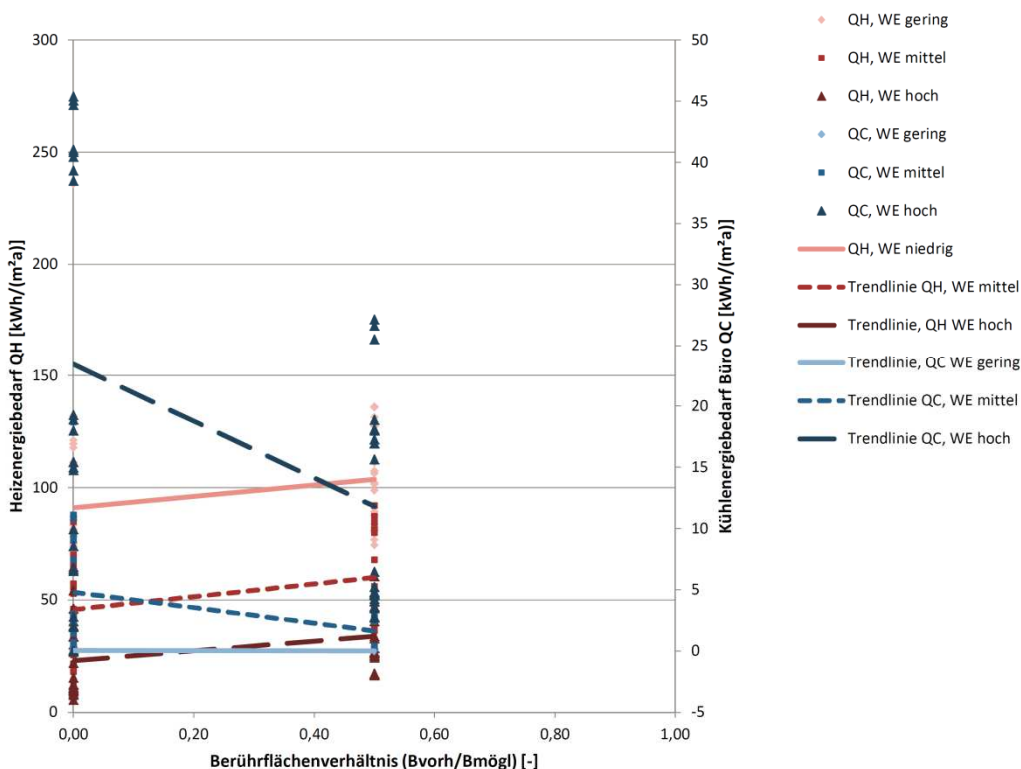


Abbildung 48: Ergebnisse der Berechnung des Heiz- und Kühlenergiebedarfs für den Technikbereich in Abhängigkeit vom Außenwandanteil

Außenwand-Lager

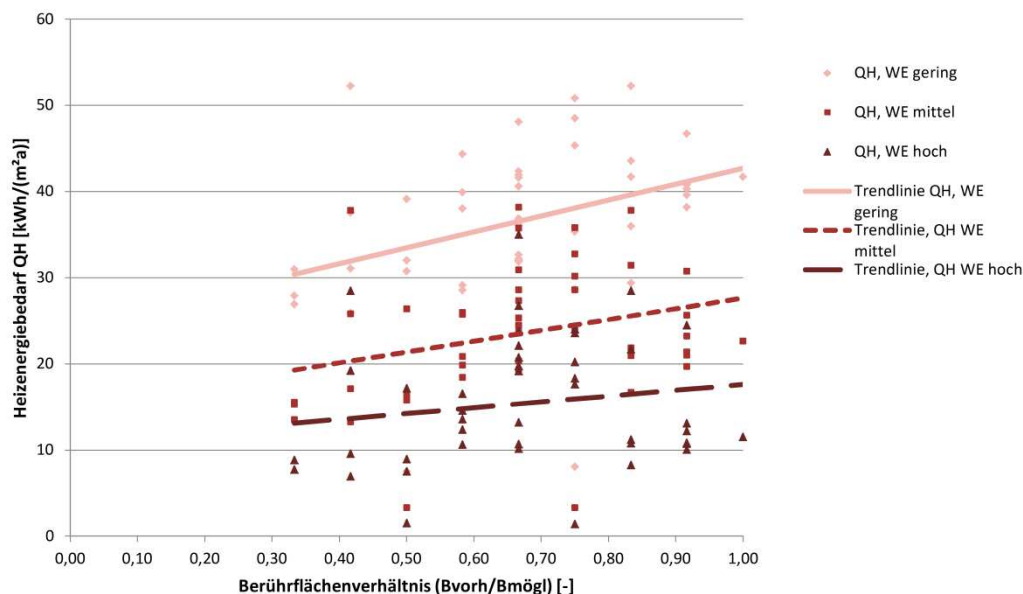


Abbildung 49: Ergebnisse der Berechnung des Heizenergiebedarfs für den Lagerbereich in Abhängigkeit vom Außenwandanteil

Der Einfluss der Anordnung von Lagerbereichen an der Außenwand auf den Heizenergiebedarf ist in dargestelltem Diagramm erkennbar. Auch hier ist zu beachten, dass mit einem steigenden Außenwandanteil der Lagerflächen einer Verringerung der Kontaktflächen zur Fertigung einhergehen. Daher fällt die Zunahme des Hei-

zenergiebedarfs bei steigendem Außenwandanteil der Lagerbereiche bei Fabriken mit hohem Wärmeenergieeintrag deutlicher aus.

Überführung der Untersuchungsergebnisse in eine Energieflussmatrix

Aufgrund der erfolgten Auswertung der Untersuchungsergebnisse mit der angewendeten Bewertungssystematik über Kontaktflächenanteile einzelner Fabrikbereiche konnten die Beziehungen der Bereiche untereinander als positiv oder negativ bewertet werden. Die Bewertungen der Energieflussbeziehungen der Bereiche sind nachfolgend in einer Energieflussmatrix (vgl. Abbildung 50) dargestellt.

Dabei sind die festgestellten Abhängigkeiten von den Wärmeenergieeinträgen in den Fabrikbereichen berücksichtigt. Mit einer „1“ werden sich positiv auf den Energiebedarf auswirkende Beziehungen, Negative mit einer „0“ bewertet. Sollte die Lage zweier Bereiche nebeneinander als neutral oder untergeordnet eingestuft werden, so ist diese mit einem „/“ gekennzeichnet.

Für die Beschreibung der Energieflussbeziehungen in der Energieflussmatrix wird immer diejenige Zone als dominant betrachtet, die höhere Anforderungen an die klimatischen Verhältnisse besitzt. Bei dem Vergleich von Lager- und Bürobereich beispielsweise ist das Büro von übergeordneter Bedeutung. Somit wird in der Bewertung der energetische Einfluss des Lagers auf das Büro und nicht der des Büros auf das Lager bewertet. Daher ist diese Matrix keine richtungsabhängige Matrix, sondern sie gibt lediglich Auskunft über die Beeinflussung des klimatisch höherwertigeren Bereichs.

	F100	F300	F500	M	B	T	L (WE)	L(WA)	AW
F100	/	/	/	1	1	1	1	1	/
F300	/	/	/	1	0	0	1	1	/
F500	/	/	/	1	0	0	1	1	/
M	/	/	/	/	1|0*	1|0*	/	/	/
B	/	/	/	/	/	1	1|0**	1|0**	1|0***
T	/	/	/	/	/	/	1|0**	1|0**	1|0***
L (WE)	/	/	/	/	/	/	/	/	0
L(WA)	/	/	/	/	/	/	/	/	0
AW	/	/	/	/	/	/	/	/	/

Legende: **1** : Positiver Einfluss auf Energiebedarf
0 : Negativer Einfluss auf Energiebedarf
/ : Weitgehend neutraler Einfluss auf Energiebedarf

F100 : Fertigungsbereich mit niedrigem Wärmeenergieeintrag

F300 : Fertigungsbereich mit mittlerem Wärmeenergieeintrag

F500 : Fertigungsbereich mit hohem Wärmeenergieeintrag

M : Montagebereich

B : Bürobereich

T : Technikbereich

L(WE) : Wareneingangslager

L(WA) : Warenausgangslager

AW : Außenwand

* wenn Montage mit F500 bzw. F300 verbunden, dann 0, sonst 1

** wenn als Puffer zwischen F500, F300 und Büro dann 1, sonst 0

*** wenn in Kontakt mit F300 bz. F500 dann 1, sonst 0

Abbildung 50: Aufgrund der Untersuchungsergebnisse entwickelte Energieflussmatrix

Die Energieflussmatrix kann somit zur dynamischen energetischen Beurteilung beliebiger Fabriklayouts verwendet werden. Es sei hierbei allerdings darauf hingewiesen, dass die bewerteten Energieflussbeziehungen auf der durchgeführten Untersuchungsreihe an definierten Fabriklayouts mit flächenanteilig vordefinierten Fabrikbereichen durchgeführt worden sind. Auch die Berechnungsannahmen zu Raum-Solltemperaturen, Arbeitszeiten, Wärmeeinträgen etc. sind aus Normvorgaben und Richtlinien entnommen. Die Beurteilung über die entwickelte Energieflussmatrix kann daher bei abweichend geplanten Fabriken als grobe Einschätzung verstanden werden.

4.3.2 Ableitung von Handlungsempfehlungen zur energie- und materialfluss-effizienten Fabrikplanung

Aus den Abstimmungen mit den Teilnehmern des PbA ist deutlich geworden, dass in allen Unternehmen logistische Fragestellungen eine zentrale Rolle spielen. Einbußen in diesem Bereich sind für die Unternehmen nicht oder nur in sehr beschränktem Umfang hinzunehmen, um wettbewerbsfähig zu bleiben. Daher ist als Handlungsempfehlung 1 (HE1) festzuhalten, dass der Gewichtungsfaktor δ_{Log} für die logistische Bewertungskennzahl am größten sein sollte. Nur in absoluten Ausnahmefällen, wenn sich der Planende sehr sicher ist, kann eine Umverteilung zu den anderen beiden Fachsichten geschehen. Darüber hinaus ist eine Erhöhung der anderen beiden Gewichtungsfaktoren im Rahmen der Sensitivitätsanalyse zur Aufdeckung weiterer Potenziale der geometrischen Anordnung vorzunehmen.

Handlungsempfehlung 2 (HE2) befasst sich ebenfalls mit den Gewichtungsfaktoren. Die Gewichtung des Materialflusses gegenüber dem Kommunikationsfluss sollte

deutlich höher sein, um die Bedeutung dessen realitätsgetreu abzubilden. Anzustreben ist mindestens ein Verhältnis von 2/3 zu 1/3.

Die Ergebnisse der Untersuchungen der verschiedenen Fabriklayouts aus logistischer Sicht ergaben, dass diejenigen Layouts, in denen Bereiche mit starken Material- und Kommunikationsflussbeziehungen nebeneinander lagen, besser bewertet wurden. Handlungsempfehlung 3 (HE3) umfasst somit die optimierte Anordnung der Fabrikbereiche nach den Materialflussbeziehungen zwischen diesen. Die Bereiche, die starke Materialflussbeziehungen untereinander aufweisen, sollten auch direkt beieinander liegen, um unnötig lange Transporte und damit nicht wertschöpfende Tätigkeiten zu vermeiden.

Handlungsempfehlung 4 bezieht sich analog zu HE 3 auf den Kommunikationsfluss. Da jedoch dem Materialfluss eine deutlich höhere Gewichtung zukommt (vgl. HE2), sollte eine Optimierung der Anordnung von Bereichen nach den Kommunikationsflussbeziehungen erst nach der Anordnung von Bereichen nach den Gesichtspunkten der Materialflussbeziehungen geschehen.

Handlungsempfehlung 5 bezieht sich auf den Fabrikplanungsprozess an sich. Der Fabrikplaner muss bereits während der Planungen intensive Rücksprache mit den Prozessplanern halten, um vereinheitlichte Prozessabläufe und -wege zu definieren und somit die Voraussetzungen für einen effizienten Fabrikbetrieb zu schaffen.

Wenn das Lager als Puffer zwischen Fertigung mit mittlerem und hohem Wärmeeintrag, ggf. verbunden mit Montagebereichen und klimatisierten Bereichen (hier: Büro und Technik) liegt, dann ist dies als positiv einzustufen, andernfalls ist ein gesteigerter Heizenergiebedarf im Büro zu erwarten. Daher ist als Handlungsempfehlung 6 (HE6) festzuhalten, dass aus energetischer Sicht ein Lager als thermischer Puffer zwischen Fertigungsbereichen mit hohen Wärmeeinträgen und klimatisierten Büro- und Sozial- sowie Technikbereichen anzuordnen ist.

Handlungsempfehlung 7 (HE7) sieht vor, klimatisierte Bereiche mit hohem Kontaktflächenanteil untereinander anzuordnen.

Klimatisierte Bereiche sollten bei Fertigungsprozessen mit niedrigen Wärmeenergieeinträgen mit hohem Kontaktflächenanteil zu den Fertigungsbereichen angeordnet werden. Sobald mittlere und hohe Wärmeeinträge zu erwarten sind, sollten klimatisierte Bereiche mit Blick auf die Vermeidung von Kühlenergiebedarfen nicht nahe den Fertigungsbereichen angeordnet werden (HE8).

Lagerbereiche sollten möglichst nahe den Fertigungsbereichen und nicht an den Außenwänden angeordnet werden (HE9).

Klimatisierte Bereiche sollten bei Fabriken mit mittleren und hohen Wärmeeinträgen in Kontakt zur Außenwand angeordnet werden, sobald sie in direktem Kontakt mit den Fertigungsbereichen stehen (HE10).

Klimatisierte Bereiche mit Kontakt zu den übrigen Fabrikbereichen (ohne Fertigung mit mittlerem und hohem Wärmeenergieeintrag) sind im Inneren der Fabrik anzuordnen (HE11).

Zur Vermeidung von Temperaturspitzen in der Fertigung und zur Senkung des Heizenergiebedarfs in Montagebereichen sollten Montagebereiche in Kontakt mit der Fertigung angeordnet werden (HE12).

Um die Tageslichtversorgung und den Sichtbezug der Mitarbeiter in Büro- und Sozialräumen gewährleisten zu können, sollten Büro- und Sozialräume nicht tiefer als max. 18 m sein. Besser ist eine maximale Tiefe von 12 m (HE13).

Zur Förderung der Kommunikation in den Büro- und Sozialräumen sollten diese eine rechteckige Form haben. Eine verwinkelte Form behindert eine optimale Kommunikation in diesen Bereichen (HE14).

Die letzte Handlungsempfehlung (HE15) umfasst den möglichen Abstand zwischen den Stützpfeilern. Die Stützpfeiler sollten einen möglichst großen Abstand haben, um Fixpunkte im Layout zu minimieren. Darüber hinaus sollten sie gleichmäßig und symmetrisch über das gesamte Gebäude verteilt sein.

4.4 BS 4: Implementierung des Fabrikmodells in einem Software-Demonstrator

BS 4 dient der Erreichung von Teilziel 4. Dazu wird in einem ersten Schritt der zur aufwandsarmen Anwendbarkeit des Fabrikmodells entwickelte Software-Demonstrator ausführlich beschrieben. Nachfolgend wird ein Ablaufplan zur systematischen Verbesserung der Planungsergebnisse dargestellt.

4.4.1 Entwicklung eines Software-Demonstrators zur Bewertung von energie- und materialflusseffizienten Fabriken

Zur aufwandsarmen Anwendbarkeit des in BS 2 entwickelten Fabrikmodells wurde ein Software-Demonstrator auf Basis von MS Excel und Visual Basic for Applications konzipiert und implementiert. Im Folgenden werden die Funktionen und Auswertungsmöglichkeiten vorgestellt.

Zum Einstieg in den Software-Demonstrator wird dem Nutzer ein Startbildschirm angezeigt, der einen kurzen Überblick über den Ablauf im Software-Demonstrator gibt. Abbildung 51 zeigt diesen Startbildschirm.

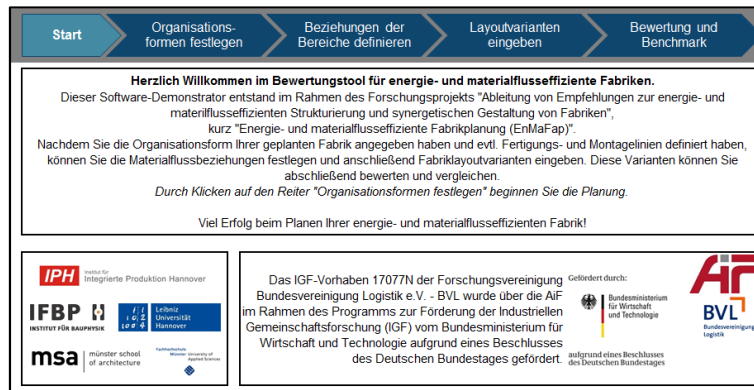


Abbildung 51: Startbildschirm des Software-Demonstrators

Anschließend gliedert sich der Software-Demonstrator in vier Bereiche, denen jeweils ein anderer Bildschirm zugeordnet ist. Der aktuelle Bereich bzw. die aktuelle Bildschirmansicht in der sich der Nutzer befindet, wird farblich hervorgehoben.

Durch Klicken auf die Schaltfläche „Organisationsformen festlegen“ gelangt der Nutzer auf die nächste Seite (vgl. Abbildung 52).

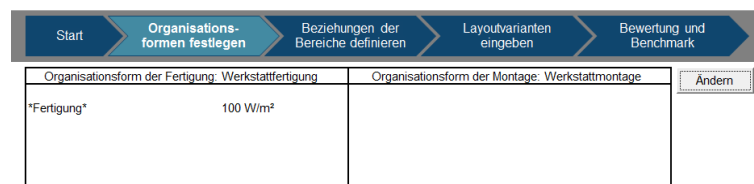


Abbildung 52: Bildschirmansicht des Schrittes Organisationsformen festlegen im Software-Demonstrator

Hier kann der Nutzer die in der zu planenden Fabrik vorliegenden Organisationsformen definieren. Jeweils für die Montage und die Fertigung kann entweder festgelegt werden, ob eine Werkstattorganisation vorliegt, oder ob eine Organisation in Fertigungs- bzw. Montagelinien benötigt wird. Wählt der Nutzer die Werkstattorganisation kann er lediglich einen Fertigungsbereich bzw. einen Montagebereich anlegen. Wird hingegen die Linienorganisation gewählt, können jeweils mehrere Bereiche, auch mit unterschiedlichen Wärmeeinträgen, angelegt werden. Durch Klicken auf die Schaltfläche „Ändern“ wird dem Nutzer ein Eingabefenster (vgl. Abbildung 53) angezeigt, in welchem definiert werden kann, welche Organisationsform vorliegt.

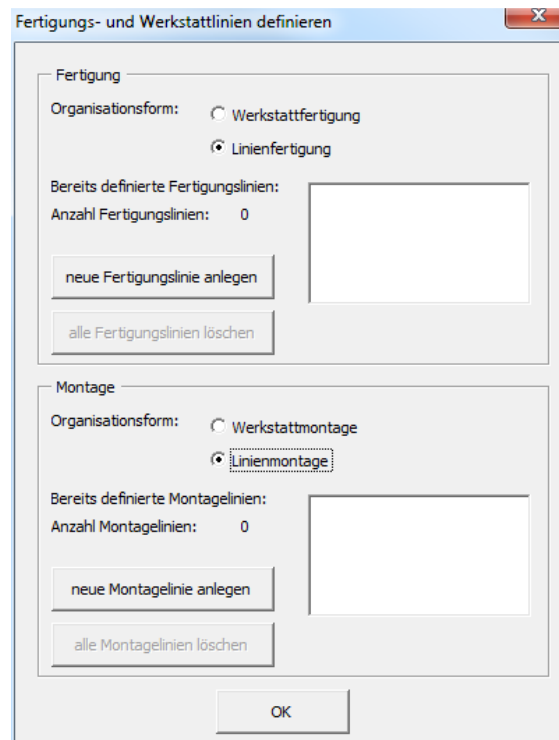


Abbildung 53: Fenster zur Definition der Organisationsform im Software-Demonstrator

Wird die Linienorganisation gewählt, müssen im Anschluss Fertigungs- bzw. Montagelinien angelegt werden. Abbildung 54 zeigt das Fenster zur Definition neuer Fertigungslinien. Der Nutzer muss der Fertigungslinie eine Bezeichnung zuweisen und die Wärmeeinträge in diesem Bereich definieren. Dies hat Auswirkungen auf die Auswertung aus bauphysikalischer Sicht. Bspw. hat die Lage einer Fertigung mit 100 W/m² Wärmeeintrag am Büro positive Auswirkungen, da Heizenergie gespart werden kann. Die Lage einer Fertigung mit 500 W/m² Wärmeeintrag am Büro hingegen führt im Sommer zu einem erhöhten Kühlenergieaufwand, der zu vermeiden ist.

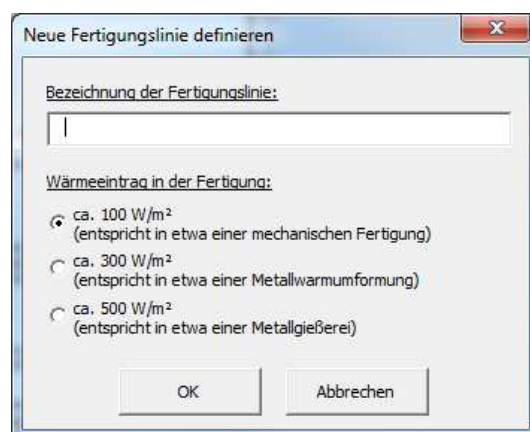


Abbildung 54: Fenster zum Anlegen einer neuen Fertigungslinie

Da unterschiedliche Wärmeeinträge in der Montage im Rahmen dieses Forschungsprojekts nicht betrachtet wurden, muss bei Anlage einer neuen Montagelinie kein Wärmeeintrag zugewiesen werden.

Nach der Definition der Organisationsformen und ggf. der Definition von Linien kann der Nutzer mit dem nächsten Schritt fortfahren. Durch Betätigen der Schaltfläche „Beziehungen der Bereiche definieren“ gelangt der Nutzer zur nächsten Anzeige. Zunächst muss der Nutzer dabei die Gewichtung zwischen Materialfluss und Kommunikationsfluss festlegen. Dazu öffnet sich ein Fenster mit Schiebereglern, der dem Nutzer eine intuitive Bedienung erleichtern soll.

Der Software-Demonstrator erzeugt die zur Bewertung aus logistischer Sicht notwendigen Materialfluss- und Kommunikationsflussmatrizen dynamisch je nach den Nutzereingaben im vorherigen Schritt. Abbildung 55 zeigt einen Ausschnitt aus diesem Fenster. Hat der Nutzer bereits in vorherigen Planungen zum gleichen Projekt Beziehungen zwischen den Bereichen angegeben, wird der Nutzer gefragt, ob er die angegebenen Daten übernehmen möchte, oder ob sie verworfen werden sollen.

Start
Organisationsformen festlegen
Beziehungen der Bereiche definieren
Layoutvarianten eingeben
Bewertung und Benchmark

Bitte tragen Sie in die **Materialflussmatrix** die Materialflussbeziehungen (Zahlenwerte als Intensitätsindikator) zwischen den angegebenen Bereichen ein. Wenn keine Beziehung besteht, tragen Sie bitte eine "0" ein.

	von	*Fertigung*	Montage	Wareneingang	Warenausgang	Produktionslager	Büro- und Sozialräume	Technik	Summe
nach									
Fertigung									0
Montage									0
Wareneingang									0
Warenausgang									0
Produktionslager									0
Büro- und Sozialräume									0
Technik									0
Summe		0	0	0	0	0	0	0	0

Bitte tragen Sie in die **Kommunikationsflussmatrix** die Kommunikationsbeziehungen ("sehr hoch", "hoch", "mittel", "niedrig", "sehr niedrig") zwischen den angegebenen Bereichen ein.

	von	*Fertigung*	Montage	Wareneingang	Warenausgang	Produktionslager	Büro- und Sozialräume	Technik	Summe
nach									
Fertigung									0

Abbildung 55: Bildschirmansicht des Schrittes "Beziehungen der Bereiche definieren"

Nach Eingabe der Materialfluss- und Kommunikationsflussbeziehungen zwischen den Bereichen kann der Nutzer zum nächsten Schritt, der Eingabe der Layoutvarianten übergehen. Abbildung 56 zeigt diese Bildschirmansicht.

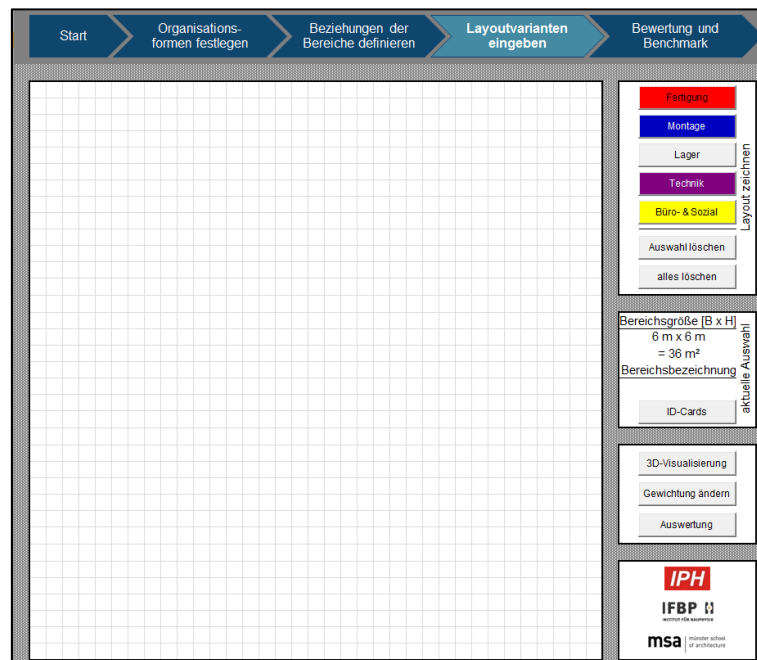


Abbildung 56: Bildschirmsicht zur Eingabe der Layoutvarianten

Der große, freie Bereich links stellt die Zeichnungsfläche dar. Auf dieser Fläche kann der Nutzer ein Layout frei aus den zur Verfügung stehenden Bereichen zusammensetzen. Über die Schaltflächen im rechten oberen Teil können die in der Zeichnungsfläche markierten Bereiche mit den jeweiligen Bereichen belegt werden. Wurden im Schritt „Organisationsformen festlegen“ verschiedene Linien definiert, kann der Nutzer aus diesen Linien nach Betätigen der Schaltflächen Fertigung bzw. Montage auswählen. Analog geschieht die Zuweisung der verschiedenen Lagertypen.

Im mittleren rechten Teil können Informationen zur aktuellen Auswahl eingesehen werden. Diese umfassen die Breite, Höhe und resultierende Größe des markierten Bereichs. Darüber hinaus wird die Bezeichnung des Bereichs angezeigt, der in der aktuell markierten Zelle angelegt wurde. Des Weiteren können die ID-Cards angezeigt werden, um bei der Erstellung schnell auf die notwendigen Informationen zugreifen zu können. Hierzu wird wiederum ein Auswahlfenster angezeigt, in dem der Nutzer die zu betrachtende ID-Card auswählen kann.

Im unteren rechten Bereich kann der Nutzer eine dreidimensionale Visualisierung des erstellten Layouts ausgeben lassen. Dazu werden die in der Zeichnungsfläche angelegten Bereiche in Quader transformiert und aneinander gesetzt. Abbildung 57 zeigt eine solche 3D-Visualisierung.

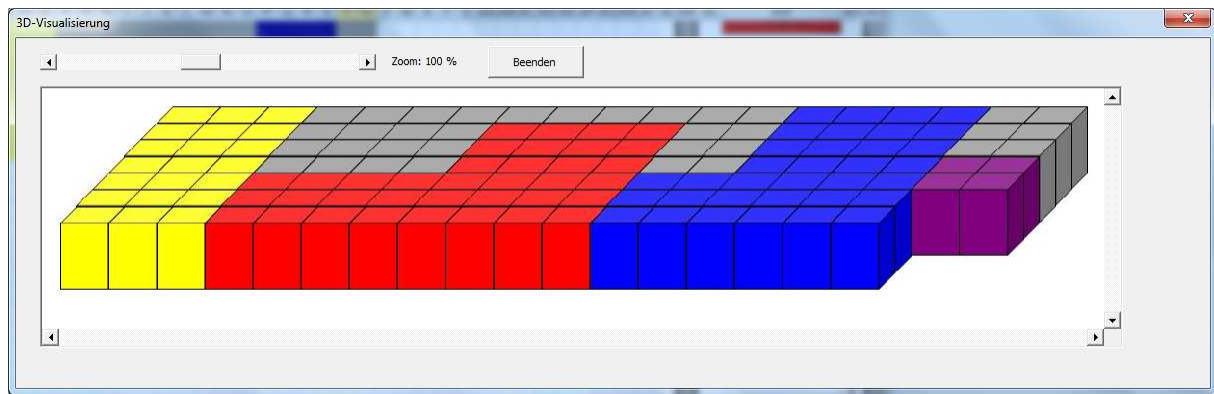


Abbildung 57: Fenster mit 3D-Visualisierung einer Fabrik mit verschiedenen Bereichen

Des Weiteren kann der Nutzer die Gewichtung der Einzelbewertungskennzahlen der drei Fachsichten eingeben. Um diese Eingabe intuitiv zu gestalten, wurde ein weiteres Fenster programmiert, in dem der Nutzer die Gewichtung mittels einer graphischen Eingabefläche bestimmen kann (vgl. Abbildung 58).

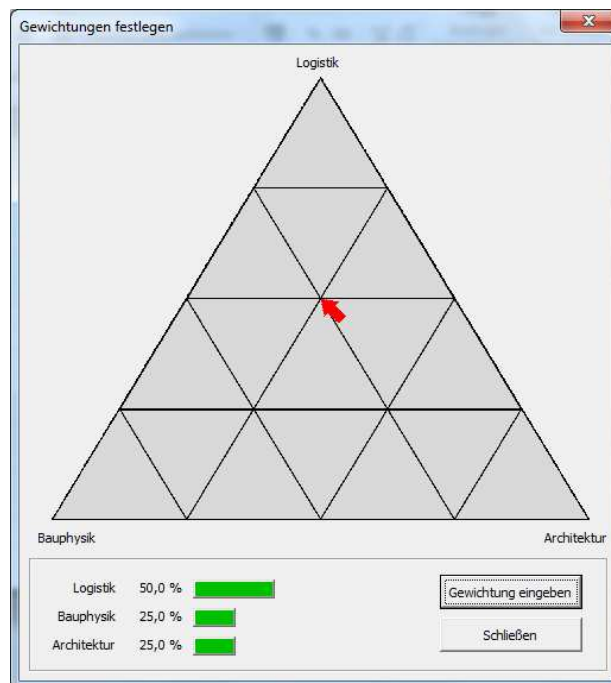


Abbildung 58: Fenster zur graphischen Eingabe der Gewichte für die Einzelbewertungskennzahlen

Nach der Festlegung der Gewichte für die Einzelbewertungskennzahlen sowie der Eingabe eines Layouts kann der Nutzer dieses Layout automatisch bewerten lassen. Dazu wurden die Bewertungsansätze im Programm hinterlegt und können automatisiert durchlaufen werden. Die Auswertung wird dem Nutzer im Anschluss in einem weiteren Fenster ausgegeben. Abbildung 59 zeigt dieses Fenster. Unter den Reitern sind die Bewertungskriterien und deren Ausprägungen im erstellten Layout zu finden. Im unteren Teil des Fensters werden die Bewertungskennzahlen (jeweils bezogen auf 100) aus den drei Fachsichten ebenso wie die Gesamtbewertungskennzahl (ebenfalls bezogen auf 100) ausgegeben. Der Nutzer kann diese Ansicht entweder

direkt schließen oder die Variante dem Benchmark hinzufügen und somit zum letzten Schritt im Software-Demonstrator gelangen.

The screenshot shows a window titled 'Auswertung' with three tabs: 'Architektur', 'Bauphysik', and 'Logistik'. The 'Architektur' tab is active. The window is divided into three main sections:

- Materialfluss:** Gewicht: 70 %, Zielerreichung: 89 / 100
- Kommunikationsfluss:** Gewicht: 30 %, Zielerreichung: 65 / 100
- Bewertung:**
 - Architektur:** Bewertungskennzahl: 33 / 100, Gewichtung: 25,0%
 - Bauphysik:** Bewertungskennzahl: 46 / 100, Gewichtung: 25,0%
 - Logistik:** Bewertungskennzahl: 82 / 100, Gewichtung: 50,0%
 - Gesamtbewertung:** Gesamtbewertungskennzahl: 61 / 100

At the bottom of the window, there are two buttons: 'Variante zum Benchmark hinzufügen' and 'Schließen'.

Abbildung 59: Fenster mit Auswertung der Layoutbewertung im Software-Demonstrator

Fügt der Nutzer die Variante dem Benchmark hinzu, so muss er der Variante zuerst eine Bezeichnung geben. Im Anschluss werden die Bewertungskennzahlen in der dafür vorgesehenen Bildschirmansicht vermerkt. Darüber hinaus wird die Zeichnungsfläche mit dem Layout kopiert und als Bild der Variante hinzugefügt, sodass die verschiedenen Varianten auch visuell einfach zu unterscheiden sind. Abbildung 60 zeigt den Benchmark im Software-Demonstrator. Wenn weitere Varianten erstellt werden, können sie ebenfalls dem Benchmark hinzugefügt werden. Der Software-Demonstrator setzt die weiteren Varianten dynamisch unter die jeweils zuvor angelegte Variante. Wie zu erkennen ist, können die verschiedenen Layoutvarianten mit dieser Darstellungsform aufwandsarm gegeneinander verglichen werden, da alle wichtigen Kennzahlen direkt neben dem Layout und untereinander im direkten Vergleich stehen.

Gewählte Gewichtung für die Fachsichten:

Architektur	25,0 %
Bauphysik	25,0 %
Logistik	50,0 %

alle Varianten löschen

Variante: Variante 1

Gesamtbewertungskennzahl:	53,25 / 100
davon Architektur:	33 Punkte gewichtet mit 25,0 % = 8,25 Punkte
davon Bauphysik:	46 Punkte gewichtet mit 25,0 % = 11,5 Punkte
davon Logistik:	67 Punkte gewichtet mit 50,0 % = 33,5 Punkte

Variante: Variante 2

Gesamtpunktzahl:	49,25 / 100
davon Architektur:	33 Punkte gewichtet mit 25,0 % = 8,25 Punkte
davon Bauphysik:	60 Punkte gewichtet mit 25,0 % = 15 Punkte
davon Logistik:	52 Punkte gewichtet mit 50,0 % = 26 Punkte

Abbildung 60: Bildschirmansicht des Benchmarks im Software-Demonstrator

Somit bildet der Software-Demonstrator alle Funktionen der Bewertungsmethodik ab und kann so vor allem in KMU helfen, Layouts in einer frühen Phase der Planung gegeneinander zu bewerten und folglich eine bessere Entscheidungsgrundlage für weitere Planungen bereitzustellen.

4.4.2 Entwicklung eines Ablaufs zur systematischen Bewertung verschiedener Layoutvarianten und Auswahl einer Vorzugsvariante

Die in BS 2 entwickelte Gesamtbewertungskennzahl wurde in einen systematischen Ablauf zur Bewertung und Weiterentwicklung verschiedener Layouts im Planungsprozess eingebettet.

Dieser Ablauf führt den Planer strukturiert zur verschiedenen Layouts, die gegeneinander bewertet werden. Das Layout mit der höchsten Bewertungskennzahl stellt dabei die beste Alternative dar.

Der Ablauf kann in elf Schritte unterteilt werden (vgl. Abbildung 61).

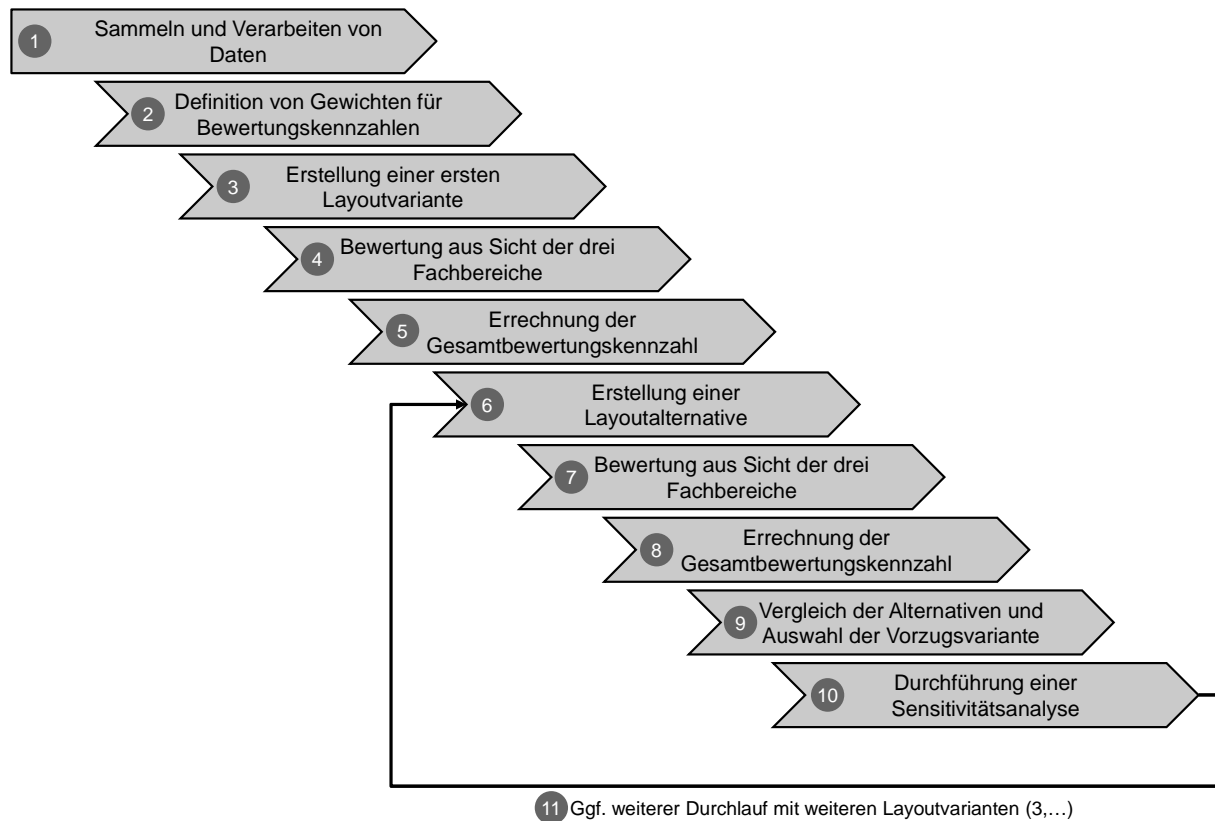


Abbildung 61: Ablauf zur systematischen Bewertung verschiedener Layoutvarianten

Schritt 1 umfasst das Sammeln und Verarbeiten von Daten, wie z. B. zu berücksichtigende Bereiche, Organisationsformen, Materialfluss- und Kommunikationsbeziehungen. Schritt 2 stellt die Definition der Gewichtungsfaktoren für die Bewertungskennzahlen der drei Fachsichten dar. Diese Definition kann bspw. durch paarweisen Vergleich geschehen. Im dritten Schritt wird eine erste Layoutvariante erzeugt, die im anschließenden Schritt aus Sicht der drei Fachbereiche bewertet wird. Schritt 5 besteht in der Errechnung der Gesamtbewertungskennzahl für das erste erstellte Layout. Anschließend wird eine weitere Layoutalternative erstellt, bewertet, und die Gesamtbewertungskennzahl errechnet (Schritte 6 bis 8). Im neunten Schritt werden die Bewertungen verglichen und eine Vorzugsvariante (= bessere Alternative) ausgewählt. Zur Verifizierung der Entscheidung sollte im Anschluss noch eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt werden. Dabei sollte der Planer die Gewichtungsfaktoren für die drei Fachsichten abändern und die Auswirkungen auf die Gesamtbewertungskennzahl beobachten. Ändert sich diese bei Anpassung der Gewichtungsfaktoren, weist das angegebene Layout eine hohe Sensitivität auf und ist als nicht so gut anzusehen, wie ein Layout, welches eine geringe Sensitivität aufweist, da sich bei (ungeplanten) Verschiebungen der Gewichtungsfaktoren ein anderes Layout als besser erweisen könnte.

Für den Fall, dass das Layout den Ansprüchen des Planers nicht genügt, kann eine weitere Planung durchgeführt werden.

5 Innovativer Beitrag und wirtschaftlicher Nutzen

5.1 Voraussichtliche Nutzung der angestrebten Forschungsergebnisse

Mit dem Fabrikmodell zur Bewertung von Fabriken im Hinblick auf die Energie- und Materialflusseffizienz lassen sich verschiedene Fabriklayoutalternativen gegeneinander bewerten. Die abgeleiteten Handlungsempfehlungen helfen bei der frühzeitigen Berücksichtigung der Planungszielgrößen sowohl aus logistischer als auch aus bauphysikalischer und architektonischer Sicht. Daher stellen das entwickelte Fabrikmodell sowie der Ablaufplan zur Bewertung von Layoutvarianten eine große Hilfe bei der fachübergreifenden Planung dar. Das Fabrikmodell kann branchenübergreifend sowohl bei der Restrukturierungs- als auch bei der Neuplanung von Fabriken eingesetzt werden. Durch die Implementierung der Methodik in einem Software-Demonstrator ist die Nutzung ohne das Beschaffen von Spezialsoftware möglich. Benötigt wird lediglich MS Excel, was jedoch in den meisten Unternehmen als Standardsoftware verfügbar ist. Dies macht den Einsatz der Methode auch für KMU interessant.

Allerdings bildet die Bewertungsmethode die Zusammenhänge nur auf einer sehr aggregierten Stufe ab. Für detailliertere Aussagen müssen weiterhin aufwändige thermische Gebäudesimulationen durchgeführt werden. Ebenfalls werden die Material- und Kommunikationsflüsse nur grob betrachtet und bewertet. Eine Untersuchung der Flussbeziehungen auf Feinlayoutebenen sollte daher im Anschluss immer durchgeführt werden. Daher werden die Hauptnutzer kurzfristig meist geschulte Fachplaner sein, die die Layouts durch ihre Kreativität (weiter-)entwickeln. Jedoch bietet die Bewertung, die sich aus dem Ablauf ergibt auch erste Hinweise zur optimierten Layoutplanung für nicht geschulte Planer. Da die Fachplaner Projekte in ganz Deutschland durchführen ist eine weite Verbreitung des Fabrikmodells und des Ablaufs zu erwarten.

5.2 Möglicher Beitrag zur Steigerung der Leistungs- und Wettbewerbsfähigkeit kleiner und mittlerer Unternehmen

Das Fabrikmodell zur Bewertung von Fabriken im Hinblick auf Energie- und Materialflusseffizienz bietet KMU die Möglichkeit der Erstellung von sowohl energie- als auch materialflusseffizienten Fabriklayouts und stellt eine sinnvolle Ergänzung zu bestehenden Planungsansätzen dar. Wird ein Energiebedarf von 1.500.000 kWh/a für ein durchschnittliches KMU [ELL08] und ein Energiepreis von 0,65 €/l Heizöl (Heizöl-äquivalent) zugrunde gelegt, ergeben sich Kosten für Energie i.H.v. ca. 97.500 €/a. Unter Zugrundelegung der untersuchten Fabriklayoutvarianten sind die ermittelten Kosteneinsparpotenziale von ca. 1.200 € aus energetischer Sicht mit 1,2 % vergleichsweise gering. Hochgerechnet auf einen angenommenen Lebenszyklus einer Fabrik können somit Einsparungen i.H.v. 60.000 € (ohne Berücksichtigung von

Preissteigerungen und Zinseffekten) erzielt werden. Diese Einsparungen können jedoch ohne zusätzliche Investitionen in Anlagentechnik erreicht werden und somit kann die Finanzierungssituation und Wettbewerbsfähigkeit der deutschen KMU positiv beeinflusst werden. Darüber hinaus sind die nur schwer monetär quantifizierbaren Potenziale im Material- und Kommunikationsfluss ebenso wie die Effekte, die sich bspw. durch höhere Zufriedenheit bzw. Leistungsfähigkeit der Mitarbeiter durch die Optimierung der Büro- und Sozialraumanordnungen ergeben, einzurechnen. Des Weiteren sind Effekte, die sich positiv auf das Image eines Unternehmens bei Berücksichtigung der Empfehlungen auswirken, zu beachten.

6 Verwendung der Zuwendung

Das Projekt wurde am IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gemeinnützige GmbH vom 01.08.2011 bis zum 30.10.2013 von einem wissenschaftlichen Mitarbeiter (TVL E 13) mit fundierten Kenntnissen im Bereich der Produktionslogistik bearbeitet.

Am IfBP - Institut für Bauphysik der Leibniz Universität Hannover wurde das Projekt vom 01.08.2011 bis zum 30.10.2013 von einem wissenschaftlichen Mitarbeiter (TVL E 13) mit fundierten Kenntnissen im Bereich der Bauphysik bearbeitet.

An der MSA - Münster School of Architecture der Hochschule Münster wurde das Projekt vom 01.08.2011 bis zum 30.10.2013 von einem wissenschaftlichen Mitarbeiter (TVL E 13) mit fundierten Kenntnissen im Bereich der Architektur bearbeitet.

7 Umsetzung der Forschungsergebnisse / Transfer der Ergebnisse in die Wirtschaft

Erste Schritte zum Ergebnistransfer sind während der Projektlaufzeit durchgeführt worden. Weitere Maßnahmen zur Verwertung und Verbreitung der Projektergebnisse sind im Anschluss an das Projekt vorgesehen. Über den Austausch zwischen Forschungsstellen und den Unternehmen des projektbegleitenden Ausschusses sowie weiteren interessierten Unternehmen hat bereits ein erster Wissenstransfer stattgefunden. Dieser ist die Basis für die praktische Umsetzbarkeit der Ergebnisse. Die Mitglieder des projektbegleitenden Ausschusses sind in folgender Tabelle aufgeführt:

Tabelle 3: Mitglieder des projektbegleitenden Ausschusses

Unternehmen	KMU	Ansprechpartner	Telefonnummer
Bahlsen GmbH & Co.KG		Hr. Hoffmann	0511 / 9600
Bäckerei Bolten GmbH	X	Hr. Schenkel	0203 / 975790
Brüggemann Holzbau GmbH & Co.KG	X	Hr. Springmeyer	05973 / 94400
Brüggemann Holzbau GmbH & Co.KG	X	Hr. Fiekers	05973 / 94400
GREAN GmbH	X	Fr. Klement	0511 / 76218291
InfraServ GmbH & Co. Gendorf KG		Hr. Manetsberger	08679 / 70
Kluth Vertriebs GmbH	X	Hr. Kluth	05105 / 77050
Koller Maschinen- und Anlagenbau GmbH		Hr. Prüssing	05141 / 98980
Siemens AG		Hr. Gottswinter	09131 / 70
URSA GmbH		Hr. Effler	034602 / 5400
Wachtel GmbH		Hr. Adams	02103 / 49040

Die bereits durchgeführten und noch geplanten Transfermaßnahmen sind dem Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft in Tabelle 4 zu entnehmen.

Tabelle 4: Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft (spezifische durchgeführte und geplante Transfermaßnahmen)

Maßnahme	Ziel	Rahmen	Zeitraum
Im Berichtszeitraum umgesetzte Transfermaßnahmen			
A Projektbegleitender Ausschuss	Fortlaufende Beratung über die geplanten und erzielten Projektergebnisse zur Gewährleistung der Praxisrelevanz	Austausch über geplante Schritte und erste Ergebnisse	29.02.2012
		Kontinuierliche Abstimmung mit den Teilnehmern des PbA über die gesamte Projektlaufzeit	08/2011 bis 10/2013
		Vorstellung der erzielten Ergebnisse und Übergabe der Projektergebnisse in Telefonkonferenz	Januar 2014

Maßnahme	Ziel	Rahmen	Zeitraum
Im Berichtszeitraum umgesetzte Transfermaßnahmen			
B Information der interessierten Fachöffentlichkeit, insbesondere KMU	Ergebnistransfer in die Wirtschaft	Herausgabe einer Pressemitteilung (http://www.iph-hannover.de/sites/default/files/press/2011/IPH_20111108_En-MaFap.pdf)	08.11.2011
		Aufbau und Pflege einer projektbegleitenden Homepage (http://www.fabrik-a-plusplus.de)	Ab 12/2011
		Vorstellung des Forschungsprojekts auf dem 6. Mittelstandsforum der BVL in Mannheim	26.04.2012
		Veröffentlichung: Böning, C.; Rochow, P.: Sparen nach Plan: Energieorientierte Fabrik- und Belegungsplanung. In: phi - Produktionstechnik Hannover informiert, PZH-Verlag, 13. Jg. (2012), H. 2.	Oktober 2012
		Veröffentlichung: Fouad, N. A.; Ackerbauer, H.: Fabrik A++ - Effizienz bei Energie- und Materialfluss. In: ti Technologie-Informationen 01/2013.	Januar 2013
		Veröffentlichung: Rochow, P.: Von Anfang an Energie sparen | Weniger Kosten durch energieeffiziente Fabrikplanung In: IPH Jahresbericht 2012	März 2013
		Ullmann, G.: Energie- und materialflusseffiziente Fabrikplanung - Vom Forschungsprojekt zum Wissenstransfer in die Unternehmen. IHK Oldenburg, Sitzung des Industrie-, Energie- und Umweltausschusses, Nordenham.	25.04.2013
		Ullmann, G.: Energie- und materialflusseffiziente Fabrikplanung - Forschung und Beratung am Praxisbeispiel. Innovationskreis Automobilzulieferer, NiedersachsenMetall - Verband der Metallindustriellen Niedersachsens e.V. und Arbeitgeberverband der Deutschen Kautschukindustrie (ADK) e.V., Hannover.	11.06.2013
		Download des Software-Demonstrators und der Handlungsempfehlungen auf der projektbegleitenden Internet-Homepage (http://www.fabrik-a-plusplus.de)	ab Februar 2014
C Weiterbildung während der Projektlaufzeit	Betreuung studentischer Abschlussarbeiten	Masterarbeit Gubernat, C.: Thermische Gebäudesimulation - Gewerbehallen, Tageslichtfaktor	2011
		Masterarbeit Company, N.: Untersuchung und Konzeptionierung von Bewertungssystemen im Hinblick auf energie- und materialflusseffiziente Strukturierung und Gestaltung von Fabriken	01/2012 - 05/2012

Maßnahme	Ziel	Rahmen	Zeitraum
Im Berichtszeitraum umgesetzte Transfermaßnahmen			
		Bachelor-Vertiefung Schulte, M. und Wiesmann, M.: Autarkie im Industriebau - Der Prozess als energetisches Einsparpotenzial	2012
		Masterthesis Kliewer, E.: Tageslicht im Industriebau, Simulation von Tageslichtverläufen	2012
		Masterarbeit Klindworth, M.: Untersuchung und Entwicklung eines Berechnungsmodells zur Identifikation einer energieeffizienten Anordnung von thermischen Bereichen in Fabriken	06/2012 - 11/2012
		Studienarbeit Kretzschmar, J.: Entwicklung eines Bewertungsverfahrens und Identifikation von Bewertungskriterien für die Planung von energie- und materialflusseffizienten Fabriken aus logistischer Sicht	10/2012-12/2013
		Diplomarbeit Bartels, D.: Untersuchungen zur energieeffizienten Anordnung unterschiedlicher Klimabereiche innerhalb einer Fabrik	11/2012 - 02/2013
		Bachelorarbeit Röhrs, S.: Entwicklung Systematik zur Bewertung von Bereichsanordnungen in Fabriken vor dem Hintergrund von Energie- und Materialflusseffizienz im Fabrikplanungsprozess	12/2012 - 03/2013
		Bachelorarbeit Wilken, C.: Entwicklung einer Bewertungssystematik für die strukturierte Identifikation von energie- und materialflusseffizienten Bereichsanordnungen in Fabriken	12/2012 - 03/2013
		Projektarbeit Groß, M.: Entwicklung einer Methode zur logistischen Bewertung des Groblayouts bei energie- und materialflusseffizienten Fabriken	06/2013 - 09/2013

Maßnahme	Ziel	Rahmen	Zeitraum
Nach dem Berichtszeitraum geplante Transfermaßnahmen			
D Weiterbildung nach der Projektlaufzeit	Qualifizierung von Mitarbeitern aus KMU	Aufnahme der Projektinhalte in das Seminarprogramm des IPH	ab 2014
	Akademische Ausbildung	Übernahme der Projektergebnisse in die Lehre der Leibniz Universität Hannover, Betreuung an die Projektergebnisse anknüpfender Diplom-, Studien-, Bachelor-, Masterarbeiten und Praktika	ab 2014

E Weiterentwicklung der Forschungsergebnisse	Nutzung der erzielten Projektergebnisse für weitere Forschungsvorhaben	Nutzung der erzielten Projektergebnisse für weitere Forschungsvorhaben	ab Anfang 2014
	Nutzung der erzielten Ergebnisse für die Anfertigung einer Dissertation	Weiterentwicklung des entwickelten Fabrikmodells im Rahmen eines Dissertationsvorhabens	ab Anfang 2014
F Information der interessierten Fachöffentlichkeit, insbesondere KMU	Ergebnistransfer in die Wirtschaft	Verfassung einer zusammenfassenden Veröffentlichung mit Projektergebnissen	Anfang 2014

8 Durchführende Forschungsstellen

Das IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH ist eine gemeinnützige Forschungseinrichtung, die eng mit der Universität Hannover kooperiert. Die Gesellschafter des IPH, Prof. Behrens, Prof. Overmeyer und Prof. Nyhuis, sind gleichermaßen Inhaber produktionstechnischer Lehrstühle an der Universität Hannover. Die Gliederung des IPH in die drei Abteilungen „Prozesstechnik“, „Produktionsautomatisierung“ und „Logistik“ spiegelt die Ausrichtung dieser Lehrstühle wider.

Während die universitären Mutterinstitute des IPH hauptsächlich den Bereich der Grundlagenforschung abdecken, widmet sich das IPH hauptsächlich der anwendungsorientierten Forschung und Entwicklung. Das IPH wurde 1988 mit Unterstützung des niedersächsischen Wirtschaftsministeriums gegründet und ist besonders der technologischen Förderung mittelständischer Industriebetriebe verpflichtet. Der Technologietransfer von der Universität in die Industrie erfolgt dabei hauptsächlich über gemeinsam mit der Industrie durchgeführte, öffentlich geförderte Verbundforschungsprojekte sowie über Fortbildungsseminare und Arbeitskreise für spezielle Zielgruppen aus Industrie und Handel. Darüber hinaus stellt das IPH laufend in einer Vielzahl ausschließlich industriefinanzierter Beratungsprojekte seine Praxisorientierung und Wettbewerbsfähigkeit unter Beweis.

Das Institut für Bauphysik (IFBP) der Leibniz Universität Hannover (LUH) als Mitglied im Kompetenzzentrum für Energieeffizienz e.V. Hannover erforscht schwerpunktmäßig die Maßnahmen für Wärmeschutz und Energieeinsparung und -effizienz. Aktuelle

Forschungsarbeiten beschäftigen sich mit der Entwicklung neuer Wärmedämmstoffe und deren Überführung in die praktische Anwendbarkeit, der Anwendung der Thermografie im Bauwesen und der Beurteilungsmöglichkeiten zur Energieeffizienz von Gebäuden.

Das Department 2 Baukonstruktion Prof. Jürgen Reichardt der MSA - münster school of architecture der Münster University of Applied Science hat sich insbesondere in den letzten zehn Jahren mit baukonstruktiven Fragen, Facility Managementtechniken, sowie energetischen Optimierungen von Industriebauten beschäftigt. Aus dieser Thematik entstanden zahlreiche Veröffentlichungen von Prof. Reichardt zu synergetischer Planung, Stahlbau, Holzbau sowie Energiesimulation. In Buchform, teilweise in Zusammenarbeit mit Produktionsplanern der Leibniz Universität Hannover, erschienene Publikationen sind:

- Holzkonstruktionen im Gewerbebau (Holzabsatzfonds, 2007)
- Handbuch Fabrikplanung, co. Autoren: Prof. Wiendahl, Prof. Nyhuis (Hanser, 2009)

Seit 2005 wurde am Department Prof. Reichardt dynamische Energiesimulationen über wechselnde Lehraufträge in die Lehre und Forschung eingebracht. Die hierfür eingesetzte dynamische Simulationssoftware TAS und IES baut auf die 3D- Modellierung der architektonischen Gebäudemodelle auf und bewertet im Mehrzonenmodell u.a. die Effizienz von Tageslichtverteilung im Raum, Energiebilanzierung im Sommer- und Winterfall, auch unter Berücksichtigung interner (Prozess) Lasten sowie die thermische Behaglichkeit an den Arbeitsplätzen.

8.1 Leiter der Forschungsstellen

IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH

Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Nyhuis

Geschäftsführender Gesellschafter des IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gemeinnützige GmbH, Hollerithallee 6, 30419 Hannover,
Tel.: 0511/27976-119

Prof. Dr.-Ing. Ludger Overmeyer

Geschäftsführender Gesellschafter des IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gemeinnützige GmbH, Hollerithallee 6, 30419 Hannover,
Tel.: 0511/27976-119

Prof. Dr.-Ing. Bernd-Arno Behrens

Geschäftsführender Gesellschafter des IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gemeinnützige GmbH, Hollerithallee 6, 30419 Hannover,
Tel.: 0511/27976-119

Dr.-Ing. Georg Ullmann

Koordinierender Geschäftsführer des IPH – Institut für Integrierte Produktion
Hannover gemeinnützige GmbH, Hollerithallee 6, 30419 Hannover,
Tel.: 0511/27976-119

IfBP - Institut für Bauphysik der Leibniz Universität Hannover

Prof. Dr.-Ing. Nabil A. Fouad

Institutsleiter des IfBP - Institut für Bauphysik der Leibniz Universität Hannover, Appelstraße 9a, 30167 Hannover, Tel: 0511/762-2404

MSA - Münster School of Architecture der Münster University of Applied Science

Prof. Jürgen Reichardt

Leiter Department 2 Baukonstruktion und Gebäudeklimatik der MSA - Münster School of Architecture, Fachbereich Architektur der Münster University of Applied Science, Leonardo Campus 5 - 7, 48149 Münster, Tel: 0251/83650-75

8.2 Projektleiter und -bearbeiter

Projektleiter und -bearbeiter:

M. Sc. Philip Rochow

Wissenschaftlicher Mitarbeiter der Abteilung Logistik des IPH

Projektbearbeiter:

Dipl.-Ing. Heide Ackerbauer

Wissenschaftliche Mitarbeiterin des Instituts für Bauphysik (IFBP) der Leibniz Universität Hannover

Dipl.-Ing. (Arch.) Thomas Lilge

Wissenschaftlicher Mitarbeiter der Münster University of Applied Science, MSA, Münster School of Architecture

Hannover, 27.02.2014

Prof. Dr.-Ing. habil.

Peter Nyhuis

Geschäftsführender Gesellschafter

Dr.-Ing.

Georg Ullmann

Koordinierender Geschäftsführer

9 Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben 17077 N der Forschungsvereinigung Bundesvereinigung Logistik e. V. (BVL) wurde über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e. V. (AiF) im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Für die Förderung sei an dieser Stelle gedankt.

10 Literaturverzeichnis

- [ASR10] Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin; Technische Regeln für Arbeitsstätten ASR A3.5 – Raumtemperatur; Ausschuss für Arbeitsstätten; 2010
- [BMW08] Bundesministerium für Wirtschaft (Hrsg.): Energiedaten, 2008.
- [BUN02] Die Bundesregierung: Perspektiven für Deutschland - Unsere Strategie für eine nachhaltige Entwicklung.
[http://www.bundesregierung.de/Content/DE/_Anlagen/Nachhaltigkeit-wiederhergestellt/perspektiven-fuer-deutschland-langfassung.pdf;jsessionid=F5B7D46605629AB0B19CE794BB672BC4.s2t1?_blob=publicationFile&v=2,](http://www.bundesregierung.de/Content/DE/_Anlagen/Nachhaltigkeit-wiederhergestellt/perspektiven-fuer-deutschland-langfassung.pdf;jsessionid=F5B7D46605629AB0B19CE794BB672BC4.s2t1?_blob=publicationFile&v=2)
8.12.2013.
- [DAV06] David, de Boer, Erhorn, Reiß, Rouvel, Schiller, Weiß, Wenning: Heizen, Kühlen, Belüften & Beleuchten – Bilanzierungsgrundlagen nach DIN V 18599. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2006
- [DIN03] Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN 8593-0: Fertigungsverfahren Fügen. Beuth Verlag, Berlin, 2003.
- [DIN07] Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN V 18599-10: Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten. Beuth Verlag, Berlin, 2007.
- [DOL81] Dolezalek, C. M.; Warnecke, H.J.: Planung von Fabrikanlagen. 2. Auflage, Springer Verlage, Berlin, 1981.
- [ELL08] Elle, M.: Schulungsmaterial - Energieeffizienz in KMU.
[http://www.engine-sme.eu/uploads/media/Training_material_de.pdf,](http://www.engine-sme.eu/uploads/media/Training_material_de.pdf)
18.12.2013.
- [GRU09] Grundig, C.-G.: Fabrikplanung: Planungssystematik – Methoden - Anwendungen. 3., neu bearbeitete Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 2009.
- [HEL10] Helbing, K. W.: Handbuch Fabrikprojektierung. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2010.
- [HEN96] Henn, H.; Kühnle, G.: Strukturplanung. In: Eversheim, W.; Schuh, G. (Hrsg.): Betriebshütte – Produktion und Management. 7., völlig neu bearbeitet Auflage, Springer Verlag, Berlin, 1996.

- [JÜN96] Jünemann, R.: Informationstechniken in der innerbetrieblichen Logistik. In: Eversheim, W.; Schuh, G. (Hrsg.): Betriebshütte – Produktion und Management. 7., völlig neu bearbeitet Auflage, Springer-Verlag, Berlin, 1996.
- [KET10] Kettner, H.; Schmidt, J., Greim, H.-R.: Leitfaden der systematischen Fabrikplanung, Nachdruck von 1984, Hanser Verlag, München, 2010.
- [MAR04] Martin, H.: Transport und Lagerlogistik. Planung, Aufbau und Steuerung von Transport- und Lagersystemen. 5., überarbeitete und erweiterte Auflage. S. 23-68. Viewegs Fachbücher der Technik, Wiesbaden, 2004.
- [SCH04] Schenk, M.; Wirth, S.: Fabrikplanung und Fabrikbetrieb, Methoden für die wandlungsfähige und vernetzte Fabrik. Springer Verlag, Heidelberg, Berlin, 2004.
- [SCH09] Schoch, T.: EnEv 2009 und DIN V 18599 - Nichtwohnbau : Kompaktdarstellung, Kommentar, Praxisbeispiele. 2. Auflage, Bauwerk Verlag, Berlin, 2009.
- [TRY04] Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere und extreme Witterungsverhältnisse (TRY); Deutscher Wetterdienst (DWD), November 2004
- [VDI73] Verein Deutscher Ingenieure e.V.: VDI-Richtlinie 3300: Materialfluss-Untersuchungen. Beuth Verlag, Berlin, 1973.
- [VDI98] Verein Deutscher Ingenieure e.V.: VDI-Richtlinie 3802: Raumluftechnische Anlagen für Fertigungsstätten. Beuth Verlag, Berlin, 1998.
- [WAR93] Warnecke, H.-J. (Hrsg.): Revolution der Unternehmenskultur - Das Fraktale Unternehmen. 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 1993.
- [WES00] Westkämper, E.; Wiendahl, H.-H. et.al.: Turbulenzen in der PPS - eine Analogie. wt Wertstattechnik 90 (2000) 5, S.203-207.
- [WES99a] Westkämper, E.: Wandlungsfähigkeit der industriellen Produktion. TCW-Verlag, München, 1999.
- [WES99b] Westkämper, E.; Wiendahl, H.-H.; März, L.: Fabrikplanung und Auftragsmanagement in wandlungsfähigen Unternehmensstrukturen. ZWF Zeitschrift für wirtschaftliche Fertigung 94 (1999) 10, S. 610-613).
- [WES99c] Westkämper, E.: Die Wandlungsfähigkeit von Unternehmen. wt Werkstatttechnik 89 (1999) 4, S.131-140.
- [WIE05] Wiendahl, H.-P.; Nofen, D.; Klußmann, J.H. et. al.: Planung Modularer Fabriken, Vorgehen und Beispiele aus der Praxis. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 2005.

[ZEW10] Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung GmbH: Schwerpunkt Energiemarkt, Sonderteil ZEWnews, http://www.zew.de/de/topthemen/meldung_show.php?LFDNR=1382&KATEGORIE=41, 26.02.2010.

11 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Darstellung des Projektablaufs in Bearbeitungsschritten und Gegenüberstellung der Teilziele	5
Abbildung 2: Schema für die Bilanzierung des Heiz- und Kühlenergiebedarfs [DAV06]	15
Abbildung 3: Bildliche Dokumentation eines Fertigungsprozesses von Polystyrol-Dämmung mit zugehörigen Thermografieaufnahmen	18
Abbildung 4: Abführung überschüssiger Wärmeenergie aus Fertigungsprozessen	19
Abbildung 5: Graphisches Flächenaufnahmeformular	21
Abbildung 6: Beispiel einer mit Bereichen nachgebildeten Fabrik	21
Abbildung 7: Thermohygrograf zu Langzeitmessung von Oberflächen- sowie Lufttemperatur an einem Ofen in einem Fertigungsbereich	25
Abbildung 8: Thermohygrograf an einer Innenwand in einem Fertigungsbereich ..	25
Abbildung 9: Auswahl von Langzeitmessungen zu Temperaturen in Fertigungs- und Montagebereichen in unterschiedlichen Fabriken	26
Abbildung 10: Thermografieaufnahme eines geöffneten Großofens	27
Abbildung 11: Elementare Fabrikbereiche mit unterschiedlichen energetischen Charakteristika	28
Abbildung 12: Nutzungsrandbedingungen der identifizierten Fabrikbereiche hinsichtlich Raumkonditionierung und Wärmeenergieeinträgen	29
Abbildung 13: Ausschnitt aus der ID-Card zum Bereich "Fertigung mit einem Wärmeeintrag von 100 W/m ² "	31
Abbildung 14: Ausgestaltung eines Rasterelements	32
Abbildung 15: (a) Beispiel einer Materialflussmatrix, (b) Bereiche in einer Materialflussmatrix	33
Abbildung 16: Allgemeine Materialflussmatrix	34
Abbildung 17: Normierte Materialflussmatrix	34
Abbildung 18: Untere Dreiecksmatrix mit zusammengefassten Einträgen	35
Abbildung 19: Untere Dreiecksmatrix mit den Berührflächen	35
Abbildung 20: Kontaktflächenmatrix	39
Abbildung 21: Energieflussmatrix mit Bewertungsgrößen ϵ_{ij}	40
Abbildung 22: Beispielhaftes Fabriklayout zur Untersuchung	44
Abbildung 23: Ausschnitt aus der Tabelle mit verschiedenartigen Fabriklayouts	45
Abbildung 24: Fabriklayouts mit ähnlichen Bereichsanordnungen	46
Abbildung 25: Angenommene Materialflussbeziehungen zwischen Fabrikbereichen	46
Abbildung 26: Angenommene Kommunikationsflussbeziehungen zwischen den Bereichen	47
Abbildung 27: Modellerstellung mit Hilfe des Rastermodells	48

Abbildung 28: Benutzeroberfläche der Simulationssoftware	49
Abbildung 29: Eingangsparameter für die Untersuchung an den Fabrikmodellen....	50
Abbildung 30: Gegenüberstellung des Nutzenergiebedarfs unter Anwendung zweier Berechnungsmethoden mit und ohne Berücksichtigung zonenübergreifender Wärmeströme bei steigendem Wärmeenergieeintrag im Bereich der Fertigung.....	52
Abbildung 31: Ermittelter Heiz- Kühl- und gesamter Nutzenergiebedarf - untersuchte Fabriklayoutvarianten nach Energiebedarf aufsteigend sortiert.....	53
Abbildung 32: Beispielhaftes Fabrikmodell als Rastermodell für die Darstellung der Ermittlung der Kontaktflächenanteile.....	55
Abbildung 33: Ergebnisse der Berechnung des Heizenergiebedarfs für den Montagebereich abhängig von dem Berührflächenverhältnis.....	56
Abbildung 34: Maximale Temperaturen T_{max} in der Fertigung.....	57
Abbildung 35: Ergebnisse der Berechnung des Heiz- und Kühlenergiebedarfs für den Bürobereich abhängig von dem Berührflächenverhältnis mit der Fertigung	58
Abbildung 36: Ergebnisse der Berechnung des Heiz- und Kühlenergiebedarfs für den Bürobereich abhängig von dem Berührflächenverhältnis mit der Montage	58
Abbildung 37: Für detaillierte Betrachtung herangezogene Untersuchungsmodelle	59
Abbildung 38: Darstellung der Energiebedarfe und Temperaturentwicklungen im Bürobereich für den Winter- sowie den Sommerfall über jeweils eine Woche	60
Abbildung 39: Ergebnisse der Berechnung des Heiz- und Kühlenergiebedarfs für den Bürobereich abhängig von dem Berührflächenverhältnis mit dem Lager	61
Abbildung 40: Ergebnisse der Berechnung des Heiz- und Kühlenergiebedarfs für den Technikbereich abhängig von dem Berührflächenverhältnis mit der Fertigung	62
Abbildung 41: Ergebnisse der Berechnung des Heiz- und Kühlenergiebedarfs für den Technikbereich abhängig von dem Berührflächenverhältnis mit der Montage	62
Abbildung 42: Ergebnisse der Berechnung des Heiz- und Kühlenergiebedarfs für den Technikbereich abhängig von dem Berührflächenverhältnis mit dem Büro.....	63
Abbildung 43: Ergebnisse der Berechnung des Heiz- und Kühlenergiebedarfs für den Technikbereich abhängig von dem Berührflächenverhältnis mit dem Lager	64

Abbildung 44: Ergebnisse der Berechnung des Heizenergiebedarfs für den Lagerbereich abhängig von dem Berührflächenverhältnis mit der Fertigung	65
Abbildung 45: Ergebnisse der Berechnung des Heizenergiebedarfs für den Lagerbereich abhängig von dem Berührflächenverhältnis mit der Montage	65
Abbildung 46: Ergebnisse der Berechnung des Heizenergiebedarfs und Darstellung der Höchsttemperaturen für Montage und Fertigung in Abhängigkeit vom Außenwandanteil.....	66
Abbildung 47: Ergebnisse der Berechnung des Heiz- und Kühlenergiebedarfs für den Bürobereich in Abhängigkeit vom Außenwandanteil	67
Abbildung 48: Ergebnisse der Berechnung des Heiz- und Kühlenergiebedarfs für den Technikbereich in Abhängigkeit vom Außenwandanteil	68
Abbildung 49: Ergebnisse der Berechnung des Heizenergiebedarfs für den Lagerbereich in Abhängigkeit vom Außenwandanteil.....	68
Abbildung 50: Aufgrund der Untersuchungsergebnisse entwickelte Energieflussmatrix.....	70
Abbildung 51: Startbildschirm des Software-Demonstrators.....	73
Abbildung 52: Bildschirmansicht des Schrittes Organisationsformen festlegen im Software-Demonstrator	73
Abbildung 53: Fenster zur Definition der Organisationsform im Software-Demonstrator.....	74
Abbildung 54: Fenster zum Anlegen einer neuen Fertigungslinie.....	74
Abbildung 55: Bildschirmansicht des Schrittes "Beziehungen der Bereiche definieren"	75
Abbildung 56: Bildschirmansicht zur Eingabe der Layoutvarianten	76
Abbildung 57: Fenster mit 3D-Visualisierung einer Fabrik mit verschiedenen Bereichen	77
Abbildung 58: Fenster zur graphischen Eingabe der Gewichte für die Einzelbewertungskennzahlen.....	77
Abbildung 59: Fenster mit Auswertung der Layoutbewertung im Software-Demonstrator.....	78
Abbildung 60: Bildschirmansicht des Benchmarks im Software-Demonstrator.....	79
Abbildung 61: Ablauf zur systematischen Bewertung verschiedener Layoutvarianten	80
Abbildung 62: ID-Card des Bereichs "Fertigung mit einem Wärmeeintrag von 100 W/m ² "	98
Abbildung 63: ID-Card des Bereichs "Fertigung mit einem Wärmeeintrag von 300 W/m ² "	99

Abbildung 64: ID-Card des Bereichs "Fertigung mit einem Wärmeeintrag von 500 W/m ² "	100
Abbildung 65: ID-Card des Bereichs "Montage"	101
Abbildung 66: ID-Card des Bereichs "Lager in der Produktion"	102
Abbildung 67: ID-Card des Bereichs "Wareneingangslager"	103
Abbildung 68: ID-Card des Bereichs "Warenausgangslager"	104
Abbildung 69: ID-Card des Bereichs "Büro- und Sozialräume"	105
Abbildung 70: ID-Card des Bereichs "Technik"	106

12 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über die wesentlichen Fertigungsformen [DOL81].....	22
Tabelle 2: Kommunikationsintensitäten.....	36
Tabelle 3: Mitglieder des projektbegleitenden Ausschusses.....	83
Tabelle 4: Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft (spezifische durchgeführte und geplante Transfermaßnahmen)	83

13 Anhang

13.1 Anhang A1: Entwickelte ID-Cards zur Charakterisierung verschiedener Fabrikbereiche

ID-Card		Fertigung (100 W/m ²)	
Nutzungszeiten	Einheit	Wert	Erläuterungen
Jährliche durchschnittliche Nutzungszeit (von xx:xx Uhr bis xx:xx Uhr)	Uhrzeit	07:00 Uhr bis 16:00 Uhr	
Anzahl jährliche Nutzungstage	d/a	250	
Jährliche Nutzungsstunden zur Tagzeit (Intervall: 06:00 Uhr bis 22:00 Uhr)	h/a	2192	
Jährliche Nutzungsstunden zur Nachtzeit (Intervall: 22:00 Uhr bis 06:00 Uhr)	h/a	58	
Tägliche Betriebszeit der Raumlufttechnik (RLT) und Kühlung (von xx:xx Uhr bis xx:xx Uhr)	Uhrzeit	05:00 Uhr bis 16:00 Uhr	
Tägliche Betriebszeit der Heizung (von xx:xx Uhr bis xx:xx Uhr)	Uhrzeit	05:00 Uhr bis 16:00 Uhr	
Jährliche durchschnittliche Betriebsstunde jeweils für	-	-	
Heizung	d/a	250	
Kühlung	d/a	250	
Kühlung	d/a	250	
Ablauftechnische und organisatorische Anforderungen und Charakteristika			
Beschreibung			
Modulbeschreibung	hoher Anteil der Wertschöpfung durch automatisierte Betriebsmittel, geringer Anteil durch personelle Kapazitäten		
Prozesse incl. Beispiel	Umformen, Umformen, Trennen, Beschichten, Stoffeigenschaften ändern		
organisatorische Anforderungen	gradliniger Materialfluss, geringe Durchlaufzeiten, hohe Kapazitätsauslastung, automatisierte Verkettung der Arbeitssysteme		
idealtypische Position in der Prozesskette	nach Entwicklung, Konstruktion, Arbeitsvorbereitung		
Gebäudestruktur			
		Wert	
Tageslichtkoeffizient (D)	min: 2%	mittel: 4%	max: 10%
Fensterfaktor (KF)	KF > 0,1		
Sichtbeziehung nach außen	mindestens 10% der Außenwandfläche müssen transparent sein		
Qualität Innenausbau (1-5)	3		
Geometrie			
Raumhöhe	Einheit	Wert	Erläuterungen
8 bis 50 m ² Raumfläche	m	> 2,50	
50 m ² bis 100 m ² Raumfläche	m	> 2,75	Luftstrom
100 - 2000 m ² Raumfläche	m	> 3,00	
mehr als 2000 m ² Raumfläche	m	> 3,25	
Fläche	Anteil in % an A _{ges}	24	
minimales Raumbvolumen	m ³	125 pro Mitarbeiter	
Geschosse	Anzahl	1	
Raumkonditionierung			
Raum-Solltemperatur Heizung	Einheit	Wert	Erläuterungen
Raum-Solltemperatur natürliche Lüftung	°C	17,00	
Raum-Solltemperatur natürliche Lüftung	°C	26,00	gem. AbSattRL
Minimale Temperatur Auslegung Heizung	°C	15,00	
Lüftung	°C	30,00	
Temperaturabsenkung reduzierter Betrieb	K	4,00	
Mindestaußenluftvolumenstrom			
Einheit	Wert	Erläuterungen	
l/h	0,60	isolern Zone an Außenwand liegt, kann Wert höher als 0,6 sein.	
Wärmebeiträge			
Einheit	Wert	Erläuterungen	
m ² je Person	ca. 20		
W/m ²	ca. 12		
W/m ²	100		
W/h/(m ² ·d)	-		
Beleuchtung			
Einheit	Wert	Erläuterungen	
lx	500		
Bauteile²			
Einheit	Wert	Erläuterungen	
U-Wert in W/(m ² K)	0,20		
Außenwand	U-Wert in W/(m ² K)	0,35	
Unterer Gebäudeabschluss	U-Wert in W/(m ² K)	0,35	
Innenwand opak	U-Wert in W/(m ² K)	2,50	

Abbildung 62: ID-Card des Bereichs "Fertigung mit einem Wärmeeintrag von 100 W/m²"

Architektur

Bauphysik

¹ Nutzungsbedingungen in Anlehnung an DIN V 18599-10
² Bauteilqualität in Anlehnung an Anforderungen für Nichtwohngebäude nach EN 1509

Abbildung 63: ID-Card des Bereichs "Fertigung mit einem Wärmeeintrag von 300 W/m²"

ID-Card		Fertigung (300 W/m ²)	
Nutzungszeiten	Einheit	Wert	Erläuterungen
Jährliche durchschnittliche Nutzungszeit (von xx:xx Uhr bis xx:xx Uhr)	Uhrzeit	07:00 Uhr bis 16:00 Uhr	
Anzahl jährliche Nutzungstage	d/a	250	
Jährliche Nutzungsstunden zur Tagzeit (Intervall: 06:00 Uhr bis 22:00 Uhr)	h/a	2192	
Jährliche Nutzungsstunden zur Nachtzeit (Intervall: 22:00 Uhr bis 06:00 Uhr)	h/a	58	
Tägliche Betriebszeit der Raumlufttechnik (RLT) und Kühlung (von xx:xx Uhr bis xx:xx Uhr)	Uhrzeit	05:00 Uhr bis 16:00 Uhr	
Tägliche Betriebszeit der Heizung (von xx:xx Uhr bis xx:xx Uhr)	Uhrzeit	05:00 Uhr bis 16:00 Uhr	
Jährliche durchschnittliche Betriebsstunde jeweils für	-	-	
RLT	d/a	250	
Heizung	d/a	250	
Kühlung	d/a	250	
Ablauftechnische und organisatorische Anforderungen und Charakteristika			
Beschreibung			
Modulbeschreibung	hoher Anteil der Wertschöpfung durch automatisierte Betriebsmittel, geringer Anteil durch personelle Kapazitäten		
Prozesse incl. Beispiel	Urformen, Umformen, Trennen, Beschichten, Stoffeigenschaften ändern		
organisatorische Anforderungen	gradliniger Materialfluss, geringe Durchlaufzeiten, hohe Kapazitätsauslastung, automatisierte Verkettung der Arbeitssysteme		
idealtypische Position in der Prozesskette	nach Entwicklung, Konstruktion, Arbeitsvorbereitung		
Gebäudestruktur			
		Wert	
Tageslichtquotient (D)	min: 2%	mittel: 4%	max: 10%
Fensterfaktor (KF)	KF > 0,1		
Sichtbeziehung nach außen	mindestens 10% der Außenwandfläche müssen transparent sein		
Qualität Innenausbau (1-5)	3		
Architektur			
Geometrie	Einheit	Wert	Erläuterungen
Raumhöhe	U-Wert in W/(m ² K)	0,20	
8 bis 50 m ² Raumfläche	U-Wert in W/(m ² K)	0,35	

ID-Card		Bauphysik	
Nutzungszeiten	Einheit	Wert	Erläuterungen
Qualität Innenausbau (1-5)			KF > 0,1
Geometrie	Einheit	Wert	Erläuterungen
Raumhöhe	m	> 2,50	
50 m ² bis 100 m ² Raumfläche	m	> 2,75	
100 - 2000 m ² Raumfläche	m	> 3,00	Luftraum (LR)
mehr als 2000 m ² Raumfläche	m	> 3,25	
Fläche	Anteil in % an A _{ges}	24	
minimales Raummolumen	m ³	125	pro Mitarbeiter
Geschosse	Anzahl	1	
Raumkonditionierung			
Raum-Solltemperatur Heizung	°C	17,00	Erläuterungen
Raum-Solltemperatur natürliche Lüftung	°C	26,00	gem. AbsätRL
Minimaltemperatur Auslegung Heizung	°C	15,00	
Lüftung	°C	30,00	
Temperaturabsenkung reduzierter Betrieb	K	4,00	
Mindestaußenluftvolumenstrom			
	Einheit	Wert	Erläuterungen
Mindestaußenluftvolumenstrom	l/h	0,60	liegt. kann Wert höher als 0,6 sein.
Wärmeeinträge			
Maximale Belegungsdichte	m ² je Person	ca. 20	Erläuterungen
Wärmeenergieeintrag durch Personen (190W/Person)	W/m ²	ca. 12	
Wärmeenergieeintrag durch Anlagen, Transponthilfsmittel etc.	W/m ²	300	
Wärmeenergiezufluhr je Tag	Wh/(m ² ·d)	-	
Beleuchtung			
Wartungswert der Beleuchtungsstärke	lx	500	Erläuterungen
Bauteile ²	Einheit	Wert	Erläuterungen
Dach	U-Wert in W/(m ² K)	0,20	
Außenwand	U-Wert in W/(m ² K)	0,35	
Unterer Gebäudeabschluss	U-Wert in W/(m ² K)	0,35	
Innenwand opak	U-Wert in W/(m ² K)	2,50	

¹ Nutzungsrandbedingungen in Anlehnung an DIN V 18599-10
² Bauteilqualität in Anlehnung an Anforderungen für Nachstrichgebäude nach EREY 09

ID-Card		Montage		Wert		Erläuterungen	
Nutzungszeiten				Einheit	Wert	Erläuterungen	
Jährliche durchschnittliche Nutzungszeit (von xx:xx Uhr bis xx:xx Uhr)				Uhrzeit	07:00 Uhr bis 16:00 Uhr		
Anzahl jährliche Nutzungstage				d/a	250		
Jährliche Nutzungsstunden zur Tagzeit (Intervall: 06:00 Uhr bis 22:00 Uhr)				h/a	2192		
Jährliche Nutzungsstunden zur Nachtzeit (Intervall: 22:00 Uhr bis 06:00 Uhr)				h/a	58		
Tägliche Betriebszeit der Raumlufttechnik (RLT) und Kühlung (von xx:xx Uhr bis xx:xx Uhr)				Uhrzeit	05:00 Uhr bis 16:00 Uhr		
Tägliche Betriebszeit der Heizung (von xx:xx Uhr bis xx:xx Uhr)				Uhrzeit	05:00 Uhr bis 16:00 Uhr		
Jährliche durchschnittliche Betriebsstage jeweils für				-	-		
RLT				d/a	250		
Heizung				d/a	250		
Kühlung				d/a	250		
Ablauftechnische und organisatorische Anforderungen und Charakteristika				Beschreibung			
Modulbeschreibung				mittlerer bis hoher Anteil der Wertschöpfung durch personelle Kapazitäten, niedriger bis mittlerer Anteil durch automatisierte Betriebsmittel			
Prozesse incl. Beispiel				Fügen, Transportieren, Handhaben, Kontrollieren (Qualitätssicherung etc.)			
organisatorische Anforderungen				Flussgerechte Materialbewegung, geringe Montagedurchlaufzeit, hohe Transparenz der Montageaufgaben, hohe Auslastung der Montagesysteme			
idealtypische Position in der Prozesskette				nach Fertigung			
Gebäudestruktur				Wert			
Tageslichtquotient (D)				min.: 2%	mittel: 4%	max.: 10%	
Fensterfaktor (KF)				KF > 0,1			
Sichtbeziehung nach außen				mindestens 10% der Außenwandfläche müssen transparent sein			
Qualität Innenausbau (1-5)				3			
Geometrie				Einheit			
Raumhöhe				Wert			
8 bis 50 m ² Raumfläche				Wert			
8 bis 50 m ² Raumfläche				m			
50 m ² bis 100 m ² Raumfläche				m			
100 - 2000 m ² Raumfläche				m			
mehr als 2000 m ² Raumfläche				m			
Fläche				Anteil in % an A _{ges}			
minimales Raumvolumen				m ³			
Geschosse				Anzahl			
				1			
Raumkonditionierung				Einheit			
Raum-Solltemperatur Heizung				°C			
				Wert			
				17,00			
Raum-Sottemperatur natürliche Lüftung				°C			
				Wert			
				26,00			
				germ. ArbSätRL			
Minimaltemperatur Auslegung Heizung				°C			
				Wert			
				15,00			
Lüftung				°C			
				Wert			
				30,00			
Temperaturabsenkung reduzierter Betrieb				K			
				Wert			
				4,00			
Mindestaußenluftvolumenstrom				Einheit			
				Wert			
				Erläuterungen			
				solem Zone an Außenwand			
				0,60			
				Wert höher als 0,6 sein.			
Wärmeinträge				Einheit			
				Wert			
				Erläuterungen			
Maximale Belegungsdichte				m ² je Person			
				Wert			
				ca. 20			
Wärmeenergieeintrag durch Personen (190W/Person)				W/m ²			
				Wert			
				ca. 12			
Wärmeenergieeintrag durch Anlagen, Transporthilfsmittel etc.				W/m ²			
				Wert			
				35			
Wärmeenergiezufuhr je Tag				Wh/(m ² d)			
				Wert			
				-			
Beleuchtung				Einheit			
				Wert			
				Erläuterungen			
Wartungswert der Beleuchtungsstärke				lx			
				Wert			
				500			
Bauteile ²				Einheit			
				Wert			
				Erläuterungen			
Dach				U-Wert in W/(m ² K)			
				Wert			
				0,20			
Außenwand				U-Wert in W/(m ² K)			
				Wert			
				0,35			
Unterer Gebäudeabschluss				U-Wert in W/(m ² K)			
				Wert			
				0,35			
Innenwand opak				U-Wert in W/(m ² K)			
				Wert			
				2,50			

Abbildung 65: ID-Card des Bereichs "Montage"

ID-Card		Montage		Wert		Erläuterungen	
Nutzungszeiten				Einheit	Wert	Erläuterungen	
Jährliche durchschnittliche Nutzungszeit (von xx:xx Uhr bis xx:xx Uhr)				Uhrzeit	07:00 Uhr bis 16:00 Uhr		
Anzahl jährliche Nutzungstage				d/a	250		
Jährliche Nutzungsstunden zur Tagzeit (Intervall: 06:00 Uhr bis 22:00 Uhr)				h/a	2192		
Jährliche Nutzungsstunden zur Nachtzeit (Intervall: 22:00 Uhr bis 06:00 Uhr)				h/a	58		
Tägliche Betriebszeit der Raumlufttechnik (RLT) und Kühlung (von xx:xx Uhr bis xx:xx Uhr)				Uhrzeit	05:00 Uhr bis 16:00 Uhr		
Tägliche Betriebszeit der Heizung (von xx:xx Uhr bis xx:xx Uhr)				Uhrzeit	05:00 Uhr bis 16:00 Uhr		
Jährliche durchschnittliche Betriebsstage jeweils für				-	-		
RLT				d/a	250		
Heizung				d/a	250		
Kühlung				d/a	250		
Ablauftechnische und organisatorische Anforderungen und Charakteristika				Beschreibung			
Modulbeschreibung				mittlerer bis hoher Anteil der Wertschöpfung durch personelle Kapazitäten, niedriger bis mittlerer Anteil durch automatisierte Betriebsmittel			
Prozesse incl. Beispiel				Fügen, Transportieren, Handhaben, Kontrollieren (Qualitätssicherung etc.)			
organisatorische Anforderungen				Flussgerechte Materialbewegung, geringe Montagedurchlaufzeit, hohe Transparenz der Montageaufgaben, hohe Auslastung der Montagesysteme			
idealtypische Position in der Prozesskette				nach Fertigung			
Gebäudestruktur				Wert			
Tageslichtquotient (D)				min.: 2%	mittel: 4%	max.: 10%	
Fensterfaktor (KF)				KF > 0,1			
Sichtbeziehung nach außen				mindestens 10% der Außenwandfläche müssen transparent sein			
Qualität Innenausbau (1-5)				3			
Geometrie				Einheit			
Raumhöhe				Wert			
8 bis 50 m ² Raumfläche				Wert			
8 bis 50 m ² Raumfläche				m			
50 m ² bis 100 m ² Raumfläche				m			
100 - 2000 m ² Raumfläche				m			
mehr als 2000 m ² Raumfläche				m			
Fläche				Anteil in % an A _{ges}			
minimales Raumvolumen				m ³			
Geschosse				Anzahl			
				1			
Raumkonditionierung				Einheit			
Raum-Solltemperatur Heizung				°C			
				Wert			
				17,00			
Raum-Sottemperatur natürliche Lüftung				°C			
				Wert			
				26,00			
				germ. ArbSätRL			
Minimaltemperatur Auslegung Heizung				°C			
				Wert			
				15,00			
Lüftung				°C			
				Wert			
				30,00			
Temperaturabsenkung reduzierter Betrieb				K			
				Wert			
				4,00			
Mindestaußenluftvolumenstrom				Einheit			
				Wert			
				Erläuterungen			
				solem Zone an Außenwand			
				0,60			
				Wert höher als 0,6 sein.			
Wärmeinträge				Einheit			
				Wert			
				Erläuterungen			
Maximale Belegungsdichte				m ² je Person			
				Wert			
				ca. 20			
Wärmeenergieeintrag durch Personen (190W/Person)				W/m ²			
				Wert			
				ca. 12			
Wärmeenergieeintrag durch Anlagen, Transporthilfsmittel etc.				W/m ²			
				Wert			
				35			
Wärmeenergiezufuhr je Tag				Wh/(m ² d)			
				Wert			
				-			
Beleuchtung				Einheit			
				Wert			
				Erläuterungen			
Wartungswert der Beleuchtungsstärke				lx			
				Wert			
				500			
Bauteile ²				Einheit			
				Wert			
				Erläuterungen			
Dach				U-Wert in W/(m ² K)			
				Wert			
				0,20			
Außenwand				U-Wert in W/(m ² K)			
				Wert			
				0,35			
Unterer Gebäudeabschluss				U-Wert in W/(m ² K)			
				Wert			
				0,35			
Innenwand opak				U-Wert in W/(m ² K)			
				Wert			
				2,50			

¹ Nutzungsanforderungen in Abhängigkeit an DIN V 18599-10
² Bauteilqualität in Abhängigkeit an Anforderungen für Nichttraggebäude nach EN 12975

ID-Card			
Lager in der Produktion			
Nutzungszeiten	Einheit	Wert	Erläuterungen
Jährliche durchschnittliche Nutzungszeit (von xx:xx Uhr bis xx:xx Uhr)	Uhrzeit	00:00 Uhr bis 24:00 Uhr	
Anzahl jährliche Nutzungstage	d/a	365	
Jährliche Nutzungsstunden zur Tagzeit (Intervall: 06:00 Uhr bis 22:00 Uhr)	h/a	4407	
Jährliche Nutzungsstunden zur Nachtzeit (Intervall: 22:00 Uhr bis 06:00 Uhr)	h/a	4353	
Tägliche Betriebszeit der Raumlufttechnik (RLT) und Kühlung (von xx:xx Uhr bis xx:xx Uhr)	Uhrzeit	00:00 Uhr bis 24:00 Uhr	
Tägliche Betriebszeit der Heizung (von xx:xx Uhr bis xx:xx Uhr)	Uhrzeit	00:00 Uhr bis 24:00 Uhr	
Jährliche durchschnittliche Betriebsstage jeweils für	-	-	
RLT	d/a	365	
Heizung	d/a	365	
Kühlung	d/a	365	
Ablauftechnische und organisatorische Anforderungen und Charakteristika			
Beschreibung			
Modulbeschreibung	Modul zum lagern und puffern von Anteilen, Entkopplung von produktiven Bereichen; wenig Personal und Betriebsmittel im Modul		
Prozesse incl. Beispiel	Lagerung, Pufferung		
organisatorische Anforderungen	sichere Versorgung aller produktiven Bereiche		
idealtypische Position in der Prozesskette	beliebig		
Gebäudestruktur			
Wert			
Tageslichtquotient (D)	min: 2%	mittel: 4%	max: 10%
Fensterfaktor (KF)	KF > 0,1		
Sichtbeziehung nach außen	mindestens 10% der Außenwandfläche müssen transparent sein		
Qualität Innenausbau (1-5)	2		
Architektur			
Geometrie	Einheit	Wert	Erläuterungen
Raumhöhe	U-Wert in W/(m²K)	0,20	
Handregallager einstückig	U-Wert in W/(m²K)	0,35	
	U-Wert in W/(m²K)	0,35	
	U-Wert in W/(m²K)	2,50	

Abbildung 66: ID-Card des Bereichs "Lager in der Produktion"

Architektur			
Qualität Innenausbau (1-5) KF > 0,1 mindestens 10% der Außenwandfläche müssen transparent sein			
Geometrie	Einheit	Wert	Erläuterungen
Raumhöhe	m	> 3	
Handregallager einstückig (zweistöckig)	m	> 6	
Palettenlager mit Stapelbetrieb	m	> 9	Luftraum (LR)
Hochregallager mit Hochregaltapler	m	> 25	
Hochregallager mit Stapelkran	m		
Fläche	Anteil in % an A _{ges}	32	
minimales Raummolumen	m³	-	keine Vorgabe
Geschosse	Anzahl	1	
Raumkonditionierung			
Raum-Solltemperatur Heizung	Einheit	Wert	Erläuterungen
Raum-Solltemperatur natürliche Lüftung	°C	12,00	
Raum-Solltemperatur natürliche Lüftung	°C	26,00	gem. AbsätRL
Minimaltemperatur Auslegung Heizung	°C	12,00	
Lüftung	°C	28,00	
Temperaturabsenkung reduzierter Betrieb	K	0,00	
Mindestaußenluftvolumenstrom			
Einheit	Wert	Erläuterungen	
Mindestaußenluftvolumenstrom	l/h	0,60	liegt. kann Wert höher als 0,6 sein.
Wärmeinträge			
Einheit	Wert	Erläuterungen	
Maximale Belegungsdichte	m² je Person	-	
Wärmeenergieeintrag durch Personen (190W/Person)	W/m²	-	
Wärmeenergieeintrag durch Anlagen, Transporthilfsmittel etc.	W/m²	-	
Wärmeenergiezufuhr je Tag	Wh/(m²·d)	-	
Beleuchtung			
Einheit	Wert	Erläuterungen	
Wartungswert der Beleuchtungsstärke	lx	100	
Bauteile ²			
Einheit	Wert	Erläuterungen	
Dach	U-Wert in W/(m²K)	0,20	
Außenwand	U-Wert in W/(m²K)	0,35	
Unterer Gebäudeabschluss	U-Wert in W/(m²K)	0,35	
Innenwand opak	U-Wert in W/(m²K)	2,50	

¹: Nutzungsrandbedingungen in Anlehnung an DIN V 18599-10
²: Bauteilqualität in Anlehnung an Anforderungen für Mehrwohngebäude nach ENEC/09

ID-Card		Wareneingangslager	
Nutzungszeiten	Einheit	Wert	Erläuterungen
Jährliche durchschnittliche Nutzungszeit (von xx:xx Uhr bis xx:xx Uhr)	Uhrzeit	00:00 Uhr bis 24:00 Uhr	
Anzahl jährliche Nutzungstage	d/a	365	
Jährliche Nutzungsstunden zur Tagzeit (Intervall: 06:00 Uhr bis 22:00 Uhr)	h/a	4407	
Jährliche Nutzungsstunden zur Nachtzeit (Intervall: 22:00 Uhr bis 06:00 Uhr)	h/a	4353	
Tägliche Betriebszeit der Raumlufttechnik (RLT) und Kühlung (von xx:xx Uhr bis xx:xx Uhr)	Uhrzeit	00:00 Uhr bis 24:00 Uhr	
Tägliche Betriebszeit der Heizung (von xx:xx Uhr bis xx:xx Uhr)	Uhrzeit	00:00 Uhr bis 24:00 Uhr	
Jährliche durchschnittliche Betriebsstage jeweils für	-	-	
RLT	d/a	365	
Heizung	d/a	365	
Kühlung	d/a	365	
Ablauftechnische und organisatorische Anforderungen und Charakteristika			
Beschreibung			
Modulbeschreibung	Modul zum Lagern und puffern von Artikeln, Entkopplung von Lieferanten; wenig Personal und Betriebsmittel im Modul		
Prozesse incl. Beispiel	Lagerung, Pufferung, Warenannahme		
organisatorische Anforderungen	sichere Versorgung der nachgelagerten Bereiche		
idealtypische Position in der Prozesskette	am Anfang der Prozesskette für physische Prozesse		
Gebäudestruktur			
Wert			
Tageslichtquotient (D)	min: 2%	mittel: 4%	max: 10%
Fensterfaktor (KF)	KF > 0,1		
Sichtbeziehung nach außen	mindestens 10% der Außenwandfläche müssen transparent sein		
Qualität Innenausbau (1-5)	2		
Architektur			
Einheit			
Geometrie	Einheit	Wert	Erläuterungen
Raumhöhe	U-Wert in W/(m²K)	0,20	
Handregallager einstückig	U-Wert in W/(m²K)	0,35	
	U-Wert in W/(m²K)	0,35	
	U-Wert in W/(m²K)	2,50	

Architektur		Bauphysik	
Qualität Innenausbau (1-5)	Einheit	Wert	Erläuterungen
Geometrie	Einheit	Wert	Erläuterungen
Raumhöhe	m	> 3	
Handregallager einstückig (zweistöckig)	m	> 6	
Palettenlager mit Stapelbetrieb	m	> 9	Luftraum (LR)
Hochregallager mit Hochregaltapler	m	>25	
Hochregallager mit Stapelkran	Anteil in % an A _{ges}	32	
Fläche	m³	-	keine Vorgabe
minimales Raummolumen	Anzahl	1	
Geschosse			
Raumkonditionierung			
Einheit			
Wert			
Raum-Solltemperatur Heizung	°C	12,00	Erläuterungen
Raum-Solltemperatur natürliche Lüftung	°C	26,00	gem. AbSätRL
Minimaltemperatur Auslegung Heizung	°C	12,00	
Lüftung	°C	28,00	
Temperaturabsenkung reduzierter Betrieb	K	0,00	
Mindestaußenluftvolumenstrom			
Einheit			
Wert			
Erläuterungen			
Mindestaußenluftvolumenstrom	l/h	0,60	liegt, kann Wert höher als 0,6 sein.
Wärmeinträge			
Einheit			
Wert			
Erläuterungen			
Maximale Belegungsdichte	m² je Person	-	
Wärmeenergieeintrag durch Personen (190W/Person)	W/m²	-	
Wärmeenergieeintrag durch Anlagen, Transponthilfsmittel etc.	W/m²	-	
Wärmeenergiezufuhr je Tag	Wh/(m²·d)	-	
Beleuchtung			
Einheit			
Wert			
Erläuterungen			
Wartungswert der Beleuchtungsstärke	lx	100	
Bauteile²			
Einheit			
Wert			
Dach	U-Wert in W/(m²K)	0,20	
Außenwand	U-Wert in W/(m²K)	0,35	
Unterer Gebäudeabschluss	U-Wert in W/(m²K)	0,35	
Innenwand opak	U-Wert in W/(m²K)	2,50	

¹: Nutzungsrandbedingungen in Anlehnung an DIN V 18599-10
²: Bauteilqualität in Anlehnung an Anforderungen für Mehrwohngebäude nach EnEV/09

Abbildung 67: ID-Card des Bereichs "Wareneingangslager"

Abbildung 68: ID-Card des Bereichs "Warenausgangslager"

ID-Card		Warenausgangslager	
Nutzungszeiten	Einheit	Wert	Erläuterungen
Jährliche durchschnittliche Nutzungszeit (von xx:xx Uhr bis xx:xx Uhr)	Uhrzeit	00:00 Uhr bis 24:00 Uhr	
Anzahl jährliche Nutzungstage	d/a	365	
Jährliche Nutzungsstunden zur Tagzeit (Intervall: 06:00 Uhr bis 22:00 Uhr)	h/a	4407	
Jährliche Nutzungsstunden zur Nachtzeit (Intervall: 22:00 Uhr bis 06:00 Uhr)	h/a	4353	
Tägliche Betriebszeit der Raumlufttechnik (RLT) und Kühlung (von xx:xx Uhr bis xx:xx Uhr)	Uhrzeit	00:00 Uhr bis 24:00 Uhr	
Tägliche Betriebszeit der Heizung (von xx:xx Uhr bis xx:xx Uhr)	Uhrzeit	00:00 Uhr bis 24:00 Uhr	
Jährliche durchschnittliche Betriebsstage jeweils für	-	-	-
RLT	d/a	365	
Heizung	d/a	365	
Kühlung	d/a	365	
Allgemeine Nutzungsrandbedingungen¹			
Ablauftechnische und organisatorische Anforderungen und Charakteristika			
Beschreibung			
Modulbeschreibung	Modul zum lagern und puffern von Artikeln, Entkopplung von Kunden, wenig Personal und Betriebsmittel im Modul		
Prozesse incl. Beispiel	Lagerung, Pufferung, Kommissionierung, Warenausgang		
organisatorische Anforderungen	sichere Versorgung der Kunden		
idealtypische Position in der Prozesskette	am Ende der Prozesskette für physische Prozesse		
Gebäudestruktur			
		Wert	
Tageslichtquotient (D)	min: 2%	mittel: 4%	max: 10%
Fensterfaktor (KF)	KF > 0,1		
Sichtbeziehung nach außen	mindestens 10% der Außenwandfläche müssen transparent sein		
Qualität Innenausbau (1-5)	2		
Geometrie	Einheit		
Raumhöhe	Wert		
Handregallager einstückig	Wert		

Architektur		Bauphysik	
Geometrie	Einheit	Wert	Erläuterungen
Qualität Innenausbau (1-5) ¹ KF > 0,1			
mindestens 10% der Außenwandfläche müssen transparent sein			
Raumhöhe	m	> 3	
Palettenlager mit Staplerbetrieb	m	> 6	
Hochregallager mit Hochregalstapler	m	> 9	Luft Raum (LR)
Hochregallager mit Stapelkran	m	> 25	
Fläche	Anteil in % an A _{ges}	32	
minimales Raummolumen	m³	-	keine Vorgabe
Geschosse	Anzahl	1	
Raumkonditionierung			
Raum-Solltemperatur Heizung	°C	12,00	Erläuterungen
Raum-Sottemperatur natürliche Lüftung	°C	26,00	gem. ArbSätRL
Minimaltemperatur Auslegung Heizung	°C	12,00	
Lüftung	°C	28,00	
Temperaturabsenkung reduzierter Betrieb	K	0,00	
Mindestaußenluftvolumenstrom			
	Einheit	Wert	Erläuterungen
Mindestaußenluftvolumenstrom	l/h	0,60	Außenwand liegt, kann Wert höher als 0,6 sein.
Wärmeeinträge			
Maximale Belegungsdichte	m² je Person	Wert	Erläuterungen
Wärmeenergieeintrag durch Personen (190W/Person)	W/m²	-	
Wärmeenergieeintrag durch Anlagen, Transporthilfsmittel etc.	W/m²	-	
Wärmeenergiezufuhr je Tag	Wh/(m²*d)	-	
Beleuchtung			
Wartungswert der Beleuchtungsstärke	lx	Wert	Erläuterungen
Baufeile ²	Einheit	Wert	Erläuterungen
Dach	U-Wert in W/(m²K)	0,20	
Außenwand	U-Wert in W/(m²K)	0,35	
Unterer Gebäudeabschluss	U-Wert in W/(m²K)	0,35	
Innenwand opak	U-Wert in W/(m²K)	2,50	

¹: Nutzungsrandbedingungen in Anlehnung an DIN V 18599-10
²: Bauteilqualität in Anlehnung an Anforderungen für Nichtwohngebäude nach EIBV/09

Abbildung 69: ID-Card des Bereichs "Büro- und Sozialräume"

ID-Card		Büro- & Sozialräume	
Nutzungszeiten	Einheit	Wert	Erläuterungen
Jährliche durchschnittliche Nutzungszeit (von xx:xx Uhr bis xx:xx Uhr)	Uhrzeit	07:00 Uhr bis 18:00 Uhr	
Anzahl jährliche Nutzungstage	d/a	250	
Jährliche Nutzungsstunden zur Tagzeit (Intervall: 06:00 Uhr bis 22:00 Uhr)	h/a	2543	
Jährliche Nutzungsstunden zur Nachtzeit (Intervall: 22:00 Uhr bis 06:00 Uhr)	h/a	207	
Tägliche Betriebszeit der Raumlufttechnik (RLT) und Kühlung (von xx:xx Uhr bis xx:xx Uhr)	Uhrzeit	05:00 Uhr bis 18:00 Uhr	
Tägliche Betriebszeit der Heizung (von xx:xx Uhr bis xx:xx Uhr)	Uhrzeit	05:00 Uhr bis 18:00 Uhr	
Jährliche durchschnittliche Betriebsstage jeweils für	-	-	
RLT	d/a	250	
Heizung	d/a	250	
Kühlung	d/a	250	
Ablauftechnische und organisatorische Anforderungen und Charakteristika			
Beschreibung			
Modulbeschreibung	hoher Anteil an Personen und EDV-Hilfsmitteln; geringe Frequentierung im Falle von Umkleiden		
Prozesse incl. Beispiel	Informations- und Wissensgenerierung, -verarbeitung und -weitergabe, verwaltende Aufgaben, Einkleiden von Personal		
organisatorische Anforderungen	keine besonderen Anforderungen		
idealtypische Position in der Prozesskette	vor der Fertigung und innerhalb der gesamten Prozesskette		
Gebäudestruktur			
Wert			
Tageslichtquotient (D)	min: 2%	mittel: 4%	max: 10%
Fensterfaktor (KF)	KF > 0,1		
Sichtbeziehung nach außen	mindestens 10% der Außenwandfläche müssen transparent sein		
Qualität Innenausbau (1-5)	4		
Architektur			
Geometrie	Einheit	Wert	Erläuterungen
Raumhöhe	U-Wert in W/(m²K)	0,20	
13 bis 50 m² Raumfläche	U-Wert in W/(m²K)	0,35	

ID-Card		Büro- & Sozialräume	
Nutzungszeiten	Einheit	Wert	Erläuterungen
Jährliche durchschnittliche Nutzungszeit (von xx:xx Uhr bis xx:xx Uhr)	Uhrzeit	07:00 Uhr bis 18:00 Uhr	
Anzahl jährliche Nutzungstage	d/a	250	
Jährliche Nutzungsstunden zur Tagzeit (Intervall: 06:00 Uhr bis 22:00 Uhr)	h/a	2543	
Jährliche Nutzungsstunden zur Nachtzeit (Intervall: 22:00 Uhr bis 06:00 Uhr)	h/a	207	
Tägliche Betriebszeit der Raumlufttechnik (RLT) und Kühlung (von xx:xx Uhr bis xx:xx Uhr)	Uhrzeit	05:00 Uhr bis 18:00 Uhr	
Tägliche Betriebszeit der Heizung (von xx:xx Uhr bis xx:xx Uhr)	Uhrzeit	05:00 Uhr bis 18:00 Uhr	
Jährliche durchschnittliche Betriebsstage jeweils für	-	-	
RLT	d/a	250	
Heizung	d/a	250	
Kühlung	d/a	250	
Ablauftechnische und organisatorische Anforderungen und Charakteristika			
Beschreibung			
Modulbeschreibung	hoher Anteil an Personen und EDV-Hilfsmitteln; geringe Frequentierung im Falle von Umkleiden		
Prozesse incl. Beispiel	Informations- und Wissensgenerierung, -verarbeitung und -weitergabe, verwaltende Aufgaben, Einkleiden von Personal		
organisatorische Anforderungen	keine besonderen Anforderungen		
idealtypische Position in der Prozesskette	vor der Fertigung und innerhalb der gesamten Prozesskette		
Gebäudestruktur			
Wert			
Tageslichtquotient (D)	min: 2%	mittel: 4%	max: 10%
Fensterfaktor (KF)	KF > 0,1		
Sichtbeziehung nach außen	mindestens 10% der Außenwandfläche müssen transparent sein		
Qualität Innenausbau (1-5)	4		
Architektur			
Geometrie	Einheit	Wert	Erläuterungen
Raumhöhe	U-Wert in W/(m²K)	0,20	
13 bis 50 m² Raumfläche	U-Wert in W/(m²K)	0,35	
50 m² bis 100 m² Raumfläche	U-Wert in W/(m²K)	0,35	
100 - 2000 m² Raumfläche	U-Wert in W/(m²K)	0,35	
mehr als 2000 m² Raumfläche	U-Wert in W/(m²K)	0,35	
Fläche	Anteil in % an A _{ges}	16	
minimales Raummolumen	m³	32,5	pro Mitarbeiter
Geschosse	Anzahl	1	
Raumkonditionierung			
Wert			
Raum-Solltemperatur Heizung	°C	21,00	Erläuterungen
Raum-Solltemperatur natürliche Lüftung	°C	24,00	
Minimaltemperatur Auslegung Heizung	°C	20,00	
Lüftung	°C	26,00	
Temperaturabsenkung reduzierter Betrieb	K	4,00	
Mindestaußenluftvolumenstrom			
Wert			
Mindestaußenluftvolumenstrom	l/h	0,60	Außenwand liegt, kann Wert höher als 0,6 sein.
Wärmeinträge			
Wert			
Maximale Belegungsdichte	m² je Person	ca. 14	Erläuterungen
Wärmeenergieeintrag durch Personen (190W/Person)	W/m²	ca. 10	
Wärmeenergieeintrag durch Anlagen, Transponthilfsmittel etc.	W/m²	ca. 10	
Wärmeenergiezufluhr je Tag	Wh/(m²·d)	-	
Beleuchtung			
Wert			
Wartungswert der Beleuchtungsstärke	lx	500	Erläuterungen
Bauteile ²			
Wert			
Dach	U-Wert in W/(m²K)	0,20	Erläuterungen
Außenwand	U-Wert in W/(m²K)	0,35	
Unterer Gebäudeabschluss	U-Wert in W/(m²K)	0,35	
Innenwand opak	U-Wert in W/(m²K)	2,50	

¹: Nutzungsrandbedingungen in Anlehnung an DIN V 18599-10
²: Bauteilqualität in Anlehnung an Anforderungen für Nichtwohngebäude nach EnEV '09

Abbildung 70: ID-Card des Bereichs "Technik"

ID-Card		Technik	
Nutzungszeiten			
Jährliche durchschnittliche Nutzungszeit (von xx:xx Uhr bis xx:xx Uhr)	Einheit	Wert	Erläuterungen
Anzahl jährliche Nutzungstage	d/a	250	
Jährliche Nutzungsstunden zur Tagzeit (Intervall: 06:00 Uhr bis 22:00 Uhr)	h/a	2192	
Jährliche Nutzungsstunden zur Nachtzeit (Intervall: 22:00 Uhr bis 06:00 Uhr)	h/a	58	
Tägliche Betriebszeit der Raumlufttechnik (RLT) und Kühlung (von xx:xx Uhr bis xx:xx Uhr)	Uhrzeit	05:00 Uhr bis 16:00 Uhr	
Tägliche Betriebszeit der Heizung (von xx:xx Uhr bis xx:xx Uhr)	Uhrzeit	05:00 Uhr bis 16:00 Uhr	
Jährliche durchschnittliche Betriebsstage jeweils für	-	-	
RLT	d/a	250	
Heizung	d/a	250	
Kühlung	d/a	250	
Ablauftechnische und organisatorische Anforderungen und Charakteristika			
Beschreibung			
Modulbeschreibung	Geschlossener Raum, geringer personeller Einsatz (nur temporär)		
Prozesse incl. Beispiel	Aufbereitung von Medien, Versorgung der Informationssysteme (z. B. Server), Haustechnik		
organisatorische Anforderungen	sichere Versorgung, räumlich relativ nah zu energieintensiven Prozessen		
idealtypische Position in der Prozesskette	-		
Gebäudestruktur			
Tageslichtquotient (D)		Wert	
Fensterfaktor (KF)		0%	
Sichtbeziehung nach außen			
Qualität Innenausbau (1-5)		1	
Geometrie			
Raumhöhe	Einheit	Wert	Erläuterungen
bis 5000 m ³ /h Volumenstrom			

ID-Card		Bauphysik ¹	
Sichtbeziehung nach außen ist nicht erforderlich			
Qualität Innenausbau (1-5)			
KF = 0		1	
Geometrie			
Raumhöhe	Einheit	Wert	Erläuterungen
bis 5000 m ³ /h Volumenstrom	m	> 2,50	
bis 10000 m ³ /h Volumenstrom	m	> 2,50	
bis 15000 m ³ /h Volumenstrom	m	> 3,00	Luftraum (LR)
bis 20000 m ³ /h Volumenstrom	m	> 4,00	
Fläche	Anteil in % an A _{ges}	4	
minimales Raummolumen	m ³	-	keine Vorgabe
Geschosse	Anzahl	1	
Raumkonditionierung			
Raum-Solltemperatur Heizung	Einheit	Wert	Erläuterungen
Raum-Solltemperatur natürliche Lüftung	°C	17,00	
Raum-Solltemperatur natürliche Lüftung	°C	26,00	
Minimaltemperatur Auslegung Heizung	°C	15,00	
Lüftung	°C	28,00	
Temperaturabsenkung reduzierter Betrieb	K	4,00	
Mindestaußenluftvolumenstrom			
Einheit	Wert	Erläuterungen	
1/h	0,60	Außenwand liegt, kann Wert höher als 0,6 sein.	
Wärmeinträge			
Einheit	Wert	Erläuterungen	
m ² je Person	-		
Wärmeenergieeintrag durch Personen (190W/Person)	W/m ²	-	
Wärmeenergieeintrag durch Anlagen, Transporthilfsmittel etc.	W/m ²	ca. 10	
Wärmeenergiezufluhr je Tag	Wh/(m ² ·d)	-	
Beleuchtung			
Einheit	Wert	Erläuterungen	
lx	100		
Wartungswert der Beleuchtungsstärke			
Einheit	Wert	Erläuterungen	
lx	100		
Bauteile²			
Einheit	Wert	Erläuterungen	
U-Wert in W/(m ² K)	0,20		
U-Wert in W/(m ² K)	0,35		
U-Wert in W/(m ² K)	0,35		
U-Wert in W/(m ² K)	2,50		

¹ Nutzungsbedingungen in Anlehnung an DIN V 18599-10
² Bauteilqualität in Anlehnung an Anforderungen für Nichtwohngebäude nach EnEV/09