

Masterarbeit

Twin Transition in Bauindustrie

Verfasser: Hossein Salehi

Matrikelnummer: 29645

Master-Studiengang: Projektmanagement

1. Betreuer: Prof. Dr. Heiko Wenzel-Schinzer

2. Betreuer: Prof. Dr. Justus Engelfried

Merseburg, den 14. Nov. 2024

Inhaltsverzeichnis

SUMMERY	V
ZUSAMMENFASSUNG	VI
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....	VII
1 EINLEITUNG	1
1.1 HINTERGRUND UND PROBLEMSTELLUNG	1
1.1.1 <i>Hintergrund</i>	1
1.1.2 <i>Problemstellung</i>	4
1.2 ZIELSETZUNG DER ARBEIT	7
1.3 FORSCHUNGSFRAGEN	8
1.3.1 <i>Hauptforschungsfrage</i>	8
1.3.2 <i>Spezifische Forschungsfragen</i>	8
1.4 METHODISCHES VORGEHEN.....	8
1.4.1 <i>Literaturrecherche</i>	8
1.4.2 <i>Entwicklung von Handlungsempfehlungen</i>	9
1.4.3 <i>Darstellung und Diskussion der Ergebnisse</i>	9
1.5 AUFBAU DER ARBEIT	9
2 GRUNDLAGEN DER TWIN TRANSITION	11
2.1 DEFINITION UND KONZEPTE DER TWIN TRANSITION.....	11
2.1.1 <i>Definition der Twin Transition</i>	11
2.1.2 <i>Konzepte der Twin Transition</i>	12
2.2 HISTORISCHE ENTWICKLUNG UND RELEVANZ DER TWIN TRANSITION	18
2.2.1 <i>Historische Entwicklung der Twin Transition</i>	18
2.2.2 <i>Relevanz der Twin Transition</i>	19
3 DIGITALISIERUNG IN DER BAUINDUSTRIE	22
3.1 EINFÜHRUNG IN DIE DIGITALE TRANSFORMATION DER BAUINDUSTRIE.....	22
3.1.1 <i>Bedeutung der digitalen Transformation in Bauindustrie</i>	22
3.1.2 <i>Treiber der digitalen Transformation in Bauindustrie</i>	23
3.1.3 <i>Aktueller Stand der Digitalisierung in Bauindustrie</i>	23
3.1.4 <i>Ziele der digitalen Transformation in Bauindustrie</i>	25
3.2 BUILDING INFORMATION MODELING (BIM)	26
3.2.1 <i>Definition und Grundlagen</i>	26
3.2.2 <i>Vorteile von BIM</i>	28
3.2.3 <i>Herausforderungen und Barrieren</i>	29
3.2.4 <i>Anwendungsbeispiele</i>	30

3.3	EINSATZ VON IOT (INTERNET OF THINGS).....	33
3.3.1	<i>Definition und Konzepte</i>	33
3.3.2	<i>Anwendungsbereiche</i>	33
3.3.3	<i>Vorteile des IoT</i>	35
3.3.4	<i>Herausforderungen</i>	35
3.4	AUTOMATISIERUNG UND ROBOTIK IM BAUWESEN	35
3.4.1	<i>Definition und Überblick</i>	35
3.4.2	<i>Anwendungsbeispiele</i>	36
3.4.3	<i>Vorteile der Automatisierung</i>	36
3.4.4	<i>Herausforderungen und Risiken</i>	37
3.5	ANWENDUNGEN VON KÜNSTLICHER INTELLIGENZ (KI).....	37
3.5.1	<i>Grundlagen der KI</i>	38
3.5.2	<i>Anwendungsfelder</i>	38
3.5.3	<i>Vorteile der KI</i>	39
3.5.4	<i>Herausforderungen</i>	40
4	NACHHALTIGKEIT IN DER BAUINDUSTRIE	42
4.1	EINFÜHRUNG IN DIE NACHHALTIGE TRANSFORMATION DER BAUINDUSTRIE	42
4.1.1	<i>Bedeutung der nachhaltigen Transformation in der Bauindustrie</i>	42
4.1.2	<i>Treiber der nachhaltigen Transformation in der Bauindustrie</i>	42
4.1.3	<i>Aktueller Stand der nachhaltigen Baupraxis</i>	43
4.1.4	<i>Ziele der nachhaltigen Transformation in der Bauindustrie</i>	43
4.2	NACHHALTIGE BAUMATERIALIEN UND TECHNIKEN	44
4.2.1	<i>Definition nachhaltiger Baumaterialien und Techniken</i>	44
4.2.2	<i>Vorteile nachhaltiger Baumaterialien und Techniken</i>	44
4.2.3	<i>Herausforderungen und Barrieren bei der Implementierung</i>	45
4.2.4	<i>Anwendungsbeispiele nachhaltiger Baumaterialien und Techniken</i>	45
4.3	ENERGIEEFFIZIENTE GEBÄUDE	45
4.3.1	<i>Definition und Bedeutung energieeffizienter Gebäude</i>	46
4.3.2	<i>Technologien und Strategien für energieeffizientes Bauen</i>	46
4.3.3	<i>Vorteile energieeffizienter Gebäude</i>	46
4.3.4	<i>Herausforderungen bei der Implementierung</i>	47
4.3.5	<i>Anwendungsbeispiele</i>	47
4.4	KREISLAUFWIRTSCHAFT IM BAUWESEN	47
4.4.1	<i>Definition und Prinzipien der Kreislaufwirtschaft</i>	48
4.4.2	<i>Vorteile der Kreislaufwirtschaft im Bauwesen</i>	48
4.4.3	<i>Herausforderungen und Barrieren bei der Umsetzung</i>	48
4.4.4	<i>Strategien und Best Practices</i>	49

4.4.5	<i>Anwendungsbeispiele</i>	49
4.5	KONZEPTE WIE NULLENERGIEHÄUSER UND PASSIVHÄUSER	50
4.5.1	<i>Definition von Nullenergiehäusern und Passivhäusern</i>	50
4.5.2	<i>Prinzipien und Funktionsweise</i>	50
4.5.3	<i>Vorteile von Nullenergiehäusern und Passivhäusern</i>	50
4.5.4	<i>Herausforderungen bei der Implementierung</i>	51
4.5.5	<i>Anwendungsbeispiele und Verbreitung</i>	51
5	SYNERGIEN ZWISCHEN DIGITALISIERUNG UND NACHHALTIGKEIT	53
5.1	DIGITALISIERUNG ZUR FÖRDERUNG DER NACHHALTIGKEIT	53
5.1.1	<i>Building Information Modeling (BIM) als Schlüsseltechnologie</i>	54
5.1.2	<i>Internet der Dinge (IoT) zur Optimierung der Ressourcennutzung</i>	54
5.1.3	<i>Künstliche Intelligenz zur Unterstützung nachhaltiger Entscheidungen</i>	55
5.1.4	<i>Digitalisierung und Kreislaufwirtschaft</i>	55
5.2	INTEGRIERTE ANSÄTZE UND FALLBEISPIELE	55
5.2.1	<i>Integrierte Ansätze für nachhaltiges Bauen</i>	56
5.2.2	<i>Fallbeispiele aus der Praxis</i>	56
5.2.3	<i>Ausblick auf integrierte Ansätze</i>	57
5.3	STRATEGIEN FÜR DIE INTEGRATION DER TWIN TRANSITION IN DER BAUINDUSTRIE	58
5.3.1	<i>Die Rolle des Change-Managements in der Bauindustrie</i>	58
5.3.2	<i>Kommunikationsstrategien für die Einführung von Digitalisierung und Nachhaltigkeit</i>	59
5.3.3	<i>Stakeholder-Management und Einbindung der Beteiligten</i>	59
5.3.4	<i>Schulung und Qualifizierung für den Einsatz digitaler und nachhaltiger Technologien</i>	61
5.3.5	<i>Widerstände gegen Veränderungen bewältigen und Unternehmenskultur anpassen</i>	61
5.3.6	<i>Implementierung von Pilotprojekten zur Twin Transition</i>	63
5.3.7	<i>Monitoring, Erfolgsmessung und kontinuierliche Verbesserung</i>	64
5.4	BEISPIELE ZUM EINBAU DER STRATEGIEN ZUR UMSETZUNG DER ANSÄTZE DER TWIN TRANSITION IN EINER ORGANISATION	65
6	REGULATORISCHE UND POLITISCHE RAHMENBEDINGUNGEN	76
6.1	NATIONALE RICHTLINIEN UND GESETZE	76
6.2	INTERNATIONALE RICHTLINIEN UND STANDARDS	77
6.3	VERGLEICH NATIONALER UND INTERNATIONALER RICHTLINIEN	79
6.4	AUSBLICK AUF ZUKÜNFTIGE REGULATORISCHE ENTWICKLUNGEN	80
6.5	DER BEITRAG DER REGULATORISCHEN RAHMENBEDINGUNGEN ZUR TWIN TRANSITION	81
7	ÖKONOMISCHE ASPEKTE DER TWIN TRANSITION	82
8	ZUKUNFTSAUSSICHTEN UND EMPFEHLUNGEN	84
8.1	ZUKUNFTSAUSSICHTEN DER TWIN TRANSITION	84

8.2	HINDERNISSE UND TREIBER DER TWIN TRANSITION.....	85
8.3	ROLLE DER INNOVATION IN DER TWIN TRANSITION.....	87
8.4	HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN FÜR DIE TWIN TRANSITION.....	87
8.5	NOTWENDIGE WEITERE FORSCHUNGEN ZUR TWIN TRANSITION IN DER BAUINDUSTRIE	89
	ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	A
	EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG	L

Summery

The construction industry faces an urgent need to rethink its traditional practices in light of global challenges such as climate change and technological advancements. This master's thesis examines the Twin Transition, which simultaneously integrates digitalization and sustainability, as a key strategy for addressing these challenges. Through an extensive literature review and theoretical analysis, the fundamental concepts of the Twin Transition are defined, and its potential to improve efficiency and sustainability in the construction industry is highlighted. Following a general overview of digitalization and sustainability, the thesis provides a detailed analysis of these topics in relation to the construction industry. Digital technologies, such as Building Information Modeling (BIM), the Internet of Things (IoT), and Artificial Intelligence (AI), as well as sustainable practices and materials, are explored. Additionally, the synergies between digitalization and sustainability, external regulatory frameworks, and the political and economic aspects of the Twin Transition are examined. Finally, practical recommendations for implementation in the industry and for policymakers are formulated to promote the adoption of the Twin Transition in the construction sector.

Keywords:

Twin Transition, construction industry, digitalization, sustainability, Building Information Modeling

Zusammenfassung

Die Bauindustrie steht vor der dringenden Notwendigkeit, ihre traditionellen Praktiken angesichts der globalen Herausforderungen wie Klimawandel und technologischem Fortschritt zu überdenken. Diese Masterarbeit untersucht die Twin Transition, die gleichzeitig Digitalisierung und Nachhaltigkeit integriert, als Schlüsselstrategie zur Bewältigung dieser Herausforderungen. Durch eine umfassende Literaturrecherche und theoretische Analyse werden die grundlegenden Konzepte der Twin Transition definiert und deren Potenzial zur Verbesserung der Effizienz und Nachhaltigkeit in der Bauindustrie aufgezeigt. Nach einer Übersicht über Digitalisierung und Nachhaltigkeit in allgemein wird in der Arbeit das Thema in Zusammenhang mit Bauindustrie detailliert analysiert. Digitale Technologien wie Building Information Modeling (BIM), das Internet der Dinge (IoT) und Künstliche Intelligenz (KI) sowie nachhaltige Praktiken und Materialien. Zudem werden die Synergien zwischen Digitalisierung und Nachhaltigkeit, die externe Rahmenbedingungen sowie die politischen und ökonomischen Aspekte der Twin Transition untersucht. Abschließend werden Handlungsempfehlungen für die Praxis und politische Entscheidungsträger formuliert, um die Implementierung der Twin Transition in der Bauindustrie zu fördern.

Stichwörter:

Twin Transition, Bauindustrie, Digitalisierung, Nachhaltigkeit, Building Information Modeling

Abkürzungsverzeichnis

BIM	Building Information Modeling
BIP	Bruttoinlandsprodukt
CaaS	Construction as a Service
CDE	Common Data Environment
GtCO ₂	Gigatonne CO ₂
HVAC	Heating, Ventilation and Air Conditioning
iBIM	Integrated BIM
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
IoT	Internet of Things
KI	Künstliche Intelligenz
KPIs	Key Performance Indicators
OKR	Objectives and Key Results
SGDs	Sustainable Development Goals

1 Einleitung

1.1 Hintergrund und Problemstellung

1.1.1 Hintergrund

Die moderne Welt steht vor tiefgreifenden Veränderungen, die durch technologische Innovationen, ökologische Herausforderungen und wirtschaftliche Dynamiken geprägt sind. Diese Entwicklungen machen die umfassende Veränderungen in Rahmen des Change-Managements in verschiedenen Branchen, einschließlich der Bauindustrie, unverzichtbar.

In der heutigen Zeit ist es unumstritten, dass sich die Welt in einem stetigen Wandel befindet und niemand diesem Prozess entkommt. Der steigende globale Wettbewerb, technologische Innovationen und die zunehmende Ressourcenknappheit erhöhen den Druck auf Unternehmen und Organisationen, sich anzupassen, um langfristig zu überleben. (Al-Sedairy, 2001)

Ein zentraler Bestandteil dieses Veränderungsprozesses in der Bauindustrie ist die sogenannte Twin Transition, also die gleichzeitige digitale und nachhaltige Transformation. Durch die Digitalisierung können Bauprozesse effizienter und transparenter gestaltet werden (Jensson, 2017), während nachhaltige Praktiken dazu beitragen, den ökologischen Fußabdruck der Branche zu minimieren (Meinhold, 2011). Angesichts des zunehmenden Drucks durch Klimawandel, Ressourcenknappheit und steigende regulatorische Anforderungen ist die Bauindustrie gezwungen, ihre traditionellen Methoden zu überdenken und innovative Ansätze zu integrieren (Stratmann and Hoeborn, 2022). Die Twin Transition bietet hierbei nicht nur eine Möglichkeit zur Bewältigung dieser Herausforderungen, sondern auch zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit und langfristigen Rentabilität. Daher ist die Implementierung von Digitalisierung und Nachhaltigkeit im Bauwesen sowohl eine technologische oder ökologische Notwendigkeit als auch ein strategischer Imperativ im Rahmen des Change-Managements, um auf die sich wandelnden globalen Bedingungen angemessen zu reagieren (Rughi, Staccioli and Virgillito, 2021).

Die Bauindustrie spielt eine zentrale Rolle in der globalen Wirtschaft, da sie grundlegende Infrastrukturen bereitstellt, die für das tägliche Leben unerlässlich sind. „Die Bauindustrie wird als Hauptantriebskraft der Wirtschaft angesehen, wobei sie ein Wachstum des BIP¹ um 5 % verzeichnet. Andere Sektoren wie Gesundheit, Bildung und Transport sind stark von der Bauindustrie abhängig. Die Bauindustrie lässt sich jedoch in drei wesentliche Bereiche unterteilen: den Hochbau, den Schwer- und Tiefbau sowie spezialisierte

¹ Bruttoinlandsprodukt, Englisch: Gross Domestic Product (GPD)

Handwerksunternehmen, die Dienstleistungen wie Tischlerei, Sanitärinstallation, Elektrik, Fliesenlegen und Malerarbeiten anbieten“ (Olanrewaju *et al.*, 2018).

„Der Energieverbrauch des globalen Gebäudesektors stieg um etwa 4 Prozent gegenüber dem Niveau von 2020, und die CO₂-Emissionen aus dem Betrieb stiegen um etwa 5 Prozent und erreichten ungefähr 10 Gigatonnen Kohlendioxid – ein Anstieg, der den Höchststand vor der Pandemie 2019 um 2 Prozent übertrifft. Dies spiegelt sowohl die Wiedereröffnung der globalen Wirtschaft als auch das Fehlen struktureller Änderungen zur Unterstützung der Dekarbonisierung des Gebäudesektors während der Pandemiezeit wider. Der Gebäude- und Bausektor ist für geschätzte 37 Prozent der globalen CO₂-Emissionen aus Betrieb und prozessbedingten Aktivitäten verantwortlich“ (UNEP, 2022).

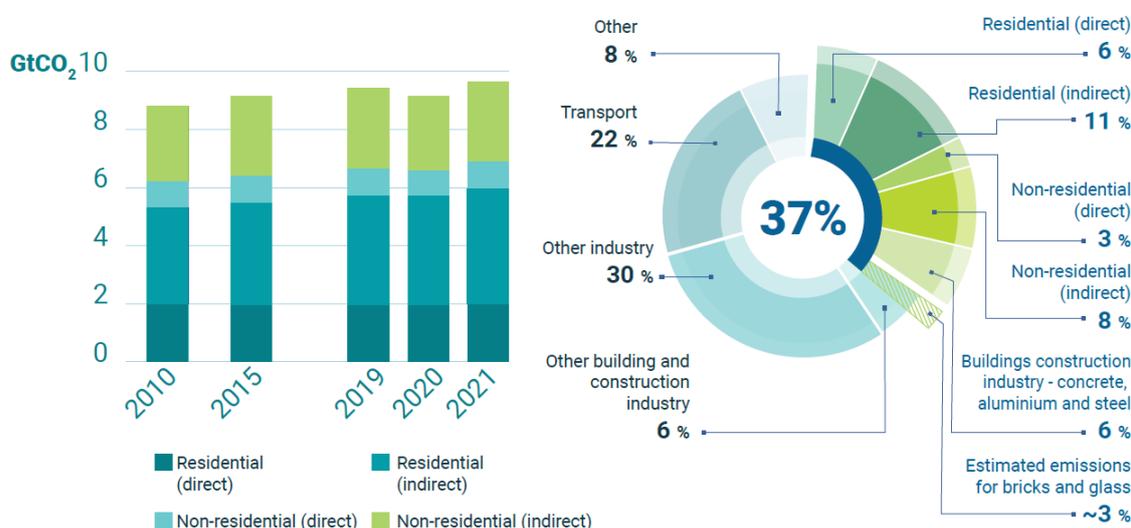


Abbildung 1: CO₂-Emissionen in Gebäuden 2010–2021 (links) und Anteil der Gebäude an den globalen Energie- und Prozessemissionen im Jahr 2021 (rechts) (UNEP, 2022)

„Der Hochbau spielt eine bedeutende Rolle in der nachhaltigen Entwicklung. Dies liegt nicht allein an seinem Beitrag zur nationalen Wirtschaft, sondern ebenso daran, dass die gebaute Umwelt einen erheblichen Einfluss auf die Lebensqualität, den Komfort, die Sicherheit und die Gesundheit hat. Bau, Instandhaltung und Modernisierung der gebauten Umwelt haben potenziell weitreichende Auswirkungen auf die Umwelt. Gebäude verbrauchen den größten Teil der nicht erneuerbaren Ressourcen und erzeugen eine erhebliche Menge an Abfall, wobei sie für die Hälfte der globalen Kohlenstoffdioxidemissionen verantwortlich sind. Die derzeitige Herausforderung im Hochbau besteht darin, wirtschaftliche Gebäude zu schaffen, die die Lebensqualität erhöhen und gleichzeitig die sozialen, wirtschaftlichen und ökologischen Auswirkungen reduzieren. Die Erreichung von Nachhaltigkeit in der Architektur und im Bauwesen wird heutzutage stärker betont. Es gibt viele theoretische Grundlagen, doch einige davon sind nicht praxisnah. Traditionelle Bauweisen weisen aufgrund

bestimmter Eigenschaften viele Aspekte der Nachhaltigkeit auf, jedoch wurde die Architektur ohne Nachhaltigkeit nach der industriellen Revolution zu einer ernsthaften Herausforderung. Technologie und ihre Errungenschaften standen im Vordergrund, und die Architektur wandelte sich von einem **Teil der Umwelt** zu etwas, das sich **von der Umwelt trennt**. Dies führte dazu, dass die Architektur die Umwelt zerstört, unwirtschaftlich wird und nicht über ausreichende Qualitäten verfügt. Daher müssen neue Lösungen vorgeschlagen werden, die es ermöglichen, von der Technologie zu profitieren und gleichzeitig die Interaktion mit der Umwelt aufrechtzuerhalten. In diesem Zusammenhang wurde der Ansatz der Nachhaltigkeit im Bau- und Architektursektor eingeführt und definiert, um diese Herausforderungen zu bewältigen“ (Zabihi, Mirsaeeedi and Habib, 2012).

„Besonders wichtig in Entwicklungsländern. Beispielsweise wird etwa 26 % des nationalen BIP in China dem Bau- und Konstruktionssektor zugeschrieben, und die Gebäudefläche wird von 2005 bis 2020 voraussichtlich um 30 Milliarden Quadratmeter zunehmen. Aus der Perspektive der Umweltauswirkungen sind Gebäude für 40 % des weltweiten Materialverbrauchs und Energieverbrauchs verantwortlich. Zement, als eines der am häufigsten verwendeten Baumaterialien ist für 5-7² % der weltweiten anthropogenen Kohlenstoffemissionen verantwortlich. Auch die Eisen- und Stahlindustrien tragen zu 6,7 % der weltweiten Kohlenstoffemissionen bei. Andererseits dürfen die sozialen Auswirkungen des Bau- und Konstruktionssektors nicht unterschätzt werden, da viele Interessengruppen, einschließlich Arbeiter, die lokale Gemeinschaft und die Gesellschaft im Allgemeinen, direkt und indirekt in die Bauindustrie eingebunden sind“ (Dong and Ng, 2016).

Technologie und gesellschaftlicher Fortschritt sind untrennbar miteinander verbunden. Die Entwicklung digitaler Technologien in der jüngeren Vergangenheit stärkte diese Verbindung nicht nur, sondern erweiterte auch das Verständnis von Fortschritt, um Wohlbefinden und Nachhaltigkeit einzuschließen. Tatsächlich transformierten digitale Innovationen Produkte und Dienstleistungen, indem sie neuartige Möglichkeiten zur Wertschöpfung boten. Die Formulierung der nachhaltigen Entwicklungsziele (SDGs³) festigte diese Wahrnehmung weiter. Jüngste Studien zeigten ebenfalls Interesse daran, den Einfluss digitaler Technologien auf die SDGs und die damit verbundene Nachhaltigkeitsagenda zu untersuchen. Dabei stellten Wissenschaftler fest, dass die Beziehung (zwischen digitalen Technologien und den nachhaltigen Entwicklungszielen (SDGs) sowie der breiteren Nachhaltigkeitsagenda) sowohl positive als auch negative Ergebnisse hervorbringen kann, was es notwendig machte, spezifische digitale Technologien auf ihre Auswirkungen in Bezug auf Nachhaltigkeitsfragen zu prüfen. Frühere Studien bezeichneten diesen durch digitale Technologien unterstützten

² 8 % der globalen CO₂-Emission im Jahr 2022 (World Economic Forum (no date).

³ Englisch: Sustainable Development Goals

Übergang hin zu einer grünen und nachhaltigen Lebensweise als **Twin Transition**. Die Twin Transition vereinte Digitalisierung und Nachhaltigkeit, was sich als besonders effektiv erwies, um inklusives Wachstum zu fördern – insbesondere nach dem Schock der COVID-19-Pandemie. Viele Autoren diskutierten darüber, wie eng Nachhaltigkeit mit der Digitalisierung verknüpft ist (Almansour, 2022).

Diese beiden Transitionen bieten erhebliche Potenziale zur Verbesserung der Effizienz und Nachhaltigkeit in der Bauindustrie. Während die digitale Transformation durch den Einsatz von Technologien wie Building Information Modeling (BIM), dem Internet der Dinge (IoT) und Künstlicher Intelligenz (KI) voranschreitet, zielt die grüne Transformation darauf ab, den ökologischen Fußabdruck der Bauindustrie zu reduzieren und nachhaltige Baupraktiken zu fördern.

1.1.2 Problemstellung

Trotz der Vorteile, die beide Transitionen bieten, steht die Bauindustrie vor erheblichen Herausforderungen. Die Implementierung digitaler Technologien ist oft mit hohen Kosten und komplexen organisatorischen Veränderungen verbunden. „Digitalisierung wurde als einer der großen Trends identifiziert, die Gesellschaft und Geschäftswelt verändern. Digitalisierung verursacht Veränderungen für Unternehmen aufgrund der Einführung digitaler Technologien in der Organisation oder im Betriebsumfeld“ (Parviainen *et al.*, 2017).

Darüber hinaus fehlen in vielen Bereichen noch standardisierte Verfahren und qualifiziertes Personal, um diese Technologien effektiv zu nutzen. es wurde festgestellt, „dass die Barrieren in drei Haupttypen unterteilt werden können: strategische, operative und personelle Barrieren. Strategische Barrieren beziehen sich auf strategische Fragestellungen, wie zum Beispiel das Marketing digitalisierter Lösungen, das notwendige Ökosystem für deren Funktionieren sowie Aspekte im Zusammenhang mit Risiken, Transparenz von Informationen und Vertrauen. Operative Barrieren umfassen die Aspekte, die mit der Implementierung digitaler Technologien in Prozesse oder Ergebnisse verbunden sind. Sie betreffen funktionale Aspekte der Digitalisierung, wie finanzielle Elemente, Datensicherheit, notwendige Ressourcen und Infrastruktur sowie die Nutzung der digitalen Technologie, neben anderen Hindernissen. Schließlich befassen sich personelle Barrieren mit der Beziehung zwischen der digitalen Technologie und deren Auswirkungen auf die Arbeitsorganisation. Diese Barrieren umfassen Schulungen, die erforderlichen Kompetenzen für die Nutzung der digitalen Technologie, die Einstellung der Mitarbeiter gegenüber der digitalen Technologie sowie die Widerstände gegen Veränderungen“ (Marcon *et al.*, 2019). „Personalressourcen betreffen hauptsächlich die erforderlichen Kompetenzen für die Digitalisierung, den menschlichen Aspekt des Arbeitsplatzersatzes durch Maschinen und Roboter und den Widerstand gegen

Veränderungen aufgrund des anhaltenden Mindsets. Diese Erkenntnis zeigt eine große Sorge von Managern und Forschern für die Aspekte im Zusammenhang mit der Beziehung der Mitarbeiter zur Digitalisierung im Prozess. Bei den operativen Barrieren wurde Finanzwesen am häufigsten genannt. Es ist auch bemerkenswert, dass strategische Barrieren nicht so wichtig sind wie die anderen Barrieren, da die erste strategische Barriere (z.B. Kurzfristige Vision) erst nach fünf Barrieren aus den anderen beiden Konstrukten erscheint. Diese Erkenntnis zeigt eine praktischere Sorge darüber, wie Digitalisierung in praktischen Begriffen umgesetzt werden kann, wie zum Beispiel finanziell, Datensicherheit, Nutzung und organisatorisch, anstatt strategisch in dieser Phase der Innovation durch Digitalisierung“ (Marcon *et al.*, 2019).

Gleichzeitig erfordert die grüne Transformation erhebliche Investitionen in neue Materialien und Technologien sowie Anpassungen an bestehende Bauprozesse. Diese Investitionen sind häufig mit wirtschaftlichen Unsicherheiten und einem Mangel an Anreizen verbunden. Die Kosten der Nachhaltigkeit umfassen verschiedene Bereiche, die mit dem Übergang zu einer kohlenstoffarmen und ressourceneffizienten Wirtschaft verbunden sind. Diese Kosten können in mehrere Kategorien unterteilt werden:

Übergangskosten zu einer nachhaltigen Wirtschaft:

- Diese umfassen die Kosten für die Dekarbonisierung (Reduzierung von CO₂-Emissionen), Entgiftung (Verringerung von Schadstoffemissionen) und Dematerialisierung (Reduzierung des Ressourcenverbrauchs).
- Der Übergang erfordert zudem eine Umgestaltung der Infrastruktur und Verhaltensweisen, um den Anforderungen einer nachhaltigen Wirtschaft gerecht zu werden.

Umweltkosten:

- Die Kosten für den Umweltschutz umfassen Maßnahmen zur Bekämpfung des Klimawandels und zur Förderung der Nachhaltigkeit.
- Alle Umweltprobleme werden durch die Risiken des Klimawandels verschärft, was zusätzliche finanzielle Belastungen für den Schutz und die Wiederherstellung von Ökosystemen mit sich bringt.

Investitionen in nachhaltige Technologien:

- Die Implementierung von Strategien wie Dekarbonisierung, Entgiftung und Dematerialisierung erfordert erhebliche Investitionen in Technologien, Verhaltensänderungen und Institutionen.
- Diese Investitionen sind notwendig, um neue, umweltfreundliche Technologien zu entwickeln und die Effizienz in der Ressourcennutzung zu steigern.

Langfristige Auswirkungen politischer Entscheidungen:

- Die heutigen politischen Entscheidungen beeinflussen maßgeblich die zukünftigen Kosten im Zusammenhang mit dem Übergang zu einer nachhaltigen Wirtschaft.
- Innovationen spielen eine zentrale Rolle, um diese Kosten zu senken und gleichzeitig die wirtschaftliche Entwicklung mit Umweltzielen zu verbinden.

Vermeidung von Bindungskosten an umweltschädliche Technologien:

- Die Vermeidung der langfristigen Kosten, die durch die Bindung an umweltschädliche Technologien, Verhaltensweisen und Institutionen entstehen, ist entscheidend. Dies erfordert eine parallele Steuerung der wirtschaftlichen Entwicklung und der Umweltleistung (Ekins and Zenghelis, 2021).

Ein zentrales Problem bei der Umsetzung von Digitalisierungs- und Nachhaltigkeitsstrategien ist die Integration beider Ansätze. Obwohl sie theoretisch synergetisch wirken können, gibt es zahlreiche Hindernisse, die eine gleichzeitige Umsetzung erschweren. Diese Hindernisse umfassen technologische Barrieren, organisatorische Widerstände und fehlende regulatorische Rahmenbedingungen. Der Mangel an klaren Richtlinien und Forschungslücken in diesem Bereich verdeutlicht die Notwendigkeit, diese Herausforderungen umfassend zu untersuchen und praktikable Lösungen zu entwickeln. Sowohl digitale als auch nachhaltige Strategien sind zunehmend integrale Bestandteile der Unternehmensstrategie, da sie es Unternehmen ermöglichen, nicht nur wirtschaftlichen Nutzen, sondern auch Mehrwert für die Gesellschaft und die Umwelt zu schaffen.

Netzwerkzentrierte Geschäftsökosysteme bieten eine Plattform für die gemeinsame Wertschöpfung durch verschiedene Interessengruppen und fördern gleichzeitig nachhaltige Ergebnisse. Neue Governance-Modelle in digitalen Ökosystemen, wie etwa kooperative und orchestrierte Nachhaltigkeitsansätze, unterstützen kollaborative Maßnahmen zur Förderung der Nachhaltigkeit. Die Digitalisierung eröffnet zudem neue Möglichkeiten, um überkonsumierte Ressourcen effizienter zu nutzen und nachhaltigere Geschäftsmodelle zu entwickeln.

Dennoch bestehen weiterhin Herausforderungen, insbesondere im Hinblick auf:

- Technische und operative Schwierigkeiten bei der Entwicklung tragfähiger Geschäftsmodelle in komplexen und unreifen digitalen Umgebungen ohne standardisierte Prozesse.
- Störungen bestehender Unternehmen durch neue digitale Wettbewerber, die innovative Wertangebote schaffen und so die Wertschöpfungsketten und Wettbewerbsdynamiken verändern.

- Umwelt- und gesellschaftliche Probleme, wie zum Beispiel Elektroschrott, Datenschutzbedenken und der Einsatz von Konfliktmineralien in digitalen Geräten.
- Schwierigkeiten bei der Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Interessengruppen in digitalen Ökosystemen, insbesondere beim Übergang von traditionellen, unternehmenszentrierten zu netzwerkzentrierten Ansätzen.
- Die Notwendigkeit, sich schnell an verändernde Kundenanforderungen und globale Marktbedingungen anzupassen, um in digitalen Umgebungen wettbewerbsfähig zu bleiben. (Aksin-Sivrikaya and Bhattacharya, 2017)

In Anbetracht dieser Herausforderungen zielt diese Arbeit darauf ab, die theoretischen Grundlagen der Twin Transition in der Bauindustrie zu erforschen und mögliche Wege zur Überwindung der identifizierten Hindernisse aufzuzeigen.

1.2 Zielsetzung der Arbeit

Die Zielsetzung dieser Masterarbeit ist es, die theoretischen Grundlagen und Herausforderungen der Twin Transition in der Bauindustrie zu erforschen. Dabei sollen die Synergien zwischen der digitalen und der grünen Transformation untersucht werden, um Potenziale und Hindernisse bei ihrer Integration zu identifizieren. Die Arbeit strebt an, praktische Empfehlungen für die Bauindustrie sowie politische Entscheidungsträger zu formulieren, um die Umsetzung der Twin Transition zu fördern und zu optimieren.

Zu den spezifischen Zielen gehören:

i. Analyse der digitalen Transformation:

Untersuchung der aktuellen Technologien und Praktiken, Bewertung ihrer Vorteile und Herausforderungen.

ii. Untersuchung nachhaltiger Baupraktiken

Analyse von nachhaltigen Materialien und Techniken, Bewertung ihrer ökologischen und ökonomischen Auswirkungen.

iii. Integration von Digitalisierung und Nachhaltigkeit

Untersuchung der Synergiepotenziale und Best Practices.

iv. Regulatorische und wirtschaftliche Rahmenbedingungen:

Analyse politischer Maßnahmen und wirtschaftlicher Aspekte.

v. Identifikation von Herausforderungen und Lösungsansätzen:

Untersuchung von Barrieren und Entwicklung von Empfehlungen.

1.3 Forschungsfragen

1.3.1 Hauptforschungsfrage

Wie können digitale und nachhaltige Transformationsprozesse in der Bauindustrie integriert werden, um sowohl ökologische als auch ökonomische Pluspunkte zu erzielen?

1.3.2 Spezifische Forschungsfragen

i. Digitalisierung in der Bauindustrie:

- Welche digitalen Technologien und Methoden werden derzeit in der Bauindustrie eingesetzt, und welche Vorteile und Herausforderungen sind mit ihrer Implementierung verbunden?

ii. Nachhaltigkeit in der Bauindustrie:

- Welche nachhaltigen Baumaterialien und Baupraktiken sind in der Bauindustrie am weitesten verbreitet, und welche ökologischen und ökonomischen Auswirkungen haben sie?

iii. Integration von Digitalisierung und Nachhaltigkeit:

- Welche Synergien bestehen zwischen digitalen und nachhaltigen Transformationsprozessen in der Bauindustrie?
- Welche Strategien i.S. von Change-Management können zur erfolgreichen Integration von Digitalisierung und Nachhaltigkeit und deren Einsatz in Bauprojekten beitragen?

iv. Regulatorische und wirtschaftliche Rahmenbedingungen:

- Inwieweit unterstützen aktuelle politische und regulatorische Rahmenbedingungen die Twin Transition in der Bauindustrie?

1.4 Methodisches Vorgehen

Diese Masterarbeit basiert auf einer umfassenden Literaturrecherche und theoretischen Analyse, um die Forschungsfragen zu beantworten und die Ziele der Arbeit zu erreichen.

1.4.1 Literaturrecherche

Eine systematische Literaturrecherche bildet die Grundlage dieser Arbeit. Die Vorrecherche gibt man einen Überblick über das Thema und hilft dabei, wichtige Autoren zu identifizieren und Schlüsselbegriffe für die systematische Recherche zu entwickeln. Sie ermöglicht es, die Dimensionen des Themas zu verstehen und die Suche effizient zu gestalten. Die systematische Recherche zielt darauf ab, relevante Literatur zur konkreten Fragestellung

umfassend und zielgerichtet zu finden. Es ist wichtig, zwischen verschiedenen Publikationstypen zu unterscheiden, da dies die Wahl der Recherchemethoden beeinflusst“ (Briselat and Malewski, 2015). Relevante wissenschaftliche Artikel, Bücher, Fachzeitschriften und Berichte werden aus Datenbanken wie Google Scholar, ScienceDirect und IEEE Xplore unter Verwendung spezifischer Suchbegriffe und Phrasen ausgewählt. Am Anfang wurde überwiegend das Schneeballprinzip verwendet, d.h., zu Beginn der Recherche sollte man Literatur nutzen, die einen Überblick über das Thema gibt, wie Handbücher und Zeitschriften. Grundlagentexte in Semesterapparaten bieten oft Hinweise auf weitere Literatur. Durch die Schneeballrecherche, also das Nutzen von Literaturverzeichnissen, findet man weitere relevante Werke. Ziel ist es, Aspekte des Themas, Umfang, vorhandene Literatur und den neuesten Stand der Diskussion zu erkennen. Achtung vor Zitierkartellen, die nur eine Sichtweise bieten. Viele verschiedene Quellen sollten genutzt werden, um ein umfassendes Bild zu erhalten. (Briselat and Malewski, 2015). Die Bewertung der Quellen erfolgt anhand von Kriterien wie Aktualität, Zitierhäufigkeit und wissenschaftlicher Reputation.

1.4.2 Entwicklung von Handlungsempfehlungen

Aus den gewonnenen Erkenntnissen werden konkrete Handlungsempfehlungen abgeleitet, die bei dem Einsatz von Twin Transition als eine Veränderung in der Praxis helfen können. Zusätzlich werden Vorschläge für weitere Forschung entwickelt, um die Twin Transition in der Bauindustrie weiter voranzutreiben.

1.4.3 Darstellung und Diskussion der Ergebnisse

Die wichtigsten Ergebnisse der theoretischen Analyse werden präsentiert und kritisch diskutiert. Dabei werden Limitationen der Arbeit sowie Implikationen für die Praxis und zukünftige Forschung reflektiert.

1.5 Aufbau der Arbeit

Diese Masterarbeit ist in acht Kapitel gegliedert, die systematisch die theoretischen Grundlagen, die aktuellen Entwicklungen und Herausforderungen sowie die Integration von Digitalisierung und Nachhaltigkeit in der Bauindustrie untersuchen.

Kapitel 1: Einleitung

In diesem Kapitel werden die Hintergrundinformationen, die Problemstellung, die Zielsetzung der Arbeit, die Forschungsfragen sowie das methodische Vorgehen dargestellt. Zudem wird der Aufbau der Arbeit erläutert.

Kapitel 2: Grundlagen der Twin Transition

Dieses Kapitel liefert eine Einführung in die Twin Transition, ihre Definition und Konzepte sowie ihre historische Entwicklung und Relevanz. Es gibt einen Überblick über die digitale und grüne Transformation und legt die theoretischen Grundlagen für die weiteren Analysen.

Kapitel 3: Digitalisierung in der Bauindustrie

Hier wird die digitale Transformation in der Bauindustrie detailliert untersucht. Wichtige Technologien wie Building Information Modeling (BIM), das Internet der Dinge (IoT), Automatisierung und Künstliche Intelligenz (KI) werden beschrieben und ihre Anwendungen sowie Herausforderungen analysiert.

Kapitel 4: Nachhaltigkeit in der Bauindustrie

Dieses Kapitel befasst sich mit nachhaltigen Praktiken und Technologien in der Bauindustrie. Es werden nachhaltige Baumaterialien, Techniken, Konzepte wie Nullenergiehäuser und Passivhäuser sowie die Kreislaufwirtschaft im Bauwesen behandelt.

Kapitel 5: Synergien zwischen Digitalisierung und Nachhaltigkeit

Die Synergiepotenziale zwischen der digitalen und der grünen Transformation werden in diesem Kapitel untersucht. Es werden integrierte Ansätze und Best Practices analysiert sowie die Herausforderungen bei der Umsetzung solcher integrierten Strategien diskutiert.

Kapitel 6: Regulatorische und politische Rahmenbedingungen

In diesem Kapitel werden die politischen Maßnahmen und Initiativen, nationale und internationale Richtlinien sowie die Herausforderungen und Chancen durch gesetzliche Vorgaben beleuchtet, die die Twin Transition in der Bauindustrie beeinflussen.

Kapitel 7: Ökonomische Aspekte der Twin Transition

Dieses Kapitel untersucht die ökonomischen Aspekte der Twin Transition, einschließlich Kosten-Nutzen-Analysen, wirtschaftlicher Vorteile und Effizienzsteigerungen sowie Investitions- und Finanzierungsstrategien.

Kapitel 8: Zukunftsaussichten der Twin Transition und Empfehlungen

Dieses Kapitel widmet sich den zukünftigen Entwicklungen der Twin Transition in der Bauindustrie. Es werden die Rolle der Innovation, die zentralen Hindernisse und Treiber sowie gezielte Handlungsempfehlungen für Bauunternehmen und politische Entscheidungsträger behandelt. Abschließend wird der Forschungsbedarf für eine erfolgreiche Weiterentwicklung der Twin Transition beleuchtet.

2 Grundlagen der Twin Transition

2.1 Definition und Konzepte der Twin Transition

Die Twin Transition, auch als doppelte Transformation bezeichnet, beschreibt die gleichzeitige Umsetzung der digitalen und nachhaltigen Transformation in verschiedenen Sektoren und Branchen. Diese beiden Transformationen sind eng miteinander verknüpft und verstärken sich gegenseitig, was zu erheblichen Effizienzgewinnen und nachhaltigen Verbesserungen führen kann. Die Twin Transition bezieht sich auf die Digitalisierung und klimaverträgliche gesellschaftliche Transformationen, die bereits signifikante und oft sogar disruptive Veränderungen mit sich bringen und auf vielfältige Weise miteinander verbunden sind. Diese Bereiche werden kollektiv als Twin Transition bezeichnet, da sie durch tiefgreifende Herausforderungen und Chancen definiert sind und es wichtig ist, wesentliche Schnittstellen zu identifizieren, um Inkohärenz, Ineffizienz und verpasste Chancen im Zusammenhang mit erfolgreichen Transformationen zu vermeiden (Tänzler, Ivleva and Bernstein, 2022).

Diese Transformationen sind wesentliche Bestandteile des modernen Change-Managements, das Organisationen hilft, sich an schnell ändernde Rahmenbedingungen anzupassen und gleichzeitig langfristige Ziele zu verfolgen.

2.1.1 Definition der Twin Transition

Die Twin Transition wird als integrativer Prozess der digitalen und nachhaltigen Transformation verstanden.

Twin Transition bezieht sich auf die wertschöpfende Wechselwirkung zwischen digitaler Transformation und Nachhaltigkeitstransformation, die darauf abzielt, eine Organisation zu verbessern, indem digitale Technologien zur Förderung der Nachhaltigkeit genutzt werden und Nachhaltigkeitsprinzipien zur Steuerung des digitalen Fortschritts eingesetzt werden. Diese Transformation umfasst die Integration von digitalen und nachhaltigen Praktiken auf gleicher Ebene, um ein

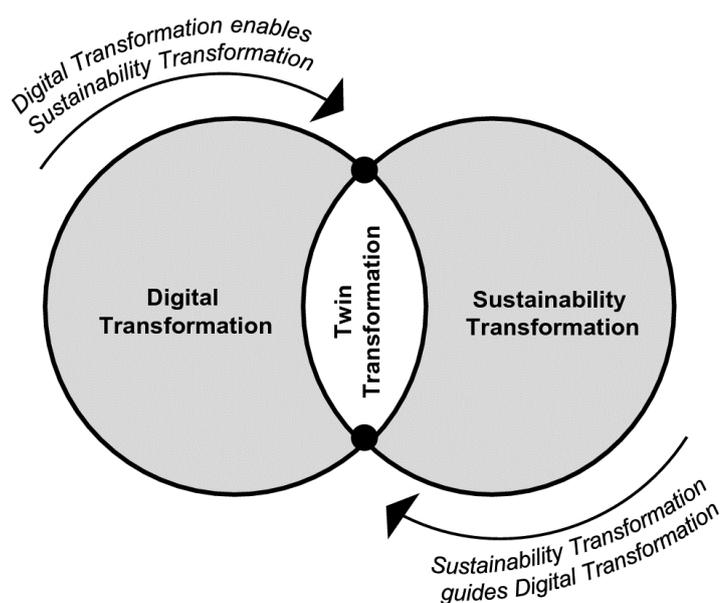


Abbildung 2: Die Twin Transformation verbindet die Synergien der digitalen Transformation und der Nachhaltigkeitstransformation (Christmann et al., 2024)

umfassendes und synergetisches Organisationsumfeld zu schaffen, das größere Werte schafft als die bloße Summe der einzelnen Transformationen (Christmann *et al.*, 2024).

Ziel von Twin Transition ist es, durch den Einsatz fortschrittlicher Technologien und nachhaltiger Praktiken eine effizientere und umweltfreundlichere Wirtschaft zu schaffen. Die Digitalisierung umfasst die Einführung und Anwendung moderner Technologien wie dem Internet der Dinge (IoT), Künstlicher Intelligenz (KI), Big Data und Automatisierung. Nachhaltigkeit bezieht sich auf die Implementierung umweltfreundlicher Praktiken, die Reduktion von CO₂-Emissionen und die Förderung der Kreislaufwirtschaft.

2.1.2 Konzepte der Twin Transition

i. Digitale Transformation:

Internet der Dinge (IoT):

Das Internet der Dinge (IoT) ist ein Konzept, das die Verbindung und Kommunikation zwischen intelligenten Objekten und Geräten wie Haushaltsgeräten, Mobiltelefonen und Laptops umfasst. Diese Objekte werden durch ein einzigartiges Adressierungsschema identifiziert und über ein einheitliches Framework, das möglicherweise Cloud Computing nutzt, mit dem Internet verbunden. Die Struktur des IoT basiert auf der Integration zwischen der physischen Welt, der Cyberwelt und der sozialen Welt. IoT ermöglicht eine nahtlose Interaktion und Vernetzung dieser drei Dimensionen, um intelligente Anwendungen und Dienste zu realisieren (H., A. and M., 2015).

Künstliche Intelligenz (KI):

Künstliche Intelligenz (KI) bezieht sich auf die Entwicklung von Computersystemen, die menschenähnliche Denkprozesse nachahmen, wie z. B. Lernen, Schlussfolgern und Selbstkorrektur. In der wissenschaftlichen Diskussion ist die Definition von KI vielfältig und im Wandel begriffen. Im Laufe der Zeit wurde der Begriff zunehmend enger gefasst und beschreibt heute oft die Imitation intelligenten menschlichen Verhaltens durch Maschinen (Joost N. Kok *et al.*, no date).

Die Definition von KI lässt sich in vier zentralen Kategorien von intelligenten Systemen unterscheiden:

- **Systeme, die wie Menschen denken:** Diese Systeme sind darauf ausgelegt, kognitive Prozesse nachzuahmen, die dem menschlichen Denken ähneln, wie etwa Schlussfolgern, Lernen oder Problemlösung.

- **Systeme, die wie Menschen handeln:** Hier steht die Fähigkeit im Vordergrund, menschliches Verhalten nachzubilden. Ein Beispiel wären Systeme, die in der Lage sind, in sozialen Umgebungen wie Menschen zu agieren.
- **Systeme, die rational denken:** Diese Systeme legen den Fokus auf die Fähigkeit, logisch und vernünftig zu denken, ähnlich dem menschlichen rationalen Denken, wie es etwa in der Mathematik oder Wissenschaft genutzt wird.
- **Systeme, die rational handeln:** Bei diesen Systemen wird die Fähigkeit betont, rational und zielgerichtet zu handeln. Sie sollen nicht allein denken, sondern ebenso die Fähigkeit besitzen, ihre Entscheidungen effektiv und logisch in Handlungen umzusetzen.

Diese Unterscheidung hilft, die unterschiedlichen Ansätze zur Entwicklung künstlich intelligenter Systeme besser zu verstehen (Joost N. Kok *et al.*, no date).

Big Data:

Speicherung und Analyse von großen und/oder komplexen Datensätzen unter Verwendung fortschrittlicher Techniken, wie NoSQL-Datenbanken, MapReduce und maschinellem Lernen. Das Hauptziel von Big Data ist es, durch die Anwendung erheblicher Rechenleistung und innovativer Analysemethoden wertvolle Erkenntnisse aus umfangreichen und komplexen Datenmengen zu gewinnen. Dies umfasst die Erweiterung traditioneller Datenquellen durch neue unstrukturierte Datenquellen sowie die Bewältigung von Herausforderungen, die konventionelle Datenverarbeitungstechniken übersteigen (Ward and Barker, 2013).

Automatisierung:

Automatisierung wird allgemein als das Betreiben oder Handeln, oder Selbstregulieren, unabhängig von menschlicher Intervention beschrieben. Der Begriff stammt vom griechischen Wort "AUTOMATOS" ab, was „selbsttätig“ oder „von selbst agierend“ bedeutet. Automatisierung umfasst Maschinen, Werkzeuge, Geräte, Installationen und Systeme, die von Menschen entwickelt wurden, um eine bestimmte Reihe von Aktivitäten ohne menschliches Eingreifen während dieser Aktivitäten auszuführen (Nof, 2009).

Cloud Computing:

Cloud Computing ist ein Paradigma für großflächiges verteiltes Rechnen, das auf bestehenden Technologien wie Virtualisierung, Serviceorientierung und Grid-Computing basiert. Es bietet eine neue Art, IT-Ressourcen in großem Maßstab zu erwerben und zu verwalten. Ein einfaches Beispiel für Cloud Computing ist Webmail, bei dem der Anbieter den Serverplatz bereitstellt und der Benutzer über einen Webbrowser darauf zugreift (Lewis, 2010).

ii. Nachhaltige Transformation:**Erneuerbare Energien:**

Die sind Energiequellen, die nachhaltige Energiedienstleistungen bereitstellen können, basierend auf der Nutzung routinemäßig verfügbarer, einheimischer Ressourcen wie Biomasse, Wind, Solarenergie, Wasserkraft und Geothermie. Diese Energiequellen werden als Alternativen zu fossilen Brennstoffen dargestellt, die umweltfreundlicher sind und das Potenzial haben, viele Male den weltweiten Energiebedarf zu decken (Herzog, Lipman and Kammen, 2001).

Kreislaufwirtschaft:

Kreislaufwirtschaft ist ein Konzept, bei dem Produkte und Materialien mehrere Lebenszyklen in verschiedenen Formaten durchlaufen und wirtschaftliches Wachstum von Umweltzerstörung entkoppelt wird (Sihvonen and Ritola, 2015).

Nachhaltige Produktions- und Konsumpraktiken:

sind Ansätze innerhalb eines industriellen Systems, die darauf abzielen, Ressourcen effizient zu nutzen und Abfall durch durchdachtes Design und optimierte Kreisläufe zu eliminieren. Diese Praktiken fördern die Nutzung erneuerbarer Energien, minimieren den Einsatz von giftigen Chemikalien und trennen Verbrauchsgüter in biologische und technische Nährstoffe, die entweder sicher in die Biosphäre zurückgeführt oder für die Wiederverwendung entworfen werden. Solche Ansätze ersetzen das traditionelle "Kaufen und Konsumieren" durch Modelle, bei denen Produkte geleast, gemietet oder geteilt werden, mit Anreizen zur Rückgabe und Wiederverwendung am Ende der Nutzungsdauer (Ellen MacArthur Foundation, 2012).

Energieeffizienz:

Während Effektivität im Sinne von „Wirksamkeit“ den Grad der Zielerreichung einer Aktivität bezeichnet, bezieht sich die Effizienz auf das Verhältnis zwischen Nutzen und Aufwand. Energieeffizienz bezieht sich also auf das Verhältnis von erzieltm Nutzen und eingesetzter Energie. Gemessen wird dabei zumeist nicht die absolute Energieeffizienz, sondern deren prozentuale Steigerung oder deren Kehrwert, die prozentuale Energieeinsparung oder auch die absolute erreichte Energieeinsparung (Irrek and Thomas, 2008).

Nachhaltige Beschaffung:

Nachhaltige Beschaffung bezieht sich auf den Prozess, bei dem Organisationen Materialien, Produkte und Dienstleistungen auf eine Weise beziehen, die sowohl ökologische als auch soziale Auswirkungen berücksichtigt. Dies umfasst die Einbeziehung von Umwelt- und Sozialkriterien in den Beschaffungsprozess, um negative Auswirkungen auf die Umwelt zu minimieren und soziale Verantwortung zu fördern. Dieser Ansatz geht über gesetzliche

Vorgaben hinaus und integriert sowohl Umwelt- als auch soziale Aspekte in strategische Beschaffungsentscheidungen. Ziel ist es, eine langfristige, nachhaltige Entwicklung der gesamten Lieferkette zu unterstützen und gleichzeitig die wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit der Organisation zu wahren (Lambrechts, 2020).

iii. Verknüpfung von Digitalisierung und Nachhaltigkeit

Die Twin Transition betont die Synergie zwischen digitaler und nachhaltiger Transformation. Durch Digitalisierung können nachhaltige Praktiken effizienter umgesetzt werden. IoT ermöglicht zum Beispiel die Überwachung und Steuerung von Energieflüssen in Echtzeit und hilft, den Energieverbrauch zu reduzieren. Künstliche Intelligenz (KI) kann Optimierungspotenziale in Produktionsprozessen aufzeigen, um Abfälle zu minimieren. Big Data analysiert das Verbraucherverhalten und fördert nachhaltige Konsummuster.

In einer Welt, die von digitalen Innovationen und der dringenden Notwendigkeit nachhaltiger Praktiken geprägt ist, stehen Organisationen vor der Herausforderung, beide Transformationen erfolgreich zu bewältigen. Diese Prozesse sind nicht isoliert, sondern erfordern eine integrative Herangehensweise, die Digitalisierung und Nachhaltigkeit vereint. Um dieser Herausforderung gerecht zu werden, wurde ein **Rahmenwerk für die Fähigkeit zur Twin Transition** entwickelt. Dieses

Rahmenwerk, symbolisiert durch einen Schmetterling, verdeutlicht die symbiotische Beziehung zwischen digitaler und nachhaltiger Transformation. Die großen Flügel des Schmetterlings repräsentieren die primären Fähigkeiten, die notwendig sind, um diese Transformationen zu leiten. Die kleineren Flügel stehen für die unterstützenden Fähigkeiten, die diese Transformationen fördern und erleichtern (Christmann et al., 2024).

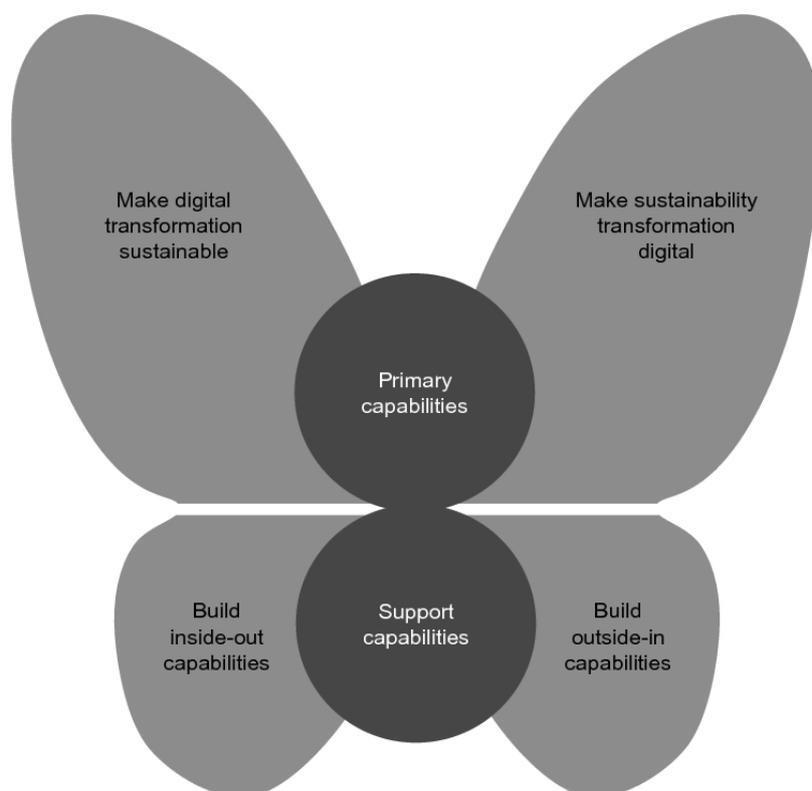


Abbildung 3: Rahmenwerk für die Fähigkeit zur Twin Transition (Twin transformation capability framework) (Christmann et al. 2024)

Hauptbestandteile des Schmetterlingsmodells:

Primäre Fähigkeiten

Die primären Fähigkeiten werden durch die großen Flügel des Schmetterlings symbolisiert und umfassen zwei Hauptbereiche:

- **Digitale Transformation nachhaltig gestalten**
 - **Nachhaltigkeit für digitale Geschäftsmöglichkeiten erkennen:** Unternehmen müssen die Potenziale von Nachhaltigkeit in ihren digitalen Geschäftsmodellen erkennen.
Beispiel: Ein Unternehmen nutzt die Cloud, um nicht nur den digitalen Betrieb zu verbessern, sondern auch um CO2-Emissionen durch grüne Rechenzentren zu reduzieren.
 - **Digitale Technologien einsetzen, die selbst nachhaltig sind:** Digitale Technologien sollten so eingesetzt werden, dass sie einen geringen ökologischen Fußabdruck haben.
Beispiel: Durch den Einsatz von Green IT werden in der gesamten IT-Infrastruktur Energieeffizienz und Nachhaltigkeit gefördert.
 - **Nachhaltigkeitsbezogene, transparente Verbraucherentscheidungen fördern:** Informationen über die Nachhaltigkeit von Produkten sollten den Kunden klar und verständlich zur Verfügung gestellt werden.
Beispiel: Ein Unternehmen gibt seinen Kunden Einblicke in den CO2-Fußabdruck jedes Produkts, um eine informierte Kaufentscheidung zu fördern.
 - **Nachhaltigkeitsprinzipien in digitale Produkt- und Serviceinnovationen integrieren:** Nachhaltigkeit muss von Anfang an in den Innovationsprozess einfließen.
Beispiel: Bei der Entwicklung eines neuen Produkts werden Materialien und Prozesse verwendet, die von Beginn an umweltfreundlich und nachhaltig sind.
- **Nachhaltigkeitstransformation digital gestalten**
 - **Digitale Technologien für nachhaltigkeitsorientierte Geschäftsmöglichkeiten erkennen:** Digitale Technologien können genutzt werden, um neue nachhaltige Geschäftsmodelle zu schaffen.

Beispiel: Ein Unternehmen verwendet KI, um seine Logistik zu optimieren und so CO₂-Emissionen durch effizientere Routen zu reduzieren.

- **Digitale Technologien zur Förderung nachhaltiger Praktiken einsetzen:** Digitale Technologien sollen so eingesetzt werden, dass sie die Umweltbelastung verringern.

Beispiel: Ein Lieferunternehmen verwendet Algorithmen, um Fahrtrouten zu optimieren und den Kraftstoffverbrauch zu senken.

- **Nachhaltigkeitsauswirkungen von Produkten und Dienstleistungen über den gesamten Lebenszyklus fördern:** Es sollten Daten gesammelt werden, um die Umweltauswirkungen über den gesamten Produktlebenszyklus zu überwachen.

Beispiel: Ein Hersteller misst den CO₂-Fußabdruck seiner Produkte von der Rohstoffgewinnung bis zur Entsorgung.

- **Daten in nachhaltige Produkt- und Serviceinnovationen integrieren:** Daten müssen genutzt werden, um nachhaltige Lösungen zu entwickeln.

Beispiel: Ein Unternehmen verwendet Marktdaten, um Produkte mit weniger Verpackungsmüll zu entwickeln.

Unterstützende Fähigkeiten

Die unterstützenden Fähigkeiten werden durch die kleineren Flügel des Schmetterlings dargestellt und sind in zwei Kategorien unterteilt:

- **Intern gerichtete Fähigkeiten aufbauen**
 - **Digitale Plattformen für den internen Informationsaustausch implementieren:** Unternehmen sollten interne Plattformen nutzen, um Wissen und Informationen zu teilen.
 - **Mitarbeiter befähigen, digitale und nachhaltige Kompetenzen zu entwickeln:** Es ist wichtig, dass Mitarbeiter in diesen beiden Bereichen geschult und weitergebildet werden.
 - **Integrierte Visionen und Missionen für Digitalisierung und Nachhaltigkeit innerhalb der Organisation etablieren:** Es muss eine klare Vision für beide Bereiche entwickelt werden.

Beispiel: Ein Unternehmen setzt sich das Ziel, seine digitalen und nachhaltigen Initiativen in einer gemeinsamen Strategie zu vereinen.

- **Offenheit für Veränderungen und strategische Flexibilität fördern:** Organisationen sollten eine Kultur der Offenheit und Flexibilität fördern, um Veränderungen zu unterstützen.

Beispiel: Flexibilität und Agilität sind im Unternehmen wichtige Werte, um auf neue Herausforderungen reagieren zu können.

- **Extern gerichtete Fähigkeiten aufbauen**

- **Daten- und Wissensaustausch innerhalb digitaler Ökosysteme implementieren:** Der Austausch von Wissen und Daten zwischen Unternehmen sollte gefördert werden.
- **Abgestimmte digitale und nachhaltige Wertschöpfung über verschiedene Branchen hinweg ermöglichen:** Branchenübergreifende Kooperationen sind notwendig, um nachhaltige Werte zu schaffen.
- **Geteilte Werte für Digitalisierung und Nachhaltigkeit unter Ökosystempartnern etablieren:** Es sollten gemeinsame Werte in Bezug auf Digitalisierung und Nachhaltigkeit definiert werden.
- **Gemeinsame Innovation und starke Gemeinschaftsnetzwerke fördern:** Netzwerke und Partnerschaften sollten gefördert werden, um Innovationen zu entwickeln.

Beispiel: In einem Innovationslabor arbeiten Startups und Unternehmen zusammen an nachhaltigen Lösungen.

Zusätzlich betont das Twin Transformation Framework die Bedeutung von dynamischen Fähigkeiten, um die Synergie zwischen der digitalen und nachhaltigen Transformation zu fördern. Unternehmen, die beide Transformationen integrieren, sind besser gerüstet, um langfristige Wettbewerbsvorteile zu erzielen und gleichzeitig zur Lösung globaler Herausforderungen wie dem Klimawandel beizutragen. Diese Transformationen erfordern jedoch spezifische Fähigkeiten, um erfolgreich implementiert zu werden. Das Rahmenwerk zeigt, dass sowohl primäre als auch unterstützende Fähigkeiten notwendig sind, um diesen Prozess zu steuern und die Organisation in die Zukunft zu führen. Das Schmetterlingsmodell verdeutlicht, dass Organisationen, die digitale und nachhaltige Transformation gleichwertig integrieren, ihre Resilienz und Innovationskraft stärken können (Christmann *et al.*, 2024).

2.2 Historische Entwicklung und Relevanz der Twin Transition

2.2.1 Historische Entwicklung der Twin Transition

Die Twin Transition, auch als doppelte Transformation bekannt, ist ein relativ neues Konzept, das aus der Notwendigkeit hervorging, digitale Innovationen und nachhaltige

Praktiken zu integrieren. Historisch gesehen konzentriert sich Organisationen in der Vergangenheit entweder auf digitale Transformationen oder auf Nachhaltigkeitsinitiativen, jedoch selten auf eine Kombination beider Ansätze.

i. Frühe Ansätze der Digitalisierung:

In den späten 1990er und frühen 2000er Jahren begannen Unternehmen, digitale Technologien zu übernehmen, um ihre Geschäftsprozesse zu optimieren und Wettbewerbsvorteile zu erzielen. Diese Phase der Digitalisierung konzentrierte sich hauptsächlich auf Effizienzsteigerung und Kostensenkung (Brynjolfsson and Hitt, 2000).

ii. Aufkommen der Nachhaltigkeit:

Parallel dazu gewann das Thema Nachhaltigkeit an Bedeutung. Anfangs lag der Fokus auf ökologischen Aspekten wie Energieeffizienz und Abfallreduktion. Mit der Verabschiedung internationaler Abkommen wie dem Kyoto-Protokoll (1997) und später dem Pariser Abkommen (2015) rückten nachhaltige Geschäftsstrategien stärker in den Vordergrund (Lovins, 1976; United Nations, 1998; *Paris Agreement* 2016).

iii. Integration beider Transformationen:

In den letzten Jahren wurde erkannt, dass digitale Technologien erhebliche Potenziale bieten, um nachhaltige Entwicklungsziele zu erreichen. Diese Erkenntnis führte zur Entwicklung der Twin Transition, bei der digitale und nachhaltige Transformationen nicht mehr als separate Initiativen, sondern als komplementäre Prozesse betrachtet werden (Dyllick and Muff, 2016; Feroz, Zo and Chiravuri, 2021; Wessel *et al.*, 2021).

2.2.2 Relevanz der Twin Transition

Die Relevanz der Twin Transition nimmt in der modernen Geschäftswelt stetig zu, da sie zahlreiche Nutzen für Organisationen und die Gesellschaft insgesamt bietet:

i. Synergien und Effizienzsteigerungen:

Durch die gleichzeitige Implementierung digitaler und nachhaltiger Maßnahmen können Unternehmen Synergien nutzen, die zu größeren Effizienzgewinnen und Kosteneinsparungen führen. Beispielsweise kann die Digitalisierung von Prozessen den Ressourcenverbrauch reduzieren und somit nachhaltiger werden. Automatisierung von Aufgaben, insbesondere repetitive Aufgaben, kann durch Eliminierung einiger Schritte zur Zeit- und Kosteneinsparung führen, wenn Energieeinsparung sich aus der Optimierung der Transport ergibt und eventuell wird die Produktion wegen der Senkung des Ressourcenverbrauch effizienter (Matoušková, 2022). Zudem ermöglicht die kontinuierliche Analyse von Betriebsdaten die Identifizierung von Engpässen in der Prozesseleistung und dadurch erhöhte Prozesseffizienz (Parida, Sjödin and Reim, 2019).

ii. Wettbewerbsvorteile:

Neben der Effizienzsteigerung, die sich aus der Integration von Nachhaltigkeitsaspekten in Geschäftsmodelle durch Innovation und der Nutzung digitaler Technologien ergibt und durch Kosteneinsparungen zum Wettbewerbsvorteil führt (Geissdoerfer, Vladimirova and Evans, 2018), können sich Unternehmen, die beide Transformationen erfolgreich integrieren, besser auf verändernde Marktbedingungen und regulatorische Anforderungen einstellen. Dies verschafft ihnen, v.a. wegen besserer Marktpositionierung, einen Wettbewerbsvorteil gegenüber Organisationen, die nur eine der beiden Transformationen verfolgen (Bocken *et al.*, 2014; Grewal *et al.*, 2020; Porter and Kramer, 2011).

iii. Gesellschaftlicher und ökologischer Nutzen:

Die Twin Transition trägt zur Bewältigung globaler Herausforderungen wie dem Klimawandel und der Ressourcenknappheit bei. Durch die Kombination digitaler Technologien mit nachhaltigen Praktiken können Unternehmen ihren ökologischen Fußabdruck verringern (Geissdoerfer, Vladimirova and Evans, 2018) und gleichzeitig soziale Verantwortung für die Bewältigung globaler Herausforderungen übernehmen. (Feroz, Zo and Chiravuri, 2021)

iv. Innovationsförderung:

Die Integration von Digital- und Nachhaltigkeitsstrategien fördert Innovationen. Unternehmen entwickeln neue Geschäftsmodelle, Produkte und Dienstleistungen, die sowohl wirtschaftlich als auch ökologisch und sozial nachhaltig sind. Auf der einen Seite kann der Aufbau eines neuen Geschäftsmodell das erforderlichen, das Geschäftsmodell aus der Konkurrenz auf digitale und nachhaltige Basis zu beruhen, was dazu führt, mit innovativen Verfahren die sowohl neuen als auch vorhandenen Produkte und Dienstleistungen anzubieten. Außerdem trägt die Kosteneinsparung durch den Einsatz der Twin Transition dazu bei, mehr in neue Technologien und Prozesse investieren zu können (Porter and Kramer, 2011). Auf der anderen Seite wächst ständig die Nachfrage nach nachhaltigen Produkten und Anwendung von Prinzipien von Circular Economy, die sich fest mit Twin Transition zusammenhängt, kann die Unternehmen dabei helfen, durch innovative Geschäftsmodelle wirtschaftliche und ökologische Vorteile zu erzielen (Geissdoerfer *et al.*, 2017).

v. Regulatorischer Druck und Erwartungen der Stakeholder:

Die zunehmenden regulatorischen Anforderungen und der wachsende Druck von Stakeholdern, wie Kunden, Investoren und Regulierungsbehörden, machen die Twin Transition für Unternehmen unerlässlich. Studien zeigen, dass der Einsatz von Industrie 4.0-Technologien nicht allein zur Verbesserung der betrieblichen Effizienz beiträgt, sondern ebenso eine zentrale Rolle bei der Erfüllung von Nachhaltigkeitsanforderungen spielt. Diese Technologien ermöglichen es Unternehmen, den ökologischen Fußabdruck zu reduzieren und

nachhaltige Praktiken zu fördern, was wiederum die Einhaltung strengerer Umweltvorschriften erleichtert. Darüber hinaus erwarten Stakeholder zunehmend, dass Unternehmen verantwortungsbewusst handeln und nachhaltige Geschäftsmodelle umsetzen. Die erfolgreiche Integration von digitalen und nachhaltigen Strategien (Twin Transition) ist somit entscheidend, um langfristig wettbewerbsfähig zu bleiben und die Betriebserlaubnis in einem zunehmend regulierten Marktumfeld zu sichern (Ghobakhloo *et al.*, 2021).

Insgesamt stellt die Twin Transition einen wegweisenden Ansatz dar, der Unternehmen hilft, sich in einer zunehmend komplexen und dynamischen Welt zu behaupten. Sie bietet einen Rahmen, um digitale und nachhaltige Strategien effektiv zu integrieren und somit langfristig erfolgreich und verantwortungsvoll zu wirtschaften (Ghobakhloo *et al.*, 2021).

3 Digitalisierung in der Bauindustrie

3.1 Einführung in die digitale Transformation der Bauindustrie

Die digitale Transformation hat tiefgreifende Auswirkungen auf alle Wirtschaftssektoren, und die Bauindustrie bildet hier keine Ausnahme. Diese Transformation beschreibt die Integration digitaler Technologien in alle Aspekte des Bauprozesses, von der Planung über die Ausführung bis hin zur Betriebsführung von Bauprojekten. Ziel ist es, Effizienz zu steigern, Kosten zu senken und die Qualität der Bauprojekte zu verbessern (Agarwal, Chandrasekaran and Sridhar, 2016).

3.1.1 Bedeutung der digitalen Transformation in Bauindustrie

Die Bauindustrie verzeichnete traditionell eine geringere Produktivitätssteigerung im Vergleich zu anderen Sektoren wie der Fertigung (McKinsey Global Institute, 2017). Die niedrige Produktivität in der Bauindustrie ist auf eine Vielzahl von Faktoren zurückzuführen, die sich gegenseitig verstärken. Die Branche ist stark fragmentiert, mit vielen kleinen Unternehmen, die oft ineffizient arbeiten und nicht die Vorteile der Standardisierung nutzen können. Dies wird durch die hohe Anzahl maßgeschneiderter Projekte verschärft, die wenig Wiederholbarkeit bieten und so die Effizienz mindern. Zudem sind Bauprojekte zunehmend komplex, was die Koordination und Zusammenarbeit zwischen den zahlreichen beteiligten Akteuren erschwert. Ein weiteres Problem ist der Mangel an qualifizierten Arbeitskräften, was durch hohe manuelle Arbeitsanteile und informelle Beschäftigung verstärkt wird. Hinzu kommt, dass die Bauindustrie im Vergleich zu anderen Sektoren weniger in Digitalisierung und neue Technologien investiert, was Innovation und Effizienz hemmt. Auch die vertraglichen Strukturen und Anreize sind oft suboptimal, wodurch Risiken entlang der Wertschöpfungskette verschoben anstatt gelöst werden. Regulierung und die Abhängigkeit von der öffentlichen Nachfrage verursachen zusätzliche Verzögerungen, während Marktversagen und intransparente Strukturen Unternehmen begünstigen, die nicht notwendigerweise produktiv arbeiten. Insgesamt führen diese Faktoren dazu, dass die Produktivität in der Bauindustrie im Vergleich zu anderen Sektoren kaum steigt (McKinsey & Company, 2020; McKinsey Global Institute, 2017).

Digitale Technologien bieten vielfältige Lösungen zur Steigerung der Produktivität in der Bauindustrie. Der Einsatz von Building Information Modeling (BIM) ermöglicht eine präzise, digitale Darstellung von Bauprojekten, die eine bessere Planung, Koordination und Kommunikation zwischen den Akteuren fördert und Fehler sowie Verzögerungen reduziert. Automatisierte Arbeitsabläufe und Robotik übernehmen repetitive Aufgaben und beschleunigen Genehmigungsprozesse, was Zeit und Kosten spart. Zudem können standardisierte

Komponenten und Vorfertigung die Bauzeiten verkürzen und die Effizienz erhöhen. Durch die verbesserte Datenanalyse lassen sich Risiken besser managen und Entscheidungen fundierter treffen, während digitale Kollaborationstools die Kommunikation auf Baustellen optimieren. Darüber hinaus ermöglicht die Integration von IoT-Technologien in Smart Buildings eine effiziente Betriebsüberwachung, während die Erhöhung der digitalen Kompetenz der Arbeitskräfte sicherstellt, dass die neuen Technologien effektiv genutzt werden. Zusammen bieten diese Ansätze die Grundlage für eine nachhaltige Produktivitätssteigerung in der Bauindustrie (McKinsey & Company, 2020; McKinsey Global Institute, 2017).

3.1.2 Treiber der digitalen Transformation in Bauindustrie

Mehrere Faktoren treiben die digitale Transformation in der Bauindustrie voran. Einer der Haupttreiber ist der zunehmende Druck zur Steigerung der Kosteneffizienz und Verbesserung der Projekttransparenz. Angesichts häufig auftretender Budgetüberschreitungen und Terminverzögerungen ist die Branche gezwungen, effizientere Lösungen zu finden (Dr. Kai-Stefan Schober, Dr. Philipp Hoff and Konstantin Sold, 2016). Technologischer Fortschritt, insbesondere in Bereichen wie dem Internet der Dinge (IoT) und Cloud-Computing, beschleunigte die Verbreitung digitaler Lösungen in der Bauindustrie erheblich. Diese Technologien ermöglichen umfassende Datenanalysen und Echtzeitüberwachung, die zu besseren Entscheidungsprozessen beitragen (Bilal *et al.*, 2016).

Ein weiterer bedeutender Treiber ist die zunehmende Bedeutung nachhaltigen Bauens. Digitale Technologien ermöglichen präzisere Planungen und eine effizientere Umsetzung nachhaltiger Baupraktiken, was sowohl ökologische als auch ökonomische Pluspunkte mit sich bringt (McKinsey & Company, 2020; McKinsey Global Institute, 2017).

3.1.3 Aktueller Stand der Digitalisierung in Bauindustrie

Die Digitalisierung erzielte in der Bauindustrie bereits deutliche Fortschritte. Technologien wie Building Information Modeling (BIM), das Internet der Dinge (IoT) und Künstliche Intelligenz (KI) werden zunehmend eingesetzt (Abioye *et al.*, 2021). BIM ist besonders hervorzuheben, da es als zentrale Technologie für die präzise Planung und Ausführung von Bauprojekten gilt (Wang, Pan and Luo, 2019). IoT ermöglicht eine verbesserte Überwachung und Steuerung von Baustellen in Echtzeit, während KI große Datenmengen analysieren kann, um fundierte Entscheidungen zu unterstützen (Amade *et al.*, 2018).

Ungeachtet dieser Fortschritte wird die Integration digitaler Technologien in die Bauindustrie durch mehrere Herausforderungen erschwert. Kulturelle Barrieren und Widerstand gegen Veränderungen behindern die Akzeptanz neuer Technologien. Hohe Anfangskosten und Bedenken hinsichtlich der Datensicherheit stellen weitere Hürden dar. Zudem mangelt es

an qualifizierten Fachkräften und die technologische Komplexität erfordert umfassende Schulungen. Unzureichende Infrastruktur, Interoperabilitätsprobleme zwischen verschiedenen Systemen sowie Herausforderungen bei der Datenqualität und -management erschweren die Integration zusätzlich. Schließlich müssen digitale Lösungen oft an bestehende regulatorische Rahmenbedingungen angepasst und auf unterschiedliche Projektgrößen skaliert werden (Abioye *et al.*, 2021; Amade *et al.*, 2018; Wang, Pan and Luo, 2019).

Der aktuelle Stand der Digitalisierung in der Bauindustrie ist durch eine Reihe von Fortschritten, aber auch erheblichen Herausforderungen geprägt. Während Building Information Modeling (BIM) zunehmend in der Planungsphase eingesetzt wird, bleibt seine Anwendung über den gesamten Lebenszyklus eines Bauprojekts hinweg oft begrenzt. Viele Unternehmen nutzen BIM nicht konsequent in allen Phasen des Bauprozesses, was das volle Potenzial dieser Technologie einschränkt. Darüber hinaus weist die Bauwirtschaft im Vergleich zu anderen Branchen einen geringen Digitalisierungsgrad auf, was zu Ineffizienzen in der Planung und Umsetzung von Bauprojekten führt und die Produktivität negativ beeinflusst. Technische Herausforderungen, wie die Inkompatibilität von IT-Systemen und der mangelnde Datenaustausch zwischen verschiedenen Softwarelösungen aufgrund proprietärer Datenformate, erschweren die flächendeckende Anwendung digitaler Methoden zusätzlich. Ein weiterer wesentlicher Hemmschuh ist der signifikante Mangel an Fachkräften, sowohl in der Planung als auch in der Baurealisierung, der die Einführung und Anwendung digitaler Technologien behindert. Trotz dieser Herausforderungen sind die Erwartungen an die Digitalisierung hoch: Die Akteure der Branche erhoffen sich durch die Digitalisierung effizientere Bauprozesse, eine verbesserte Zusammenarbeit und eine gesteigerte Attraktivität des Berufsbildes. Insgesamt wird deutlich, dass zwar bereits Fortschritte in der Digitalisierung der Bauindustrie erzielt wurden, aber noch erhebliche Anstrengungen erforderlich sind, um die Vorteile der Digitalisierung vollständig zu realisieren und die Branche für die Zukunft zu rüsten (Prof. Dr. Karsten Körkemeyer *et al.*, 2023).

Im Jahr 2017 war die Digitalisierung in der Bauindustrie durch eine Vielzahl von Herausforderungen geprägt. Viele Unternehmen hielten an traditionellen Arbeitsweisen fest, was zu erheblichem Widerstand gegen Veränderungen führte. Die Einführung neuer digitaler Technologien erforderte tiefgreifende Anpassungen in der Unternehmenskultur und den Arbeitspraktiken, was auf Widerstand stieß. Ein signifikantes Problem war der Mangel an qualifizierten Fachkräften, die mit digitalen Technologien vertraut waren, da viele Bauarbeiter und Fachkräfte nicht ausreichend geschult waren. Darüber hinaus stellten die hohen Investitionskosten für die Implementierung digitaler Technologien insbesondere kleinere Bauunternehmen vor große finanzielle Herausforderungen. Die Branche war stark

fragmentiert, mit vielen unterschiedlichen Akteuren, die oft inkompatible Systeme und Software verwendeten, was die Integration und den Informationsaustausch erschwerte. Ein weiteres Hindernis war der Mangel an standardisierten Prozessen und Technologien, der die Umsetzung digitaler Lösungen komplizierte. Regulatorische Hürden behinderten zusätzlich die Einführung neuer Technologien, da bestehende Vorschriften und Standards häufig nicht an die Bedürfnisse der Digitalisierung angepasst waren. Schließlich stellte die unzureichende digitale Infrastruktur in einigen Regionen, insbesondere in ländlichen oder weniger entwickelten Gebieten, ein weiteres Hindernis für die Implementierung digitaler Lösungen dar (McKinsey Global Institute, 2017).

Insgesamt verbesserten sich einige der Herausforderungen seit 2017, insbesondere hinsichtlich der Investitionskosten und der Verfügbarkeit von Finanzierungsoptionen. Fortschritte wurden auch bei der Integration von Systemen und der Entwicklung von Standards erzielt. Dennoch bleiben viele Herausforderungen bestehen, wie der Fachkräftemangel, die Fragmentierung der Branche, mangelnde Standardisierung und regulatorische Hürden. Die kontinuierliche Anstrengung zur Verbesserung und Anpassung der digitalen Strategien ist erforderlich, um die vollständigen Vorteile der Digitalisierung in der Bauindustrie zu realisieren.⁴

3.1.4 Ziele der digitalen Transformation in Bauindustrie

Die Digitalisierung in der Bauindustrie verfolgt mehrere zentrale Ziele, die darauf abzielen, die Effizienz, Qualität und Nachhaltigkeit von Bauprojekten zu verbessern. Erstens soll durch den Einsatz digitaler Technologien wie Building Information Modeling (BIM) und automatisierte Prozesse die Effizienz in der Projektplanung und -durchführung gesteigert werden, was zu einer Reduzierung von Zeit- und Kostenaufwand führt. Zweitens fördert die Digitalisierung die Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Akteuren im Bauprozess, indem sie durch digitale Plattformen einen besseren Austausch von Informationen und eine koordinierte Planung ermöglicht. Drittens wird eine datengestützte Entscheidungsfindung unterstützt, bei der Unternehmen auf Echtzeitdaten zugreifen können, um die Planung, das Risikomanagement und die Ressourcennutzung zu verbessern. Ein weiteres Ziel ist die Unterstützung nachhaltiger Baupraktiken, indem digitale Werkzeuge den Materialverbrauch optimieren, Abfall reduzieren und die Energieeffizienz von Gebäuden verbessern. Zudem trägt die Digitalisierung zur Qualitätssteigerung bei, indem sie präzisere Planungen und Ausführungen ermöglicht und potenzielle Probleme frühzeitig identifiziert. Die Flexibilität und Anpassungsfähigkeit der Bauunternehmen werden durch digitale Technologien erhöht, was in einem sich schnell verändernden Marktumfeld von entscheidender Bedeutung ist.

⁴ eigene Aussage anhand des Vergleiches beider Argumente

Schließlich erleichtert die Digitalisierung die Integration neuer Technologien wie IoT und künstliche Intelligenz, die weitere Effizienzgewinne und innovative Lösungen ermöglichen. Insgesamt zielt die Digitalisierung darauf ab, die Bauindustrie zu modernisieren, ihre Wettbewerbsfähigkeit zu steigern und den sich ändernden Anforderungen von Kunden und Märkten gerecht zu werden (McKinsey & Company, 2020; Prof. Dr. Karsten Körkemeyer *et al.*, 2023).

3.2 Building Information Modeling (BIM)

Building Information Modeling (BIM) ist eine zentrale Technologie in der digitalen Transformation der Bauindustrie, die zunehmend an Bedeutung gewinnt. Eine Studie im Jahr 2016 in Großbritannien zeigt, dass eine Mehrheit der Befragten (63,2%) angab, dass ihre Unternehmen bereits mit der Implementierung von BIM begannen, während 23,5% planen, dies zu tun (Gledson and Greenwood, 2016). Die Anzahl von einsetzenden Unternehmen ist im Jahr 2021 auf 80% gestiegen⁵. Die Steigerung ist auch in Deutschland deutlich, jedoch mit geringeren Kennzahlen. Jeder fünfte Betrieb arbeitet in seinen Projekten bereits mit BIM – im Schnitt mit einem Anteil der BIM-Projekte am eigenen Unternehmensumsatz von 31,8 Prozent⁶. Dieser Abschnitt befasst sich mit den Definitionen, Stärken, Herausforderungen sowie praktischen Anwendungsbeispielen von BIM, um ein umfassendes Verständnis dieser Technologie zu vermitteln.

3.2.1 Definition und Grundlagen

Building Information Modeling (BIM) wird in der Literatur als ein digitaler Prozess beschrieben, der die physikalischen und funktionalen Merkmale eines Bauwerks in Form eines 3D-Modells darstellt. Diese digitale Darstellung ermöglicht es allen Beteiligten, auf eine zuverlässige Informationsbasis zuzugreifen, die während des gesamten Lebenszyklus des Gebäudes für Entscheidungsfindungen genutzt werden kann. BIM integriert digitale Daten mit Prozessen, Technologien und Richtlinien und fördert eine bessere Zusammenarbeit zwischen den verschiedenen Akteuren im Bauwesen, indem es Informationen in einem einzigen Modell bereitstellt. Dies führt zu einer Minimierung von Designfehlern und -auslassungen sowie zu einer signifikanten Reduzierung der Planungszeit. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass BIM nicht nur ein Werkzeug zur 3D-Modellierung ist, sondern auch

⁵ ABZ. (2024). BIM-Nutzung im Ländervergleich: Wer führt bei der Implementierung in Europa?. Abgerufen am 28.08.2024 von <https://allgemeinebauzeitung.de/abz/bim-nutzung-im-laendervergleich-wer-fuehrt-bei-der-implementierung-in-europa-41421>

⁶ Ingenieur.de. (2024). 5 Kennzahlen zur BIM-Nutzung in Deutschland. Abgerufen am 28.08.2024 von <https://www.ingenieur.de/fachmedien/bauingenieur/special-digitalisierung/5-kennzahlen-zur-bim-nutzung-in-deutschland/>

eine umfassende Informationsmanagementstrategie, die die Effizienz und Zusammenarbeit im Bauwesen erheblich verbessert (Amade *et al.*, 2018).

Building Information Modeling (BIM) wird oft in verschiedene **Level** unterteilt, um den Grad der Zusammenarbeit und Integration von BIM innerhalb eines Bauprojekts zu beschreiben. Diese Levels dienen dazu, den Fortschritt der BIM-Implementierung in einem Unternehmen oder Projekt zu kategorisieren. Die vier am häufigsten genannten Level sind:

BIM Level 0:

- Beschreibung: Es gibt im Grunde genommen kein BIM. Bei Level 0 wird keine kollaborative Nutzung von digitalen Modellen praktiziert. Informationen werden meist in Papierform oder in einfachen 2D-CAD-Zeichnungen verwaltet.
- Merkmale: Nutzung von 2D-CAD für die Produktion von Zeichnungen, keine gemeinsame Datenumgebung (CDE⁷), getrennte Datenverwaltung.

BIM Level 1:

- Beschreibung: In Level 1 wird eine Kombination aus 2D-Zeichnungen und 3D-Modellen genutzt. Es gibt eine teilweise Zusammenarbeit, jedoch noch keine vollständige Integration der Datenmodelle.
- Merkmale: Einsatz von 3D-CAD für konzeptuelle Arbeiten, kombiniert mit 2D-Dokumentation für Genehmigungen und Produktion. Die Daten werden in einem gemeinsamen Datenumfeld (CDE) gespeichert, allerdings noch ohne vollständige Integration und Zusammenarbeit zwischen den Beteiligten.

BIM Level 2:

- Beschreibung: Bei Level 2 findet eine vollständige und strukturierte Zusammenarbeit zwischen den Projektbeteiligten statt. Verschiedene Disziplinen arbeiten in ihren eigenen 3D-Modellen, die dann regelmäßig in einem koordinierten Modell zusammengeführt werden.
- Merkmale: Gemeinsame Nutzung von 3D-Modellen zwischen allen Beteiligten, regelmäßiger Abgleich und Zusammenführung der Modelle zur Kollisionserkennung⁸, gemeinsame Datenumgebung (CDE), aber immer noch teilweise getrennte Datenmodelle.

⁷ Common Data Environment

⁸ Englisch: Clash Detection, Erkennung der Konflikte zwischen verschiedenen Modellen während des Entwurfsprozesses. Clash Detection - Kollisionserkennung - Catenda. (2023, 29. September). Catenda. Abgerufen am 03.12.2024 von <https://catenda.com/de/glossary/clash-detection-kollisionserkennung/>

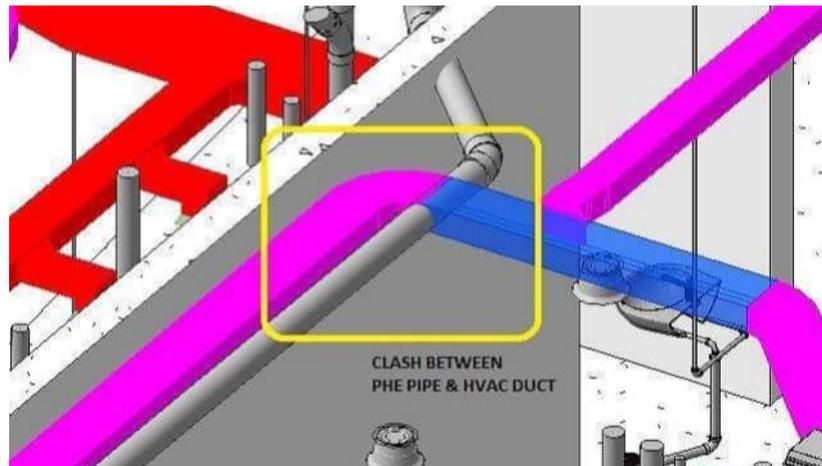


Abbildung 4: : Clash Detection (Srinsoft Inc, 2024)

BIM Level 3:

- Beschreibung: Level 3 ist der angestrebte Idealzustand, auch bekannt als "iBIM"⁹. Hier gibt es ein vollständig integriertes Modell, das in Echtzeit von allen Beteiligten gemeinsam genutzt wird.
- Merkmale: Ein einziges, koordiniertes 3D-Modell, auf das alle Beteiligten in Echtzeit zugreifen können. Vollständige Integration aller Prozesse, Daten und Systeme. Es gibt eine umfassende Zusammenarbeit in einer gemeinsamen Datenumgebung (CDE) mit einheitlichen Standards und Protokollen.

BIM Level 3 wird oft als die Zukunft des Bauens angesehen, da es das höchste Maß an Effizienz und Integration verspricht. Der Übergang von Level 2 zu Level 3 erfordert jedoch erhebliche Investitionen in Technologie, Schulungen und den Wandel von Unternehmensprozessen. (Zieliński and Wójtowicz, no date)

3.2.2 Vorteile von BIM

Die Implementierung von Building Information Modeling (BIM) in der Bauindustrie bringt eine Vielzahl an Vorteilen mit sich, die verschiedene Aspekte der Effizienz, Zusammenarbeit und Nachhaltigkeit betreffen:

Effizienzsteigerung und Zeitersparnis:

Durch die Integration aller relevanten Informationen in einem digitalen Modell ermöglicht BIM eine effizientere Planung und Ausführung. Dies führt zu kürzeren Planungs- und Bauzeiten und minimiert Ineffizienzen in allen Phasen des Bauprozesses (Amade *et al.*, 2018; Georgiadou, 2019).

⁹ integrated BIM

Verbesserte Zusammenarbeit und Kommunikation:

BIM fördert die Zusammenarbeit zwischen unterschiedlichen Disziplinen wie Architekten, Ingenieuren und Bauunternehmern durch ein gemeinsames Modell. Dies reduziert Missverständnisse und verbessert die Koordination, was zu einer genaueren Kostenschätzung beiträgt und den Projektablauf insgesamt erleichtert (Amade *et al.*, 2018; DIAZ, 2016; Georgiadou, 2019).

Qualitätssicherung und Fehlerreduktion:

Die präzise Modellierung und frühzeitige Fehlererkennung, die BIM bietet, führt zu einer höheren Bauqualität und verringert die Notwendigkeit für Nacharbeiten. Zudem unterstützt das Echtzeit-Datenmanagement eine termingerechte Lieferung und verbessert die Gesamtqualität des Bauprojekts (Amade *et al.*, 2018; DIAZ, 2016; Georgiadou, 2019).

Unterstützung nachhaltiger Baupraktiken:

BIM erleichtert die Integration von Energieanalysen und umweltfreundlichen Designstrategien, was zur Energieeffizienz und Nachhaltigkeit von Bauprojekten beiträgt. So können energieeffiziente Lösungen in den Entwurfsprozess eingebracht und ihre Auswirkungen auf das gesamte Projekt bewertet werden (Amade *et al.*, 2018; DIAZ, 2016).

Erleichterte Visualisierung und langfristige Effizienz:

Die 3D-Visualisierung, die BIM ermöglicht, bietet allen Projektbeteiligten einen besseren Überblick, fördert das Verständnis und verbessert die Kommunikation. Dies unterstützt eine langfristige Effizienz im Lebenszyklusmanagement und trägt zur nachhaltigen Umsetzung der Projekte bei (Georgiadou, 2019).

3.2.3 Herausforderungen und Barrieren

Die Implementierung von Building Information Modeling (BIM) steht vor erheblichen technischen und organisatorischen Herausforderungen. Ein zentrales Problem sind Interoperabilitätsprobleme, die durch unterschiedliche Datenformate und Softwarelösungen entstehen und zu Informationsverlusten sowie ineffizientem Datenaustausch führen (Kinaber *et al.*, 2023; Safari and AzariJafari, 2021). Auch der Mangel an standardisierten Austauschformaten erschwert die Integration von BIM in komplexe Analyseverfahren wie Lebenszyklusanalysen (LCA¹⁰). Zudem mangelt es häufig an qualifiziertem Personal mit

¹⁰ Eine Lebenszyklusanalyse (auch bekannt als Umweltbilanz, Ökobilanz oder englisch Life Cycle Assessment, LCA) ist eine systematische Methode zur Bewertung der potenziellen Umweltwirkungen und der Energiebilanz eines Produkts über dessen gesamten Lebensweg. Dies umfasst alle Phasen von der Rohstoffgewinnung über die Produktion und Nutzung bis hin zur Entsorgung.

Die Analyse berücksichtigt sämtliche Umweltwirkungen, wie die Entnahme von Ressourcen (z. B. Erze, Rohöl) und die Emissionen in die Umwelt (z. B. Abfälle, Kohlendioxidemissionen). Ziel ist es, die Umweltauswirkungen eines Produkts zu minimieren und nachhaltigere Entscheidungen zu treffen. Quelle: Ausberg, L. *et al.* (2015).

den erforderlichen digitalen Fähigkeiten, was die Anwendung von BIM weiter behindert (Farouk *et al.*, 2023; Kineber *et al.*, 2023).

Hinzu kommen hohe Anfangsinvestitionen in Software und Hardware sowie rechtliche Unsicherheiten hinsichtlich der Datenverantwortung. In vielen Ländern fehlen nationale BIM-Standards und staatliche Unterstützung, insbesondere in Entwicklungsländern, was die umfassende Einführung der Technologie zusätzlich erschwert. Auch der Widerstand gegen Veränderungen und die zögerliche Anpassung langjähriger Fachkräfte an die neue Technologie stellen bedeutende Hindernisse dar, die die Produktivität beeinträchtigen können (Farouk *et al.*, 2023).

3.2.4 Anwendungsbeispiele

Projektübersicht

- Name: Len Lye Centre
- Ort: New Plymouth, Neuseeland
- Eröffnung: 2015
- Architekten: Patterson Associates (Architekt Andrew Patterson)
- Besonderheit: Das erste Museum in Neuseeland, das ausschließlich einem Künstler gewidmet ist – dem Filmemacher und Künstler Len Lye.

Architektonische Merkmale

- Design: Die Architektur ist geprägt durch eine auffällige Fassade aus poliertem Edelstahl, die eine Spiegelwirkung erzeugt. Die reflektierende, wellenförmige Oberfläche soll die Dynamik von Lyes Kunst und seinen Fokus auf Bewegung und Licht widerspiegeln.
- Materialien: Neben der Edelstahlfassade sind Beton und Glas zentrale Baumaterialien, um eine minimalistische und dennoch wirkungsvolle Struktur zu schaffen.
- Nachhaltigkeit: Die Materialien wurden so gewählt, dass sie langlebig sind und geringeren Wartungsaufwand erfordern.



Abbildung 5: Len Lye Centre (NEMETSCHEK 2024)

Einsatz von BIM im Projekt

- **Planung und Visualisierung:** BIM ermöglichte es dem Architektenteam, das komplexe Design der Fassade in der digitalen Modellierungsphase genau zu erfassen. Dies half dabei, die Wellenform der Edelstahlpaneele präzise zu gestalten und sicherzustellen, dass sie bei unterschiedlichen Lichtverhältnissen die gewünschte Wirkung erzielen.
- **Kollaboration und Koordination:** Durch BIM konnten verschiedene Disziplinen, wie Architekten, Ingenieure und Bauunternehmen, in Echtzeit am gleichen Modell arbeiten und Änderungen sofort nachvollziehen. Dies vereinfachte die Zusammenarbeit und reduzierte potenzielle Fehler.
- **Kostenkontrolle und Zeiteffizienz:** BIM unterstützte das Projektmanagement und ermöglichte eine genaue Kostenschätzung und Zeitplanung. Durch die digitale Modellierung konnten Optimierungen im Bauablauf vorgenommen werden, um das komplexe Design effizient umzusetzen.
- **Facility Management:** Das digitale Modell dient als Grundlage für das zukünftige Facility Management und die Wartung des Gebäudes. Da die Edelstahlfassade pflegeintensiv ist, kann BIM helfen, Wartungsintervalle effizienter zu planen.

Bedeutung des BIM-Einsatzes

- **Vermeidung von Planungsfehlern:** Aufgrund der einzigartigen Fassade und des speziellen Designs wären ohne BIM potenzielle Konstruktionsfehler oder Abweichungen zwischen Planung und Realität wahrscheinlicher gewesen.

- Effiziente Umsetzung von Designideen: BIM ermöglichte die präzise Realisierung des visionären Designs, das eng an die Philosophie und Ästhetik von Len Lyes Kunst anknüpft.
- Zukunftssicherheit: Das digitale Modell bietet eine Grundlage, auf der zukünftige Renovierungen oder Anpassungen effizient geplant und umgesetzt werden können.

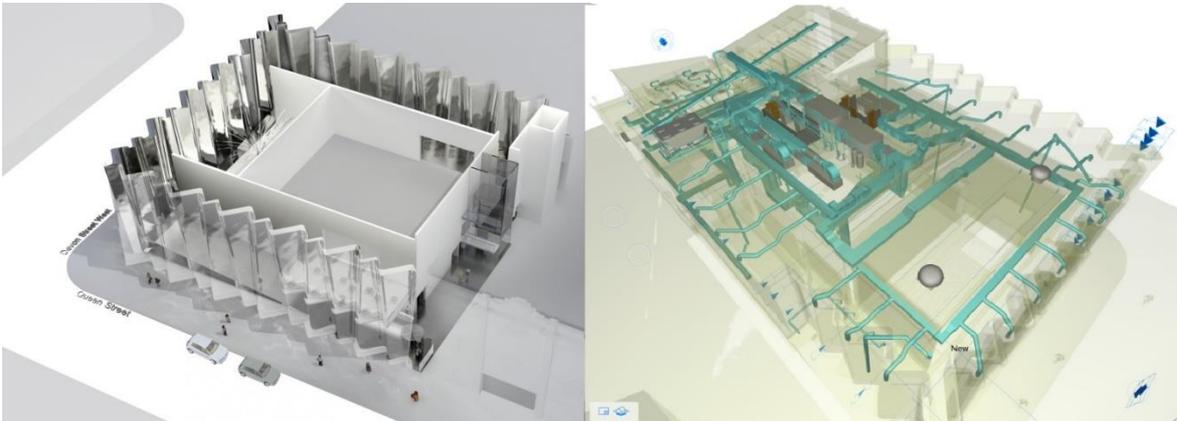


Abbildung 6: Planung in BIM (NEMETSCHKE 2024)

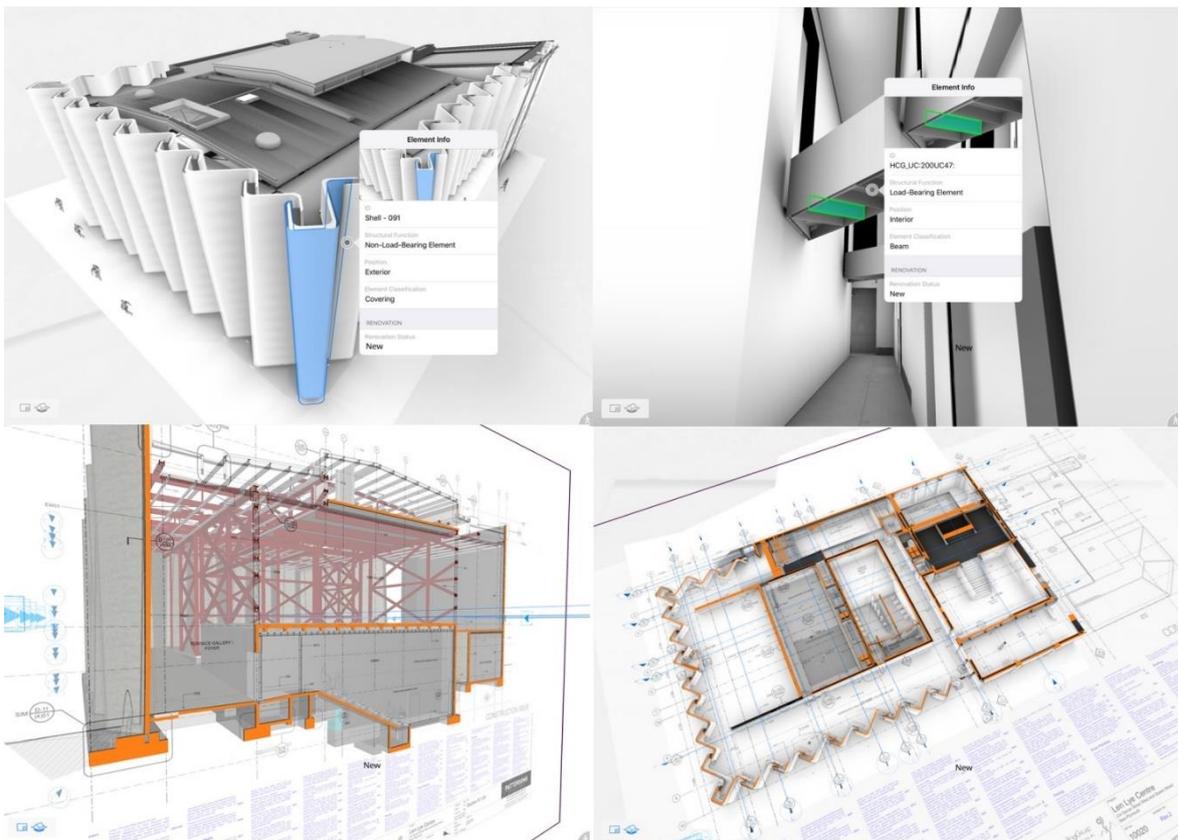


Abbildung 7: Kommunikation und Informationsaustausch in BIM (NEMETSCHKE 2024)

3.3 Einsatz von IoT (Internet of Things)

Das Internet der Dinge (IoT) revolutioniert die Bauindustrie, indem es eine neue Ebene der Vernetzung und Automatisierung einführt. Durch die Integration von Sensoren und intelligenten Geräten in den Bauprozess können Unternehmen präzise Daten in Echtzeit erfassen und analysieren, was zu einer erheblichen Verbesserung der Effizienz, Sicherheit und Ressourcennutzung führt (Oesterreich and Teuteberg, 2016). In diesem Abschnitt wird erläutert, wie IoT im Bauwesen angewendet wird, welche Werte es bietet und welche Herausforderungen bei seiner Implementierung auftreten können.

3.3.1 Definition und Konzepte

Das Internet der Dinge (IoT) bezieht sich auf die Vernetzung physischer Objekte, die durch Sensoren, Software und andere Technologien miteinander verbunden sind, um Daten in Echtzeit zu sammeln und auszutauschen. Im Bauwesen ermöglicht IoT die Überwachung und Steuerung von Geräten, Maschinen und Materialien über vernetzte Systeme. Diese Vernetzung bietet eine nahtlose Integration von Bauprozessen, indem es Daten von Sensoren auf Baustellen sammelt, die dann für die Überwachung des Fortschritts, die Analyse von Umweltbedingungen und die Wartung von Maschinen genutzt werden. Die Fähigkeit, Daten in Echtzeit zu erfassen, ermöglicht eine dynamische und präzise Steuerung von Bauprojekten, was zu einer erheblichen Effizienzsteigerung führt (Gubbi *et al.*, 2013).

3.3.2 Anwendungsbereiche

Der Einsatz von IoT in der Bauindustrie erstreckt sich über verschiedene Phasen des Bauprozesses. In der Planungs- und Bauphase werden Sensoren eingesetzt, um den Baufortschritt zu überwachen und die Materialverfügbarkeit zu prüfen. Intelligente Geräte können Echtzeit-Feedback über den Zustand von Bauwerken geben, sodass bei Abweichungen sofortige Korrekturmaßnahmen ergriffen werden können (Woodhead, Stephenson and Morrey, 2018). Auf Baustellen tragen IoT-basierte Systeme zur Erhöhung der Sicherheit bei, indem sie die Bewegung von Arbeitern und Maschinen verfolgen und potenzielle Gefahrenquellen identifizieren. Darüber hinaus werden IoT-Systeme für die vorausschauende Wartung von Maschinen eingesetzt, um Ausfallzeiten zu minimieren und die Lebensdauer von Anlagen zu verlängern. Auch das Ressourcenmanagement profitiert von IoT, indem die effiziente Nutzung von Materialien und Energie optimiert wird, was zu erheblichen Kosteneinsparungen führen kann (Oesterreich and Teuteberg, 2016).

Nach der Ausführung eines Bauprojekts bleibt das Internet der Dinge (IoT) ein entscheidendes Werkzeug für das Facility Management und den laufenden Betrieb des Gebäudes oder der Infrastruktur. IoT-Sensoren können kontinuierlich den Zustand von Bauwerken

überwachen, um potenzielle Probleme frühzeitig zu erkennen und vorausschauende Wartungsmaßnahmen zu ermöglichen. Diese Sensoren sammeln Daten zu Temperatur, Feuchtigkeit, Energieverbrauch und anderen relevanten Parametern, was nicht nur die Betriebseffizienz erhöht, sondern auch die Lebenszykluskosten senkt. Zudem ermöglicht IoT die Optimierung des Nutzerkomforts durch intelligente Steuerungssysteme, die die Umgebungsbedingungen in Echtzeit anpassen. Dies führt zu einer verbesserten Ressourcennutzung und trägt zur Nachhaltigkeit bei, indem Energieeinsparungen realisiert werden. Die Integration von IoT in den langfristigen Betrieb eines Gebäudes oder einer Infrastruktur schafft somit eine Grundlage für kontinuierliche Effizienzsteigerungen und trägt erheblich zur Verlängerung der Lebensdauer der Anlagen bei (O'Dwyer *et al.*, 2019).

Ein anschauliches Beispiel für den Einsatz von IoT in der Bauindustrie ist das Crossrail-Projekt in London, auch bekannt als die „Elizabeth Line“. Dieses Großprojekt zeigt deutlich die Vorteile des Einsatzes von IoT zur Effizienzsteigerung und Risikominimierung.

Projektübersicht

- Name: Crossrail (Elizabeth Line)
- Ort: London, Großbritannien
- Start: Baubeginn 2009, Betrieb seit 2022
- Projektumfang: Eine 118 Kilometer lange Bahnstrecke, die London und die umliegenden Regionen verbindet, mit über 40 Stationen.

Einsatz von IoT im Projekt

- Echtzeit-Überwachung: Über 250.000 IoT-Sensoren wurden auf Baustellen und Tunneln installiert, um die Betriebsbedingungen in Echtzeit zu überwachen. Diese Sensoren lieferten kontinuierlich Daten über Feuchtigkeit, Temperatur, Erschütterungen und strukturelle Belastungen.
- Risikomanagement: IoT ermöglichte die frühzeitige Erkennung von Problemen, etwa Spannungen im Tunnelbett oder Materialverschleiß, wodurch gezielte Gegenmaßnahmen eingeleitet werden konnten.
- Optimierung des Bauablaufs: IoT-Sensoren lieferten präzise Daten zur Position und zum Zustand von Baumaschinen und Materialien. So konnten Lieferketten optimiert und Bauprozesse effizient geplant werden.
- Sicherheitsmanagement: Der Einsatz von IoT-Sensoren ermöglichte eine genaue Kontrolle der Luftqualität und der Vibrationspegel im Tunnel, was zu einem sichereren Arbeitsumfeld für die Arbeiter beitrug.

3.3.3 Vorteile des IoT

Die Integration von IoT in Bauprojekte bietet zahlreiche Nutzen. Einer der wesentlichen Vorteile ist die Verbesserung der Entscheidungsfindung durch den Zugang zu präzisen und aktuellen Daten. Diese Daten ermöglichen eine fundierte Planung und Durchführung von Bauprojekten, was die Effizienz steigert und Kosten senkt. Zudem trägt IoT zur Optimierung der Ressourcennutzung bei, indem es den Materialverbrauch überwacht und den Energieeinsatz steuert (Perera *et al.*, 2014). Durch die vorausschauende Wartung und die Überwachung von Maschinenzuständen kann IoT Ausfälle vermeiden und die Sicherheit auf Baustellen erheblich verbessern (Lee, Kao and Yang, 2014). Insgesamt führt der Einsatz von IoT zu einer höheren Effizienz, Sicherheit und Nachhaltigkeit in Bauprojekten.

3.3.4 Herausforderungen

Den Vorteilen zum Trotz gibt es erhebliche Herausforderungen bei der Integration von IoT in die Bauindustrie. Eine der größten Herausforderungen ist die Komplexität der Datenintegration, da Daten aus verschiedenen Quellen und Systemen zusammengeführt werden müssen, um nützliche Informationen zu erzeugen (Lee and Lee, 2015). Datenschutz ist ebenfalls ein zentrales Thema, da die kontinuierliche Erfassung und Verarbeitung von Daten auf Baustellen Sicherheitsrisiken birgt. Zudem erfordert die Implementierung von IoT-Systemen hohe Anfangsinvestitionen in Technologie und Infrastruktur, was für viele Bauunternehmen eine Hürde darstellt. Schließlich erfordert die Einführung solcher Technologien eine umfassende Schulung der Mitarbeiter, um sicherzustellen, dass die neuen Systeme effektiv genutzt werden können (Elkhodr, Shahrestani and Cheung, 2016).

3.4 Automatisierung und Robotik im Bauwesen

Die Automatisierung und der Einsatz von Robotik im Bauwesen spielen eine zunehmend wichtige Rolle bei der Verbesserung der Effizienz, Sicherheit und Qualität von Bauprojekten (Zhou, Whyte and Sacks, 2012). In diesem Abschnitt wird untersucht, wie diese Technologien das Bauwesen transformieren, welche spezifischen Anwendungen sie haben und welche Gewinne und Herausforderungen mit ihrer Implementierung verbunden sind.

3.4.1 Definition und Überblick

Automatisierung im Bauwesen bezieht sich auf den Einsatz von Technologien, die manuelle Prozesse mechanisieren und optimieren, um die Effizienz und Präzision von Bauaktivitäten zu steigern. Dazu gehört der Einsatz von Maschinen und Software, die Aufgaben ohne oder mit minimalem menschlichem Eingriff ausführen können. Robotik hingegen bezieht sich auf die Anwendung von autonomen oder ferngesteuerten Maschinen, die spezifische

Bauaufgaben durchführen. Zu den aktuell eingesetzten automatisierten Systemen und Robotern im Bauwesen gehören Maschinen für das Mauern, Betonieren, Verputzen sowie der Einsatz von Drohnen zur Überwachung und Inspektion von Baustellen (Davila Delgado *et al.*, 2019).

Die Bandbreite der Automatisierung reicht von einfachen Maschinen, die wiederholbare Aufgaben ausführen, bis hin zu komplexen Robotern, die in der Lage sind, auf unvorhergesehene Ereignisse auf der Baustelle zu reagieren. Beispiele für solche Technologien sind Mauerroboter, die präzise und gleichmäßige Ziegelmauern setzen können, oder Betonierroboter, die in der Lage sind, große Flächen in kürzester Zeit zu betonieren. Zudem werden Drohnen zunehmend zur Überwachung von Baufortschritten und zur Inspektion von schwer zugänglichen Bereichen eingesetzt, was die Sicherheit und Effizienz erheblich verbessert (Li *et al.*, 2021).

3.4.2 Anwendungsbeispiele

Automatisierung und Robotik finden in verschiedenen Bereichen des Bauwesens Anwendung. Ein bekanntes Beispiel ist der Einsatz von Mauerrobotern, die präzise Ziegelsteine setzen und somit eine konsistente Qualität gewährleisten. Diese Roboter sind in der Lage, schneller und gleichmäßiger zu arbeiten als menschliche Arbeiter, wodurch die Bauzeit erheblich verkürzt wird. Betonierroboter sind ein weiteres Beispiel, bei dem große Betonflächen effizient und mit hoher Präzision gegossen werden. Diese Roboter minimieren menschliche Fehler und verbessern die Oberflächenqualität (Saidi, Bock and Georgoulas, 2016).

Ein weiteres Anwendungsfeld ist die Nutzung von Verputzrobotern, die Wandflächen automatisiert verputzen und so eine gleichmäßige Beschichtung gewährleisten. Diese Roboter arbeiten schneller und effizienter als manuelle Methoden und tragen dazu bei, die Bauzeit zu reduzieren. Darüber hinaus kommen Drohnen zunehmend bei der Überwachung von Baustellen zum Einsatz. Sie bieten eine kostengünstige Möglichkeit, den Baufortschritt zu dokumentieren, Inspektionen durchzuführen und schwer zugängliche Bereiche sicher zu überwachen (Pan and Zhang, 2021).

3.4.3 Vorteile der Automatisierung

Der Einsatz von Automatisierung und Robotik im Bauwesen bietet mehrere Pluspunkte, die zur Effizienzsteigerung und Verbesserung der Bauqualität beitragen. Ein zentraler Vorteil ist die erhebliche Verkürzung der Bauzeit. Automatisierte Systeme können kontinuierlich arbeiten, wodurch Bauprojekte schneller abgeschlossen werden können. Dies führt auch

zu Kosteneinsparungen, da die Arbeitskosten reduziert werden und die Bauzeit verkürzt wird (Zhang *et al.*, 2013).

Ein weiterer Vorteil ist die Verbesserung der Sicherheit auf Baustellen. Roboter können in gefährlichen oder schwer zugänglichen Bereichen eingesetzt werden, wodurch das Risiko für menschliche Arbeiter minimiert wird. Zudem reduzieren automatisierte Systeme die Wahrscheinlichkeit von menschlichen Fehlern, was die Qualität der Bauausführung erhöht. Durch die hohe Präzision und Wiederholbarkeit von Robotern können Bauprojekte mit höherer Konsistenz und Qualität durchgeführt werden (Manuel Davila Delgado and Oyedele, 2022).

3.4.4 Herausforderungen und Risiken

Obwohl zahlreiche Vorteile die Automatisierung vorantreiben, wird sie durch Herausforderungen und Risiken bei der Einführung von Automatisierung und Robotik im Bauwesen gebremst. Eine der größten Hürden sind die hohen Anfangsinvestitionen, die für die Anschaffung und Implementierung dieser Technologien erforderlich sind. Viele Unternehmen zögern, in Automatisierung zu investieren, da die Amortisationszeit oft lang ist und die Kosten hoch sind (Manuel Davila Delgado and Oyedele, 2022).

Zudem erfordert der Einsatz von automatisierten Systemen und Robotern spezialisierte Fachkenntnisse. Es besteht ein erheblicher Schulungsbedarf, um sicherzustellen, dass die Mitarbeiter in der Lage sind, diese Technologien effektiv zu bedienen und zu warten. Ein weiteres Risiko ist die potenzielle Gefährdung von Arbeitsplätzen, da durch die Automatisierung weniger menschliche Arbeitskräfte benötigt werden. Dies kann zu Widerständen und Bedenken hinsichtlich der Arbeitsplatzsicherheit führen, insbesondere in Bereichen, die stark von manueller Arbeit abhängig sind (Pan and Zhang, 2021).

Schließlich gibt es technische Herausforderungen, wie die Integration von Robotern in bestehende Bauprozesse und die Anpassung an unvorhergesehene Ereignisse auf der Baustelle. Die Komplexität solcher Systeme kann dazu führen, dass unerwartete Probleme auftreten, die die Implementierung erschweren und die Effizienz beeinträchtigen (Oesterreich and Teuteberg, 2016).

3.5 Anwendungen von Künstlicher Intelligenz (KI)

Der Einsatz von Künstlicher Intelligenz (KI) in der Bauindustrie gewinnt zunehmend an Bedeutung, da er erhebliche Potenziale zur Effizienzsteigerung, Risikominderung und Optimierung von Bauprozessen bietet (Hashim Mohammed *et al.*, 2022). Dieser Abschnitt beleuchtet die Grundlagen von KI, deren spezifische Anwendungsfelder im Bauwesen, die

damit verbundenen Vorteile sowie die Herausforderungen, die mit der Implementierung dieser Technologien einhergehen.

3.5.1 Grundlagen der KI

Künstliche Intelligenz (KI) bezieht sich auf die Fähigkeit von Maschinen und Computersystemen, Aufgaben auszuführen, die typischerweise menschliche Intelligenz erfordern. Dazu gehören das Lernen aus Erfahrung, das Erkennen von Mustern und das Treffen von Entscheidungen. In der Bauindustrie werden verschiedene Arten von KI-Techniken eingesetzt, darunter maschinelles Lernen, Deep Learning und neuronale Netze. Maschinelles Lernen ermöglicht es Systemen, aus großen Datenmengen zu lernen und Vorhersagen zu treffen, ohne explizit programmiert zu sein (Russell and Norvig, 2021). Deep Learning, eine spezielle Form des maschinellen Lernens, nutzt tief geschichtete neuronale Netze, um komplexe Muster in Daten zu erkennen, was besonders in der Bild- und Spracherkennung Anwendung findet (LeCun, Bengio and Hinton, 2015).

Diese Techniken werden in der Bauindustrie verwendet, um intelligente Systeme zu entwickeln, die große Datenmengen analysieren und wertvolle Erkenntnisse gewinnen können. Diese Erkenntnisse unterstützen Bauleiter und Ingenieure dabei, fundierte Entscheidungen zu treffen und die Effizienz von Bauprojekten signifikant zu steigern. Die fortschreitende Digitalisierung der Bauindustrie generiert eine Vielzahl von Daten, die durch KI-Techniken verarbeitet werden können. Diese Techniken werden beispielsweise eingesetzt, um Baukosten präziser zu schätzen, den Baufortschritt effizienter zu überwachen und Risiken effektiver zu minimieren (Pan and Zhang, 2021).

3.5.2 Anwendungsfelder

KI wird in der Bauindustrie in verschiedenen Bereichen eingesetzt, um Prozesse zu optimieren und die Leistung von Bauprojekten zu verbessern. Ein wesentliches Anwendungsfeld ist die Vorhersage von Baukosten und Zeitplänen. KI-Algorithmen analysieren historische Projektdaten, um genaue Schätzungen für zukünftige Projekte zu erstellen. Diese Schätzungen berücksichtigen eine Vielzahl von Faktoren, einschließlich Materialkosten, Arbeitskosten und potenziellen Verzögerungen, was zu einer realistischeren und präziseren Planung führt (Ujong, Mbadike and Alaneme, 2022).

Ein weiteres Anwendungsfeld ist die Optimierung von Bauabläufen durch die Integration von Künstlicher Intelligenz (KI) in Kombination mit Building Information Modeling (BIM) und dem Internet der Dinge (IoT). KI-Systeme sind in der Lage, Bauprozesse in Echtzeit zu überwachen und dynamische Anpassungen vorzunehmen, um die Effizienz zu maximieren. Dies umfasst die Optimierung von Ressourcen, die Reduzierung von Ausfallzeiten und die

Verbesserung der Arbeitsabläufe auf der Baustelle. Durch die Integration von IoT-Sensordaten in BIM-Modelle können KI-gestützte Systeme präzise vorausschauende Wartungspläne erstellen, die auf den spezifischen Bedingungen eines Bauwerks basieren. Dadurch werden potenzielle Ausfälle verhindert und die Lebensdauer der Anlagen erheblich verlängert. Diese Technologien arbeiten zusammen, um eine nahtlose und kontinuierliche Überwachung und Optimierung von Bauprojekten zu gewährleisten, was zu einer insgesamt effizienteren und sichereren Bauumgebung führt (Hashim Mohammed *et al.*, 2022).

Darüber hinaus spielt Künstliche Intelligenz (KI) eine entscheidende Rolle bei der Verbesserung der Sicherheit auf Baustellen. Durch die Analyse von Echtzeitbildern und Videos, die über Überwachungssysteme erfasst werden, kann KI potenzielle Gefahrenquellen frühzeitig erkennen und sofortige Warnungen ausgeben, um Unfälle zu verhindern. Diese Systeme sind in der Lage, die Einhaltung von Sicherheitsvorschriften kontinuierlich zu überwachen und sicherzustellen, dass die Arbeiter alle erforderlichen Schutzmaßnahmen befolgen. Insbesondere im Zusammenhang mit Building Information Modeling (BIM) ermöglicht KI eine automatisierte Überprüfung der Sicherheit durch die Integration von Regelwerken, die Gefahren identifizieren und Schutzmaßnahmen in Bauplänen visualisieren, um ein sichereres Arbeitsumfeld zu schaffen (Zhang *et al.*, 2013).

Beispiel für KI in der Bauindustrie: Hong Kong International Airport (HKIA) Terminal 2 Expansion

- **KI-Anwendung:** Das Projekt nutzte KI-gestützte Videoüberwachung und Bildverarbeitung, um Baufortschritte in Echtzeit zu überwachen und den Ressourcenbedarf vorherzusagen. Die KI analysierte Bilddaten, erkannte Muster im Bauablauf und identifizierte potenzielle Probleme, noch bevor sie eintraten.
- **Vorteile der KI:** Diese Anwendung führte zu einer schnelleren Erkennung von Verzögerungen, einer besseren Koordination der Arbeitsabläufe und einer Reduzierung der Betriebskosten.

3.5.3 Vorteile der KI

Der Einsatz von Künstlicher Intelligenz (KI) in der Bauindustrie bietet zahlreiche Vorteile, die zur Verbesserung der Entscheidungsfindung und der Effizienz von Bauprojekten beitragen. Einer der größten Vorteile ist die Fähigkeit von KI, große Mengen historischer Daten zu analysieren und fundierte Vorhersagen zu treffen. Dies ermöglicht eine genauere Planung und ein effektiveres Risikomanagement, da potenzielle Probleme frühzeitig erkannt und entsprechende Maßnahmen rechtzeitig ergriffen werden können. Die fortschreitende Digitalisierung und der Einsatz von Big Data-Technologien im Bauwesen verstärken diesen

Nutzen zusätzlich, indem sie umfassende Datenanalysen und prädiktive Modelle ermöglichen (Bilal *et al.*, 2016).

Künstliche Intelligenz (KI) trägt maßgeblich zur Reduzierung von Fehlern und zur Optimierung von Bauprozessen bei. Durch die kontinuierliche Überwachung und Analyse großer Datenmengen sind KI-Systeme in der Lage, ineffiziente Prozesse zu identifizieren und Verbesserungsvorschläge zu unterbreiten. Dies ermöglicht eine effizientere Ressourcennutzung und führt zu einer höheren Produktivität auf der Baustelle. Darüber hinaus kann KI die Qualität von Bauprojekten signifikant steigern, indem sie sicherstellt, dass alle Arbeiten den festgelegten Standards entsprechen. Die präzise Überwachung und Analyse durch KI-Systeme tragen dazu bei, Abweichungen frühzeitig zu erkennen und notwendige Korrekturen rechtzeitig vorzunehmen (Pan and Zhang, 2021).

Ein weiterer wichtiger Vorteil des Einsatzes von Künstlicher Intelligenz (KI) im Bauwesen ist die signifikante Verbesserung der Sicherheit auf Baustellen. KI-Systeme sind in der Lage, potenzielle Gefahrenquellen in Echtzeit zu identifizieren und sofortige Maßnahmen vorzuschlagen, um Unfälle zu vermeiden. Dies erhöht nicht allein die Sicherheit der Arbeiter erheblich, sondern trägt ebenso zur Reduzierung von Versicherungs- und Haftungskosten bei, indem Risiken frühzeitig erkannt und gemindert werden (Zhang *et al.*, 2013).

3.5.4 Herausforderungen

Selbst wenn Künstlicher Intelligenz (KI) viele Vorteile in der Bauindustrie mitbringt, belasten Herausforderungen ihren Einsatz, da es zahlreiche Hürden zu überwinden gilt. Eine der größten Herausforderungen ist die Qualität der Daten, die zur Schulung von KI-Modellen verwendet werden. Da KI-Systeme stark von der Genauigkeit und Vollständigkeit der Daten abhängen, können unvollständige oder fehlerhafte Daten zu ungenauen Vorhersagen und suboptimalen Entscheidungen führen. Diese Herausforderung wird durch die hohe Komplexität und Fragmentierung der Bauprojekte verstärkt, was die Konsistenz und Zuverlässigkeit der Daten weiter beeinträchtigen kann (Oesterreich and Teuteberg, 2016).

Ein weiteres Problem ist die Integration von KI in bestehende Systeme und Prozesse. Viele Bauunternehmen verfügen nicht über die notwendige Infrastruktur, um KI-Technologien effektiv zu implementieren. Dies erfordert erhebliche Investitionen in Hardware, Software und Schulungen, was für kleinere Unternehmen oft eine Hürde darstellt. Zudem gibt es ethische Überlegungen, insbesondere im Hinblick auf die Automatisierung von Arbeitsplätzen und den Datenschutz. Der Einsatz von KI könnte zu Arbeitsplatzverlusten führen, da viele Aufgaben automatisiert werden könnten. Darüber hinaus müssen Bauunternehmen

sicherstellen, dass die Daten, die zur Schulung von KI-Modellen verwendet werden, sicher und vertraulich behandelt werden (Russell and Norvig, 2021).

4 Nachhaltigkeit in der Bauindustrie

4.1 Einführung in die nachhaltige Transformation der Bauindustrie

Die Bauindustrie steht vor einer signifikanten Umwälzung, da sie zunehmend in den Fokus globaler Nachhaltigkeitsbestrebungen rückt. Angesichts des erheblichen Beitrags der Bauwirtschaft zu den globalen CO₂-Emissionen und dem Ressourcenverbrauch ist die nachhaltige Transformation dieser Branche unvermeidlich (GlobalABC, 2023). Dieser Abschnitt untersucht die Bedeutung der nachhaltigen Transformation in der Bauindustrie, die treibenden Kräfte hinter dieser Entwicklung, den aktuellen Stand der nachhaltigen Baupraxis sowie die Ziele, die mit der nachhaltigen Transformation erreicht werden sollen.

4.1.1 Bedeutung der nachhaltigen Transformation in der Bauindustrie

Die nachhaltige Transformation der Bauindustrie ist von zentraler Bedeutung, da die Branche eine wesentliche Rolle bei der Bewältigung globaler Umweltprobleme spielt. Die Bauindustrie, wie bereits in Einleitung erwähnt wurde, ist für etwa 37 % der weltweiten CO₂-Emissionen verantwortlich, wovon ein Großteil auf den Betrieb von Gebäuden entfällt (GlobalABC, 2023). Darüber hinaus verbraucht die Bauindustrie immense Mengen an natürlichen Ressourcen und erzeugt erhebliche Mengen an Abfall. Die Notwendigkeit, diese negativen Umweltauswirkungen zu reduzieren, zwingt die Branche dazu, nachhaltigere Ansätze zu entwickeln, die sowohl ökologisch als auch ökonomisch tragfähig sind. Die nachhaltige Transformation zielt darauf ab, Bauprozesse und -praktiken so zu gestalten, dass sie weniger ressourcenintensiv und umweltbelastend sind, und gleichzeitig zur sozialen und wirtschaftlichen Entwicklung beitragen (Berardi, 2013).

4.1.2 Treiber der nachhaltigen Transformation in der Bauindustrie

Verschiedene Faktoren treiben die nachhaltige Transformation in der Bauindustrie voran. Einer der wichtigsten Treiber ist der regulatorische Druck, der durch nationale und internationale Vorschriften und Richtlinien zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen und zur Förderung nachhaltiger Praktiken ausgeübt wird (Malmqvist *et al.*, 2011). Darüber hinaus tragen wirtschaftliche Überlegungen wesentlich dazu bei, da nachhaltige Baupraktiken häufig zu Kosteneinsparungen führen können, insbesondere durch die effizientere Nutzung von Ressourcen und die Reduktion von Abfall. Der technologische Fortschritt, insbesondere in den Bereichen Digitalisierung und Materialwissenschaft, ermöglicht es der Bauindustrie, innovative und nachhaltigere Bauweisen zu entwickeln (Oesterreich and Teuteberg, 2016). Schließlich ist auch das gestiegene Bewusstsein der Gesellschaft für Umwelt- und

Klimafragen ein bedeutender Treiber, der die Nachfrage nach umweltfreundlicheren Bauprojekten erhöht (Häkkinen and Belloni, 2011).

4.1.3 Aktueller Stand der nachhaltigen Baupraxis

Der aktuelle Stand der nachhaltigen Baupraxis variiert stark je nach Region und spezifischem Bauprojekt. In vielen Ländern werden nachhaltige Bauprojekte bereits umgesetzt, wobei Konzepte wie energieeffiziente Gebäude, grüne Materialien und Kreislaufwirtschaft zunehmend an Bedeutung gewinnen (Berardi, 2013). Standards und Zertifizierungen wie LEED¹¹ und BREEAM¹² setzen Maßstäbe für nachhaltiges Bauen und werden weltweit als Benchmark für umweltfreundliche Bauprojekte anerkannt. Trotz dieser Fortschritte gibt es jedoch weiterhin erhebliche Unterschiede in der Umsetzung nachhaltiger Praktiken, insbesondere in Entwicklungs- und Schwellenländern, wo wirtschaftliche und infrastrukturelle Herausforderungen die Einführung nachhaltiger Technologien erschweren (Häkkinen and Belloni, 2011).

In Deutschland schreitet die Bauindustrie auf dem Weg zur nachhaltigen Transformation kontinuierlich voran, unterstützt durch umfassende staatliche Regelungen und Förderprogramme. Das Gebäudeenergiegesetz (GEG), das seit 2020 in Kraft ist, bildet einen wichtigen rechtlichen Rahmen und definiert hohe Energieeffizienzstandards für Neubauten und Bestandsgebäude, um den Energieverbrauch erheblich zu reduzieren und die CO₂-Emissionen zu senken (Hopfensperger and Finsterlin, 2023). Initiativen wie das Deutsche Gütesiegel Nachhaltiges Bauen (DGNB) fördern darüber hinaus die Einführung nachhaltiger Bauweisen und das ressourcenschonende Management entlang des gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks, was zur langfristigen Reduzierung ökologischer Belastungen beiträgt (dgnb.de, 2024). Parallel dazu wurde Building Information Modeling (BIM) für öffentliche Infrastrukturprojekte als digitaler Standard eingeführt, um Effizienz und Transparenz zu erhöhen und die Integration nachhaltiger Strategien zu unterstützen (*Stufenplan Digitales Planen und Bauen 2020*). Durch diese Maßnahmen nimmt Deutschland eine Vorreiterrolle bei der Umsetzung der Twin Transition in der Bauindustrie ein und fördert sowohl die Digitalisierung als auch die Umweltfreundlichkeit der Branche, um eine resiliente und zukunftsfähige Bauwirtschaft zu schaffen.

4.1.4 Ziele der nachhaltigen Transformation in der Bauindustrie

Die Ziele der nachhaltigen Transformation in der Bauindustrie sind vielfältig und umfassen sowohl ökologische als auch ökonomische Aspekte. Ein zentrales Ziel ist die signifikante

¹¹ Leadership in Energy and Environmental Design

¹² Building Research Establishment Environmental Assessment Method

Reduzierung der CO₂-Emissionen, um die Klimaziele zu erreichen und die globale Erwärmung zu begrenzen (GlobalABC, 2023). Darüber hinaus zielt die nachhaltige Transformation darauf ab, den Ressourcenverbrauch zu minimieren, indem Materialien effizienter genutzt und Abfälle reduziert werden. Ein weiteres wichtiges Ziel ist die Förderung der Kreislaufwirtschaft im Bauwesen, bei der der Lebenszyklus von Baumaterialien verlängert und deren Wiederverwertung maximiert wird (Malmqvist *et al.*, 2011). Schließlich strebt die Branche an, Gebäude zu entwickeln, die nicht nur energieeffizient, sondern auch langlebig und anpassungsfähig an zukünftige Anforderungen sind, um langfristige Nachhaltigkeit zu gewährleisten (Berardi, 2013).

4.2 Nachhaltige Baumaterialien und Techniken

Die Bauindustrie ist für einen erheblichen Teil der globalen CO₂-Emissionen und des Ressourcenverbrauchs verantwortlich (GlobalABC, 2023). Vor diesem Hintergrund spielen nachhaltige Baumaterialien und Techniken eine entscheidende Rolle bei der Reduzierung der Umweltbelastung und der Förderung der nachhaltigen Entwicklung. Dieser Abschnitt bietet eine Definition nachhaltiger Baumaterialien und Techniken, untersucht deren Vorteile und Herausforderungen und gibt konkrete Anwendungsbeispiele.

4.2.1 Definition nachhaltiger Baumaterialien und Techniken

Nachhaltige Baumaterialien sind solche, die während ihres gesamten Lebenszyklus – von der Rohstoffgewinnung über die Verarbeitung und Nutzung bis hin zur Entsorgung – minimale negative Auswirkungen auf die Umwelt haben. Dazu zählen Materialien, die energieeffizient hergestellt werden, lokal verfügbar sind und über eine lange Lebensdauer verfügen (Asif, Muneer and Kelley, 2007). Techniken wie die Nutzung von recycelten Materialien, die Verringerung des Energieverbrauchs in der Herstellung und der Einsatz von biologisch abbaubaren oder wiederverwertbaren Materialien zählen zu den zentralen Ansätzen im Bereich nachhaltiger Baumaterialien (Malmqvist *et al.*, 2011).

4.2.2 Vorteile nachhaltiger Baumaterialien und Techniken

Die Verwendung nachhaltiger Baumaterialien und Techniken bietet zahlreiche Vorteile. Zunächst führt sie zu einer signifikanten Reduktion der CO₂-Emissionen und des Energieverbrauchs während des gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks (Zabalza Bri-bián, Aranda Usón and Scarpellini, 2009). Darüber hinaus tragen sie dazu bei, die Ressourcenknappheit zu lindern, indem erneuerbare oder recycelte Materialien genutzt werden. Nachhaltige Baumaterialien verbessern auch die Energieeffizienz von Gebäuden, was langfristig zu Kosteneinsparungen führt. Ein weiterer Vorteil ist die Verbesserung der

Lebensqualität durch die Schaffung gesünderer Innenräume, da nachhaltige Materialien oft weniger Schadstoffe enthalten und die Luftqualität verbessern (Ding, 2008).

4.2.3 Herausforderungen und Barrieren bei der Implementierung

Obgleich die unzählige Vorteile als Anreize zum Verwenden der nachhaltigen Materialien dienen, wird die Implementierung nachhaltiger Baumaterialien und Techniken durch erhebliche Herausforderungen beeinträchtigt. Eine der größten Hürden sind die höheren Anfangskosten vieler nachhaltiger Materialien, die oft die Budgets traditioneller Bauprojekte übersteigen (Zuo and Zhao, 2014). Darüber hinaus erfordert die Einführung nachhaltiger Techniken oft spezielle Fachkenntnisse, die in vielen Bauunternehmen fehlen. Ein weiteres Hindernis ist die begrenzte Verfügbarkeit nachhaltiger Materialien, insbesondere in Entwicklungs- und Schwellenländern, wo die Infrastruktur für ihre Herstellung oder Beschaffung nicht ausreichend entwickelt ist. Schließlich gibt es auch kulturelle und marktbezogene Widerstände, da viele Bauunternehmen an traditionellen Baupraktiken festhalten (Berardi, 2013).

4.2.4 Anwendungsbeispiele nachhaltiger Baumaterialien und Techniken

In der Praxis etablierten sich bereits mehrere nachhaltige Materialien und Techniken. Ein Beispiel ist der Einsatz von recyceltem Beton, der in vielen Bauprojekten zur Reduzierung des CO₂-Ausstoßes und zur Minimierung von Abfall verwendet wird (Kou and Poon, 2012). Ein weiteres innovatives Material ist Lehm, der aufgrund seiner geringen Umweltauswirkungen und seiner Fähigkeit zur Wärmespeicherung in nachhaltigen Bauprojekten immer häufiger eingesetzt wird. Gründächer sind eine weitere nachhaltige Technik, die sowohl die Energieeffizienz von Gebäuden verbessert als auch zur Reduzierung der städtischen Wärmeinseln beiträgt (Getter and Rowe, 2006). Solche Beispiele zeigen, dass die Kombination traditioneller Bauweisen mit modernen nachhaltigen Technologien bereits heute eine realisierbare Option ist.

4.3 Energieeffiziente Gebäude

Energieeffiziente Gebäude spielen eine zentrale Rolle in den globalen Bemühungen, den Energieverbrauch zu senken und den Klimawandel zu bekämpfen. In der Bauindustrie werden zunehmend Technologien und Strategien eingesetzt, um den Energiebedarf von Gebäuden zu minimieren und so die Nachhaltigkeit zu fördern. Dieser Abschnitt untersucht die Definition und Bedeutung energieeffizienter Gebäude, beschreibt die wichtigsten Technologien und Strategien, analysiert die Vorteile und Herausforderungen sowie konkrete Anwendungsbeispiele.

4.3.1 Definition und Bedeutung energieeffizienter Gebäude

Energieeffiziente Gebäude sind Bauwerke, die so konzipiert und betrieben werden, dass sie den Energieverbrauch während ihres gesamten Lebenszyklus minimieren. Dies umfasst sowohl den Betrieb als auch die Herstellung der Baumaterialien. Der Fokus liegt darauf, durch geeignete Planung und technische Lösungen den Bedarf an Heiz-, Kühl-, Beleuchtungs- und Lüftungsenergie drastisch zu senken (Ionescu *et al.*, 2015). Energieeffizienz erfüllt eine entscheidende Funktion bei der Erreichung globaler Klimaziele, da Gebäude etwa 34 % des weltweiten Endenergieverbrauchs ausmachen und erneut ist es zu betonen, dass die Gebäude für rund 37 % der energiebezogenen CO₂-Emissionen verantwortlich sind (GlobalABC, 2023).

4.3.2 Technologien und Strategien für energieeffizientes Bauen

Es gibt eine Vielzahl von Technologien und Strategien, die zur Reduzierung des Energieverbrauchs in Gebäuden beitragen. Eine der wichtigsten Strategien ist die Verbesserung der Wärmedämmung, die sicherstellt, dass weniger Energie für Heizung und Kühlung benötigt wird. Hochleistungsdämmstoffe, energieeffiziente Fenster mit Mehrfachverglasung und die Abdichtung von Gebäudehüllen spielen dabei eine zentrale Rolle (Zuo and Zhao, 2014). Darüber hinaus kommen smarte Technologien zum Einsatz, wie etwa intelligente Thermostate und vernetzte Heizungs-, Lüftungs- und Klimaanlage (HVAC¹³-Systeme), die den Energieverbrauch in Echtzeit anpassen (Pan and Zhang, 2021). Die Integration erneuerbarer Energien, wie z. B. Photovoltaik-Anlagen, ist ebenfalls eine gängige Praxis, um den Bedarf an externen Energiequellen zu verringern und den CO₂-Fußabdruck eines Gebäudes zu minimieren (Ding, 2008).

4.3.3 Vorteile energieeffizienter Gebäude

Energieeffiziente Gebäude bieten eine Vielzahl von Vorteilen. Einer der offensichtlichsten ist die Reduzierung der Betriebskosten durch geringere Energiekosten, was vor allem in gewerblichen Gebäuden zu erheblichen Einsparungen führen kann (Zabalza Bribián, Aranda Usón and Scarpellini, 2009). Zudem tragen energieeffiziente Gebäude dazu bei, den CO₂-Ausstoß zu verringern, was im Einklang mit internationalen Klimazielen steht. Weitere Stärke sind die Verbesserung der Raumluftqualität und des thermischen Komforts, was zu einem besseren Wohlbefinden der Bewohner führt (Ding, 2008). Darüber hinaus können energieeffiziente Gebäude den Wert einer Immobilie erhöhen, da sie als zukunftssichere Investitionen gelten (Zuo and Zhao, 2014).

¹³ Heizung, Lüftung und Klimatisierung, Englisch: Heating, Ventilation and Air Conditioning

4.3.4 Herausforderungen bei der Implementierung

Ungeachtet der zahlreichen Vorteile stehen der Implementierung energieeffizienter Gebäude verschiedene Herausforderungen gegenüber. Eine der größten Hürden sind die höheren Anfangskosten, die mit der Verwendung fortschrittlicher Baumaterialien und Technologien verbunden sind. Diese Kosten können insbesondere in Entwicklungsländern oder in Projekten mit begrenztem Budget abschreckend wirken (Berardi, 2013). Ein weiteres Hindernis ist der Fachkräftemangel im Bereich energieeffizienten Bauens, da es spezialisierte Kenntnisse und Fähigkeiten erfordert, um diese Technologien richtig zu planen und zu installieren (Zuo and Zhao, 2014). Zudem gibt es in vielen Ländern immer noch unzureichende Anreize für Investoren, in energieeffiziente Gebäude zu investieren, obwohl langfristige Einsparungen möglich sind (Zabalza Bribián, Aranda Usón and Scarpellini, 2009).

4.3.5 Anwendungsbeispiele

Energieeffiziente Gebäude sind weltweit zunehmend verbreitet, und es gibt zahlreiche Anwendungsbeispiele, die die Machbarkeit dieser Konzepte demonstrieren. Passivhäuser, die so konzipiert sind, dass sie ihren Energiebedarf hauptsächlich durch passive Energiequellen wie Sonneneinstrahlung decken, sind ein prominentes Beispiel für energieeffizientes Bauen (Berardi, 2013). Ein weiteres Beispiel sind Nullenergiehäuser, die über ein Jahr hinweg genauso viel Energie erzeugen, wie sie verbrauchen, oft durch die Integration von Solarenergie und hocheffizienten Wärmesystemen (Pan and Zhang, 2021). Diese Beispiele verdeutlichen, dass energieeffiziente Gebäude nicht allein technologisch möglich, sondern ebenso wirtschaftlich sinnvoll sind, insbesondere im Hinblick auf die langfristigen Einsparungen bei den Energiekosten.

4.4 Kreislaufwirtschaft im Bauwesen

Die Kreislaufwirtschaft im Bauwesen spielt eine zunehmend wichtige Rolle, um den Ressourcenverbrauch zu senken, Abfall zu reduzieren und nachhaltige Baupraktiken zu fördern. Im Gegensatz zu der traditionellen linearen Wirtschaftsweise, bei der Materialien verwendet und entsorgt werden, zielt die Kreislaufwirtschaft darauf ab, Materialien wiederzuverwenden, zu recyceln und den Lebenszyklus von Bauprodukten zu verlängern (Pomponi and Moncaster, 2017). Dieser Abschnitt erläutert die Prinzipien und Vorteile der Kreislaufwirtschaft im Bauwesen, die damit verbundenen Herausforderungen sowie Strategien und Beispiele für deren erfolgreiche Umsetzung.

4.4.1 Definition und Prinzipien der Kreislaufwirtschaft

Die Kreislaufwirtschaft im Bauwesen basiert auf der Idee, dass Ressourcen und Materialien über ihren gesamten Lebenszyklus hinweg in Kreisläufen gehalten werden, um Abfall zu minimieren und die Ressourceneffizienz zu maximieren. Zu den Grundprinzipien gehören die Vermeidung von Abfall durch die Reduktion von Materialeinsatz, die Wiederverwendung von Baumaterialien sowie das Recycling von Baustoffen am Ende ihrer Lebensdauer (Ghisellini, Cialani and Ulgiati, 2016). Durch die Anwendung der Kreislaufwirtschaft kann der Bauprozess nachhaltiger gestaltet werden, indem Abfälle reduziert und natürliche Ressourcen geschont werden. Im Bauwesen bedeutet dies beispielsweise den Rückbau und die Wiederverwendung von Materialien aus abgerissenen Gebäuden oder den Einsatz von recyceltem Beton und Stahl (Pomponi and Moncaster, 2017).

4.4.2 Vorteile der Kreislaufwirtschaft im Bauwesen

Die Implementierung der Kreislaufwirtschaft im Bauwesen bringt zahlreiche ökologische, ökonomische und soziale Vorteile mit sich. Erstens trägt sie erheblich zur Reduzierung von Abfall und dem schonenden Umgang mit natürlichen Ressourcen bei, indem Materialien mehrfach verwendet oder recycelt werden (Pomponi and Moncaster, 2017). Dadurch werden nicht nur die Rohstoffvorräte geschont, sondern auch die Umweltbelastungen durch die Rohstoffgewinnung und Abfallentsorgung verringert. Ökonomisch gesehen können Unternehmen durch die Reduktion von Abfall und die Wiederverwendung von Materialien Kosten sparen, insbesondere in Bezug auf die Beschaffung und Entsorgung von Materialien (Adams *et al.*, 2017). Zudem bietet die Kreislaufwirtschaft Möglichkeiten, neue Geschäftsfelder zu erschließen, wie z. B. den Handel mit recycelten Baumaterialien oder den Rückbau von Gebäuden. Soziale Gewinne entstehen durch die Schaffung neuer Arbeitsplätze in der Recycling- und Rückbauindustrie sowie durch die Förderung eines bewussteren Umgangs mit Ressourcen in der Gesellschaft (Ghisellini, Cialani and Ulgiati, 2016).

4.4.3 Herausforderungen und Barrieren bei der Umsetzung

Die klaren Vorteile der Kreislaufwirtschaft stehen im Widerspruch zu zahlreichen Herausforderungen bei ihrer Umsetzung im Bauwesen. Eine der größten Barrieren ist der Mangel an Infrastruktur für das Sammeln, Sortieren und Verarbeiten von recycelten Materialien (Khorasanizadeh, Bazargan and McKay, 2018). Viele Städte und Regionen verfügen nicht über die nötigen Kapazitäten, um Baumaterialien effizient zu recyceln, was den Einsatz von Kreislaufwirtschaftskonzepten erheblich einschränkt. Ein weiteres Hindernis sind die höheren Kosten, die mit der Rückgewinnung und Wiederverwendung von Baumaterialien

verbunden sind. Oftmals ist es teurer, Materialien zu recyceln oder wiederzuverwenden, als neue Materialien zu verwenden, was die Implementierung wirtschaftlich unattraktiv machen kann (Pomponi and Moncaster, 2017). Technologische Herausforderungen bestehen zudem darin, dass viele Materialien, die in Gebäuden verwendet werden, nicht leicht recycelbar sind oder Schadstoffe enthalten, die eine Wiederverwendung erschweren. Schließlich gibt es auch regulatorische Hürden, da in vielen Ländern noch keine klaren Richtlinien für den Einsatz von recycelten Baumaterialien bestehen (Ghisellini, Cialani and Ulgiati, 2016).

4.4.4 Strategien und Best Practices

Um die Kreislaufwirtschaft im Bauwesen voranzutreiben, müssen bestimmte Strategien und Best Practices entwickelt und umgesetzt werden. Eine wichtige Strategie ist die Integration von Design-for-Deconstruction-Prinzipien, bei denen Gebäude so konzipiert werden, dass sie am Ende ihrer Lebensdauer einfach zurückgebaut und ihre Materialien wiederverwendet werden können. Dies erfordert eine enge Zusammenarbeit zwischen Architekten, Bauingenieuren und Bauunternehmern, um sicherzustellen, dass Gebäude aus leicht demontierbaren Materialien bestehen und die Rückgewinnung von Baustoffen erleichtert wird (Adams *et al.*, 2017). Eine weitere bewährte Praxis ist die Förderung der Verwendung von recycelten Materialien durch Anreize wie Steuererleichterungen oder Subventionen, um den wirtschaftlichen Druck zu verringern und den Einsatz dieser Materialien attraktiver zu machen. Zudem sollten Städte und Gemeinden Recycling-Infrastrukturen ausbauen und klare Richtlinien für die Wiederverwendung von Baumaterialien schaffen, um die Akzeptanz der Kreislaufwirtschaft im Bauwesen zu erhöhen (Ghisellini, Cialani and Ulgiati, 2016).

4.4.5 Anwendungsbeispiele

Es gibt bereits erfolgreiche Beispiele für die Umsetzung der Kreislaufwirtschaft im Bauwesen. In den Niederlanden ist die Stadt Amsterdam¹⁴ ein Vorreiter auf diesem Gebiet, da sie ein umfassendes Kreislaufwirtschaftsprogramm für den Bau- und Abbruchsektor einführte. In Amsterdam werden Baumaterialien aus abgerissenen Gebäuden systematisch recycelt und in neuen Bauprojekten wiederverwendet (Akanbi *et al.*, 2018). Ein weiteres Beispiel ist das „Cradle-to-Cradle“-Konzept, das in verschiedenen Bauprojekten weltweit angewendet wird. Dieses Konzept verfolgt das Ziel, Gebäude und ihre Materialien so zu gestalten, dass sie nach ihrer Nutzung vollständig wiederverwendet oder recycelt werden können, ohne

¹⁴ (November 2018). Amsterdam's Circular Economy Roadmap: Lessons learned and tools for upscaling. Abgerufen am 25.09.2025 von <https://www.c40.org/de/case-studies/amsterdam-s-circular-economy-roadmap-lessons-learned-and-tools-for-upscaling/>

Abfall zu erzeugen (Pomponi and Moncaster, 2017). Solche Projekte zeigen, dass die Kreislaufwirtschaft im Bauwesen nicht nur theoretisch, sondern auch praktisch umsetzbar ist.

4.5 Konzepte wie Nullenergiehäuser und Passivhäuser

Energieeffizientes Bauen gewannen in den letzten Jahrzehnten enorm an Bedeutung, insbesondere in Bezug auf die globalen Bemühungen zur Reduzierung des Energieverbrauchs und der CO₂-Emissionen. Zu den bekanntesten Konzepten gehören Nullenergiehäuser und Passivhäuser, die beide darauf abzielen, den Energiebedarf für den Betrieb eines Gebäudes so weit wie möglich zu senken (Marszal *et al.*, 2011). In diesem Abschnitt werden die Definitionen, Funktionsweisen, Vorteile und Herausforderungen dieser beiden Konzepte erläutert, gefolgt von praktischen Anwendungsbeispielen.

4.5.1 Definition von Nullenergiehäusern und Passivhäusern

Ein Nullenergiehaus (Zero-Energy Building, ZEB) ist ein Gebäude, das über ein Jahr hinweg genauso viel Energie erzeugt, wie es verbraucht. Dies wird durch die Kombination hocheffizienter Gebäudetechnik mit der Nutzung erneuerbarer Energiequellen, wie z. B. Photovoltaik, erreicht (Marszal *et al.*, 2011). Im Gegensatz dazu ist ein Passivhaus ein Gebäude, das dank seiner Konstruktion und Materialwahl nur sehr wenig Energie für Heizung und Kühlung benötigt. Passivhäuser sind so konzipiert, dass sie den Energiebedarf durch passive Maßnahmen wie Wärmedämmung und Sonnenenergie drastisch reduzieren (Moreno-Rangel, 2021).

4.5.2 Prinzipien und Funktionsweise

Die Funktionsweise von Nullenergie- und Passivhäusern beruht auf ähnlichen Prinzipien, wobei der Schwerpunkt auf Energieeffizienz und -erzeugung liegt. Passivhäuser erreichen ihre hohen Energieeinsparungen durch die Verwendung von hochgedämmten Wänden, dreifach verglasten Fenstern, Luftdichtheit und Wärmebrückenfreiheit, wodurch der Energiebedarf für Heizung und Kühlung minimiert wird (Moreno-Rangel, 2021). Nullenergiehäuser nutzen zusätzlich Technologien zur Energieerzeugung, wie z. B. Photovoltaikanlagen oder Wärmepumpen, um die verbleibende Energie für den Betrieb des Gebäudes selbst zu produzieren (Marszal *et al.*, 2011). In beiden Fällen spielt die passive Nutzung von Sonnenenergie und die Speicherung von Wärme eine Schlüsselrolle.

4.5.3 Vorteile von Nullenergiehäusern und Passivhäusern

Die Vorteile dieser Konzepte sind vielfältig und umfassen ökologische, ökonomische und soziale Aspekte. Erstens tragen sie erheblich zur Reduzierung des Energieverbrauchs und

der CO₂-Emissionen bei, was im Einklang mit internationalen Klimaschutzzielen steht (Laustsen, 2008). Zweitens führen die geringen Betriebskosten durch den niedrigen Energiebedarf langfristig zu erheblichen Einsparungen, insbesondere in Bezug auf Heiz- und Kühlkosten (Panchalingam, Rasheed and Rotimi, 2024). Darüber hinaus bieten Nullenergiehäuser und Passivhäuser einen hohen Wohnkomfort, da sie durch ihre gute Dämmung ein gleichmäßiges Raumklima bieten und Schadstoffbelastungen durch verbesserte Luftqualität verringert werden (Gou and Xie, 2017). Auch der Immobilienwert dieser Gebäude ist oft höher, da sie als nachhaltige und zukunftssichere Investitionen gelten (Fuerst and McAllister, 2008).

4.5.4 Herausforderungen bei der Implementierung

Auch wenn die bereits genannten und hier nicht benannten Vorteile den Einsatz von Nullenergiehäusern und Passivhäusern fördern, bestehen weiterhin erhebliche Herausforderungen bei deren Implementierung. Eine der größten Hürden sind die höheren Baukosten, die mit der Verwendung spezieller Materialien und Technologien verbunden sind (Gou and Xie, 2017). Auch die technischen Anforderungen, insbesondere in Bezug auf die Luftdichtheit und Wärmebrückenfreiheit, erfordern spezielles Know-how und gut ausgebildete Fachkräfte, die nicht immer verfügbar sind (Laustsen, 2008). In vielen Regionen gibt es zudem regulatorische Hürden, da die Bauvorschriften oft nicht auf die Anforderungen solcher hoch energieeffizienten Gebäude abgestimmt sind. Hinzu kommt, dass die Technologien zur Energieerzeugung, wie z. B. Photovoltaikanlagen, stark von den lokalen klimatischen Bedingungen abhängen, was die Planung und Umsetzung solcher Projekte erschwert (Marszal *et al.*, 2011).

4.5.5 Anwendungsbeispiele und Verbreitung

Es gibt weltweit zahlreiche erfolgreiche Beispiele für Nullenergie- und Passivhäuser. Besonders in Europa etablierte sich das Passivhaus-Konzept stark, vor allem in Ländern wie Deutschland, Österreich und der Schweiz. Das Passivhaus Institut in Deutschland setzte dabei eine Vorreiterrolle übernommen und weltweit Maßstäbe für energieeffizientes Bauen. Durch intensive Forschung, Zertifizierungen und Schulungen trug das Institut dazu bei, dass der Passivhaus-Standard heute als einer der anerkanntesten und erfolgreichsten Standards für energieeffiziente Gebäude gilt (Feist, 2016). Ein weiteres Beispiel ist das Nullenergiehaus-Konzept in den USA, das durch verschiedene staatliche Programme und Anreize gefördert wird (Marszal *et al.*, 2011). Die Verbreitung dieser Konzepte ist auch in anderen Teilen der Welt zu beobachten, wo Regierungen durch Förderprogramme und strenge Bauvorschriften die Einführung energieeffizienter Gebäude vorantreiben. In der EU sieht die **Energy Performance of Buildings Directive** vor, dass alle neuen Gebäude ab

2021 Niedrigstenergiehäuser sein müssen, was dem Nullenergiehaus-Konzept sehr nahekommt (*Richtlinie 2010/31/EU über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden 2010*).

5 Synergien zwischen Digitalisierung und Nachhaltigkeit

Die Bauindustrie steht an einem Wendepunkt, da sie vor der doppelten Herausforderung steht, ihre Prozesse effizienter zu gestalten und gleichzeitig nachhaltiger zu werden. In den letzten Jahren zeigten sich, dass die Digitalisierung ein mächtiges Werkzeug zur Bewältigung dieser Herausforderungen darstellt. Digitale Technologien wie Building Information Modeling (BIM), das Internet der Dinge (IoT) und Künstliche Intelligenz (KI) bieten erhebliche Potenziale, um sowohl die Effizienz zu steigern als auch die Umweltbelastungen zu minimieren. Diese Technologien ermöglichen eine ganzheitliche Betrachtung des gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks – von der Planung über die Bauphase bis hin zur Nutzung und zum Rückbau – und tragen dazu bei, den Ressourcenverbrauch zu senken, Abfall zu minimieren und den Energieverbrauch zu optimieren (Oesterreich and Teuteberg, 2016).

Der Einsatz digitaler Werkzeuge fördert die Kreislaufwirtschaft, indem er Wiederverwendungs- und Recyclingprozesse unterstützt und den Lebenszyklus von Baumaterialien verlängert (Ghisellini, Cialani and Ulgiati, 2016). Darüber hinaus ermöglichen IoT und KI eine präzise Überwachung und Steuerung von Bauprozessen und Gebäudebetrieben, was zur Reduzierung des Energieverbrauchs und zur besseren Ressourcennutzung beiträgt (Oesterreich and Teuteberg, 2016). Die Digitalisierung erweist sich somit als wesentlicher Treiber der nachhaltigen Transformation der Bauindustrie.

Dieser Abschnitt untersucht, wie digitale Technologien zur Förderung der Nachhaltigkeit beitragen und welche Synergien zwischen Digitalisierung und nachhaltigen Baupraktiken entstehen können. Es werden sowohl die Vorteile der Digitalisierung als auch integrierte Ansätze und Fallbeispiele erläutert, die zeigen, wie sich Digitalisierung und Nachhaltigkeit gegenseitig stärken.

5.1 Digitalisierung zur Förderung der Nachhaltigkeit

Die Digitalisierung etablierte sich in den letzten Jahren als einer der wichtigsten Katalysatoren für die Förderung von Nachhaltigkeit in der Bauindustrie. Durch den Einsatz digitaler Technologien wie Building Information Modeling (BIM), dem Internet der Dinge (IoT) und Künstlicher Intelligenz (KI) kann die Effizienz in allen Phasen des Bauprozesses gesteigert und gleichzeitig der ökologische Fußabdruck von Bauprojekten erheblich reduziert werden. Diese Technologien ermöglichen es, Prozesse besser zu planen, zu überwachen und zu optimieren, was zu einer ressourcenschonenden und umweltfreundlichen Bauweise führt (Agarwal, Chandrasekaran and Sridhar, 2016).

5.1.1 Building Information Modeling (BIM) als Schlüsseltechnologie

BIM gilt als eine der effektivsten Technologien zur Förderung der Nachhaltigkeit in der Bauindustrie. Es ermöglicht die Erstellung digitaler Modelle von Gebäuden, die nicht allein die physikalischen Eigenschaften eines Bauwerks abbilden, sondern ebenso detaillierte Informationen über den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes enthalten – von der Planung über den Bau bis hin zur Nutzung und dem Abriss (Malmqvist *et al.*, 2011). Diese ganzheitliche Betrachtung unterstützt die Optimierung der Materialnutzung und minimiert Abfälle, indem sie präzise Prognosen über den Materialbedarf und die Ressourcennutzung ermöglicht (Oesterreich and Teuteberg, 2016).

BIM kann auch zur Verbesserung der Energieeffizienz eines Gebäudes beitragen, indem es thermische Simulationen und Energieanalysen integriert, die den Energieverbrauch während des Betriebs optimieren. So können beispielsweise Wärmebrücken und ineffiziente Gebäudestrukturen bereits in der Planungsphase erkannt und beseitigt werden, was zu einer signifikanten Reduzierung des Energiebedarfs führt (Berardi, 2013). Studien zeigen, dass der Einsatz von BIM zu einer deutlichen Senkung der Bau- und Betriebskosten führen kann, während gleichzeitig die Umweltauswirkungen verringert werden (Zuo and Zhao, 2014)

5.1.2 Internet der Dinge (IoT) zur Optimierung der Ressourcennutzung

Das IoT ermöglicht eine Echtzeitüberwachung von Baustellen und Gebäuden durch die Integration von Sensoren, die verschiedene Parameter wie Energieverbrauch, Temperatur und Luftqualität messen. Diese Daten können genutzt werden, um den Betrieb von Gebäuden dynamisch anzupassen und die Ressourcennutzung zu optimieren (Perera *et al.*, 2014). Ein zentraler Vorteil des IoT ist die Möglichkeit, Systeme so zu steuern, dass Energie nur dann genutzt wird, wenn sie tatsächlich benötigt wird, wodurch der Gesamtenergieverbrauch eines Gebäudes reduziert wird.

Ein weiteres Anwendungsgebiet des IoT im Bauwesen ist die vorausschauende Wartung von Gebäuden und Infrastrukturen. Durch die kontinuierliche Überwachung von Gebäudekomponenten können Anomalien oder Verschleiß frühzeitig erkannt werden, bevor es zu teuren Reparaturen oder Ausfällen kommt. Dies trägt nicht nur zur Verlängerung der Lebensdauer von Gebäuden bei, sondern reduziert auch den Bedarf an neuen Materialien, was wiederum den Ressourcenverbrauch verringert (Perera *et al.*, 2014).

5.1.3 Künstliche Intelligenz zur Unterstützung nachhaltiger Entscheidungen

KI spielt eine zunehmende Rolle bei der Analyse großer Datenmengen, die im Bauprozess und im Gebäudebetrieb anfallen. Durch maschinelles Lernen und Data Mining kann KI helfen, Muster zu erkennen, die zur Optimierung von Bauprozessen und zur Minimierung von Umweltbelastungen genutzt werden können (Pan and Zhang, 2021). Beispielsweise kann KI historische Bauprojekte analysieren, um potenzielle Fehler zu identifizieren und bessere Entscheidungen in zukünftigen Projekten zu treffen.

Zudem ermöglicht KI die Optimierung von Zeitplänen und Ressourceneinsatz, was die Effizienz steigert und Abfall reduziert. In Kombination mit IoT-Daten kann KI sogar den Energieverbrauch eines Gebäudes in Echtzeit steuern und anpassen, um den Energieverbrauch zu minimieren und die Betriebskosten zu senken (Oesterreich and Teuteberg, 2016).

5.1.4 Digitalisierung und Kreislaufwirtschaft

Eine der größten Synergien zwischen Digitalisierung und Nachhaltigkeit zeigt sich in der Förderung der Kreislaufwirtschaft. Digitale Technologien wie BIM und IoT können die Rückverfolgbarkeit von Materialien sicherstellen, indem sie den gesamten Lebenszyklus von Baumaterialien überwachen – von ihrer Herstellung über ihre Nutzung bis hin zu ihrem möglichen Recycling oder ihrer Wiederverwendung (Pomponi and Moncaster, 2017). Dadurch wird es möglich, Materialien effizienter zu nutzen und Abfall zu minimieren. Integrierte digitale Systeme können dabei helfen, Materialien in Bauprojekten gezielt wiederzuverwenden und so einen geschlossenen Materialkreislauf zu schaffen.

Ein Beispiel dafür ist der Rückbau von Gebäuden, bei dem Materialien mithilfe von BIM katalogisiert und für den Einsatz in neuen Bauprojekten vorbereitet werden können. Solche digitalen Ansätze unterstützen die Kreislaufwirtschaft und tragen erheblich zur Ressourcenschonung und Abfallreduzierung bei (Ghisellini, Cialani and Ulgiati, 2016).

5.2 Integrierte Ansätze und Fallbeispiele

Die Verknüpfung von Digitalisierung und Nachhaltigkeit erfordert einen ganzheitlichen Ansatz, bei dem verschiedene Technologien, Prozesse und Akteure koordiniert zusammenwirken, um eine nachhaltige Transformation im Bauwesen zu erreichen. Integrierte Ansätze setzen dabei auf die nahtlose Verbindung digitaler Werkzeuge wie Building Information Modeling (BIM), das Internet der Dinge (IoT), Künstliche Intelligenz (KI) und Automatisierung, um Bauprozesse ressourcenschonend und effizient zu gestalten. Dieser Abschnitt beleuchtet einige bewährte integrierte Ansätze und Fallbeispiele, die verdeutlichen, wie Digitalisierung und Nachhaltigkeit erfolgreich kombiniert werden können.

5.2.1 Integrierte Ansätze für nachhaltiges Bauen

Ein integrativer Ansatz verbindet verschiedene Technologien, um den gesamten Lebenszyklus eines Bauprojekts nachhaltig zu gestalten – von der Planung über den Bau bis hin zum Betrieb und Rückbau von Gebäuden. Building Information Modeling (BIM) nimmt hierbei eine zentrale Rolle ein, da es als Plattform fungiert, auf der Daten aus verschiedenen Quellen zusammengeführt werden. Durch die Integration von Lebenszyklusanalysen (LCA) und Umweltverträglichkeitsprüfungen in das BIM-Modell können Bauunternehmen bereits in der Planungsphase nachhaltige Entscheidungen treffen (Pomponi and Moncaster, 2017).

Ein weiterer wesentlicher Bestandteil eines integrierten Ansatzes ist die Nutzung von IoT-Sensoren, die Echtzeitdaten über den Energieverbrauch, die Luftqualität und andere Umweltparameter in Gebäuden sammeln. Diese Daten können dann in das BIM-Modell eingespeist werden, um eine kontinuierliche Optimierung des Gebäudebetriebs zu ermöglichen. Solche Ansätze fördern die Reduzierung des Energieverbrauchs und unterstützen gleichzeitig die Kreislaufwirtschaft, indem Ressourcen effizienter genutzt und wiederverwendet werden (Ghisellini, Cialani and Ulgiati, 2016).

Zusätzlich ermöglicht die Künstliche Intelligenz (KI) eine datenbasierte Optimierung der Bauprozesse und trägt dazu bei, Bauprojekte nachhaltiger zu gestalten. KI kann Muster in historischen Daten analysieren und Vorhersagen über die besten Baupraktiken treffen, die die Umweltbelastung minimieren und den Ressourceneinsatz optimieren (Pan and Zhang, 2021). Integrierte Systeme, die KI mit BIM und IoT kombinieren, bieten somit eine Plattform für nachhaltiges Bauen, die auf Daten und Technologie basiert.

5.2.2 Fallbeispiele aus der Praxis

In der Praxis gibt es bereits zahlreiche Bauprojekte, die zeigen, wie eine erfolgreiche Integration digitaler Technologien zur Förderung der Nachhaltigkeit beitragen kann. Ein herausragendes Beispiel ist das „One Central Park“-Projekt in Sydney, Australien. Dieses Projekt kombiniert digitale Planungswerkzeuge wie BIM mit nachhaltigen Technologien wie vertikalen Gärten und Solaranlagen, um sowohl Energie als auch Wasser effizient zu nutzen. Dank der IoT-Sensoren und BIM-Integration konnten der Energieverbrauch und der Wasserbedarf in Echtzeit überwacht und optimiert werden (Pan and Zhang, 2021). Diese Kombination ermöglichte eine erhebliche Reduzierung des Energieverbrauchs und stellte sicher, dass das Gebäude nachhaltig betrieben wird.

Ein weiteres Beispiel ist das „Energiesprong“-Projekt in den Niederlanden, das darauf abzielt, bestehende Wohngebäude auf einen energiepositiven Standard zu bringen, indem sie mehr Energie erzeugen, als sie verbrauchen. Dabei leistet BIM einen Schlüsselbeitrag in

der Planung und Überwachung der Sanierungsarbeiten, während IoT-basierte Systeme die Effizienz des Gebäudebetriebs kontinuierlich optimieren. Diese Projekte demonstrieren, wie integrierte Ansätze, die digitale Technologien und Nachhaltigkeit kombinieren, den Weg für eine ressourcenschonende und emissionsfreie Bauweise ebnen können (Fabbri, Grooten and Rapf, 2016).

Auch in der Stadt Amsterdam wurde ein umfassendes Kreislaufwirtschaftsprogramm für den Bau- und Abbruchsektor implementiert, bei dem Baumaterialien aus abgerissenen Gebäuden systematisch recycelt und in neuen Bauprojekten wiederverwendet werden. Dies wird durch die Verwendung von BIM erleichtert, das den gesamten Lebenszyklus der Materialien dokumentiert und es ermöglicht, diese gezielt in neuen Projekten zu integrieren (Akanbi *et al.*, 2018). Dieser Ansatz unterstützt die Reduzierung des Materialverbrauchs und trägt zudem zur Minimierung von Bauabfällen bei.

5.2.3 Ausblick auf integrierte Ansätze

Die Zukunft der Bauindustrie wird zunehmend durch die Integration digitaler Technologien und nachhaltiger Baupraktiken geprägt sein. Technologische Entwicklungen und steigende regulatorische Anforderungen treiben diesen Wandel maßgeblich voran. Ein vielversprechender Ansatz ist die Nutzung digitaler Zwillinge, also virtueller Abbilder physischer Bauwerke, die eine kontinuierliche Überwachung und Optimierung der Gebäudeleistung ermöglichen. Mit digitalen Zwillingen können Bauprojekte während ihres gesamten Lebenszyklus in Echtzeit überwacht werden, um ressourcenschonende Maßnahmen zu implementieren und die Umweltbelastung zu minimieren (Pan and Zhang, 2021).

Innovative Geschäftsmodelle, wie die Bereitstellung von **Bauen als Dienstleistung**¹⁵, werden ebenfalls eine bedeutende Rolle spielen. In diesem Modell übernehmen Bauunternehmen nicht nur die Errichtung von Gebäuden, sondern bieten auch deren Betrieb und Wartung als Dienstleistung an. Dieser Ansatz fördert die Langlebigkeit und Effizienz von Gebäuden und unterstützt nachhaltige Praktiken, da durch kontinuierliches Monitoring und regelmäßige Wartung der Ressourcenverbrauch gesenkt werden kann (Bilal *et al.*, 2016).

Eine weitergehende Kombination von Building Information Modeling (BIM), dem Internet der Dinge (IoT) und künstlicher Intelligenz (KI) wird eine tiefere Integration ermöglichen. Diese Synergien werden den Bauprozess optimieren, indem sie eine datengestützte Planung, effizientere Bauabläufe und eine proaktive Instandhaltung ermöglichen. Die gesammelten Daten können beispielsweise genutzt werden, um den Energieverbrauch

¹⁵ Englisch: Construction as a Service (CaaS)

eines Gebäudes präzise vorherzusagen und Anpassungen in Echtzeit vorzunehmen, wodurch der ökologische Fußabdruck reduziert wird. Diese integrierten Systeme tragen zur Verlängerung des Lebenszyklus von Gebäuden bei und unterstützen eine Kreislaufwirtschaft, indem sie die Wiederverwendbarkeit von Materialien fördern und Abfälle minimieren (Adams *et al.*, 2017).

5.3 Strategien für die Integration der Twin Transition in der Bauindustrie

5.3.1 Die Rolle des Change-Managements in der Bauindustrie

Die Implementierung der Twin Transition stellt in der Bauindustrie eine erhebliche Veränderung dar, die sorgfältiges Change-Management erfordert. Change-Management ist entscheidend, um die Einführung neuer Technologien und nachhaltiger Praktiken zu erleichtern und die Akzeptanz bei den Mitarbeitern und Stakeholdern zu fördern. Ohne eine systematische Herangehensweise können Widerstände entstehen, die den Erfolg der Transformation gefährden (Cummings and Worley, 2015).

Ein zentrales Element des Change-Managements in der Bauindustrie ist die frühzeitige Einbindung aller Beteiligten. Die Herausforderung liegt darin, sowohl die technologischen als auch die ökologischen Vorteile der Digitalisierung und Nachhaltigkeit zu vermitteln. Eine klare Kommunikation und transparente Information über die Ziele der Twin Transition sind notwendig, um Vertrauen aufzubauen und die Motivation zu steigern (Raineri, 2011).

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Schulung und Qualifizierung der Mitarbeiter. Die Bauindustrie steht häufig vor der Herausforderung, dass Mitarbeiter nur begrenzte Kenntnisse über neue digitale Tools wie BIM oder nachhaltige Bauweisen haben. Durch gezielte Schulungsprogramme können diese Wissenslücken geschlossen werden, was die Effizienz der Veränderungen deutlich steigert (Zhao, Hwang and Low, 2013).

Darüber hinaus ist es notwendig, Widerstände gegen Veränderungen aktiv anzugehen. Dies kann durch die Einsetzung von Change Agents – also Führungspersonen, die den Wandel aktiv unterstützen – und durch die Schaffung einer offenen Unternehmenskultur erreicht werden. Studien zeigen, dass Unternehmen, die solche Change Agents einsetzen, schneller und erfolgreicher Veränderungen umsetzen (van der Voet, 2014).

Change-Management ist in der Bauindustrie ein Schlüsselfaktor für den Erfolg der Twin Transition. Es hilft dabei, technologische und nachhaltige Innovationen zu integrieren, Widerstände abzubauen und die langfristige Wettbewerbsfähigkeit sicherzustellen.

5.3.2 Kommunikationsstrategien für die Einführung von Digitalisierung und Nachhaltigkeit

Eine effektive Kommunikationsstrategie ist ein zentraler Erfolgsfaktor für die Implementierung von Veränderungen, insbesondere bei der Einführung der Twin Transition (Digitalisierung und Nachhaltigkeit) in der Bauindustrie. Frühzeitige und transparente Kommunikation ist entscheidend, um Widerstände zu minimieren und Akzeptanz für den Wandel zu schaffen. Führungskräfte müssen die Ziele und Vorteile der digitalen und nachhaltigen Transformation klar vermitteln und sicherstellen, dass alle Beteiligten – von Führungskräften bis hin zu Mitarbeitern auf der Baustelle – die Bedeutung der Veränderungen verstehen (Gholami *et al.*, 2013).

Partizipative Ansätze fördern die Einbindung der Stakeholder, indem sie alle Beteiligten aktiv in den Veränderungsprozess einbeziehen. Regelmäßige Feedback-Schleifen und offene Dialoge helfen dabei, Probleme frühzeitig zu erkennen und gemeinsam Lösungen zu entwickeln. Diese Praxis erhöht die Akzeptanz und das Vertrauen in den Veränderungsprozess, was entscheidend für den Erfolg der Twin Transition ist (Zhao, Hwang and Low, 2013).

Der Einsatz von digitalen Kommunikationsplattformen, wie z.B. BIM, hat eine bedeutende Stellung bei der Koordination von Bauprojekten. Diese Plattformen ermöglichen es, alle relevanten Informationen in Echtzeit zu teilen, wodurch die Transparenz und Zusammenarbeit zwischen den Projektbeteiligten verbessert werden. Studien zeigen, dass digitale Tools wie BIM die Kommunikation und Integration von digitalen und nachhaltigen Baupraktiken erheblich erleichtern (Succar, 2010).

Zusätzlich zu rationalen Kommunikationsmethoden bietet Storytelling eine wirkungsvolle Strategie, um Veränderungen greifbarer zu machen. Indem Erfolgsgeschichten von Bauprojekten, die bereits von der Twin Transition profitierten, erzählt werden, können Unsicherheiten reduziert und die Motivation der Mitarbeiter gesteigert werden. Storytelling ermöglicht eine emotionale Ansprache, die über rein technische Argumente hinausgeht und das Engagement der Beteiligten erhöht (Denning, 2011).

5.3.3 Stakeholder-Management und Einbindung der Beteiligten

Die erfolgreiche Umsetzung der Twin Transition in der Bauindustrie hängt entscheidend von der aktiven Beteiligung und dem Engagement der relevanten Stakeholder ab. Dazu gehören Bauunternehmen, Architekten, Ingenieure, Kunden und Behörden, die alle unterschiedliche Interessen, Erwartungen und Rollen in Bauprojekten haben. Ein effektives Stakeholder-Management ermöglicht es, diese Gruppen zu identifizieren, zu analysieren

und in den Transformationsprozess einzubinden, um den Erfolg der Twin Transition zu gewährleisten.

Identifizierung und Analyse von Stakeholdern

Eine der ersten Aufgaben im Stakeholder-Management ist die Identifizierung der wichtigsten Stakeholder. Diese Akteure betrafen entweder Einfluss auf den Erfolg des Projekts oder sind von den Ergebnissen der Twin Transition direkt. Es ist notwendig, eine umfassende Stakeholder-Analyse durchzuführen, um die Erwartungen und Bedürfnisse der einzelnen Gruppen zu verstehen. Dazu gehört auch eine Priorisierung der Stakeholder, basierend auf ihrem Einfluss und ihrem Interesse am Projekt (Olander and Landin, 2005).

Beispielsweise ist es wichtig, dass Bauunternehmen, die für die Umsetzung der Bauprojekte verantwortlich sind, frühzeitig in den Prozess eingebunden werden, um Widerstände zu vermeiden und die notwendigen Ressourcen für die Einführung digitaler und nachhaltiger Technologien bereitzustellen. Ebenso müssen Kunden und Behörden einbezogen werden, um sicherzustellen, dass die neuen Technologien und nachhaltigen Praktiken den gesetzlichen Anforderungen entsprechen und den Kundenerwartungen gerecht werden (Yang *et al.*, 2009).

Kooperation und Kollaboration fördern

Die Kooperation zwischen verschiedenen Stakeholdern ist entscheidend, um den Wandel erfolgreich zu gestalten. Integrierte Projektteams, die auf BIM-Plattformen oder anderen digitalen Tools arbeiten, ermöglichen eine bessere Kommunikation und eine engere Zusammenarbeit zwischen den verschiedenen Disziplinen im Bauwesen (Bresnen and Marshall, 2000). Durch den Einsatz solcher kollaborativen Ansätze können Missverständnisse reduziert und Effizienzgewinne erzielt werden, da alle Beteiligten auf dieselben Informationen zugreifen und ihre Aktivitäten in Echtzeit koordinieren können.

Ein Beispiel für erfolgreiche Stakeholder-Kollaboration in der Twin Transition ist die enge Zusammenarbeit von Architekten, Bauunternehmen und Nachhaltigkeitsexperten bei der Planung energieeffizienter Gebäude. In diesen Projekten werden digitale Tools wie BIM genutzt, um frühzeitig mögliche Konflikte zu erkennen und nachhaltige Lösungen zu entwickeln (Eadie, Perera and Heaney, 2011). Durch den ständigen Austausch von Informationen und die gemeinsame Nutzung digitaler Plattformen kann die Projektkoordination optimiert werden, was sowohl die Bauzeit als auch die Kosten reduziert.

Minimierung von Widerständen durch Einbindung

Die Einbindung der Stakeholder in die Planungs- und Umsetzungsphase ist eine effektive Methode, um Widerstände gegen die Twin Transition zu minimieren. Indem die betroffenen Akteure frühzeitig in den Veränderungsprozess eingebunden werden, steigt ihre

Bereitschaft, den Wandel zu unterstützen. Dies gilt besonders für Mitarbeiter und Bauunternehmen, die möglicherweise Bedenken hinsichtlich der Veränderungen in den Arbeitsabläufen oder der Nutzung neuer Technologien haben (Walker, Bourne and Rowlinson, 2007).

Regelmäßige Meetings, Workshops und Schulungen sind wichtige Instrumente, um den Dialog zwischen den Stakeholdern zu fördern und deren Feedback aktiv in den Prozess einzubeziehen. Durch den Einsatz partizipativer Ansätze können Unsicherheiten abgebaut und ein gemeinsames Verständnis für die Ziele der Twin Transition geschaffen werden (Freeman, 2010).

5.3.4 Schulung und Qualifizierung für den Einsatz digitaler und nachhaltiger Technologien

Die erfolgreiche Umsetzung der Twin Transition in der Bauindustrie erfordert gezielte Schulungs- und Qualifizierungsprogramme für die Belegschaft. Sowohl digitale Technologien wie Building Information Modeling (BIM), das Internet der Dinge (IoT) und Künstliche Intelligenz (KI) als auch nachhaltige Baupraktiken verlangen nach spezialisierter Expertise und neuen Fähigkeiten. Ohne ein solides Schulungskonzept riskieren Unternehmen, dass ihre Mitarbeiter die Vorteile dieser Technologien nicht vollständig nutzen können (Oesterreich and Teuteberg, 2016).

Schulungsprogramme sind unerlässlich, um die Kompetenzen der Mitarbeiter im Umgang mit digitalen Werkzeugen und nachhaltigen Bauverfahren zu stärken. Hier bieten sich praxisnahe Weiterbildungen und E-Learning-Plattformen an, die den spezifischen Anforderungen der Bauindustrie gerecht werden. Regelmäßige Workshops und Trainings, die sich auf konkrete Anwendungsfälle beziehen, erwiesen sich als besonders effektiv (Succar and Kassem, 2015).

Ein weiteres Problem ist der Fachkräftemangel. Die Bauindustrie leidet häufig unter einem Mangel an qualifiziertem Personal, das über die notwendigen Fähigkeiten für die Anwendung digitaler und nachhaltiger Technologien verfügt. Kooperationen mit Bildungseinrichtungen, die spezielle Ausbildungsprogramme für digitale Bauprozesse und Nachhaltigkeit anbieten, können dabei helfen, diese Lücke zu schließen und langfristig sicherzustellen, dass ausreichend Fachkräfte zur Verfügung stehen (Gholami *et al.*, 2013).

5.3.5 Widerstände gegen Veränderungen bewältigen und Unternehmenskultur anpassen

Die Einführung der Twin Transition in der Bauindustrie stellt eine tiefgreifende Veränderung dar, die auf Widerstände innerhalb der Belegschaft und Führungsebene treffen kann.

Widerstände gegen Veränderungen entstehen häufig durch Unsicherheit, mangelndes Verständnis oder die Angst vor Arbeitsplatzverlusten, insbesondere bei der Einführung neuer Technologien wie BIM und IoT sowie nachhaltiger Baupraktiken. Um diese Widerstände erfolgreich zu bewältigen, sind gezielte Strategien notwendig (Gilley, Gilley and McMillan, 2009).

Analyse typischer Widerstände

Ein wichtiger Schritt zur Bewältigung von Widerständen ist die Identifizierung der häufigsten Ursachen. Zu den häufigsten Widerständen zählen die Angst vor Arbeitsplatzverlusten durch Automatisierung, die Skepsis gegenüber neuen Technologien und der Unwille, bestehende Arbeitsweisen zu ändern. Diese Bedenken müssen frühzeitig erkannt und durch offene Kommunikation und Transparenz adressiert werden (Oreg, Vakola and Armenakis, 2011). Mitarbeiter müssen verstehen, dass die Twin Transition nicht nur technologische, sondern auch langfristige wirtschaftliche und ökologische Vorteile bietet.

Change Agents und Führung

Die Einführung von Change Agents kann ein wirksames Mittel sein, um Veränderungen innerhalb eines Unternehmens zu fördern. Change Agents sind Führungspersonen oder Mitarbeiter, die als Vorbilder fungieren und den Wandel aktiv vorantreiben. Sie übernehmen die Rolle von Vermittlern zwischen der Unternehmensleitung und den übrigen Mitarbeitern und helfen dabei, den Transformationsprozess zu steuern (Kotter, 1996). Studien zeigen, dass Unternehmen, die Change Agents einsetzen, Veränderungen schneller und effizienter umsetzen können (Gilley, Gilley and McMillan, 2009).

Change Agents können auch Schulungen leiten und als Ansprechpartner für Fragen und Bedenken zur Verfügung stehen. Durch ihre aktive Rolle können sie die Akzeptanz neuer Technologien und nachhaltiger Praktiken innerhalb der Belegschaft erhöhen.

Anpassung der Unternehmenskultur

Eine weitere wichtige Komponente bei der Überwindung von Widerständen ist die Anpassung der Unternehmenskultur. Eine innovationsfreundliche und umweltbewusste Kultur, die offen für digitale und nachhaltige Transformationen ist, spielt eine entscheidende Rolle für den Erfolg der Twin Transition. Dazu gehört, eine Kultur zu schaffen, die Innovation fördert, Fehler als Lernchancen ansieht und Nachhaltigkeit als festen Bestandteil der Unternehmensstrategie integriert (Cummings and Worley, 2015).

Sensibilisierungsworkshops und Schulungsprogramme, die sich auf die Vorteile von Nachhaltigkeit und Digitalisierung konzentrieren, können helfen, das Bewusstsein innerhalb der Organisation zu schärfen. Eine proaktive Unternehmenskultur, die Digitalisierung und

Nachhaltigkeit unterstützt, ermöglicht es dem Unternehmen, die Twin Transition langfristig erfolgreich zu integrieren.

5.3.6 Implementierung von Pilotprojekten zur Twin Transition

Pilotprojekte sind ein effektives Mittel, um die Twin Transition in der Bauindustrie schrittweise zu testen und zu optimieren. Pilotprojekte ermöglichen es Unternehmen, auf einer kleineren, überschaubaren Ebene digitale Technologien und nachhaltige Baupraktiken zu erproben, bevor sie auf größere Bauvorhaben skaliert werden. Durch das Sammeln von Erfahrungen und das Identifizieren von Erfolgsfaktoren können die Risiken minimiert und die Implementierung auf breiterer Ebene vorbereitet werden (Davies and Harty, 2013).

Pilotprojekte als Testumgebung

Der Hauptvorteil von Pilotprojekten besteht darin, dass sie eine kontrollierte Testumgebung bieten, in der Unternehmen die Twin Transition ausprobieren können, ohne dass die Risiken eines groß angelegten Projekts bestehen. Pilotprojekte ermöglichen es, den Einsatz von Technologien wie BIM, IoT oder KI auf ihre Effizienz, Funktionalität und Akzeptanz zu prüfen, bevor sie in großem Maßstab eingesetzt werden. Hier können auch nachhaltige Bauverfahren, wie die Verwendung umweltfreundlicher Materialien oder die Optimierung von Energieeffizienzmaßnahmen, im praktischen Kontext getestet werden (Buchanan, 2009).

Ein erfolgreiches Pilotprojekt bietet den Vorteil, dass es als Best-Practice-Beispiel für zukünftige Projekte dient und das Vertrauen in die neuen Technologien und nachhaltigen Verfahren stärkt. Die durch das Pilotprojekt gewonnenen Erkenntnisse können genutzt werden, um Anpassungen vorzunehmen und die Techniken zu verfeinern, bevor sie auf weitere Projekte übertragen werden.

Evaluation und Erfolgsmessung

Ein zentraler Aspekt bei der Implementierung von Pilotprojekten ist die Evaluation der Ergebnisse. Dies umfasst sowohl die technischen als auch die organisatorischen Aspekte. Wichtige Kennzahlen¹⁶, wie Energieeinsparungen, CO₂-Reduktion, Kosteneffizienz oder die Produktivitätssteigerung durch digitale Werkzeuge, sollten festgelegt werden, um den Erfolg des Pilotprojekts zu messen (Succar and Kassem, 2015). Ein gründliches Monitoring der Projektfortschritte ermöglicht es, Schwächen frühzeitig zu erkennen und Verbesserungsmaßnahmen zu ergreifen.

¹⁶ Englisch: Key Performance Indicators, KPIs

Ein weiteres Ziel der Evaluation ist es, Skalierbarkeitspotenziale zu identifizieren. Projekte, die erfolgreich im kleinen Maßstab umgesetzt wurden, können als Vorlage für größere Vorhaben dienen. Dies reduziert die Unsicherheiten bei der großflächigen Implementierung der Twin Transition und sorgt für eine reibungslosere Einführung (Gholami *et al.*, 2013).

Lernprozess und kontinuierliche Verbesserung

Pilotprojekte dienen einerseits als Testumgebung und fördern andererseits einen Lernprozess innerhalb des Unternehmens. Durch das Testen neuer Technologien und nachhaltiger Praktiken sammeln die Projektbeteiligten wertvolle Erfahrungen, die in die Weiterentwicklung der Twin Transition einfließen können. Dieser iterative Lernprozess ist entscheidend, um Innovationen erfolgreich umzusetzen und kontinuierliche Verbesserungen vorzunehmen (Cummings and Worley, 2015).

Darüber hinaus können die gewonnenen Daten aus Pilotprojekten genutzt werden, um die Schulungsprogramme für Mitarbeiter zu optimieren und die Akzeptanz neuer Technologien zu erhöhen. Der Erfolg eines Pilotprojekts schafft Vertrauen in die Machbarkeit der Twin Transition und fördert die Bereitschaft, diese auf größere Projekte zu skalieren.

5.3.7 Monitoring, Erfolgsmessung und kontinuierliche Verbesserung

Die erfolgreiche Umsetzung der Twin Transition erfordert nicht nur sorgfältige Planung und Implementierung, sondern auch eine fortlaufende Überwachung und Erfolgsmessung. Nur durch systematisches Monitoring können Fortschritte erfasst und potenzielle Probleme frühzeitig identifiziert werden. Die kontinuierliche Verbesserung auf Basis von gemessenen Ergebnissen ist entscheidend, um den langfristigen Erfolg der digitalen und nachhaltigen Transformation in der Bauindustrie sicherzustellen (Cummings and Worley, 2015).

KPI-gestützte Erfolgsmessung

Ein zentraler Bestandteil des Monitorings ist die Einführung von Key Performance Indicators (KPIs), die den Erfolg der Twin Transition messen. Diese Kennzahlen sollten sowohl die ökologischen als auch die wirtschaftlichen Aspekte der Transformation abbilden. Zu den wichtigen KPIs können gehören:

- Energieeinsparungen durch den Einsatz nachhaltiger Technologien,
- Reduzierung von CO₂-Emissionen,
- Produktivitätssteigerung durch digitale Werkzeuge wie BIM und IoT,
- Kostenersparnisse durch verbesserte Bauabläufe und nachhaltige Materialien (Gholami *et al.*, 2013).

Durch die kontinuierliche Überwachung dieser Kennzahlen können Unternehmen den Fortschritt der Twin Transition in Echtzeit verfolgen und Anpassungen vornehmen, wenn die Ziele nicht erreicht werden. Eine regelmäßige Berichterstattung und Analyse der KPIs hilft außerdem, Transparenz zu schaffen und die Beteiligten über den Stand der Transformation zu informieren.

Feedback-Schleifen und kontinuierliche Verbesserung

Die Erhebung von Feedback und die Schaffung von Feedback-Schleifen leisten einen zentralen Beitrag im Prozess der kontinuierlichen Verbesserung. Rückmeldungen von Stakeholdern, Mitarbeitern und Projektbeteiligten sollten aktiv eingeholt werden, um potenzielle Schwachstellen in der Implementierung der Twin Transition zu identifizieren (Davies and Harty, 2013). Diese Rückmeldungen können wertvolle Einblicke geben, wie Technologien und nachhaltige Praktiken optimiert werden können.

Durch iterative Lern- und Anpassungsprozesse können Unternehmen sicherstellen, dass die Einführung der Twin Transition nicht starr verläuft, sondern flexibel an neue Erkenntnisse und Herausforderungen angepasst wird. Dies fördert eine innovationsfreundliche Unternehmenskultur, in der Fehler als Lernchancen gesehen werden und kontinuierliche Verbesserung ein integraler Bestandteil des Transformationsprozesses ist (Oesterreich and Teuteberg, 2016).

Skalierung erfolgreicher Ansätze

Die durch das Monitoring und die Feedback-Schleifen gesammelten Daten sollten genutzt werden, um erfolgreiche Ansätze zu skalieren. Projekte, die die Twin Transition erfolgreich umsetzten, können als Best Practices dienen, um die Transformation auf größere Projekte und Organisationseinheiten auszuweiten. Dies erfordert jedoch eine ständige Anpassung und Verfeinerung der Ansätze, um sicherzustellen, dass die Digitalisierung und Nachhaltigkeit in allen Projekten gleichermaßen effektiv umgesetzt werden können (Succar and Kassem, 2015).

Skalierung bedeutet neben der Ausweitung erfolgreicher Pilotprojekte auch, die Anwendung neuer Technologien und Verfahren kontinuierlich zu überprüfen und anzupassen. Dieser Ansatz stellt sicher, dass die Twin Transition flexibel und nachhaltig in der Bauindustrie verankert wird.

5.4 Beispiele zum Einbau der Strategien zur Umsetzung der Ansätze der Twin Transition in einer Organisation

Die Implementierung der Twin Transition stellt für viele Organisationen eine Herausforderung dar. Gerade im Bauwesen, das traditionell durch eine hohe Fragmentierung und starke

Regulierungen geprägt ist, erfordert die Twin Transition eine durchdachte Anpassung bestehender Prozesse und Strukturen (Agarwal, Chandrasekaran and Sridhar, 2016). Um diese Transformation erfolgreich zu gestalten, sind fundierte Change-Management-Strategien erforderlich, die sowohl technologische als auch kulturelle Veränderungen unterstützen (Christmann *et al.*, 2024).

Dieser Bereich widmet sich dem fiktiven Architekturunternehmen Architektur Beispiel Unternehmen (BAU) mit Sitz in Merseburg und zeigt, wie ein mittelständisches Unternehmen die Twin Transition erfolgreich umsetzen kann. Durch den Einsatz eines kombinierten Modells aus Kotters 8-Phasen-Strategie und OKR-Framework strebt BAU eine kontinuierliche Anpassung und strategische Steuerung der Twin Transition an. Der Ansatz zielt darauf ab, das Unternehmen auf die zunehmenden Anforderungen in den Bereichen Digitalisierung und Nachhaltigkeit auszurichten und dabei eine flexible und zukunftsorientierte Unternehmensstruktur zu schaffen. Dabei wird auf die Besonderheiten und Herausforderungen eingegangen, die sich bei der Einführung digitaler und nachhaltiger Ansätze ergeben.

Das Architektur Beispiel Unternehmen (BAU) mit Sitz in Merseburg ist seit über 45 Jahren in der Bauindustrie tätig. Mit 58 Mitarbeitern reagierte sich BAU bislang vorwiegend auf die Einhaltung vorgeschriebener Regelungen konzentriert und auf Entwicklungen in den Bereichen Digitalisierung und Nachhaltigkeit eher konservativ. Durch den wachsenden Druck, insbesondere im Hinblick auf die Twin Transition, möchte das Unternehmen nun jedoch proaktiv nachhaltige und digitale Innovationen in seinen Projekten implementieren.

Das Team von BAU setzt sich aus Architekten, Ingenieuren sowie Mitarbeitern in unterstützenden Rollen zusammen. Die relevanten Fachkräfte – bestehend aus 20 Architekten und 15 Ingenieuren – haben ein Durchschnittsalter von 53 Jahren, was bei der Einführung neuer Technologien und Methoden eine besondere Herausforderung darstellen kann. Das Unternehmen sieht sich durch die veränderten Marktanforderungen zunehmend gezwungen, seine strategischen Ansätze anzupassen, um wettbewerbsfähig zu bleiben und seine Expertise in nachhaltigen und digitalen Projekten weiter auszubauen.

Für das Architektur Beispiel Unternehmen (BAU) wird eine kombinierte Strategie verfolgt, die auf Kotters 8-Phasen-Modell für Change-Management als Basis aufbaut und durch OKR (Objectives and Key Results) ergänzt wird. Diese Strategie ermöglicht eine strukturierte, schrittweise Einführung der Twin Transition und berücksichtigt gleichzeitig die Notwendigkeit, flexibel auf technologische Entwicklungen und Marktveränderungen zu reagieren.

Kotters 8-Phasen-Modell und OKR

Die Wahl der beiden Strategien in Kombination wurde getroffen, um eine langfristige und nachhaltige Transformation des Unternehmens zu ermöglichen und gleichzeitig agiles Management der einzelnen Maßnahmen zu fördern. Kotters Modell dient als übergeordneter Rahmen für die Veränderungsprozesse. Es bietet eine klare Struktur für die Einführung und Umsetzung von Veränderungen und gewährleistet, dass alle Schritte sorgfältig geplant und durchgeführt werden. Dies ist besonders relevant für BAU, da das Unternehmen bisher nur auf festgelegte Regelungen achtete und nun grundlegende Veränderungen anstrebt.

OKR hingegen wird als ergänzende Methode in den einzelnen Phasen eingesetzt, insbesondere bei der Zielsetzung und Fortschrittsüberprüfung. Da sich die Digitalisierung und nachhaltige Technologien ständig weiterentwickeln, erlaubt OKR eine regelmäßige Anpassung der Ziele. Alle sechs Monate werden neue OKRs festgelegt, die sicherstellen, dass das Unternehmen flexibel bleibt und technologische Fortschritte sowie neue Anforderungen im Nachhaltigkeitsbereich berücksichtigen kann.

Mit dem folgenden Beispiel wird verdeutlicht, wie das in dieser Arbeit gesammelte Wissen als Basis für eine nachhaltige Veränderung in einem Architekturunternehmen genutzt werden kann. Insbesondere in den Phasen 1, 3, 6 und 7 wird gezeigt, wie die Notwendigkeit und die versprochenen Vorteile der Twin Transition durch die gewonnenen Erkenntnisse aus dieser Arbeit vermittelt werden können. In Phase 1 dient die Darstellung der Dringlichkeit zur Einführung der Twin Transition, indem auf die Herausforderungen und Chancen hingewiesen wird, die in der theoretischen Analyse identifiziert wurden. Phase 3 nutzt diese Arbeit zur Formulierung einer klaren Vision, die auf wissenschaftlich fundierten Zielen und messbaren Vorteilen basiert.

Darüber hinaus zeigt das Beispiel, wie in Phase 6 kurzfristige Erfolge erzielt werden können, die auf den strategischen Handlungsempfehlungen dieser Arbeit basieren, und wie in Phase 7 diese Erfolge gefestigt und als Ausgangspunkt für weitere Verbesserungen genutzt werden können. Die Integration der Twin Transition wird somit nicht nur theoretisch, sondern praxisnah durch konkrete Maßnahmen verankert, die speziell auf die Herausforderungen und Chancen der Bauindustrie zugeschnitten sind.

Dieses Beispiel unterstreicht die praktische Relevanz der hier vorgestellten Strategien und bietet Anleitungen für deren Implementierung. Es zeigt auf, wie die Twin Transition einerseits als abstraktes Konzept, andererseits als konkretes, umsetzbares Ziel für Architekturunternehmen greifbar wird und welchen Beitrag diese Arbeit dazu leistet, umsetzbare Schritte für die Transformation zu entwickeln.

Phase 1: Ein Gefühl der Dringlichkeit schaffen

In dieser ersten Phase wird ein starkes Bewusstsein für die Notwendigkeit der Twin Transition geschaffen. Ziel ist es, allen Mitarbeitern klar zu machen, dass die Einführung digitaler und nachhaltiger Prozesse entscheidend für die langfristige Wettbewerbsfähigkeit des Unternehmens ist.

Methoden und Kommunikationskanäle:

- Digitale Plattformen: Interne Informationsplattformen und E-Mails, um eine schnelle Verbreitung der wichtigsten Updates und Entwicklungen zur Twin Transition zu gewährleisten.
- Printmedien: Aushänge an zentralen Orten, Newsletter und Handouts, um auch jene Mitarbeiter zu erreichen, die weniger digital-affin sind.

Wichtige und dringende Punkte zur Kommunikation:

- Wettbewerbsfähigkeit: Betonung, dass die Twin Transition eine unabdingbare Voraussetzung ist, um am Markt erfolgreich zu bleiben.
- Erfolge anderer Unternehmen: Praxisbeispiele, die zeigen, wie Digitalisierung und Nachhaltigkeit konkret umgesetzt und welche Vorteile damit erzielt wurden.
- Statistiken zur Twin Transition: Präsentation relevanter Daten und Kennzahlen, um die positiven Auswirkungen der Twin Transition greifbar zu machen.
- Marktveränderungen und Vorschriften: Vermittlung der Tatsache, dass zunehmende gesetzliche Anforderungen nachhaltige Praktiken und digitale Prozesse erfordern.
- Ressourceneffizienz und Zukunftssicherung: Darstellung, wie die Twin Transition zur Schonung von Ressourcen beiträgt und das Unternehmen zukunftssicher aufstellt.
- Regelmäßige Updates: Bereitstellung kontinuierlicher Informationen zu Erfolgen anderer Unternehmen, die bereits mit der Twin Transition arbeiten.

Ziel:

Durch die Kombination dieser Maßnahmen soll eine breite Akzeptanz und ein gemeinsames Verständnis von Veränderungen unter allen Entscheidungsträgern geschaffen werden, warum der Übergang zur Twin Transition für das Unternehmen von dringender Bedeutung ist.

Phase 2: Bildung einer starken Führungskoalition**Führungskoalition:**

Die Führungskoalition im BAU setzt sich aus der Geschäftsführung und erfahrenen Abteilungsleitern aus Architektur und Ingenieurwesen zusammen. Diese Schlüsselfiguren besitzen das Ansehen und die Autorität, die Twin Transition effektiv voranzutreiben. Sie entwickeln eine klare Vision und Strategie und sichern eine strukturierte und nachhaltige Umsetzung. Durch enge Zusammenarbeit und regelmäßige Abstimmung gewährleisten sie die erfolgreiche Steuerung des Transformationsprozesses.

Change Agents (Moderne Ergänzung):

Neben der Führungskoalition unterstützen Change Agents den Wandel auf operativer Ebene. Es handelt sich um motivierte Mitarbeiter, die ein starkes Interesse an digitalen und nachhaltigen Praktiken zeigen. Als „Botschafter“ der Twin Transition integrieren sie neue Prozesse und Technologien in den Arbeitsalltag und steigern so die Akzeptanz im Unternehmen. Diese Rolle ergänzt das traditionelle Kotter-Modell und verankert die Twin Transition direkt in der Belegschaft.

Rollen und Aufgaben der Change Agents:

- Fördern ein besseres Verständnis und eine positive Einstellung zur Twin Transition bei den Kollegen.
- Unterstützen bei der Einführung und Anwendung neuer, digitaler und nachhaltiger Prozesse.
- Geben regelmäßig Feedback an die Führungskoalition über Herausforderungen und Fortschritte, um Anpassungen gezielt umzusetzen.
- Motivieren und begleiten die Teams durch den Veränderungsprozess und bieten Unterstützung bei der Nutzung neuer Technologien wie BIM.

Vorteile der Kombination von Führungskoalition und Change Agents:

- Stärkere Kommunikation und Einbindung auf allen Ebenen im BAU, um einen abgestimmten Transformationsprozess zu gewährleisten.
- Höhere Akzeptanz und Motivation innerhalb der Belegschaft, besonders angesichts der älteren Altersstruktur.
- Kontinuierliche Rückmeldung zur praktischen Umsetzung und zu möglichen Hindernissen, die es der Führungskoalition ermöglicht, flexibel auf die Herausforderungen zu reagieren und gezielte Unterstützung zu bieten.

Phase 3: Vision und Strategie entwickeln**Entwicklung der Vision und Strategie:**

Die Führungskoalition entwickelt eine klare, inspirierende Vision für die Twin Transition, die sowohl die Vorteile der Digitalisierung als auch der Nachhaltigkeit integriert. Die Vision soll den Mitarbeitern das „Warum“ der Veränderung vermitteln und aufzeigen, wie die Twin Transition zur Zukunftssicherung des Unternehmens beiträgt.

Wichtige Elemente der Vision und Strategie:

- Wettbewerbsfähigkeit stärken: Die Vision betont, wie das Unternehmen durch die Twin Transition wettbewerbsfähiger bleibt und mit branchenspezifischen Entwicklungen Schritt hält.
- Effizienz und Ressourcenschonung: Die Strategie unterstreicht, dass durch die Einführung von BIM Level 2 und weitere digitale Tools die Effizienz gesteigert und Ressourcen optimal genutzt werden.
- Nachhaltige Unternehmensentwicklung: Die Vision zeigt auf, wie das Unternehmen durch nachhaltiges Bauen zur ökologischen Verantwortung beiträgt und regulatorischen Anforderungen gerecht wird.

Zielsetzung (mit OKR in Phase 6 verknüpft):

Die Vision wird in klare, erreichbare Ziele heruntergebrochen, die in späteren Phasen durch OKRs (Objectives and Key Results) konkretisiert und alle sechs Monate überprüft werden, um sicherzustellen, dass die Strategie dynamisch auf Markttrends und technologische Entwicklungen reagiert.

Beispiel für Vision:

„Architektur Beispiel Unternehmen (BAU) wird ein Vorreiter für nachhaltiges und digitales Bauen. Durch den Einsatz fortschrittlicher Technologien und nachhaltiger Baupraktiken gestalten wir Projekte, die Ressourcen schonen, CO₂-Emissionen minimieren und höchste Qualitätsstandards erfüllen. Unser Ziel ist es, die Bauindustrie durch Innovation und verantwortungsvolles Handeln zu verändern und eine umweltfreundlichere Zukunft zu gestalten.“

Strategische Ziele, die diese Vision unterstützen könnten:

- Einsatz von BIM in allen neuen Projekten
 - Regelmäßige Weiterbildung der Mitarbeiter
- Senkung der CO₂-Emissionen
 - Partnerschaften für Nachhaltigkeit suchen

Phase 4: Vision und Strategie des Wandels kommunizieren**Ziele der Phase:**

- Sicherstellen, dass die Vision und strategischen Ziele der Twin Transition klar und einheitlich vermittelt werden
- Ein gemeinsames Verständnis schaffen, eine breite Unterstützung fördern
- Alle Mitarbeiter motivieren und ihre Wertschätzung für die Bedeutung der Transformation stärken

Methoden zur Kommunikation der Vision und Strategie:**Regelmäßige Teammeetings und Briefings:**

- Diese Meetings sind kurz und strukturiert, um die zentralen Botschaften der Twin Transition klar zu vermitteln.
- Die Führungskoalition und die Change Agents sorgen dafür, dass die Vision verständlich und für alle greifbar erklärt wird.

Digitale Informationsplattform:

- Auf dieser Plattform sind die Vision und alle Fortschritte jederzeit für die Mitarbeiter zugänglich.
- Sie dient als Forum für Rückfragen und Feedback und wird von der Führungskoalition regelmäßig gepflegt und aktualisiert, sodass alle Mitarbeiter über den Fortschritt auf dem Laufenden bleiben.

Printmedien und visuelle Darstellungen:

- Für die weniger digital-affinen Mitarbeiter bei BAU werden Aushänge in Gemeinschaftsräumen, Newsletter und Infografiken bereitgestellt.
- Führungskoalition und Change Agents arbeiten gezielte Visualisierungen aus, die die Vision verständlich und motivierend darstellen.

Workshops und Präsentationen:

- Interaktiven Veranstaltungen bieten eine Plattform für Fragen und Feedback.
- Change Agents nutzen die Gelegenheit, um die Vision anschaulich zu machen und etwaige Unsicherheiten / Fragen der Belegschaft direkt zu klären.

Rolle der Führungskoalition und Change Agents:

Führungskoalition: Setzt und überwacht die Kommunikationsstrategie und sorgt dafür, dass die Vision einheitlich vermittelt wird.

Change Agents: Agieren als Bindeglieder, geben Feedback zur Wahrnehmung der Vision und wirken als erste Ansprechpartner.

Phase 5: Hindernisse auf dem Weg räumen**Ziel der Phase:**

Beseitigung von Hindernissen und Schaffung von Bedingungen, die es den Mitarbeitern ermöglichen, aktiv zur Twin Transition beizutragen.

Schritte zur Beseitigung der Hindernisse:

- **Herausforderung: Veraltete Technologie und fehlende digitale Infrastruktur**
 - Problem: Ineffiziente Prozesse durch alte IT-Strukturen.
 - Lösung: Führungskoalition beschafft neue Software; Change Agents führen Einführungsworkshops durch.
- **Herausforderung: Wissens- und Kompetenzlücken im Umgang mit BIM und nachhaltigen Praktiken**
 - Problem: Führungskoalition beschafft neue Software; Change Agents führen Einführungsworkshops durch.
 - Lösung: Praxisorientierte Schulungen durch Change Agents; Führungskoalition stellt Budget und Zeit für individuelle Schulungen bereit.
- **Herausforderung: Widerstand gegen neue Prozesse und Verlust der Eigeninitiative**
 - Problem: Angst vor Veränderungen und Einschränkungen der Arbeitsweise.
 - Lösung: Transparente Kommunikationsstrategie der Führungskoalition; Change Agents fördern Akzeptanz und Motivation durch Einzelgespräche.
- **Herausforderung: Fehlende Abstimmung zwischen verschiedenen Abteilungen**
 - Problem: Abteilungen arbeiten oft isoliert, erschweren Zusammenarbeit.
 - Lösung: Unterstützen direkt die Teams, beseitigen Hürden und fördern die Motivation.

Rolle der Führungskoalition und Change Agents:

Führungskoalition: Schafft strukturelle und finanzielle Voraussetzungen, damit Hindernisse entfernt werden.

Change Agents: Arbeiten direkt mit den Teams, um bei individuellen Hürden zu helfen und die Motivation hochzuhalten.

Phase 6: Kurzfristige Erfolge sicherstellen**Ziel der Phase:**

Die Umsetzung messbarer, kurzfristiger Erfolge, um die Motivation im Unternehmen hochzuhalten und den Fortschritt der Twin Transition greifbar zu machen.

Methoden zur Umsetzung:**1. Identifizierung erreichbarer Ziele:**

- Die Führungskoalition setzt klare, realistische, kurzfristige Zwischenziele, z. B. der erfolgreiche BIM-Einsatz in einem Pilotprojekt oder Recyclingpraktiken in einem kleinen Bauvorhaben.
- Zwischenziele tragen direkt zur Twin Transition bei und machen die Anwendung des Wandels sichtbar.

2. Einführung von OKR (Objectives and Key Results):

- OKR definiert operative Ziele in kurzen Zyklen (z. B. halbjährlich) und passt sie flexibel an.
- Beispiele für OKRs in Phase 6:
 - Objective: Verbesserung der digitalen Kommunikation
 - Key Results:
 - 30 % weniger E-Mail durch BIM-basierte Kommunikation
 - Schulung von 40 % der Mitarbeiter in BIM Level 2
 - Durchführung eines Pilotprojekts unter vollständiger Einhaltung nachhaltiger Vorgaben

3. Sichtbare Belohnung und Anerkennung:

- Die Führungskoalition erkennt die Fortschritte an und lobt Teams und Einzelpersonen, die zur Zielerreichung beigetragen haben. Erfolge werden über die internen Plattformen und in Meetings geteilt, um alle Mitarbeiter zu motivieren.
- Mitarbeiter werden eingeladen, ihre Erfolge und Herausforderungen zu präsentieren, was das Vertrauen und die Motivation weiter stärkt.

Rolle der Führungskoalition und Change Agents:

Führungskoalition: Ermöglicht durch Ressourcen und Unterstützung das Erreichen kurzfristiger Ziele.

Change Agents: Fördern die Umsetzung auf operativer Ebene und sorgen für die Transparenz dieser Erfolge innerhalb des Teams.

Phase 7: Erfolge konsolidieren und weitere Veränderungen einleiten**Ziel der Phase:**

Langfristige Veränderungen verankern, nachhaltige Verbesserungen in die Unternehmenskultur integrieren

Umsetzungsmethoden:**1. Festigung bisheriger Erfolge:**

- Analyse und Ausbau erfolgreicher Initiativen durch Führungskoalition
- Change Agents sammeln Feedback, fördern Integration in Kultur und Prozesse

2. Einführung neuer Projekte:

- Neue Projekte ergänzen bestehende Initiativen
- Beispiele:
 - BIM-Einsatz auf alle Abteilungen ausweiten
 - Solarenergie für Betriebsgebäude einführen
 - Regelmäßige Audits zur Sicherstellung von Nachhaltigkeits- und Digitalisierungsstandards

3. Anpassung und Erweiterung der OKR:

- Regelmäßige Überprüfung und Anpassung operativer Ziele
- Neue OKRs z.B. CO₂-Tracking in Projekten, Schulung zu Nachhaltigkeit

4. Integration in Unternehmensprozesse:

- Führungskoalition und Change Agents sichern Verankerung in Standards und Arbeitsabläufen

Rolle der Führungskoalition und Change Agents:

Führungskoalition: Treibt strategisch die Weiterentwicklung neuer Projekte voran.

Change Agents: Helfen, bestehende Erfolge zu festigen und neue Projekte in die Praxis umzusetzen.

Phase 8: Verankerung der neuen Ansätze in der Unternehmenskultur**Ziel der Phase:**

Die Twin Transition dauerhaft in die Unternehmenskultur von BAU integrieren, damit sie im täglichen Handeln verankert ist.

Umsetzungsmethoden:**1. Werte und Prinzipien der Twin Transition festlegen:**

- Führungskoalition und Change Agents definieren Werte wie Nachhaltigkeit, Innovation und digitale Effizienz, die in Leitbilder und Richtlinien aufgenommen werden.

2. Kontinuierliche Kommunikation der Vision und Erfolge:

- Regelmäßige Kommunikation über Newsletter, Intranet und Meetings, um Twin Transition präsent zu halten.

3. Mitarbeiterentwicklung und kulturelle Verstärkung:

- Fortlaufende Schulungen und Integration der Twin Transition in Mitarbeitergespräche und Zielsetzungen, einschließlich Einführung für neue Mitarbeiter.

4. Integration in Entscheidungsprozesse:

- Twin Transition wird fester Bestandteil der Projektbewertung und Entscheidungskriterien.

5. Erfolgskontrollen und Verbesserungsschleifen:

- Regelmäßige Evaluierungen und Feedbackrunden; jährliches Review zur Anpassung der Ziele und Methoden.

Rolle der Führungskoalition und Change Agents:

Führungskoalition: Verankert die Veränderung als Teil der Unternehmenswerte.

Change Agents: Stellen sicher, dass die Werte der Twin Transition im Arbeitsalltag gelebt werden.

6 Regulatorische und politische Rahmenbedingungen

6.1 Nationale Richtlinien und Gesetze

In vielen Ländern, einschließlich Deutschland, spielen nationale Richtlinien und Gesetze eine entscheidende Rolle bei der Förderung der Digitalisierung und Nachhaltigkeit in der Bauindustrie. Diese rechtlichen Vorgaben zielen darauf ab, die Transformation der Bauwirtschaft hin zu umweltfreundlicheren und effizienteren Prozessen zu steuern und gleichzeitig die Einhaltung technischer Standards zu gewährleisten. Die folgenden nationalen Rahmenbedingungen sind besonders relevant für die Implementierung der Twin Transition in Bauprojekten.

Bauordnungen und Nachhaltigkeitsvorgaben

Eine der zentralen gesetzlichen Grundlagen für das Bauwesen in Deutschland ist die Musterbauordnung (MBO), die als rechtlicher Rahmen für alle Bauprojekte dient. Diese Verordnung legt fest, wie Gebäude geplant und errichtet werden müssen, um Sicherheit, Stabilität und Energieeffizienz zu gewährleisten (*Musterbauordnung 2020*). Mit der zunehmenden Bedeutung der Nachhaltigkeit wurden in den letzten Jahren verstärkt Vorgaben integriert, die den Einsatz umweltfreundlicher Materialien und Baupraktiken fördern.

Neben der MBO nehmen auch spezifische Energieeinsparverordnungen (EnEV), wie die Gebäudeenergiegesetz (GEG), eine bedeutende Schlüsselposition. Das GEG, das 2020 in Kraft trat, stellt strenge Anforderungen an den Energieverbrauch von Gebäuden und setzt Grenzwerte für CO₂-Emissionen fest. Diese Gesetze fördern die Nutzung energieeffizienter Technologien und Systeme, wie z.B. die Integration von Photovoltaikanlagen oder intelligenten Heizungs- und Kühlsystemen (Hopfensperger and Finsterlin, 2023).

Förderung von Digitalisierung im Bauwesen

Auf nationaler Ebene ergriff Deutschland auch Maßnahmen zur Förderung der Digitalisierung im Bauwesen. Eine der zentralen Initiativen in diesem Bereich ist die Einführung von Building Information Modeling (BIM) als Standardverfahren in öffentlichen Bauprojekten. Seit 2020 ist BIM für alle öffentlichen Infrastrukturprojekte ab einer bestimmten Größenordnung verpflichtend, was die digitale Transformation in der Branche beschleunigte (*Stufenplan Digitales Planen und Bauen 2020*). Dies wurde im Rahmen des Stufenplans **Digitales Planen und Bauen** des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) umgesetzt.

Durch die Einführung von BIM sollen die Effizienz und Transparenz von Bauprozessen verbessert sowie Planungsfehler und Kostenüberschreitungen minimiert werden. Der Einsatz digitaler Technologien wird zudem durch Programme wie das Innovationsprogramm Bau

und verschiedene Förderprogramme für KMUs unterstützt, die finanzielle Anreize für Unternehmen bieten, in neue Technologien zu investieren.

Nachhaltigkeitszertifikate und Standards

Im Bereich der Nachhaltigkeit leisten Zertifizierungssysteme einen entscheidenden Beitrag, um die Einhaltung ökologischer Baupraktiken sicherzustellen. In Deutschland ist das Deutsche Gütesiegel Nachhaltiges Bauen (DGNB) ein weit verbreiteter Standard, der ökologische, ökonomische und soziokulturelle Aspekte von Bauprojekten bewertet. Projekte, die diesen Standard erfüllen, zeichnen sich durch geringe Umweltbelastungen und einen nachhaltigen Umgang mit Ressourcen aus.

Neben dem DGNB gibt es auch international anerkannte Standards wie das Leadership in Energy and Environmental Design (LEED) und das BREEAM-Zertifikat (Building Research Establishment Environmental Assessment Method), die ebenfalls zur Anwendung kommen. Diese Zertifizierungen spielen eine zunehmend wichtige Rolle bei der Förderung nachhaltiger Baupraktiken und werden oft als Voraussetzung für die Genehmigung von Bauprojekten verwendet.

Klimaschutzgesetze und CO₂-Reduktion

Die deutsche Regierung setzte sich mit dem Klimaschutzgesetz (KSG) ehrgeizige Ziele, um die CO₂-Emissionen bis 2030 deutlich zu reduzieren (Albrecht, 2020). Dies hat direkte Auswirkungen auf die Bauindustrie, da der Sektor für einen erheblichen Teil der Treibhausgasemissionen verantwortlich ist. Das KSG verpflichtet Bauherren und Unternehmen, Maßnahmen zur Energieeinsparung und Emissionsminderung zu ergreifen.

Eine wichtige Maßnahme ist die Förderung von Technologien wie Wärmepumpen, die es ermöglichen, Gebäude umweltfreundlicher und energieeffizienter zu beheizen und zu kühlen. Durch den Einsatz von Wärmepumpen können Bauherren den CO₂-Ausstoß senken und die gesetzlichen Vorgaben im Bereich Energieeffizienz leichter einhalten. Die Integration solcher Systeme wird zunehmend gefördert, um den Wandel hin zu einer nachhaltigen Bauweise zu unterstützen.

6.2 Internationale Richtlinien und Standards

Die Bauindustrie ist nicht nur von nationalen Gesetzen und Regelungen geprägt, sondern wird auch stark durch internationale Richtlinien und Standards beeinflusst. Diese Richtlinien fördern sowohl die Digitalisierung als auch nachhaltige Baupraktiken und sind entscheidend für die Harmonisierung der Bauprozesse über Ländergrenzen hinweg. Internationale Organisationen und Zusammenschlüsse wie die Europäische Union (EU), die Vereinten

Nationen (UN) und verschiedene Branchenorganisationen entwickelten umfassende Vorgaben, die eine Transformation der Bauwirtschaft im globalen Kontext ermöglichen.

Europäische Union: EPBD und weitere Richtlinien

Die Europäische Union (EU) etablierte sich als ein Vorreiter in der Förderung der Digitalisierung und Nachhaltigkeit in der Bauindustrie. Eine der wichtigsten Richtlinien im Bereich der Nachhaltigkeit ist die Energy Performance of Buildings Directive (EPBD). Die EPBD, ursprünglich 2002 verabschiedet und zuletzt 2018 aktualisiert, legt verbindliche Energieeffizienzstandards für Gebäude in den Mitgliedstaaten fest. Ziel der EPBD ist es, den Energieverbrauch von Gebäuden in der EU erheblich zu senken und den CO₂-Ausstoß zu reduzieren, indem energieeffiziente Technologien und Materialien in den Bauprozess integriert werden (eur-lex.europa.eu, 2024).

Neben der EPBD vorantrieben die EU auch die Building Information Modeling (BIM)-Richtlinien stark. BIM wird in vielen europäischen Ländern mittlerweile als Standardverfahren bei öffentlichen Bauprojekten verwendet. Länder wie Großbritannien und die Niederlande entwickelten detaillierte Vorschriften zur Verwendung von BIM, die in den kommenden Jahren auch von anderen Mitgliedstaaten übernommen werden sollen. Die EU BIM Task Group, eine von der Europäischen Kommission ins Leben gerufene Initiative, fördert die Harmonisierung von BIM-Standards in der gesamten EU (eubim.eu, 2023).

Vereinte Nationen: Nachhaltigkeitsziele und ihre Auswirkungen auf die Bauindustrie

Die Vereinten Nationen (UN) schufen mit den Sustainable Development Goals (SDGs) im Jahr 2015 einen globalen Rahmen für nachhaltige Entwicklung, der auch die Bauindustrie stark beeinflusst. Besonders relevant sind hier die SDGs 11 („Nachhaltige Städte und Gemeinden“) und 13 („Maßnahmen zum Klimaschutz“), die sich direkt auf die Bauindustrie auswirken. Diese Ziele betonen die Notwendigkeit, Städte und Gebäude nachhaltiger und widerstandsfähiger gegen die Auswirkungen des Klimawandels zu gestalten (United Nations, 2024).

Die UN-Habitat-Initiative, die sich auf nachhaltige Städte konzentriert, veröffentlichte ebenfalls Richtlinien zur Förderung der Nutzung nachhaltiger Baumaterialien und -techniken in städtischen Entwicklungsprojekten. Diese Richtlinien unterstützen die Entwicklung umweltfreundlicher und energieeffizienter Gebäude und setzen sich für die Verwendung lokaler und ressourcenschonender Materialien ein, um den ökologischen Fußabdruck der Bauindustrie zu minimieren (Knudsen, op. 2020).

Internationale Standards: ISO und CEN

Internationale Normen wie die ISO-Standards und die Richtlinien des Europäischen Komitees für Normung (CEN) sind ebenfalls von entscheidender Bedeutung für die Harmonisierung der Bauprozesse und die Einführung nachhaltiger Praktiken. Die ISO-Normen, insbesondere die ISO 19650, die sich mit der Verwaltung von Informationen im Bauwesen befasst, standardisierten den Einsatz von BIM international und damit die Grundlage für die digitale Transformation der Bauindustrie gelegt. Die Norm stellt sicher, dass Informationen konsistent und strukturiert erfasst werden, was die Zusammenarbeit und Effizienz in Bauprojekten verbessert (iso.org#iso:std:iso:19650:-1:ed-1:v1:en, 2024).

Im Bereich der Nachhaltigkeit entwickelte die ISO zudem Standards wie die ISO 14001, die ein Umweltmanagementsystem beschreibt und Anforderungen an die nachhaltige Bewirtschaftung von Bauprojekten stellt. Diese Standards sind international anerkannt und werden von zahlreichen Unternehmen und Organisationen weltweit verwendet, um ihre Bauprojekte umweltfreundlicher und effizienter zu gestalten.

Auch das CEN leistete durch die Entwicklung von Normen, die in der gesamten EU gelten, einen wichtigen Beitrag zur Standardisierung der Bauindustrie. Diese Normen legen Mindestanforderungen an die Bauausführung, die Materialien und die Energieeffizienz fest und fördern damit die Schaffung eines harmonisierten Marktes innerhalb Europas.

Internationale Bauzertifikate und ihre Bedeutung

Neben den oben genannten Richtlinien und Normen spielen auch internationale Zertifizierungssysteme wie LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) und BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method) eine wichtige Rolle in der Förderung nachhaltiger Baupraktiken. Diese Zertifikate werden in vielen Ländern als Qualitätsstandard für nachhaltiges Bauen angesehen und setzen Benchmarks für den umweltfreundlichen Bau von Gebäuden. LEED und BREEAM bewerten Projekte in Bezug auf Energieeffizienz, Wassernutzung, Materialeinsatz und Ressourcenschonung und tragen somit dazu bei, die Nachhaltigkeitsziele im Bauwesen zu verwirklichen (usgbc.org, 2024; BREEAM, 2024).

6.3 Vergleich nationaler und internationaler Richtlinien

Unterschiede in der Herangehensweise

Nationale und internationale Richtlinien unterscheiden sich oft in ihrer Herangehensweise, da sie auf unterschiedlichen Ebenen operieren. Nationale Regelungen sind in der Regel stärker auf die spezifischen Bedürfnisse eines Landes abgestimmt. Diese berücksichtigen lokale Gegebenheiten, wirtschaftliche Rahmenbedingungen sowie landesspezifische

Herausforderungen in der Bauindustrie. Zum Beispiel können in einem Land strikte Vorgaben zur Energieeffizienz bestehen, während in einem anderen Land der Schwerpunkt eher auf der Modernisierung der Infrastruktur liegt.

Internationale Richtlinien hingegen setzen global gültige Standards und bieten einen breiteren Rahmen, der es den Ländern ermöglicht, ihre eigenen nationalen Ziele an diese Vorgaben anzupassen. Dabei wird häufig ein gemeinsames Ziel verfolgt, wie beispielsweise die Reduzierung von CO₂-Emissionen oder die Förderung nachhaltiger Bauweisen. Die Herausforderung besteht darin, diese globalen Vorgaben mit den jeweiligen nationalen Anforderungen zu harmonisieren.

Gemeinsame Ziele und Synergien

Die unterschiedlichen Herangehensweisen hindern die nationalen und internationalen Richtlinien nicht daran, häufig ähnliche Ziele zu verfolgen. Sowohl auf nationaler als auch auf internationaler Ebene wird die Bedeutung von Nachhaltigkeit und Digitalisierung zunehmend anerkannt. Beide Ebenen zielen darauf ab, den Einsatz energieeffizienter Technologien zu fördern, die CO₂-Emissionen im Bauwesen zu senken und innovative digitale Werkzeuge wie Building Information Modeling (BIM) zu implementieren.

Die Synergie zwischen nationalen und internationalen Regelungen entsteht, wenn Länder ihre nationalen Gesetze und Standards an internationale Vorgaben anpassen und umgekehrt. Dies fördert die Zusammenarbeit über Ländergrenzen hinweg und ermöglicht es, gemeinsame Fortschritte bei der Erreichung globaler Nachhaltigkeits- und Digitalisierungsziele zu erzielen.

6.4 Ausblick auf zukünftige regulatorische Entwicklungen

In der Zukunft wird erwartet, dass sowohl nationale als auch internationale Regelungen weiter verschärft werden, um den zunehmenden Druck auf den Bausektor zu bewältigen, nachhaltiger zu werden und digitale Technologien vollständig zu integrieren. Ein wichtiger Schritt in dieser Richtung wird die Nutzung ähnlicher Softwarelösungen für Technologien wie BIM und IoT sein, um den Informationsaustausch und die Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Ländern und Projekten zu erleichtern. Eine einheitliche Nutzung von Softwarestandards würde dazu beitragen, die Effizienz zu steigern und Missverständnisse oder technische Barrieren im globalen Bauwesen zu reduzieren.

Zusätzlich wird es notwendig sein, dass internationale Organisationen wie die Vereinten Nationen (UN) oder die Europäische Union (EU) stärker auf entwickelnde Länder einwirken, um sicherzustellen, dass auch diese Länder die Digitalisierung vorantreiben und nachhaltige Bauvorschriften umsetzen können. Dabei muss jedoch auch Unterstützung in Form von

Technologietransfers und finanzieller Hilfe bereitgestellt werden, damit diese Länder Zugang zu den neuesten digitalen Werkzeugen und nachhaltigen Baupraktiken erhalten. Dies wird entscheidend sein, um die globalen Ziele zur Reduktion von CO₂-Emissionen und zur Förderung der Nachhaltigkeit auch in Entwicklungsländern zu erreichen. Der Druck, diese Veränderungen umzusetzen, wird sich in den kommenden Jahren erhöhen, da globale Abkommen wie das Pariser Klimaabkommen immer strengere Anforderungen an alle Nationen stellen.

6.5 Der Beitrag der regulatorischen Rahmenbedingungen zur Twin Transition

Die beschriebenen nationalen und internationalen regulatorischen Rahmenbedingungen legen den Grundstein für die erfolgreiche Integration der Twin Transition in der Bauindustrie. Auf nationaler Ebene fördern Richtlinien wie die Musterbauordnung und das Gebäudeenergiegesetz (GEG) die Nutzung energieeffizienter Technologien und ressourcenschonender Materialien, was entscheidend für nachhaltigere Bauprojekte ist. Gleichzeitig tragen Digitalisierungsinitiativen wie das verpflichtende Building Information Modeling (BIM) dazu bei, Planungsprozesse zu optimieren und Baufehler zu minimieren, wodurch der Wandel zu digitaleren und effizienteren Projekten beschleunigt wird.

Internationale Standards und Programme, wie die EPBD der Europäischen Union und die Sustainable Development Goals der Vereinten Nationen, schaffen darüber hinaus eine Grundlage für harmonisierte und grenzüberschreitende Zusammenarbeit. Diese ermöglichen es der Bauindustrie, digitale und nachhaltige Ansätze global auszutauschen und kontinuierlich weiterzuentwickeln. Die Unterstützung durch Programme wie die UN-Habitat-Initiative zur Förderung nachhaltiger Städte und die ISO-Normen trägt dazu bei, die Ziele der Twin Transition auch in Entwicklungsländern voranzutreiben und deren Transformation zu erleichtern.

Durch diesen umfassenden rechtlichen und regulatorischen Rahmen wird die Twin Transition in der Bauindustrie aktiv unterstützt und gefördert. Die Vorgaben motivieren Bauunternehmen und Organisationen, sich stärker auf ökologische und digitale Innovationen auszurichten und eine nachhaltige Transformation zu realisieren. Zukünftige Anpassungen der Richtlinien werden notwendig sein, um den dynamischen Entwicklungen in den Bereichen Digitalisierung und Nachhaltigkeit gerecht zu werden und die Twin Transition langfristig zu sichern.

7 Ökonomische Aspekte der Twin Transition

Die Twin Transition – die gleichzeitige Implementierung von Digitalisierung und Nachhaltigkeit in der Bauindustrie – bietet beträchtliche wirtschaftliche Vorteile und Effizienzsteigerungen. Die Synergie zwischen diesen beiden Trends ermöglicht es, Kosten zu senken, Produktivität zu steigern und langfristig die Wettbewerbsfähigkeit zu verbessern.

Wirtschaftliche Vorteile

Ein zentraler wirtschaftlicher Vorteil der Twin Transition liegt in der Kostensenkung durch Digitalisierung. Die Einführung von Building Information Modeling (BIM) und Internet of Things (IoT) in Bauprojekten führt zu einer besseren Projektkoordination und einer effizienteren Nutzung von Ressourcen. BIM ermöglicht es, Planungsfehler frühzeitig zu identifizieren und dadurch Nacharbeiten zu minimieren, was zu einer deutlichen Kostenreduktion führt. Eine Studie zeigt, dass BIM in Großbritannien erhebliche Kosteneinsparungen ermöglicht, indem es die Projektkosten durch besseres Datenmanagement um bis zu 20 % senkt (Santos and Brink, 2024).

IoT-Technologien tragen ebenfalls zu einer Steigerung der Effizienz bei, indem sie Echtzeitdaten von Baustellen sammeln und so die Überwachung und Steuerung von Bauprozessen optimieren. Diese Technologie reduziert Ausfallzeiten von Maschinen und ermöglicht zudem eine proaktive Wartung, was wiederum die Betriebs- und Instandhaltungskosten verringert. Diese wirtschaftlichen Vorteile sind sowohl für kleine als auch für große Bauunternehmen von Bedeutung, da sie die langfristige Rentabilität erhöhen.

Effizienzsteigerungen durch die Twin Transition

Die Twin Transition sorgt auch für erhebliche Effizienzsteigerungen in der Bauindustrie. Zum einen ermöglicht die Digitalisierung durch Technologien wie BIM und IoT eine automatisierte Erfassung und Analyse von Daten, wodurch Entscheidungsprozesse beschleunigt werden. Durch die bessere Vernetzung und den kontinuierlichen Datenaustausch zwischen verschiedenen Projektbeteiligten werden Zeitverluste minimiert und die Zusammenarbeit verbessert.

Zum anderen trägt der Fokus auf Nachhaltigkeit dazu bei, dass Ressourcen effizienter genutzt werden. Materialien können wiederverwendet und Energie kann eingespart werden, was die ökologischen und wirtschaftlichen Kosten des Bauprozesses reduziert. Nachhaltige Bauweisen und ressourcenschonende Materialien sorgen dafür, dass Gebäude über ihren gesamten Lebenszyklus hinweg energieeffizienter betrieben werden können. In Verbindung mit digitalen Werkzeugen wie IoT, die den Energieverbrauch kontinuierlich überwachen und optimieren, können die Betriebskosten von Gebäuden langfristig gesenkt werden (single-market-economy.ec.europa.eu, 2024).

Ein weiteres Beispiel ist die Kreislaufwirtschaft im Bauwesen, bei der Baumaterialien wiederverwendet und recycelt werden. Diese Praxis reduziert nicht nur den Materialverbrauch, sondern senkt auch die Entsorgungskosten und minimiert den Bedarf an neuen Rohstoffen. Dies führt zu einer signifikanten Senkung der Baukosten und verbessert gleichzeitig die Nachhaltigkeit von Bauprojekten (WBCSD, 2021).

Langfristige Vorteile und Wettbewerbsfähigkeit

Langfristig erhöht die Twin Transition die Wettbewerbsfähigkeit von Bauunternehmen. Unternehmen, die sowohl auf Digitalisierung als auch auf Nachhaltigkeit setzen, sind besser positioniert, um von staatlichen Förderprogrammen und Subventionen zu profitieren, die speziell auf diese Bereiche abzielen. Zudem steigt die Nachfrage nach umweltfreundlichen und energieeffizienten Gebäuden, was zu neuen Geschäftsmöglichkeiten für Unternehmen führt, die sich auf nachhaltige Technologien und Bauweisen spezialisierten.

Die Investitionen in digitale und nachhaltige Technologien zahlen sich langfristig aus, indem sie den Zugang zu internationalen Märkten erleichtern. Internationale Richtlinien und Standards, wie die Sustainable Development Goals (SDGs) der Vereinten Nationen, setzen zunehmend auf nachhaltige Bauweisen, und Unternehmen, die diesen Standards entsprechen, werden in Zukunft von zusätzlichen Geschäftsmöglichkeiten profitieren.

8 Zukunftsaussichten und Empfehlungen

8.1 Zukunftsaussichten der Twin Transition

Die Zukunft der Twin Transition in der Bauindustrie verspricht bedeutende technologische und ökologische Fortschritte. Die Kombination von Digitalisierung und Nachhaltigkeit wird langfristig zu einer grundlegenden Transformation der Branche führen, die sowohl die Art und Weise, wie Bauprojekte geplant und durchgeführt werden, als auch ihre ökologischen Auswirkungen revolutionieren wird.

Technologische und ökologische Trends

Technologische Innovationen wie Building Information Modeling (BIM), das Internet of Things (IoT) und künstliche Intelligenz (KI) werden in den kommenden Jahren eine immer größere Rolle spielen. Diese Technologien ermöglichen eine nahtlose Integration von Daten über den gesamten Lebenszyklus eines Bauprojekts hinweg – von der Planung über den Bau bis hin zur Wartung. Insbesondere BIM bietet das Potenzial, durch genauere Planung und verbesserte Koordination von Bauprojekten Kosten zu senken und Fehler zu minimieren (Santos and Brink, 2024). Mit der zunehmenden Vernetzung von Maschinen und Geräten durch IoT wird es möglich sein, Baustellen in Echtzeit zu überwachen und den Ressourceneinsatz effizienter zu steuern (WBCSD, 2021). KI-basierte Algorithmen können zudem zur Optimierung von Bauabläufen und zur Vorhersage von Risiken eingesetzt werden (single-market-economy.ec.europa.eu, 2024).

Auf der ökologischen Seite wird die Twin Transition durch die Integration nachhaltiger Technologien und Materialien weiter vorangetrieben. Energieeffiziente Gebäude, die auf Technologien wie Nullenergiehäusern und Passivhäusern basieren, werden in Zukunft die Norm sein (Bianchini, Damioli and Ghisetti, 2023). Die Nachfrage nach diesen Bauprojekten wird durch internationale Klimaziele, wie die Sustainable Development Goals (SDGs) der Vereinten Nationen, weiter angetrieben. Diese Entwicklungen tragen dazu bei, dass die Bauindustrie langfristig ihren CO₂-Fußabdruck verringern und den globalen Anforderungen an Nachhaltigkeit gerecht werden kann (single-market-economy.ec.europa.eu, 2024).

Langfristige Integration von Digitalisierung und Nachhaltigkeit

Die Zukunft der Bauindustrie wird stark von der vollständigen Integration der Digitalisierung und der Nachhaltigkeit geprägt sein. Die Twin Transition wird in den nächsten Jahrzehnten zur Norm in der Branche werden, wobei die Bauunternehmen zunehmend auf diese beiden Säulen setzen, um wettbewerbsfähig zu bleiben. Während die anfängliche Einführung digitaler Technologien und nachhaltiger Praktiken in der Bauindustrie aufgrund von hohen Investitionskosten und regulatorischen Unsicherheiten langsam voranschreitet, wird

erwartet, dass dieser Prozess durch verstärkte staatliche Förderung und internationale Regulierungen beschleunigt wird (single-market-economy.ec.europa.eu, 2024; World Economic Forum, 2024).

Insbesondere in urbanen Räumen, wo der Bedarf an smarten Städten und umweltfreundlichen Gebäuden wächst, wird die Twin Transition eine zentrale Rolle spielen. Smarte Städte, die durch digitale Technologien miteinander verbunden sind, bieten eine vielversprechende Perspektive für die Zukunft des Bauens. Diese Städte nutzen IoT und KI, um den Energieverbrauch zu überwachen, Verkehrsströme zu steuern und die Lebensqualität der Bewohner zu verbessern (Bianchini, Damioli and Ghisetti, 2023). Nachhaltige Baupraktiken, die auf Kreislaufwirtschaft und umweltfreundliche Materialien setzen, werden dazu beitragen, diese Vision zu verwirklichen und gleichzeitig die ökologischen Herausforderungen, vor denen die Bauindustrie steht, zu bewältigen.

Die fortschreitende Digitalisierung und die Nutzung nachhaltiger Technologien werden somit die Wettbewerbsfähigkeit von Bauunternehmen stärken und die Bauindustrie insgesamt effizienter, umweltfreundlicher und zukunftssicherer machen.

8.2 Hindernisse und Treiber der Twin Transition

Die Umsetzung der Twin Transition in der Bauindustrie, wird durch verschiedene Herausforderungen erschwert, aber auch von starken Kräften angetrieben

Hindernisse für die umfassende Umsetzung

Ein großes Hindernis ist die Fragmentierung der Bauindustrie, die durch die starke Dominanz von kleinen und mittleren Unternehmen (KMUs) gekennzeichnet ist. Diese Fragmentierung führt dazu, dass viele Unternehmen nicht über ausreichende Ressourcen oder das technische Fachwissen verfügen, um digitale Technologien wie Building Information Modeling (BIM) oder Internet of Things (IoT) effizient einzusetzen (Bilal *et al.*, 2016). Dies erschwert die Standardisierung von Arbeitsprozessen und führt zu einer geringeren Effizienz bei der Zusammenarbeit zwischen den Projektbeteiligten (Davila Delgado *et al.*, 2019).

Ein weiteres Hindernis ist der hohe Kapitalbedarf für die Implementierung dieser neuen Technologien. Der Einsatz von BIM, IoT und weiteren Innovationen erfordert erhebliche Investitionen in Software, Hardware und Mitarbeiterschulungen, was insbesondere KMUs vor finanzielle Herausforderungen stellt (Bilal *et al.*, 2016; Davila Delgado *et al.*, 2019). Zudem führt die Notwendigkeit zur Neustrukturierung bestehender Prozesse zu einer zusätzlichen Kostenbelastung.

Der Fachkräftemangel in der Bauindustrie ist ein weiteres Hindernis, da die Twin Transition spezialisierte Kenntnisse im Umgang mit digitalen Technologien und nachhaltigen Bauweisen erfordert. Viele Unternehmen haben Schwierigkeiten, die richtigen Fachkräfte zu finden oder das bestehende Personal weiterzubilden (Bilal *et al.*, 2016). Ohne diese Qualifikationen wird die erfolgreiche Umsetzung von Digitalisierung und Nachhaltigkeit stark beeinträchtigt.

Schließlich stellen regulatorische Unsicherheiten und unzureichend harmonisierte Richtlinien auf nationaler und internationaler Ebene ein Hindernis dar. Unterschiedliche Standards und rechtliche Vorgaben erschweren es den Unternehmen, sich auf langfristige Investitionen in digitale und nachhaltige Technologien einzulassen (GlobalABC, 2023; UNEP, 2022).

Treiber der Twin Transition

Trotz der Hindernisse gibt es mehrere wichtige Treiber, die die Twin Transition voranbringen. Ein zentraler Treiber ist der regulatorische Druck durch internationale Verpflichtungen wie die Sustainable Development Goals (SDGs) und das Pariser Abkommen, die Unternehmen dazu verpflichten, ihre CO₂-Emissionen zu reduzieren und nachhaltige Bauweisen zu implementieren (GlobalABC, 2023; UNEP, 2022).

Ein weiterer bedeutender Treiber sind die wirtschaftlichen Vorteile, die durch den Einsatz von digitalen und nachhaltigen Technologien entstehen. Obwohl die anfänglichen Investitionen hoch sind, ermöglichen Technologien wie BIM und IoT langfristige Einsparungen durch effizientere Planung und Ressourcennutzung (Bilal *et al.*, 2016; Davila Delgado *et al.*, 2019).

Auch das steigende gesellschaftliche Bewusstsein für Nachhaltigkeit trägt zur Förderung der Twin Transition bei. Immer mehr Kunden, Investoren und staatliche Institutionen fordern nachhaltige Bauprojekte, wodurch Unternehmen gezwungen sind, ihre Prozesse anzupassen, um wettbewerbsfähig zu bleiben und ihre Reputation zu verbessern (Bilal *et al.*, 2016; Wessel *et al.*, 2021).

Technologische Innovationen wie künstliche Intelligenz (KI), Robotik und 3D-Druck erfüllen ebenfalls eine entscheidende Funktion bei der Transformation der Bauindustrie. Diese Technologien ermöglichen es, Prozesse zu automatisieren, Ressourcen effizienter zu nutzen und gleichzeitig die Nachhaltigkeitsziele zu erreichen (Abioye *et al.*, 2021; Davila Delgado *et al.*, 2019).

8.3 Rolle der Innovation in der Twin Transition

Technologische Innovationen als Schlüsselfaktor

Technologische Innovationen sind der zentrale Treiber für die Twin Transition in der Bauindustrie. Neue Technologien wie 3D-Druck, künstliche Intelligenz (KI) und moderne Fertigungsverfahren revolutionieren die Art und Weise, wie Bauprojekte geplant und umgesetzt werden. 3D-Druck ermöglicht es, komplexe Bauteile präzise und ressourcenschonend herzustellen, was die Bauzeiten verkürzt und den Materialeinsatz reduziert (Davila Delgado *et al.*, 2019). Gleichzeitig tragen KI-basierte Tools zur Optimierung von Bauprozessen bei, indem sie Vorhersagen über Baukosten und Zeitpläne ermöglichen und dadurch Risiken minimieren (Abioye *et al.*, 2021). Diese Technologien verbessern nicht allein die Effizienz, sondern ermöglichen ebenso höhere Bauqualität und tragen zur Nachhaltigkeit bei, indem sie die Ressourcennutzung optimieren und Abfälle minimieren.

Darüber hinaus tragen Innovationen in der Fertigungstechnologie dazu bei, nachhaltigere Bauprojekte zu realisieren. Vorfertigung und modulare Bauweisen, die in kontrollierten Umgebungen durchgeführt werden, ermöglichen eine bessere Qualitätskontrolle und reduzieren den Energieverbrauch auf der Baustelle (Bilal *et al.*, 2016). Diese Technologien sind entscheidend, um den ökologischen Fußabdruck der Bauindustrie zu verringern und gleichzeitig den steigenden Anforderungen an Energieeffizienz und Nachhaltigkeit gerecht zu werden.

Innovationsförderung durch Kooperationen

Um die Einführung dieser Technologien zu beschleunigen, spielen Kooperationen zwischen Hochschulen, Forschungseinrichtungen und Unternehmen eine zentrale Rolle. Durch Partnerschaften zwischen der Industrie und der Wissenschaft können neue Technologien schneller entwickelt und implementiert werden. Forschungsprojekte in Kooperation mit Universitäten haben das Potenzial, praxisorientierte Lösungen für reale Herausforderungen zu bieten und somit die Einführung innovativer Technologien in der Bauindustrie voranzutreiben (Hashim Mohammed *et al.*, 2022). Zudem können durch diese Kooperationen neue Standards und Richtlinien für den Einsatz von Technologien wie BIM und IoT entwickelt werden, was zu einer breiteren Akzeptanz und Integration in der Branche führt.

8.4 Handlungsempfehlungen für die Twin Transition

Empfehlungen für Bauunternehmen

- **Technologische Weiterbildung:** Bauunternehmen sollten verstärkt in die Weiterbildung ihrer Mitarbeiter investieren, um sicherzustellen, dass diese die neuen Technologien beherrschen und effizient einsetzen können. Dies betrifft

insbesondere den Umgang mit BIM, IoT und KI-basierten Tools, die die Grundlage der Twin Transition bilden. Regelmäßige Schulungen und Weiterbildungsprogramme können dazu beitragen, die digitale Kompetenz der Belegschaft zu stärken (Bilal *et al.*, 2016; Davila Delgado *et al.*, 2019).

- **Pilotprojekte umsetzen:** Um die Risiken bei der Implementierung neuer Technologien zu minimieren, sollten Bauunternehmen Pilotprojekte durchführen, in denen innovative Technologien auf kleinerer Skala getestet werden. Diese Pilotprojekte bieten wertvolle Erkenntnisse über die Integration von Digitalisierung und Nachhaltigkeit und ermöglichen es, potenzielle Herausforderungen frühzeitig zu identifizieren (Abioye *et al.*, 2021). Der schrittweise Einsatz von Technologien erleichtert zudem die Skalierung auf größere Projekte.
- **Nachhaltigkeitsstrategien entwickeln:** Unternehmen sollten klare Nachhaltigkeitsstrategien formulieren, die die Reduzierung von CO₂-Emissionen und den effizienten Einsatz von Ressourcen fokussieren. Durch die Integration von Technologien wie IoT können Unternehmen den Energieverbrauch und die Ressourcennutzung in Echtzeit überwachen und so effizienter gestalten (Bilal *et al.*, 2016). Eine klare Nachhaltigkeitsstrategie stärkt zudem die Wettbewerbsfähigkeit auf dem Markt.

Empfehlungen für Regierungen und politische Entscheidungsträger

- **Förderprogramme und Anreize ausweiten:** Um die Einführung digitaler und nachhaltiger Technologien zu beschleunigen, sollten Regierungen den Zugang zu Fördermitteln und Anreizen ausweiten. Durch steuerliche Vorteile und Subventionen können Bauunternehmen ermutigt werden, in Technologien wie BIM und KI zu investieren (UNEP, 2022). Diese finanziellen Anreize sind insbesondere für kleinere Unternehmen entscheidend, um die Twin Transition zu unterstützen.
- **Schaffung einheitlicher Regelungen:** Die Harmonisierung von nationalen und internationalen Standards ist eine der wichtigsten Maßnahmen, um die Integration von Digitalisierung und Nachhaltigkeit in der Bauindustrie zu erleichtern. Einheitliche Regelungen ermöglichen es Unternehmen, ihre Strategien auf eine klar definierte rechtliche Grundlage zu stellen und Investitionen sicher zu planen (GlobalABC, 2023; UNEP, 2022). Dabei sollten die Regelungen auch dazu führen, dass Bauunternehmen durch Fusionen und Kooperationen zu größeren Einheiten zusammengeführt werden, um die notwendigen Ressourcen für die Einführung und Beherrschung neuer Technologien bereitzustellen. Große Konzerne haben eher die Kapazitäten, in Technologien wie IoT, KI und BIM zu investieren und diese effektiv umzusetzen. Gleichzeitig müssen die Regelungen sicherstellen, dass der

Wettbewerb unter den Unternehmen erhalten bleibt, um Innovation und Effizienz weiterhin zu fördern.

- **Unterstützung von Unternehmenszusammenschlüssen unter Wahrung des Wettbewerbs:** Die politischen Entscheidungsträger sollten Rahmenbedingungen schaffen, die es kleinen Unternehmen ermöglichen, sich zusammenzuschließen und größere Einheiten zu bilden. Dies erleichtert Investitionen in neue Technologien, da größere Unternehmen oft über mehr Ressourcen verfügen, um in digitale Innovationen und nachhaltige Praktiken zu investieren. Gleichzeitig muss sichergestellt werden, dass der Wettbewerb auf dem Markt erhalten bleibt. Durch wettbewerbsrechtliche Maßnahmen und Regulierungen kann gewährleistet werden, dass auch nach Zusammenschlüssen ein fairer Wettbewerb herrscht, der Innovation fördert und Verbrauchern sowie anderen Marktteilnehmern zugutekommt. Die Förderung von Kooperationen und Clustern kann ebenfalls dazu beitragen, dass Unternehmen gemeinsam Ressourcen nutzen, ohne ihre Eigenständigkeit vollständig aufzugeben.

8.5 Notwendige weitere Forschungen zur Twin Transition in der Bauindustrie

Obwohl die Twin Transition – die Kombination von Digitalisierung und Nachhaltigkeit – in der Bauindustrie erhebliche Fortschritte macht, gibt es zahlreiche Forschungsbereiche, die für eine vollständige Umsetzung und Optimierung weiter untersucht werden müssen. Der folgende Abschnitt beleuchtet die zentralen Bereiche, in denen zusätzliche wissenschaftliche Untersuchungen notwendig sind, um die Twin Transition in der Bauindustrie erfolgreich voranzutreiben.

Vertiefte Forschung zur praktischen Umsetzung der Twin Transition

Die Einführung der Twin Transition erfordert spezifische Umsetzungsstrategien, die auf die Anforderungen der Bauindustrie zugeschnitten sind. Bisherige Ansätze zur Integration von Digitalisierung und Nachhaltigkeit sind oft fragmentiert und decken nicht alle Anforderungen der Branche ab. Es bedarf daher detaillierter Studien zu Change-Management-Strategien, die speziell für Bauunternehmen entwickelt werden und den besonderen Herausforderungen in Bezug auf Komplexität, Projektstruktur und Kooperation gerecht werden.

Langzeitstudien zur wirtschaftlichen Rentabilität

Ein weiteres wichtiges Forschungsfeld betrifft die Langzeitauswirkungen der Twin Transition auf die Wirtschaftlichkeit von Bauprojekten. Inwieweit die Investitionen in digitale Technologien wie Building Information Modeling (BIM) und IoT sowie in nachhaltige Materialien zu Kostensenkungen und Effizienzsteigerungen führen, ist aktuell noch unzureichend belegt. Langzeitstudien könnten hier wichtige Erkenntnisse liefern, indem sie untersuchen, wie sich

diese Technologien und Materialien auf die finanziellen und operativen Ergebnisse von Projekten auswirken und welche potenziellen Ersparnisse langfristig realisiert werden können.

Untersuchung der sozialen und kulturellen Barrieren

In vielen Bauunternehmen bestehen soziale und kulturelle Barrieren gegenüber der Einführung neuer Technologien und nachhaltiger Praktiken. Es fehlt jedoch an umfassender Forschung zu den Gründen und zur Überwindung dieser Widerstände. Studien könnten untersuchen, wie sich die Akzeptanz der Mitarbeitenden für digitale und nachhaltige Transformationen stärken lässt und welche Change-Management-Strategien effektiv sind, um eine Transformationskultur zu schaffen, die die Twin Transition fördert.

Bewertung der ökologischen Auswirkungen und Optimierung nachhaltiger Praktiken

Ein zentrales Ziel der Twin Transition ist die Reduktion der Umweltbelastung der Bauindustrie. Aktuell fehlen jedoch umfassende methodische Ansätze, um die tatsächlichen ökologischen Auswirkungen von digitalen und nachhaltigen Innovationen quantitativ zu bewerten. Künftige Forschungen sollten sich daher auf die Entwicklung von Modellen zur Bewertung und Optimierung nachhaltiger Praktiken konzentrieren, die die CO₂-Emissionen und den Ressourcenverbrauch über den gesamten Lebenszyklus eines Bauprojekts hinweg messen und reduzieren.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: CO ₂ -Emissionen in Gebäuden 2010–2021 (links) und Anteil der Gebäude an den globalen Energie- und Prozessemissionen im Jahr 2021 (rechts) (UNEP, 2022).....	2
Abbildung 2: Die Twin Transformation verbindet die Synergien der digitalen Transformation und der Nachhaltigkeitstransformation (Christmann et al., 2024)	11
Abbildung 3: Rahmenwerk für die Fähigkeit zur Twin Transition (Twin transformation capability framework) (Christmann et al. 2024)	15
Abbildung 4: : Clash Detection (Srinsoft Inc, 2024)	28
Abbildung 5: Len Lye Centre (NEMETSCHEK 2024)	31
Abbildung 6: Planung in BIM (NEMETSCHEK 2024)	32
Abbildung 7: Kommunikation und Informationsaustausch in BIM (NEMETSCHEK 2024)	32

Literaturverzeichnis

- Abioye, S.O. *et al.* (2021) 'Artificial intelligence in the construction industry: A review of present status, opportunities and future challenges', *Journal of Building Engineering*, 44, p. 103299.
doi: 10.1016/j.jobe.2021.103299
- Adams, K.T. *et al.* (2017) 'Circular economy in construction: current awareness, challenges and enablers', *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Waste and Resource Management*, 170(1), pp. 15–24. doi: 10.1680/jwarm.16.00011
- Agarwal, R., Chandrasekaran, S. and Sridhar, M. (2016) *Imagining Construction's Digital Future*. Available at: <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/imagining-constructions-digital-future> (Accessed: 25 August 2024).
- Akanbi, L.A. *et al.* (2018) 'Salvaging building materials in a circular economy: A BIM-based whole-life performance estimator', *Resources, Conservation and Recycling*, 129, pp. 175–186.
doi: 10.1016/j.resconrec.2017.10.026
- Aksin-Sivrikaya, S. and Bhattacharya, C.B. (2017) 'Where Digitalization Meets Sustainability: Opportunities and Challenges', in Osburg, T. and Lohrmann, C. (eds.) *Sustainability in a Digital World*. (CSR, Sustainability, Ethics & Governance). Cham: Springer International Publishing, pp. 37–49.
- Albrecht, J. (2020) 'Das Klimaschutzgesetz des Bundes – Hintergrund, Regelungsstruktur und wesentliche Inhalte', *Natur und Recht*, 42(6), pp. 370–378. doi: 10.1007/s10357-020-3692-3
- Almansour, M. (2022) 'Electric vehicles (EV) and sustainability: Consumer response to twin transition, the role of e-businesses and digital marketing', *Technology in Society*, 71, p. 102135.
doi: 10.1016/j.techsoc.2022.102135
- Al-Sedairy, S.T. (2001) 'A change management model for Saudi construction industry', *International Journal of Project Management*, 19(3), pp. 161–169. doi: 10.1016/S0263-7863(99)00067-8
- Amade, B. *et al.* (2018) 'Building Information Modelling and its Application in Building Construction Projects', VII(XII), pp. 1–21.
- Asif, M., Muneer, T. and Kelley, R. (2007) 'Life cycle assessment: A case study of a dwelling home in Scotland', *Building and Environment*, 42(3), pp. 1391–1394. doi: 10.1016/j.buildenv.2005.11.023
- Berardi, U. (2013) 'Clarifying the new interpretations of the concept of sustainable building', *Sustainable Cities and Society*, 8, pp. 72–78. doi: 10.1016/j.scs.2013.01.008
- Bianchini, S., Damioli, G. and Ghisetti, C. (2023) 'The environmental effects of the "twin" green and digital transition in European regions', *Environmental & Resource Economics*, 84(4), pp. 877–918.
doi: 10.1007/s10640-022-00741-7
- Bilal, M. *et al.* (2016) 'Big Data in the construction industry: A review of present status, opportunities, and future trends', *Advanced Engineering Informatics*, 30(3), pp. 500–521.
doi: 10.1016/j.aei.2016.07.001

- Bocken, N. *et al.* (2014) 'A literature and practice review to develop sustainable business model archetypes', *Journal of Cleaner Production*, 65, pp. 42–56. doi: 10.1016/j.jclepro.2013.11.039
- BREEAM (2024) *BREEAM: Sustainable Building Certification*, 9 October. Available at: <https://breeam.com/> (Accessed: 9 October 2024).
- Bresnen, M. and Marshall, N. (2000) 'Partnering in construction: a critical review of issues, problems and dilemmas', *Construction Management and Economics*, 18(2), pp. 229–237. doi: 10.1080/014461900370852
- Briselat, T. and Malewski, S. (2015) 'Literaturrecherche', *Propädeutik für Studierende der Kommunikationswissenschaft*, 4, pp. 113–124. doi: 10.20378/irb-39631
- Brynjolfsson, E. and Hitt, L.M. (2000) 'Beyond Computation: Information Technology, Organizational Transformation and Business Performance', *Journal of Economic Perspectives*, 14(4), pp. 23–48. doi: 10.1257/jep.14.4.23
- Buchanan, D.A. (2009) *Organizational research methods*. Los Angeles: Sage.
- Christmann, A.-S. *et al.* (2024) 'The Twin Transformation Butterfly', *Business & Information Systems Engineering*, 66(4), pp. 489–505. doi: 10.1007/s12599-023-00847-2
- https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/construction/construction-transition-pathway_en (2024), 9 October (Accessed: 9 October 2024).
- Cummings, T.G. and Worley, C.G. (2015) *Organization development & change*. 10th edn. Stamford CT: Cengage Learning.
- Davies, R. and Harty, C. (2013) 'Implementing 'Site BIM': A case study of ICT innovation on a large hospital project', *Automation in Construction*, 30, pp. 15–24. doi: 10.1016/j.autcon.2012.11.024
- Davila Delgado, J.M. *et al.* (2019) 'Robotics and automated systems in construction: Understanding industry-specific challenges for adoption', *Journal of Building Engineering*, 26, p. 100868. doi: 10.1016/j.jobbe.2019.100868
- Denning, S. (2011) *The Leader's Guide to Storytelling: Mastering the Art and Discipline of Business Narrative*. San Francisco CA: Jossey-Bass.
- <https://www.dgnb.de/de/zertifizierung/das-wichtigste-zur-dgnb-zertifizierung/ueber-das-dgnb-system> (2024), 3 November (Accessed: 3 November 2024).
- DIAZ, P. (2016) 'Analysis of Benefits, Advantages and Challenges of Building Information Modelling in Construction Industry', *Journal of Advances in Civil Engineering*, 2(2), pp. 1–11. doi: 10.18831/djcivil.org/2016021001
- Ding, G.K.C. (2008) 'Sustainable construction-the role of environmental assessment tools', *Journal of Environmental Management*, 86(3), pp. 451–464. doi: 10.1016/j.jenvman.2006.12.025
- <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2018/844/oj> (2024), 9 October (Accessed: 9 October 2024).

-
- Dong, Y.H. and Ng, S.T. (2016) 'A modeling framework to evaluate sustainability of building construction based on LCSA', *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(4), pp. 555–568. doi: 10.1007/s11367-016-1044-6
- Dr. Kai-Stefan Schober, Dr. Philipp Hoff and Konstantin Sold (2016) *Digitization in the construction industry: A Comprehensive Guide to Reinventing Companies*. Munich, Germany.
- Dyllick, T. and Muff, K. (2016) 'Clarifying the Meaning of Sustainable Business', *Organization & Environment*, 29(2), pp. 156–174. doi: 10.1177/1086026615575176
- Eadie, R., Perera, S. and Heaney, G. (2011) 'Key process area mapping in the production of an e-capability maturity model for UK construction organisations', *Journal of Financial Management of Property and Construction*, 16(3), pp. 197–210. doi: 10.1108/13664381111179198
- Ekins, P. and Zenghelis, D. (2021) 'The costs and benefits of environmental sustainability', *Sustainability Science*, 16(3), pp. 949–965. doi: 10.1007/s11625-021-00910-5
- Elkhodr, M., Shahrestani, S. and Cheung, H. (2016) 'The Internet of Things : New Interoperability, Management and Security Challenges', *International Journal of Network Security & Its Applications*, 8(2), pp. 85–102. doi: 10.5121/ijnsa.2016.8206
- Ellen MacArthur Foundation (2012) *Towards the Circular Economy: Economic and business rationale for an accelerated transition*, S. 7-8.
- Fabbri, M., Groote, M. de and Rapf, O. (2016) *Building renovation passports: customised roadmaps towards deep renovation and better homes*. Brussels: Buildings Performance Institute Europe (BPIE). Available at: https://www.bpie.eu/wp-content/uploads/2017/01/Building-Passport-Report_2nd-edition.pdf.
- Farouk, A.M. et al. (2023) 'Factors, Challenges and Strategies of Trust in BIM-Based Construction Projects: A Case Study in Malaysia', *Infrastructures*, 8(1), p. 13. doi: 10.3390/infrastructures8010013
- Feist, W. (2016) *Aktiv für mehr Behaglichkeit: Das Passivhaus*. 9th edn. Darmstadt, Germany. Available at: <https://www.ig-passivhaus.de/upload/Flipbook.pdf>.
- Feroz, A.K., Zo, H. and Chiravuri, A. (2021) 'Digital Transformation and Environmental Sustainability: A Review and Research Agenda', *Sustainability*, 13(3) (20pp). doi: 10.3390/su13031530
- Freeman, R.E. (2010) *Strategic Management: A stakeholder approach*. 1984th edn. Cambridge: Cambridge Univ. Press.
- Fuerst, F. and McAllister, P. (2008) 'Green Noise or Green Value? Measuring the Price Effects of Environmental Certification in Commercial Buildings'. Available at: <http://ssrn.com/abstract=1140409>.
- Geissdoerfer, M. et al. (2017) 'The Circular Economy – A new sustainability paradigm?' *Journal of Cleaner Production*, 143, pp. 757–768. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.12.048

- Geissdoerfer, M., Vladimirova, D. and Evans, S. (2018) 'Sustainable business model innovation: A review', *Journal of Cleaner Production*, 198, pp. 401–416. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.06.240
- Georgiadou, M.C. (2019) 'An overview of benefits and challenges of building information modelling (BIM) adoption in UK residential projects', *Construction Innovation*, 19(3), pp. 298–320. doi: 10.1108/CI-04-2017-0030
- Getter, K.L. and Rowe, D.B. (2006) 'The Role of Extensive Green Roofs in Sustainable Development', *HortScience*, 41(5), pp. 1276–1285. doi: 10.21273/HORTSCI.41.5.1276
- Ghisellini, P., Cialani, C. and Ulgiati, S. (2016) 'A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems', *Journal of Cleaner Production*, 114, pp. 11–32. doi: 10.1016/j.jclepro.2015.09.007
- Ghobakhloo, M. *et al.* (2021) 'Industry 4.0 ten years on: A bibliometric and systematic review of concepts, sustainability value drivers, and success determinants', *Journal of Cleaner Production*, 302, p. 127052. doi: 10.1016/j.jclepro.2021.127052
- Gholami, R. *et al.* (2013) 'Senior managers' perception on green information systems (IS) adoption and environmental performance: Results from a field survey', *Information & Management*, 50(7), pp. 431–438. doi: 10.1016/j.im.2013.01.004
- Gilley, A., Gilley, J.W. and McMillan, H.S. (2009) 'Organizational change: Motivation, communication, and leadership effectiveness', *Performance Improvement Quarterly*, 21(4), pp. 75–94. doi: 10.1002/piq.20039
- Gledson, B. and Greenwood, D. (2016) 'Surveying the extent and use of 4D BIM in the UK', *Journal of Information Technology in Construction*, pp. 57–71.
- GlobalABC (2023) *2023 Global Status Report for Buildings and Construction*.
- Gou, Z. and Xie, X. (2017) 'Evolving green building: triple bottom line or regenerative design?' *Journal of Cleaner Production*, 153, pp. 600–607. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.02.077
- Grewal, D. *et al.* (2020) 'The future of technology and marketing: a multidisciplinary perspective', *Journal of the Academy of Marketing Science*, 48(1), pp. 1–8. doi: 10.1007/s11747-019-00711-4
- Gubbi, J. *et al.* (2013) 'Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions', *Future Generation Computer Systems*, 29(7), pp. 1645–1660. doi: 10.1016/j.future.2013.01.010
- H., Z., A., H. and M., M. (2015) 'Internet of Things (IoT): Definitions, Challenges and Recent Research Directions', *International Journal of Computer Applications*, 128(1), pp. 37–47. doi: 10.5120/ijca2015906430
- Häkkinen, T. and Belloni, K. (2011) 'Barriers and drivers for sustainable building', *Building Research & Information*, 39(3), pp. 239–255. doi: 10.1080/09613218.2011.561948
- https://www.eubim.eu/downloads/EU_BIM_Task_Group_Handbook_FINAL.PDF (2023), 18 December (Accessed: 9 October 2024).

-
- Hashim Mohammed, B. *et al.* (2022) 'Building Information Modeling and Internet of Things Integration in the Construction Industry: A Scoping Study', *Advances in Civil Engineering*, 2022(1) (21pp). doi: 10.1155/2022/7886497
- Herzog, A.V., Lipman, T.E. and Kammen, D.M. (2001) 'Renewable Energy Sources', *Encyclopedia of life support systems (EOLSS)*.
- Hopfensperger, G. and Finsterlin, C. (2023) 'Das Gebäudeenergiegesetz (GEG)', in Hopfensperger, G. and Finsterlin, C. (eds.) *Energiesparen für Immobilieneigentümer und Verwalter*. München: Haufe, pp. 123–139.
- Ionescu, C. *et al.* (2015) 'The historical evolution of the energy efficient buildings', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, pp. 243–253. doi: 10.1016/j.rser.2015.04.062
- Irrek, W. and Thomas, S. (2008) *Definition Energieeffizienz*. Available at: https://wupperinst.org/fa/redaktion/downloads/misc/energieeffizienz_definition.pdf.
- <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:19650:-1:ed-1:v1:en> (2024), 9 October (Accessed: 9 October 2024).
- Jensson, A. (2017) *Digitalization in the construction industry: Potential industry dynamic changes in the construction industry caused by increased usage of building information modeling*. CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY.
- Joost N. Kok *et al.* 'Artificial Intelligence : Definition, Trends, Techniques and Cases'.
- Khorasanizadeh, M., Bazargan, A. and McKay, G. (2018) 'An Introduction to Sustainable Materials Management', in Hussain, C.M. (ed.) *Handbook of Environmental Materials Management*. Cham: Springer International Publishing, pp. 1–39.
- Kineber, A.F. *et al.* (2023) 'Challenges to the Implementation of Building Information Modeling (BIM) for Sustainable Construction Projects', *Applied Sciences*, 13(6), p. 3426. doi: 10.3390/app13063426
- Knudsen, C. (op. 2020) *World cities report 2020: The value of sustainable urbanization*. (World cities report, 2020). Nairobi, Kenya: United Nations Human Settlements Programme (UN-Habitat). Available at: https://unhabitat.org/sites/default/files/2020/10/wcr_2020_report.pdf (Accessed: 9 October 2024).
- Kotter, J.P. (1996) *Leading change*. Boston Mass.: Harvard Business School Press.
- Kou, S.C. and Poon, C.S. (2012) 'Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate', *Construction and Building Materials*, 35, pp. 69–76. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.02.032
- Lambrechts, W. (2020) 'Ethical and Sustainable Sourcing: Towards Strategic and Holistic Sustainable Supply Chain Management', in Leal Filho, W. *et al.* (eds.) *Decent Work and Economic Growth*. (Encyclopedia of the UN Sustainable Development Goals). Cham: Springer International Publishing, pp. 1–13.

Laustsen, J. (2008) *Energy Efficiency Requirements in Building Codes, Energy Efficiency Policies for New Buildings*. Available at: <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-requirements-in-building-codes-policies-for-new-buildings>.

LeCun, Y., Bengio, Y. and Hinton, G. (2015) 'Deep learning', *Nature*, 521(7553), pp. 436–444. doi: 10.1038/nature14539

in Lee and Lee, K. (2015) 'The Internet of Things (IoT): Applications, investments, and challenges for enterprises', *Business Horizons*, 58(4), pp. 431–440. doi: 10.1016/j.bushor.2015.03.008

Lee, J., Kao, H.-A. and Yang, S. (2014) 'Service Innovation and Smart Analytics for Industry 4.0 and Big Data Environment', *Procedia CIRP*, 16, pp. 3–8. doi: 10.1016/j.procir.2014.02.001

<https://www.usgbc.org/leed> (2024), 9 October (Accessed: 9 October 2024).

Lewis, G. (2010) *Basics About Cloud Computing*. Pittsburgh, PA. Available at: SEI CMU Cloud Computing Basics.

Li, G. *et al.* (2021) 'A method for robot placement optimization based on two-dimensional manifold in joint space', *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 67, p. 102002. doi: 10.1016/j.rcim.2020.102002

Lovins, A.B. (1976) 'Energy Strategy: The Road Not Taken?' *Foreign Affairs*, 55(1), pp. 65–96.

Malmqvist, T. *et al.* (2011) 'Life cycle assessment in buildings: The ENSLIC simplified method and guidelines', *Energy*, 36(4), pp. 1900–1907. doi: 10.1016/j.energy.2010.03.026

Manuel Davila Delgado, J. and Oyedele, L. (2022) 'Robotics in construction: A critical review of the reinforcement learning and imitation learning paradigms', *Advanced Engineering Informatics*, 54, p. 101787. doi: 10.1016/j.aei.2022.101787

Marcon, É. *et al.* (2019) 'Barriers for the digitalization of servitization', *Procedia CIRP*, 83, pp. 254–259. doi: 10.1016/j.procir.2019.03.129

Marszal, A.J. *et al.* (2011) 'Zero Energy Building – A review of definitions and calculation methodologies', *Energy and Buildings*, 43(4), pp. 971–979. doi: 10.1016/j.enbuild.2010.12.022

Matoušková, D. (2022) 'Digitalization and Its Impact on Business', *Theory, Methodology, Practice*, 18(2), pp. 51–67. doi: 10.18096/TMP.2022.02.03

McKinsey & Company (2020) *The Next Normal in Construction: How Disruption is Reshaping the World's Largest Ecosystem*. Available at: <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/the-next-normal-in-construction-how-disruption-is-reshaping-the-worlds-largest-ecosystem>.

McKinsey Global Institute (2017) *Reinventing Construction: A Route to Higher Productivity*. Available at: <https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/business%20functions/operations/our%20insights/reinventing%20construction%20through%20a%20productivity%20revolution/mgi-reinventing-construction-a-route-to-higher-productivity-full-report.pdf>.

Meinhold, K. (2011) 'Der ökologische Fußabdruck: Ein ganzheitlicher Bewertungsansatz von Nachhaltigkeit', *Ernährung im Fokus*, 11(01), pp. 2–7.

Moreno-Rangel, A. (2021) 'Passivhaus', *Encyclopedia*, 1(1), pp. 20–29. doi: 10.3390/encyclopedia1010005

Musterbauordnung 2020.

Nof, S.Y. (2009) *Springer Handbook of Automation: S. 14-15*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

O'Dwyer, E. *et al.* (2019) 'Smart energy systems for sustainable smart cities: Current developments, trends and future directions', *Applied Energy*, 237, pp. 581–597.

doi: 10.1016/j.apenergy.2019.01.024

Oesterreich, T.D. and Teuteberg, F. (2016) 'Understanding the implications of digitisation and automation in the context of Industry 4.0: A triangulation approach and elements of a research agenda for the construction industry', *Computers in Industry*, 83, pp. 121–139. doi: 10.1016/j.com-pind.2016.09.006

Olander, S. and Landin, A. (2005) 'Evaluation of stakeholder influence in the implementation of construction projects', *International Journal of Project Management*, 23(4), pp. 321–328.

doi: 10.1016/j.ijproman.2005.02.002

Olanrewaju, O.I. *et al.* (2018) 'Global economic recession: causes and effects on nigeria building construction industry', *Journal of Surveying, Construction & Property*, 9(1), pp. 9–18.

doi: 10.22452/jscp.vol9no1.2

Oreg, S., Vakola, M. and Armenakis, A. (2011) 'Change Recipients' Reactions to Organizational Change', *The Journal of Applied Behavioral Science*, 47(4), pp. 461–524.

doi: 10.1177/0021886310396550

Pan, Y. and Zhang, L. (2021) 'Roles of artificial intelligence in construction engineering and management: A critical review and future trends', *Automation in Construction*, 122, p. 103517.

doi: 10.1016/j.autcon.2020.103517

Panchalingam, K., Rasheed, E.O. and Rotimi, J.O.B. (2024) 'Cost-Related Drivers and Barriers of Passivhaus: A Systematic Literature Review', *Sustainability*, 16(15), p. 6510.

doi: 10.3390/su16156510

Parida, V., Sjödin, D. and Reim, W. (2019) 'Reviewing Literature on Digitalization, Business Model Innovation, and Sustainable Industry: Past Achievements and Future Promises', *Sustainability*, 11(2), p. 391. doi: 10.3390/su11020391

Paris Agreement 2016, UNFCCC Paris Agreement.

Parviainen, P. *et al.* (2017) 'Tackling the digitalization challenge: how to benefit from digitalization in practice', *International Journal of Information Systems and Project Management*, 5(1), pp. 63–77.

doi: 10.12821/ijispm050104

Perera, C. *et al.* (2014) 'Context Aware Computing for The Internet of Things: A Survey', *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 16(1), pp. 414–454. doi: 10.1109/SURV.2013.042313.00197

- Pomponi, F. and Moncaster, A. (2017) 'Circular economy for the built environment: A research framework', *Journal of Cleaner Production*, 143, pp. 710–718. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.12.055
- Porter, M.e. and Kramer, M.R. (2011) 'Creating Shared Value: How to reinvent capitalism - and unleash a wave of innovation and growth', *Harvard Business Review*, 89(1/2), pp. 62–77.
- Prof. Dr. Karsten Körkemeyer *et al.* (2023) *Digitalisierung der Baubranche*. Kaiserslautern, Germany.
- Raineri, A.B. (2011) 'Change management practices: Impact on perceived change results', *Journal of Business Research*, 64(3), pp. 266–272. doi: 10.1016/j.jbusres.2009.11.011
- Richtlinie 2010/31/EU über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden 2010.*
- Rughi, T., Staccioli, J. and Virgillito, M.E. (2021) 'Climate change and labour-saving technologies: the twin transition via patent texts', *SSRN (45pp)*. doi: 10.2139/ssrn.4407851
- Russell, S.J. and Norvig, P. (2021) *Artificial intelligence: A modern approach*. (Pearson series in artificial intelligence). Hoboken: Pearson.
- Safari, K. and AzariJafari, H. (2021) 'Challenges and opportunities for integrating BIM and LCA: Methodological choices and framework development', *Sustainable Cities and Society*, 67, p. 102728. doi: 10.1016/j.scs.2021.102728
- Saidi, K.S., Bock, T. and Georgoulas, C. (2016) 'Robotics in Construction', in Siciliano, B. and Khatib, O. (eds.) *Springer Handbook of Robotics*. (Springer Handbooks). Cham: Springer International Publishing, pp. 1493–1520.
- Santos, M. and Brink, R. (2024) *What is the twin transition: and why is it key to sustainable growth?*, 9 October. Available at: <https://www.paconsulting.com/newsroom/what-is-the-twin-transition-and-why-is-it-key-to-sustainable-growth> (Accessed: 9 October 2024).
- Sihvonen, S. and Ritola, T. (2015) 'Conceptualizing ReX for Aggregating End-of-life Strategies in Product Development', *Procedia CIRP*, 29, pp. 639–644. doi: 10.1016/j.procir.2015.01.026
- Srinsoft Inc (2024) *BIM Clash Detection Services | Prefabricated Corridor | Building Risers | AEC Industry*, 16 October. Available at: <https://www.srinsofttech.com/bim-clash-detection.html> (Accessed: 10 November 2024).
- Stratmann, L. and Hoeborn, G. (2022) 'Twin-Transition: Digitalisierung und Nachhaltigkeit Hand in Hand', *UdZ (Unternehmer der Zukunft)*, 2022, pp. 14–19.
- Stufenplan Digitales Planen und Bauen 2020* (<https://www.bmvi.de>). Available at: https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Publikationen/DG/stufenplan-digitales-bauen.pdf?__blob=publicationFile.
- Succar, B. (2010) 'Building Information Modelling Maturity Matrix', in Underwood, J. and Isikdag, U. (eds.) *Handbook of research on building information modeling and construction informatics: Concepts and technologies*. (Advances in Civil and Industrial Engineering). Hershey PA: Information Science Reference, pp. 65–103.

-
- Succar, B. and Kassem, M. (2015) 'Macro-BIM adoption: Conceptual structures', *Automation in Construction*, 57, pp. 64–79. doi: 10.1016/j.autcon.2015.04.018
- Tänzler, D., Ivleva, D. and Bernstein, T. (2022) 'Twin Transition: Digital Transformation and Climate Policy in Development Cooperation'.
- Ujong, J.A., Mbadike, E.M. and Alaneme, G.U. (2022) 'Prediction of cost and duration of building construction using artificial neural network', *Asian Journal of Civil Engineering*, 23(7), pp. 1117–1139. doi: 10.1007/s42107-022-00474-4
- UNEP (2022) *Global status report for building and construction*. Nairobi, Kenya.
- United Nations (1998) *Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change*. New York.
- United Nations (2024) *Sustainable Development Goals*, 9 October. Available at: <https://www.un.org/en/academic-impact/page/sustainable-development-goals> (Accessed: 9 October 2024).
- van der Voet, J. (2014) 'The effectiveness and specificity of change management in a public organization: Transformational leadership and a bureaucratic organizational structure', *European Management Journal*, 32(3), pp. 373–382. doi: 10.1016/j.emj.2013.10.001
- Walker, D.H.T., Bourne, L. and Rowlinson, S. (2007) 'Stakeholders and the supply chain'. Available at: https://www.researchgate.net/publication/237227350_Stakeholders_and_the_supply_chain.
- Wang, H., Pan, Y. and Luo, X. (2019) 'Integration of BIM and GIS in sustainable built environment: A review and bibliometric analysis', *Automation in Construction*, 103, pp. 41–52. doi: 10.1016/j.autcon.2019.03.005
- Ward, J.S. and Barker, A. (2013) *Undefined By Data: A Survey of Big Data Definitions*. Available at: <http://arxiv.org/pdf/1309.5821v1>.
- WBCSD (2021) *New WBCSD report shows how the construction sector can benefit from digital technology* | WBCSD, 9 January. Available at: <https://www.wbcds.org/news/new-wbcds-report-shows-how-the-construction-sector-can-benefit-from-digital-technology/> (Accessed: 9 October 2024).
- Wessel, L. *et al.* (2021) 'Unpacking the Difference Between Digital Transformation and IT-Enabled Organizational Transformation', *Journal of the Association for Information Systems*, 22(1), pp. 102–129. doi: 10.17705/1jais.00655
- Woodhead, R., Stephenson, P. and Morrey, D. (2018) 'Digital construction: From point solutions to IoT ecosystem', *Automation in Construction*, 93, pp. 35–46. doi: 10.1016/j.autcon.2018.05.004
- World Economic Forum (2024) *What is the 'twin transition' - and how can it speed sustainable growth*, 11 October. Available at: <https://www.weforum.org/agenda/2022/10/twin-transition-playbook-3-phases-to-accelerate-sustainable-digitization/> (Accessed: 11 October 2024).

-
- World Economic Forum (2024) *4 ways to make the cement industry more sustainable*, 15 October. Available at: <https://www.weforum.org/agenda/2024/09/cement-production-sustainable-concrete-co2-emissions/> (Accessed: 15 October 2024).
- Yang, J. *et al.* (2009) 'Exploring critical success factors for stakeholder management in construction projects', *JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING AND MANAGEMENT*, 15(4), pp. 337–348. doi: 10.3846/1392-3730.2009.15.337-348
- Zabalza Bribián, I., Aranda Usón, A. and Scarpellini, S. (2009) 'Life cycle assessment in buildings: State-of-the-art and simplified LCA methodology as a complement for building certification', *Building and Environment*, 44(12), pp. 2510–2520. doi: 10.1016/j.buildenv.2009.05.001
- Zabihi, H., Mirsaedi, L. and Habib, F. (2012) 'Sustainability in Building and Construction: Revising Definitions and Concepts', *International Journal of Emerging Sciences*, 2(4), pp. 570–578. Available at: https://www.researchgate.net/profile/farah-habib-3/publication/236033739_sustainability_in_building_and_construction_revising_definitions_and_concepts/links/00b7d515eb40f25763000000/sustainability-in-building-and-construction-revising-definitions-and-concepts.pdf.
- Zhang, S. *et al.* (2013) 'Building Information Modeling (BIM) and Safety: Automatic Safety Checking of Construction Models and Schedules', *Automation in Construction*, 29, pp. 183–195. doi: 10.1016/j.autcon.2012.05.006
- Zhao, X., Hwang, B.-G. and Low, S.P. (2013) 'Developing Fuzzy Enterprise Risk Management Maturity Model for Construction Firms', *Journal of Construction Engineering and Management*, 139(9), pp. 1179–1189. doi: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000712
- Zhou, W., Whyte, J. and Sacks, R. (2012) 'Construction safety and digital design: A review', *Automation in Construction*, 22, pp. 102–111. doi: 10.1016/j.autcon.2011.07.005
- Zieliński, R. and Wójtowicz, M. 'Different BIM levels during the design and construction stages on the example of public utility facilities', in *Proceedings of the 15th Conference on Computational Technologies in Engineering*, p. 20075.
- Zuo, J. and Zhao, Z.-Y. (2014) 'Green building research—current status and future agenda: A review', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, pp. 271–281. doi: 10.1016/j.rser.2013.10.021

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche einzeln kenntlich gemacht. Es wurden keine anderen, als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel (inklusive elektronischer Medien und Online-Ressourcen) benutzt. Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht veröffentlicht. Ich bin mir bewusst, dass ein Verstoß gegen diese Versicherung nicht nur prüfungsrechtliche Folgen haben wird, sondern auch zu weitergehenden rechtlichen Konsequenzen führen kann.

Merseburg

12.11.2024